

# 한국 SCM 학회지

*Journal of the Korean Society of  
Supply Chain Management*

Volume 21 Number 1

2021 May



사단  
법인

한국SCM학회

# 한국 SCM 학회지

Journal of the Korean Society of Supply Chain Management

## 1. 공급사슬 리스크 대응이 공급사슬 회복탄력성과 공급사슬 성과에 미치는 영향

박찬권 · 서영복

This study analyzes the overall relationship structure between agility, robustness, and supply chain performance as supply chain risk response and supply chain resilience in response to possible risks in the supply chain. To confirm this, survey data were collected for domestic manufacturing companies, and finally 134 survey data were used for the study. The reliability and validity of the research items were confirmed through statistical processing of the questionnaire data, and the research hypotheses were tested using the path analysis method using the research items satisfying them. The test results of the research hypothesis can be summarized as follows. As a result of testing hypothesis H1, it was tested that supply risk response, operational risk response, and network risk response had a significant positive effect on agility. In addition, environmental risk response was tested to have a positive effect on agility at a conservative level ( $p < 0.1$  or less), and demand risk response had a positive effect on agility, but was not significant. As a result of testing hypothesis H2, it was tested that supply risk response, demand risk response, operational risk response, and network risk response had a significant positive effect on robustness. However, the environmental risk response had a positive effect on

robustness, but was not significant. As a test of hypothesis H3, agility was tested to have a significant positive effect on supply chain performance, and as a test of hypothesis H4, robustness was also tested to have a significant positive effect on supply chain performance. As a result of the testing of the research hypothesis, risks that may occur in the supply chain are classified into five types with reference to previous studies. Among these risks, activities that respond to the rest of the risks excluding environmental risk response are the resilience of the supply chain, which is agility and robustness. It has a significant positive effect in most cases, and suggests that agility and robustness as supply chain resilience can lead to improvement in supply chain performance.

## 23. 드론 운영 및 배터리 충전 스케줄링 모형

최병천 · 정지복

We consider a drone scheduling model with a constraint on battery charge amount. The schedule consists of three decisions as follows: which drone to allocate the jobs to, which sequence to deliver the allocated jobs of each drone on, and when and how much to charge the battery of each drone. We assume that the battery charge time has the linear relationship with the battery charge amount. We consider two cases with a single drone and multiple drones. Firstly, we show that a single-drone case is

strongly NP-hard even if the charge function is a constant. If the charge function is a linear function with zero Y-intercept, then we show that the single- and the multiple-drone cases are polynomially solvable and NP-hard, respectively. Finally, we prove the weak NP-hardness of the case with multiple drones and the linear charge function.

## 37. 공급자와 경로 붕괴를 고려한 공급망 네트워크설계모델: 혼합유전알고리즘 접근법

추률희크 아누다리 · 윤영수

In this paper, a supply chain network design (SCND) model considering supplier disruption and route disruption simultaneously is proposed. Since most of conventional studies have focused either on supplier disruption only or on route disruption only, the simultaneous consideration of supplier disruption and route disruption in the SCND model can reinforce its flexibility and efficiency. The SCND model is represented as a mathematical formulation and implemented using a hybrid genetic algorithm (HGA) approach, one of the meta-heuristic approaches. In numerical experiment, the performance of the HGA approach is compared with those of some conventional approaches using various-sized SCND models, and a sensitivity analysis considering i) the change of the number of main suppliers and ii) that of the number

of the backup routes at main suppliers is done. Experimental results show that the HGA approach outperforms the conventional competing approaches, and the flexibility and efficiency of the SCND model proposed in this paper is also proved. Finally, the significance of this paper is summarized and a future research direction is remarked in conclusion.

## 55. 델파이 기법을 이용한 무인기 자율기능 분류에 관한 연구

정병호 · 오지현 · 설현주 · 황성인

The United States defines the autonomous control level of unmanned aircraft in 10 stages depending on their operational needs or technical maturity, and the level of interoperability in terms of integrated operation of manned and unmanned aircraft in 5 stages. However, it was difficult to find a case in which the autonomous functions of unmanned aircraft were systematically organized from the perspective of perception, planning, and control, which are the mechanisms of activities of autonomous systems. This study aims to systematically classify the autonomous functions of unmanned aircraft according to the mechanisms of autonomous systems in conjunction with aircraft activities. We establish a corresponding layer for each activity by dividing the mechanisms of autonomous systems leading to perception-planning-control into large, medium and small categories in conjunction with the activities of unmanned aircraft. The methodology uses Delphi Method to reflect experts' knowledge in the development and operation of unmanned aircraft.

## 69. 흐름 공정의 가중치 조기 종료된 작업 개수와 지체 종료된 작업 개수의 최소화 문제

홍지현 · 윤석훈

In this paper, we consider a two-machine flow shop scheduling problem with different job due dates. The objective is to minimize the weighted number of early and tardy jobs. We present a mixed integer programming formulation for the problem and develop efficient cut constraints which are valid inequalities. Extensive experiments are conducted to show the effectiveness of the cut constraints. We propose an  $O(n^2)$  heuristic algorithm to solve the problem.

## 79. 구매 업무에서의 블록체인 기술 도입을 위한 개념적 프레임워크

김준석

Recently, new cutting-edge technologies such as Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence, Big Data Analysis and Blockchain Technology (BCT) have been rapidly introduced in various industries. Among them, the BCT is expected as one of the most useful technologies in the field of procurement. The characteristics of BCT are 1) Information distribution and synchronization, 2) P2P networks and consensus, 3) Smart contract and payment and 4) Data immutability. These characteristics of BCT could be well applied into each segment of procurement processes including finding potential suppliers, negotiation and contract management, order and fulfillment management and supplier management.

Even though the possibility of successful implementation of BCT into overall procurement processes could be expected very high, it has been rarely considered in the literature. In this study, a conceptual framework for applying BCT into procurement processes is proposed. Two real world cases of BCT implemented in procurement processes are also introduced.

# 한국 SCM 학회지

Journal of the Korean Society of Supply Chain Management

## 투고논문 작성 요령

### 1. 제출방법

투고자는 논문을 한글 또는 MS워드 작성하며, 글씨크기 11포인트, 2단 편집으로 작성하여 제출한다. 논문 심사 후 게재가 확정되면 저자 약력 및 사진이 포함된 최종본을 e-mail로 제출하여야 한다(논문저자 중 한 명 이상은 한국 SCM학회 연회비 납부회원이어야 투고할 수 있다).

### 2. 제출 철회

접수된 후 심사과정에 있는 논문의 철회를 저자가 원하는 경우, 저자는 서면으로 편집위원장에게 철회요청서를 제출하여야 한다.

### 3. 표지 및 본문의 내용

논문 표지에는 국문으로 논문 제목, 저자명, 소속을 기입하고 영문으로 다시 논문 제목, 저자명, 소속을 기입한 후 영문 요약, 키워드를 차례로 기입한다. 표지 각주에는 사사표기, 교신저자 정보(영문 주소, 전화번호, e-mail 주소)를 기입한다. 표지의 다음 쪽부터 본문, 참고문헌, 부록 순으로 작성한다. 원고 작성 시 본문과 그림(그래프) 등은 모두 흑백으로 작성한다(컬러 그림(그래프) 사용 자제).

### 4. 영문 작성

영문의 대문자는 고유명사나 문장의 첫 자 또는 고유명사의 약자 등에만 사용한다.

### 5. Abstract 및 키워드

영문으로 기입된 저자 소속 아래 150단어 이내의 영문 요약(Abstract)을 기입하고, 그 아래 키워드를 5개 내외로 정해 영문으로 기입한다.

### 6. 각주(footnote)

- 연구비의 지원을 받아 연구가 이루어진 논문을 알릴 경우  
- 교신저자의 연락처를 기재하는 경우  
상기 2개 사항을 제외하고, 각주는 사용하지 않는 것을 원칙으로 한다.

### 7. 저자 구분

논문의 저자 기재 시 제1저자, 제2저자 순으로 기재하며, 교신저자의 경우 “\*” 표시를 이름 옆에 표기한다.

### 8. 본문 제목 일련번호 표기방법

장, 절, 항은 아라비아 숫자로 1., 1.1., 1.1.1., 등으로 표기한다.

### 9. 그림과 표

그림과 표는 제목과 내용을 모두 영문으로 작성한다. 그림 제목은 “Fig.”로 표기한 후 일련번호를 매기고, 그림 아래 가운데 정렬한다. 표의 제목은 “Table”로 표기한 후 일련번호를 매기고, 표 위 왼쪽 정렬한다. 모든 그림과 표는 본문의 적당한 위치에 삽입하고, 삽입이 어려운 경우에는 논문의 맨 뒤에 첨부한다.

### 10. 수식 표현

수식은 필요한 경우 아래 예시와 같이 오른쪽에 (1), (2), (3), ... 등으로 일련번호를 부여해 표기한다.

예시)  $y = a_1x^2 + a_2x + a_3$  (1)

### 11. 참고문헌

참고문헌의 표제는 “REFERENCES”로 표기하고, 이하의 모든 내용은 영문으로 작성한다. 참고문헌은 [1], [2], ... 등의 일련번호를 붙여 알파벳순으로 나열한다. 인용된 문헌의 종류별 세부 작성 방식은 다음과 같다.

예시)

- 학술지

[1] Hayes, R. & Pisano, G. P.(2000). SCM Strategy in Korea. *SCM Journal*, 11(4), 25-41.

- 단행본

[2] Hayes, R.(2000). *SCM Strategy in Korea* (2nd ed). New Jersey: Prentice-Hall.

### 12. 논문 심사료 및 게재료

심사료는 5만원, 게재료는 10페이지(2단으로 편집된 최종 게재본 기준)를 기본으로 20만원이고, 10페이지 초과 시 페이지 당 2만원을 추가로 납부한다. 또한 각주 중 연구비 지원에 대한 사사표기가 있을 경우에는 10만원을 추가로 납부한다(연구비 지원 금액이 1천만 원을 넘지 않을 경우 사무국에 사사표기 금액 면제 요청 가능).

<송금처>

국민은행 031737-00-000482

(예금주: 사단법인 한국SCM학회 / 영수증 발급)

# 공급사슬 리스크 대응이 공급사슬 회복탄력성과 공급사슬성과에 미치는 영향

박찬권\*.서영복\*\*†

\*경북대학교 건설환경에너지융합기술원 . \*\*김천대학교 교양학과

## Effect of Supply Chain Risk Response on Supply Chain Resilience and Supply Chain Performance

Chan-Kwon Park\* · Yeong-Bok Seo\*\*†

\*Convergence Institute of Construction, Environmental, Energy Engineering, Kyungpook National University

\*\*Department of General Education, Gimcheon University

This study analyzes the overall relationship structure between agility, robustness, and supply chain performance as supply chain risk response and supply chain resilience in response to possible risks in the supply chain. To confirm this, survey data were collected for domestic manufacturing companies, and finally 134 survey data were used for the study. The reliability and validity of the research items were confirmed through statistical processing of the questionnaire data, and the research hypotheses were tested using the path analysis method using the research items satisfying them. The test results of the research hypothesis can be summarized as follows. As a result of testing hypothesis H1, it was tested that supply risk response, operational risk response, and network risk response had a significant positive effect on agility. In addition, environmental risk response was tested to have a positive effect on agility at a conservative level ( $p < 0.1$  or less), and demand risk response had a positive effect on agility, but was not significant. As a result of testing hypothesis H2, it was tested that supply risk response, demand risk response, operational risk response, and network risk response had a significant positive effect on robustness. However, the environmental risk response had a positive effect on robustness, but was not significant. As a test of hypothesis H3, agility was tested to have a significant positive effect on supply chain performance, and as a test of hypothesis H4, robustness was also tested to have a significant positive effect on supply chain performance. As a result of the testing of the research hypothesis, risks that may occur in the supply chain are classified into five types with reference to previous studies. Among these risks, activities that respond to the rest of the risks excluding environmental risk response are the resilience of the supply chain, which is agility and robustness. It has a significant positive effect in most cases, and suggests that agility and robustness as supply chain resilience can lead to improvement in supply chain performance.

**Keyword** : Supply Chain Risk Response, Supply Chain Resilience, Agility, Robustness, Supply Chain Performance

† Corresponding Author : Industry Academic Support Team, 214, Dahak-ro, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do Korea,  
Tel: +82-54-420-4457, E-mail: yeonbokseo@naver.com

Received: 2 February 2021, Accepted: 29 March 2021

## 1. 서론

공급사슬관리(Supply Chain Management : SCM)란 원재료 공급업체, 부품 제조 및 공급업체, 완제품 제조 및 공급업체, 도소매기업으로서 유통업체, 최종 고객으로 구성되는 공급사슬에서 협력 및 파트너십을 통해 원자재·부품·제품 흐름, 정보 흐름, 자금 흐름이 자연스럽게 원활하게 이루어지도록 함으로써 수익 극대화와 비용 최소화를 통해 공급사슬에서 발생하는 전체 가치를 극대화 혹은 최적화하는 것이 주요 목적이다(Chopra & Meindl, 2010).

그러나 공급사슬 구성원들의 경우 협력과 파트너십을 통해 공급사슬 전체 가치 극대화와 최적화보다는 자기 기업 중심의 수익 극대화와 비용 최소화의 방향으로 의사결정을 내릴 수 있으며, 이에 따른 수요와 공급 불일치 현상으로써 채찍효과(Bullwhip Effect) 현상이 나타날 수 있다. 또한 글로벌로 넓게 펼쳐져 있는 공급사슬 확장성(Scalability)은 필연적으로 공급사슬 복잡성(Complexity)과 상호의존성(Interdependence)을 가져올 수 있게 되었고, 자연스럽게 공급사슬 구조의 취약성(Vulnerability) 역시 증가하게 되었다(이충배·김현중, 2020; 한낙현·남택삼, 2009). 따라서 경영환경 불확실성에 의한 리스크(Risk) 발생 시 해당 기업뿐만 아니라 관련 공급사슬 구성원 전체가 어려움에 직면하는 경우가 발생할 수 있으므로, 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크에 대하여 적절한 대응이 이루어지지 않는 경우 해당 기업뿐만 아니라 전체 공급사슬에서 피해 혹은 손실이 발생할 수 있다(신창훈 외, 2006).

그러므로 공급사슬의 리스크는 언제, 어디서, 어떻게 발생할지, 해당 기업 및 공급사슬에 어떠한 영향을 미칠 것인지를 확인할 수 없는 불투명한 상황을 발생시킬 수 있다. 따라서 여러 가지 역할을 수행하는 다양한 기업체들로 복잡하게 구성된 공급사슬에서 공급사슬 리스크 관리(Supply Chain Risk Management : SCRM)를 하여야 하는 이유는 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크가 네트워크의 특성을 가진 공급사슬을 통하여 연쇄적으로 다른 공급사슬 구성기업들로 이전 혹은 전파될 수 있기 때문이다(이

충배·정석모, 2011b).

공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크에 대한 연구는 관리 및 운영자가 리스크 요인들을 지각하고 관리를 하자는 것에서 시작되었으며(Smeltzer & Siferd, 1998), 공급사슬 상의 거래기업에서 발생한 리스크가 해당 기업에 대한 피해 발생뿐만 아니라 공급사슬 붕괴 및 단절로 인하여 나의 기업에게 재무적 및 물류 네트워크상의 피해를 가져올 수 있으며, 마찬가지로 나의 기업에서 발생한 리스크가 거래기업들에게 전파됨으로써 동일한 피해를 유발할 수 있기 때문에 공급사슬 리스크에 대한 대응 및 관리의 필요성이나 중요성이 증가하여 왔다(김은수 외, 2012; 박명섭 외, 2014, 2015; 송병준 외, 2011; 신창훈 외, 2006; 오지수 외, 2010; 최정욱, 2005; 한낙현·남택삼, 2009; Cavinato, 2004; Chopra & Sodhi, 2004; Christopher & Lee, 2004; Giannakis & Louis, 2011; Harland et al., 2003; Kern et al., 2012; Khan et al., 2008; Manuj & Mentzer, 2008; Thun & Hoenig, 2011; Trkman & McCormack, 2009). 또한 급변하는 경영환경에서 개별 기업 및 공급사슬이 환경 변화에 적응하고 대응하며, 리스크 요인들을 회피하고자 하는 것은 성공적인 기업 활동을 위한 필수적인 요인이기 때문이다(남현정·김중훈, 2020).

이제까지 공급사슬 리스크와 관련한 국내 선행연구들을 살펴보면 다음과 같이 분류할 수 있다. 먼저 공급사슬 리스크 요인을 제시하고 리스크 관리의 중요성 및 필요성을 제시하는 연구(김은수 외, 2012; 박명섭 외, 2014, 2015; 송병준 외, 2011; 신창훈 외, 2006; 오지수 외, 2010; 최정욱, 2005; 한낙현·남택삼, 2009), 공급사슬 리스크 요인의 정의와 대응방안에 대한 연구(양재훈 외, 2011), 공급사슬 리스크 관리가 기업 및 공급사슬 성과에 미치는 영향에 대한 연구(김동정·이영재, 2014; 김미형, 2008; 김창봉, 2011; 김창봉·권승하, 2011, 2013; 박광호, 2013; 윤국 외, 2015; 이충배·김현중, 2020; 정석모 외, 2020), 공급사슬에서의 리스크 관리 전략과 관련한 연구(김동정·이영재, 2014; 이완형, 2020; 이충배·정석모, 2011a, b; 이충배 외, 2020), 공급사슬 리스크에 따르는 회복탄력성에 대한 연구(곽동욱, 2020; 권재득·이진춘, 2017; 남현정·김중훈, 2020; 남현정·이상현, 2017), 공급사슬 리스크

관리 프레임워크에 대한 연구(박대현·천세학, 2007; 송병준 외, 2011; 천세학·박대현, 2011), 공급사슬 리스크의 영향을 수리적 모델을 활용하여 설명하는 연구(정장화 외, 2003; 추봉성, 2018), 공급사슬 리스크 관리 성숙도에 대한 연구(김동현·김석태, 2017) 등의 연구가 있으며, 이 외에도 많은 선행연구들이 제시되었다.

그러나 이들 선행연구의 제한사항으로서 리스크에 대한 구분을 시행하고 리스크에 대한 대응의 중요성과 필요성을 제시하는 연구들과 공급사슬 회복탄력성에 대한 연구들이 일부 제시되었지만, 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크에 대한 대응 및 적응 활동이 리스크의 극복을 위해 필요로 하는 기업 및 공급사슬의 회복탄력성 역량에 미치는 영향에 대한 선행연구들은 제한적인 상황이다. 또한 공급사슬 회복탄력성 역량 확보와 보유가 기업경영 및 공급사슬성과의 제고로 나타날 수 있다는 것을 실증한 선행연구 역시 제한적인 상황이다. 그러므로 본 연구에서는 공급사슬 리스크에 대하여 선행연구들을 참조하여 분류를 시행하고, 이러한 리스크에 대한 적응 및 대응의 과정이나 활동의 결과가 리스크에 대하여 신속하게 대응 및 적응하고 이를 극복하기 위한 역량으로써 공급사슬 회복탄력성에 미치는 영향 및 공급사슬 회복탄력성이 공급사슬성과에 미치는 전체적인 관계구조를 분석하는 것이 주요한 목적이다. 따라서 본 연구를 통하여 아래의 사항을 제시할 수 있을 것이다.

첫째, 공급사슬 리스크 대응의 중요성이다. 공급사슬에서 수요 및 공급의 변동성 요인 및 환경 불확실성에 따라서 공급사슬 리스크는 자연스럽게 발생할 수밖에 없는 상황이다. 그러므로 이러한 리스크에 대하여 적응 및 대응하고자 하는 활동 역시 자연스럽게 나타날 수밖에 없어지는데, 리스크 발생에 따르는 대응활동이 공급사슬 회복탄력성으로 연결될 수 있고 나아가 기업 및 공급사슬성과의 제고로 연결될 수 있는가를 확인하는 것이다.

둘째, 개별기업의 관점에서 자신이 보유하고 있는 역량 및 경영 관련 활동이 궁극적으로 기업경영성과 및 공급사슬성과로 나타나지 않는다면, 해당 역량을 확보하거나 관련 활동을 수행할 필요성은 없어진다.

또한 해당 역량의 확보를 위한 인력 및 자금, 자원을 투자할 논리적 필요성 역시 없어지게 마련이다. 그러므로 공급사슬에서의 리스크 대응의 과정에서 또한 대응을 위한 역량으로써 공급사슬 회복탄력성 확보에 투자하는 것이 기업 및 공급사슬의 경영성과로 연결될 수 있다는 것을 확인하는 경우 개별기업 및 공급사슬 구성원들은 보다 적극적으로 이러한 역량을 확보하기 위하여 활동하게 될 것이고, 공급사슬의 리스크 관리 역량 역시 보다 강화될 수 있기 때문이다. 따라서 이러한 사항을 실증하는 것이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 공급사슬 리스크

리스크(Risk)란 예상하지 못한 사건의 발생으로 인해 피해 혹은 손실, 부정적인 현상이 발생할 가능성을 의미한다(최정욱, 2005; Finch, 2004; Harland et al., 2003). 또한 공급사슬 전체의 정보, 자금, 제품흐름의 단절 혹은 실패 현상을 발생시킬 수 있는 불확실성(Christine et al., 2003; Tang, 2006; Zsidisin et al., 2004), 공급사슬상에서 발생 가능한 단절 현상 즉 수요와 공급 불균형에 의하여 고객의 요구사항에 제대로 대응하지 못하는 무능력을 포함하는 것으로서(Peck, 2005; Zsidisin, 2003), 어떠한 성과 측정의 예측된 가치로부터 이탈로 인하여 해당 기업에 대한 부정적인 결과를 가져올 수 있는 모든 것을 의미한다(이충배·정석모, 2011a).

공급사슬에서의 리스크는 잠재적 손실을 발생시킬 수 있는 리스크의 발생가능성과 위험 발생으로 인한 손실의 크기 두 가지 요인을 포함한다. 그리고 공급사슬의 이탈 가능성을 의미하며, 공급사슬의 붕괴 또는 지연 등의 현상을 발생시키는 요인으로 작용한다(Kumar et al., 2010). 따라서 이를 예방하거나 최소화시키기 위한 활동을 필요로 한다.

공급사슬 리스크 관리(SCRM)란 공급사슬에서 발생하는 리스크로부터 손실을 최소화하기 위하여 체계적이고 단계적으로 공급사슬의 리스크를 관리함으로

써 불확실한 미래의 리스크 요인을 예측이 가능한 수준으로 만듦으로써 비용의 감소와 수익의 증가를 달성하고, 발생하거나 발생할 수 있는 리스크로부터 피해 및 손실을 최소화시키기 위한 체계를 의미한다(김창봉, 2011; 김창봉·권승하, 2013; 신창훈 외, 2006; Chopra & Sodhi, 2004; Hallikas et al., 2004; Manuj & Mentzer, 2008). 따라서 리스크를 전반적으로 감소시키는 관리 활동을 의미하는데(Tang & Tomlin, 2008), 부가적으로는 공급사슬 상의 지속가능성을 제고할 수 있어야 하고 기업의 경영구조 및 운영을 통합하여 고객에게 긍정적인 가치 제안을 제고시키고, 위험 요인에 대해서는 사전 예방과 함께 실제로 발생하는 경우에는 경감, 수용, 이전 등을 전략적으로 선택하기 위해서이다(Giannakis & Papadopoulos, 2016).

한국무역협회의 자료에 의하면 우리나라의 경우 경제활동에서 무역의존도는 2019년을 기준으로 63.7%(수출 33.0%, 수입 30.7%)로 조사되어, 다른 선진국들과 비교 시 높은 상황이다. 또한 국내총생산(Gross Domestic Product: GDP)에서 제조업이 차지하는 비중은 약 25%로써 제조업이 담당하고 있는 비중이 높은 상황이다. 따라서 우리나라의 제조업체들은 글로벌 및 공급사슬 전체에서 발생할 수 있는 리스크에 대하여 적절한 관리 역량을 확보하는 것이 중요한 경영활동의 일환이 되었다.

공급사슬과 관련한 리스크의 사례를 살펴보면 1995년 한신(阪神) 대지진, 2000년 엘버커키 필립스 반도체 공장 화재, 2001년 9·11테러, 2005년 허리케인 카트리나, 2009년 쌍용차 파업, 2011년 동일본 대지진, 2020년 1월부터 시작된 코로나-19(COVID-19) 등을 들 수 있으며, 특히 코로나 팬데믹으로 인한 인명 손실은 말할 것도 없지만 경제적 피해는 상상할 수 없을 만큼 큰 상황이다. 그러므로 개별기업 및 공급사슬 구성원 전체에 큰 피해를 주었거나 줄 수 있는 공급사슬 리스크에 대하여 적절하게 대응할 수 있는 방안과 역량을 필요로 한다.

## 2.2. 공급사슬 리스크 분류 및 대응

공급사슬에서 발생하는 리스크는 광범위한 범위와 여러 가지 요인에 의하여 나타날 수 있기 때문에 분

류의 기준 역시 선행연구자들에 따라서 다양하게 나타나고 있다(이충배·김현중, 2020). 크게는 리스크가 발생한 지점에 따르는 분류 및 공급사슬 기능과 프로세스에 따라서 분류하는 방식으로 구분할 수 있다.

우선 리스크 발생 지점에 따르는 분류 방식으로써 Chopra와 Sodhi(2004)는 내부적 리스크와 외부적 리스크로서 Supplier 관련 리스크와 Customer 관련 리스크로 분류하며, 조금 더 세부적으로는 Systems Risk, Forecast Risk, Intellectual Property Risk, Procurement Risk, Receivables Risk, Inventory Risk, Capacity Risk로 구분한다. 또한 Wang과 Yang(2007) 역시 내부적 관점과 외부적 관점에서 리스크 요인을 제시한다. 박명섭 외(2014)는 내부적, 외부적, 운영적 리스크로 구분하며, 박명섭 외(2015)는 전략, 전술, 운영 리스크와 환경리스크로 구분하고, 송병준 외(2011)는 내부적 리스크, 외부적 리스크, 공급사슬 상의 리스크의 관점으로 구분하여 제시한다.

공급사슬 기능과 프로세스에 따라서 분류하는 방식을 살펴보면 Harland 외(2003)는 전략적 리스크, 생산리스크, 공급리스크, 고객리스크, 자산감소 리스크, 경쟁적 리스크, 평판리스크, 재무적 리스크, 회계적 리스크, 규정리스크, 법적 리스크의 11개 항목으로 제시한다. Chen 외(2013), Gouda와 Saranga(2018), Tang(2006)은 운영적 리스크와 붕괴리스크로 구분하며, De Araujo Lima 외(2020)는 재무적 리스크, 헤저드 리스크, 운영적 리스크, 전략적 리스크로 구분한다. Manuj와 Mentzer(2008)는 공급리스크, 운영리스크, 수요리스크, 보안리스크, 경기리스크, 정책리스크, 경쟁리스크, 자원리스크의 8가지 리스크 요인을 제시한다. 신창훈 외(2006)는 공급사슬 리스크 요인을 총 38개로 제시하고 이를 다시 물류센터와 외주기업체의 관리자 면접조사를 통하여 운송, 재고, 예측, 정보, 시장, 공급자 리스크로 분류하여 제시하고 있다.

양재훈 외(2011)는 공급사슬 상의 리스크 유형을 공급상의 리스크, 수요에서의 리스크, 운영상의 리스크, 환경상의 리스크로 구분하며, 윤국 외(2015)는 공급리스크, 수요리스크, 운영리스크, 환경적 리스크, 파괴적 리스크로 제시한다. 정석모 외(2020)는 프로세스 리스크, 통제 리스크, 수요리스크, 공급리스크, 환경리스크의 5가지로 구분하며, 박대현·천세학(2007)은



공급리스크, 수요리스크, 네트워크 리스크, Global 리스크로 구분한다. 또한 이충배·정석모(2011b)는 공급리스크, 설계 및 운영 리스크, 수요리스크, 환경리스크로 제시하며, 이충배·정석모(2011a), 이충배·김현중(2020)은 공급리스크, 수요리스크, 운영리스크, 네트워크리스크, 환경리스크의 5가지 유형으로 구분한다. Christopher와 Peck(2004) 또한 공급리스크, 운영리스크, 수요리스크, 통제리스크, 환경적 리스크의 5가지로 구분한다.

본 연구에서는 이충배·정석모(2011a), 이충배·김현중(2020)의 연구에서 제시된 공급사슬 리스크 분류를 중심으로 하고 다른 선행연구에서 제시된 요인을 추가로 검토하여 리스크 분류를 시행하였으며, 분류된 리스크 요인들에 대하여 적절하게 대응하는 활동으로 하여 연구를 진행한다.

### 2.3. 공급사슬 회복탄력성

한낙현·남택삼(2009)에 의하면 공급사슬에서 리스크 대응에는 두 가지를 고려하여야 한다고 하였다. 하나는 공급사슬 리스크로부터 리스크를 방지하는 것으로서 공급사슬을 지키는 안전 확보(Security)를 의미하며, 다른 하나는 공급사슬이 직면한 리스크로부터 신속하게 회복(Resilience)하는 것이 요구된다고 하였다. 회복탄력성은 공급사슬에서 예상하지 못한 문제 혹은 부정적인 영향을 미칠 수 있는 문제가 발생한 경우 해당 문제에 대응하기 위한 역량을 의미하는 것으로서(Barroso et al., 2011; Ponomarov & Holcomb, 2009), 리스크가 발생한 이후에 리스크 발생 이전의 최초의 상태를 넘어서 보다 향상된 상태로 회복할 수 있는 역량을 의미한다.

Simch-Levi 외(2013)는 공급사슬 회복탄력성의 측정을 위하여 시간에 대한 개념(Time to Recover : TTR)을 제시하는데, 리스크에 대한 노출에서부터 회복되는 데 필요로 하는 시간을 측정하는 것이다. 간략하게 설명하면 리스크에 노출되는 경우 회복하는데 10일을 필요로 하는 기업 및 공급사슬과 30일을 필요로 하는 기업 및 공급사슬이 있을 경우 10일을 필요로 하는 기업 및 공급사슬의 회복탄력성이 우수하다고 판단하는 것이다.

Chopra와 Sodhi(2004)는 리스크의 대응을 위하여서는 용량의 제고, 추가적 공급업체 확보, 반응성 제고, 재고 보유량 증대, 유연성 제고, 통합 수요관리, 대응능력 제고를 제시한다. 또한 Khan(2008)은 민첩성(Agility)의 제고를 통하여 리스크 대응과 감소가 가능하며, Tang과 Tomlin(2008)은 유연성(Flexibility)을 활용하는 방안을 제시한다. 또한 Christopher와 Holweg(2011)는 글로벌 리스크의 대응을 위해 요구되는 것으로서 네트워크 재구성, 협력, 민첩성, 리스크를 관리할 수 있는 문화를 제시한다.

이러한 공급사슬 회복탄력성 구성요인으로 Ponomarov와 Holcomb(2009)는 사전 준비성, 효율적 대응, 회복을 제시하며, Valikangas(2010)는 회복탄력성을 위기가 발생하기 전 행동을 취하는 사전대비능력(Proactive Capacity)과 위기를 겪고 난 후의 반응능력(Reactive Capacity)로 구분하는데, 이러한 내용을 종합한 사항으로 Wieland와 Wallenburg(2012, 2013)는 리스크 대응을 위한 역량으로써 민첩성(대응적)과 강건성(선제적)으로 구분하여 공급사슬 회복탄력성을 제시한다. 남현정·김종훈(2020) 역시 공급사슬이 최초의 안정적 상황이 지속되거나 리스크 발생에서부터 새로운 안정적 상황이 달성되는 경우 탄력적일 수 있다고 하였는데, 변화에 대처하는 공급사슬의 역량으로써, 불안정한 상태를 벗어나기 위하여 환경과 상호작용하는 상태는 반응적(Reactive)이면서도 사전 예방적(Proactive)인 특성을 가져야 한다고 하였다.

따라서 본 연구에서도 공급사슬 회복탄력성을 리스크에 대하여 빠르게 반응하는 민첩성과 리스크에 대하여 견딜 수 있고, 일부 기능이 제한되더라도 본래의 역할을 수행할 수 있으며(Meepetchdee & Shah, 2007; Wallace & Choi, 2011), 리스크 발생 이전의 상태로 복귀하기 위한 내용(Asbjornslett, 2008)을 강건성의 개념으로 하여 연구를 진행한다.

### 2.4. 공급사슬성과

기업 및 공급사슬의 성과는 다양한 방식으로 측정될 수 있다. 특히 공급사슬에서 성과를 측정하는 대표적인 방법으로는 균형성과표(BSC : Balanced Scorecard)를 적용하는 방법과 SCOR(Supply Chain

Operation Reference)모델을 적용하는 방법으로 구분할 수 있지만 본 연구에서는 다른 선행연구들에서 제시된 기업 및 공급사슬성과 측정 항목을 검토하였다.

Bhagwat와 Sharma(2007)는 정량적 성과로서 기업의 재무적 성과, 시장 점유율, 수익성의 항목을 제시하며, 정성적 성과로는 고객만족 제고, 고객 서비스 품질, 주문 배송시간, 유연성 등의 항목을 제시한다. 또한 Azfar 외(2014)는 공급사슬성과를 재고수준, 품질, 시간, 고객만족의 운영적 성과와 비용, 환경비용, 현금화 사이클의 경제적 성과 및 비즈니스 낭비의 환경적 성과로 제시한다.

그리고 이충배·김현중(2020)은 공급사슬 리스크에 따르는 기업성과로서 국내 및 해외 판매량, 수익성을 재무적 성과로 제시하고 원활한 조달, 신뢰성, 유연성, 리드타임을 운영성과로 제시한다. 또한 남현정·김종훈(2020)은 공급사슬성과로서 공급사슬 전반의 리드타임 감소, 주문 충족 제고, 완제품 재고회전을 제고의 측정항목을 활용한다. 따라서 본 연구에서도 이들 선행연구들에서 제시된 측정항목들에 대하여 검토를 시행하였으며, 본 연구의 목적에 맞추어 공급사슬성과의 세부적인 측정항목을 선정하였다.

이제까지 본 연구에서 연구하고자 하는 연구항목별로 선행연구에서의 정의 및 세부적인 측정항목에 대한 내용을 살펴보았다. 그리고 이에 따르는 본 연구에서의 세부 측정항목 및 참조 선행연구들을 종합한 내용은 다음의 Table 1.과 같다.

### 3. 연구가설 및 연구모형

#### 3.1. 연구가설

본 연구는 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크를 분류하고 리스크 요인에 대하여 대응하는 공급사슬 리스크대응, 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성과 강건성, 공급사슬성과 간의 전체적인 관계구조에 대하여 실증하는 것이다. 이를 확인하기 위한 연구가설의 내용을 살펴보면 아래와 같다.

##### 3.1.1. 공급사슬 리스크 대응과 회복탄력성 간의 관계

남현정·김종훈(2020)은 공급사슬 리스크에 대한 관계학습으로서 정보 공유, 정보 배포, 해석 공유 같은 고차적인 요인들은 공급사슬 변동에 의하여 발생할 수 있는 부정적인 요인들에 대하여 대응할 수 있는 역량으로서 공급사슬 회복탄력성 요소인 민첩성과 강건성에 유의한 긍정적인 영향을 미친다고 하였다. 그리고 남현정·이상현(2017)은 공급사슬에서 위험관리 구조와 문화는 공급사슬 강건성에 긍정적이고 유의한 영향을 미친다고 하였다. 또한 이충배·김현중(2020)에 의하면 공급사슬 리스크는 소극적 및 적극적 전략에 대부분 유의한 긍정적인 영향을 미친다고 하였다.

Nooraie 외(2019), Shekarian 외(2020)는 공급사슬에서 리스크에 노출된 경우 즉 수요 및 공급 리스크에 대응하는 것은 민첩성과 유연성 역량 같은 탄력성의 개선을 통하여 리스크를 개선할 수 있다고 하였다. 또한 Christopher와 Peck(2004)은 공급사슬 리엔지니어링, 공급사슬 협력, 공급사슬 위험관리 문화 형성은 회복탄력성 제고를 위한 선행요인으로 작용한다는 것을 제시하였다.

따라서 공급사슬에서 발생할 수 있거나 발생하는 리스크에 대하여 대응하는 활동은 리스크에 대한 신속한 대응 역량으로서 민첩성과 리스크에 대하여 버티고, 리스크가 발생하기 이전의 상태로 복귀할 수 있는 강건성 역량 즉, 공급사슬 회복탄력성에 어떠한 형태로든 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있으므로 아래의 연구가설을 검정하고자 하였다.

**가설 H1 : 리스크대응은 민첩성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.**

가설 H1-1 : 공급리스크대응은 민첩성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

가설 H1-2 : 수요리스크대응은 민첩성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

가설 H1-3 : 운영리스크대응은 민첩성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

가설 H1-4 : 네트워크 리스크대응은 민첩성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

가설 H1-5 : 환경리스크대응은 민첩성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

## 공급사슬 리스크 대응이 공급사슬 회복탄력성과 공급사슬성장에 미치는 영향

Table 1. Detailed Measurement Items and Reference Precedents for Each Research Item

Item	Number	Detailed Measurement	Reference
Supply Risk Response	1	Response to supply instability due to dependence on minority suppliers	Chen et al.(2013)
	2	Response to rising raw material prices and costs	Christopher & Peck(2004)
	3	Response to lack of ability to respond to changes in supplier order	Christopher & Sodhi(2004)
	4	Responding to supplier lead time uncertainty	De Araujo Lima et al.(2020)
	5	Response to deterioration in supplier financial soundness	Faisal(2009)
Demand Risk Response	1	Response to the diversity and volatility of demand	Gauda & Saranga(2018)
	2	Difficulty in accurately predicting demand	Harland et al.(2003)
	3	Response to short product life cycle	Jung et al.(2020)
	4	Response to market price decline	Lee & Jung(2011b)
	5	Response to competition in the market	Lee & Jung(2011a)
Operational Risk Response	1	(Safety) inventory increase response	Lee & Kim(2020)
	2	Inadequate internal process response	Manuj & Mentzer(2008)
	3	Product delivery delay response	Park & Chun(2011)
	4	Response to lack of flexibility (production quantity, product mixing, delivery time)	Park et al.(2014, 2015)
	5	Respond to limited resources and loss of production plan failure	Shin et al.(2006)
Network Risk Response	1	Respond to the lack of trust (opportunism) with business partners	Song et al.(2011)
	2	Response to lack of timely information sharing with business partners	Spekman & Davis(2004)
	3	Responding to excess or shortage of inventory due to prediction failure	Tang(2006)
	4	Response to lack of cooperation (competitive thinking) with business partners	Wang & Yang(2007)
	4	Response to lack of cooperation (competitive thinking) with business partners	Yang et al.(2011)
Environmental Risk Response	5	Responding to change and disconnection of partnerships with business partners	Yoon et al.(2015)
	1	Response to exchange rate fluctuations and increase in transportation costs	
	2	Response to changes in customer and market taste and technology	
	3	Responding to competitors' unexpected behavior	
	4	Response to logistics infrastructure risks (transportation bonds, IT failure, etc.)	
Agility	5	Response to changes in laws, policies and regulations in overseas markets	
	1	Adjust responsiveness to changing customer needs	Barroso et al.(2011)
	2	Changes in production items due to changes in customer (market)	Chpora & Sodhi(2004)
	3	Changes in production quantity due to changes in customer (market)	Christopher & Holweg(2011)
	4	Speed up transaction-related decisions	Khan (2008)
Robustness	5	Enhancing the ability to quickly accommodate change	Meepetchdee & Shah(2007)
	1	Provides enough time to respond to external shocks	Nam & Kim(2020)
	2	Maintains a stable situation even with external shocks	Ponomarov & Holcomb(2009)
	3	Preparation and implementation of various scenarios for risk	Simch-Levi et al.(2013)
	4	Efforts to return to the situation before the risk occurred	Tang & Tomlin(2008)
Supply Chain Performance	5	Performing a role despite impairment of some functions	Wieland & Wallenburg(2012)
	1	Improve overall financial performance	Azfar et al.(2014)
	2	Reduced lead time from order to supply	Bhagwat & Sharma(2007)
	3	Increase overall productivity	Lee & Kim(2020)
	4	Increase order fulfillment rate	Nam & Kim(2020)
	5	Increase inventory turnover	

- 가설 H2-1 : 공급리스크대응은 강건성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.
- 가설 H2-2 : 수요리스크대응은 강건성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.
- 가설 H2-3 : 운영리스크대응은 강건성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.
- 가설 H2-4 : 네트워크 리스크대응은 강건성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.
- 가설 H2-5 : 환경리스크대응은 강건성에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

### 3.1.2. 공급사슬 회복탄력성과 기업경영성과 간의 관계

남현정·김종훈(2020)은 공급사슬 회복탄력성 요소들 중 민첩성은 기업경영성과에 긍정적이고 유의한 영향을 미치지만, 강건성은 기업경영성과에 긍정적인 영향을 미치지만 유의하지는 않다고 하였다. 김창봉·권승하(2013)는 공급사슬 탄력성으로서 원재료 및 부품의 안전재고 유지, 다수 창고 및 공급자 확보와 같은 활동은 위험 발생 빈도와 영향 최소화와 위험관리 프로세스로써 위험관리 성과와 적기 및 정시 납품 비율 증가와 같은 사업성과 제고에 유의한 긍정적인 영향을 미친다는 결과를 제시한다.

Shekarian 외(2020)는 민첩성 및 유연성 역량에 대한 투자는 기업의 이윤을 제고시키는 데 있어서 최고의 전략이라는 내용을 제시하며, Ponomarov와 Holcomb(2009), Wieland와 Wallenburg(2012)에 의하면 공급사슬 회복탄력성은 고객 가치와 사업의 성과를 제고시킨다고 하였다.

따라서 공급사슬 구성원들이 확보하고 있는 공급사슬 회복탄력성 역량으로서 민첩성 및 강건성의 수준이 높을 경우 공급사슬 리스크에 대한 대응 역량이 높아지게 되므로, 궁극적으로 공급사슬성과 역시 제고될 수 있을 것으로 예측하였으며 아래의 가설을 검정하고자 하였다.

가설 H3 : 민첩성은 공급사슬성과에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

가설 H4 : 강건성은 공급사슬성과에 긍정적인 영향을 미칠 것이다.

## 3.2. 연구모형

본 연구에서 검정하고자 하는 연구가설에 대하여서는 앞서 모두 제시하였으며, 연구가설의 내용을 종합한 연구모형은 아래의 Fig 1.과 같다.

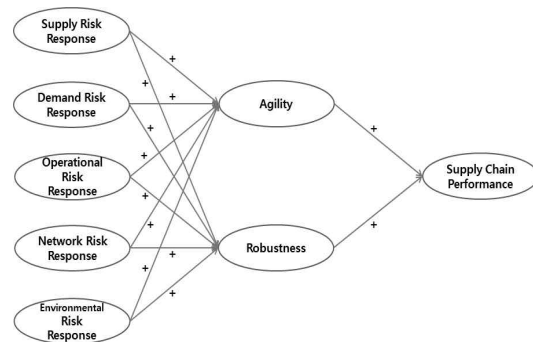


Fig. 1. Research Model

## 4. 실증분석

### 4.1. 표본설계 및 연구방법론

본 연구의 목표를 달성하기 위한 조사의 대상은 우리나라의 제조업체를 대상으로 한다. 앞서 Table 1.에서 제시한 내용을 중심으로 Likert 7점 척도로 설문문항을 구성하고 조사대상자의 인구통계학적 특성 및 조사대상 기업체의 일반 현황을 포함하는 설문지를 작성하였다. 설문조사는 기업체별 1부를 조사하는 것을 원칙으로 하였다. 그러나 사업부문이 독립적으로 운영이 이루어지고 의사결정을 시행하는 경우에는 독립적인 기업으로 판단하여 사업부별로 설문조사를 시행하였다.

또한 최근의 기업연감을 활용하여 되도록 소기업으로 분류되는 기업으로서 매출액 기준 50억 원 미만으로 나타나는 기업체들의 경우 본 연구에서 조사하고자 하는 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성과 강건성에 대한 이해가 비교적 제한적일 것으로 판단하여 조사 대상에서 제외하고자 하였으며, 또한 서비스 기업으로 분류 및 판단되는 기업체들 역시 본 연

구의 조사 대상에서 제외하였다.

설문조사의 기간은 2020년 3월부터 10월까지이며, 총 1,000부의 설문지가 배포되었다. 우편조사 방식을 기본으로 하였으며, 일부 e-mail을 통하여서도 조사를 시행하였다. 또한 조사대상 기업체들 중 연구자들의 직접적인 방문을 허용한 기업체들의 경우 연구자들이 직접 방문하여 조사를 시행하였으며, 공급사슬 리스크에 대한 대응과 관련하여 해당 기업체의 리스크 대응 프로세스와 사례에 대한 사항을 청취하기도 하였다. 총 167부의 설문지가 수집되었으며, 이중 설문 응답의 내용이 성실하지 못하다고 판단되는 설문지 33부를 제거하였다. 최종적으로 연구 및 통계처리에 활용된 설문지는 134부이다. 연구에 활용된 설문조사 대상자의 인구통계학적 특성 및 기업체의 일반 현황은 Table 2.와 같다.

세부적인 내용을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 직위는 과차장급 이상이 100명으로써 74.6%이다. 근속년수에서는 6년 이상이 95명으로써 70.9%이다. 따라서 해당 기업체의 경영 활동 상황을 비교적 정확하게 파악하고 있는 직급과 근속년수를 가진 응답자의 비율이 높다. 담당 직무는 마케팅이 96명으로써 71.6%, 구매 및 조달이 17명으로 12.7%이다. 따라서 거래기업들과 거래 관련 업무를 수행하는 직원들의 응답비중이 높은 상황이다.

매출액은 1000억 원 이하가 99개 업체로서 70.9%이며, 종업원 수는 300명 이하가 100개 업체로써 74.6%이다. 따라서 중소 및 중견기업으로 분류할 수 있는 기업체들의 응답비중이 비교적 높은 상황이다. 업종별로는 전기 및 전자가 31개 업체 23.1%이며, 자동차 관련 업체가 28개사 20.9%이고, 기계 및 금속 관련 업체 역시 35개 업체로써 26.1%이다. 따라서 이들 업종에서의 응답비중이 70.1%로써 높은 상황이다. 공급사슬상의 위치로는 2차 부품 공급업체가 31개 업체로써 23.1%, 1차 부품공급업체가 85개 업체로써 63.4%이며, 완제품 제조업체는 18개 업체 13.4%이다. 따라서 부품 공급업체에서의 응답이 86.5%로써 높은 비율을 차지한다.

Table 2. Characteristics of Surveyed Companies

Item	Division	Frequency	%
Rank	Executive over	21	15.7
	Team Leader	30	22.4
	Deputy Manager	49	36.6
	Proxy below	34	25.4
Years of Service	3 below	20	14.9
	4 ~ 5	19	14.2
	6 ~ 10	53	39.6
	10 over	42	31.3
Responsible Job	Marketing	96	71.6
	Sourcing	17	12.7
	R & D	5	3.7
	Distribution	6	4.5
	Production	9	6.7
	Etc	1	0.7
Sales Unit: KRW 100million	50 ~ 100	39	29.1
	101 ~ 300	23	17.2
	301 ~ 500	15	11.2
	501 ~ 1000	22	16.4
	1001 ~ 5000	16	11.9
	5001 ~ 10000	3	2.2
	10000 over	14	10.4
	Etc	2	1.5
Employee Unit: Person	50 below	41	30.6
	51 ~ 100	24	17.9
	101 ~ 200	20	14.9
	201 ~ 300	15	11.2
	301 ~ 500	2	1.5
	501 ~ 1000	9	6.7
	1000 over	19	14.2
	Etc	4	3.0
Sectors	Electricity/Electronics	31	23.1
	Car	28	20.9
	Construction	1	0.7
	Machine/Metal	35	26.1
	Petroleum/Chemical	2	1.5
	Plastic	10	7.5
	Communication	4	3.0
	Household Good	10	7.5
	Medicine	7	5.2
	Furniture/Office	2	1.5
	Paper/Pulp	3	2.2
	Etc	1	0.7
Supply Chain Location	Second Supplier	31	23.1
	Primary Supplier	85	63.4
	Product Manufac	18	13.4

본 연구의 연구방법론을 제시하면 먼저 연구항목들에 대한 요인분석을 시행한다. 본 연구의 설문조사 항목은 앞서 제시한 것처럼 선행연구들에서 사용되어 검증이 완료된 것이지만, 선행연구들과는 다른 조사 대상자들이고 특히 공급사슬 리스크 요인을 5가지의 요인으로 구분하여 연구를 진행함으로써 연구항목별 신뢰성과 타당성을 엄격하게 적용할 필요성이 있다고 판단하였다. 연구항목별 신뢰성과 타당성 분석은 1차적으로 SPSS 23을 활용하여 탐색적 요인분석을 시행하여 요인분석의 가능성을 파악하였으며, 이를 충족하는 연구항목들을 활용하여 2차적으로 Smart PLS 2.0을 활용하여 확인적 요인분석을 시행한다. 또한 이를 충족하는 연구항목들을 이용하여 연구가설의 검정은 구조방정식 모형(Structural Equation Modeling)분석으로써 경로분석 방식으로 연구가설을 검증한다.

## 4.2. 신뢰성 및 타당성 분석

### 4.2.1. 탐색적 요인분석 및 결과

연구항목별 탐색적 요인분석의 시행에 앞서 상관계수 분석을 시행하였다. 상관계수의 값이  $\pm 0.3$  이상으로 나타나지 않는 경우 해당 자료는 요인분석에 적합하지 않기 때문이다(이학식·임지훈, 2019). 상관계수의 검정은 SPSS 23을 활용하였으며, 상관계수의 검정 결과 가장 낮은 상관계수 값을 보이는 연구항목들은 공급리스크대응과 환경리스크대응 간의 관계로서 상관계수는 0.004( $p=0.962$ )로 나타나지만 다른 연구항목들에서는 대부분 상관계수가  $+0.3$  이상으로 나타나므로 탐색적 요인분석 검증에 적합하다고 판단하였다. 탐색적 요인분석 역시 SPSS 23을 활용하였다. 탐색적 요인분석 검증은 연구항목들 사이의 독립성을 가정한 Varimax 직각회전 방식을 활용하여 검정을 시행하였다. 탐색적 요인분석의 결과는 다음의 Table 3.과 같다.

탐색적 요인분석의 결과를 살펴보면 KMO와 Bartlett의 검정으로서 표본 적절성의 Kaiser-Meyer-Olkin 측도값은 0.842, Bartlett의 구형성 검정의 근사 카이제곱은 5591.356, 자유도(df)는 741, 유의확률( $p$ -val)은 0.000으로 검정되었다. 또한

요인 적재량의 최솟값은 민첩성 2번 항목(고객(시장)변동에 따른 생산 품목 변동)으로서 0.545로 나타난다. 그러나 환경리스크대응 5번 항목(해외시장에서의 법률·정책·규제 변화 대응)은 요인 적재량의 기준값인 0.5 이상으로 나타나지 않음으로 인하여 연구 활용에서 삭제하였다. 최종적으로 누적 설명력의 기준값은 60% 이상으로 나타나야 하는데, 다음의 Table 3.에서 제시한 것처럼 79.323%로 나타나므로 기준값 이상으로 검정되었다. 탐색적 요인분석의 결과 본 연구의 연구항목들이 8개로 구분될 수 있음을 확인하였다.

### 4.2.2. 확인적 요인분석 및 결과

앞서 제시된 탐색적 요인분석의 결과를 바탕으로 하여 확인적 요인분석을 시행하였다. 확인적 요인분석은 Smart PLS 2.0을 활용하여 분석을 시행하였다. 확인적 요인분석으로는 집중타당성 및 내적 일관성 신뢰도를 검증하였다. 집중타당성의 검증에는 Outer Loading값과 평균분산추출(Average Variance Extract : AVE)값을 활용한다. 여기서 Outer Loading값은 0.7 이상으로, 평균분산추출(AVE)값은 0.5 이상으로 나타나야 한다. 또한 내적 일관성 신뢰도의 검증에서는 Cronbach's  $\alpha$  값과 복합신뢰성(Composite Reliability : C. R.)값을 활용한다. Cronbach's  $\alpha$  값은 0.7 이상으로 나타나야 하며, C. R.값은 0과 1 사이의 값을 가지며 높을수록 높은 신뢰도를 의미한다(Hair et al., 2014). 확인적 요인분석의 세부적인 내용은 다음의 Table 4.와 같다.

공급사슬 리스크 대응이 공급사슬 회복탄력성과 공급사슬성공에 미치는 영향

Table 3. Exploratory Factor Analysis Results

Item	Number	항 목							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Supply Risk Response	1	<b>.832</b>	.142	.167	.142	.097	.084	.190	.049
	2	<b>.809</b>	.197	.234	.174	.109	.049	.116	-.018
	3	<b>.828</b>	.043	.172	.253	.079	.145	.175	.106
	4	<b>.807</b>	.092	.275	.242	.009	.183	.103	-.036
	5	<b>.730</b>	.034	.321	.269	-.030	.252	.124	-.010
Demand Risk Response	1	.282	.049	-.107	.133	-.038	.275	<b>.685</b>	-.026
	2	-.010	.394	.137	.318	.130	.170	<b>.562</b>	-.281
	3	.130	.046	.183	.162	.049	.168	<b>.884</b>	-.069
	4	.162	.161	.215	.206	.052	.186	<b>.841</b>	-.106
	5	.244	.279	.321	.255	.032	.126	<b>.688</b>	-.087
Operational Risk Response	1	.316	.220	<b>.810</b>	.133	-.020	.174	.101	-.014
	2	.164	.199	<b>.833</b>	.198	-.041	.273	.032	-.072
	3	.182	.220	<b>.695</b>	.295	-.186	.173	.229	.044
	4	.272	.246	<b>.745</b>	.257	-.071	.139	.195	.017
	5	.298	.126	<b>.759</b>	.229	-.012	.112	.110	-.035
Network Risk Response	1	.216	.105	-.107	-.041	<b>.721</b>	.021	.123	-.095
	2	-.082	-.066	.016	.091	<b>.768</b>	.012	-.003	.093
	3	-.022	-.159	.013	-.139	<b>.884</b>	-.072	.013	.035
	4	.075	-.047	-.118	-.171	<b>.893</b>	-.084	-.016	.024
	5	.056	-.152	-.020	-.159	<b>.881</b>	-.110	-.010	.022
Environmental Risk Response	1	.126	-.020	.094	-.182	.024	-.241	.095	<b>.776</b>
	2	-.004	.028	.061	.020	-.031	-.098	.077	<b>.899</b>
	3	.011	.101	-.089	.043	.091	-.038	-.275	<b>.824</b>
	4	-.057	.083	-.145	.143	.027	.026	-.244	<b>.792</b>
	5								
Agility	1	.129	.187	.241	.138	-.155	<b>.697</b>	.228	-.040
	2	.346	.059	.400	.210	-.141	<b>.545</b>	.208	-.172
	3	.217	.066	.120	.143	.017	<b>.851</b>	.120	-.114
	4	.042	.119	.149	.240	-.037	<b>.797</b>	.226	-.053
	5	.123	.051	.142	.121	-.061	<b>.918</b>	.112	-.119
Robustness	1	.283	.067	.283	<b>.716</b>	-.010	.161	.196	.084
	2	.242	.039	.176	<b>.791</b>	-.155	.168	.152	.054
	3	.319	.174	.212	<b>.708</b>	.004	.268	.190	-.056
	4	.177	.100	.232	<b>.842</b>	-.178	.146	.123	-.039
	5	.201	.154	.181	<b>.820</b>	-.190	.145	.239	.004
Supply Chain Performance	1	.162	<b>.682</b>	.250	.114	.077	.026	.101	.006
	2	.178	<b>.825</b>	.106	-.008	-.074	.145	.091	-.021
	3	-.028	<b>.828</b>	.089	.162	-.093	.111	.068	.157
	4	.034	<b>.886</b>	.118	.061	-.214	.008	.070	.050
	5	.117	<b>.911</b>	.171	.063	-.065	.088	.124	.027
eigen value		4.389	4.208	4.176	4.123	3.782	3.769	3.519	2.968
% variance		11.254	10.790	10.712	10.571	9.699	9.663	9.023	7.611
accumulate %		11.254	22.045	32.756	43.328	53.026	62.689	71.712	<b>79.323</b>

Table 4. Result of Confirmatory Factor Analysis

Item	Number	Outer Loading	AVE	Cronbach's $\alpha$	C. R.	R <sup>2</sup>
Supply Risk Response	1	0.867	0.802	0.939	0.953	-
	2	0.856				
	3	0.911				
	4	0.934				
	5	0.908				
Demand Risk Response	1	0.970	0.884	0.935	0.958	-
	2	0.934				
	3	-				
	4	-				
	5	0.916				
Operational Risk Response	1	0.923	0.806	0.940	0.954	-
	2	0.927				
	3	0.879				
	4	0.908				
	5	0.850				
Network Risk Response	1	0.707	0.683	0.884	0.912	-
	2	0.741				
	3	0.927				
	4	0.950				
	5	0.935				
Environmental Risk Response	1	0.813	0.683	0.848	0.896	-
	2	0.849				
	3	0.860				
	4	0.781				
	5	-				
Agility	1	0.825	0.723	0.904	0.929	0.475
	2	0.819				
	3	0.859				
	4	0.830				
	5	0.913				
Robustness	1	0.866	0.800	0.937	0.952	0.536
	2	0.875				
	3	0.880				
	4	0.906				
	5	0.942				
Supply Chain Performance	1	0.856	0.810	0.921	0.945	0.200
	2	0.872				
	3	0.930				
	4	0.939				
	5	-				



집중타당성의 분석 결과로서 Outer Loading값의 최솟값은 네트워크 리스크대응 1번 항목(거래기업들과 신뢰부족(기회주의)정도 대응)으로서 0.707로 나타나므로 기준값을 충족한다. 그러나 수요리스크대응 3번 항목(짧은 제품수명주기 대응)과 4번 항목(시장가격 하락 대응), 공급사슬성과 5번 항목(재고 회전을 제고)은 기준치를 충족하지 못하므로 연구 활용에서 제거하였다. AVE의 최솟값은 네트워크 리스크대응과 환경리스크대응으로서 0.683으로 나타나므로 기준값을 충족한다. 따라서 집중타당성에서 요구되는 기준치를 모두 충족한다. Cronbach's  $\alpha$  값의 최솟값은 환경리스크대응으로서 0.848로 나타나므로 기준치를 충족하며, C. R. 값의 최솟값 역시 환경리스크대응으로서 0.896으로 나타나므로 내적 일관성 신뢰도에서 요구하는 기준값을 모두 충족한다. 따라서 확인적 요인 분석의 기준치를 모두 충족한다.

구조방정식 모형의 적합성은 종속변수들의  $R^2$ 값을 활용하여 판단하는데,  $R^2$ 값이 0.1(10%) 이상으로 나타나는 경우 예측타당성이 존재한다고 판단한다(Falk & Miller, 1992). 또한 이와는 조금 다른 기준으로 내생(종속)변수를 얼마나 잘 예측할 수 있는가에 대한 분석의 기준으로  $R^2$ 값을 활용하는데,  $R^2$ 값은 0.19 이상으로 나타나면 연구모형의 적합성이 존재하며, 0.67 이상으로 나타나면 강한 설명력을 가지고 있다고 판단한다(Henseler et al., 2009).  $R^2$ 값의 최솟값은 다음의 Table 4.에서 제시한 것처럼 공급사슬성과로써

0.200으로 나타나므로 두 가지 관점에서 요구하는 기준을 모두 충족한다.

#### 4.2.3. 판별 타당성 분석 및 결과

판별 타당성의 검정은 Fornell과 Larcker(1981)의 방식을 적용하여 검정 하였다. 판별타당성의 검정은 개별 연구항목들의 AVE의 제곱근 값을 활용하여 분석하였다. 세부적인 내용은 다음의 Table 5.와 같다.

AVE의 제곱근 값은 0.7 이상으로 검정되어야 하며, 경로모형의 상의 다른 연구항목들의 상관계수 값보다 높은 값으로 나타나야만 한다. 분석 결과 AVE의 제곱근 값의 최솟값은 네트워크 리스크대응과 환경리스크대응으로서 0.826으로 검정되었으며, 다른 행과 열의 상관계수들보다 높은 값으로 나타나므로 판별타당성이 있다고 판단하였다.

#### 4.3. 연구가설 검정 결과

앞서 Table 3.과 Table 4. 다음의 Table 5.에서 제시한 것처럼 본 연구에서의 연구항목들이 신뢰성과 타당성 검정에서 요구되는 기준치를 모두 충족하는 것으로 나타나므로, 연구가설에 대한 검정을 Smart PLS 2.0을 활용하여 경로분석 방식으로 시행하였다. 세부적인 내용은 다음의 Table 6.과 같다.

Table 5. Discriminant Validity Analysis Result

Item	Average	St. Deviation	$\sqrt{AVE}$	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Supply Risk Response	5.205	1.293	0.895	1							
2. Demand Risk Response	4.984	1.049	0.940	0.519	1						
3. Operational Risk Response	4.970	1.083	0.898	0.620	0.535	1					
4. Network Risk Resoinse	4.178	1.234	0.826	0.058	0.078	0.248	1				
5. Environmental Risk Response	3.442	1.065	0.826	0.010	0.200	0.078	0.061	1			
6. Agility	4.702	1.111	0.850	0.533	0.474	0.595	0.299	0.225	1		
7. Robustness	4.699	1.280	0.894	0.555	0.552	0.618	0.346	0.011	0.612	1	
8. Supply Chain Performance	4.848	0.944	0.900	0.340	0.440	0.446	0.214	0.016	0.396	0.406	1

Table 6. Test Results of Hypothesis

H	P a t h	Original Sample	Simple Mean	STDEV	STERR	t-val	p-val	Approve or Reject
H1-1	SUR → Agility	0.267	0.266	0.101	0.101	2.652	0.009	Approve
H1-2	DER → Agility	0.126	0.125	0.097	0.097	1.303	0.195	Reject
H1-3	OPR → Agility	0.303	0.295	0.105	0.105	2.883	0.005	Approve
H1-4	NWR → Agility	0.189	0.193	0.071	0.071	2.672	0.009	Approve
H1-5	EVR → Agility	0.161	0.171	0.094	0.094	1.717	0.089	Reject
H2-1	SUR → Robustness	0.224	0.234	0.097	0.097	2.306	0.023	Approve
H2-2	DER → Robustness	0.289	0.287	0.090	0.090	3.209	0.002	Approve
H2-3	OPR → Robustness	0.270	0.253	0.089	0.089	3.022	0.003	Approve
H2-4	NWR → Robustness	0.249	0.252	0.069	0.069	3.612	0.000	Approve
H2-5	EVR → Robustness	0.085	0.079	0.084	0.084	1.017	0.311	Reject
H3	Agility → SCP	0.237	0.239	0.109	0.109	2.161	0.033	Approve
H4	Robustness → SCP	0.261	0.260	0.102	0.102	2.550	0.012	Approve

- Supply Risk Response : SUR, Demand Risk Response : DER, Operational Risk Response : OPR  
 Network Risk Response : NWR, Environmental Risk Response : EVR, Supply Chain Performance : SCP

먼저 가설 H1의 검정 결과 먼저 공급리스크대응은 민첩성에 유의한 긍정적인 영향을 미친다( $\beta=0.267$ ,  $p=0.000$ ). 수요리스크대응은 민첩성에 긍정적인 영향을 미치지만 유의하지는 않았다( $\beta=0.126$ ,  $p=0.195$ ). 운영리스크대응은 민첩성에 유의한 긍정적인 영향을 미친다( $\beta=0.303$ ,  $p=0.005$ ). 네트워크 리스크대응은 민첩성에 유의한 긍정적인 영향을 미친다( $\beta=0.189$ ,  $p=0.009$ ). 마지막으로, 환경리스크대응은 민첩성에 긍정적인 영향을 미치지만 유의하지는 않았다( $\beta=0.161$ ,  $p=0.089$ ). 그러나 보수적인 수준( $p<0.1$  이하)에서는 유의한 영향을 미치는 것으로 나타나므로 해석에 주의를 필요로 한다. 따라서 공급사슬에서 발생할 수 있는 여러 가지 리스크의 대응은 대부분 민첩성 역량 제고에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

또한 가설 H2의 검정 결과 먼저 공급리스크대응은 강건성에 유의한 긍정적인 영향을 미친다( $\beta=0.224$ ,  $p=0.023$ ). 수요리스크대응은 강건성에 유의한 긍정적인 영향을 미친다( $\beta=0.289$ ,  $p=0.002$ ). 운영리스크대응은 강건성에 유의한 긍정적인 영향을 미친다( $\beta=0.270$ ,  $p=0.003$ ). 네트워크 리스크대응은 강건성에 유의한 긍정적인 영향을 미친다( $\beta=0.249$ ,  $p=0.000$ ). 환경리스크대응은 강건성에 긍정적인 영향을 미치지만 유의하지는 않았다( $\beta=0.085$ ,  $p=0.311$ ). 그러므로 공급

사슬에서 발생할 수 있는 여러 가지 리스크의 대응은 대부분 강건성 역량 제고에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

그리고 가설 H3의 검정 결과 민첩성은 공급사슬성과에 유의한 긍정적인 영향을 미치는 것으로 검정되었다( $\beta=0.237$ ,  $p=0.033$ ). 마지막으로 가설 H4의 검정 결과 강건성은 공급사슬성과에 유의한 긍정적인 영향을 미치는 것으로 검정되었다( $\beta=0.261$ ,  $p=0.012$ ). 따라서 민첩성 및 강건성 역량의 제고는 공급사슬성과의 제고로 나타날 수 있다는 것을 확인하였다.

## 5. 연구 결과 요약 및 시사점, 향후 연구 방향

### 5.1. 연구 결과 요약 및 시사점

본 연구는 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크에 대하여 대응하는 공급사슬 리스크 대응, 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성과 강건성, 공급사슬성과 간의 전체적인 관계구조에 대하여 분석하는 것이다. 이를 확인하기 위하여 국내의 제조 기업체들을 대상으로

설문 자료를 수집하였으며, 최종적으로 134개의 설문 자료를 연구에 활용하였다. 설문 자료의 통계처리를 통해 연구항목들에 대한 신뢰성과 타당성을 확인하였으며, 이를 충족하는 연구항목들을 활용하여 Smart PLS 2.0을 활용한 경로분석의 방식으로 연구가설을 검증하였다. 연구가설의 검증 결과는 아래와 같다.

가설 H1의 검증 결과 공급리스크대응, 운영리스크대응, 네트워크 리스크대응은 민첩성에 유의한 긍정적인 영향을 미치는 것으로 검증되었다. 그리고 환경리스크대응은 보수적인 수준( $p < 0.1$  이하)에서 민첩성에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 검증되었으며, 수요리스크대응은 긍정적인 영향을 미치지만 유의하지는 않았다. 가설 H2의 검증 결과 공급리스크대응, 수요리스크대응, 운영리스크대응, 네트워크 리스크대응은 강건성에 유의한 긍정적인 영향을 미치는 것으로 검증되었다. 그러나 환경리스크대응은 강건성에 긍정적인 영향을 미치지만 유의하지는 않았다. 가설 H3의 검증으로서 민첩성은 공급사슬성장에 유의한 긍정적인 영향을 미치는 것으로 검증되었으며, 가설 H4의 검증으로서 강건성 역시 공급사슬성장에 유의한 긍정적인 영향을 미치는 것으로 검증되었다.

이러한 본 연구의 결과에 따르는 연구의 시사점을 정리하면 아래와 같다.

먼저, 이제까지 공급사슬에서 민첩성 역량의 선행요인, 중요성 및 필요성 등에 대하여 제시하는 선행연구들은 매우 많은 상황이다. 그러나 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크에 대한 대응과 민첩성 역량 제고 간의 관계에 대하여 제시하고 있는 선행연구들은 매우 제한적인 상황에서 본 연구는 공급사슬에서의 리스크 구분 및 리스크대응과 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성 역량 간의 관계에 대하여 제시하는 것이다.

또한 리스크대응과 강건성 간의 관계에 대한 선행연구로는 남현정·이상현(2017)의 연구로서 위험관리 구조와 문화가 강건성에 미치는 영향에 대하여 연구를 진행하였지만 본 연구에서는 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크 요인을 5가지로 구분하고, 이들 리스크에 대한 대응 활동이 공급사슬 회복탄력성으로서 강건성에 미치는 영향을 연구하였으며, 이들 사이의 관계를 명확하게 제시하였다.

둘째, 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크의 대응과정에서 리스크에 대응하는 활동은 리스크 대응 역량으로써 민첩성 역량을 제고할 수 있다는 것을 확인하였다. 세부적인 내용을 살펴보면 민첩성 역량의 제고에 공급리스크대응, 운영리스크대응, 네트워크 리스크대응은 민첩성 역량의 제고에 유의한 영향을 미칠 수 있으며, 환경리스크대응은 보수적인 수준( $P < 0.1$  이하)에서 영향을 미친다. 민첩성 역량에 가장 높은 영향을 미치는 것은 운영리스크대응이며, 다음은 공급리스크대응, 네트워크 리스크대응, 환경리스크대응의 순서이다. 따라서 이들 리스크에 대한 대응활동의 과정에서 개별기업 및 공급사슬에서의 민첩성 역량의 수준이 제고될 수 있다는 것을 확인하였다.

또한 민첩성 관련 선행연구들의 대부분에서 개별기업들이 경영환경의 불확실성에 신속하게 대응하기 위하여 요구되는 역량으로 민첩성 역량의 필요성 제시하는 선행연구들이 많은 상황이다. 그러나 민첩성 역량의 경우 개별기업 및 공급사슬에서 필요성을 지각하는 경우는 안정적이고 예측이 가능한 상황보다는 불안정하며, 공급사슬에서 리스크가 발생하는 경우, 즉 경영환경의 불확실성 상황 혹은 리스크 발생 상황에 대응하는 과정에서 민첩성 역량의 필요성에 대하여 지각하는 수준이 더욱 높아질 것으로 예측할 수 있다. 따라서 리스크에 대한 대응의 과정을 통해서도 민첩성 역량의 수준이 제고될 수 있다는 것을 논리적으로 제시하는 것이다.

셋째, 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크의 대응과정에서 리스크에 대응하는 활동은 리스크 대응 역량으로서 강건성 역량을 제고할 수 있다는 것을 확인하였다. 세부적인 내용을 살펴보면 강건성 역량의 제고에 수요리스크대응이 가장 높은 영향을 미치며, 다음은 운영리스크대응, 네트워크 리스크대응, 공급리스크대응의 순서이다. 앞서 강건성의 측정과 관련하여 리스크 발생을 사전에 예방하고, 발생한 리스크에 대하여 버티고 견디며, 리스크가 발생하기 이전의 상황으로 복귀하거나 더 나은 상태로 발전하기 위한 역량으로서 강건성을 제시하였다.

일반적으로 개별기업 및 공급사슬의 관점에서 내부적 및 외부적 요인 등 어떠한 요인에 의해서도 리

스크는 발생하지 않는 안정적인 상황이 가장 좋은 상황이다. 그러나 공급사슬에서 발생하는 수요 및 공급의 변동에 따른 불일치 현상 등으로 인하여 리스크는 언제라도 발생할 수 있는 상황이며, 이에 대응할 수 있는 역량으로서 강건성 역량을 필요로 한다. 따라서 리스크에 대한 대응의 과정에서 리스크 발생 이전의 사전적(예방적) 대응 및 리스크 발생에도 불구하고 안정적인 상황으로 복귀를 위해서 요구되는 역량으로서 강건성 역량의 수준이 제고될 수 있다는 것을 논리적으로 제시하는 것이다.

넷째, 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성과 강건성은 공급사슬성과의 긍정적인 영향을 미치는 것으로 검증되었다. 이를 통해 우리나라의 개별기업들에게 다음의 내용을 제시할 수 있다. 기본적으로 공급사슬 리스크에 대응하기 위한 역량 확보의 필요성과 중요성에 대하여 제시하는 것이다. 영리조직으로서 개별기업의 경영활동은 해당 기업의 경영 활동 성과로 나타날 수 있어야 하는데, 민첩성과 강건성 역량의 제고는 공급사슬성과 제고에 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 이러한 역량의 확보의 필요성과 중요성을 제시하는 것이다.

또한 공급사슬 전체 구성원의 관점에서 어떤 개별기업(Node)에서 발생한 리스크로 인해 전체 공급사슬 구성원들에서 피해가 발생하는 경우 리스크가 발생한 해당 기업과의 지속적인 거래 관계 유지를 희망하는 거래기업들은 감소할 것으로 예상할 수 있다. 그러므로 기업의 지속가능성 확보를 위해서라도 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성과 강건성의 수준을 확보할 필요성이 있음을 제시한다. 리스크에 대하여 신속하게 대응하고 리스크에 대하여 버티고, 리스크 발생 이전의 상황으로 신속하게 복귀할 수 있는 역량을 보유하고 있다는 사실을 다른 거래기업들에게 인식시키는 경우 지속적인 거래관계의 유지와 함께 공급사슬에서의 지속가능성 역시 확보할 수 있을 것이다.

마지막으로, 공급사슬에서 발생할 수 있는 리스크에 대하여 대응하는 공급사슬 리스크대응, 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성과 강건성, 공급사슬성과 간의 전체적인 관계구조에 대하여 분석한 것이다. 연구가설의 검증 결과 공급사슬에서 발생할 수 있는 리

스크를 선행연구들을 참조하여 5가지 유형으로 구분하였으며, 이들 리스크들 중 환경리스크대응을 제외한 나머지 리스크에 대응하는 활동은 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성과 강건성에 대부분 유의한 긍정적인 영향을 미치며, 공급사슬 회복탄력성으로서 민첩성과 강건성은 공급사슬성과의 제고로 연결될 수 있다는 것을 확인하였다.

## 5.2. 연구 제한점 및 향후 연구 방향

본 연구의 제한사항 및 차후 연구 방향과 관련한 내용을 정리하면 아래와 같다.

먼저, 가설 H1-2(수요리스크대응과 민첩성 간의 관계), H1-5(환경리스크대응과 민첩성 간의 관계), H2-5(환경리스크대응과 강건성 간의 관계)의 가설은 긍정적인 영향을 미치지만 유의하지 않은 것으로 나타난다. 이러한 결과가 나타난 이유를 분석하여 보면 수요리스크는 주로 고객사 및 시장, 제품의 변동성 요인에 의하여 발생하는데, 앞서 Table 2.에서 제시한 것처럼 조사대상의 많은 기업들이 중소기업으로 조사되었으며, 공급사슬 상의 위치에서도 1차 및 2차 부품 공급업체의 역할을 수행하는 기업들이 비교적 높은 수준이다. 이들 기업의 경우 ERP를 통하여 완성품 제조업체가 요구하는 대로 원재료 및 부품을 완성품 제조업체에 공급하고 있으므로, 수요예측과 관련된 부분을 직접적으로 예측하기보다는 완성품 제조업체로부터 납품을 요구하는 수량에 따라서 제조를 시행하는 경우가 많을 것으로 예측할 수 있다. 그러므로 이러한 현상에 따라서 수요리스크대응이 민첩성에 미치는 영향에 대한 가설의 검증에서 유의한 결과가 나타나지 않은 것으로 판단하였다.

또한 환경리스크대응은 민첩성과 강건성에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 검증되었다. 환경리스크의 최종적인 측정 내용으로 “환율변동 및 운송비의 증가”, “고객 및 시장의 취향, 기술 변화”, “경쟁사의 예측하지 못한 행동”, “물류기반시설 위험”에 대응하는 내용을 활용하였는데, 앞서 Table 5.에 제시한 것처럼 환경리스크대응은 다른 연구항목들과 비교 시 낮은 평균값(3.442)을 보인다. 이는 조사대상 기업들이 지각하는 환경리스크대응의 수준이 비교적

낮기 때문이라고 판단하였으며, 위에서 제시한 것처럼 중소기업들의 많은 수가 환경리스크와 관련하여서는 큰 경영 관심을 가지지 않는 것으로 판단하였다. 향후 더 많은 자료를 확보하고 다시 연구를 진행할 필요성이 있다.

둘째, 공급사슬 리스크 관리 전략에 대한 부분의 연구가 제한적인 상황이다. 이충배·정석모(2011a)는 공급사슬 위험관리전략으로서 위험회피전략, 위험감소전략, 위험전가전략, 위험수용전략을 제시한다. 공급사슬을 구성하고 있는 개별기업의 관점에서 발생하고 있는 리스크에 대하여 대응하는 전략의 방식은 모두 다르게 나타날 수 있다.

예를 들어서 개별기업의 경쟁전략, 리스크의 발생가능성 수준, 리스크가 해당 기업에 미치는 영향의 수준, 보유하고 있는 자원 및 자산과 관련된 재무적 상황, 공급사슬에서의 역할과 위치, 경쟁기업의 존재유무 등이 해당 기업의 리스크 관리 전략에 영향을 미칠 수 있으며, 이에 따라서 발생한 리스크에 대한 처리방안 역시 모두 달라질 수 있고, 리스크 관리 모델 역시 모두 다르게 나타날 수 있다. 또한 앞서 Table 2.에서 제시한 것처럼 전기 및 전자, 자동차 관련, 기계 및 금속 관련 업종에서의 설문 조사의 비중이 높은 상황이다. 따라서 이들 산업을 제외한 다양한 산업에서의 설문조사를 필요로 하며, 이러한 부분에 대하여 추가적인 연구를 필요로 한다.

셋째, 공급사슬 리스크에 대한 조사와 의견 수렴의 과정에서 아직까지 발생하지 않은 리스크에 대응하기 위하여 인력과 시간, 자원을 투자하는 것에 대하여 난색을 표현하는 일부 기업들이 존재하였으며, 공급사슬 상의 거래기업에서 발생한 리스크에 대하여 협력과 파트너십의 개념으로 동시에 해결하여야 한다는 사항에 대하여 지각하지 못하는 중소기업들이 많았다. 이는 네트워크 리스크대응의 평균값(4.178)이 비교적 낮게 나타나는 것에서도 확인할 수 있다. 특히 기업의 규모가 작은 기업일수록 이러한 경향이 높게 나타나는 경우가 많았다.

실제적으로 거래기업에서 리스크가 발생하였다고 하더라도 작·간접적으로 자신의 기업에게 피해나 손실이 발생하지 않은 이상 이를 자기 기업의 리스크로 지각하기는 어려우며, 리스크 발생에 따르는 대응

을 위하여 사용하여야 하는 자원 및 자금을 비용으로 간주하며 부담을 가지는 경향이 높았다. 따라서 이러한 부분에 대하여 조금 더 심층적으로 연구를 진행할 필요성이 존재한다.

마지막으로, 효율적 공급사슬 리스크 관리를 위해서는 리스크 관리 프레임 워크를 필요로 한다(이충배·김현중, 2020; Giannakis & Papadopoulos, 2016). 그러나 본 연구에서는 이러한 공급사슬 리스크 관리 프레임 워크로서 위험인식, 위험평가, 위험분석, 위험처리, 위험점검과 통제로 연결되어 가는 부분, 또한 박명섭 외(2015)의 연구에서 제시된 것처럼 1단계 위험식별, 2단계 위험사정 및 평가, 3단계 위험관리전략, 4단계 공급사슬 위험관리 전략의 실행, 5단계 공급사슬 경감의 경감으로 연결되는 전체적인 리스크 관리 구조에 대한 부분의 연구가 제한적인 상황이다.

개별 기업의 상황이나 역량, 공급사슬 상의 위치 등에 따라서 표준화된 리스크 관리 프레임 워크 프로세스를 적용하는 것은 매우 제한적일 수 있으므로, 이러한 부분에 대한 세밀한 조사와 연구의 과정은 차후 더 많은 데이터를 수집하고 다시 추가적인 연구를 진행할 필요성이 있을 것이다.

## REFERENCES

- [1] Asbjornslett, B. E.(2008), "Assessing the Vulnerability of Supply Chains", in Zsidisin, G. A. & Ritchie, B. (eds), *Supply Chain Risk: A Handbook of Assessment, Management and Performance*, Springer.
- [2] Azfar, K. R. W., Khan, N. & Gabriel, H. F.(2014), "Performance Measurement: A Conceptual Framework for Supply Chain Practices", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol.150, pp.803-812.
- [3] Barroso, A. P., Machado, V. C. & Machado, V. H.(2011), *Supply Chain Resilience Using the Mapping Approach*, INTECH Open Access Publisher.

- [4] Bhagwat, R. & Sharma, M. K.(2007), "Performance Measurement of Supply Chain Management: A Balanced Scorecard Approach", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.53(1), pp.43-62.
- [5] Cavinato, J. L.(2004), "Supply Chain Logistics Risks. From the back Room to the Board Room", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.34(5), pp.383-387.
- [6] Chen, J., Sohal, A. S. & Prajogo, D. I.(2013), "Supply Chain Operational Risk Mitigation: A Collaborative Approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 51(7), pp.2186-2199.
- [7] Choi, J. W.(2005), "A Study of Supply Chain Continuity Management", *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol.5(1), pp.23-31.
- [8] Chopra, S. & Meindl, P.(2010), *Supply Chain Management-Strategy, Planning, and Operation*, 4/e, Prentice Hall.
- [9] Chopra, S. & Sodhi, M. S.(2004), "Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown", *MIT Sloan Management Review*, 46(1), pp.53-62.
- [10] Christopher, M. & Holweg, M.(2011), "Supply Chain 2.0: Managing Supply Chains in the Era of Turbulence", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.41(10), pp.63-82.
- [11] Christopher, M. & Lee, H.(2004), "Mitigating Supply Chain Risk Through Improved Confidence", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.34(5), pp.388-396.
- [12] Christopher, M. & Peck, H.(2004), "Building the Resilient Supply Chain", *International Journal of Logistics Management*, Vol.15(2), pp.1-14.
- [13] Chu, B. S.(2018), "A Study on Risk Analysis of Supply Chain - Focused on Degree Centrality and Mismatch between Supply and Demand -", *KOREA LOGISTICS REVIEW*, Vol.28(4), pp.1-8.
- [14] Chun, S. H. & Park, D. H.(2011), "A Study of the Framework for Risk Management in Global Supply Chain: Focusing on the Case of Company A", *Journal of Commodity Science and Technology*, Vol.29(2), pp.137-146.
- [15] De Araujo Lima, P. F., Crema, M. & Verbano, C.(2020), "Risk Management in SMEs: A Systematic Literature Review and Future Directions", *European Management Journal*, Vol.38(1), pp.78-94.
- [16] Faisal, M. N.(2009), "Prioritization of Risk in Supply Chains", in Wu, T. & Blackhurst, J.(eds), *Managing Supply Chain Risk and Vulnerability*, pp.41-66.
- [17] Falk, R. F. & Miller, N. B.(1992), *A Primer for Soft Modeling*, University of Akron Press.
- [18] Finch, P.(2004), "Supply Chain Risk Management", *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol.9(2), pp.183-196.
- [19] Fornell, C. & Larcker, D. F.(1981), "Evaluating Structural Equation Models with Unobservable Variable and Measurement Error", *Journal of Marketing Research*, Vol.18(1), pp.39-50.
- [20] Giannakis, M. & Louis, M.(2011), "A Multi-agent Based Framework for Supply Chain Risk Management", *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol.17(1), pp.23-31.
- [21] Giannakis, M. & Papadopoulos, T.(2016), "Supply Chain Sustainability: A Risk Management Approach", *International Journal of Production Economics*, Vol.171(4), pp.455-470.
- [22] Gouda, S. K. & Saranga, H.(2018), "Sustainable Supply Chain for Supply Chain Sustainability: Impact of Sustainability Efforts on Supply Chain Risk", *International Journal of Production Research*, Vol.56(17), pp.5820-5835.
- [23] Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M. & Sarstedt, M.(2014), *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling(PLS-SEM)*, Sage Publication.
- [24] Hallikas, J., Karvonen, I., Pulkkinen, U.,

- Virolainen, V. M. & Tuominen, M.(2004), "Risk Management Processes in Supplier Networks", *International Journal of Production Economics*, Vol.90(1), pp.47-58.
- [25] Han, N. H. & Nam, T. S.(2009), "The Countermeasures of Supply Chain Risks and Logistics Risks", *KOREA LOGISTICS REVIEW*, Vol.19(5), pp.27-53.
- [26] Harland, C., Brenchley, R. & Walker, H.(2003), "Risk in Supply Networks", *Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol.9(2), pp.51-62.
- [27] Henseler, J., Ringle, C. M., & Sinkovics, R. R.(2009), "The Use of Partial Least Squares Path Modeling in International Marketing, in Sinkovics, R. R., Ghauri, P. N.(eds), *New Challenges to International Marketing*, Emerald Group Publishing Limited, pp.277-319.
- [28] Jeong, J. H., Lee, Y. H. & Jeong, J. U.(2003), "Optimization of Collaborative Risk Management in Supply Chain", *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, Vol.8(3), pp.121-130.
- [29] Jung, S. M., Ryu, H. C. & Lee, C. B.(2020), "Impacts of Network Risks in Global Supply Chains on Risk Management Strategies and Performance", *International Commerce and Information Review*, Vol.22(3), pp.325-348.
- [30] Kern, D., Moser, R., Hartmann, E. & Moder, M. (2012), "Supply Risk Management: Model Development and Empirical Analysis", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.42(1), pp.60-82.
- [31] Khan, O.(2008), "Mitigating Supply Chain Risk Through Improved Agility: Lessons from a UK Retailer", *International Journal of Agile Systems and Management*, Vol.3(2/4), pp.262-281.
- [32] Khan, O., Christopher, M. & Burnes, B.(2008), "The Impact of Product Design on Supply Chain Risk: A Case Study", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.38(5), pp.412-432.
- [33] Kim, C. B.(2011), "A Study on the Relationships among Supply Chain Risk Components, Commitment, Trust, and Business Performance", *Korea Logistics Review*, Vol.21(5), pp.299-321.
- [34] Kim, C. B. & Kwon, S. H.(2011), "A Study on the relation of Risk Management, Partnerships, Business Performance in Supply Chain Management", *International Commerce and Information Review*, Vol.13(3), pp.203-227.
- [35] Kim, C. B. & Kwon, S. H.(2013), "Moderating Effects of Supply Chain Risk Management from Partnership and Risk Management Performance in SCM of Korea", *Korea Trade Review*, Vol.38(1), pp.91-112.
- [36] Kim, D. H. & Kim, S. T.(2017), "The Maturity of Supply Chain Risk Management and its Effect on the Risk Management Performance", *The e-Business Studies*, Vol.18(4), pp.21-35.
- [37] Kim, D. J. & Lee, Y. J.(2014), "The Risk Assessment Effects of SCM and the Strategy of Risk Management on Supply Chain Performance", *Journal of Information Technology Applications & Management*, Vol.21(4), pp.173-186.
- [38] Kim, U. S., Song, B. J. & Lee, J. Y.(2012), "A Study on Risk Classification System in Supply Chain", *The KIPS Transactions : Part D*, Vol.19(3), pp.257-262.
- [39] Kim, M. H.(2008), "The Research on Supply Chain Risk Management", *The Korean Operations Research and Management Science Society*, pp.1460-1465.
- [40] Kumar, S. K., Tiwari, M. K. & Babiceanu, R. F.(2010), "Minimization of Supply Chain Cost with Embedded Risk Using Computational Intelligence Approaches", *International Journal of Production Research*, Vol. 48(13), pp.3717-3739.
- [41] Kwak, D. W.(2020), "An Interpretive Structural Analysis of Supply Chain Resilience's Core Competencies", *International Commerce and Information Review*, Vol.22(3), pp.263-282.

- [42] Kwon, J. D. & Lee, J. C.(2017), “A Study on Determinants of Resilience of Firms”, *Journal of Decision Science*, Vol.25(2), pp.1-24.
- [43] Lee, C. B. & Jung, S. M(2011a), “A Study on Risk Management Strategies of Global Supply Chain for the Electrical and Electronics Corporations”, *Korea International Commercial Review*, Vol.26(2), pp.27-48.
- [44] Lee, C. B. & Jung, S. M(2011b), “Risk Management Strategies for Global Food Supply Chain”, *Korean Journal of Logistics*, Vol.19(3), pp.105-124.
- [45] Lee, C. B. & Kim, H. C.(2020), “Effect of Supply Chain Risk Management Factors on Risk Management Strategy and Corporate Performance”, *Journal of Korea Port Economic Association*, Vol.36(3), pp.55-74.
- [46] Lee, C. B., Park, S. W. & Kim, H. C.(2020), “A Study on The Impacts of Freight Transport Risk Factors on Risk Management Strategies”, *KOREA INTERNATIONAL COMMERCE REVIEW*, Vol.35(2), pp.197-219.
- [47] Lee, H. S. & Lim, J. H.(2019), *SPSS New UI Manual*, Jiphyunjae.
- [48] Lee, W. H.(2020), “Strategy for Overcoming Environmental Change Risks Facing the Distribution and Logistics Industry Caused by COVID-19 Pandemic”, *Journal of Distribution and Management Research*, Vol.23(3), pp.81-95.
- [49] Manuj, I. & Mentzer, J. T.(2008), “Global Supply Chain Risk Management Strategies”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.38(2), pp.192-223.
- [50] Meepetchdee, Y. & Shah, N.(2007), “Logistical Network Design with Robustness and Complexity Considerations”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 37(3), pp.211-222.
- [51] Nam, H. J. & Kim, J. H.(2020), “The Effect of Relationship Learning about Supply Chain Risk on Supply Chain Resilience”, *Korean Management Consulting Review*, Vol.20(3), pp.201-211.
- [52] Nam, H. J. & Lee, S. H.(2017), “A Study on the Effect of Supply Chain Risk Management Structure and Culture on Supply Chain Robustness through Supply Chain Collaboration”, *Korean Management Consulting Review*, Vol.17(4), pp.165-176.
- [53] Nooraie, V., Fathi, M., Narenji, M., Parast, M. M., Pardalos, P. M. & Stanfield, P. M.(2019), “A Multi-Objective Model of Risk Mitigating in Supply Chain Design”, *International Journal of Production Research*, Vol.58(5), pp.1338-1361.
- [54] Oh, J. S., Sim, S. B. & Jeong, B. J.(2010), “Risk Management Network for Enterprise Risk Management: Focusing Supply Chain Risk”, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, pp. 1689-1695.
- [55] Park, D. H. & Chun, S. H.(2011), “A Study of the Framework for Risk Management in Global Supply Chain”, *Korean Society for Management Information System Conference*, pp.1061-1065.
- [56] Park, K. O.(2013), “Effects of Real Time Enterprise on SCM Performance”, *The Korea Contents Society*, Vol.13(6), pp.390-400.
- [57] Park, M. S., Han, N. H. & Park, J. U.(2015), “A Study on Supply Chain Risk Management of International Logistics”, *Korea Trade Review*, Vol.40(1), pp.109-131.
- [58] Park, M. S., Hur, Y. S. & Lee, J. S.(2014), “How Supply Chain Risk Management of Trade Companies Should Be Managed According to the Changes of International Logistics Trend”, *Korea Trade Review*, Vol.39(2), pp.45-70.
- [59] Peck, H.(2005), “Drivers of Supply Chain Vulnerability: An Integrated Framework”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 35(4), pp.210-232.
- [60] Ponomarov, S. Y. & Holcomb, M. C.(2009), “Understanding the Concept of Supply Chain



- Resilience”, *The International Journal of Logistics Management*, Vol.20(1), pp.124-143.
- [61] Shekarian, M., Nooraie, S. V. R., & Parast, M. M.(2020), “An Examination of the Impact of Flexibility and Agility on Mitigating Supply Chain Disruptions”, *International Journal of Production Economics*, Vol.220, pp.1-16.
- [62] Shin, C. H., Jeoung, D. H. & Choi, M, S.(2006), “An Exploratory Study on Risk Factor in Supply Chain”, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol.30(1), pp.67-71.
- [63] Simch-Levi, D., Kyratzoglou, I. & Vassiliadis, C.(2013), *Supply Chain Risk Management: Making the Right Decisions to Strengthen Operations Performance*, MIT Forum for Supply Chain Innovation, MIT and PwC Research Study.
- [64] Smeltzer, L. R. & Siferd, S. P.(1998), “Proactive Supply Management”, *Journal of Supply Chain Management*, Vol.34(1), pp.38-45.
- [65] Song, B. J., Ahn, H. J., Rhee, J. T. & Lee, J. Y.(2011), “A Framework Design of an Active Supply Chain Risk Management System from the Perspective of Shippers”, *The KIPS Transactions : Part A*, Vol.18(4), pp.151-158.
- [66] Spekman, R. E. & Davis, E. W.(2004), “Risky Business: Expanding the Discussion on Risk and the Extended Enterprise”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.34(5), pp.414-433.
- [67] Tang, C. S.(2006), “Robust Strategies for Mitigating Supply Chain Disruptions”, *International Journal of Logistics: Research and Applications*, Vol.9(1), pp.33-45.
- [68] Tang, C. & Tomlin, B.(2008), “The Power of Flexibility for Mitigating Supply Chain Risks”, *International Journal of Production Economics*, Vol.116(1), pp.12-27.
- [69] Thun, J. H. & Hoenig, D.(2011), “An Empirical Analysis of Supply Chain Risk Management in the German Automotive Industry”, *International Journal of Production Economics*, Vol.131(1), pp.242-249.
- [70] Trkman, P. & McCormack, K.(2009), “Supply Chain Risk in Turbulent Environments—A Conceptual Model for Managing Supply Chain Network Risk”, *International Journal of Production Economics*, Vol.119(2), pp.247-258.
- [71] Valikangas, L.(2010), *The Resilient Organization: How Adaptive Cultures Thrive even When Strategy Fails*, McGraw-Hill.
- [72] Wallace, S. W. & Choi, T. M.(2011), “Flexibility, Information Structure, Options, and Market Power in Robust Supply Chains”, *International Journal of Production Economics*, Vol.134(2), pp.284-288.
- [73] Wang, D. & Yang, Z.(2007), “Risk Management of Global Supply Chain”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp.1150-1155.
- [74] Wieland, A. & Wallenburg, C. M.(2012), “Dealing with Supply Chain Risks: Linking Risk Management Practices and Strategies to Performance”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.42(10), pp.887-905.
- [75] Wieland, A. & Wallenburg, C. M.(2013), “The Influence of Relational Competencies on Supply Chain Resilience: A Relational View”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.43(4), pp.300-320.
- [76] Yang, J. H., Jung, S. M., Kim, J. H. & Kim, M. K.(2011), “A Study on Risk Factor for Global Supply Chain and Management Strategy”, *The Journal of Korea Research Society for Customs*, Vol.12(1), pp.459-486.
- [77] Yoon, K., Kim, J. S. & Yang, C. H.(2015), “A Study on Significant Effect of SCRM for Shipper Company's Short-term and Long-term Performance”, *KOREA LOGISTICS REVIEW*, Vol.25(3), pp.39-53.
- [78] Zsidisin, G. A.(2003), “Managerial Perceptions of Supply Risk”, *Journal of Supply Chain*

- Management*, Vol.39(1), pp.14-26.
- [79] Zsidisin, G. A., Ellram, L. M., Carter, J. R. & Cavinato, J. L.(2004), "An Analysis of Supply Risk

Assessment Techniques", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol.34(5), pp.397-413.



### 박 찬 권

경북대학교 경영학부 비즈니스 운영관리 박사  
 현재: 경북대학교 건설환경에너지 융합기술원 연구초빙교수  
 관심 분야: SCM, 생산운영관리, 물류 유통



### 서 영 복

금오공과대학교 건설팅학과 박사  
 현재: 김천대학교 교양학과 조교수  
 관심 분야: POM, 물류관리, 공급 사슬관리

## 드론 운영 및 배터리 충전 스케줄링 모형\*

최병천\*\*, 정지복\*\*\*†

\*\*충남대학교 경상학부 교수 · \*\*\*공주대학교 산업유통학과 교수

## Scheduling for Drone Operation and the Battery Charging

Byung-Cheon Choi\*\* · Jibok Chung\*\*\*†

\*\*Professor, Department of Business Administration, Chungnam National University

\*\*\*Professor, Department of Retail Management, Kongju National University

We consider a drone scheduling model with a constraint on battery charge amount. The schedule consists of three decisions as follows: which drone to allocate the jobs to, which sequence to deliver the allocated jobs of each drone on, and when and how much to charge the battery of each drone. We assume that the battery charge time has the linear relationship with the battery charge amount. We consider two cases with a single drone and multiple drones. Firstly, we show that a single-drone case is strongly NP-hard even if the charge function is a constant. If the charge function is a linear function with zero Y-intercept, then we show that the single- and the multiple-drone cases are polynomially solvable and NP-hard, respectively. Finally, we prove the weak NP-hardness of the case with multiple drones and the linear charge function.

**Keyword** : Drone scheduling, Battery charging function, Computational complexity

---

※ 이 논문은 2020년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구 지원에 의하여 지원받았음.

† **Corresponding Author** : Department of Retail Management, Kongju National University, 54 Daehak-ro, Yesan-gun Chungcheongnam-do, Korea,  
Tel: +82-41-330-1428, E-mail: jibchung@kongju.ac.kr

**Received**: 9 February 2021, **Revised**: 9 April 2021, **Accepted**: 12 May 2021

## 1. 서론

아마존을 비롯한 유통기업들을 중심으로 드론(무인 비행체, drone)을 배송에 활용하고자 하는 연구와 테스트가 진행되고 있다(Jung & Lee, 2015). 드론은 차량 대비 속도가 빠르고 교통정체가 발생하지 않는 장점이 있어 교통정체가 심하거나 도서·산간 등 취약지역의 배송업무에 드론을 활용함으로써 배송시간 단축과 환경오염 절감 등의 효과를 기대할 수 있다(Jung & Lee, 2015). 관련하여 기존 학술연구는 대부분 드론 단독(또는 드론과 차량)의 배송경로(routing problem) 최적화에 관심을 가지고 연구를 진행하고 있다(Agatz, bouman, & Schmidt, 2018; Ha et al., 2018; Murray & Chu, 2015). 그러나 드론은 배터리에 의존하여 운행하기 때문에 배송업무를 완료하게 되면 필요에 따라 충전소에서 배터리 충전과 배터리 교체가 발생하고, 배터리 충전소가 제한된 상황에서 드론의 충전 순서와 배터리 할당 문제가 발생하게 된다(Tajrian & Kim, 2019). Park 외(2017)는 드론 배터리 충전 원리와 특성을 고려한 내구성 높은 배터리 관리 문제를 처음으로 제안하였다. Park 외(2017)에 따르면, 드론 배송에 사용되는 배터리의 무게와 충전수준은 드론 배송이 가능한 물품 무게와 배송시간에 영향을 주며 빈번한 배터리의 재충전은 배터리 수명을 단축하는 결과를 가져온다. 따라서, 배터리 충전은 최대한 늦게 충전하는 방식(ALAP: As late as possible)이 배터리 수명관점에서는 바람직하다. 또한, 장착된 배터리가 필요 이상으로 무거운 내용량이면 비행 속도가 떨어지고 배터리 소모량이 많아지는 문제가 발생하며 배터리 용량이 부족할 경우 배송업무를 수행하지 못하거나 충전소로 회귀하지 못하는 문제가 발생할 수 있다고 알려져 있다. 본 연구는 Park 외(2017)가 제시한 배터리 관리의 기술적 특성에 기반하여 드론 운영 및 배터리 충전 스케줄링 모형을 제시하고자 한다. Park 외(2017)는 배터리 할당 문제와 배터리 충전 스케줄링 문제에 대해 각각 독립적인 모형을 제시하고 있는 반면에 본 연구는 배터리 할당과 충전 스케줄링을 동시에 결정하고 있다는 점에서 차이점이 있다.

본 논문에서 고려하는 모형은 다음과 같다. 배송 물품 집합과 배송을 위한 드론 집합이 주어졌을 때, 각 배송 물품을 어떤 드론에 할당하지 결정하는 할당 계획과 드론에 할당된 물품들 어떤 순서로 배송할지 결정하는 배송 계획을 구하는 것이다. 또한, 각 물품의 배송을 위해서는 각 드론은 일정 수준 이상의 배터리 충전량이 필요하므로 각 드론의 배터리를 언제 충전하는지 결정하는 충전 계획도 결정하는 것도 필요하다. 참고로, 본 모형에서는 드론의 배터리 충전 시간과 충전량은 선형 관계를 갖는다고 가정한다. 연구 모형의 목적은 물품 창고의 평균 재고 수준을 최소화하기 위해 전체 물품 배송 완료 시간으로 설정하였다. 따라서, 본 연구 모형은 전체 물품 배송 완료 시간을 최소화하도록 배터리의 할당 계획, 배송 계획, 그리고 충전 계획을 결정하는 것이다.

논문 구성은 다음과 같다. 2장에서는 선행 연구를 살펴보고, 3장에서는 연구 모형에 사용되는 기호와 용어를 정의하고, 모형의 가정을 설명할 것이다. 4장에서는 연구 모형의 여러 가지 경우에 대한 계산 복잡도를 분석할 것이고, 마지막으로 5장에서 결론을 제시할 것이다.

## 2. 선행 연구

드론 배터리 스케줄링 최적화 모형을 다루고 있는 연구는 몇몇 연구(Park, Zhang, & Chakraborty, 2017; Tajrian & Kim, 2019; Torabbeigi, Lim, & Kim, 2020)를 제외하고는 찾아보기 힘들다. Part 외(2017)는 드론 배터리의 효율적 관리를 위한 배터리 할당 및 충전 스케줄링 모형을 처음으로 제안하였다. 배터리 충전 스케줄링 모형에 대한 정수계획법 모형과 실험결과를 제시하였으나, 배터리 할당 문제와 배터리 충전 스케줄링 문제를 분리하여 독립적인 모형을 제시하고 있으며 제시된 모형의 계산 복잡도를 규명하고 있지 않다. Tajrian과 Kim(2019)은 우선순위(priority) 기반의 배터리 충전 스케줄링 휴리스틱과 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 최근,

Torabbeigi 외(2020)는 배송무게와 배송시간에 따른 리튬폴리머 배터리 소모의 관계에 대하여 실험결과를 발표하였다. 연구결과에 따르면 배송무게에 따라 배터리 소모 속도는 선형적으로 비례하여 증가한다. 지금까지 살펴본 바와 같이 선행 연구는 드론 배터리 스케줄링 이슈를 다루고 있으나, 근본적인 문제의 특성과 계산 복잡도를 분석하지 않고 몇몇 휴리스틱 알고리즘과 실험결과를 제시하고 있을 뿐이다. 본 연구에서는 기존에 고려하지 않은 드론 배터리 스케줄링 모형을 제시하고, 계산 복잡도 분석 및 다항 시간을 위한 최적 조건을 탐색할 것이다. 본 연구 모형과 가장 유사한 모델 유형으로 유지 보수 (preventive maintenance, PM) 스케줄링 모형을 들 수 있다 (Lee & Chen, 2000; Qi, Chen, & Tu, 1999; Rebai, Kacem, & Adjallah, 2013). 이유는 본 연구 모형의 배터리 충전 계획이 유지 보수 계획으로 간주될 수 있기 때문이다. 그러나 다음과 같은 측면에서 PM 스케줄링 모형과 차이점이 있다.

Table 1. Originality of the research

구분	PM 모델	본 연구 모델
충전(유지보수) 횟수	주어진 기간 동안 한 번만 실행함	횟수 제한 없음
충전(유지보수) 시간	고정되어 있음	결정해야 함
충전(유지보수) 시점	시작 시점에 제한 없음	후속 작업 시간에 영향을 받음

### 3. 연구 모형

본 장에서는 연구 모형에 사용될 기호와 용어, 그리고 가정을 설명하며, 스케줄링 모형은 Graham 외 (1979)의 표시법에 따라 표현한다.

$n$  : 총 작업 수

$m$  : 총 드론 개수

$J = 1, 2, \dots, n$ : 작업 집합

$M = 1, 2, \dots, m$ : 드론 집합

$p_j$  : 작업  $j$ 의 작업 시간

$B_i$  : 드론  $i$ 의 배터리 최대 사용 시간

$B_i^0$  : 드론  $i$ 의 초기 배터리 초기 충전 시간

$f_i(x) = \alpha_i + \beta_i x$  : 드론  $i$ 의 배터리 용량 (시간)을  $x$  증가시키는 데 필요한 충전 시간 (단,  $\alpha_i$ 와  $\beta_i$ 는 드론  $i$  충전과 관련된 주어진 값이다)

$\sigma = (\sigma_i)_{i \in M}$  : 스케줄

$\sigma_i = (\pi_i, \tau_i, x_i)$  : 드론  $i$ 의 스케줄

$J_i$  : 드론  $i$ 에 할당된 작업 집합 (단,  $n_i = |J_i|$ )

$H_i$  : 드론  $i$ 에 계획된 충전 집합 (단,  $h_i = |H_i|$ )

$\pi_i = (\pi_i(1), \pi_i(2), \dots, \pi_i(n_i))$  : 드론  $i$ 에 할당된  $n_i$ 개 작업의 작업 순서 (단,  $\pi_i(j)$ 은 드론  $i$ 에  $j$ 번째 처리되는 작업)

$\tau_i = (\tau_{i,h})_{h \in H_i}$  : 드론  $i$ 의 충전 시작 시간 벡터 (단,  $\tau_{i,h}$ 는  $h$ 번째 충전 시작 시간)

$x_i = (x_{i,h})_{h \in H_i}$  : 드론  $i$ 의 충전 소요 시간 벡터 (단,  $x_{i,h}$ 는  $h$ 번째 충전 소요 시간)

$C_j(\sigma)$  : 스케줄  $\sigma$ 하에, 작업  $j$ 의 완료 시간

$S_j(\sigma)$  : 스케줄  $\sigma$ 하에, 작업  $j$ 의 시작 시간

연구 모형은 전체 작업 시간,  $\sum_{j=1}^n C_j(\sigma)$ 를 최소로

하는 스케줄을 구하는 것이며 편의상 앞으로 본 연구 모형을 Problem P로 정의하겠다. 한편, 연구 모형의 가정은 다음과 같다.

1) 가장 큰 작업 시간은 가장 큰 드론의 배터리 용량보다 같거나 작다. 즉,

$$\max p_j \mid j \in J \leq \max B_i \mid i \in M.$$

2) 각 드론  $i$ 는 시점 0부터 모든 작업들이 완료될 때까지, 작업 배송 처리 또는 배터리 충전량이 최대가 아니면 충전을 한다. 즉, 각 드론  $i$ 에 배터리 충전량이 최대가 아니면, 유휴 시간 (idle time)은 존재하지 않는다.

3) 각 드론  $i$ 는 배터리 용량이  $\bar{B}_i$ 인 시점부터  $x$ 시간 동안 작업 처리한 후, 드론  $i$ 의 남은 배터리 용량은  $(\bar{B}_i - x)$ 이다.

4) 각 드론  $i$ 는 배터리 용량이  $\bar{B}_i$ 인 시점부터 다음

충전 시작 시점 사이에 총 작업시간은  $\bar{B}_i$ 를 초과할 수 없다.

Problem P는 다음 결정변수를 이용하여 아래 정수 계획 모형으로 표현할 수 있다.

(결정변수)

$z_{i,j,k}$ : 작업  $k$ 가 드론  $i$ 의  $j$ 번째로 처리된다면 1이고, 그렇지 않다면 0인 변수

$\tau_{i,j}$ : 드론  $i$ 에서  $j$ 번째 작업과  $(j+1)$ 번째 작업 사이의 충전시간 변수

$R_{i,j}$ : 드론  $i$ 에서  $j$ 번째 충전 직후 배터리 양

$x_{i,j}$ : 드론  $i$ 에서  $j$ 번째 충전 양

$y_{i,j}$ : 드론  $i$ 에서  $j$ 번째 충전을 하면 1이고, 그렇지 않으면 0인 변수

$C_k$ : 작업  $k$ 의 완료 시간

(수리모형)

$$\min \sum_{k=1}^n C_k$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{i,j,k} = 1,$$

for  $k \in J$

$$\sum_{k=1}^n z_{i,j,k} \leq 1,$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$\tau_{i,0} = 0,$$

for  $i \in M$

$$\tau_{i,j} \leq M y_{i,j},$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$x_{i,j} \leq B_i y_{i,j},$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$\tau_{i,j} \geq \alpha_i + \beta_i x_{i,j} + M(y_{i,j} - 1),$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$\sum_{l=1}^n \sum_{h=1}^j (p_l z_{i,h,l} + \tau_{i,h-1}) \leq C_k + M(1 - z_{i,j,k}),$$

for  $i \in M$  and  $j, k \in J$

$$R_{i,0} = B_i^0,$$

for  $i \in M$

$$R_{i,j-1} \geq \sum_{k=1}^n p_k z_{i,j,k},$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$R_{i,j} = R_{i,j-1} - \sum_{k=1}^n p_k z_{i,j,k} + x_{i,j},$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$R_{i,j} \leq B_i,$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$z_{i,j,k} \in \{0,1\},$$

for  $i \in M$  and  $j, k \in J$

$$\tau_{i,j} \geq 0,$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$R_{i,j} \geq 0,$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$x_{i,j} \geq 0,$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$y_{i,j} \in \{0,1\},$$

for  $i \in M$  and  $j \in J$

$$C_k \geq 0,$$

for  $k \in J$

다음 Problem P의 예를 보자.

- $m = 1, n = 5$
- $(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5) = (2, 3, 5, 6, 8)$
- $B_1^0 = 6, B_1 = 10$
- $f_1(x) = 1 + x$

이때, 다음 스케줄을 고려해보자.

$$\pi_1 = (J_1, J_2, J_3, J_4, J_5), \tau_1 = (5, 15, 28), x_1 = (5, 7, 9)$$

위 스케줄을 다음과 같은 Gantt 차트로 표현할 수 있다.

1	2		3		4		5
$\begin{pmatrix} 0 \\ 6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 5 \\ 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 10 \\ 5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 15 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 22 \\ 6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 28 \\ 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 37 \\ 8 \end{pmatrix}$

숫자가 있는 영역은 해당 숫자에 해당되는 작업의 작업 구간을, 회색 영역은 배터리 충전 구간을 의미한다. 벡터의 첫 번째 요소는 의미는 해당 작업의 완료 시간 또는 충전 완료 시간을, 두 번째 요소는 남은 배터리 용량을 의미한다. 즉, 벡터  $\begin{pmatrix} 5 \\ 1 \end{pmatrix}$ 는 작업 2의 완료시간은 5이고 이때 남은 배터리 용량은 1임을 의미한다. 이때, 남은 배터리 용량은 초기 배터리 용량 6과 작업 1과 2의 총 시간 작업 5의 차로 계산된다. 벡터  $\begin{pmatrix} 10 \\ 5 \end{pmatrix}$ 는 시점 5에서 남은 배터리 용량은 1이므로 작업 3을 시작하기 전에 배터리 용량을 5로 올린다는 것으로 의미한다. 이때, 충전량은 4이므로 충전 시간은  $f(4) = 5$ 가 된다. 이런 식으로 모든 작업을 완료하는 데 45가 걸리며, 총 작업 완료 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$\sum_j^n C_j(\sigma) = 2 + 5 + 15 + 28 + 45 = 95$$

#### 4. 계산 복잡도 분석

본 장에서는 Problem P의 다양한 유형에 대한 계산 복잡도를 분석할 것이다. 편의를 위해, 단일 드론을 갖는 경우, 기호  $\tau_{i,h}, x_{i,h}, f_i(x) = \alpha_i + \beta_i x$ ,

$B_i, B_i^0, \sigma_i, \pi_i, \tau_i, x_i$  대신, 기호  $\tau_h, x_h, f(x) = \alpha + \beta x, B, B^0, \sigma, \pi, \tau, x$ 을 사용할 것이다.

**정리 1:** 만약  $f(x) = \alpha$ 이고, 드론의 개수가 하나이면, Problem P의 계산 복잡도는 strongly NP-hard이다.

**증명:** Strongly NP-hard로 알려진 3-partition 문제를 이용하여 증명할 것이다. 3-partition 문제는  $\sum_{i=1}^{3m} a_i = mA$  and  $\frac{A}{4} < a_i < \frac{A}{2}, i = 1, 2, \dots, 3m$ 의 특성을 갖는 정수 집합  $a_1, a_2, \dots, a_{3m}$ 이 주어졌을 때, 아래 성질을 갖는 partition  $(X_i)_{i=1,2,\dots,m}$ 이 존재하는지 판단하는 문제이다.

- $\cup_{h=1}^m X_h = \{1, 2, \dots, 3m\}$  와  $X_i \cap X_j = \emptyset$  for  $i \neq j$ ;
- $\sum_{j \in X_1} a_j = \sum_{j \in X_2} a_j = \dots = \sum_{j \in X_m} a_j = A$ ?

편의를 위해  $A > \frac{3}{2}m(m+1)$ 라고 가정하자.

3-partition 문제를 이용하여, 아래와 같은 Problem P의 문제를 구성할 수 있다.

- 작업의 개수는  $3m$ 개다.
- 작업  $j$ 의 작업 시간  $p_j = a_j, j = 1, 2, \dots, 3m$ , 이

다.

•  $B^0 = A$ ,  $B = A$ , and  $\alpha = A^2$ 이다.

지금부터, 3-partition 문제가 해를 갖는다는 것과 앞서 구성된 Problem P의 문제에서  $\sum_{j=1}^{3m} C_j(\sigma) \leq K$ 를 갖는 스케줄이 존재한다는 것이 동치임을 보일 것이다. 단,

$$K = \frac{3}{2}m((m+1)A + (m-1)A^2).$$

( $\Rightarrow$ ) 3-partition 문제에 해  $(\bar{X}_h)_{h=1,2,\dots,m}$ 가 존재한다고 하자.  $\bar{J}_h$ 을  $\bar{X}_h$ ,  $h = 1, 2, \dots, m$ , 에 속한 정수에 대응되는 작업들의 집합이라 하자. 이를 바탕으로 스케줄  $\bar{\sigma} = (\bar{\pi}, \bar{\tau}, \bar{x})$ 를 다음과 같이 구성하자.

- $\bar{\pi}_h$ 는  $\bar{J}_h$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 에 속한 작업들을 작업 시간이 크지 않는 것부터 나열된 작업 순서이다;
- $x_h = A$ ,  $h = 1, 2, \dots, m-1$ .

스케줄  $\bar{\sigma}$ 에서

$$B_1^0 = A, \quad x_h(\bar{\sigma}) = A, \quad h = 1, 2, \dots, m-1 \quad \text{와} \\ \sum_{j \in \bar{X}_h} p_j = A, \quad h = 1, 2, \dots, m,$$

만족하기 때문에,  $\bar{\sigma}$ 는 가능 스케줄임을 알 수 있다. 또한,  $h = 1, 2, \dots, m$ 에 대해,

$$C_j(\bar{\sigma}) \leq hA + (h-1)A^2 \quad \text{for } j \in \bar{X}_h \quad \text{and} \\ |\bar{X}_h| = 3,$$

이기 때문에,

$$\sum_{j=1}^{3m} C_j(\bar{\sigma}) \leq 3 \sum_{i=1}^m (hA + (h-1)A^2) = K.$$

( $\Leftarrow$ ) 앞서 구성된 Problem P의 문제에서

$$\sum_{j=1}^{3m} C_j(\hat{\sigma}) \leq K \text{를 갖는 스케줄 } \hat{\sigma} \text{이 존재한다고 하}$$

자.  $B^0 = B = A$ 이기 때문에, 편의를 위해, 첫 번째 충전은 어떤 작업 완료 후에 실행되고, 배터리 충전은  $(g-1)$ 번 한다고 가정하자.  $\hat{J}_1$ 은  $\hat{\tau}_1$  전에 처리되는 작업 집합이고,  $\hat{J}_h$ 은  $\hat{\tau}_{h-1}$ 과  $\hat{\tau}_h$ ,  $h = 2, 3, \dots, g-1$ , 사이에 처리되는 작업 집합이고,  $\hat{J}_g$ 은  $\hat{\tau}_{g-1}$  후에 처리되는 작업 집합이라고 하자.  $\hat{\sigma}$

은 가능 스케줄이기 때문에, 아래 식이 성립한다.

$$\sum_{j \in \bigcup_{i=1}^g \hat{J}_i} p_j \leq A + \sum_{h=1}^{g-1} x_h(\hat{\sigma}), \quad k = 1, 2, \dots, g.$$

더욱이,  $B = A$  이고  $\frac{A}{4} < p_j < \frac{A}{2}$ ,

$j = 1, 2, \dots, 3m$  이기 때문에, 아래 식이 성립한다.

$$|\hat{J}_h| \leq 3, \quad h = 1, 2, \dots, g \quad \text{and } g \geq m.$$

**주장 1-1:** 스케줄  $\hat{\sigma}$ 에서,  $g = m$ 이다.

**증명:** 부록 참조 □

**주장 1-2:** 스케줄  $\hat{\sigma}$ 에서,  $\sum_{j \in \hat{J}_h} p_j = A$ ,

$h = 1, 2, \dots, m$ , 이다.

**증명:** 부록 참조 □

$\frac{A}{4} < p_j < \frac{A}{2}$ ,  $j = 1, 2, \dots, 3m$ , 의해  $|\hat{J}_h| = 3$ ,  $h = 1, 2, \dots, m$ 이기 때문에, 주장 1-2에 의해,  $(\hat{J}_h)_{h=1,2,\dots,m}$ 이 3-partition 문제의 해가 된다. ■

**정리 2:** 만약  $f(x) = \beta x$ 이고, 드론의 개수가 하나이면, Problem P는 다항시간에 풀린다.

**증명:** 편의를 위해, 최적 스케줄  $\sigma^* = (\pi^*, \tau^*, x^*)$ 은 다음 성질을 갖는다고 하자.

- 배터리 충전 횟수는  $l$ 번이다. 즉,

$$H^* = 1, 2, \dots, l-1 \text{ 이다;}$$

- $J_1^*$ 는  $\tau_1^*$  전에 처리되는 작업 집합이고,  $J_h^*$ 은  $\tau_{h-1}^*$ 과  $\tau_h^*$ ,  $h = 2, 3, \dots, l-1$ , 사이에 처리되는 작업 집합이고,  $J_l^*$ 은  $\tau_{l-1}^*$  후에 처리되는 작업 집합이다;
- $\pi_h^*$ 는  $J_h^*$ ,  $h = 1, 2, \dots, l$ , 에 속하는 작업 순서이다.

$\sigma^*$ 가 가능 스케줄이기 때문에, 아래 부등식이 성립한다.



$$\sum_{j \in \bigcup_{h=1}^k J_i} p_j \leq B^0 + \sum_{h=1}^{k-1} x_h^*, \quad k = 1, 2, \dots, l.$$

**주장 2-1:** 최적 스케줄  $\sigma^*$ 에서, 아래 부등식이 성립한다.

$$B^0 < \sum_{j \in J_1^*} p_j + p_{\pi_2^*(1)},$$

단,  $\pi_2^*(1)$ 는  $\pi_2^*$ 에서 첫 번째 작업이다.

**증명:** 부록 참조.  $\square$

**주장 2-2:** 최적 스케줄  $\sigma^*$ 에서, 아래 식은 성립한다.

$$\sum_{j \in \bigcup_{h=1}^k J_h^*} p_j = B^0 + \sum_{h=1}^{k-1} x_h^*, \quad k = 2, 3, \dots, l.$$

**증명:** 부록 참조.  $\square$

**주장 2-3:** 최적 스케줄  $\sigma^*$ 에서, 아래 식은 성립한다.

$$|J_h^*| = 1, \quad h = 1, 2, \dots, l.$$

**증명:** 부록 참조.  $\square$

**주장 2-4:** 최적 스케줄  $\sigma^*$ 에서, 작업들은 작업 시간이 감소하지 않는 순서로 처리된다.

**증명:** 정리 4는 기본적인 pair-wise interchange 기법으로 성립함을 보일 수 있다.  $\square$

주장 2-1-2-4에 의해, 최적 스케줄  $\sigma^*$ 는  $O(n \log n)$  안에 구성될 수 있으므로, 정리 2는 성립한다.  $\blacksquare$

**정리 3:** 만약  $f_1(x) = f_2(x) = x$ 이고 드론의 개수가 두 개이면, Problem P의 계산 복잡도는 NP-hard이다.

**증명:** NP-hard로 알려진 Odd-Even Partition(OEP) 문제를 이용하여 증명할 것이다(Garey & Johnson, 1979). OEP 문제는  $\sum_{j=1}^{2m} a_j = 2A$ 의 특성을 갖는 정수 집합  $a_1, a_2, \dots, a_{2m}$ 이 주어졌을 때, 아래 성질을 갖는 부분 집합  $Q \subseteq 1, 2, \dots, 2m$ 이 존재하는지 판단하는 문제이다.

· 부분 집합  $2j-1, 2j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ,에서 정확히 하나만  $Q$ 에 속한다.

· 등식  $\sum_{j \in Q} a_j = A$ 를 만족한다.

편의를 위해 아래 부등식이 성립한다고 가정하자.

·  $a_{2j-1} \leq a_{2j}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ;

·  $a_{2j+1} > \sum_{i=1}^j (m-i+1)(a_{2i-1} + a_{2i})$ ,

$j = 1, 2, \dots, m-1$ .

OEP 문제를 이용하여, 아래와 같은 Problem P의 문제를 구성할 수 있다.

· 작업의 개수는  $2m$ 개다.

· 작업  $j$ 의 작업 시간  $p_j = a_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, 2m$ , 이다.

·  $B_1^0 = B_2^0 = A$  이고  $B_1 = B_2 = A$ 이다.

지금부터, OEP 문제가 해를 갖는다는 것과 앞서 구

성된 Problem P의 문제에서  $\sum_{j=1}^{2m} C_j(\sigma) \leq K$ 를 만족

하는 스케줄이 존재한다는 것이 동치임을 보일 것이다. 단,

$$K = \sum_{j=1}^m (m-j+1)(a_{2j-1} + a_{2j}).$$

( $\Rightarrow$ ) OEP 문제가  $\bar{Q}$ 의 해를 갖는다고 하자.  $\bar{J}_1$ 를  $\bar{Q}$ 에 속한 정수에 대응되는 작업들의 집합이라 하자.  $\bar{J}_2$ 를  $1, 2, \dots, 2m \setminus \bar{J}_1$ 라고 하자.  $|\bar{J}_1| = |\bar{J}_2| = m$ 이기 때문에,  $\bar{J}_i$ ,  $i = 1, 2$ ,에 속한 작업들을 드론  $i$ 에 할당하고, 충전 없이 작업 시간이 감소하지 않는 순서로 처리하는 스케줄  $\bar{\sigma}$ 를 구성해보자. 그렇다면, 다음과 같은  $\bar{\sigma}$ 의 성질을 발견할 수 있다.

·  $\sum_{j \in \bar{J}_1} p_j = \sum_{j \in \bar{J}_2} p_j = A$  이고  $B_1^0 = B_2^0 = A$ 이기 때

문에,  $\bar{\sigma}$ 는 가능 스케줄이다.

·  $2j-1, 2j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ,에 속한 작업은 할당된 드론에서  $j$ 번째로 처리된다.

두 번째 성질과 아래 식에 의해

$$C_{\pi_1(j)}(\bar{\sigma}) + C_{\pi_2(j)}(\bar{\sigma}) = \sum_{i=1}^j (p_{2i-1} + p_{2i}) = \sum_{i=1}^j (a_{2i-1} + a_{2i})$$

,  $j = 1, 2, \dots, m$ ,

다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^{2m} C_j(\bar{\sigma}) = \sum_{j=1}^m (C_{\pi_1(j)}(\bar{\sigma}) + C_{\pi_2(j)}(\bar{\sigma})) = \sum_{j=1}^m (m - j + 1)(a_{2j-1} + a_{2j}) = K.$$

( $\Leftrightarrow$ )  $\sum_{j=1}^{2m} C_j(\hat{\sigma}) \leq K$ 을 만족하는 스케줄  $\hat{\sigma}$ 이 앞서

구성된 Problem P의 문제에서 존재한다고 하자. 단, 편의를 위해,  $\hat{\sigma}$ 에서 각 드론에 할당된 작업들은 작업 시간이 감소하지 않는 순서를 처리된다고 하자.

**주장 3-1:**  $j \in 1, 2, \dots, m$ 에 대해, 아래 식이 성립한다고 하자.

$$|\hat{J}_i \cap 2j - 1, 2j| = 1, \quad i = 1, 2.$$

**증명:** 부록 참조. ■

**주장 3-2:**  $i = 1, 2$ 에 대해, 아래 식이 성립한다.

$$\sum_{j \in \hat{J}_i} p_j = A.$$

**증명:** 부록 참조. ■

집합  $\hat{Q}$ 를  $\hat{J}_1$ 에 속하는 작업에 대응되는 정수 집합이라고 하자. 참고로, 주장 3-1과 3-2에 의해  $|\hat{Q}| = m$  이고  $\sum_{j \in \hat{Q}} a_j = A$ 임을 알 수 있다. 그러므

로  $\hat{Q}$ 는 OEP 문제의 해이므로, 정리 3은 증명이 되었다. ■

**정리 4:** 만약  $f_i(x) = \beta_i x$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ 이고 드론의 개수가  $m$ 개이면, Problem P는 유사-다항시간 안에 풀린다.

**증명:** 우리는 Problem P를 최단 경로 문제(shortest path problem)로 전환됨을 보임으로써 증명할 것이다. 최단 경로 문제는 노드 (node) 집합  $N = 1, 2, \dots, n$ 과 엣지 (edge) 집합  $E$ 로 구성된 그래

프  $G = (N, E)$ 에서 각 엣지  $(i, j) \in E$ 는 길이  $l_{i,j}$ 의 값을 갖을 때, 출발 노드 1에서 도착 노드  $n$ 까지 최단 길이를 갖는 경로를 구하는 문제이다. 참고로, 정리 2의 주장 4에 의해, 최적 스케줄에서 각 드론에 할당된 작업들은 작업 시간이 감소하지 않는 순서로 처리된다는 것을 알 수 있다. 지금부터는, 이와 같은 성질을 갖는 스케줄만 고려할 것이다. 편의를 위해, 다음 부등식이 성립한다고 가정하자.

$$p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_n.$$

$k \in 1, 2, \dots, n$ 에 대해,  $N(k; (C_i, R_i)_{i=1,2,\dots,m})$ 를 아래 의미를 갖는 노드라고 하자:

- $1, 2, \dots, k$ 에 속한 작업들은 어떤 드론에서 처리되는지 결정되었다.

- 드론  $i$ 에 마지막 할당된 작업의 완료시간은  $C_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 이다.

- 시점  $C_i$ 에서, 드론  $i$ 의 남은 충전량은  $R_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 이다.

노드  $N(0; (0, B_i^0)_{i=1,2,\dots,m})$ 과  $t$ 를 출발 및 도착 노드라고 하자.  $k \in 1, 2, \dots, n-1$ 과  $i' \in 1, 2, \dots, m$ 에 대해, 노드  $N(k; (C_i, R_i)_{i=1,2,\dots,m})$ 과  $N(k+1; (C_{i'}, R_{i'})_{i=1,2,\dots,m})$ 을 길이  $C_{i'}$ 을 갖는 엣지로 연결한다. 단,  $C_{i'}$ 은 아래와 같이 계산된다.

$$(C'_i, R'_i) = \begin{cases} (C_i + p_{k+1}, R_i - p_{k+1}) & \text{if } i = i' \text{ and } R_i \geq p_{k+1} \\ (C_i + p_{k+1} + \beta_i(p_{k+1} - R_i), 0) & \text{if } i = i' \text{ and } R_i < p_{k+1} \\ (C_i, R_i) & \text{if } i \in 1, 2, \dots, m \setminus i' \end{cases}$$

$k = n$ 에 대해서, 노드  $N(k; (C_i, R_i)_{i=1,2,\dots,m})$  과  $t$ 를 길이 0을 갖는 엣지로 연결한다. 목적은 위와 같이 구성된 그래프에서, 출발 노드  $N(0; (0, B_i^0)_{i=1,2,\dots,m})$ 에서 도착 노드  $t$ 까지 최단 길이를 갖는 경로를 구하는 것이다.

변환 과정에서 구성된 노드의 수는  $O(n^m P^m \prod_{i=1}^m B_i)$  이고, 각 노드에서 나오는 엣지의

수는 많아야  $m$ 개임을 알 수 있다(단,  $P = \sum_{j=1}^n p_j$ 이

다). 그러므로 총 엣지의 수는  $O(mn^m P^m \prod_{i=1}^m B_i)$ 이

다. 그런데, 구성된 그래프는 사이클을 갖지 않기 때문에, 위 변환 과정으로 구성된 최단 경로 문제는 Ahuja 외(1990)의 알고리즘으로  $O(mn^m P^m \prod_{i=1}^m B_i)$ 안에 풀린다는 것을 알 수 있다. 그러므로 정리 4는 성립한다. ■

**보조 정리 1:** 만약  $f_i(x) = \beta_i x$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ 이고 드론의 개수가  $m$ 개이면, Problem P의 계산 복잡도는 weakly NP-hard이다.

**증명:** 보조 정리 1은 정리 3과 4에 의해서 성립한다. ■

## 5. 결론

본 연구에서는 드론 운영 및 배터리 충전 스케줄링 모형에 대한 계산 복잡도를 분석하였다. 연구 결과 드론 개수가 하나인 경우, 배터리충전 함수가 상수  $f(x) = \alpha$ 인 경우에도 계산복잡도가 strongly NP-hard지만, 선형 함수  $f(x) = \beta x$ 인 경우에는 다

항 시간에 풀릴 수 있음을 보였다. 드론의 개수가  $m$ 개면 각 드론의 배터리 충전 함수가  $f_i(x) = x$ 인 경우, 드론의 개수가 두 대인 경우에도 NP-hard임을 보였고, 배터리충전 함수가  $f_i(x) = \beta_i x$ 인 경우에 유사-다항시간 안에 풀릴 수 있음을 증명하였다. 이를 통해, 드론의 개수가  $m$ 대이고, 배터리충전 함수가  $f_i(x) = \beta_i x$ 인 경우는 weakly NP-hard임을 보였다.

드론 배송은 교통 정체를 피할 수 있고 환경오염 절감 등의 사회적 편익을 기대할 수 있기 때문에 많은 기업들이 드론을 물류와 유통에 활용하고자 관심을 가지고 있다. 그러나 드론이 가지고 있는 물리적 한계점(배터리 무게, 용량)은 드론 배송 상용화의 장애요인이 될 수 있다. 따라서 드론 배송을 도입하는 기업 입장에서 배터리는 핵심자원이고 배터리의 잦은 충전과 방전으로 인해 배터리의 수명이 단축하고 이로 인해 드론 운용비용이 증가하는 문제점을 해결할 필요가 있다. 본 연구는 기존의 스케줄링 영역에서 많이 다루지 않은 드론 배터리 할당 및 충전 스케줄링 모형을 제시하고 있다. 본 연구 결과는 드론 운용을 검토하고 있거나 담당 실무자의 의사결정을 지원할 수 있으며 학술적으로는 효율적인 드론 운영 및 배터리 충전 스케줄링 알고리즘 개발의 시발점이 될 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] Agatz, N., Bouman, P., & Schmidt, M. (2018). Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*, 52(4), 965-981.
- [2] Ahuja, R. A., Mehlhorn, K., & Orlin, J. B. (1990). Faster algorithm for the shortest path problem. *Journal of the Association for Computing*

- Machinery*, 37, 213-223.
- [3] Garey, M. R. & Johnson, D. S. (1979), *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness*, W. H. Freeman, New York.
  - [4] Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., & Rinnooy Kan, A.H.G. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. *Annal of Discrete Mathematics*, 5, 287-326.
  - [5] Ha, Q. M., Deville, Y., Pham, Q. D., & Hà, M. H. (2018). On the min-cost traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86, 597-621.
  - [6] Lee, C.Y. & Chen, Z.L. (2000). Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines. *Naval Research Logistics*, 47, 145-165.
  - [7] Murray, C.C., & Chu, A.G. (2015). The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54, 86-109.
  - [8] Park, S., Zhang, L., & Chakraborty, S. (2017). Battery assignment and scheduling for drone delivery businesses. In 2017 IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED), 1-6.
  - [9] Qi, A., Chen, T., & Tu, F. (1999). Scheduling the maintenance on a single machine. *Journal of the Operational Research Society*, 50, 1071-1078.
  - [10] Tajrian, M. & Kim, J. (2019). Power Charge Scheduling and Charge-Ready Battery Allocation Algorithms for Real-Time Drones Services. *KIPS transactions on computer and communication systems*, 8(12), 277-286.
  - [11] Torabbeigi, M., Lim, G. J., & Kim, S.J. (2020). Drone Delivery Scheduling Optimization Considering Payload-induced Battery Consumption Rates. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97, 471 - 487.
  - [12] Rebai, M., Kacem, I., & Adjallah, K.H. (2013). Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines. *Operational Research*, 13, 363 - 383.
  - [13] Jung, H.& Lee, H.K (2015). Trends in Logistics Delivery Services Using UAV. *Postal Information*, 101, 13-39.

## 부록

**주장 1-1 증명:**  $g > m$  이라고 가정하자.  $|\hat{J}_h| \leq 3$ ,  $h = 1, 2, \dots, g$  이고  $A > \frac{3}{2}m(m+1)$  이기 때문에 아래 부등식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{3m} C_j(\hat{\sigma}) &\geq \sum_{h=1}^g (h-1)A^2 |\hat{J}_h| \geq \sum_{i=2}^{m-1} 3(h-1)A^2 + \sum_{h=m}^g (h-1)A^2 |\hat{J}_h| \\ &\geq \sum_{h=1}^{m-1} 3(h-1)A^2 + 2(m-1)A^2 + mA^2 = \frac{3}{2}m(m-1)A^2 + A^2 > K. \end{aligned}$$

위 부등식은 모순이므로 주장 1-1은 성립한다.  $\square$

**주장 1-2 증명:** 주장 1-2가 성립하지 않는다고 가정하자.  $B = A$  이기 때문에, 아래 부등식이 성립한다.

$$\sum_{j \in \bigcup_{h=1}^k \hat{J}_h} p_j \leq kA, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

$l$ 을 아래 식을 만족하는 값이라고 하자.

$$\sum_{j \in \bigcup_{h=1}^k \hat{J}_h} p_j = kA, \quad k = 1, 2, \dots, l-1 \quad \text{와} \quad \sum_{j \in \bigcup_{h=1}^l \hat{J}_h} p_j < lA.$$

그렇다면, 아래 부등식이 성립한다.

$$\sum_{j \in \bigcup_{h=l+1}^m \hat{J}_h} p_j > (m-l)A,$$

위 부등식과  $B = A$  이기 때문에,  $\bigcup_{h=l+1}^m \hat{J}_h$ 에 속한 작업들의 충전 횟수는  $(m-l)$ 이다. 이것은 주장 1-1에 모순이므로 주장 1-2는 성립한다.  $\square$

**주장 2-1의 증명:** 주장 2-1이 성립하지 않는다고 하자. 즉,  $B^0 \geq \sum_{j \in J_1^*} p_j + p_{\pi_2^*(1)}$  이라고 하자.  $\bar{\sigma}$ 을 작업  $\pi_2^*(1)$ 을  $\pi_1^*$ 의 마지막 순서에 이동시켜 구성된 스케줄이라고 하자.  $\sum_{j \in J_1^*} p_j + p_{\pi_2^*(1)} \leq B^0$  이기 때문에,  $\bar{\sigma}$ 는 가능 스케줄이다. 그런데,  $j \in 1, 2, \dots, n \setminus \pi_2(1)$ 에 대해,

$$C_{\pi_2(1)}^-(\bar{\sigma}) < C_{\pi_2^*(1)}^*(\sigma^*) \quad \text{와} \quad C_j(\bar{\sigma}) = C_j(\sigma^*)$$

이기 때문에 아래 식을 성립한다.

$$\sum_{j=1}^n C_j(\bar{\sigma}) < \sum_{j=1}^n C_j(\sigma^*).$$

즉, 이는 모순이므로 주장 2-1이 성립한다.  $\square$

**주장 2-2의 증명:** 정리 2-2가 성립하지 않는다고 하자.  $t$ 는 다음 부등식을 만족하는 가장 작은 값이라고 하자.

$$\sum_{j \in \bigcup_{h=1}^t J_h} p_j < B^0 + \sum_{h=1}^{t-1} x_h^*.$$

$\bar{\sigma}$ 는  $\sigma^*$ 로부터  $\bar{x}_{t-1} = x_{t-1}^* - \epsilon$  과  $\bar{x}_t = x_t^* + \epsilon$  으로 변환함으로써 구성된 스케줄이라고 하자. 단,  $\epsilon > 0$  인 충분히 작은 값이다. 참고로, 아래 부등식이 성립하기 때문에,  $\bar{\sigma}$ 은 가능 스케줄이다. 그런데,  $k \in 1, 2, \dots, t-1$ 에 대해,

$$\sum_{j \in \bigcup_{h=1}^k J_h} p_j \leq B^0 + \sum_{h=1}^{k-1} \bar{x}_h \text{ 와 } \sum_{h=1}^k \bar{x}_h = \sum_{h=1}^k x_h^*$$

이기 때문에, 아래 부등식이 성립한다.

$$\sum_{j=1}^n C_j(\sigma) = \sum_{j=1}^n C_j(\bar{\sigma}) + |J_t^*| \epsilon > \sum_{j=1}^n C_j(\bar{\sigma}).$$

위 부등식은 모순이므로, 주장 2-2는 성립한다.  $\square$

**주장 2-3의 증명:** 주장 2-3이 성립하지 하지 않는다고 하자.  $u$ 는 부등식  $|J_u| \geq 2$ 를 만족하는 가장 작은 값이라고 하자.  $\bar{\sigma}$ 는 아래 절차로 구성된 스케줄이라고 하자.

- 단계 1:  $J_u^*$ 을  $\pi_u^*(1)$ 과  $J_u^* \setminus \pi_u^*(1)$ 으로 구분하자.
- 단계 2:  $x_{u-1}^*$ 을 아래와 같이 정의된  $\bar{x}_{u-1,1}$ 과  $\bar{x}_{u-1,2}$ 로 나누자.

$$\bar{x}_{u-1,1} = \begin{cases} p_{\pi_u^*(1)} + \sum_{j \in J_1^*} p_j - B^0 & \text{if } u = 2 \\ p_{\pi_u^*(1)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\bar{x}_{u-1,2}(\bar{\sigma}) = \sum_{j \in J_u^*} p_j - \bar{x}_{u-1,1}$$

- 단계 3:  $\bigcup_{h=1}^{u-1} J_h^*$ 의 마지막 작업 완료 시점에, 드론을  $\bar{x}_{u-1,1}$ 만큼 충전하고 작업  $\pi_u^*(1)$ 을 처리한다.
- 단계 4: 작업  $\pi_u^*(1)$  완료 시점에, 드론을  $\bar{x}_{u-1,2}$ 만큼 충전하고  $J_u^* \setminus \pi_u^*(1)$ 에 있는 작업들을 처리한다.

참고로,  $\bar{\sigma}$ 은 가능 스케줄이고,  $j \in 1, 2, \dots, n \setminus \pi_u(1)$ 에 대해

$$C_{\pi_u(1)}(\bar{\sigma}) < C_{\pi_u(1)}(\sigma) \text{ 와 } C_j(\bar{\sigma}) = C_j(\sigma)$$

이기 때문에, 아래 부등식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^n C_j(\bar{\sigma}) < \sum_{j=1}^n C_j(\sigma).$$

위 부등식은 모순이므로 주장 2-3은 성립한다.  $\blacksquare$

**주장 3-1의 증명:** 주장 3-1이 성립하지 않는다고 하자.  $k$ 를 아래 식을 만족하는 가장 큰 값이라고 하자.

$$|\hat{J}_1 \cap 2k-1, 2k| \neq |\hat{J}_2 \cap 2k-1, 2k|.$$

그렇다면, 아래 부등식들이 성립한다.

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^{2m} C_j(\hat{\sigma}) &\geq \sum_{j=k}^m (m-j+1)(a_{2j-1} + a_{2j}) + a_{2k-1} \\
&> \sum_{j=k}^m (m-j+1)(a_{2j-1} + a_{2j}) + \sum_{j=1}^{k-1} (m-j+1)(a_{2j-1} + a_{2j}) = K .
\end{aligned}$$

위 부등식은 모순이므로 정리 3-1은 성립한다.  $\square$

**주장 3-2의 증명:** 만약  $\sum_{j \in J_1} p_j < A$  이면,  $\sum_{j \in J_2} p_j > A$  이 성립한다. 이는 드론 2가 마지막 작업  $\hat{\sigma}_2(m)$  하기 전에 반드시  $(\sum_{j \in J_2} p_j - A)$  동안 충전해야 한다는 것을 의미한다. 이를 통해, 아래 성질을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
&\cdot C_{\hat{\pi}_2(m)}(\hat{\sigma}) = (\sum_{j \in J_2} p_j - A) + \sum_{j=1}^m p_{\hat{\pi}_2(j)} \quad ; \\
&\cdot C_{\hat{\pi}_2(j)}(\hat{\sigma}) \geq \sum_{i=1}^j p_{\hat{\pi}_2(i)}, \quad j = 1, 2, \dots, m-1; \\
&\cdot C_{\hat{\pi}_1(j)}(\hat{\sigma}) = \sum_{i=1}^j p_{\hat{\pi}_1(i)}, \quad j = 1, 2, \dots, m.
\end{aligned}$$

그렇다면,

$$\sum_{j=1}^{2m} C_j(\hat{\sigma}) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j \in J_i} C_j(\hat{\sigma}) = (\sum_{j \in J_2} p_j - A) + \sum_{j=1}^m (m-j+1)(a_{2j-1} + a_{2j}) > K .$$

위 부등식은 모순이다. 또한,  $\sum_{j \in J_1} p_j > A$  인 경우도 위와 비슷하게 모순을 보일 수 있으므로, 주장 3-2는 성립함을 알 수 있다.  $\blacksquare$



최 병 천

충남대학교 경상학부 교수  
관심 분야: 운영관리, 최적화,  
스케줄링



정 지 복

공주대학교 산업유통학과 교수  
관심 분야: 유통 최적화, 드론  
배송





## 공급자와 경로 붕괴를 고려한 공급망 네트워크설계모델: 혼합유전알고리즘 접근법

추룬수크 아누다리\*, 윤영수\*†

\*조선대학교 경상대학 경영학부

## Supply Chain Network Design Model Considering Supplier and Route Disruptions: Hybrid Genetic Algorithm Approach

Chuluunsukh Anudari\* · YoungSu Yun\*†

\*Division of Business Administration, Chosun University

In this paper, a supply chain network design (SCND) model considering supplier disruption and route disruption simultaneously is proposed. Since most of conventional studies have focused either on supplier disruption only or on route disruption only, the simultaneous consideration of supplier disruption and route disruption in the SCND model can reinforce its flexibility and efficiency. The SCND model is represented as a mathematical formulation and implemented using a hybrid genetic algorithm (HGA) approach, one of the meta-heuristic approaches. In numerical experiment, the performance of the HGA approach is compared with those of some conventional approaches using various-sized SCND models, and a sensitivity analysis considering i) the change of the number of main suppliers and ii) that of the number of the backup routes at main suppliers is done. Experimental results show that the HGA approach outperforms the conventional competing approaches, and the flexibility and efficiency of the SCND model proposed in this paper is also proved. Finally, the significance of this paper is summarized and a future research direction is remarked in conclusion.

**Keyword** : Supply chain network design, Supplier disruption, Route disruption, Hybrid genetic algorithm

---

† **Corresponding Author** : Division of Business Administration, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 61452, South Korea,  
Tel: +82-62-230-6243, E-mail: ysyun@chosun.ac.kr

**Received**: 12 February 2021, **Revised**: 21 April 2021, **Accepted**: 12 May 2021

## 1. Introduction

Integrating both facility planning at each stage of supply chain and transportation route planning between the facilities, the supply chain network design (SCND) model is one of the important issues in implementing supply chain management. By the integration of facility planning and transportation route planning in the SCND model, the efficiency of its operation and the quick response to customers can be simultaneously achieved. Unfortunately, however, there exist many situations that the SCND model is prone to disruption.

Disruption, one of the risks that can be occurred in the SCND model, has been considered by many literatures (Chopra and Sodhi, 2004; Tang, 2006; Waters, 2007; Jabbarzadeh et al., 2018). Chopra and Sodhi (2004) classified the risks in the SCND model into nine categories. Disruption, one of the categories, is occurred by natural disasters, terrorist attacks, war, etc. Tang (2006) mentioned that disruption risk, one of two main risks, are caused by natural disasters such as earthquakes, floods, or hurricanes and human-made disasters such as terrorist or cyber-attack. Waters (2007) considered disruption as one of the external risks or environmental risks which cannot be controlled. He included extreme weather, earthquakes, hurricanes, wars, etc. in the examples of disruption.

Real-world cases of disruption in the SCND model as follows: Dole, one of the multi-national food companies, suffered serious revenue decline according that their suppliers (banana plantations) were breakdowns by Hurricane Mitch in 1998

(Baghalian et al., 2013). Apple cancelled many customer orders due to the shortage of DRAM chips by Taiwan suppliers when an earthquake hits Taiwan in 1999 (Baghalian et al., 2013). Ericsson has the loss of 400 million Euros because of the supply shortage of semiconductor components by the fire of their suppliers (semiconductor plants) in 2000 (Baghalian et al., 2013). In recent case, the earthquake of Japan in 2011 caused that the twelve assembly plants of Toyota had to cease manufacture, and had the production loss of 140,000 vehicles due to the shortage of component or part supply by the disruption of their suppliers (Baghalian et al., 2013). More examples of disruption in the SCND model have shown in the literatures (Martha and Subbakrishna, 2002; Monahan et al., 2003).

As mentioned-above, we can see that in most real-world cases, the supply problem by supplier disruption can have devastating effect on manufacturers or customers. The supply problem to manufacturer or customers can be classified into two modes: supplier disruption and route disruption.

First, conventional studies with supplier disruption are briefly summarized as follows. Xiao and Yu (2006) designed the three stage SCND model which consists of raw material suppliers, manufacturers, and retailers. The raw material supply disruption by raw material suppliers is considered. By the disruption, the raw material price is changed, which can influence on the product production by manufacturers. The SCND model suggested by Baghalian et al. (2013) consists of three stages with manufacturer, distribution center and retailer. In the SCND

model, a mathematical model for maximizing the total profit (= total revenue – total cost) is developed under considering the disruption of manufacturer. In real-world case study using a small-sized SCND model (three manufacturers, three DCs and nine retailers), they proved the efficiency and availability of the SCND model under the various disruption risks of manufacturer. They also recommended the use of meta-heuristics approaches to prevent the exponential increase of running time when solving large-scaled SCND models. Jabbarzadeh et al. (2018) designed a closed-loop SCND model with supplier, producer, collection center and first customer in forward logistics and disposal center and second customer in reverse logistics. They considered the redundancy of producer to cope with the disruption of producer, so that the product supply by producer can be continuously available. They proved that the SCND model with the redundancy of producer is more efficient in total cost than that with single producer under producer's disruption. Azaron et al. (2021) suggested a four stage SCND model with supplier, manufacturer, warehouse and market under considering various disruption risks of manufacturer. The SCND model was represented by a mathematical model to maximize total profit. They concluded that considering various disruption risks with uncertainty can reinforce resilience in the SCND model. However, similar to Baghalian et al. (2013), the exponential increase of running time when solving larger-sized SCND model is left to the weakness of this study.

Secondly, conventional studies with route disruption are briefly summarized as follows. Lo

and Tung (2003) suggested a network model which route capacity can be decreased when a congestion by traffic accident is occurred in the network. Wang et al. (2012) designed the two stages SCND model which consists of central depot and customers. In the SCND model, vehicle routing problem with time windows (VRPTW) was studied under considering various disruption risks and its recovery processes. Particularly, a transportation route disruption by vehicle breakdown and its recovery by a backup plan were considered in the VRPTW. Server et al. (2013) also designed a network model considering the various situations that the routes within the network can be prone to disruption. In the network model, the traveller should decide the best one of the next feasible routes depending on the current state of the network to minimize travel time. Poudel et al. (2016) suggested a four stage SCND model for the efficient supply of bio-fuel. The suggested SCND model is represented by a mathematical model under considering the disruption of the routes with failure probability within each stage. The objective of the mathematical model is to minimize the total cost under both normal and disruptive scenarios, in order to strengthen the route connection. Abudayyeh, et al. (2018, 2021) constructed a bi-level optimization framework to minimize the impact of disruption under considering that various disruption risks (ex., earthquakes, floods, traffic accidents, adverse weather, industrial action, and in-adequate maintenance) can be occurred in transportation network model. They analysed the influence of driver's re-routing to cope with a partial or

complete disruption of the transportation network.

As mentioned-above, all of conventional studies have focused either on supplier disruption only or on route disruption only, which means that there is no study that both supplier disruption and route disruption are simultaneously considered in the SCND model.

In real-world case, there are many situations that supplier disruption is considered with route disruption at the same time in the SCND model.

For instance, in a SCND model which consists of suppliers and manufacturers, if a supplier is disrupted under the route between the supplier and the manufacturer connected by the supplier is available, then the route is also disrupted, since the route is unavailable by the disruption of the supplier. To overcome this weakness, a backup supplier which can replace the disrupted supplier should be considered and then the supply by the backup supplier can be continued to the manufacturer, though Jabbarzadeh et al. (2018) has considered the supplier's redundancy as a similar concept of backup supplier.

If the main route between a supplier and a manufacturer is disrupted under the supplier and the manufacturer are available, then the supply between the supplier and the manufacturer is also disrupted, since the supply is unavailable by the disruption of the main route. To overcome this weakness, a backup route which can connect the supplier to the manufacturer should be considered and then the supply by the backup route is continued between the supplier and the manufacturer, though the re-route by Abudayyeh, et al. (2018, 2021) or another feasible routes by Server et al. (2013) has been considered as

similar concepts of backup route.

In this paper, to overcome the weaknesses of conventional studies mentioned-above, we propose a SCND model under the situation that supplier disruption and route disruption are simultaneously considered. The proposed SCND model is implemented by a hybrid genetic algorithm (HGA) approach, one of the meta-heuristic approaches, since as already mentioned by Baghalian et al. (2013), most of larger-scaled SCND models cannot be solved using conventional approaches. The major contributions of this paper when compared with conventional studies are as follows:

- Reinforcing the flexibility and efficiency of the SCND model implementation under considering the simultaneous disruption of supplier and route.
- Presenting a mathematical formulation for efficiently representing the SCND model.
- Proving the efficiency of the HGA approach by comparing some conventional meta-heuristic approaches using various-sized SCND models.
- Providing a sensitivity analysis considering the change of the number of main suppliers and that of the number of the main routes at the main supplier.

This paper is organized as follows: In Section 2, we describe the SCND model to be studied in full detail; Section 3 presents the mathematical model for the SCND model; In Section 4, the HGA approach is proposed for implementing the mathematical model; Section 5 shows the computational results and analyses of the

numerical experiments using various- sized SCND models to prove the efficiency of the HGA approach compared with some conventional approaches and also includes a sensitivity analysis; Finally, we conclude the paper in Section 6 and suggest our future research direction.

## 2. Proposed SCND Model

A conceptual flow of the proposed SCND model is described in <Fig. 1>. We assume that three types of part are required for producing a product at manufacturer, and each part is prepared at three supplier groups (i.e., supplier group 1 for part 1, supplier group 2 for part 2, and supplier group 3 for part 3).

One main supplier with one main route and one backup route, and two backup suppliers with one backup route are located in the supplier group 1. First, the main supplier sends part 1 to manufacturer using its main route. However, if the main supplier is disrupted, then one of the two backup suppliers sends part 1 to manufacturer using its backup route. Also, if the main route of the main supplier is disrupted, then one of the three routes (i.e., one backup route of the main supplier and two backup routes of two backup suppliers) is used for sending part 1 to manufacturer. The same situation is also shown in the supplier groups 2 and 3 for parts 2 and 3, respectively.

This type of supply from suppliers to manufacturer using various parts (or materials) is common in assembly industry. For instance, most

of car manufacturing companies (ex. Hyundai Motor Co.) produce cars at their manufacturing plants using various types of parts (or materials) that a number of the suppliers distributed worldwide prepare or produce.

In <Fig. 1>, the importance thing is how to maintain the sustainable and efficient supply from each supplier to manufacturer under disruption risks of main supplier and its main route. In the next section, we propose a mathematical formulation to maintain the sustainable and efficient supply.

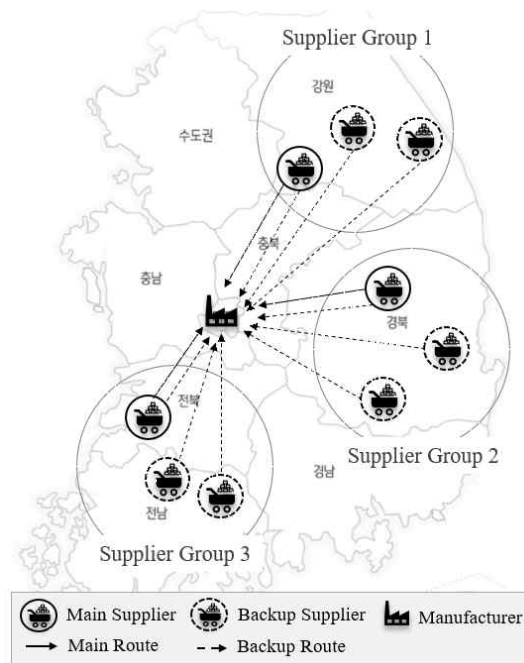


Fig. 1. A Conceptual Flow of the Proposed SCND Model

## 3. Mathematical Formulation

The following assumptions are used for representing the proposed SCND model.

- No priority is considered when choosing backup suppliers considered at each supplier group.
- If main supplier is disrupted, then backup supplier and route should be used, since the backup route of the main supplier is unavailable by the disruption of the main supplier.
- If the main route of a main supplier is disrupted under the main supplier is available, then either the backup route of the main supplier or the backup routes of backup suppliers should be used.
- A single type product is considered.
- The number of suppliers at each supplier group and that of the manufacturer are fixed and known beforehand.
- Only one supplier and one route are available at each supplier group.
- The costs to operate the suppliers considered at each supplier group are all constant, different from each other, and known beforehand.
- The unit handling costs of the suppliers considered at each supplier group are different from each other and known beforehand.
- The unit transportation costs between the suppliers at each supplier group and manufacturer are different from each other and known beforehand.
- The proposed SCND model is considered to be in a steady-state situation.

Indices, sets, parameters, and decision variables are defined as follows:

- Indices and Sets

$m$ : index of manufacturer  $m \in M$ ,  $M$ : set of manufacturers.

$g$ : index of supplier group,  $g \in G$ ,  $G$ : set of supplier groups.

$s$ : index of main supplier,  $s \in S$ ,  $S$ : set of main suppliers.

$s'$ : index of backup supplier,  $s' \in S'$ ,  $S'$ : set of backup suppliers.

$r$ : index of main route,  $r \in R$ ,  $R$ : set of main routes.

$r'$ : index of backup route,  $r' \in R'$ ,  $R'$ : set of backup routes.

- Parameters

$Amgsr$ : quantity transported from main supplier  $s$  of supplier group  $g$  to manufacturer  $m$  using main route  $r$ .

$Amgsr'$ : quantity transported from main supplier  $s$  of supplier group  $g$  to manufacturer  $m$  using backup route  $r'$ .

$Amgsr'$ : quantity transported from backup supplier  $s'$  of supplier group  $g$  to manufacturer  $m$  using backup route  $r'$ .

$Bgs$ : quantity handled at main supplier  $s$  of supplier group  $g$ .

$Bgs'$ : quantity handled at backup supplier  $s'$  at supplier group  $g$ .

$Umgsr$ : unit transportation cost from main supplier  $s$  of supplier group  $g$  to manufacturer  $m$  using main route  $r$ .

$Umgsr'$ : unit transportation cost from main supplier  $s$  of supplier group  $g$  to manufacturer  $m$  using backup route  $r'$ .

$Umgsr'$ : unit transportation cost from backup supplier  $s'$  of supplier group  $g$  to manufacturer

$m$  using backup route  $r'$ .

$H_{gs}$ : unit handling cost at main supplier  $s$  of supplier group  $g$ .

$H_{gs'}$ : unit handling cost at backup supplier  $s'$  of supplier group  $g$ .

$E_{gs}$ : fixed cost at main supplier  $s$  of supplier group  $g$ .

$E_{gs'}$ : fixed cost at backup supplier  $s'$  of supplier group  $g$ .

$C_m$ : capacity of manufacturer  $m$ .

- Decision variables

$x_{gs}$ : takes the value 1 if main supplier  $s$  at supplier group  $g$  is available and 0 otherwise.

$x_{gs'}$ : takes the value 1 if backup supplier  $s'$  at supplier group  $g$  is available and 0 otherwise.

$y_{gsr}$ : takes the value 1 if main route  $r$  of main supplier  $s$  at supplier group  $g$  is available and 0 otherwise.

$y_{gsr'}$ : takes the value 1 if backup route  $r'$  of main supplier  $s$  at supplier group  $g$  is available and 0 otherwise.

$y_{gs'r'}$ : takes the value 1 if backup route  $r'$  of backup supplier  $s'$  at supplier group  $g$  is opened and 0 otherwise.

The objective function is to minimize the total cost ( $TC$ ) as follows. The  $TC$  is the aggregate of the total fixed cost, the total handling costs and the total transportation cost.

$$\begin{aligned} \min. TC = & \sum_m \sum_g \sum_s \sum_r A_{mgsr} \cdot U_{mgsr} \cdot x_{gs} \cdot y_{gsr} + \\ & \sum_m \sum_g \sum_{s'} \sum_{r'} A_{mgs'r'} \cdot U_{mgs'r'} \cdot x_{gs'} \cdot y_{gs'r'} + \\ & \sum_m \sum_g \sum_{s'} \sum_{r'} A_{mgs'r'} \cdot U_{mgs'r'} \cdot x_{gs'} \cdot y_{gs'r'} + \\ & \sum_g \sum_s B_{gs} \cdot H_{gs} \cdot x_{gs} + \sum_g \sum_{s'} B_{gs'} \cdot H_{gs'} \cdot x_{gs'} + \\ & \sum_g \sum_s E_{gs} \cdot x_{gs} + \sum_g \sum_{s'} E_{gs'} \cdot x_{gs'} \end{aligned} \quad (1)$$

In Equation (1), the first term is for the sum of the transportation costs at main suppliers and main routes, the second terms for the sum of the transportation costs at main suppliers and backup routes, the third terms for the sum of the transportation costs at backup suppliers and backup routes. As a same meaning, the fourth and fifth terms represent for the sum of the handling costs at main suppliers and that of the handling costs at backup suppliers, respectively. The sixth and seventh terms represent for the sum of the fixed costs at main suppliers and that of the fixed costs at backup suppliers, respectively.

The objective function shown in Equation (1) should be optimized with respect to the following constraints.

$$\sum_s x_{gs} + \sum_{s'} x_{gs'} = 1, \quad \forall g \quad (2)$$

$$\sum_s \sum_r y_{gsr} + \sum_s \sum_{r'} y_{gsr'} + \sum_{s'} \sum_{r'} y_{gs'r'} = 1, \quad \forall g \quad (3)$$

$$\sum_g \sum_s \sum_r A_{mgsr} \cdot x_{gs} \cdot y_{gsr} + \sum_g \sum_{s'} \sum_{r'} A_{mgs'r'} \cdot x_{gs'} \cdot y_{gs'r'} \leq C_m, \quad \forall m \quad (4)$$

$$x_{gs} \cdot y_{gsr'} \leq \sum_g \sum_s B_{gs} \cdot x_{gs}, \quad \forall m \quad (5)$$

$$\sum_g \sum_{s'} \sum_{r'} A_{mgs'r'} \cdot x_{gs'} \cdot y_{gs'r'} \leq \sum_g \sum_{s'} B_{gs'} \cdot x_{gs'}, \quad \forall m \quad (6)$$

$$\sum_g \sum_s \sum_r A_{mgsr} \cdot x_{gs} \cdot y_{gsr} + \sum_g \sum_{s'} \sum_{r'} A_{mgs'r'} \cdot x_{gs'} \cdot y_{gs'r'} \leq C_m, \quad \forall m \quad (7)$$

$$x_{gs}, x_{gs'}, y_{gsr}, y_{gsr'}, y_{gs'r'} \in \{0, 1\}, \quad \forall g, s, s', r, r' \quad (8)$$

Equation (2) represents the opening constraint of main suppliers and backup suppliers at each supplier group. Another opening constraint at the main routes and backup routes of main suppliers and the backup routes of backup suppliers is shown in Equation (3). The amounts which can be transported from each supplier are subjected in

Equations (4) and (5). Transportation amount between the suppliers at each supplier group and manufacturer are restricted in Equation (6). Opening and closing constraints at main suppliers, main routes, backup suppliers, and backup routes are shown in Equation (7).

#### 4. HGA Approach

As already mentioned above (Baghalian et al., 2013), most complicated network models including the proposed SCND model have been known as NP-complete problems (Savaskan, 2004; Gen et al., 2018; Yun et al., 2020). Existing literatures have shown that meta-heuristic approaches such as genetic algorithm, Tabu search, particle swarm optimization and Cuckoo search (CS) have been adapted to solve complicated network models efficiently (Savaskan, 2004; Gen et al., 2018; Gen and Cheng, 2020; Yun et al., 2018, 2020). However, there exists many situations that most single-based meta-heuristic approaches do not be well adapted (Yun, 2006; Yun et al., 2013; Gen and Cheng, 2020). To cope with this weakness, various hybrid approaches hybridizing conventional single-based meta-heuristic approaches have been developed and their efficiency has also been proved (Lin et al., 2009; Zhang et al., 2012; Xinyu and Liang, 2016).

Therefore, as a same trend, a HGA approach, called the pro-HGA approach, is proposed in this paper. The proposed HGA approach combines GA approach with CS approach. In fact, the HGA approach combining GA approach with CS approach was firstly developed by Kanagaraj et

al. (2013). They adapted GA approach for global search and CS approach for local search in whole search space. First, for GA loop, initial population is randomly generated and then selection, crossover and mutation operators are adapted in initial population to produce offspring population. Secondly, for CS loop, the offspring population of GA loop suffers from re-searching process by Lévy flight scheme (Kanagaraj et al., 2013) to produce more respective solutions. However, the search efficiency of the HGA approach by Kanagaraj et al. (2013) can be decreased, since re-searching process by Lévy flight scheme is done by just one time in CS loop. To improve this weakness, Lévy flight scheme are applied to all solutions of the offspring population in the pro-HGA approach, which can achieve continuous improvement of solution during GA and CS search processes. The detailed implementation procedure of the pro-HGA approach is described in <Fig. 2>.



---

```

procedure: pro-HGA approach
begin
   $G_{opt} = 0$ 
   $t \leftarrow 0$  //  $t$ : iteration number
  randomly generate parent population  $GP(t)$  using
  floating-point representation scheme (Gen and Cheng
  1997);
  while (not stop condition)
    generate offspring population  $GO(t)$  from  $GP(t)$  by
    2X crossover and random mutation operators (Gen
    and Cheng 1997);
    evaluate  $GO(t)$ ;
     $GA_{opt} \leftarrow$  best solution of  $GO(t)$ ;
    for each solution  $s_i$  of  $GO(t)$  do
      generate a new solution  $s_{new}$  from  $s_i$  by
      applying Lévy flight scheme (Kanagaraj et al.,
      2013);
      randomly select a solution  $s_i$  in  $GO(t)$ ;
      if ( $F(s_{new}) > F(s_i)$ ) then
         $CP(t) \leftarrow s_{new}$  //  $CP(t)$ : CS population
      end
    end
    randomly generate the remainders of  $CP(t)$  for
    keeping population size;
    worst solutions with a fraction rate ( $fr$ ) in  $CP(t)$ 
    are abandoned;
    randomly regenerate new solutions  $s_{news}$  as many
    as  $fr$  and insert  $s_{news}$  into  $CP(t)$ ;
    evaluate  $CP(t)$ ;
     $CS_{opt} \leftarrow$  best solution of  $CP(t)$ ;
    if ( $F(GA_{opt}) > F(CS_{opt})$ ) then  $G_{opt} \leftarrow GA_{opt}$ 
    else  $G_{opt} \leftarrow CS_{opt}$ 
    end
    generate new  $GP(t)$  using elitist selection strategy
    in enlarged sampling space (Gen and Cheng
    1997);
     $t \leftarrow t+1$ 
  end
  output  $G_{opt}$ ;
end

```

---

Fig. 2 Detailed Implementation Procedure of the pro-HGA Approach

## 5. Numerical Experiments

The mathematical formulation suggested in Section 3 is implemented at three different scales of the SCND model as shown in <Table 1>.

The performance of the pro-HGA approach is

compared with a single-based meta-heuristic approach (i.e., GA by Gen and Chang (2000)) and a hybrid-based meta-heuristic approach (i.e., HGA by Kanagaraj et al. (2013)). The GA, HGA and pro-HGA approaches were programmed and run under a same computational environment (MATLAB Version 2014b, IBM compatible PC 1.3 GHz processor-Intel core I5-1600 CPU, 4GB RAM, and OS-X EI).

The parameter settings to implement all approaches are as follows: population size is 5, crossover rate 0.3, and mutation rate 0.2 for the search process of GA. The number of host nests is 20,  $\alpha = 1$  and fraction rate ( $fr$ ) 0.25 for the search process of CS. These setting values were obtained after fine-tuning process of each approach. Total number of iterations is 1,000. To eliminate the randomness in the run of each approach, all results are obtained after 20 independent runs.

The parameter values to implement the mathematical formulation in Section 3 are defined as follows:  $Amgsr = 1,000$ ,  $Amgsr' = 1,000$ ,  $Amgsr'' = 1,000$ ,  $Umgsr = U[1.0, 2.0]$ ,  $Umgsr' = U[2.0, 3.0]$ ,  $Umgsr'' = U[2.0, 3.0]$ ,  $Hgs = U[1.0, 2.0]$ ,  $Hgs' = U[2.0, 3.0]$ ,  $Egs = U[10, 20]$ ,  $Egs' = U[20, 30]$ ,  $Cgs = 1,000$ ,  $Cgs' = 1,000$ ,  $Cm = 1,000$ .

Three measures of performance are used to compare the performances of the GA, HGA and pro-HGA approaches as depicted in <Table 2>.

Table 1. SCND Model at Three Differewnt Scales

Case	# of Supplier group	# of Supplier	# of Main supplier	# of Backup supplier	# of Main route in main supplier	# of Backup route in main supplier	# of Backup route in backup supplier	# of Manufac- turer
1	9	13	1	12	1	1	12	1
2	12	15	1	14	1	1	14	1
3	15	30	1	29	1	1	29	1

Table 2. Measure of performance

Measure	Description
Best Solution (BS)	Best solution in all trails
Average Solution (AS)	Average solution through all trails
Average CPU time (CPU)	Averaged running time through all trails (unit: sec.)

To compare the performances of the GA, HGA and pro-HGA approaches under various disruption situations, four scenarios (Scenario 1 to 4) that main route of main supplier at each supplier group can be disrupted and another four scenarios (Scenarios 5 to 8) that main supplier at each supplier group can be disrupted are taken into consideration, respectively. The detailed descriptions of each scenario are as follows:

- **Scenario 1.** Main route of main supplier in one supplier group is disrupted: Backup route of main supplier and those of backup suppliers are available.
- **Scenario 2.** Main routes of main suppliers in two supplier groups are disrupted: Backup route of main supplier and those of backup suppliers are available.
- **Scenario 3.** Main routes of main suppliers in three supplier groups are disrupted: Backup route of main supplier and those of backup suppliers are available.
- **Scenario 4.** Main routes of main suppliers in four supplier groups are disrupted: Backup route of main supplier and those of backup suppliers are available.
- **Scenario 5.** Main supplier in one supplier group is disrupted: Backup routes of backup suppliers are available.
- **Scenario 6.** Main suppliers in two supplier

groups are disrupted: Backup routes of backup suppliers are available.

- **Scenario 7.** Main suppliers in three supplier groups are disrupted: Backup routes of backup suppliers are available.
- **Scenario 8.** Main suppliers in four supplier groups are disrupted: Backup routes of backup suppliers are available.

In Scenario 1, the main route of main supplier in one supplier group is disrupted. For instance, in Case 1 of <Table 1>, this Scenario means that the main route of main supplier in one supplier group of total 9 ones is disrupted. Same meanings are also applied to Scenarios 2 to 4. In Scenario 5, main supplier in one supplier group is disrupted. For instance, in Case 1 of <Table 1>, this Scenario means that the main supplier in one supplier group of total 9 ones is disrupted. Same meanings are also applied to Scenarios 6 to 8.

The experimental results using the GA, HGA and pro-HGA approaches in Scenarios 1 to 4 are summarized in <Table 3>. In Case 1 of Scenario 1, there is no difference in terms of the BS among the performances of the GA, HGA and pro-HGA approaches. In terms of the AS, the pro-HGA approach shows better performance than the GA and HGA, whereas, the search speed of the GA approach is the quickest in terms of the CPU.

In Cases 2 and 3 of Scenario 1, the performances of the pro-HGA approach are the same with those of the GA and HGA approaches in terms of the BS, while the former outperforms the latter in terms of the AS. The search speed of the GA approach is quicker than those of the

HGA and pro-HGA approaches. In average value of the Gaps 1 and 2, all approaches have the same performance in terms of the BS, while, the pro-HGA approach shows to be slightly better results (0.01) in terms of the AS than the GA and HGA approaches.

The experimental results in Cases 1, 2, and 3 of Scenario 1 show that the pro-HGA approach does not show any merits in terms of the BS rather than the GA and HGA approaches, though the former shows a slightly better performance in terms of the AS than the latter, which implies that the pro-HGA approach fails in the ability for locating a better solution during its search process when compared with the GA and HGA approaches.

In Cases 1, 2 and 3 of Scenarios 2, 3 and 4, the pro-HGA approach shows significantly better performances in terms of the BS and AS, except the CPU than the GA and HGA approaches. This result analysis is quite different when compared with those of Cases 1, 2 and 3 of Scenario 1, which means that adapting the pro-HGA approach is more efficient than adapting the GA and HGA approaches under the situation that the more disruptions at the main route of main supplier can be occurred.

The experimental results using the GA, HGA and pro-HGA approaches in Scenarios 5 to 8 are summarized in <Table 4>. In Case 1 of Scenario 5, the performances of the HGA and pro-HGA approaches are the same with each other, and their performances is slightly better than that of the GA in terms of the BS. In terms of the AS, the performances of the pro-HGA approach are superior to those of the GA and HGA

approaches, while, the search speeds of the GA approach are the quickest in terms of the CPU. Similar situations of the Cases 2 and 3 of Scenario 5 are also shown in the Cases 1, 2 and 3 of Scenarios 6, 7 and 8. Most Cases of Scenarios 6, 7 and 8 show that the pro-HGA approach outperforms the GA and HGA approaches in terms of the BS and AS, except for the CPU. This implies that adapting the pro-HGA approach is more efficient than adapting the GA and HGA approaches under the situation that the more disruptions of main supplier can be occurred.

For more detailed comparison of the GA, HGA and pro-HGA approaches in their search processes, <Figs. 3 and 4> show the convergence behaviours of the GA, HGA and pro-HGA approaches in Case 3 of Scenario 4 and Case 3 of Scenario 8.

In <Fig. 3>, the pro-HGA approach shows a better convergence behaviour than the GA and HGA approaches, though all approaches show various and quick convergence behaviours during initial generations. Similar convergence behaviours are also shown in <Fig. 4>. The GA and pro-HGA approaches show one- or two-times convergence behaviours at about 6 generations and 10 generations, respectively, and the HGA approach shows continuous convergence behaviours until about 12 generations. However, in the view of total generations, it can be shown that the convergence behaviours of the pro-HGA approach is superior to those of the GA and HGA approaches.

Table 3. Experimental results using GA, HGA and pro-HGA in Scenarios 1 - 4

Scenario	Case	GA					HGA					Pro-HGA		
		BS	AS	CPU	Gap 1 (%)	Gap 2 (%)	BS	AS	CPU	Gap 1 (%)	Gap 2 (%)	BS	AS	CPU
1	1	<b>2,879</b>	2,913	<b>0.335</b>	0.00	0.01	<b>2,879</b>	2,901	0.375	0.00	0.01	<b>2,879</b>	<b>2,879</b>	0.495
	2	<b>3,728</b>	3,742	<b>0.355</b>	0.00	0.00	<b>3,728</b>	3,729	0.385	0.00	0.00	<b>3,728</b>	<b>3,728</b>	0.492
	3	<b>4,597</b>	4,635	<b>0.375</b>	0.00	0.01	<b>4,597</b>	4,624	0.390	0.00	0.01	<b>4,597</b>	<b>4,597</b>	0.506
		Avg.			0.00	0.01	Avg.			0.00	0.01			
2	1	2,920	3,059	<b>0.379</b>	0.01	0.05	<b>2,879</b>	2,983	0.390	0.00	0.03	<b>2,879</b>	<b>2,904</b>	0.495
	2	2,496	2,627	<b>0.382</b>	0.04	0.05	2,489	2,690	0.391	0.03	0.08	<b>2,410</b>	<b>2,498</b>	0.498
	3	4,725	4,806	<b>0.394</b>	0.03	0.03	4,730	4,818	0.452	0.03	0.04	<b>4,597</b>	<b>4,655</b>	0.510
		Avg.			0.03	0.05	Avg.			0.02	0.05			
3	1	3,061	3,171	<b>0.403</b>	0.06	0.06	2,898	3,120	0.442	0.00	0.05	<b>2,892</b>	<b>2,985</b>	0.498
	2	3,962	4,061	<b>0.416</b>	0.06	0.06	3,869	4,031	0.445	0.04	0.05	<b>3,730</b>	<b>3,837</b>	0.501
	3	4,730	4,872	<b>0.420</b>	0.03	0.02	4,719	4,798	0.453	0.02	0.01	<b>4,612</b>	<b>4,758</b>	0.512
		Avg.			0.05	0.05	Avg.			0.02	0.03			
4	1	3,090	3,243	<b>0.428</b>	0.07	0.06	3,038	3,198	0.442	0.06	0.05	<b>2,879</b>	<b>3,056</b>	0.501
	2	4,065	4,182	<b>0.430</b>	0.07	0.06	4,026	4,164	0.480	0.05	0.05	<b>3,817</b>	<b>3,947</b>	0.508
	3	4,874	5,046	<b>0.445</b>	0.02	0.03	4,856	5,011	0.465	0.02	0.02	<b>4,763</b>	<b>4,890</b>	0.518
		Avg.			0.05	0.05	Avg.			0.04	0.04			

\* Boldface is the best value at each performance

\* Gap 1: Difference (%) when compared the performance of GA and HGA with that of pro-HGA in terms of the BS.

\* Gap 2: Difference (%) when compared the performance of GA and HGA with that of pro-HGA in terms of the AS.

\* Avg.: Average value (%) of Gap 1 or Gap 2.

Table 4. Experimental results using GA, HGA and pro-HGA in Scenarios 5 - 8

Scenario	Case	GA					HGA					Pro-HGA		
		BS	AS	CPU	Gap 1 (%)	Gap 2 (%)	BS	AS	CPU	Gap 1 (%)	Gap 2 (%)	BS	AS	CPU
5	1	2,906	2,978	<b>0.335</b>	0.02	0.04	<b>2,853</b>	2,893	0.375	0.00	0.01	<b>2,853</b>	<b>2,859</b>	0.495
	2	3,690	3,752	<b>0.355</b>	0.01	0.01	<b>3,675</b>	3,735	0.385	0.00	0.01	<b>3,675</b>	<b>3,709</b>	0.492
	3	4,584	4,626	<b>0.375</b>	0.01	0.01	<b>4,544</b>	4,579	0.390	0.00	0.00	<b>4,544</b>	<b>4,575</b>	0.506
		Avg.			0.01	0.02	Avg.			0.00	0.01			
6	1	2,901	3,031	<b>0.379</b>	0.01	0.04	2,901	3,023	0.390	0.01	0.03	<b>2,880</b>	<b>2,926</b>	0.495
	2	3,764	3,927	<b>0.382</b>	0.02	0.05	3,731	3,892	0.391	0.01	0.04	<b>3,690</b>	<b>3,738</b>	0.498
	3	4,625	4,771	<b>0.394</b>	0.01	0.03	4,611	4,764	0.452	0.01	0.03	<b>4,573</b>	<b>4,643</b>	0.510
		Avg.			0.01	0.04	Avg.			0.01	0.03			
7	1	2,879	3,023	<b>0.403</b>	0.01	0.04	<b>2,853</b>	2,984	0.442	0.00	0.03	<b>2,853</b>	<b>2,911</b>	0.498
	2	3,767	3,908	<b>0.416</b>	0.03	0.04	3,758	3,911	0.445	0.02	0.04	<b>3,675</b>	<b>3,747</b>	0.501
	3	4,692	4,872	<b>0.420</b>	0.02	0.03	4,663	4,821	0.453	0.01	0.02	<b>4,614</b>	<b>4,740</b>	0.512
		Avg.			0.02	0.04	Avg.			0.01	0.03			
8	1	3,104	3,299	<b>0.428</b>	0.05	0.06	3,060	3,232	0.442	0.03	0.04	<b>2,967</b>	<b>3,109</b>	0.501
	2	3,909	4,079	<b>0.430</b>	0.03	0.03	3,905	4,125	0.480	0.03	0.04	<b>3,796</b>	<b>3,948</b>	0.508
	3	4,861	5,041	<b>0.445</b>	0.03	0.03	4,855	5,048	0.465	0.03	0.03	<b>4,698</b>	<b>4,895</b>	0.518
		Avg.			0.04	0.04	Avg.			0.03	0.04			

\* Boldface is the best value at each performance

\* Gap 1: Difference (%) when compared the performance of GA and HGA with that of pro-HGA in terms of the BS.

\* Gap 2: Difference (%) when compared the performance of GA and HGA with that of pro-HGA in terms of the AS.

\* Avg.: Average value (%) of Gap 1 or Gap 2.

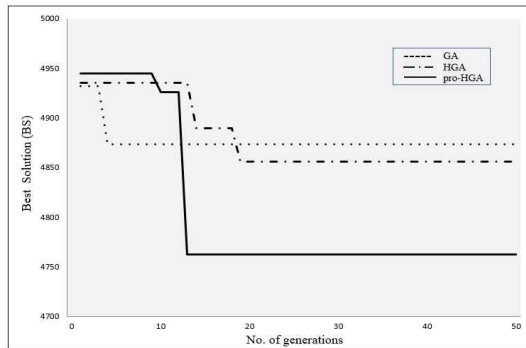


Fig. 3 Convergence Behaviours of the GA, HGA and pro-HGA Approaches in Case 3 of Scenario 4

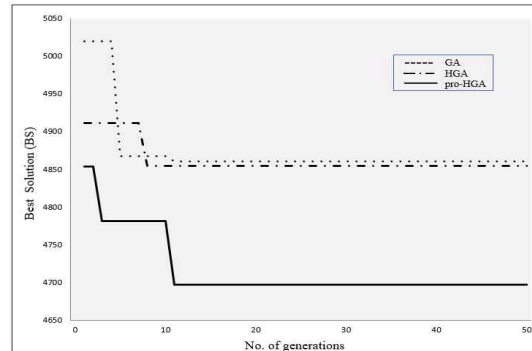


Fig. 4 Convergence Behaviours of the GA, HGA and pro-HGA Approaches in Case 3 of Scenario 8

<Fig. 5> shows the result of using Scenario 1 in Case 1.

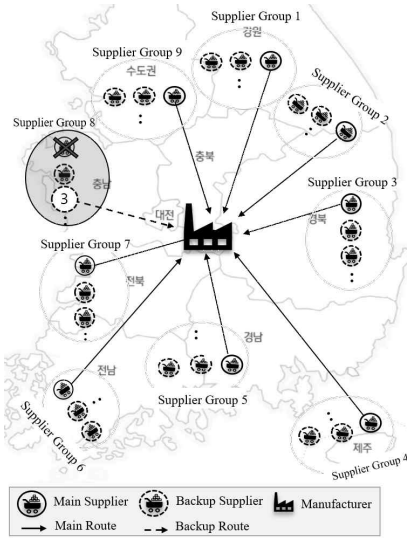


Fig. 5 Result of using Scenario 1 in Case 1

As shown in <Fig. 5>, among all supplier groups, the main supplier of the supplier group 8 is disrupted. By the disruption of the main supplier, third backup suppliers send parts to manufacturer using its backup route.

### 5.1 Sensitivity Analysis

In the analysis using each Scenario mentioned-above, we considered that the number of backup route of main supplier is fixed as constant 1. However, in real-world case, there exist many situations that various backup routes

can be considered. Therefore, it will be worthwhile to consider various backup routes in main supplier. <Table 5> shows the change of the number of the backup routes in main supplier at Case 3 of Scenario 4.

<Fig. 6> shows the performance of the pro-HGA approach in terms of the BS using <Table 5>. In <Fig. 6>, a continuous decrease trend of the values in terms of the BS is shown and the average decrease rate is 1.04%, which means that the total cost for operating the SCND model can be decrease through the continuous increase of the number of backup routes.

For another sensitivity analysis, we consider the increase of the number of suppliers in supplier group. <Table 6> shows the change of the number of suppliers at Case 3 of Scenario 8.

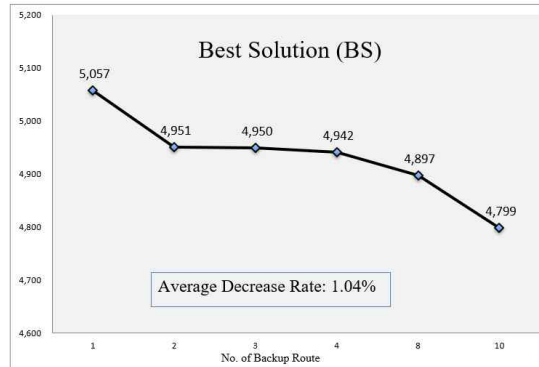


Fig. 6 Performances of the pro-HGA Approach for the Change of the Number of the Backup Routes

Table 5. Change of the Number of Backup Routes in Main Suppliers at Case 3 of Scenario 4

Case	# of Supplier group	# of Supplier	# of Main supplier	# of Backup supplier	# of Main route in main supplier	# of Backup route in main supplier	# of Backup route in backup supplier	# of Manufacturer
1	15	30	1	29	1	1	29	1
2	15	30	1	29	1	2	29	1
3	15	30	1	29	1	3	29	1
4	15	30	1	29	1	4	29	1
5	15	30	1	29	1	8	29	1
6	15	30	1	29	1	10	29	1

Table 6. Change of the Number of Suppliers at Case 3 of Scenario 8

Case	# of Supplier group	# of Supplier	# of Main supplier	# of Backup supplier	# of Main route in main supplier	# of Backup route in main supplier	# of Backup route in backup supplier	# of Manufacturer
1	15	2	1	1	1	1	1	1
2	15	5	1	4	1	1	4	1
3	15	10	1	9	1	1	9	1
4	15	15	1	14	1	1	14	1
5	15	20	1	19	1	1	19	1
6	15	25	1	24	1	1	24	1
7	15	30	1	29	1	1	29	1

<Fig. 7> shows the performance of the pro-HGA approach in terms of the BS using <Table 6>. Similar to <Fig. 6>, <Fig. 7> also shows the continuous decrease of the values in terms of the BS and the average decrease rate is 0.70%. This implies that the total cost for operating the SCND model can be decrease through the continuous increase of the number of suppliers.

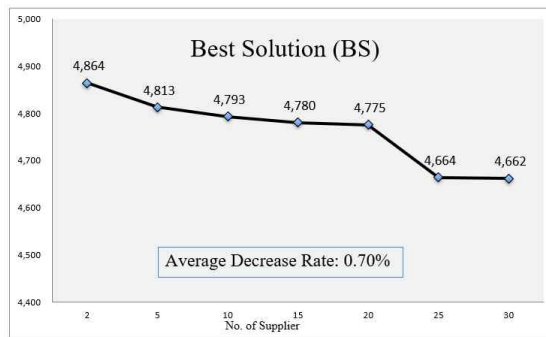


Fig. 7 Performances of the pro-HGA Approach for the Change of the Number of Suppliers

Both <Fig. 6> and <Fig. 7> show the continuous decrease of the total cost through continuous increases of the number of backup routes and that of suppliers. However, if we want to decrease the total cost more rapidly in operating the SCND model, it will be worthwhile to increase the number of backup routes of main supplier rather than to increase the number of suppliers.

## 6. Conclusion

In real-world case, there exist many situations that supplier and transportation route can be disrupted due to natural disasters such as earthquakes, floods, or hurricanes and human-made disasters such as terrorist or cyber-attack. These types of disruption have been considered in many conventional literatures. Unfortunately, however, there is little literature that supplier's disruption and route's disruption can be taken into consideration at the same time.

In this paper, we have proposed a SCND model considering supplier's disruption and route's disruption simultaneously. The proposed SCND model consists of two kinds of supplier (main supplier and backup supplier) and two kinds of route (main route in main supplier and backup route in backup supplier) in each supplier's group.

The proposed SCND model has represented using a mathematical formulation with the objective function of minimizing total cost under satisfying several constraints. The mathematical formulation has been implemented using the pro-HGA approach, one of hybrid meta-heuristic approaches. In numerical experiments, the SCND model with three scales has been presented and the performance of the pro-HGA approach has been compared with those of the GA and HGA

approach in terms of the BS, AS and CPU. The experimental results have shown that the performance of the pro-HGA approach is more efficient than those of the GA and HGA approaches in terms of the BS and AS, except for the CPU. Additionally, two types of sensitivity analysis have been done; the change of the number of backup routes in main supplier, and that of the number of suppliers. The experimental results have shown that the increase of the number of backup routes of main supplier and that of the number of suppliers can decrease the total cost for operating the SCND model.

However, since the SCND model proposed in this paper has a simple supply chain network considering supplier and manufacturer alone, the SCND model should be extended as a multi-stage SCND model linked with supplier, manufacturer, distribution center, retailer and customer. Also, an effort for reducing the search speed of the pro-HGA approach should be required. These two weaknesses of the SCND model and pro-HGA approach will be left to our future research direction.

## REFERENCES

- [1] Azaron, A., Venkatadri, U. & Doost, A. F. (2021). Designing profitable and responsive supply chains under uncertainty, *International Journal of Production Research*, Vol. 59(1), pp. 213-225 <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1785036>
- [2] Abudayyeh D., Ngoduy, D., & Nicholson, A. (2018). Traffic signal optimization in disrupted networks with re-routing, *Transportation Research Procedia*, Vol. 34, pp. 195-202.
- [3] Abudayyeh D., Nicholson, A., & Ngoduy, D. (2021). Traffic signal optimization in disrupted networks to improve resilience and sustainability, *Travel Behaviour and Society*, Vol. 22, pp. 117-128.
- [4] Baghalian, A., Rezapour, S., & Farahani, R. Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case, *European Journal of Operational Research*, Vol. 227, pp. 199-215 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.017>
- [5] Chopra, S., & Sodhi, M. S., (2004). Managing risk to avoid supply chain breakdown, *MIT Sloan Management Review*, Vol. 46(1), pp. 53-62.
- [6] Gen, M. & Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*. John-Wiley & Sons. New York, NY, USA.
- [7] Gen, M., & Cheng, R. (2000). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, John-Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- [8] Gen, M., Lin, L., Yun, Y. S., & Inoue, H. (2018). Recent advances in hybrid priority-based genetic algorithms for logistics and SCM network design, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 115, pp. 394-412.
- [9] Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 116, pp. 178-191.
- [10] Kanagaraj, G., Ponnambalam, S. G., & Jawahar, N. (2013). A hybrid cuckoo search and genetic algorithm for reliability-redundancy allocation problems, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 66, pp. 1115-1125.
- [11] Lin, L., Gen, M., & Wang, X. (2009). Integrated multistage logistics network design by using hybrid evolutionary algorithm, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 56, pp. 854-873.
- [12] Lo, H. K., & Tung, Y-K. (2003). Network with

- degradable links: capacity analysis and design, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 37(4), pp. 345-363.  
[https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00017-6)
- [13] Martha, J., & Subbakraishna, S. (2002). Targeting a just-in-case supply chain for the inevitable next disaster, *Supply Chain Management Review*, Vol. 6(5), pp. 18-23.
- [14] Monahan, S., Laudicina, P., & Attis, D., (2003). Supply chains in a vulnerable volatile world, *Executive Agenda*, Vol. 6(3), pp. 5-15.
- [15] Poudel, S. R., Marufuzzaman, M. & Bian, L. (2016). Designing a reliable bio-fuel supply chain network considering link failure probabilities, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 91, pp. 85-99
- [16] Savaskan, R. C., Bhattacharya, S., & Van Wassenhove, L.V. (2004). Closed-loop supply chain models with product manufacturing, *Management Science*, Vol. 50, pp. 239-252.
- [17] Sever, D., Dellaert, N., Van Woensel, T., & Kok, T. D. (2013). Dynamic shortest path problems: Hybrid routing policies considering network disruptions, *Computers and Operations Research*, Vol. 40, pp. 2852-2863.
- [18] Tang, C. S., (2006). Perspectives in supply chain risk management, *International Journal of Production Economics*, Vol. 103, pp. 451-488.
- [19] Waters, D., (2007). *Supply Chain Risk Management: Vulnerability and Resilience in Logistics*, Kogan Page limited, London, UK.
- [20] Wang, X., Ruan, J., & Shi, Y. (2012). A recovery model for combinational disruptions in logistics delivery: Considering the real-world participators, *International Journal of Production Economics*, Vol. 140, pp. 508-520.
- [21] Xiao, T. & Yu, G. (2006). Supply chain disruption management and evolutionarily stable strategies of retailers in the quantity-setting duopoly situation with homogeneous goods, *European Journal of Operational Research*, Vol. 173, pp. 648-668.
- [22] Xinyu, L., & Liang, G. (2016). An effective hybrid genetic algorithm and Tabu search for flexible job shop scheduling problem, *International Journal of Production Economics*, Vol. 174, pp. 93-110.
- [23] Yun, Y. S. (2006). Hybrid genetic algorithm with adaptive local search scheme, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 51, pp. 128-141.
- [24] Yun, Y. S., Chuluunsukh, A., & Gen, M. (2020). Sustainable closed-loop supply chain design problem: A hybrid genetic algorithm approach, *Mathematics*, Vol. 8(1), pp. 84.  
<https://doi.org/10.3390/math8010084> pp 1-18.  
 2020.01.04
- [25] Yun, Y. S., Chuluunsukh, A. & Chen X., (2018). Hybrid genetic algorithm for optimizing closed-loop supply chain model with direct shipment and delivery, *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 68(6), pp. 683-692.
- [26] Yun, Y. S., Chung, H. S., & Moon, C. U. (2013). Hybrid genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problem, *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 65, pp. 137-147.
- [27] Zhang, Q., Manier, H., & Manier, M.A. (2012). A genetic algorithm with Tabu search procedure for flexible job shop scheduling with transportation constraints and bounded processing times, *Computers and Operations Research*, Vol. 39, pp. 1713-1723.



공급자와 경로 붕괴를 고려한 공급망 네트워크설계모델: 혼합유전알고리즘 접근법



**추문수크 아누다리**

현재: 조선대학교 경영학과 박사  
관심 분야: SCM, 생산최적화



**윤 영 수**

현재: 조선대학교 경영학부 교수  
관심 분야: 물류/SCM, 생산최적화, 유전알고리즘



## 델파이 기법을 이용한 무인기 자율기능 분류에 관한 연구\*

정병호\*\*, 오지현\*\*\*, 설현주\*\*\*\*, 황성인\*\*†

\*\*공군사관학교 · \*\*\*국방과학연구소 · \*\*\*\*충남대학교

## A Study on the Classification of Autonomous Functions of Unmanned Aircraft Using Delphi Method

Byungho Jung\*\* · Jihyun Oh\*\*\* · Hyeonju Seol\*\*\*\* · Seong In Hwang\*\*†

\*\*Republic of Korea Air Force Academy

\*\*\*Agency for Defense Development

\*\*\*\*Chungnam National University

The United States defines the autonomous control level of unmanned aircraft in 10 stages depending on their operational needs or technical maturity, and the level of interoperability in terms of integrated operation of manned and unmanned aircraft in 5 stages. However, it was difficult to find a case in which the autonomous functions of unmanned aircraft were systematically organized from the perspective of perception, planning, and control, which are the mechanisms of activities of autonomous systems. This study aims to systematically classify the autonomous functions of unmanned aircraft according to the mechanisms of autonomous systems in conjunction with aircraft activities. We establish a corresponding layer for each activity by dividing the mechanisms of autonomous systems leading to perception-planning-control into large, medium and small categories in conjunction with the activities of unmanned aircraft. The methodology uses Delphi Method to reflect experts' knowledge in the development and operation of unmanned aircraft.

**Keyword** : Delphi Method, Autonomous Function, Unmanned Aircraft, Perception-Planning-Control

---

※ 이 논문은 국방과학연구소의 지원에 의해 수행한 연구임(UD200021JD, 유무인 협업 공대공 교전을 위한 무인기 전술 및 자율기능 도출).

† Corresponding Author : P.O.Box 335-2, 635 Danjae-ro, Namil-myeon, Sangdang-gu, Cheongju-si, Chungbuk, Korea, 28187,  
Tel: +82-43-290-6546, E-mail: saintwang@gmail.com

Received: 27 April 2021, Revised: 20 May 2021, Accepted: 27 May 2021

## 1. 서론

최근 전 세계적으로 4차 산업혁명의 중요성이 강조되면서 사회 전반과 산업에 엄청난 변화를 일으키고 있다. 4차 산업혁명은 컴퓨터와 인터넷으로 대표되는 3차 산업혁명에서 한 단계 진화한 개념이며, 인공지능을 비롯하여 사물인터넷, 빅데이터, 자율자동차, 3D 프린터, 로봇공학, 생명과학, 나노기술 등의 분야에서 비약적인 기술적 혁신을 보여주고 있다(김대수, 2020). 국방 분야에서도 이러한 기술을 활용한 다양한 무기체계를 개발해 나가고 있으며, 20세기까지 개념적 수준에 머물러 있던 기술들을 활발하게 적용하고 있다. 국방 분야에서는 이러한 기술들을 접목하여 웨어러블 로봇, 무인 전차, 무인 함정, 무인 지뢰 제거 로봇 등 다양한 무기체계를 개발하고 있지만, 그중 으뜸은 3차원 공간에서 전장을 지배하여 전쟁의 양상을 변화시킬 수 있는 무인항공기(이하 무인기로 표현)라고 할 수 있다.

무인기는 인원이 탑승하지 않은 상태로 다양한 자동화 기능을 통해 원격조종이 가능하고, 복원력이 있으며 치명적 또는 비치명적인 탑재체를 적재할 수 있는 비행체로 정의할 수 있다(UK Ministry of Defence, 2011). 2009년 발간된 ‘미공군 무인기 체계 비행계획 2009-2047’에 따르면 무인체계는 인간의 능력이나 생리적 특성에 제한을 받지 않기 때문에 오랫동안 지속적인 활동을 할 수 있고, 기동성의 장점을 갖춘 것으로 평가되고 있다(US Air Force, 2009; 조관행·정현주, 2016).

무인기의 자율기능은 무인기가 다양한 임무를 스스로 수행하기 위해 갖추어야 할 기능이라고 할 수 있다. 전 세계적으로 무인기 기술을 선도하고 있는 미국은 작전적 요구 또는 기술적 성숙도에 따라 무인기의 자율화 수준(Autonomous Control Level)을 10단계로 구분하여 정의하고 있으며, 유인기와 무인기의 통합운용 관점에서는 상호운용성 수준(Level of Interoperability)을 5단계로 구분하여 정의하고 있다(US Office of the Secretary of Defence, 2005; US Army UAS Center of Excellence, 2010). 하지만, 자율체계의 활동 메커니즘인 인지, 판단, 제어의 관점에

서 무인기의 자율기능을 체계적으로 정리한 사례는 찾아보기 어려웠다.

본 연구는 항공기 활동과 연계하여 무인기의 자율기능을 자율체계의 메커니즘에 따라 체계적으로 분류하는 것이 목적이다. 인지(Perception)-판단(Planning)-제어(Control)로 이어지는 자율체계의 메커니즘을 무인기의 활동과 연계하여 대분류, 중분류, 소분류로 구분함으로써 각 활동에 따라 대응하는 자율기능 계층을 정립하였다. 방법론으로는 델파이 기법을 사용하여 무인기의 개발과 운용에 대한 전문가들의 지식을 반영하였다.

## 2. 자율기능

서론에서 제시한 자율기능의 메커니즘인 “인지-판단-제어”는 자율로봇의 초기 구조에서 유래되었다(Brooks, 1986). 이러한 메커니즘은 스스로 움직이는 로봇의 통제시스템으로 정의하고, 인지(Sense) 시스템, 판단(Plan) 시스템, 제어(Act) 시스템으로 분류하였다. 인지 시스템은 센서에 의해 입력되는 외부 상황을 청각, 시각적 인지가 가능하도록 변환하는 단계를 의미한다. 판단의 요소는 인지된 사항을 기준으로 목표를 정의하고, 정의된 목표 달성이 가능하도록 계획을 수립하는 단계를 의미한다. 제어는 로봇이 계획된 목표를 달성하기 위해 필요한 동작을 수행하는 단계를 의미한다. 이러한 메커니즘은 인간의 의사결정 및 반응과 유사하다고 할 수 있다(Forster et al., 2006).

최근 비약적인 기술발전을 이루어 나가고 있는 자율주행 자동차는 이러한 자율로봇의 메커니즘을 적용하고 있는 대표적인 분야이다. 자율주행 자동차는 ‘인지(Perception)-판단(Planning)-제어(Control)’의 3단계를 거치면서 작동하게 된다. 인지단계에서는 카메라·라이더(LiDAR)·레이더(RADAR) 등의 센서로 주변 환경을 인지한다. 판단단계에서는 인지된 환경 정보를 해석하여 안전하고 원활한 주행이 가능한 주행 경로를 생성한

다. 마지막 제어단계에서는 판단단계에서 나온 경로를 추종하도록 하는 가·감속 조향제어를 수행한다(정석우·심현철, 2017). Table 1은 자율주행 자동차에 적용되는 기술 특징을 ‘인지-판단-제어’의 세부 기능에 따라 기술한 것이다.

Table 1. Self-driving car technology features (Source : Research Report of Samsung Transportation Safety Culture Institute 2017-09)

Sortation		Details
Perception	Sensing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 자율주행 자동차의 핵심(외부환경 인지)</li> <li>- 장비유형 : 카메라, 초음파, 레이더, 라이다</li> </ul>
	Measurement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 차량 이동 방향과 속도를 추정하는 기술</li> <li>- 차선 위치 인식 등 고정밀 측위 및 맵핑 기술</li> </ul>
Planning		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 경로 탐색, 자율주행 판단, 위험회피 및 대처 수행</li> <li>- 차선 유지, 차로 변경, 좌우 회전, 비상 정지, 주차 등 행동 판단</li> </ul>
Control		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 조향, 제동, 가속 등 제어</li> <li>- 주어진 경로 주행과 상황 판단에 따른 제동, 자체·자세, 조향장치 등 인간의 손과 발 역할 수행</li> </ul>

자율주행 자동차를 발전시켜 나가기 위한 기술 개발 쟁점은 다음 몇 가지로 요약될 수 있다. 인지 단계에서는 도로 및 교통 환경 인지 기술 고도화, 센서 부품가격 저가화 등을 들 수 있고, 판단단계에서는 인공지능 기반 전방 교통상황 판단의 정확성 확보, 긴급 상황 시 운전제어 전환권 기준 마련 등을 들 수 있으며, 제어단계에서는 첨단운전자보조시스템 기반 동적 제어능력 확보 등을 들 수 있다(삼성교통안전문화연구소, 2017).

무인기와 자동차의 자율기능은 활동공간의 차이(3차원 또는 2차원)만 있을 뿐 유사한 구조라고 할 수 있다. 인지-판단-제어의 단계로 이어지는 자동차의 자율기능 분류에 착안하여 무인기의 자율기능을 분류하였으며, 이러한 자율기능 분류를 토대로 무인기 기술을 체계적으로 발전시켜 나가고, 상황에 따른 기

술적 특징·쟁점 등에 대한 논의를 통해 진정한 무인체계의 발전을 이룰 수 있을 것이다.

### 3. 텔파이 기법(Delphi Method)

본 연구에서 사용한 텔파이 기법은 예측하고자 하는 문제에 관하여 전문가들의 견해를 종합하고 정리하는 일련의 절차로 볼 수 있다. 텔파이(Delphi)라는 명칭은 고대 그리스 신화에서 미래를 통찰하고 신탁을 하였다는 아폴로 신전이 있는 옛 도읍지의 명칭에 따른 것이다 (이종성, 2001; 노승용, 2006; 박경준, 2008; 강용주, 2008).

텔파이 기법은 1950년대 냉전이 시작될 무렵 새로운 기술이 전쟁에 미칠 영향을 예측하기 위해 미국 랜드(RAND)연구소가 개발하였다. 개발 당시에는 적의 공격 가능성, 강도, 빈도 등을 예측하기 위한 목적으로 활용되었다. 이후, 1960년대부터 1970년대에는 텔파이 기법이 널리 알려지게 되었고, 정부, 일반 기업, 학계로 널리 퍼져 다양한 분야에서 미래예측과 의사결정에 활용되고 있다. 미래예측과 의사결정은 불확실성과 복잡성 때문에 전통적인 통계적 기법으로는 한계가 있으며 전문가의 경험과 정통한 판단에 기초한 설명과 예측이 필요하기 때문이다(이길규·김유은·김병남·허태희, 2016).

텔파이 기법은 전문가의 경험과 정통한 판단에 기초하기 때문에 설문 대상자를 선정하는데 신중을 기해야 한다. 설문 대상자는 연구 주제와 관련한 해당 분야 전문가로 구성하며 사회적 명성을 고려하기보다는 관련된 영역에서 전문적 지식과 노하우를 갖추었느냐를 고려해야 한다(김병욱, 2015; 박도순, 2001).

텔파이 기법의 타당성은 계량적 객관의 원리와 민주적 의사결정의 원리를 활용한다는 것에 논리적 근거를 두고 있다. 이 방법은 체계적으로 구성된 일련의 설문지를 동일한 사람에게 3~4회 반복하여 실시하게 되는데, 각 회의 설문지를 이전 회의 설문조사 결과와 함께 제시함으로써, 설문조사 응답자에게 다른 사람들의 정보와 의견이 환류(Feedback)될 수 있도록 고안된 방법이다. 설문의 횟수가 거듭될수록 응

답 결과가 서로 접근하게 되므로 참가자들이 시간과 공간의 제약을 받으며 직접 모여 논쟁을 하지 않고도 합의를 유도해낼 수 있는 조사 방법이다(이화룡·조창희, 2012). 전문가 설문 결과는 내용타당도(Content Validity), 타당도(Validity), 안정도(Stability) 측면에서 타당성 검증을 진행하게 된다.

본 연구에서 델파이 기법을 사용한 이유는 지리적으로 여러 지역에 분포되어 있는 전문가 그룹의 판단을 체계적으로 정리하여 전문가들의 아이디어를 반영하고, 연구의 객관성을 확보하기 위함이다.

### 3.1. 내용타당도(Content Validity) 검증

내용타당도는 Lawshe(1975)가 제시한 내용타당도 비율(Content Validity Ratio : CVR)을 바탕으로 분석한다. CVR은 설문 참여자(패널) 수에 따라 최소값을 제시하고 있으며, 최소값 이상이 되었을 때 문항에 대한 내용타당도가 있는 것으로 판단된다. 식 (1)은 CVR을 계산하는 방법이며, 설문 참여자에 따른 최소값은 Table 2와 같다(강용주, 2008).

$$CVR = \frac{IM - \frac{N}{2}}{\frac{N}{2}} \quad (1)$$

IM : 중요(적합)하다고 응답한 수

N : 설문 참여자(패널) 수

Table 2. Content validity ratio minimum

Number of respondents	Minimum CVR Value
10	0.62
11	0.59
12	0.56
13	0.54
14	0.51
15	0.49
20	0.42
25	0.37
30	0.33
35	0.31
40	0.29

### 3.2. 타당도(Validity) 검증

타당도는 전문가의 의견 수렴과 합의 정도의 분석을 통해 확인할 수 있다. 수렴도는 의견이 한 점에서 모두 수렴하였을 때 0의 값을 가지며, 의견의 편차라 클 경우 그 값이 커진다. 합의도는 1분위 값과 3분위 값이 일치하여 완전 합의했을 때 1의 값을 가지며, 의견의 편차가 클 경우 수치가 감소한다. 즉, 수렴도는 0에 가까울수록 문항이 타당하고, 합의도는 1에 가까울수록 타당함을 의미하며, 식 (2), (3)은 수렴도와 합의도를 계산하는 방법이다(강용주, 2008).

$$\text{수렴도} = \frac{Q_3 - Q_1}{2} \quad (2)$$

$$\text{합의도} = 1 - \frac{Q_3 - Q_1}{Mdn} \quad (3)$$

$Q_3$  : 3분위 값,  $Q_1$  : 1분위 값, Mdn : 중앙값

### 3.3. 안정도(Stability) 검증

반복되는 설문 과정에서 패널들의 설문 응답의 차이가 작아서 응답의 일치성이 높은 경우 안정도가 확보되었다고 볼 수 있다. 일반적으로 서로 다른 평균과 표준편차를 갖는 여러 지표의 상대적인 변동 혹은 산포를 측정하기 위해 평균과 표준편차를 동시에 고려한 변이계수(Coefficient Variation, CV)를 사용한다. 변이계수는 표준편차를 산술평균으로 나눈 값이며, 그 수치가 작을수록 자료들이 평균 주위에 보다 가깝게 분포되어 있다고 볼 수 있다. 일반적으로 변이계수가 0.5 이하인 경우, 추가적인 설문이 필요 없고, 0.5~0.8인 경우, 비교적 안정적이라고 판단하게 되며, 0.8 이상인 경우, 추가적인 설문조사가 필요하다(노승용, 2006; 강용주, 2008).

## 4. 연구 수행 절차

본 연구는 항공기 활동과 연계하여 무인기의 자율 기능을 체계적으로 분류하는 것이 목적이다. 본 연구

에서는 무인기 자율기능 분류를 위해 총 2단계를 적용하였다.

첫 번째 단계는 연구진에 의한 자율기능 1차 분류(초안)를 작성하는 것이다. 인지, 판단, 제어와 관련된 자율기능들은 항공기 활동을 토대로 관련 서적 탐구에서 시작하였다. 서적을 탐구한 연구진들의 브레인스토밍(Brainstorming)에 의한 아이디어와 조종사 3명의 인터뷰를 통해 자율기능 항목을 발췌하였다. 이렇게 발췌된 항목들은 항목 간의 유사성, 관련성을 기준으로 대분류-중분류-소분류의 항목으로 구분하였다.

두 번째 단계는 만들어진 자율기능 분류(초안)를 기준으로 델파이 설문을 작성하여 전문가 설문을 진행하고 결과를 분석하는 단계이다. 설문 항목은 개방형 질문과 폐쇄형 질문을 함께 구성하여 항목 추가, 삭제, 병합과 같은 전문가 의견을 수렴하여 초안에서 분류한 항목의 적절성을 판단하였다. 계속되는 2차와 3차 델파이 조사를 통해 내용타당도, 타당도, 안정도 검증은 진행하였다.

델파이 조사를 위한 전문가 패널은 총 25명으로 구성하였다. 10년 이상 경험을 가진 전투기 조종사 10명, KAI 항공기 개발자 10명과 관련 연구를 진행하고 있는 학계 전문가 5명으로 구성하였으며, 폐쇄형 설문은 리커트 척도법을 사용하였다.

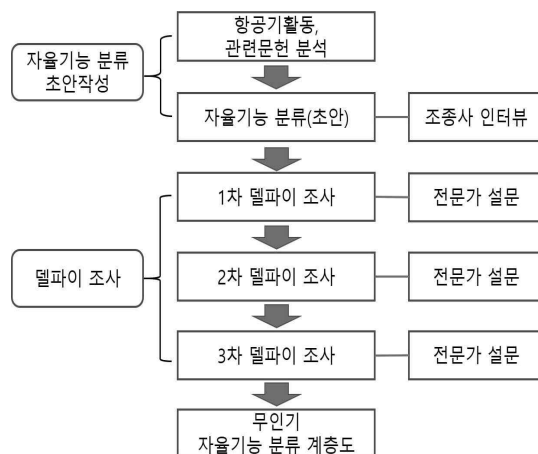


Fig 1. Flow Chart

## 5. 자율기능 분류(초안) 작성

자율기능 분류(초안) 작성은 본 연구의 시작이다. 자율기능 항목은 항공기 활동을 근간으로 무인기에 필요한 전체 자율기능을 대상으로 진행하였다. 자율기능의 메커니즘인 인지-판단-제어를 대분류로 하부 자율기능 항목들을 찾아내는 과정을 거쳤다. 항목들을 찾아내기 전에 인지-판단-제어의 대분류에 포함될 항목들에 대한 대략적인 기준은 Fig 2와 같다.

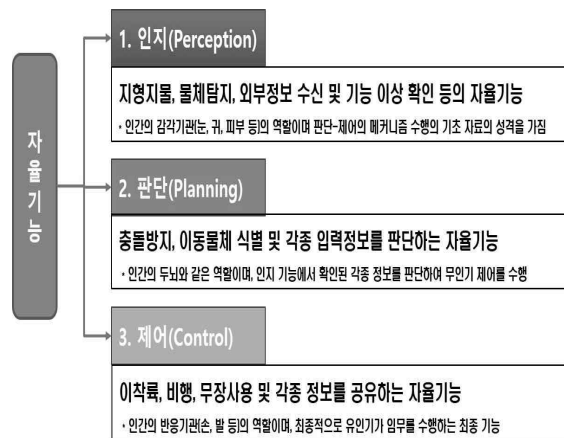


Fig 2. Classification criteria of autonomous function

자율기능 항목들을 분류하기 위해 Military Avionics Systems(Ian Moir-Allan Seabridge, 2006), 항공기 T.O. 등 관련 서적을 통해 항공기 계통과 활동에 대한 연 계구조와 기능들을 식별하였으며, 조종사들의 인터뷰와 체계적인 분석을 통해 항목 간 유사성, 관련성 등을 판단하여 대분류(3항목)-중분류(22항목)-소분류(83항목)의 계층적 구조를 완성하였다. Fig 3은 최초 자율기능 항목 계층도이다.

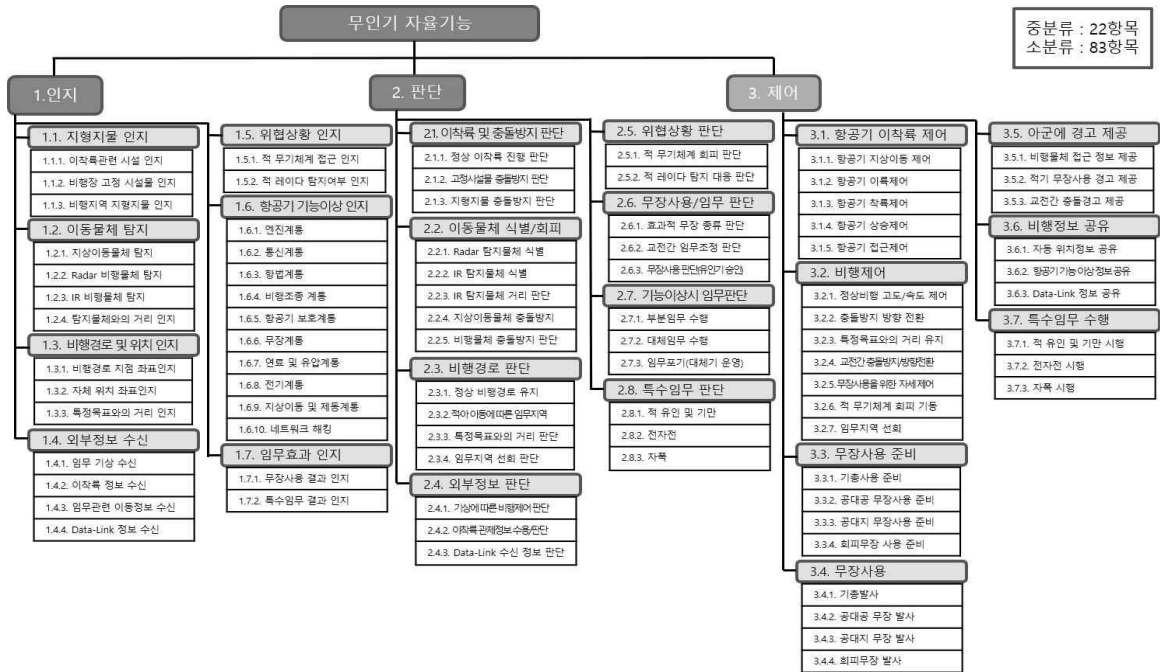


Fig 3. Hierarchy chart (draft)

## 6. 델파이 조사

### 6.1. 1차 델파이 조사

자율기능 분류(초안)를 기준으로 설문을 작성하여 이미 선정된 25명의 전문가 패널에게 배포 후, 회수하여 결과를 분석하였다. 1차 델파이 설문지 항목은 자율기능의 적합성 판단을 위한 폐쇄형 설문(리커트 척도 활용)과 자율기능의 추가/삭제/병합 판단을 위한 개방형 설문을 다수 포함하였다. 설문에 응한 전문가들은 기능별 계층구조의 적합성을 판단하여 폐쇄형 설문에 답하고, 부적합하다고 판단한 항목은 개방형 설문을 통해 의견을 제시하였다. 1차 델파이 설문은 자율기능 계층도에 포함된 항목의 추가/삭제/병합 등 항목조정을 최우선 목표로, 2차, 3차 설문을 위한 문항 적응을 두 번째 목표로 진행하였다. 설문 분석을 통해 대분류 3항목, 중분류 18항목, 소분류 73항목으로 항목을 조정하였다. 추가된 항목은 무인기가 자율적 제어가 되지 않는 우발상황에 대한 추가기능이고, 삭제된 항목은 작전적 판단이 필요한 임무효과 인지

와 기준이 모호한 특수임무와 관련된 부분이며, 병합된 항목은 연속된 동작과 관련한 이동 및 비행제어, 무장/장착장비 사용 기능이다. 자율기능 중 추가/삭제/병합된 대표적인 항목은 Table 3과 같으며, Fig 4는 1차 델파이 설문 후, 조정된 항목들을 반영한 계층도이다.

Table 3. Autonomous function adjustment item (The first Delphi Survey)

Sortation	Adjustment item
추가	3.3. 자율기능 상실 시 제어
삭제	1.7. 임무효과 인지 2.8. 특수임무 판단 3.7. 특수임무 수행
병합	3.1. 항공기 이착륙 제어 + 3.2. 비행제어 → 3.1. 이동 및 비행제어 3.3. 무장사용 준비 + 3.4. 무장사용 → 3.2. 무장/장착장비 사용



델파이 기법을 이용한 무인기 자율기능 분류에 관한 연구

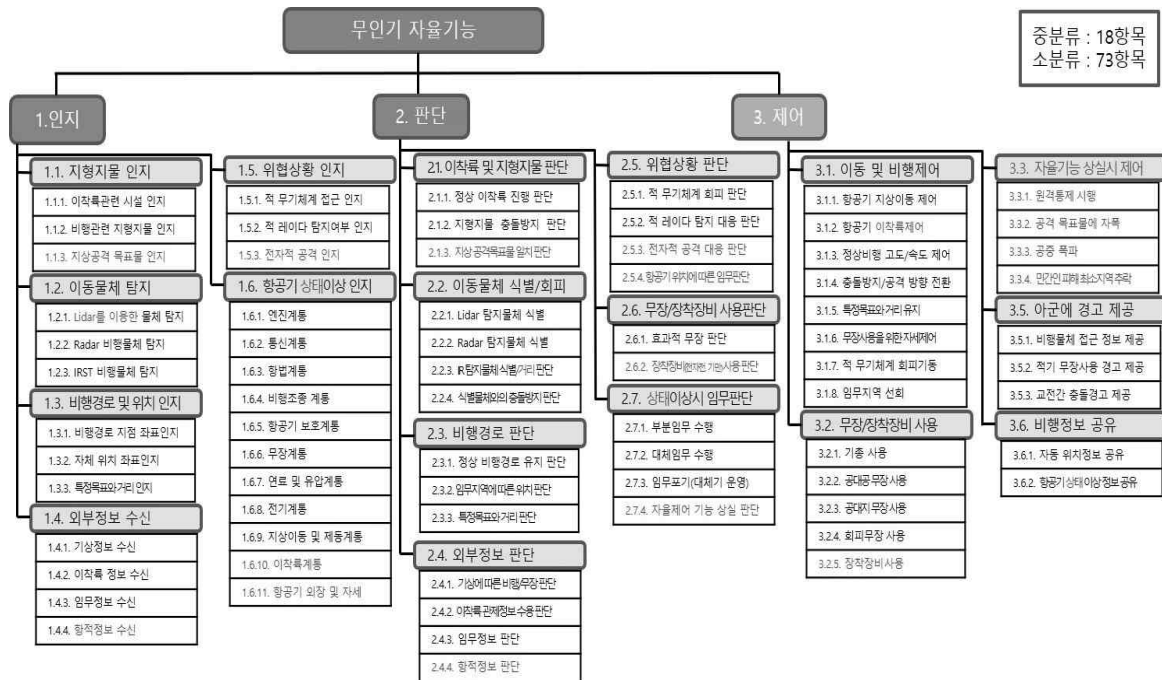


Fig 4. Hierarchy chart (The first Delphi Survey)

## 6.2. 2차 델파이 조사

1차 델파이 조사 결과를 기준으로 설문을 재작성하여 동일한 25명의 패널에 대한 설문 후, 결과를 분석하였다. 2차 델파이 설문의 특징은 1차 델파이 조사에 따른 패널들의 종합된 반응을 공유하였다는 것이다. 이는 1차 델파이 설문에서 본인의 응답과 다른 패널들의 의견을 비교하여 판단할 수 있는 기준을 제공하기 위해서다. 또한, 자율기능 항목 구성에 대한 타당성은 내용타당도, 타당도, 안정도 검증을 통해 확인하였다. 그리고, 개방형 설문을 축소하여 소분류 위주의 자율기능 항목을 보완하였다.

먼저 중분류 18항목의 적합성에 대한 검증을 실시하였다. 5점 척도를 통해 의견을 종합한 결과 모든 항목의 평균이 4점 이상으로 적합한 항목 구성이라 판단할 수 있었다. 내용타당도는 모든 항목이 기준이 되는 최솟값 0.37(25명) 이상으로 나타났으며, 수렴도, 합의도, 변동계수도 타당성 기준을 충족하여 항목이 적절하게 편성되었다는 것을 알 수 있었다. Table 4는 중분류 항목에 대한 타당성 검증 결과이다.

Table 4. Conformity Verification Results (The Second Delphi Survey\_Middle category)

구분	중분류 항목	평균	내용 타당도	수렴도	합의도	변동 계수
인지	1.1. 지형지물 인지	4.52	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.2. 이동물체 탐지	4.64	1.00	0.50	0.80	0.11
	1.3. 비행경로 및 위치 인지	4.56	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.4. 임무관련 외부 정보 수신	4.20	0.68	0.50	0.75	0.17
	1.5. 위협상황 인지	4.52	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.6. 항공기 상태 이상유무 인지	4.52	0.92	0.50	0.80	0.13
판단	2.1. 이착륙 및 임무관련 지형지물 판단	4.52	0.76	0.50	0.80	0.16
	2.2. 이동물체 식별 및 회피 판단	4.72	1.00	0.50	0.80	0.10
	2.3. 비행경로 판단	4.60	0.92	0.50	0.80	0.13
	2.4. 외부정보 판단	4.52	0.92	0.50	0.80	0.13
	2.5. 위협상황 판단	4.72	1.00	0.50	0.80	0.10
	2.6. 무장/장착장비 사용 판단	4.52	0.92	0.50	0.80	0.13
	2.7. 항공기 상태 이상시 임무판단	4.40	0.84	0.50	0.75	0.15
제어	3.1. 이동 및 비행 제어	4.76	0.92	0.00	1.00	0.11
	3.2. 무장/장착장비 사용(인간통제)	4.36	0.84	0.50	0.75	0.15
	3.3. 자율기능 상실에 따른 제어	4.56	1.00	0.50	0.80	0.11
	3.4. 야근에 대한 경고제공	4.40	0.84	0.50	0.80	0.17
	3.5. 비행정보 공유	4.28	0.84	0.50	0.75	0.17

중분류 항목과 같은 방법으로 인지의 소분류 27항목, 판단의 소분류 23항목, 제어의 소분류 22항목에 대한 타당성을 검증하였다. 대부분의 항목이 기준을 충족하였으나, 인지의 소분류 항목 중 1.4.1. 기상정보 수신(기상 관련 부서)은 평균이 3.96으로 4점(적합)에 못 미쳤고, 내용 타당도는 0.36으로 최솟값인 0.37을 넘지 못했으며, 수렴도와 합의도 또한 다른 항목에 비해 적합도가 떨어졌다. Table 5 ~ 7은 인지, 판단, 제어 소분류 항목에 대한 적합성 검증 결과이다.

Table 5. Conformity Verification Results (The Second Delphi Survey\_Small category\_Perception)

구분	소분류 항목	평균	내용 타당도	수렴도	합의도	변동 계수
1.1	1.1.1. 이착륙 관련 시설 인지	4.28	0.68	0.50	0.75	0.17
	1.1.2. 비행관련 시설물 인지	4.40	0.84	0.50	0.75	0.15
	1.1.3. 지상 공격 목표물 인지	4.36	0.76	0.50	0.80	0.19
1.2	1.2.1. Lidar를 이용한 물체 탐지	4.36	0.84	0.50	0.75	0.15
	1.2.2. Radar를 통한 비행물체 탐지	4.56	1.00	0.50	0.80	0.11
	1.2.3. IRST를 통한 비행물체 탐지	4.20	0.76	0.50	0.75	0.15
1.3	1.3.1. 비행경로 지점 좌표 인지	4.60	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.3.2. 자체 위치 좌표 인지	4.60	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.3.3. 특정 목표편조 작기 등위위 거리 인지	4.24	0.68	0.50	0.75	0.20
1.4	1.4.1. 기상정보 수신(기상관련 부서)	3.96	0.36	1.00	0.50	0.20
	1.4.2. 이착륙 정보 수신(관제타워)	4.48	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.4.3. 임무정보 수신(MCRC, 유인기 등)	4.60	1.00	0.50	0.80	0.11
	1.4.4. 함적정보 수신(MCRC, 조기경보기 등)	4.40	0.92	0.50	0.75	0.13
1.5	1.5.1. 적 무기체계 접근 상황 인지	4.56	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.5.2. 적 레이다 탐지 여부 인지	4.64	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.5.3. 전자적 공격 인지	4.36	0.84	0.50	0.75	0.15
1.6	1.6.1. 엔진계통 이상유무 인지	4.64	1.00	0.50	0.80	0.11
	1.6.2. 통신계통 이상유무 인지	4.56	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.6.3. 함법계통 이상유무 인지	4.68	1.00	0.50	0.80	0.10
	1.6.4. 비행조종계통 이상유무 인지	4.72	1.00	0.50	0.80	0.10
	1.6.5. 항공기 보호계통 이상유무 인지	4.32	0.76	0.50	0.75	0.16
	1.6.6. 무장계통 이상유무 인지	4.56	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.6.7. 연료 및 유압계통 이상유무 인지	4.68	1.00	0.50	0.80	0.10
	1.6.8. 전기계통 이상유무 인지	4.56	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.6.9. 지상이동 및 계통계통 이상유무 인지	4.28	0.68	0.50	0.75	0.17
	1.6.10. 이착륙계통 이상유무 인지	4.52	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.6.11. 항공기 외장 및 자세 이상유무 인지	4.56	0.92	0.50	0.80	0.13

Table 6. Conformity Verification Results (The Second Delphi Survey\_Small category\_Planning)

구분	소분류 항목	평균	내용 타당도	수렴도	합의도	변동 계수
2.1	2.1.1. 정상 이착륙 진행 판단	4.68	0.12	0.92	0.50	0.80
	2.1.2. 비행관련 지형지물 충돌 방지 판단	4.64	0.12	0.92	0.50	0.80
	2.1.3. 지상 공격 목표물 일치 여부 판단	4.32	0.21	0.76	0.50	0.80
2.2	2.2.1. Lidar 탐지물체 식별	4.36	0.16	0.76	0.50	0.75
	2.2.2. Radar 탐지물체 식별	4.56	0.11	1.00	0.50	0.80
	2.2.3. IR 탐지물체 식별/거리 판단	4.20	0.14	0.84	0.50	0.75
	2.2.4. 식별물체와 충돌 방지 판단	4.48	0.15	0.84	0.50	0.80
2.3	2.3.1. 정상 비행경로 유지 판단	4.56	0.13	0.92	0.50	0.80
	2.3.2. 임무에 따른 항공기 위치 판단	4.48	0.11	1.00	0.50	0.75
	2.3.3. 특정 목표(편조, 작기 등)의 거리 판단	4.32	0.15	0.84	0.50	0.75
2.4	2.4.1. 기상상황에 따른 비행/무장제어 판단	4.28	0.16	0.76	0.50	0.75
	2.4.2. 이착륙 관련 관제정보 수용 및 판단	4.36	0.13	0.92	0.50	0.75
	2.4.3. 임무정보 판단	4.36	0.17	0.84	0.50	0.75
	2.4.4. 함적정보 판단	4.32	0.17	0.84	0.50	0.75
2.5	2.5.1. 적 무기체계 접근에 따른 회피 판단	4.64	0.12	0.92	0.50	0.80
	2.5.2. 적 레이다 탐지에 따른 대응 판단	4.56	0.13	0.92	0.50	0.80
	2.5.3. 전자적 공격에 따른 대응 판단	4.44	0.11	1.00	0.50	0.75
2.6	2.6.1. 효과적 무장 종류 판단	4.52	0.13	0.92	0.50	0.80
	2.6.2. 장착장비(전자전, 기만 등) 사용 판단	4.20	0.17	0.84	0.50	0.75
2.7	2.7.1. 부분임무 수행	4.16	0.17	0.84	0.50	0.75
	2.7.2. 대대임무 수행	4.20	0.17	0.84	0.50	0.75
	2.7.3. 임무 포기	4.36	0.17	0.84	0.50	0.75
	2.7.4. 자율제어 기능 상실 판단	4.48	0.11	1.00	0.50	0.75

Table 7. Conformity Verification Results (The Second Delphi Survey\_Small category\_Control)

구분	소분류 항목	평균	내용 타당도	수렴도	합의도	변동 계수
3.1	3.1.1. 항공기 지상이동 제어	4.20	0.17	0.68	0.50	0.75
	3.1.2. 항공기 이착륙 제어(추력, 조종면 등)	4.56	0.13	0.92	0.50	0.80
	3.1.3. 정상 경로비행을 위한 고도/속도 제어	4.60	0.14	0.84	0.50	0.80
	3.1.4. 충돌방지 및 공격을 위한 방향전환	4.68	0.12	0.92	0.50	0.80
	3.1.5. 특정 목표(적기, 편조 등)의 거리 유지	4.48	0.13	0.92	0.50	0.80
	3.1.6. 무장사용을 위한 항공기 자세 제어	4.68	0.12	0.92	0.50	0.80
	3.1.7. 적 무기체계 접근에 따른 회피 기동	4.72	0.10	1.00	0.50	0.80
	3.1.8. 임무지역 선회	4.40	0.16	0.76	0.50	0.80
3.2	3.2.1. 기총사용	4.36	0.16	0.76	0.50	0.75
	3.2.2. 공대공 무장(Missile)사용	4.60	0.11	1.00	0.50	0.80
	3.2.3. 공대지 무장사용(Missile, Bomb) 준비	4.56	0.13	0.92	0.50	0.80
	3.2.4. 회피무장(Chaff, Flare) 사용 준비	4.52	0.13	0.92	0.50	0.80
	3.2.5. 장착장비(전자전, 기만) 사용	4.60	0.11	1.00	0.50	0.80
3.3	3.3.1. 원격통제(지상통제소, 유인기) 수행	4.56	0.11	1.00	0.50	0.80
	3.3.2. 공격목표물에 대한 자폭	4.16	0.19	0.68	0.50	0.75
	3.3.3. 공중폭파	4.08	0.20	0.60	0.50	0.75
	3.3.4. 민간인 피해 최소화점 추락 유도	4.48	0.13	0.92	0.50	0.80
3.4	3.4.1. 아군에 대한 비행물체 접근정보 제공	4.36	0.16	0.92	0.50	0.75
	3.4.2. 적기 무장사용 자동 경고 제공	4.28	0.17	0.84	0.50	0.75
	3.4.3. 교전간 충돌 경고 제공	4.24	0.17	0.84	0.50	0.75
3.5	3.5.1. 이동간 자동 위치정보 공유	4.44	0.17	0.84	0.50	0.80
	3.5.2. 항공기 기능 이상유무 정보 제공	4.36	0.17	0.84	0.50	0.75

타당성이 부족하다고 판단된 항목과 추가로 식별된 유사항목 등은 전문가 자문과 분석을 통해 보완하였다. “1.4.1. 기상정보 수신” 항목은 조종사 자문을 통해 필요성 여부를 확인하였으며, 폭탄 투하시 기상 영향 미친다는 것을 확인하여 명칭을 변경하는 것으로 결정하였다. 보완된 항목은 Table 8과 같으며, Fig 5는 2차 델파이 조사 후, 조정된 항목들을 반영한 계층도이다. 계층도에 포함된 항목은 중분류 18항목, 소분류 70항목이다.

Table 8. Autonomous function adjustment item (The second Delphi Survey)

Sortation	Adjustment item
명칭 변경	1.4.1. 기상정보 수신 및 인지(작전기상, 센서)
병합	1.6.9. 지상 이동 및 제동계통 + 1.6.10. 이착륙계통 → 1.6.9. 이착륙 및 제동계통 2.7.1. 부분 임무 수행 + 2.7.2. 대체임무 수행 → 2.7.1 대체임무 수행판단 3.3.3. 공중폭파 + 3.3.4. 민간인 피해 최소 지역 추락 → 3.3.3. 자체 폐기

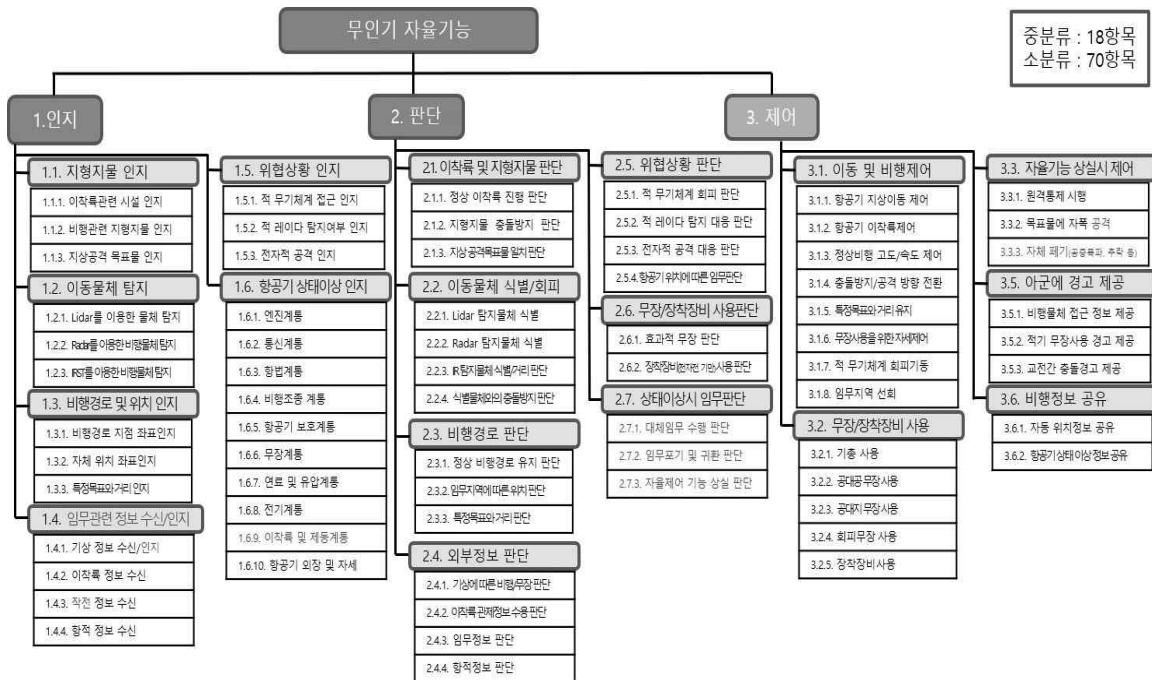


Fig 5. Hierarchy chart(The second Delphi Survey)

### 6.3. 3차 델파이 조사

2차 델파이 조사 결과를 기준으로 설문을 제작하여 동일한 25명의 패널에 대한 설문 후, 결과를 분석하였다. 3차 조사에서도 2차 델파이 조사에 따른 패널들의 중첩된 반응을 공유하였으며, 자율기능 항목 구성에 대한 타당성은 2차 조사와 동일하게 내용

타당도, 타당도, 안정도 검증을 통해 확인하였다. 그리고, 개방형 설문을 통해 소분류 위주의 자율기능 항목을 보완하였다.

먼저 중분류 18항목의 타당성에 대한 검증을 실시하였다. 모든 항목의 평균이 4점(적합) 이상으로 적합한 항목 구성이라 판단할 수 있었다. 내용타당도는 모든 항목이 기준이 되는 최솟값 0.37(25명) 이상으로

나타났으며, 수렴도, 합의도, 변동계수도 타당성 기준을 충족하여 항목이 적절하게 편성되었다는 것을 알 수 있었다. Table 9는 중분류 항목에 대한 적합성 검증 결과이다.

Table 9. Conformity Verification Results (The Third Delphi Survey\_Middle category)

구분	중분류 항목	평균	내용 타당도	수렴도	합의도	변동 계수
1. 인지	1.1. 지형지물 인지	4.60	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.2. 이동물체 탐지	4.80	1.00	0.00	1.00	0.09
	1.3. 비행경로 및 위치 인지	4.60	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.4. 임무 관련 정보 수신/인지	4.32	0.76	0.50	0.75	0.16
	1.5. 위협상황 인지	4.72	1.00	0.50	0.80	0.10
	1.6. 항공기 상태 이상유무 인지	4.64	0.92	0.50	0.80	0.12
2. 판단	2.1. 이착륙 및 임무관련 지형지물 판단	4.72	0.84	0.00	1.00	0.13
	2.2. 이동물체 식별 및 회피 판단	4.88	1.00	0.00	1.00	0.07
	2.3. 비행경로 판단	4.76	0.84	0.00	1.00	0.13
	2.4. 외부정보 판단	4.68	0.92	0.50	0.80	0.12
	2.5. 위협상황 판단	4.88	1.00	0.00	1.00	0.07
	2.6. 무장/장착장비 사용 판단	4.72	0.92	0.00	1.00	0.11
	2.7. 항공기 상태 이상시 임무 판단	4.52	0.84	0.50	0.80	0.14
3. 제어	3.1. 이동 및 비행 제어	4.80	0.92	0.00	1.00	0.10
	3.2. 무장/장착장비 사용(인간통제)	4.56	1.00	0.50	0.80	0.11
	3.3. 자율기능 상실에 따른 제어	4.68	1.00	0.50	0.80	0.10
	3.4. 야간에 대한 경고 제공	4.44	0.84	0.50	0.80	0.15
	3.5. 비행정보 공유	4.28	0.68	0.50	0.75	0.17

중분류 항목과 같은 방법으로 인지의 소분류 26항목, 판단의 소분류 22항목, 제어의 소분류 21항목에 대한 검증을 실시하였다. 대부분의 항목이 기준을 충족하였으나, 인지의 소분류 항목 중 “1.4.1. 기상정보 수신 및 인지(작전기상, 관련 센서)”의 경우, 평균이 4.04로 적합한 항목으로 판단할 수 있었으나, 내용타당도는 0.20로 최솟값인 0.37을 넘지 못했으며, 수렴도와 합의도 또한 다른 항목에 비해 적합도가 떨어졌다. Table 10 ~ 12는 인지, 판단, 제어 소분류 항목에 대한 적합성 검증 결과이다.

Table 10. Conformity Verification Results (The Third Delphi Survey\_Small category\_Preception)

구분	기능분류	평균	내용 타당도	수렴도	합의도	변동 계수
1.1.	1.1.1. 이착륙 관련 시설 인지	4.40	0.60	0.50	0.80	0.19
	1.1.2. 비행관련 지형지물 인지	4.52	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.1.3. 지상 공격 목표물 인지	4.48	0.76	0.50	0.80	0.16
1.2.	1.2.1. Lidar를 이용한 물체 탐지	4.32	0.68	0.50	0.80	0.20
	1.2.2. Radar를 통한 비행물체 탐지	4.80	1.00	0.00	1.00	0.09
	1.2.3.IRST를 통한 비행물체 탐지	4.32	0.60	0.50	0.80	0.19
1.3.	1.3.1. 비행경로 지점 착표 인지	4.64	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.3.2. 자체 위치 착표 인지	4.68	0.92	0.50	0.80	0.12
	1.3.3. 특정목표와의 거리 인지	4.44	0.68	0.50	0.80	0.17
1.4.	1.4.1. 기상정보 수신 및 인지	4.04	0.20	1.00	0.50	0.23
	1.4.2. 이착륙 정보 수신	4.48	0.92	0.50	0.80	0.13
	1.4.3. 작전정보 수신	4.72	1.00	0.50	0.80	0.10
1.5.	1.4.4. 항적 정보 수신	4.56	0.76	0.50	0.80	0.16
	1.5.1. 적 무기체계 접근 상황 인지	4.80	1.00	0.00	1.00	0.09
	1.5.2. 적 레이더 탐지 여부 인지	4.80	0.92	0.00	1.00	0.10
1.6.	1.5.3. 전자적 공격 인지	4.60	0.84	0.50	0.80	0.14
	1.6.1. 엔진계통 이상유무 인지	4.88	1.00	0.00	1.00	0.07
	1.6.2. 통신계통 이상유무 인지	4.76	1.00	0.00	1.00	0.09
1.7.	1.6.3. 함발계통 이상유무 인지	4.88	1.00	0.00	1.00	0.07
	1.6.4. 비행조종계통 이상유무 인지	4.92	1.00	0.00	1.00	0.06
	1.6.5. 항공기 보호계통 이상유무 인지	4.64	0.92	0.50	0.80	0.12
1.8.	1.6.6. 무장계통 이상유무 인지	4.76	1.00	0.00	1.00	0.09
	1.6.7. 연료 및 유압계통 이상유무 인지	4.72	1.00	0.50	0.80	0.10
	1.6.8. 전기계통 이상유무 인지	4.76	1.00	0.00	1.00	0.09
1.9.	1.6.9. 이착륙 및 계통계통 이상유무 인지	4.72	0.84	0.00	1.00	0.13
	1.6.10. 항공기 외장 및 자세 이상유무 인지	4.64	0.92	0.50	0.80	0.12

Table 11. Conformity Verification Results (The Third Delphi Survey\_Small category\_Planning)

구분	기능분류	평균	내용 타당도	수렴도	합의도	변동 계수
2.1.	2.1.1. 정상 이착륙 진행 판단	4.80	0.92	0.00	1.00	0.10
	2.1.2. 비행관련 지형지물 충돌 방지 판단	4.80	0.92	0.00	1.00	0.10
	2.1.3. 지상 공격 목표물 일치 여부 판단	4.64	0.92	0.50	0.80	0.12
2.2.	2.2.1. Lidar 탐지물체 식별	4.40	0.84	0.50	0.80	0.17
	2.2.2. Radar 탐지물체 식별	4.68	1.00	0.50	0.80	0.10
	2.2.3. IR 탐지물체 식별/거리 판단	4.52	0.84	0.50	0.80	0.14
2.3.	2.2.4. 식별물체와 충돌 방지 판단	4.60	0.92	0.50	0.80	0.13
	2.3.1. 정상 비행경로 유지 판단	4.76	0.92	0.00	1.00	0.11
	2.3.2. 임무에 따른 항공기 위치 판단	4.72	1.00	0.50	0.80	0.10
2.4.	2.3.3. 특정 목표(원주, 적기)와의 거리 판단	4.52	0.92	0.50	0.80	0.13
	2.4.1. 기상에 따른 비행/무장제어 판단	4.40	0.76	0.50	0.80	0.16
	2.4.2. 이착륙 관련 관제정보 수용 판단	4.52	0.84	0.50	0.80	0.14
2.5.	2.4.3. 임무 정보 판단	4.52	0.84	0.50	0.80	0.17
	2.4.4. 항적 정보 판단	4.44	0.76	0.50	0.80	0.18
	2.5.1. 적 무기체계 접근에 따른 회피 판단	4.84	1.00	0.00	1.00	0.08
2.6.	2.5.2. 적 레이더 탐지에 따른 대응 판단	4.80	0.92	0.00	1.00	0.10
	2.5.3. 전자적 공격에 따른 대응 판단	4.64	1.00	0.50	0.80	0.11
	2.6.1. 효과적 무장 종류 판단	4.52	0.84	0.50	0.80	0.14
2.7.	2.6.2. 임무에 따른 장착장비 사용 판단	4.32	0.84	0.50	0.75	0.15
	2.7.1. 대체 임무 수행 판단	4.36	0.84	0.50	0.75	0.15
	2.7.2. 임무 포기 및 귀환 판단	4.36	0.68	0.50	0.80	0.20
2.8.	2.7.3. 자율제어 기능 상실 판단	4.56	0.92	0.50	0.80	0.13

텔파이 기법을 이용한 무인기 자율기능 분류에 관한 연구

Table 12. Conformity Verification Results (The Third Delphi Survey\_Small category\_Control)

구분	기능분류	평균	내용 타당도	수렴도	합의도	별첨 계수
3.1.	3.1.1. 항공기 자살이동 제어	4.24	0.68	0.50	0.75	0.17
	3.1.2. 항공기 이착륙(추력, 조종면 등) 제어	4.76	0.92	0.00	1.00	0.11
	3.1.3. 정상 경로비행을 위한 고도/속도 제어	4.68	0.92	0.50	0.80	0.12
	3.1.4. 충돌 방지 및 공격을 위한 방향 전환	4.80	1.00	0.00	1.00	0.09
	3.1.5. 특정 목표(적기, 편조)와의 거리 유지	4.72	0.92	0.00	1.00	0.11
	3.1.6. 무장사용을 위한 항공기 자세 제어	4.84	1.00	0.00	1.00	0.08
	3.1.7. 적 무기체계 접근에 따른 회피 기동	4.84	1.00	0.00	1.00	0.08
	3.1.8. 임무지역 선회	4.40	0.84	0.50	0.75	0.15
3.2.	3.2.1. 기총 사용	4.52	0.92	0.50	0.80	0.13
	3.2.2. 공대공 무장(Missile) 사용	4.76	1.00	0.00	1.00	0.09
	3.2.3. 공대지 무장(Missile, Bomb) 사용	4.80	0.92	0.00	1.00	0.10
	3.2.4. 회피무장(Chaff, Flare) 사용	4.68	0.92	0.50	0.80	0.12
	3.2.5. 장착장비(전차전, 기만) 사용	4.72	0.92	0.00	1.00	0.11
	3.3.1. 원격통제(지상통제소, 유인기) 수행	4.68	1.00	0.50	0.80	0.10
	3.3.2. 목표물에 대한 자동 공격	4.28	0.60	0.50	0.75	0.18
	3.3.3. 자체 폐기(공중 폭파, 추락 등)	4.44	0.76	0.50	0.80	0.16
3.4.	3.4.1. 아군에 대한 비행물체 접근정보 제공	4.68	1.00	0.50	0.80	0.10
	3.4.2. 적기 무장사용 자동 경고 제공	4.64	0.92	0.50	0.80	0.12
3.5.	3.5.1. 이동안 자동 위치정보 공유	4.44	0.92	0.50	0.75	0.13
	3.5.2. 항공기 기능 이상유무 정보 제공	4.48	0.84	0.50	0.80	0.15

타당성이 부족하다고 분석된 “1.4.1. 기상정보 수신 및 인지” 항목은 2차 텔파이 조사 후, 조종사 자문을 통해 필요성 여부를 확인하였으나, 전문가들은 “1.4.2. 이착륙 정보 수신, 1.4.3. 작전정보 수신, 1.4.4. 항적 정보 수신” 과 관련한 하부 항목으로 인식하였다. 이러한 내용을 반영하여 “1.4.1. 기상정보 수신 및 인지” 항목은 삭제하고 최종적으로 중분류 18항목, 소분류 69항목의 자율기능을 확정하였다. Fig 6은 3차 텔파이 조사 후 확정된 최종 계층도이다.

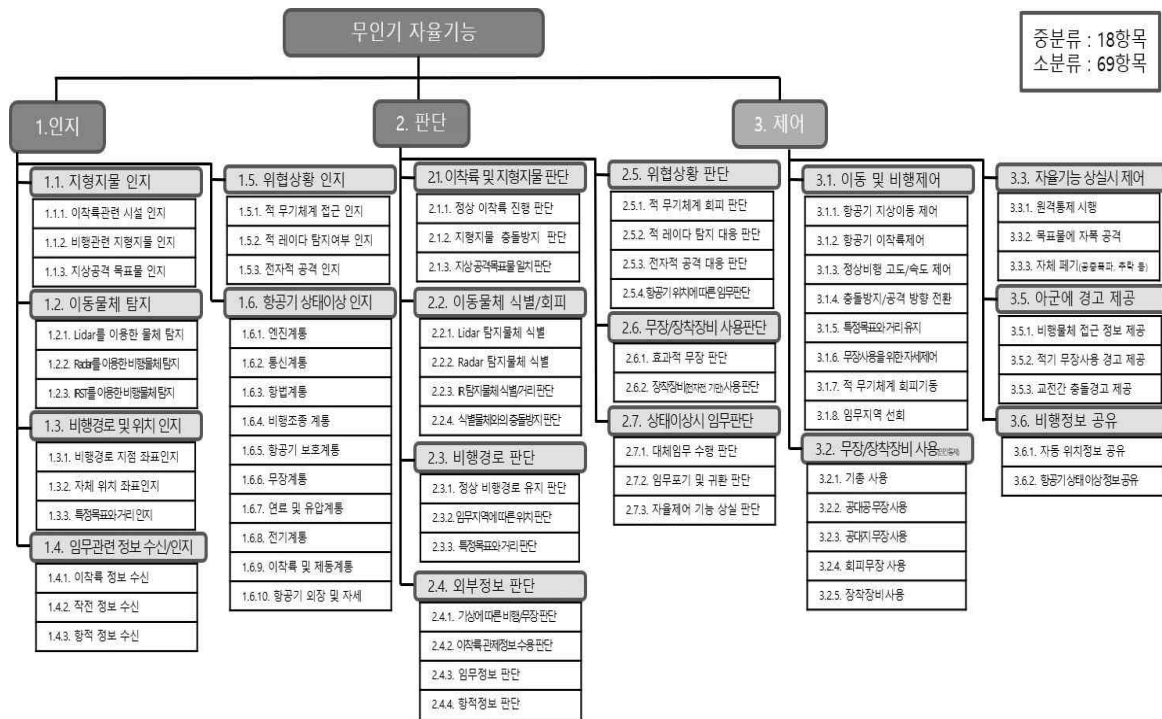


Fig 6. Hierarchy chart(The Third Delphi Survey)

## 7. 결론

무인기의 등장과 발전으로 인해 기존 유인기만의 고유한 임무들을 무인기가 차례로 대체해 나가고 있으며, 주요 선진국들은 전장에서 무인기의 활용을 점차 증대해 나가고 있다. 특히, 4차 산업혁명의 중요성 인식에 따라 무인기와 관련된 기술적인 연구와 운용개념은 급속한 발전 추세에 있다. 이러한 추세와 맞물려 미 국방부에서는 무인기의 자율화 수준을 10단계로 구분하여 관련 기술을 발전시켜 나가고 있다. 또한, 미 육군은 유인기와 무인기의 통합 운영을 위해 상호운용성 수준을 5단계로 구분하는 한편 AH-64E(아파치)와 무인기인 MQ-1(그레이 이글) 편대를 구성하여 최초의 유무인 통합운용 개념이 반영된 MUM-T(Manned- Unmanned Teaming) 비행대대를 설립 운용하고 있다. 이렇듯 무인기와 관련한 운용개념의 구체화와 실제 적용이 활발하게 이루어지고 있지만, 항공기 활동과 연계하여 무인기의 자율기능을 체계적으로 분류한 사례는 찾아보기 어려운 것이 현실이다.

본 연구는 항공기 활동과 연계하여 무인기의 자율기능을 체계적으로 분류하기 위한 목적에서 시작되었다. 본 연구에서는 자율로봇에서 시작되어 현재 자율주행 자동차에까지 적용하고 있는 “인지(perception)-판단(Planning)-제어(Control)”의 단계를 무인기 자율기능 분류에 적용하였다. 관련 문헌과 조종사 인터뷰를 통해 항공기의 활동과 무인기의 자율기능을 연계시키고, 자율기능 항목 간의 유사성, 관련성을 기준으로 인지-판단-제어를 대분류로, 하부구조로 중분류, 소분류의 3단계 계층구조로 분류하였다. 또한, 분류 체계의 타당성을 확보하기 위해 3차에 걸친 델파이(Delphi)조사를 실시하였다. 델파이 조사를 통해 전문가들의 의견을 반영하여 자율기능 항목을 수정하고, 계층도에 포함된 항목의 타당도와 안정도를 검증하여 연구의 신뢰성을 향상시켰다. 무인기의 자율기능과 관련해서는 연구하는 사람마다 견해가 다를 수 있으나, 본 연구는 25명의 전문가 의견을 수렴하고, 전문가들의 종합된 반응을 공유하여 연구의 객관성을 확보하였다.

최근 미 DARPA에서는 모자이크전(Mosaic Warfare) 개념 하에서 항공기의 다양한 유무인 협업 전술에 관한 연구를 진행하고 있다. 모자이크전은 작은 규모로 분산된 전력을 유연하게 결합하여 지휘관에게 다양한 대안을 제공하고, 다수 전력으로 구성된 킬체인을 통해 하나의 노드가 무력화되더라도 작전운영의 연속성을 유지하며, 인간지휘-기계통제의 개념을 적용하는 전쟁 개념이다. 향후에는 AHP(Analytic Hierarchy Process)분석 등을 통해 모자이크전 적용을 위한 무인기 자율기능 간 개발 또는 구현의 우선순위를 도출하고, 성공적인 유무인 협업을 위한 무인기의 전술적 운용에 관한 연구를 진행해 나가고자 한다.

## REFERENCES

- [1] Brooks, R. A.(1986), “A Robust Layered Control System for a Mobile Robot,” *IEEE Journal on Robotics and Automation*, Vol. RA-2.
- [2] Cho, K. H. & Jung, H. J.(2016), “Policy Implications of the Spread on Unmanned Aerial Vehicles in Northeast Asia and the Korean Peninsula”, *National Strategy*, Vol 22(4), pp. 93-122.
- [3] Forster, H., Magee, J., Kramer, J., & Uchitel S(2006), “Adatable Software Architectures and Task Synthesis for UAVs,” *1<sup>st</sup> SEAS DTC Technical Conference-Edinburgh 2006*.
- [4] Ian, M., & Allan, S.(2006), *Military Avionics Systems*, pp. 47-410, John Wiley & Sons Ltd.
- [5] Jung, S. W., & Shim, H. C.(2017), “A.I. of Self Driving Cars”, *Journal of the KSME*, Vol. 57(3), pp. 42 ~ 45.
- [6] Kang, H. T.(2019), “Direction of Operation of ROKA RPA for Future Warfare”, *The Korea Journal of Defence Analysis*, vol. 35(1), pp. 14~19.
- [7] Kang, Y. J.(2008), Understanding and Application of

- Delphi Techniques, *Korea Employment Agency for the Disabled*, pp. 1 ~ 17.
- [8] Kim, B. U.(2015), *Delphi Analysis Method*, Kims info, pp. 15~21.
- [9] Kim, D. S.(2020). *Welcome to the A.I. World.*, pp. 230~237, Life and Power Press.
- [10] Lee, H. R., & Cho, C. H.(2012), “A Study on Developing the Design Quality Indicators(DQI) for School Building”, *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, vol. 28(5), pp. 69~77.
- [11] Lee, J. S.(2001), *Research Method 21 : Delphi Method*, Education science co. pp. 23 ~ 32.
- [12] Lee, K. K., Kim, Y. Y., Kim, B. N. & Huh, T. H.(2016), *Structure Analytic Techniques*, pp. 318~325, Parkyoungsa.
- [13] Noh, S. Y.(2006), “Delphi Technique : Predict the future with professional insights”, *Planning and Policy*, pp. 53 ~ 62.
- [14] Park, D. S.(2001), *Educational research methodology*, Moonumsa, pp. 225 ~ 250.
- [15] Park, K. J.(2008), “Real-time Delphi : Expert Predictions, *Planning and Policy*, pp. 132 ~ 139.
- [16] Samsung Traffic Safety Research Institute.(2017), “*Development Trends and Countermeasures in the Era of Autonomus Vehicles*, Research Report 2017-09, pp. 17-24.
- [17] UK Ministry of Defence.(2011). *Joint Doctrine Note 2/11, The UK Approach to Unmanned Aircraft Systems*, UK: Ministry of Defence
- [18] US Air Force.(2009). *United States Air Force Unmanned Aircraft Systems Flight Plan 2009-2047*, USA: Air Force.
- [19] US Army UAS Center of Excellence.(2010), *US Army Roadmap for Unmanned Aircraft Systems 2010-2035*, US Army
- [20] US Office of the Secretary of Defence.(2005), *Unmanned Aircraft System Roadmap 2005-2030*, US Department of Defence.



### 정 병 호

한양대학교 교통공학 박사  
현재: 공군사관학교 시스템공학과  
조교수(공군 중령)  
관심 분야: 물류, 최적화, 의사결정



### 설 현 주

서울대학교 산업공학 박사  
현재: 충남대학교 국가안보융합학  
부 교수  
관심 분야: 기술경영,  
프로세스관리, 국방  
분야에 산업공학 응용



### 오 지 현

한양대학교 전자컴퓨터공학 석사  
현재: 국방과학연구소 항공기술연  
구원 선임연구원  
관심 분야: M&S, 체계 효과도 분석,  
유무인 협업



### 황 성 인

일본 방위대학교 전자공학 박사  
현재: 공군사관학교 전자통신공학  
과 조교수(공군 중령)  
관심 분야: 레이더 신호처리,  
유무인 협업, 전자전





# 흐름 공정의 가중치 조기 종료된 작업 개수와 지체 종료된 작업 개수의 최소화 문제

홍지현\*, 윤석훈\*\*†

\*SK 텔레콤, \*\*충실대학교 산업정보시스템공학과

## To Minimize the Weighted Number of Early and Tardy Jobs in a Two-machine Flow Shop

Ji Hon Hong\* · Suk-Hun Yoon\*\*†

\*SK Telecom

\*\*Department of Industrial and Information Systems Engineering, Soongsil University

In this paper, we consider a two-machine flow shop scheduling problem with different job due dates. The objective is to minimize the weighted number of early and tardy jobs. We present a mixed integer programming formulation for the problem and develop efficient cut constraints which are valid inequalities. Extensive experiments are conducted to show the effectiveness of the cut constraints. We propose an  $O(n^2)$  heuristic algorithm to solve the problem.

**Keyword** : Scheduling, Flow shop, Mixed integer programming, Cuts, Heuristic algorithm

---

† **Corresponding Author** : Department of Industrial and Information Systems Engineering Soongsil University, 369 Sangdo-ro, Dongjak-gu, Seoul, Korea, Tel: +82-2-820-0687, E-mail: yoon@ssu.ac.kr

**Received**: 10 May 2021, **Revised**: 23 May 2021(1st), 27 May 2021(2nd), **Accepted**: 28 May 2021

## 1. Introduction

Scheduling deals with the allocation of limited resources to tasks over time. It is a decision-making process with the goal of optimizing one or more objectives. Given tasks and resources, the scheduling problem is to determine the detailed timing of the tasks within the capability of the resources (Baker & Trietsch, 2019).

In order to survive in the highly competitive marketplace, manufacturing systems and commercial environments are forced by customers' growing demand for a just-in-time (JIT) deliverance of various products. Due to this increasing requirement, scheduling problems with the earliness and tardiness penalties have attracted significant attention. With regard to the JIT philosophy, the number of early and tardy jobs is often used for the performance measure (Aydilek et al., 2017)

In this paper, we consider two-machine flow shop scheduling problem in which jobs have different due dates. We assume that preemption is prohibited. Define binary variables for job  $j$  as follows:

$$U_j^E = \begin{cases} 1 & \text{if job } j \text{ is early} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_j^T = \begin{cases} 1 & \text{if job } j \text{ is tardy} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Let  $w_j^E$  and  $w_j^T$  be the weights in which job  $j$  is early and tardy, respectively. The objective is to minimize the weighted number of early and tardy jobs.

A scheduling problem is described by a triplet

$\alpha|\beta|\gamma$ . The  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  fields describe the machine environment, processing characteristics and constraints, and the objective to be minimized, respectively (Pinedo, 2016). Using this notation, our problem can be denoted as

$$F_2 \parallel \sum (w_j^E U_j^E + w_j^T U_j^T).$$

The remaining sections are organized as follows. In Section 2, related researches are reviewed. In Section 3, a mixed integer programming formulation and two valid cuts are presented. In Section 4, an  $O(n^2)$  heuristic algorithm is proposed to solve the problem and a numerical example for the problem is provided. In Section 5, extensive experiments are performed to show the effectiveness of the cuts. Finally, a summary of main results and conclusions are presented in Section 6.

## 2. Literature Review

The scheduling problem of maximizing the weighted number of JIT jobs and equivalently minimizing the weighted number of early and tardy jobs has been studied in various machine environments such as single machine, parallel machines and flow shop in the literature (Gilenson & Shabtay, 2019).

Li et al. (1995) considered the single machine scheduling problem to minimize the weighted number of early and tardy agreeable jobs, in which the start times increased in the same sequence as the due-dates. They showed that the problem was NP-complete in the strong sense. Lann and Mosheiov (1996) studied single machine scheduling problems to minimize the number of

early and tardy jobs. Four cost structures were considered as job-independent, job-dependent and symmetric, and job-dependent and asymmetric. They showed that the first two problems were polynomially solvable, whereas the last two were NP-hard.

Sevaux and Dauzere-Peres (2003) tested some variations to design the best genetic algorithm for the single machine scheduling problem when the objective was to minimize the weighted number of late jobs. They derived a new and efficient mixed integer programming formulation. By relaxing some constraints, a Lagrangean relaxation algorithm was designed to give lower and upper bounds.

Hermelin et al. (2021) studied the single machine scheduling problem where the objective is to minimize the weighted number of tardy jobs. They focused on the case where one or more parameters of the number of different due dates, processing times, and weights was constant. They showed that the problem was polynomial-time solvable when either one of the latter two parameters were constant.

Liu et al. (2016) investigated a single machine scheduling problem with periodic maintenance, which was motivated by various industrial applications. The objective was to minimize the number of tardy jobs. They devised a new branch-and-bound algorithm based on an efficient lower bounding procedure and several new dominance properties.

Lenstra et al. (1977) showed that minimizing the number of tardy jobs in a two-machine flow shop with a common due date ( $F_2 | d_j=d | \sum U_j$ ) was NP-hard in the strong sense. Bulfin and M'Hallah (2003) described an exact algorithm for

$F_2 || \sum w_j U_j$  based on branch-and-bound using a surrogate relaxation and a multiple-choice knapsack bound.

Hassanzadeh et al. (2016) studied an integrated multi-objective production-distribution flow-shop scheduling problem with respect to two objective functions in which the first objective function was to minimize total weighted tardiness and make-span and the second objective function was to minimize the summation of total weighted earliness, total weighted number of tardy jobs, inventory costs and total delivery costs. They proposed a multi-objective particle swarm optimization combined with a heuristic mutation operator, Gaussian membership function and a chaotic sequence and the second algorithm.

Mosheiov and Shabtay (2013) studied the problem of maximizing the weighted number of just-in-time jobs on a single machine with position-dependent processing times. They assumed that each job processing time was a non-increasing function of its position in the sequence. They proved that the problem was strongly NP-hard even if all the weights were identical.

Ceppek and Sung (2005) addressed a scheduling problem on identical parallel machines to maximize the number of just-in-time jobs. They presented a new quadratic time algorithm. Jolai et al. (2011) proposed a hybrid memetic algorithm for the scheduling problem on unrelated parallel machines with the objective of maximizing the weighted number of just-in-time jobs.

Choi and Yoon (2007) showed that the problem of maximizing the weighted number of just-in-time jobs in a two-machine flow shop

scheduling system was NP- complete. Shabtay and Bensoussan (2012) provided a pseudo-polynomial time algorithm (FPTAS) to solve this problem, proving that it was NP-hard in the ordinary sense. They also proved that the problem was strongly NP-hard for both a two-machine job shop and a two-machine open shop. Elaluf et al. (2013) proposed the pseudo-polynomial algorithm which improved Shabtay and Bensoussan's complexity result.

**Theorem 1** The problem  $F_2 \parallel \sum (w_j^E U_j^E + w_j^T U_j^T)$  is NP-hard in the strong sense.

**Proof**

Lenstra et al. (1977) show that  $F_2 | d_j = d | \sum U_j$  is NP-hard in the strong sense. This problem is a special case of our problem, when  $d_j = d$ ,  $w_j^E = 0, w_j^T = 1$ . Therefore

$F_2 \parallel \sum (w_j^E U_j^E + w_j^T U_j^T)$  is NP-hard in the strong sense.  $\square$

### 3. Mixed Integer Programming

The following notations are used throughout this paper.

$n$	number of jobs,
$p_{ij}$	processing time of job $j$ on machine $i$ ,
$d_j$	due date of job $j$ ,
$C_{ij}$	completion time of job $j$ on machine $i$ ,

$e_j$	$\max\{d_j - C_{2j}, 0\}$ ,
$t_j$	$\max\{C_{2j} - d_j, 0\}$ ,
$n_j$	$\max\{\alpha_j - \beta_j, 0\}$ ,
$\alpha_j$	earliness weight of job $j$ ,
$\beta_j$	tardiness weight of job $j$ .

Define binary variables as follows:

$y_j = \begin{cases} 1 & \text{if job } j \text{ is early} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
$x_j = \begin{cases} 1 & \text{if job } j \text{ is tardy} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
$b_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{if job sequence is } k < j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

The problem can be formulated as follows:

$$\text{minimize } \sum_{j=1}^n (\alpha_j y_j + \beta_j x_j)$$

subject to

$$e_j + C_{2j} \geq d_j, \quad j=1,2,\dots,n \quad (1)$$

$$C_{2j} - t_j \leq d_j, \quad j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$M y_j - e_j \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

$$M x_j - t_j \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

$$C_{2j} + e_j - t_j = d_j, \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

$$x_j + y_j \leq 1, \quad j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

$$C_{ij} \geq p_{ij}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

$$C_{2j} - C_{1j} \geq p_{2j}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (8)$$

$$C_{ij} - C_{ik} - M(b_{kj} - 1) \geq p_{ij}, \\ i=1,2; j=1,\dots,n; k=1,\dots,n; j \neq k \quad (9)$$

$$b_{jk} + b_{kj} \geq 0, \\ i=1,2; j=1,\dots,n; k=1,\dots,n; j \neq k \quad (10)$$

$$e_j \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n \quad (11)$$

$$t_j \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n \quad (12)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (13)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (14)$$

$$b_{kj} \in \{0,1\}, \\ j=1,\dots,n; k=1,\dots,n; j \neq k \quad (15)$$

The objective sums the weights of all early and tardy jobs. Constraints (1) and (2) state the earliness and the tardiness of job  $j$ . Constraint (3) guarantees that when job  $j$  is early,  $y_j$  will be 1. Otherwise,  $y_j$  will be 0. Similarly, constraint (4) guarantees that when job  $j$  is tardy,  $x_j$  will be 1. Otherwise,  $x_j$  will be 0. Constraint (5) states the completion time of job  $j$  on machine 2. Constraint (6) insures that job  $j$  cannot be early and tardy at the same time. Constraint (7) establishes that jobs are available on time 0. Constraint (8) states that a job has to be processed on exactly one machine. Constraint (9) determines the precedence of the job by the binary variable  $b_{jk}$  and constraint (10) states that only one job can be processed on each machine. Constraints (11) and (12) are the bounds of the variables. The constraints (13) through (15) state that the variables are binary.

In this paper, we consider the number of early or tardy jobs rather than the amount of earliness and tardiness. Thus, when a job is tardy (or early), increasing the tardiness (or earliness) of the job does not affect the objective function value. Consider the following constraints:

$$x_j \leq b_{kj}, \quad k \leq j-1, \quad j=2, \dots, n \quad (16)$$

$$n_j(x_j - y_j) \geq 0, \quad j=1, \dots, n \quad (17)$$

Some valid cut constraints reduce the feasible region and can be used to improve the convergence of the algorithm.

**Theorem 2** Constraint (16) is a valid inequality of the original problem

**Proof**

Case 1: If job  $j$  is tardy,  $x_j$  is one and we can shift the job  $j$  after the maximum due date ( $d_{max}$ ) without change in the objective function value. Now we can consider two cases about the position of job  $k$ .

Case 1-1: If job  $k$  is early or on time ( $x_k=0$ ), it is certain that  $b_{kj}=1$  since job  $j$  is starting after  $d_{max}$  and job  $k$  is completing before or on  $d_k$ . Therefore Constraint (16) is valid.

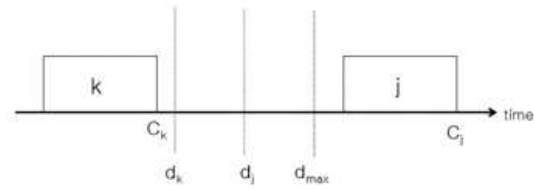


Fig 1. Schedule of case 1-1

Case 1-2: If job  $k$  is tardy ( $x_k=1$ ), the precedence of the two job do not affect the objective function value and the optimal solution. Therefore, we can assume  $b_{kj}=1$ .

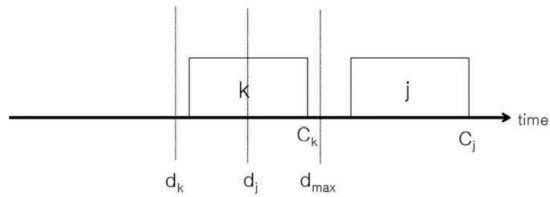


Fig 2. Schedule of case 1-2

Case 2: If job  $j$  is early or on time, it means that  $x_j$  is zero, the constraint (16) is a valid inequality.

Thus, this completes the proof.  $\square$

**Theorem 3** Constraint (17) is a valid inequality

and reduce the feasible set.

**Proof**

We can consider only the case  $\alpha_j > \beta_j$ , which means  $\eta_j > 0$ . In this case if job  $j$  is not on time, it is trivial that job  $j$  should be tardy for the minimization problem. This means that  $x_j$  is one and  $y_j$  is zero. So we can fix the variable if job  $j$  cannot be on time and constraint (17) is valid. This procedure reduces the feasible set.  $\square$

#### 4. Heuristic Algorithm

In this section, we present a heuristic algorithm to minimize the weighted number of early and tardy jobs.

**Algorithm**

**Step 1:** Rearrange the jobs in EDD (Earliest Due Date First) order such that  $d_1 \leq \dots \leq d_n$ .

**Step 2:** Set  $X \leftarrow \emptyset$ ,  $Y \leftarrow \emptyset$ ,  $t \leftarrow 0$ .  $X \cup Y$  will contain those jobs that are not on-time.  $t$  is a variable representing the current time.

**Step 3:** For  $j \leftarrow 1$  to  $n$  do

- (a) If  $p_{1j} + p_{2j} \leq d_j$ , then schedule job  $j$  to start on machine 1 and to be on time on machine
2. Set  $t \leftarrow d_j$  and  $j \leftarrow j+1$ .
- (b) If  $t + p_{2j} \leq d_j$  and  $C_{1,j-1} + p_{2j} \leq d_{j-1}$ , then schedule job  $j$  on machine 1 and on time on machine 2. Set  $t \leftarrow d_j$  and  $j \leftarrow j+1$ .
- (c) If  $\alpha_j \leq \beta_j$  then  $Y \leftarrow Y \cup \{j\}$ . Otherwise;  $X \leftarrow X \cup \{j\}$ .

**Step 4:** Sort jobs in  $Y$  in descending order of

$\frac{\beta_j - \alpha_j}{p_{2j}}$ . Let the sorted list be  $(j_1, \dots, j_r)$ , where  $r = |Y|$ .

**Step 5:** For  $i \leftarrow 1$  to  $r$  do

Check if job  $j_i$  can be put as an early job without affecting the sequence of the original schedule. If possible, assign  $j_i$  as an early job, otherwise  $X \leftarrow X \cup \{j_i\}$ .

**Step 6:** The jobs in  $X$  can be scheduled at the end of the sequence on machine 1. On machine 2 schedule the jobs next to  $d_M = \max\{d_j\} \times n$ .

**Step 7:** Change the job sequence of machine 1 as the one on machine 2.

In Step 3 we consider the relationship between early and tardy weights of job  $j$ . If the job cannot be on time, then it is better to be early (tardy) if the ratio of early weight to tardy weight is less (greater) than one. This is the main idea of the heuristic algorithm. In Step 4, the jobs in  $Y$  are sorted in descending order of  $\frac{\beta_j - \alpha_j}{p_{2j}}$ . Since  $\beta_j - \alpha_j$  is the amount of penalty

saved by making tardy job  $j$  early,  $\frac{\beta_j - \alpha_j}{p_{2j}}$  measures the penalty save per unit time. The computational time of the heuristic is  $O(n^2)$ .

Consider a 5-job, 2-machine flow shop problem with the following data:

흐름 공정의 가중치 조기 종료된 작업 개수와 지체 종료된 작업 개수의 최소화 문제

Table 1. A numerical example

$j$	1	2	3	4	5
$\alpha_j$	2	20	14	19	15
$\beta_j$	16	4	16	13	12
$d_j$	665	642	621	203	333
$p_{1j}$	63	73	64	33	73
$p_{2j}$	93	45	68	34	72

After Step 2 and 3 of the heuristic, the schedule is as depicted in Fig. 3 with  $Y = \{1\}$  and  $X = \{2\}$

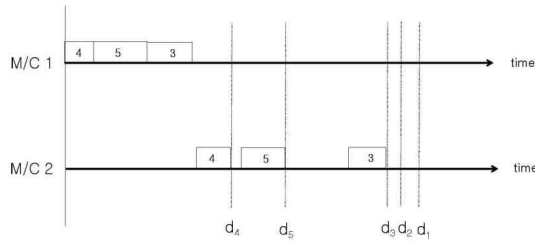


Fig 3. Schedule after Step 3 of the heuristic

The result of Step 5 is shown in Fig. 4. Job 1 is an early job.

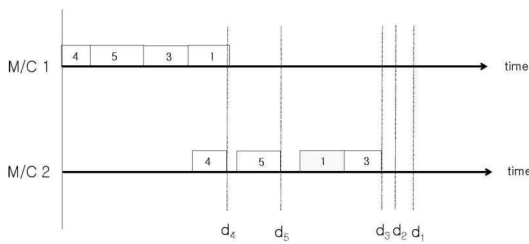


Fig 4. Schedule after Step 5 of the heuristic

In Step 6, job 2 is assigned after  $d_M$ . Job 2 is a tardy job. Left-shifting job 2 until the completion time of job 3 does not change the objective value as shown in Fig. 5.

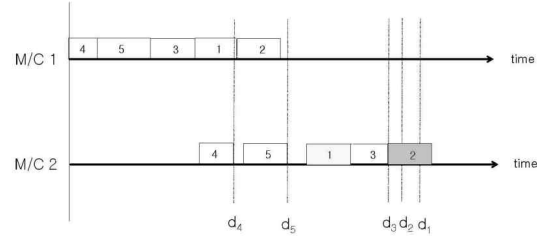


Fig 5. Schedule after Step 6 of the heuristic

In Step 7, interchange job 3 and 1 on machine 1 as in Fig. 6. The total penalty of this schedule is 6.

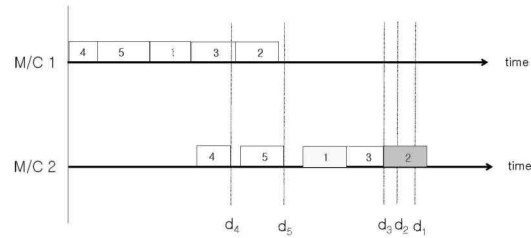


Fig 6. Schedule after Step 7 of the heuristic

## 5. Numerical Experiments

The test problems were generated randomly as follows. Number of jobs were 5, 10, 15 and 20. Early and tardy weights were generated from a uniform distribution [1,20]. Processing times were drawn from the uniform distribution [1,100]. Due dates were randomly generated from the uniform distribution [1000, 2000]. Big-M was calculated as  $100 \times n$ . All data were rounded to the nearest integer. The heuristic algorithm and mixed integer programming formulation were coded in Visual C++ and ran on an Intel Core i7 CPU @3.4 GHz PC with the software IBM ILOG CPLEX. Ten different test problems were created for each

problem size.

The average run time of 10 experiments of different job sizes were provided in Fig. 7. The average run time of the formulation without cuts increased exponentially as the number of jobs increased. It was not possible to solve the problems with more than 25 jobs without cuts in reasonable time. With two valid inequalities, some problems were solved.

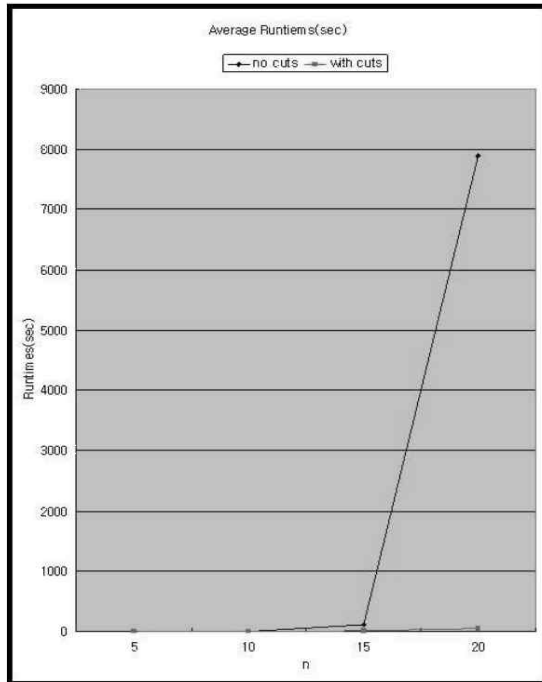


Fig. 7 Average runtimes with and without cuts

To find the effectiveness of each valid inequalities, experiments have been done: first added constraint (16) and (17) separately, and then added them together. Fig. 8 showed the run time improvement adding two cuts. The performance of adding constraint (17) outperformed that of adding constraints (16). The performance of adding both constraints was best.

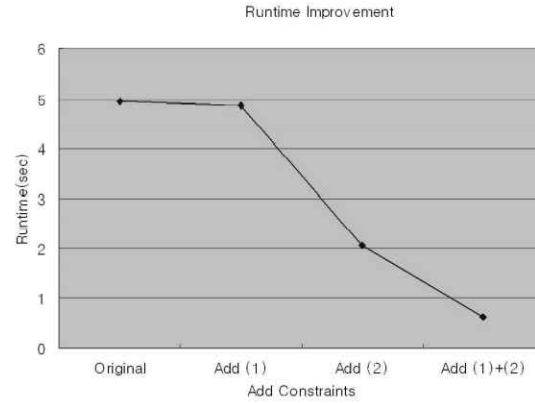


Fig. 8 Run time improvement with cuts

To evaluate the performance of the heuristic, the performance ratios ( $R$ ) was calculate as follows:

$$R = \frac{avg(Z^H)}{avg(Z^*)}$$

$Z^H$  = solution value using Heuristic algorithm,

$Z^*$  = optimal solution.

Experiments showed that the ratio of the objective value of the heuristic to that of the optimal solution was 1.35 on the average as in Table 2. Since the problem belongs to NP-hard in the strong sense, the search space enlarges significantly as the problem size grows. The heuristic algorithm found the limited number of good solutions fast regardless of the search space and consequently the ratio tended to increase as the problem size became bigger.

Table 2. Performance of the heuristic

No. jobs	R
5	1.23
10	1.34
15	1.37
20	1.46
	1.35



## 6. Conclusion

In this paper, we considered the two-machine flow shop scheduling problem to minimize the weighted number of early and tardy jobs. We presented a mixed integer programming formulation and provided efficient cut constraints. Computational experiments were conducted to show the effectiveness of the cut constraints. We developed an  $O(n^2)$  heuristic algorithm to solve the problem.

The heuristic algorithm does not guarantee to find good solutions as the problem size grows. Thus, developing some metaheuristics to obtain near-optimal solutions or approximation algorithms that guarantee good worst case performances for large size problems can be the future research. In some applications, the penalty depends on how tardy a job is. Thus, a possible research area would be to address the problem with total tardiness performance measure. Another extension would be models with time window rather than a specific due date, in which no cost is incurred if a job is completed within its time window.

## REFERENCES

- [1] Aydilek, A. and Aydilek, H. and Allahverdi, A. (2017), Algorithms for minimizing the number of tardy jobs for reducing production cost with uncertain process, *Applied Mathematical Modelling*, 45, pp. 982-996.
- [2] Baker, K.R. and Trietsch, D. (2019), *Principles of Sequencing and Scheduling* (2<sup>nd</sup> Ed.), Wiley, New York.
- [3] Bulfin R.L. and M'Hallah, R. (2003), Minimizing the weighted number of tardy jobs on a two-machine flow shop, *Computers and Operations Research*, 30, pp. 1887-1900.
- [4] Cepek, O. and Sung, S.C. (2005), A quadratic time algorithm to maximize the number of just-in-time jobs on identical parallel machines, *Computers & Operations Research*, vol. 32, pp. 3265 – 3271.
- [5] Choi, B.-C. and S.-H. Yoon (2007) Maximizing the weighted number of just-in-time jobs in flow shop scheduling, *Journal of Scheduling*, vol. 10, pp. 237-243.
- [6] Elalouf, A., Levner, E. and Tang, H. (2013), An improved FPTAS for maximizing the weighted number of just-in-time jobs in a two-machine flow shop problem, *Journal of Scheduling*, vol. 16, pp. 429-435.
- [7] Gilenson, M. and Shabtay, D. (2019), Multi-scenario scheduling to maximise the weighted number of just-in-time jobs, *Journal of the Operational Research Society*, <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1578628>
- [8] Hassanzadeh, A., Rasti-Barzoki, M. and Khosroshahi, H. (2016), Two new meta-heuristics for a bi-objective supply chain scheduling problem in flow-shop environment, *Applied Soft Computing*, 49, pp. 335-351.
- [9] Hermelin, D., Karhi, S., Pinedo, M. and Shabtay, D. (2021), New algorithms for minimizing the weighted number of tardy jobs on a single machine, *Annals of Operations Research*, 298, pp. 271-287.
- [10] Jolai, F., Amalnick, M. S., Alinaghian, M., Shakhshi-Niaei, M. and Omrani, H. (2011), A hybrid memetic algorithm for maximizing the weighted number of just-in-time jobs on unrelated parallel machines, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 22, pp. 247-261.
- [11] Lann, A. and Mosheiov, G. (1996), Single machine scheduling to minimize the number of

- early and tardy jobs, *Computers and Operations Research*, 23(8), pp. 769-781.
- [12] Lenstra J.K., Rinnooy Kan A.H.G., Brucker P. (1977), Complexity of machine scheduling problems, *Annals of Discrete Mathematics*, 1, pp. 343-362.
- [13] Li, C.-L., Cheng, T.C.E. and Chen, Z.-L. (1995), Single-machine scheduling to minimize the weighted number of early and tardy agreeable jobs, *Computers and Operations Research*, 22(2), pp. 205-219.
- [14] Liu, M., Wang, S., Chengbin Chu, C. and Chu, F. (2016), An improved exact algorithm for single-machine scheduling to minimise the number of tardy jobs with periodic maintenance, *International Journal of Production Research*, 54(12), 3591-3602.
- [15] Mosheiov, G. and Shabtay, D. (2013), Maximizing the weighted number of just-in-time jobs on a single machine with position-dependent processing times, *Journal of Scheduling*, vol. 16, pp. 519-527.
- [16] Pinedo, M.L. (2016), *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems* (5<sup>th</sup> Ed.), Springer, New York.
- [17] Sevaux M., Dauzere-Peres S. (2003), Genetic algorithms to minimize the weighted number of late jobs on a single machine, *European Journal of Operational Research*, 151, pp. 296-306.
- [18] Shabtay, D. and Bensoussan, Y. (2012). Maximizing the weighted number of just-in-time jobs in several two-machine scheduling systems. *Journal of Scheduling*, 15(1), pp. 39-47.

**홍 지 현**

한양대학교 산업공학과 학사  
 서울대학교 산업공학과 석사  
 현재: SK 텔레콤  
 관심 분야: OR, 수리계획

**윤 석 훈**

서울대학교 산업공학과 학사  
 미국 NC A&T State University  
 공학석사  
 미국 Pennsylvania State University  
 공학박사  
 현재: 숭실대학교 산업정보시스  
 템공학과 부교수  
 관심 분야: 최적화, 메타휴리스틱,  
 스케줄링

## 구매 업무에서의 블록체인 기술 도입을 위한 개념적 프레임워크

김준석\*†

\*세종대학교 경영학과

## A Conceptual Framework for Applying Blockchain Technology in Procurement Processes

Joon-Seok Kim\*†

\*Department of Business Administration, Sejong University

Recently, new cutting-edge technologies such as Internet of Things (IOT), Artificial Intelligence, Big Data Analysis and Blockchain Technology (BCT) have been rapidly introduced in various industries. Among them, the BCT is expected as one of the most useful technologies in the field of procurement. The characteristics of BCT are 1) Information distribution and synchronization, 2) P2P networks and consensus, 3) Smart contract and payment and 4) Data immutability. These characteristics of BCT could be well applied into each segment of procurement processes including finding potential suppliers, negotiation and contract management, order and fulfillment management and supplier management. Even though the possibility of successful implementation of BCT into overall procurement processes could be expected very high, it has been rarely considered in the literature. In this study, a conceptual framework for applying BCT into procurement processes is proposed. Two real world cases of BCT implemented in procurement processes are also introduced.

**Keyword** : Procurement processes, Blockchain technology, Smart contract, e-Procurement systems

---

† **Corresponding Author** : Department of Business Administration, Sejong University, 209 Neungdongro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, Korea,  
Tel: +82-2-3408-3169, E-mail: jskim@sejong.ac.kr

Received: 7 May 2021, Revised: 24 May 2021, Accepted: 27 May 2021

## 1. 서론

최근 산업 현장에는 과거에 경험하지 못했던 속도로 새로운 기술들이 도입되고 있으며 그중 일부 기술들이 해당 산업에 끼치는 영향은 과거의 어떤 기술과도 비교할 수 없을 정도로 크다. 이런 기술들은 대체로 인공지능, 데이터 사이언스, P2P 네트워크 등 IT 기반의 기술과 연관되어 있는 경우가 많다. 이러한 기술들이 종합되어 4차 산업혁명의 기틀이 만들어지고 스마트한 산업환경으로 진화하고 있다.

산업 현장에 도입이 이루어지거나 전향적으로 검토되고 있는 대표 기술 중의 하나가 블록체인 기술(blockchain technology)이다. 블록체인 기술은 2010년대 중반부터 전 세계적으로 주목받고 있는 비트코인(bitcoin) 등의 가상화폐의 기반 기술로 널리 알려졌다. 정보의 투명성, 정보의 면역성(data immunity) 등과 같은 블록체인 기술의 대표적인 기술적 특징은 가상화폐뿐만 아니라 주요 산업의 현장에 매우 유용하게 사용될 수 있는 가능성을 열어 주었다. 정보의 면역성은 정보의 생성과 변경이 시스템 참여자들의 동의 하에서만 이루어질 수 있는 성질을 뜻한다. 이러한 기술적 특징으로 블록체인 기술은 점차로 실제 산업현장에 사용되어 현실이 되고 있고 많은 분야에서 도입이 검토되고 있다(Kim & Laskowski, 2017).

글로벌 공급망의 구성에서 핵심적인 역할을 담당하고 있는 구매(procurement) 분야는 자재에 대한 발주 및 납품관리(order and fulfillment management), 협상과 계약관리(negotiation and contract management) 및 공급업체관리(supplier management) 등 중요한 업무를 수행하고 있다(Dimitri, Piga, & Spagnolo, 2006; Nicoletti, 2017). 특히 애플(Apple)과 같이 자체 생산시설을 운영하지 않고 주요 제품에 대한 생산을 외주업체로부터 전부 공급받는 경우에는 구매의 중요성이 한층 더 커지므로 구매 부서의 업무 역량 고도화에 대한 관심이 고조되고 있다.

구매 분야에서의 주요 업무의 성패는 좋은 품질의 자재를 적시에 공급받는 것에 달려 있다(Kim & Kim, 2014). 이는 공급업체와의 협력적 성과와 연결되며 이를 위한 데이터의 정합성 및 정확성, 투명성의 확

보가 매우 중요하다. 구매 업무의 이러한 속성은 블록체인의 고유한 기술적 특징과 매우 잘 어울린다. 따라서, 구매 업무에서의 블록체인 기술 도입은 전향적으로 검토되어야 한다. 그러나 현재까지 구매 분야에서의 블록체인 기술 도입 관련 연구는 문헌에서 많이 부족한 편이고 현존하는 대부분의 연구는 스마트 계약과 관련되거나(Christidis & Devetsikiotis, 2016; Guo & Liang, 2016) 혹은 컴퓨터 사이언스 분야의 블록체인 기반의 전자구매시스템 개발과 관련된 연구이다(Cole, Stevenson, & Aitken, 2019).

본 연구의 목적은 구매 업무 프로세스 전반에 걸쳐 블록체인 기술 도입의 가능성을 검토하고 이에 따른 블록체인 기술 도입을 위한 개념적 프레임워크를 제안하는 데 있다. 본 연구의 나머지 부분은 2장 블록체인 기술에 대한 설명, 3장 구매 업무에 대한 블록체인 기술 적용 가능성, 4장 블록체인 기술 기반의 구매 시스템 사례 및 5장 결론으로 이루어졌다.

## 2. 블록체인 기술

블록체인은 암호화된 정보를 기록하고 전달하는 일종의 데이터베이스 시스템이다(Nakamoto, 2008). 블록체인이 다루는 정보는 주로 거래(transaction) 정보이지만 이외의 다른 주요 정보도 취급한다. 블록체인 상의 정보는 암호화되어 보호받으므로 위·변조의 위험이 현저히 낮고, 여러 시스템에 분산되어 저장된다. 블록체인 상의 정보에 대한 생성 및 변경은 분산된 시스템상의 사용자들의 동의가 있어야 가능하므로 절차적으로 매우 까다롭다.

블록체인에 있어서 “블록”은 시스템 참여자들에 의하여 업데이트되는 실시간 정보를 의미하고, “체인”은 시스템 참여자들이 네트워크상에서 관리하는 데이터들의 목록을 의미한다. 블록체인 기술은 앞서 밝혔듯이 비트코인과 같은 암호화폐에 적용되기 시작하면서 널리 알려지게 됐다.

블록체인이 가지고 있는 특징은 정보의 배포와 동기화, P2P 네트워크와 참여자 간 합의, 스마트 계약의 도입, 정보의 면역성(data immunity) 등으로 요약

될 수 있다(Kim & Shin, 2019). 정보의 배포와 동기화에 있어서 모든 시스템 참여자들은 평등하게 동일한 데이터에 접근할 수 있으며, 모든 데이터에 대한 생성 및 변경의 이력은 투명하게 공개된다. P2P 네트워크와 참여자 간 합의에 있어서는 중앙 기관 및 중앙 관리자의 개입없이 참여자 간의 독립적으로 분산된 네트워크가 형성되고 운영된다. 스마트 계약의 도입에 있어서는 시스템 참여자들 간의 계약은 프로그래밍 코드에 의하여 합의된 계약 조항이 형성되어 공식화되고 참여자들 간에 시스템을 통하여 검증된다. 또한 계약 실행에 있어서 발생될 수 있는 계약조건과 위약에 대한 페널티 등이 사전에 자동적으로 구체화되고 확인된다. 정보의 면역성에 있어서는 시스템상의 데이터의 생성 및 변경은 모든 시스템 참여자들이 동의 하에서만 가능하고 이에 따라 정보 이력을 신뢰할 수 있다.

현재 블록체인 기술은 암호화폐의 거래와 지불, 신원 확인 분야에서 주로 적용되고 있으며 이외에도 스마트시티계획(Planning Korea, 2018), 의료보건의서비스관리(Binance Academy, 2019), 공급업체관리(Kouhizadeh & Sarkis, 2018), 배송관리(Tijan et al., 2019) 등 다양한 분야에서 적용되기 시작했다. 최근에는 공급사슬관리(SCM) 및 지속가능 공급사슬관리(Sustainable SCM)에서의 적용 가능성 및 이에 따른 장점 및 한계 등에 대해 논의도 이루어지고 있다(Kouhizadeh & Sarkis, 2018; Tezel et al., 2020).

블록체인 기술의 특징과 관련하여 다양한 산업들에 대한 적용 가능성을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 물류산업은 분산된 참여자들 간의 네트워크상에 디지털화된 정보로 이루어진 원장으로 물류 정보의 추적 가능성이 가능하다. 물류 대금의 지급은 화주와 업체 간의 배송 정보가 일치하면 자동적으로 이루어지므로 수작업이 줄어들며, 정보의 신뢰도가 높아 분쟁의 여지가 줄어든다(Tijan et al., 2019). 둘째, 의료서비스 산업에서는 환자에 대한 정확한 이력이 시스템 참여자에게 장소와 상관없이 제공되며, 업데이트된 이력은 자동적으로 분산된 시스템에 반영된다. 환자에 대한 의료서비스 이력은 의료보험 회사에 자동적으로 전달되어 보험 사기 등을 사전에 차단할 수 있으며 치료 및 투약 등의 이력이 약국과 같은 시스템 참여

자들에게 투명하게 공개되어 중복 투약 등의 부작용을 사전에 차단할 수 있다(Binance Academy, 2019). 마지막으로, 은행 서비스에 있어서 송금과 같은 업무에 있어서 투명하고 분산된 거래 네트워크에 의하여 제3자 기관의 개입을 필요로 하지 않기 때문에 운영의 효율성을 높이고 오류를 차단할 수 있다. 참여자들 간의 지불이 사전에 약속된 시간에 정확히 이루어질 수 있어 후속되는 수작업에 따른 비효율과 위험을 감소시킬 수 있다(Guo & Liang, 2016).

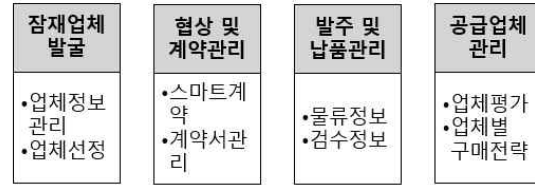
앞서 살펴봤듯이 블록체인 기술은 기존에 데이터에 대한 신뢰성 및 정확성이 보장이 되지 않아 상당한 양의 수작업으로 진행해야 되는 업무들을 자동적으로 진행될 수 있도록 변환시켜 업무의 효율화를 이룰 수 있다는 큰 장점이 있다. 이로 인하여 블록체인 기술이 점차로 많은 분야로 확대 적용될 수 있는 가능성이 크게 높아지고 있으며 구매 업무 또한 블록체인 기술의 수혜를 볼 수 있는 대표적인 분야라고 할 수 있다.

### 3. 구매와 블록체인 기술

구매는 본질적으로 공급업체와 연결되어 있다. 기업이 소유하고 있지 않은 인력 및 재화를 외부의 타 업체로부터 구입하여 본 기업의 업무가 원활하게 진행될 수 있도록 사전에 준비하는 것이 구매의 주요한 미션이다. 이 과정에서 공급업체와의 교류는 불가피하며 이에 따른 신뢰도의 확보, 위험 회피 등은 매우 중요한 덕목이다. 과거에는 구매의 일상 업무인 발주 및 납품관리가 구매업무 비중의 대부분을 차지할 정도로 많은 수작업이 이루어졌다. 그러나 2000년대 초부터는 재료비 비중이 높은 하이테크 제조기업 위주로 재료비 비중을 원천적으로 줄이기 위한 전략 구매의 도입이 이루어져 왔으며 이를 위하여 구매업무 자동화를 통해 상당 부분 매일 발생하는 발주 업무에 대한 자동화를 시도하였다. 전략구매의 핵심은 더 좋은 공급업체를 찾아내고 파트너십을 강화하여 더 좋은 제품을 더 낮은 가격으로 구입하는 것이다(Booth, 2010). 한번 거래 관계를 맺은 공급업체는

객관적이고 정량적인 평가를 통하여 관리되며 최고의 공급업체와는 전략적 파트너십을 계속적으로 유지하여 구매 관점에서의 경쟁력을 지속적으로 유지하는 것이다. 따라서 전략구매에서는 더 많은 시간을 잠재적인 공급업체들을 발굴하는 데 사용하고 나머지 업무들은 되도록 자동화하여 업무시간을 낮춤으로써 업무의 효율을 높이는 것이 중요하다.

본 연구에서는 구매의 주요 업무를 1) 잠재적 공급업체 발굴 및 데이터 관리, 2) 협상 및 계약관리, 3) 발주 및 납품관리, 4) 공급업체관리로 분류하였다. 위의 분류는 Dimitri 외(2006)를 참고하였다. 1) 공급업체 탐색 및 데이터 관리에서는 전 세계에 분포되어 있는 기업들 중에서 우리 기업이 공급받을 만한 제품을 생산하는 기업들을 미리 찾아내어, 업체의 역량을 평가하고 주요 정보를 데이터베이스에 기록하며 주기적으로 변경된 정보를 업데이트하는 업무이다. 2) 협상 및 계약관리에서 협상은 구매하기로 결정된 제품에 대하여 이 제품의 공급업체와 구매 단가, 기간 및 기타 조건 등을 협의하는 업무이며, 계약관리는 협상 종료 후 공급 계약을 체결하고 이후의 계약 이행 등을 관리하는 업무이다. 3) 발주 및 납품관리는 필요한 제품을 필요한 시기에 납품이 가능하도록 해당 업체에 주문을 발송하고 납품까지의 기간 동안 업체와 이상 상황 등의 발생 시 협의하며 납품이 이루어지면 납품 수량과 품질을 검수하고 납품에 대한 대금을 지불하는 것까지의 업무이다. 마지막으로 4) 공급업체관리에는 공급업체 선택과 공급량 결정, 공급업체 평가, 공급업체와의 관계 유지 등의 서브업무로 구성된다. 공급업체 선택은 필요한 제품의 구입처를 결정하는 업무로 입찰 또는 잠재 및 공급업체와의 협의를 통하여 이루어지며, 이때 복수의 업체가 선정되면 계약기간 내의 공급받을 제품의 양도 결정한다. 공급업체 평가는 공급이 이루어지고 있는 제품에 대한 공급 상황 및 능력을 평가하여 공급업체와의 관계를 설정하는 데 이용한다. 공급업체와의 관계 유지는 평가를 통하여 설정된 관계에 따라 공급업체에게 어드밴티지 또는 페널티를 부과하는 업무이다. [그림 1]은 위에서 설명한 구매업무의 흐름을 표현하였다.



[그림 1] 구매업무 프로세스

본 연구에서는 구매 업무 프로세스 중 4개의 주요 업무 세그먼트에 대하여 각각 블록체인 기술의 적용 가능성과 주요 고려사항을 제시하고자 한다.

### 3.1. 잠재적 공급업체 발굴 및 데이터 관리

기업의 수직적 통합(vertical integration)이 약해지면서 상대적으로 자기기업의 경쟁력이 떨어지는 분야는 적극적으로 외부에서 더 나은 경쟁력을 가진 대상을 찾아 수혈하는 정책을 추구하는 것이 일반적 현상이다. 이러한 업무는 대개 구매 부서가 담당하게 되었고 외부에서 더 나은 자재 또는 부품을 수급하는 것은 자기기업의 제품에 대한 가격, 품질 및 속도 경쟁력을 높이는 데 매우 중요한 역할을 하게 되었다. 시장 및 공급지의 국제화(globalization)가 가속화되고, 수요 및 제품의 다양성이 증가하면서 공급사들도 또한 매우 복잡한 양상을 보이게 되었다. 이러한 복잡도의 증가는 자재 또는 부품 수급에 있어 가격, 품질 등 기존의 주요 지표 외에도 유연성(agility), 대응성(responsiveness) 등 시장의 변동성에 대처하기 위한 속성들도 동시에 고려해야 하게 되어 단순히 주변의 업체들만으로는 경쟁력을 확보하기 어려워졌다(Tezel et al., 2020). 글로벌하게 분포되어 있는 잠재적인 공급업체들 중 가장 경쟁력 있는 업체를 제대로 발굴하기 위해서는 기본적으로 수많은 업체들에 대한 최신의 정보 확보가 가장 중요하다. 현재 공식적인 계약관계가 아니더라도 자기기업이 생산하거나 계획 중인 제품들과 관련된 부품의 라인업을 가지고 있거나 기술력을 확보한 업체 중에서 최적 후보들을 빠른 시간에 찾아내서 공급계약을 마칠 수 있다면 시장에서 경쟁우위를 확보하는 데 큰 도움이 될 것이다.

일반적으로 좋은 업체들을 지구촌 곳곳에서 찾아 내서 관련 정보들을 모으고 기록하는 것은 시간이 다소 걸리긴 하지만 어려운 일은 아니다. 하지만 모아진 정보들을 최신으로 업데이트하여 유지하는 것은 매우 어려운 일이다. 매일 수많은 기업들의 상황이 전날과는 달라지게 된다. 제품 라인업 변경, 가격 변동, 업종 변경 또는 기업 도산과 같은 큰 변경에서부터 담당자 변경, 연락처 변경 및 주소 변경과 같은 상대적으로 작은 변경까지 일상적으로 일어난다. 거래업체 정보 변경은 어느 정도 실시간으로 대응할 수 있더라도 잠재적인 업체들에 대한 변경된 정보들은 너무 방대한 양이고 하나하나 찾아보아야 하기 때문에 데이터베이스에 실시간으로 반영하는 것은 기존에는 거의 불가능에 가까울 정도로 어렵다.

2장에서 설명한 블록체인의 특성 중 정보의 배포와 동기화 특성은 이러한 약점을 극복하는 데 매우 적합하다. 발굴된 잠재적 업체들을 블록체인 네트워크상에서 관리함으로써 각 업체들의 변경된 정보가 실시간으로 데이터베이스에 반영될 수 있도록 운영이 가능하다. 업체의 규모가 작거나 운영 능력이 부족한 경우에는 거대한 규모의 데이터베이스를 운영하기 어려울 수 있다. 이런 경우에는 여러 업체들이 연합으로 운영하거나 공적인 데이터베이스를 활용하는 방법도 있다. 직물 산업에서 공급망 상의 공급자에 대한 사회 및 환경적 감사(audit)에 사용되기 위하여 구축된 Business Social Compliance Initiative (BSCI) 데이터베이스가 대표적인 예이다(Egels-Zandén & Wahlqvist, 2007).

### 3.2. 협상 및 계약관리

기업에서 필요한 자재 또는 서비스의 구입이 결정되면 어떤 조건으로 누구에게서 구입을 할지 결정하고 상대방과의 협의를 통하여 구입 계약을 맺는다. 위의 과정은 협상(negotiation) 및 계약관리(contract management) 프로세스에서 이루어지게 된다. 협상 단계에서는 대상이 되는 자재 또는 서비스에 대하여 거래의 상대방과 구입 조건, 즉, 가격, 기간, 품질 요건, 리드타임 등에 대한 광범위한 협의를 진행하게 된다. 이 과정에서 쌍방 간의 합의가 이루어지게 되

면 계약 단계로 넘어간다. 계약은 거래 당사자 간의 의사가 일치했음을 표시하는 형식이며 쌍방 간의 약속에 대한 증거를 남기는 행위이다. 계약에 의한 쌍방 간의 거래에 대한 약속은 법률적으로 보호받게 되고 어느 한 쪽에서 약속을 파기하게 되면 계약에 의하여 미리 정해진 또는 계약서에 명기된 페널티가 부여된다.

협상의 과정에서 주도권을 쥐고 상대방보다 유리한 조건을 이끌어 내기 위하여 보다 가치 있는 정보의 필요성이 높아진다. 이러한 정보들은 상대방과의 거래 협상이 처음인 경우에는 앞서 거론한 잠재적 공급업체에 대한 탐색 정보들과 유사한 제품 또는 서비스를 거래했던 과거 정보들의 조합 및 분석으로 얻어지게 된다. 이런 유용한 정보들에 대한 가용성(availability)이 낮을수록 협상에서 유리한 위치를 점하기에 어려움이 있다. 한 번 계약을 맺고 거래하게 되면 다음번 재계약까지는 조건에 대한 변경이 매우 어렵고 잘못된 계약 조건의 도입은 원가에 직접적으로 악영향을 끼치게 될 가능성이 매우 높다. 기업의 규모가 큰 경우에는 타 지역의 지사 또는 공장에서도 이미 현재 협상을 시작하는 업체와 거래를 한 이력이 있을 수도 있다. 기업 내부에서 계약에 대한 이력이 잘 관리되지 않으면 이미 거래를 한 업체를 새로운 업체로 잘못 인식하고 이전보다 불리한 계약을 맺을 가능성도 있다. 잠재적인 공급업체들에 대한 정보 관리와 더불어 기업 내부에 분산되어 있는 계약 정보들에 대하여 블록체인 기술을 적용하여 관리함으로써 새로운 업체와의 협상에서의 우위를 확보할 수 있으며 더하여 기존 거래 업체와의 재계약에 있어서도 확실한 우위를 가져갈 수 있게 된다.

### 3.3. 발주 및 납품관리

협상을 통하여 합의되고 결정된 구입조건들은 계약서에 명확하게 표기되어야 하고 양측 대표자 간의 서명을 통하여 양측이 계약 조건을 이해하였음을 밝힘으로써 법적 효력이 발생된다. 이런 과정을 통하여 계약이 이행되지만 현실에서는 양측 간의 분쟁이 빈번히 발생한다. 거래와 계약은 상호신뢰에 바탕을 둔 행위여서 계약 이행 도중에 당사자 간의 상호신뢰에

문제가 생기는 경우 분쟁으로 이어지게 된다.

계약 이행의 과정에 있어서 발주와 납품이 계약 기간 동안 주기적으로 이루어지는 경우에는 발주 및 납품관리(order and fulfillment management)에 의하여 전반적인 납품 과정이 관리된다. 이 과정에서 스마트 계약(smart contracts)의 도입은 복수의 주문이 이루어지고 이에 따른 납품과 검수 그리고 지불이 이루어지는 계약 이행 프로세스에서 상호신뢰에 문제가 생기지 않고 원활하게 계약이 이행되는 데 큰 도움이 된다.

스마트 계약은 계약조건과 거래의 원칙을 참여자들 간의 분산된 네트워크에 저장하고 거래의 조건이 자동적으로 이행되도록 할 수 있다. 또한, 사전에 당사자들 간에 합의된 규칙과 페널티를 상황에 따라 체크하고 합당한 조치가 이루어질 수 있다. 이를 통하여 계약 당사자 간의 분쟁을 방지할 수 있으며 보다 효율적으로 구매 프로세스가 이루어지도록 한다(Cole, Stevenson, & Aitken, 2019; Guo et al., 2021). 스마트 계약의 한 예인 자동지불시스템은 거래에 있어서 특정 조건이 완성이 되면 구매 대금이 자동으로 지불되는 시스템으로 모든 거래는 참여자들의 네트워크에 분산된 원장에 기록이 되고 모든 참여자들에 의하여 검증되는 형태이다.

### 3.4. 공급업체관리

급격한 변동성에 대한 최선의 대응을 요구하는 최근의 공급사슬(supply chain)에서는 기존에 공급업체들에게 가장 흔하게 요구하던 가격, 품질 등의 공급 요건들 외에도 유연성(agility), 속도(speed) 등의 공급업체 내부의 혁신 역량을 크게 필요로 하는 공급요건들도 중요한 공급업체 평가의 지표로 고려되고 있다. 지구 곳곳에 존재하는 좋은 역량 있는 업체들을 발굴하는 것도 중요한 일이지만 기존에 거래하고 있는 업체들의 잠재력을 잘 파악하고 가능성 있는 업체들을 더 좋은 업체가 될 수 있도록 도와주어 궁극적으로 전략적 파트너(strategic partners)가 될 수 있도록 하는 것은 최근의 구매 업무에 있어서 매우 중요한 업무이다.

공급업체관리(supplier management)는 공급업체의

공급능력을 종합적으로 평가하고, 평가 결과를 바탕으로 해당 업체와의 관계를 설정한다. 공급업체와의 관계설정에 있어서 일반적으로 업체에 대한 등급을 부여한다. 예를 들어 (1) 협업, (2) 지원, (3) 경쟁, (4) 대체 등의 등급으로 분류하고 각 등급에 맞는 전략으로 공급업체를 관리한다. 협업 등급의 업체들은 상대적으로 매우 우수한 공급능력을 갖춘 업체들로 주로 보상 정책을 적용하며 지원 등급의 업체들은 협업 등급에는 부족하지만, 잠재적인 가능성이 높아 더 성장할 수 있도록 돕는 지원 정책을 적용한다. 경쟁 등급은 공급능력이 일반적인 업체들에게 부여하며 보상과 페널티를 상황에 맞게 부여한다. 대체 등급은 공급능력이 부족하여 재계약 불가를 결정한다. 공급업체관리는 대체로 공급업체관계관리(Supplier Relationship Management; SRM)의 기반하에서 이루어지고 있으며 분류 등급이나 체계는 기업의 상황에 맞게 적용하면 된다. 일부 공급업체 개발 프로그램은 블록체인 플랫폼에 기록된 데이터를 이용하여 구현되고 있으며 업체 평가에 이용되고 있다. Dell, IBM 등은 이미 환경적 공급자 개발 및 훈련 프로그램을 운영 중이며 광범위한 데이터베이스를 구축하여 운영하고 있다(Sarkis, 2017).

공급업체 평가 및 등급 분류와 이에 따른 공급업체 관계 전략 실행에 있어서 블록체인 기술 적용은 평가의 공정성 확보와 운영의 효율성에 있어서 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 공급업체들과 블록체인 상에서 연결된 상태에서 평가 정보를 공유하게 되면 정량 및 정성적 지표를 통한 평가의 객관성과 공정성을 확보할 수 있으며 특히 특정 평가자의 불공정한 개입을 막을 수 있다. 이를 통하여 공급업체의 평가 결과에 대한 납득을 쉽게 이끌어 낼 수 있다. 또한 공급업체관리 프로세스에서 발생할 수 있는 수작업 및 오류를 미연에 방지할 수 있어서 운영의 효율성을 확보할 수 있다. 평가 방법 또는 전략에 대한 구체적인 내용에 대해서는 공급업체 평가 및 선택(vendor evaluation or selection)에 대한 문헌을 참고하는 것을 권고한다.



표 1. 구매 업무의 블록체인 기술 적용

주요 구매 업무	블록체인 기술 적용가능 분야
공급업체 발굴	잠재적 업체 정보 탐색, 업데이트 및 관리
협상 및 계약관리	잠재적 업체 정보 및 계약 정보 관리, 스마트 계약 체결
발주 및 납품관리	스마트 계약 이행, 자동 지불
공급업체 관리	공급업체 관계관리, 업체 평가 및 분류, 공급업체 선택

#### 4. 구매 업무 블록체인 적용 사례

본 장에서는 실제 구매 업무에 적용된 블록체인 기술 사례를 간단히 소개하고자 한다. 구매 분야에서 블록체인 기술은 주로 e-procurement system 개발 및 스마트 계약의 사례에서 찾아볼 수 있다(Planning Korea, 2018).

Guo 외(2021)는 중국 항저우 소재의 전력회사에 블록체인 기술을 적용한 전자 계약관리시스템(e-contract management system)인 BEcontractor를 구축한 사례를 소개하였다. 기존의 계약은 주로 수작업으로 관리되어서 비효율적이었고 2019년 말에 시작된 COVID-19로 인하여 대면 작업의 비중이 높은 기존의 계약관리에 매우 큰 어려움을 겪고 있었다. 기존의 문제점을 정리하면 첫째, 서명 위조의 위험성 및 프로세스 추적의 어려움, 둘째, 공증 등 보안을 위한 긴 업무 시간, 셋째, 수작업 위주의 비효율성 등이었다. BEcontractor는 블록체인 기술의 자격증명을 통하여 서명 위조를 방지하고, 계약 과정에서의 추적성을 높였다. 인터넷 공증 전자증명서비스를 제공함으로써 계약 업무의 시간을 단축하였으며, 스마트 계약은 계약 및 지불 업무의 자동화를 통하여 업무의 효율을 극대화하였다.



[그림 2] BEcontractor 개념(Guo et al, 2021)

BEcontractor의 적용으로 기존 수작업 기반에서 계약 완료까지 걸리던 55-190시간을 16-46시간으로 감소하여 업무의 효율을 높였다. 또한, 평균 계약 비용이 2363RMB에서 229RMB로 대폭 줄었다.

개발도상국의 경우에 공공 구매 프로세스에 블록체인 기술을 응용하는 사례를 볼 수 있다. 시민들에게 물자와 서비스를 공적으로 제공하는 공공 구매의 경우 여러 개발도상국에서 불투명한 공공 구매 프로세스와 부정부패로 상당한 문제점을 초래하는 경우가 존재한다. 이런 경우 블록체인 기술을 적용하면 투명하고 공정한 구매시스템을 구축할 수 있다. Akaba 외(2020)는 나이지리아의 새로운 블록체인 기반 공공 구매 시스템을 소개하였다. 나이지리아의 경우 기존 공공구매시스템은 서류와 수작업에 의존한 비효율적이고 불투명한 프로세스와 주요 참여자들 간의 상호신뢰가 무너진 상태였다. 설문조사에 의하면 응답자의 약 50%가 공공 구매 전 과정에 걸쳐 부정부패가 존재한다고 답했다. 기존의 공공 구매 프로세스는 더이상 공공 구매 역할을 수행할 수 없는 처지였다. 나이지리아 정부는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 기존의 공공 구매시스템에 블록체인 기술을 적용하였다. 가장 문제가 된 경매시스템에 참여자들 간의 정보를 블록체인 상에 공유하여 상호 신뢰를 확보하였으며, 경매 시스템에 시민들의 참여를 높이기 위하여 경매 정보를 투명하게 공개하였다. 마지막으로, 경매시스템에 대한 모니터링과 감사 프로세스를 확립하였다.

위의 두 사례에서는 공통적으로 불공정하고 불투

명한 구매 프로세스의 개선을 위하여 블록체인 기반의 구매시스템을 구축하고 운영하는 노력을 보였다. 스마트 계약이 적용된 구매 시스템은 참여자들인 구매자와 공급자 사이의 계약 이행에 있어 참여자의 주관적인 판단과 결정이 개입할 여지를 사전에 차단하고 위·변조 혹은 오류를 방지할 수 있다. 계약 이행 과정에서 사전에 설정된 조건이 성립이 되면 자동적으로 지불이 되므로 분쟁의 여지도 줄어든다. 이에 더하여 수작업의 대폭적인 감소로 프로세스의 효율성도 높이고 비용도 절감할 수 있었다. 블록체인 기반의 구매시스템은 공정하고 투명한 구매 프로세스가 이미 확립된 선진국에 비하여 구매 프로세스를 새로 확립하려는 개발도상국에 전면적으로 도입하는 것이 보다 효과적일 것으로 예상된다.

## 5. 결론

블록체인 기술은 분산된 네트워크에 거래 원장을 보관하며 관리하는 일종의 데이터베이스 시스템이다. 거래의 투명성, 익명성 등의 특징을 이용하여 비트코인 등 암호화폐의 기술적 플랫폼으로 이용되며 각광을 받고 있다. 정보의 배포와 동기화, P2P 네트워크와 참여자간 합의, 스마트 계약의 도입, 정보의 면역성 등으로 대표되는 블록체인 기술의 특성은 많은 산업과 비즈니스 업무로의 영역을 확대해 가고 있으며, 특히 구매 업무에 대한 적용의 필요성이 높아지고 있다.

본 연구에서는 블록체인 기술에 대한 소개를 포함하여 구매 업무에 대한 블록체인 기술 적용에 대한 개념적 프레임워크를 제안하였다. 본 연구의 의의는 상호신뢰 부족에 의한 분쟁의 발생, 협업의 어려움 등 기존 구매 업무의 한계점을 극복할 수 있는 새로운 프레임워크를 제공한다는 데 있다. 공급업체 발굴에서부터 협상과 계약관리, 발주 및 납품관리 그리고 공급업체관리까지 구매 프로세스의 전 과정에서 블록체인 기술은 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 블록체인 기술이 적용된 구매시스템의 사례들을 소개하여 실제적으로 블록체인 기술이

상호신뢰와 투명성을 높일 수 있음을 확인했을 뿐만 아니라 프로세스 운영의 효율성을 향상시킨 사례도 확인하였다.

구매 분야에서 블록체인 기반의 구매 시스템을 도입하기 위해서는 다음과 같은 전제 조건이 충족되어야 한다. 첫째, 구매 프로세스에 대한 전면적인 혁신이 먼저 수행되어야 한다. 기존의 프로세스와 새로운 프로세스에 대한 차이 분석을 통하여 개선 포인트를 도출하고 변경을 수행하여 새로운 시스템이 원활하게 운용될 수 있게 준비하여야 한다. 둘째, 새로운 구매시스템은 블록체인 기술 기반의 시스템과 네트워크상에서 운영되므로 이에 적합한 기술적 기반을 사전에 조성하여야 한다. 이런 기술적 기반에는 시스템 아키텍처, 네트워크 등을 포함하며 시스템 참여자들과 공유하여야 한다. 셋째, 공급자들의 참여를 이끌어 내야 한다. 계약 이행이 포함된 구매 프로세스는 구매자와 공급자 간의 쌍방향 행위이므로 구매자의 단독적인 추진으로는 원하는 성과를 얻어낼 수 없다. 따라서, 구매자는 공급자의 적극적인 참여를 이끌어 낼 수 있게 설득하고 독려하여야 한다.

블록체인 기술 적용에 있어서 유의할 점은 첫째, 본 기술의 장점에도 불구하고 데이터베이스의 일종인 블록체인 기술 단독으로는 유용성을 확보하기 어렵다는 것이다. 인공지능, 사물인터넷, 빅데이터 분석 등 신기술들을 같이 활용해야 유용성이 더 확대될 수 있다. 구매 분야에서도 프로세스 자동화를 위한 고려가 있어야 하고 특히 4차 산업혁명의 물결에 올라타기 위한 적극적인 대응이 필요하다. 둘째, 앞서 언급한 정보의 투명성을 비롯한 여러 블록체인의 기술적 특성으로 인하여 정보력 등 상대적 경쟁우위에서 대기업에 비하여 부족한 중소기업 혹은 스타트업 기업의 활용이 더 효율적일 것으로 판단된다. 하지만, 본 기술의 적용에는 네트워크 및 하드웨어 등에서 어느 정도 규모의 투자를 필요로 하므로 예산계획 등을 고려한 도입이 필요하다.

블록체인을 활용한 자격증명 등을 활용하여 참여기업들의 투명성을 높이고 상호신뢰를 확보하기 위해서는 주요 참여기업의 정보들을 블록체인 네트워크상에서 잘 관리하는 것이 관건이다. 직물 산업에서의 BSCI 데이터베이스와 같이 공적인 부분에서 주요

정보들을 참여자에게 제공하는 블록체인 네트워크를 공적인 기관 또는 정부에서 적극적으로 운영하여 많은 참여자들이 투명하고 정확한 정보에 어려움 없이 접근할 수 있다면 블록체인 기술의 활용성을 더욱더 높일 수 있을 것이다.

본 연구의 한계점은 구매 업무에 적용될 수 있는 블록체인 기술의 세부기술 분석 및 분류보다는 큰 방향성을 제시한 것에 있다. 향후 보다 기술적인 세부사항을 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] Akaba, T., A. Norta, C. Udokwu & D. Draheim (2020), A Framework for the Adoption of Blockchain-Based e-Procurement Systems in the Public Sector: A Case Study of Nigeria, *Proceedings of Conference on e-Business, e-Services and e-Society*, pp.3-14.
- [2] Binance Academy (2019), Block-chain Use Cases: Healthcare, Available online: <https://www.binance.vision/blockchain/blockchain-use-cases-healthcare>
- [3] Booth, C. (2010), Strategic procurement: Organizing suppliers and supply chains for competitive advantage, KoganPage.
- [4] Christidis, K. & M. Devetsikiotis (2016), Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. *IEEE Access*, Vol.4, pp.2292-2303.
- [5] Cole, R., M. Stevenson, & J. Aitken (2019), Blockchain Technology: Implications for operations and supply chain management, *Supply Chain Management*, Vol.24, No.4, pp.469-483.
- [6] Dimitri, N., G. Piga & G. Spagnolo (2006), *Handbook of Procurement*, Cambridge Press.
- [7] Egels-Zandén, N. & E. Wahlqvist (2007), Post-Partnership Strategies for Defining Corporate Responsibility: The Business Social Compliance Initiative, *Journal of Business Ethics*, Vol.70, No.2, pp.175-189.
- [8] Guo, Y. & C. Liang (2016), Blockchain application and outlook in the banking industry. *Financial Innovation*, Vol.2.
- [9] Guo, L., Q. Liu, K. Shi, Y. Gao, J. Luo & J. Chen (2021), A Blockchain-Driven Electronic Contract Management System for Commodity Procurement in Electronic Power Industry, *IEEE Access*, Vol.9.
- [10] Kim, H. & M. Laskowski (2017), A Perspective on Blockchain Smart Contracts: Reducing Uncertainty and Complexity in Value Exchange, *Proceedings of 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*.
- [11] Kim, H.J. & S.W. Kim (2014), Impact of Buyer-Supplier Collaboration on Supplier Performance in Supply Chain Quality Management, *Journal of the Korean Society of Supply Chain Management*, Vol.14, No.1, pp.75~87.
- [12] Kim, J.S. & N. Shin (2019), The Impact of Blockchain Technology Application on Supply Chain Collaboration and Performance, *Sustainability*, Vol.11, Issue.21, 6181.
- [13] Kouhizadeh, M. & J. Sarkis (2018), Blockchain Practices, Potentials, and Perspectives in Greening Supply Chains, *Sustainability*, Vol.10, Issue.10, 3652.
- [14] Nakamoto, S. (2008), Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System, Available online: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- [15] Nicoletti, B. (2017), The Future: Procurement 4.0, in *Agile Procurement*, Vol.2, pp.1 - 281.
- [16] Planning Korea (2018), Blockchain City. Available online: <http://planningkorea.com/portfolio/blockchain-city>
- [17] Rejeb, A., E. Süle & J. G. Keogh (2018), Exploring New Technologies in Procurement, Transport & Logistics: the International Journal, Vol.12, Issue.45, pp.76-86.
- [18] Sarkis, J. & Y. Dou (2017), *Green Supply Chain Management: A Concise Introduction*, Routledge.

- [19] Tezel, A., E. Papadonikolaki, I. Yitmen & P. Hilletofth (2020), Preparing Construction Supply Chains for Blockchain Technology: An Investigation of its Potential and Future Directions, Front Engineering Management, Vol.7, No.4, pp.547-563
- [20] Tijan, E., S. Aksentijević, K. Ivanić & M. Jardas (2019), Blockchain Technology Implementation in Logistics, Sustainability, Vol.11, Issue.4, 1185.



### 김 준 석

한양대학교 산업공학 학사

한양대학교 산업공학 석사

University of Minnesota 산업공학 석사

University of Minnesota 산업공학 박사

현재: 세종대학교 경영학과 교수

관심 분야: SCM, 구매, Logistics, 블록체인

## 한국SCM학회 연구 윤리 규정

### 제1조 (목적)

본 규정은 ‘한국SCM학회 연구 윤리 규정’이라 부르며 한국SCM학회(이하 “학회”라 한다)와 관련된 연구 행위가 연구 목적을 달성하기 위해 수행되는 과정에서 인간의 기본적, 사회 공동 윤리를 손상하지 않도록 윤리 규정과 기준을 정함을 목적으로 한다. 여기서 연구 행위라는 것은 학회가 주관 공동 주관하는 학술대회와 학회 학술지와 관련된 연구 수행, 결과, 발표 및 게재 등을 포함한다.

### 제2조 (적용 대상)

학회가 주관 또는 공동 주관하는 학술대회 발표와 학회 학술지 투고에 참여하는 학회의 회원들 외에 비회원들(이하 “저자”라 한다)에게도 준용된다.

### 제3조 (저자의 연구 윤리)

1. 저자는 아이디어의 도출, 실험 방법의 설계, 결과의 분석, 연구 결과의 발표, 연구 심사 등의 연구 행위에 있어 정직하여야 한다.
2. 저자는 타인의 연구나 주장의 전체 또는 일부분을 인용할 수 있다. 그러나 자신의 연구처럼 기술해서는 안 되며 반드시 정확하게 출처 표시와 참고문헌 목록을 작성하여야 한다.
3. 저자는 연구 수행과 결과에서 획득한 정보를 이용하여 부당한 이익을 추구하지 않는다.

### 제4조 (연구 내용의 기록, 보존 및 공개)

1. 저자의 연구 내용은 타 연구자가 해석 및 확인이 용이하도록 정확하게 기록하여야 하며, 연구 수행 시 활용된 주요 사실 및 증거는 보존해야 한다.
2. 연구 결과가 출판된 후 타 연구자의 요청이 있을 경우 보안이 보장되는 범위 내에서 연구 결과물이 타 연구자의 연구 수행에 도움이 되도록 최대한 노력한다.

### 제5조 (저자의 책임과 보상)

1. 연구 결과에 기재된 모든 저자들은 발표된 사실에 책임을 다하도록 한다.
2. 저자는 공식적인 공동 연구자 또는 연구에 직간접적으로 기여한 사람들로만 구성되며 상대적 지위와 무관하게 학술적 기여도에 따라 저자 표기 순서가 결정된다.
3. 학회지 및 학술대회 발표논문집에 게재된 논문은 저자가 저작권을 가지나 공동의 목적으로 사용될 때는 학회가 사용권을 가진다.

### 제6조 (연구 부정행위)

연구 수행 중에 발생하는 부정행위는 다음과 같다.

1. 위조: 존재하지 않는 데이터나 연구 결과를 허위로 만들어 내는 행위를 말한다.
2. 변조: 데이터의 변형이나 연구과정을 조작하여 연구 결과를 왜곡하는 행위를 말한다.
3. 표절: 정당한 인용 없이 타 연구자의 연구 결과를 저자의 연구 결과에 사용하는 행위를 말한다.
4. 중복게재: 타 학술지에 게재 또는 투고 중인 원고를 본 학회지에 투고하는 행위를 말한다.
5. 부당한 논문 저자 표시: 연구 수행 중에 학술적 기여도가 없는 자에게 연구 결과의 저자 자격을 부여하는 행위를 말한다.

**제7조 (윤리위원회 구성)**

1. 학회는 연구 윤리와 관련된 사항을 검토심의의결하기 위해 학회 내에 윤리위원회를 운영한다.
2. 윤리위원회 구성은 위원장 1인과 부위원장 1인을 포함하여 5인으로 구성한다.
3. 윤리위원장은 학회 공동회장 중 한 분이 담당하며, 윤리위원회 부위원장은 학회지 공동 편집위원장 중 한 분을 윤리위원장이 임명하며, 나머지 3인의 위원회 회원은 윤리위원장과 부위원장의 합의로 임명한다.

**제8조 (연구 부정행위 제재)**

연구 부정행위가 적발된 연구 및 저자에 대해서는 윤리위원회의 검토를 거쳐 정도에 따라 다음과 같이 제재를 가할 수 있다.

1. 학회 징계 서한 발송
2. 학회의 해당 학회지에서 해당 연구 결과 삭제 또는 수정 요구
3. 연구 관련자의 적정 기간 동안 논문 투고 금지
4. 연구 관련자의 적정 기간 동안 회원자격 상실 및 연구 관련자 소속기관 세부사항 통보
5. 학회에서 제명

**제9조 (윤리위원회 운영)**

1. 필요한 연구 윤리 제정 및 개정을 담당한다.
2. 제소된 회원 및 연구에 대해 윤리 규정 위반 여부 심의 및 위반에 대한 제재를 의결한다.
3. 제소된 사안에 대해 접수된 날로부터 60일 이내에 심의의결한다.
4. 위원회는 위원회의 조사 기간 동안 조사 내용 및 과정에 대해 일체의 보안을 유지하고, 관련자들의 신상 정보를 보호한다.
5. 윤리위원회는 조사 결과 제소된 내용이 무혐의이거나 충분한 소명으로 혐의 사실이 해소될 경우 피고발자 혹은 혐의자의 명예를 회복하기 위해 적절한 후속 조치를 취할 수 있다.

**제10조 (윤리위원회 제소 및 혐의자 의무)**

1. 윤리위원회 제소는 회원 5인 이상의 서명을 받아야 한다.
2. 윤리위원회에 제소된 회원은 윤리위원회의 조사에 협조해야 한다.

**제11조 (윤리위원회 의무)**

1. 윤리위원회는 제소된 자에 대해 심의 결과가 확정되기 전까지는 회원으로 권리를 보장한다.
2. 윤리위원회에 제소된 자는 위원회에 충분히 소명할 권리를 갖고, 위원회는 소명 및 반론 기회를 부여해야 한다.

**제12조** 기타 본 규정에 포함되지 않은 사항은 관계 법령과 사회적 규범에 의거 판단한다.

**부 칙****제1조 (시행일)**

본 규정은 이사회에서 의결된 날부터 시행한다.

2013. 1. 16. 이사회 제정

## **Journal of the Korean Society of Supply Chain Management Copyright Transfer Agreement**

To: Editor of Journal of the Korean Society of Supply Chain Management

Title of submitted manuscript: \_\_\_\_\_

Author(s)(Full Names): \_\_\_\_\_

I hereby certify that I agreed to submit the manuscript entitled as above to Journal of the Korean Society of Supply Chain Management with the following statements:

- This manuscript is author's original work and has not been published before. It will not be submitted again to other journals without permission from Editor of Journal of the Korean Society of Supply Chain Management if it is accepted for publication.
- This manuscript should not contain any libelous statements, defamation and privacy intrusion. Any legal or ethical damage should not be directed to the Korean Society of Supply Chain Management due to this manuscript.
- All authors contributed to this manuscript have equal responsibility with respect to the copyright problem.
- Copyright of the manuscript to be published in the Journal of Korean Society of Supply Chain Management is transferred to the Korean Society of Supply Chain Management.

I agreed Declaration of Ethical Conduct in Research & Statement of Copyright Transfer.

Date:

Author(s) Name and Signature:





## 한국SCM학회지 제21권 제1호 심사자 명단(가나다 순)

---

고현정(군산대학교), 김기태(한밭대학교), 김보성(부산대학교), 김상국(한국과학기술정보연구원), 민대기(이화여자대학교), 이근철(건국대학교), 이현수(금오공과대학교), 장태우(경기대학교), 정영선(전남대학교), 정지복(공주대학교), 정호상(인하대학교), 최동현(한국항공대학교), 최병천(충남대학교), 한창희(한양대학교)

학회지 심사를 위해 노고를 아끼지 않은 심사자 여러분들께 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

## 한국SCM학회지 제21권 제1호


---

인 쇄 / 2021년 5월 31일

발 행 / 2021년 5월 31일

발행인 / 고창성

편집인 / 임성묵 · 박건수

발행처 /  한국SCM학회

경기도 수원시 영통구 월드컵로 206 아주대학교  
팔달관 812호

전화 031-211-5269

전송 031-214-5269

<http://www.kscm.org>

---

등록번호 ISSN 1598-382X