

# 붕괴위험을 고려한 공급망 네트워크 모델: GA-JAYA-FLC 접근법<sup>+</sup>

## (Supply Chain Network Model with Disruption Risk: GA-JAYA-FLC Approach)

윤 영 수<sup>1)\*</sup>  
(YoungSu Yun)

**요약** 본 연구에서는 붕괴위험(Disruption Risk)을 고려한 공급망 네트워크(Supply Chain Network: SCN) 모델을 제안한다. SCN 모델에서 발생하는 붕괴위험은 SCN 각 단계에서 고려되는 설비들의 붕괴 혹은 설비들간 수송경로의 붕괴로 인해 발생한다. 기존의 많은 연구들에서는 이러한 설비 붕괴 및 수송경로의 붕괴를 각각 분리하여 고려하고 있다. 하지만 현실적으로 보면 이러한 붕괴는 동시에 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 설비 붕괴 및 수송경로의 붕괴를 함께 가지는 SCN 모델을 제안한다. 제안된 SCN 모델은 비선형0-1계획법 (Non-Linear 0-1 Programming) 모형으로 표시되며, 혼합형 메타휴리스틱 (GA-JAYA-FLC) 접근법을 사용하여 해결한다. 수치실험에서는 다단계의 SCN 모델을 제안하며, 이를 해결하기 위하여 GA-JAYA-FLC 접근법과 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들 간의 수행도를 비교분석하였다. 실험결과 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법이 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들보다 더 우수한 것을 확인하였다.

**핵심주제어:** 붕괴위험, 공급망 네트워크 모델, 설비 붕괴, 경로 붕괴, 혼합형 메타휴리스틱 접근법

**Abstract** In this paper, a supply chain network (SCN) model with disruption risk is proposed. Either the disruption of the facilities in each stage of the SCN or the disruption of route between them is considered as the disruption risk in the SCN model. Many conventional studies have considered facility disruption and route disruption separately. However, their disruptions can be occurred simultaneously in real world. This paper proposes the SCN model with facility disruption and route disruption simultaneously. The SCN model is represented as a nonlinear 0-1 programming and solved using a hybrid meta-heuristics approach called GA-JAYA-FLC approach. In numerical experiment, the performance of the GA-JAYA-FLC approach is compared with those of some conventional single and hybrid meta-heuristic approaches using a multi-stage SCN model. Experimental result shows that the GA-JAYA-FLC approach outperforms some conventional single and hybrid meta-heuristic approaches.

**Keywords:** Disruption Risk, Supply Chain Network Model, Facility Disruption, Route Disruption, Hybrid Meta-heuristics Approach

\* Corresponding Author: ysyun@chosun.ac.kr

+ 이 논문은 2023학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

Manuscript received July 25, 2024 / revised August 21, 2024 /  
accepted August 23, 2024

1) 조선대학교 경상대학 경영학부, 제1저자, 교신저자

## 1. 서론

공급망 네트워크(Supply Chain Network: SCN) 모델은 원자재의 공급에서 시작하여 제품생산, 유통단계를 거쳐 고객에게 제품이 전달되는 다단계 구조를 가지고 있다. 각 단계에서는 다양한 설비(원자재 공급업체, 제품생산업체, 물류센터 등)들이 고려되며, 각 설비들 간에 원자재 및 제품 수송을 위한 경로가 필요하다. 즉 각 단계에서 고려되는 다양한 설비 및 수송경로가 정상적으로 작동하여야만 SCN 모델의 올바른 운영이 가능하다. 하지만 현실적으로 보면 설비 및 수송경로가 붕괴되는 다양한 상황이 존재한다. 이러한 붕괴상황은 기존의 많은 연구들에서 다양하게 구분되고 조사되었다. Jabbarzadeh et al.(2018)는 붕괴상황을 지진, 홍수, 태풍, 테러리스트의 공격 등과 같은 주요위험(Major Risk)과 설비고장, 동력 손실, 공장 내 사고 등과 같은 우발적 위험(Contingency Risk)으로 구분하였으며, Tang(2006)은 고객 수요 변동, 공급량 변동 등과 같은 운영적 위험(Operational Risk)과 지진, 홍수, 태풍, 환율 변동, 파업 등과 같은 붕괴위험(Disruption Risk)으로 구분하였다. Waters(2007)는 납기 지체, 수요 예측 실패, 인적 에러(Human Error), 과도한 재고 보유 등과 같은 통제 가능한 내부위험(Internal Risk)과 지진, 홍수, 태풍, 원자재 부족, 범죄 등과 같은 통제 불가능한 외부위험(External Risk)으로 구분하였다. 하지만 다수의 연구들(An et al., 2015; Snyder et al., 2016; Cheng et al., 2018; Anudari et al., 2021, 2022; Ge et al., 2022; Gen et al., 2023)에서 태풍, 홍수, 지진 등과 같은 자연재해위험(Natural Disaster Risk)과 파업, 태업, 테러리스트의 공격 등과 같은 인적재해위험(Human-made Disaster Risk)로 구분하고 있다. 따라서 본 연구에서도 설비 및 수송붕괴에 영향을 미치는 주요한 요인으로 자연재해위험과 인적재해위험으로 구분하여 사용한다.

이와 같은 자연재해 및 인적재해로 인해 특정 설비 혹은 수송경로의 이용이 불가능할 경우에는 그 SCN 모델에 연결된 모든 업체들로 피해가 확산될 수 있다. 따라서 SCN 모델을 설계할 때

는 발생할 수 있는 다양한 붕괴상황을 고려하여야 하며, 실제 이러한 붕괴상황이 발생했을 경우 이를 극복하기 위한 방법론의 마련이 필요하다. 기존의 많은 연구들(Wilson, 2007; Peng et al., 2011; Wang et al., 2012; Meena and Sarmah, 2013; An et al., 2015; Ma et al., 2016; Jabbarzadeh et al., 2018; Khan et al., 2020; Anudari and Yun, 2021)에서는 이러한 설비 붕괴 혹은 수송경로 붕괴 상황을 고려한 SCN 모델을 제안하였다.

Meena and Sarmah(2013), Ma et al.(2016), Jabbarzadeh et al.(2018), Khan et al.(2020), Peng et al.(2011)은 설비 붕괴를 고려한 SCN 모델을 제안하였으며, Wilson(2007), Wang et al.(2012), Ghadge et al.(2021)은 수송경로 붕괴를 고려한 SCN 모델을 제안하였다. 하지만 이들 연구들은 설비 붕괴와 수송경로 붕괴를 각각 분리하여 고려하고 있다. 즉 설비 붕괴 및 수송경로 붕괴를 동시에 고려하지는 않았다는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 Baghalian et al.(2013), An et al.(2015), Poudel et al.(2016), Taghavi et al.(2023)은 설비 붕괴 및 수송경로 붕괴를 동시에 고려되는 SCN 모델을 제안하였다. 하지만 설비 붕괴 및 수송경로 붕괴를 동시에 고려한 이들 연구들 또한 이러한 붕괴가 발생하였을 때 대응할 수 있는 대안을 올바르게 제시하지 않고 있다. 예를 들어 Baghalian et al.(2013)은 설비붕괴가 발생하였을 때 이에 대응할 수 있는 백업설비(Backup Facility)만을 고려하였고, 수송경로 붕괴가 발생하였을 때 이에 대응할 수 있는 대안을 제기하지 않았다. 반대로 Poudel et al.(2016)은 수송경로 붕괴가 발생하였을 때 이에 대응할 수 있는 백업수송경로(Backup Route)만을 고려하였고, 설비붕괴가 발생하였을 때 이에 대응할 수 있는 대안을 제기하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 설비 붕괴 및 수송경로 붕괴가 동시에 발생할 수 있는 상황을 고려한 SCN 모델을 제안한다. 즉 설비 붕괴가 발생했을 때는 백업 설비를 이용하고, 수송경로 붕괴가 발생했을 때는 백업 수송경로를 이용하는 방법으로 이러한 붕괴상황에 대응하고자 한다.

제안된 SCN 모델은 각 단계에서 다양한 설비 및 수송경로를 고려하기 때문에 매우 복잡한 네

트위크 형태로 나타나게 된다. 이러한 형태의 SCN 모델은 메타휴리스틱(Meta-heuristics) 접근법들을 이용하여 해결하는 것이 매우 효율적이라고 알려져 있다(Jayaraman and Pirkul, 2001; Syam, 2002; Altiparmak et al. 2009; Yun and Anudari, 2019; Yun, 2024).

메타휴리스틱 접근법들은 크게 두 가지 형태로 구분될 수 있다. 즉 GA(Genetic Algorithm) (De Jong, 1975), PSO(Particle Swarm Optimization) (Rao et al. 2011), TLBO(Teaching and Learning-Based Optimization) (Rao, 2016a) 등과 같이 단일형 메타휴리스틱 접근법을 이용하는 방법과 GA-PSO(Kao and Zahara, 2008), GA-TLBO (Gucyetmez and Çam, 2016) 등과 같이 기존의 단일형 메타휴리스틱 접근법들을 혼합한 혼합형 메타휴리스틱 접근법을 이용한 방법으로 구분할 수 있다.

일반적으로 혼합형 메타휴리스틱 접근법은 사용된 단일형 메타휴리스틱 접근법들 각각의 장점을 혼합하여 사용하는 것이 특징이다. 예를 들어 GA의 경우 전역적 탐색(Global Search) 능력은 우수하지만 지역적 탐색(Local Search) 능력을 떨어지기 때문에 지역적 탐색능력이 우수한 PSO 혹은 TLBO를 GA와 함께 사용한 혼합형 메타휴리스틱 접근법인 GA-PSO 혹은 GA-TLBO를 구성하게 된다. 이러한 특징 때문에 대부분의 혼합형 메타휴리스틱 접근법은 단일형 메타휴리스틱 접근법보다 더 우수한 수행도를 보여주고 있다(Kao and Zahara, 2008; Gucyetmez and Çam, 2016). 본 연구에서도 이러한 경향에 따라서 GA와 JAYA(Rao, 2016b)를 함께 사용한 혼합형 메타휴리스틱 접근법을 제안한다. 즉 GA의 장점인 전역적 탐색능력과 JAYA의 장점인 지역적 탐색능력을 혼합하여 사용한다. 또한 FLC(Fuzzy Logic Controller) (Song et al. 1997)를 함께 사용하여 GA 적용에 있어서 사용되는 다양한 연산자들의 비율을 자동적으로 조절하도록 하였다.

수치실험에서는 설비 붕괴 및 수송경로 붕괴를 가진 SCN 모델에 대한 다양한 시나리오를 제시하며, 각각의 시나리오에 대해 본 연구에서 제안한 혼합형 메타휴리스틱 접근법을 적용하고 그 수행도를 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱

접근법들의 수행도와 비교 분석하였다. 또한 FLC를 적용한 혼합형 메타휴리스틱 접근법과 FLC를 적용하지 않은 혼합형 메타휴리스틱 접근법의 수행도를 각각 비교분석하여 FLC의 적용이 수행도에 어떠한 영향을 미치는지도 추가적으로 분석하였다. 2장에서는 붕괴위험을 가진 SCN 모델에 대한 기존의 연구결과들을 분석하며, 3장에서는 설비 붕괴 및 수송경로 붕괴를 가진 SCN 모델을 제안한다. 4장에서는 제안된 SCN 모델을 비선형 0-1계획법(Non-Linear 0-1 Programming) 모형으로 표현한다. 이 비선형 0-1계획법은 본 연구에서 제안한 혼합형 메타휴리스틱 접근법을 이용해 이행되며, 그 절차는 5장에서 제시한다. 6장은 수치실험으로 설비 붕괴 및 수송경로 붕괴를 가지는 SCN 모델을 몇 가지 형태의 시나리오로 구분하며, 이를 본 연구에서 제안된 혼합형 메타휴리스틱 접근법과 기존의 접근법들을 적용하여 그 수행도를 비교분석한다. 7장 결론에서는 본 연구의 전체적인 내용을 요약하고 향후 연구의 진행 방향 등을 제시한다.

## 2. 붕괴 위험을 가진 SCN 모델의 기존연구

SCN 모델에서 자연재해 및 인적재해의 원인으로 인해 발생하는 붕괴위험은 현실적으로 사전에 예측하기가 상당히 어렵다. 따라서 SCN 모델에 연결된 기업들은 이러한 붕괴위험을 사전에 예방하기 위한 조치를 취해야 한다. Sabouhi et al.(2020)와 Wang et al. (2023)은 이러한 사전 예방을 위한 조치로서 다음을 몇 가지 방안을 제시하였다.

- 투자 강화(Strengthening Investment: SI)
- 수평적 협력(Horizontal Collaboration: HC)
- 설비 강화(Facility Fortification: FF)
- 직접수송(Direct Shipment: DS)
- 측면 경유수송(Lateral Transshipment: LT)
- 신뢰성 있는 물류센터(Reliable Distribution center: RD)
- 긴급 소싱(Emergency Sourcing: ES)
- 긴급 재고(Emergency Inventory: EI)

- 다중 소싱(Multiple Sourcing: MS)
- 다중 경로(Multiple Routes: MR)
- 다중 백업(Multiple Backups: MB)

따라서 기존의 많은 연구들에서는 이러한 방안을 고려하여 붕괴위험에 대응하는 SCN 모델을 구축하였다(Table 1). Table 1에서 보는 것과 같이 가장 많은 연구들에서 다중 백업(MB)을 적용하는 것을 알 수 있다. 다중 백업(MB)은 주요설비(Main Facility)가 붕괴될 경우, 이에 대응하기 위하여 다수의 백업설비들을 활용하거나, 주요수송경로(Main Route)가 붕괴될 경우, 이에 대응하기 위하여 다수의 백업수송경로(Backup Route)를 활용하는 방법을 사용하는 것을 말한다. 따라서 본 연구에서도 다중 백업(MB) 방법을 사용하여 붕괴위험에 대응하는 SCN 모델을 개발한다.

### 3. 제안된 SCN 모델

본 연구에서 제안하는 SCN 모델의 개략적인 흐름은 Fig. 1과 같다. Fig. 1은 다수의 자재를 결합하여 제품을 생산한 후 이를 지역별 물류센터로 보낸 후 해당 지역의 고객들에게 제품을 공급하는 구조를 가지고 있다. 구체적으로 살펴보면, 먼저 공급자그룹 1(Supplier Group 1: SG1)에서 자재 1(Material 1)을, 공급자그룹 2(Supplier Group 2: SG2)에서 자재 2(Material 2)를 각각 생산한 후 제조업체(Manufacturer)로 보낸다. 제조업체는 공급받은 자재 1과 자재 2를 이용하여 제품을 생산한 후 두 군데의 지역별 물류센터(Regional Distribution Center Group 1, 2: RDCG1, RDCG2)로 보낸다. RDCG1과 RDCG2는 해당 지역(Regional Customer Group 1, 2: RCG1, RCG2)에 거주하는 고객(Customer)들의

Table 1 Conventional Studies to Cope with Disruption Risks in SCN Model

	MB	LT	MS	FF	DS	ES	EI	SI	HC	MR	RD
Ramshani et al.(2019)	✓										
Sabouhi et al.(2020)	✓										
Anudari et al.(2022)	✓										
Ge et al.(2022)	✓										
Wang and Yao(2023)	✓										
Ren et al.(2024)	✓										
Taghavi et al.(2024)	✓										
Zhao et al.(2024)	✓										
Sabouhi et al.(2020)		✓									
Zhao et al.(2024)		✓									
Fazelet et. al.(2023)		✓									
Ma et al.(2016)			✓								
Taghavi et al.(2023)			✓								
Wang et al.(2023)			✓								
Zhao et al.(2024)				✓							
Taghavi et al.(2023)				✓							
Sabouhi et al.(2020)					✓						
Alikhani et al.(2023)					✓						
Taghavi et al.(2023)						✓					
He et al.(2018)						✓					
Ren et al.(2024)							✓				
Zhalechian et al.(2016)								✓			
Jabbarzadeh et al.(2016)									✓		
Alikhani et al.(2023)										✓	
Alikhani et al.(2023)											✓
Number of Count	8	3	3	2	2	2	2	1	1	1	0

요청이 있을 경우, 보관된 제품을 각각 전달한다.

만일 이러한 수송과정에서 설비 붕괴위험을 고려할 경우는 다음과 같은 물류흐름이 진행된다. 첫째, SG1의 주 공급업체(Main Supplier)가 붕괴될 경우, 해당 SG1에 존재하는 다수의 백업 공급업체(Backup Supplier) 중에서 한 군대를 선정한 후 여기서 자재 1을 생산하여 제조업체로 공급하게 된다. 동일한 경우가 SG2에서도 발생할 수 있다. 둘째, RDCG1의 주 물류센터(Main DC)가 붕괴될 경우, 해당 RDCG1에 존재하는 다수의 백업 물류센터(Backup DC)들 중에서 한 군대를 선정한 후 여기서 제품을 해당 지역인 RCG1의 고객에게 공급한다. 동일한 경우가 RDCG2에서도 발생할 수 있다. 만일 이러한 수송과정에서 수송경로의 붕괴위험을 고려할 경우는 다음과 같은 물류흐름이 진행된다. 첫째, SG1의 주 공급업체의 주 수송경로(Main Route)가 붕괴될 경우, 해당 SG1에 존재하는 다수의 백업 공급업체 중에서 한 군대를 선정한 후 선정된 백업 공급업체의 백업 수송경로(Backup Route)를 이용하여 자재 1을 생산한 후 제조업체로 공급하게 된다. 동일한 경우가 SG2에서도 발생할 수 있다. 둘째, RDCG1의 주 물류센터의 주 수송경로가 붕괴될 경우, 해당 RDCG1에 존재하는 다수의 백업 물류센터의 백업 수송경로 중에서 한 군대를 선정한 후 여기서 제품을 해당 지역인

RCG1의 고객에게 공급한다. 동일한 경우가 RDCG2에서도 발생할 수 있다.

이와 같이 SCN 모델에서 붕괴위험이 발생할 경우 백업 공급업체, 백업 물류센터 혹은 백업 수송경로를 이용하여 자재 및 제품을 다음 단계로 수송할 수 있기 때문에 SCN 모델의 안정적인 운영이 가능하게 된다.

#### 4. 수리모형

3장 Fig. 1에서 제시한 SCN 모델을 공식화하기 위해 필요한 가정은 다음과 같다.

- 각 단계에서 고려되는 설비 및 수송경로는 사전에 결정되어 있다.
- 각 단계에서 고려되는 설비의 능력(Capacity), 처리량, 고정비용, 단위당 처리비용은 사전에 결정되어 있다.
- 각 단계에서 고려되는 수송경로 상에서 발생하는 수송량, 단위당 수송비용은 사전에 결정되어 있다.
- 주 공급업체와 주 물류센터는 붕괴상황에 따라 그 개설 여부가 결정되지만, 제조업체(Manufacturer)와 RCG는 항상 개설된다.

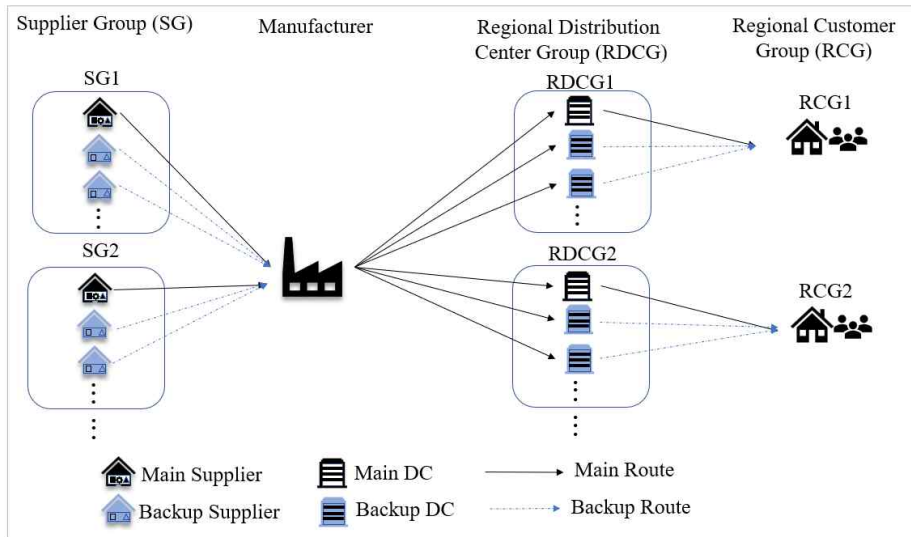


Fig. 1 Overall Structure of the Proposed SCN Model with Disruption Risk

셋(Set), 인덱스(Index), 모수(Parameter) 및 변수(Decision Variable) 설정은 다음과 같다.

- 셋(Set), 인덱스(Index)

$A1$ : Set of SGs, indexed by  $a1$

$S$ : Set of main supplier, indexed by  $s$

$S'$ : Set of backup supplier, indexed by  $s'$

$R1$ : Set of main route of  $s$  indexed by  $r1$

$R1'$ : Set of backup route of  $s'$ , indexed by  $r1'$

$M$ : Set of manufacturer, indexed by  $m$

$R2$ : Set of main route of  $m$  indexed by  $r2$

$A2$ : Set of RDCGs, indexed by  $a2$

$D$ : Set of main DC, indexed by  $d$

$D'$ : Set of backup DC, indexed by  $d'$

$R3$ : Set of main route of  $d$ , indexed by  $r3$

$R3'$ : Set of backup route of  $d'$ , indexed by  $r3'$

$A3$ : Set of RCGs, indexed by  $a3$

- 모수(Parameter)

$C_{a1s}$ : Capacity of  $s$  at  $a1$

$C_{a1s'}$ : Capacity of  $s'$  at  $a1$

$C_m$ : Capacity of  $m$

$C_{a2d}$ : Capacity of  $d$  at  $a2$

$C_{a2d'}$ : Capacity of  $d'$  at  $a2$

$C_{a3}$ : Capacity of  $a3$

$Q_{a1s}$ : Quantity treated at  $s$  at  $a1$

$Q_{a1s'}$ : Quantity treated at  $s'$  at  $a1$

$Q_m$ : Quantity treated at  $m$

$Q_{a2d}$ : Quantity treated at  $d$  at  $a2$

$Q_{a2d'}$ : Quantity treated at  $d'$  at  $a2$

$F_{a1s}$ : Fixed cost of  $s$  at  $a1$

$F_{a1s'}$ : Fixed cost of  $s'$  at  $a1$

$F_m$ : Fixed cost of  $m$

$F_{a2d}$ : Fixed cost of  $d$  at  $a2$

$F_{a2d'}$ : Fixed cost of  $d'$  at  $a2$

$H_{a1s}$ : Unit handling cost of  $s$  at  $a1$

$H_{a1s'}$ : Unit handling cost of  $s'$  at  $a1$

$H_m$ : Unit handling cost of  $m$

$H_{a2d}$ : Unit handling cost of  $d$  at  $a2$

$H_{a2d'}$ : Unit handling cost of  $d'$  at  $a2$

$A_{ma1sr1}$ : Quantity transported from  $s$  at  $a1$  to  $m$  using  $r1$

$A_{ma1s'r1'}$ : Quantity transported from  $s'$  at  $a1$  to  $m$  using  $r1'$

$A_{a2dmr2}$ : Quantity transported from  $m$  to  $d$  at  $a2$  using  $r2$

$A_{a2d'mr2'}$ : Quantity transported from  $m$  to  $d'$  at  $a2$  using  $r2'$

$A_{a3a2dr3}$ : Quantity transported from  $d$  at  $a2$  to  $a3$  using  $r3$

$A_{a3a2d'r3'}$ : Quantity transported from  $d'$  at  $a2$  to  $a3$  using  $r3'$

$T_{ma1sr1}$ : Unit transportation cost from  $s$  at  $a1$  to  $m$  using  $r1$

$T_{ma1s'r1'}$ : Unit transportation cost from  $s'$  at  $a1$  to  $m$  using  $r1'$

$T_{a2dmr2}$ : Unit transportation cost from  $m$  to  $d$  at  $a2$  using  $r2$

$T_{a2d'mr2'}$ : Unit transportation cost from  $m$  to  $d'$  at  $a2$  using  $r2'$

$T_{a3a2dr3}$ : Unit transportation cost from  $d$  at  $a2$  to  $a3$  using  $r3$

$T_{a3a2d'r3'}$ : Unit transportation cost from  $d'$  at  $a2$  to  $a3$  using  $r3'$

- 변수(Decision Variable)

$x_{a1s}$ : take value 1 if  $s$  at  $a1$  is available 0 and otherwise

$x_{a1s'}$ : take value 1 if  $s'$  at  $a1$  is available 0 and otherwise

$y_{a1sr1}$ : take value 1 if  $r1$  of  $s$  at  $a1$  is available 0 and otherwise

$y_{a1s'r1'}$ : take value 1 if  $r1'$  of  $s'$  at  $a1$  is available 0 and otherwise

$x_m$ : take value 1 if  $m$  is available 0 and otherwise

$y_{mr2}$ : take value 1 if  $r2$  of  $m$  is available 0 and otherwise

$x_{a2d}$ : take value 1 if  $d$  at  $a2$  is available 0 and otherwise

$x_{a2d'}$ : take value 1 if  $d'$  at  $a2$  is available 0 and otherwise

$y_{a2dr3}$ : take value 1 if  $r3$  of  $d$  at  $a2$  is available 0 and otherwise

$y_{a2d'r3}$ : take value 1 if  $r3'$  of  $d'$  at  $a2$  is available 0 and otherwise

수리모형의 목적함수는 SCN 모델 운영에서 발생하는 총비용(Total Cost:  $TC$ )을 최소화하는 것이다. 여기서  $TC$ 는 총 고정비용(Total Fixed Cost:  $TFC$ ), 총 처리비용(Total Handling Cost:  $THC$ ), 총 수송비용(Total Transportation Cost:  $TTC$ )의 합을 의미한다.  $TC$ ,  $TFC$ ,  $THC$ ,  $TTC$ 는 각각 수식(1)-(4)로 표현된다.

$$\text{minimize } TC = TFC + THC + TTC \quad (1)$$

$$TFC = \sum_{a1} \sum_s F_{a1s} x_{a1s} + \sum_{a1} \sum_{s'} F_{a1s'} x_{a1s'} + \sum_m F_m x_m + \sum_{a2} \sum_d F_{a2d} x_{a2d} + \sum_{a2} \sum_{d'} F_{a2d'} x_{a2d'} \quad (2)$$

$$THC = \sum_{a1} \sum_s Q_{a1s} H_{a1s} x_{a1s} + \sum_{a1} \sum_{s'} Q_{a1s'} H_{a1s'} x_{a1s'} + \sum_m Q_m H_m + \sum_{a2} \sum_d Q_{a2d} H_{a2d} x_{a2d} + \sum_{a2} \sum_{d'} Q_{a2d'} H_{a2d'} x_{a2d'} \quad (3)$$

$$TTC = \sum_m \sum_{a1} \sum_s \sum_{r1} A_{ma1sr1} T_{ma1sr1} x_m x_{a1s} y_{a1sr1} + \sum_m \sum_{a1} \sum_s \sum_{r1'} A_{ma1sr1'} T_{ma1sr1'} x_m x_{a1s'} y_{a1sr1'} + \sum_{a2} \sum_d \sum_m \sum_{r2} A_{a2dmr2} T_{a2dmr2} x_m x_{a2d} y_{mr2} + \sum_{a2} \sum_d \sum_m \sum_{r2'} A_{a2dmr2'} T_{a2dmr2'} x_m x_{a2d'} y_{mr2'} + \sum_{a3} \sum_{a2} \sum_d \sum_{r3} A_{a3a2dr3} T_{a3a2dr3} x_{a2d} y_{a2dr3} + \sum_{a3} \sum_{a2} \sum_d \sum_{r3'} A_{a3a2d'r3'} T_{a3a2d'r3'} x_{a2d'} y_{a2d'r3'} \quad (4)$$

목적함수 수식(1)을 최소화하기 위해 다음의 제약조건들을 만족해야 한다.

$$\sum_s x_{a1s} + \sum_{s'} x_{a1s'} = 1, \quad \forall a1 \quad (5)$$

$$\sum_d x_{a2d} + \sum_{d'} x_{a2d'} = 1, \quad \forall a2 \quad (6)$$

$$\sum_{a1} \sum_s \sum_{r1} A_{ma1sr1} x_m x_{a1s} y_{a1sr1} \leq \sum_{a1} \sum_s Q_{a1s} x_{a1s}, \quad \forall m \quad (7)$$

$$\sum_{a1} \sum_s \sum_{r1'} A_{ma1sr1'} x_m x_{a1s'} y_{a1sr1'} \leq \sum_{a1} \sum_{s'} Q_{a1s'} x_{a1s'}, \quad \forall m \quad (8)$$

$$\sum_{a2} \sum_d \sum_{r2} A_{a2dmr2} x_m x_{a2d} y_{mr2} + \sum_{a2} \sum_{d'} \sum_{r2'} A_{a2dmr2'} x_m x_{a2d'} y_{mr2'} \leq Q_m, \quad \forall m \quad (9)$$

$$\sum_{a2} \sum_d \sum_{r3} A_{a3a2dr3} x_{a2d} y_{a2dr3} \leq \sum_{a2} \sum_d Q_{a2d} x_{a2d}, \quad \forall a3 \quad (10)$$

$$\sum_{a2} \sum_d \sum_{r3'} A_{a3a2d'r3'} x_{a2d'} y_{a2d'r3'} \leq \sum_{a2} \sum_{d'} Q_{a2d'} x_{a2d'}, \quad \forall a3 \quad (11)$$

$$\sum_{a1} \sum_s \sum_{r1} A_{ma1sr1} x_m x_{a1s} y_{a1sr1} + \sum_{a1} \sum_{s'} \sum_{r1'} A_{ma1sr1'} x_m x_{a1s'} y_{a1sr1'} \leq C_m, \quad \forall m \quad (12)$$

$$\sum_d \sum_m \sum_{r2} A_{a2dmr2} x_m x_{a2d} y_{mr2} \leq \sum_d C_{a2d} x_{a2d}, \quad \forall a2 \quad (13)$$

$$\sum_{d'} \sum_m \sum_{r2'} A_{a2dmr2'} x_m x_{a2d'} y_{mr2'} \leq \sum_{d'} C_{a2d'} x_{a2d'}, \quad \forall a2 \quad (14)$$

$$\sum_{a2} \sum_d \sum_{r3} A_{a3a2dr3} x_{a2d} y_{a2dr3} + \sum_{a2} \sum_{d'} \sum_{r3'} A_{a3a2d'r3'} x_{a2d'} y_{a2d'r3'} \leq C_{a3}, \quad \forall a3 \quad (15)$$

$$x_{a1s}, x_{a1s'}, y_{a1sr1}, y_{a1sr1'}, y_{mr2}, x_{a2d}, x_{a2d'}, y_{a2dr3}, y_{a2d'r3'} \in \{0, 1\}, \quad \forall a1, s, s', r1, r1', m, r2, a2, d, d', r3, r3' \quad (16)$$

제약조건 (5)는 각각의 SG에서 주 공급업체와 백업 공급업체 중에서 반드시 하나만 개설되어야 한다는 의미이다. 같은 의미로 제약조건 (6)은 RDCG에서도 주 물류센터와 백업 물류센터 중에서 반드시 하나만 개설되어야 한다는 의미이다. 제약조건 (7)에서 (11)까지는 현 단계에서 그 다음 단계로 보내는 수송량의 합은 현 단계 설비의 처리용량보다 작거나 같아야 한다는 의미이다. 제약조건 (12)에서 (15)까지는 현 단계에서 그 다음 단계로 보내는 수송량의 합은 그 다음 단계에서 개설되는 설비의 수용량(Capacity)보다 작거나 같아야 한다는 의미이다. 마지막 제약조건 (16)은 각 결정변수의 개설여부를 결정하고 있다.

제시된 수리모형은 비선형0-1계획법 형태를 나타내고 있으며, SCN 모델에서 각 단계별로 다양한 설비들과 수송경로가 존재하기 때문에 기존의 최적화 접근법들로는 그 해를 구하기가 어렵다(Gen and Cheng, 2000; Savaskan et al., 2004). 따라서 본 연구에서는 혼합형 메타휴리스틱 접근법을 이용하여 해결하고자 한다.

## 5. GA-JAYA-FLC 접근법

본 연구에서 제안한 SCN 모델의 효율적인 이행을 위해 혼합형 메타휴리스틱 접근법을 제안한다. 제안된 혼합형 메타휴리스틱 접근법은 기존의 단일형 메타휴리스틱 접근법인 GA와 JAYA를 이용하며, GA에서 사용되는 모수의 적용비율을 자동화하기 위한 FLC를 함께 사용한다. 먼저 각각의 접근법들에 대한 특징 및 적용상의 장단점을 살펴본다.

GA는 De Jong(1975)이 제안한 방법으로 생명체의 진화과정을 모방하여 해를 탐색하는 특징을 가지고 있다. 특히 해를 탐색할 때 개별적인 해들을 각각 이용하는 것이 아니라 해들의 집합인 집단(Population)을 이용하여 탐색을 진행하기 때문에 기존에 개별적인 해를 이용하여 탐색을 수행하는 Tabu Search (Glover, 1995), Simulated Annealing(Kirkpatrick et al., 1983) 등 보다 더 우수한 해를 발견할 수 있다는 것이 장점이다. 하지만 개별해가 아니라 집단을 이용하여 탐색을 수행하기 때문에 그 수행속도가 느리고, 집단 탐색으로 인해 수렴된 특정 탐색공간 내에서 보다 세밀하게 탐색을 수행하는 지역적 탐색능력은 떨어진다는 단점이 존재한다. 또한 GA를 적용할 때 사용되는 모수인 교차변이(Crossover), 돌연변이(Mutation) 등의 적용비율을 어떻게 설정하느냐에 따라 해의 품질이 영향을 받는다는 한계점이 존재한다.

JAYA는 Rao(2016b)가 제안한 접근법으로 해결하고자 하는 문제의 초기해를 일부 생성한 후 이들 초기해들 간의 결합과정을 통해 새로운 해를 생성하고, 이 과정에서 열등한 해는 제거하고 우수한 해를 지속적으로 생성하는 과정을 통해 해의 개선을 추구하는 특징을 가지고 있다. JAYA는 GA와는 다르게 해의 개선과정에 어떠한 모수를 사용하지 않기 때문에 그 적용절차가 간단하고 빠른 수행속도를 가지는 장점이 있다. 하지만 이러한 해의 개선과정은 기존의 해들을 이용하여 개선을 진행하기 때문에 해의 탐색공간이 한정되고 보다 넓은 탐색공간에 존재하는 더 우수한 해들을 탐색할 수 없다(즉 지역적 탐색능력만 있다)는 단점이 존재한다.

위에서 언급한 것을 요약하면 GA는 전역적 탐색능력을 뛰어나지만 지역적 탐색능력은 떨어지며, 반대로 JAYA는 지역적 탐색능력은 뛰어나지만 전역적 탐색능력은 떨어진다. 따라서 GA, JAYA 각각의 장점을 결합한 혼합형 메타휴리스틱 접근법을 개발한다. 즉 탐색의 초기단계는 GA를 적용하여 전역적 탐색을 수행하고, 이러한 과정에서 수렴된 특정 탐색공간에 대해서는 JAYA를 적용하여 지역적 탐색을 수행하는 방법으로 혼합형 메타휴리스틱 접근법을 개발한다. 또한 혼합형 메타휴리스틱 접근법에서 GA 적용단계에서 사용되는 모수인 교차변이와 돌연변이는 그 적용비율의 어떻게 설정하느냐에 따라 해의 품질에 영향을 주게 된다. 따라서 교차변이와 돌연변이의 적용비율을 해의 탐색과정에서 자동으로 조절해 주기 위해 FLC(Song et al., 1997)를 함께 사용한다. Song et al.(1997)이 제안한 FLC의 적용은 해의 탐색과정에서 생성된 이전 집단과 현재 집단 각각의 평균적합도(Average Fitness)값을 구한 후 그 차이가 일정수준 이내에 있을 경우에는 현재의 교차변이 및 돌연변이 적용비율을 그 다음 탐색과정에도 동일하게 적용하고, 만일 그 차이가 일정수준을 벗어날 경우에는 미리 설정된 계산방식(Defuzzification rule)에 따라 교차변이 및 돌연변이 적용비율을 다시 계산하여 변경하고 이렇게 변경된 적용비율을 그 다음 탐색과정에 적용하게 된다. 이러한 절차는 해의 탐색 전 과정에 걸쳐 진행된다. 이에 대한 보다 세부적인 적용방법은 Song et al.(1997)의 논문을 참조하기 바란다.

본 연구에서 제안한 혼합형 메타휴리스틱인 GA-JAYA-FLC 접근법의 세부적인 적용방법은 Fig. 2와 같다.

## 6. 수치실험

수치실험에서는 4장의 수리모형을 이행하기 위한 SCN 모델의 구조를 먼저 제안하고, 이를 5장의 GA-JAYA-FLC 접근법에 적용하여 그 수행도를 분석한다. 먼저 사용할 SCN 모델의 구조는 다음과 같다.



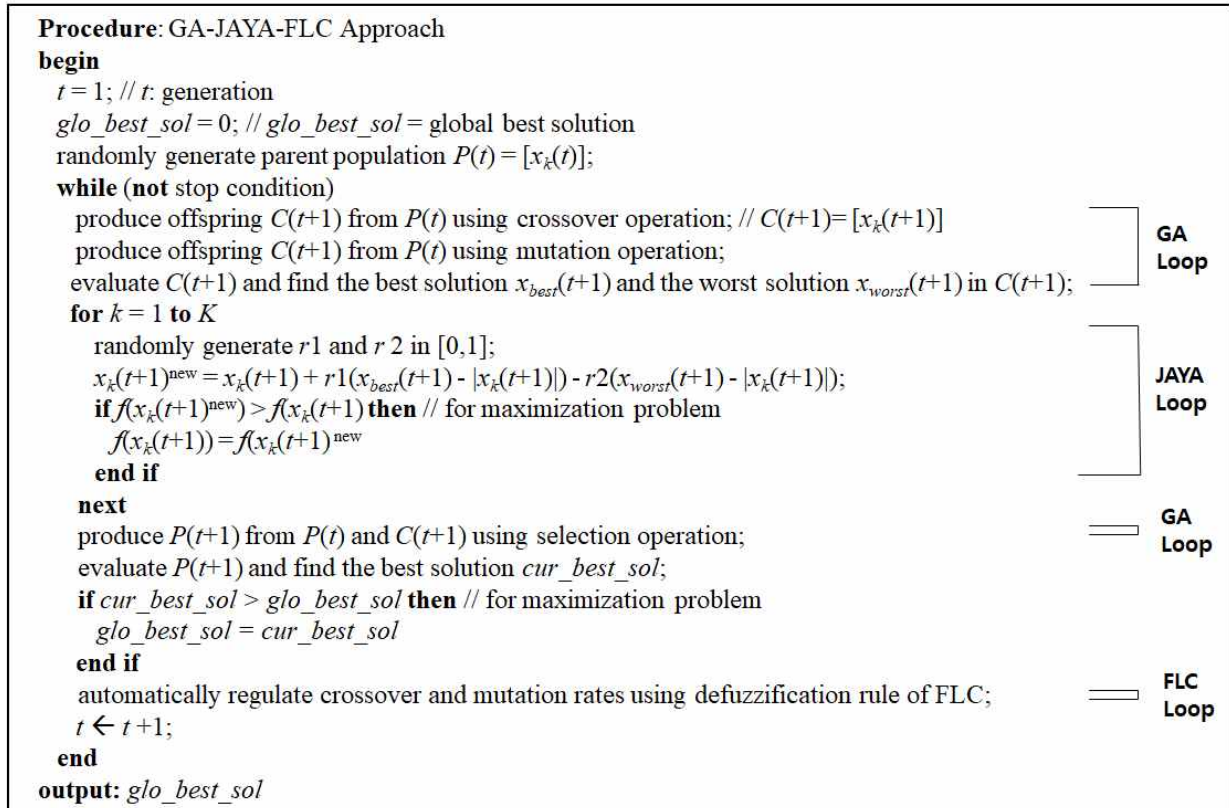


Fig. 2 Pseudo Code of GA-JAYA-FLC Approach

- SG: 5 (각 SG에는 5개의 공급업체(1개의 주 공급업체, 4개의 백업공급업체)가 존재한다)
- 제조업체: 1
- RDCG: 5 (각 RDCG에는 5개의 DC(1개의 주 물류센터, 4개의 백업 물류센터)가 존재한다)
- RCG: 5 (지역별 5개의 RCG에서 각각의 제품을 공급받는다)

위에서 설정된 SCN 모델의 구조에서 다음과 같은 다양한 붕괴상황 시나리오를 설정하였다.

- 시나리오 1(S1): SG 1곳에서 주 공급업체가 붕괴된다.
- 시나리오 2(S2): RDCG 1곳에서 주 물류센터가 붕괴된다.
- 시나리오 3(S3): SG 1곳에서 주 공급업체의 주 경로가 붕괴된다.
- 시나리오 4(S4): RDCG 1곳에서 주 물류센터의 주 경로가 붕괴된다.

- 시나리오 5(S5): SG 1곳에서 주 공급업체가 붕괴되고, 동시에 RDCG 1곳에서도 주 물류센터가 붕괴된다.
- 시나리오 6(S6): SG 1곳에서 주 공급업체의 주 경로가 붕괴되고, 동시에 RDCG 1곳에서도 주 물류센터의 주 경로가 붕괴된다.
- 시나리오 7(S7): SG 3곳에서 주 공급업체가 붕괴되고, 동시에 RDCG 3곳에서도 주 물류센터가 붕괴된다.
- 시나리오 8(S8): SG 3곳에서 주 공급업체의 주 경로가 붕괴되고, 동시에 RDCG 3곳에서도 주 물류센터의 주 경로가 붕괴된다.

수리모형에서 사용되는 모수는 Table 2와 같으며, 설정된 범위 내에서 랜덤하게 모수값을 발생시킨다.

### 6.1 GA-JAYA-FLC 접근법의 수행도 분석

GA-JAYA-FLC 접근법의 수행도는 기존의 단일형 메타휴리스틱 접근법들(GA(De Jong, 1975), JAYA(Rao, 2016b), TLBO(Rao, 2011), PSO (Kennedy and Eberhart, 1995))과 혼합형 메타휴리스틱 접근법들(GA-TLBO(Gucyetmez and Çam, 2016), GA-PSO(Kao and Zahara, 2008))과의 수행도와 비교분석을 실시한다. GA-JAYA-FLC 접근법과 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들에 사용되는 모수 설정은 다음과 같다.

- 총세대수(반복수): 500
- 집단의 크기: 10
- 교차변이 비율: 0.5
- 돌연변이 비율: 0.3

Table 2 Parameter Setting

	Fixed Cost	Unit Handling Cost	Unit Transp. Cost
Main Supplier	$U[1000,1500]$	$U[5,7]$	$U[6,8]$
Backup Supplier	$U[1500,1700]$	$U[8,11]$	$U[8,12]$
Manufacturer	$U[2000,2500]$	$U[70,80]$	$U[10,15]$
Main DC	$U[800,1200]$	$U[4,7]$	$U[4,6]$
Backup DC	$U[1200,1500]$	$U[7,10]$	$U[8,10]$

여기서 총세대수(반복수) 및 집단의 크기는 비교대상인 모든 접근법에 동일하게 적용되며, 교차변이 및 돌연변이 비율은 GA, GA-TLBO, GA-PSO 접근법에 적용된다. 또한 각 접근법들의 수행도 비교를 위해서는 다음의 세 가지 척도가 사용된다.

- BS(Best Solution): 각 접근법들의 총 세대수 이후 구해진 가장 우수한 해.
- AS(Average Solution): 각 접근법들의 총 세대수 이후 구해진 해들의 평균값.

- Time(Running Time): 각 접근법들의 총 세대수까지 실행시간의 평균값 (unit: sec.)

수행도 척도인 BS, AS, Time은 각 접근법들을 총 세대수까지 10회 반복한 후 구해진 값들이다. 각각의 시나리오에 대해 각 접근법들을 적용하여 구해진 결과는 Table 3, 4와 같으며, Table 3, 4에서 진하게 표시된 값들이 각각의 수행도 척도에서 가장 우수한 값을 의미한다.

Table 3의 S1 결과를 보면, 수행도 척도인 BS에서 GA-JAYA-FLC가 625,287의 값으로 가장 우수한 것을 알 수 있다. 이 값(625,287)은 단일형 메타휴리스틱 접근법인 GA, JAYA, TLBO, PSO 보다 각각 3.57%(=648,468/625,287), 0.92%(=631,101/625,287), 2.70%(=642,609/625,287), 2.74%(=642,878/625,287) 더 우수하며, 혼합형 메타휴리스틱 접근법인 GA-TLBO, GA-PSO 보다 각각 1.49%(=634,714/625,287), 2.10%(=638,697/625,287) 더 우수하다. 이와 비슷한 결과를 S2, S3, S4의 결과에서도 볼 수 있다. 하지만 S1의 수행도 척도인 AS에서는 기존의 GA-TLBO가 GA-JAYA-FLC 보다 0.26%(=655,623/657,334) 더 우수하며, S4의 수행도 척도인 AS에서도 기존의 GA가 GA-JAYA-FLC 보다 1.40%(=619,761/628,413) 더 우수한 것을 알 수 있다. 수행도 척도인 Time의 경우에는 S1, S2, S3, S4 모두에서 GA-JAYA-FLC가 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들 보다 더 열등한 것을 알 수 있다. Table 4의 S5 결과를 보면, 수행도 척도인 BS에서 GA-JAYA-FLC가 640,313 값으로 가장 우수한 것을 알 수 있다. 이 값(640,313)은 단일형 메타휴리스틱 접근법인 GA, JAYA, TLBO, PSO 보다 각각 0.20%, 0.18%, 0.27%, 0.29% 더 우수하며, 혼합형 메타휴리스틱 접근법인

Table 3 Computation Results of Each Approach in S1 - S4

	S1							S2						
	GA	JAYA	TLBO	PSO	GA-TLBO	GA-PSO	GA-JAYA-FLC	GA	JAYA	TLBO	PSO	GA-TLBO	GA-PSO	GA-JAYA-FLC
BS	648,468	631,101	642,609	642,878	634,714	638,697	<b>625,287</b>	617,611	606,683	605,236	609,109	598,054	605,782	<b>592,177</b>
AS	672,474	667,942	659,734	664,291	<b>655,623</b>	657,879	657,334	640,469	637,581	639,108	641,881	631,797	637,118	<b>621,552</b>
Time	3.61	4.60	<b>3.26</b>	3.30	3.96	4.33	4.88	3.00	4.17	<b>2.90</b>	2.97	3.29	3.50	4.52

Table 4 Computation Results of Each Approach in S5 - S8

S5								S6							
	GA	JAYA	TLBO	PSO	GA-TLBO	GA-PSO	GA-JAYA-FLC	GA	JAYA	TLBO	PSO	GA-TLBO	GA-PSO	GA-JAYA-FLC	
BS	641,571	641,481	642,028	642,162	640,455	641,746	<b>640,313</b>	611,910	606,618	607,326	609,999	606,310	606,896	<b>605,919</b>	
AS	666,285	663,656	677,489	668,137	668,255	668,966	<b>660,655</b>	639,952	<b>629,107</b>	647,480	646,043	646,543	638,544	634,486	
Time	<b>3.00</b>	5.67	3.50	3.11	4.22	3.93	5.89	<b>3.08</b>	4.45	3.14	3.10	4.65	4.08	5.62	
S7								S8							
	GA	JAYA	TLBO	PSO	GA-TLBO	GA-PSO	GA-JAYA-FLC	GA	JAYA	TLBO	PSO	GA-TLBO	GA-PSO	GA-JAYA-FLC	
BS	752,350	745,478	748,240	749,251	741,507	743,604	<b>727,239</b>	636,600	619,027	623,538	627,308	620,994	622,885	<b>609,621</b>	
AS	770,628	769,847	763,961	768,362	760,119	761,545	<b>748,997</b>	703,126	639,406	655,732	656,047	650,995	654,056	<b>635,688</b>	
Time	4.79	4.27	<b>4.06</b>	4.22	5.01	5.11	5.70	<b>4.72</b>	4.89	5.45	5.08	5.62	5.97	5.09	

GA-TLBO, GA-PSO 보다 각각 0.02%, 0.22% 더 우수하다. 이와 비슷한 결과를 S6, S7, S8에서도 볼 수 있다.

S5의 수행도 척도인 AS에서는 GA-JAYA-FLC가 660,655로서 비교대상인 모든 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법 보다 더 우수한 값을 가지는 것을 알 수 있으며, S6를 제외하고 S7, S8의 결과분석에서도 이와 비슷한 결과를 나타내고 있다. 하지만 수행도 척도인 Time에서는 S5, S6, S7, S8 모두에서 GA-JAYA-FLC가 가장 느린 수행도를 보여 주었다. Fig. 3과 4는 S6와 S7에 대해 비교대상인 모든 접근법들의 수렴 과정을 보여주고 있다.

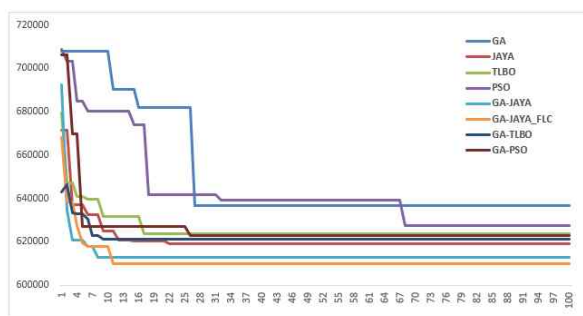


Fig. 3 Convergence Behaviors in S6

Fig. 3에서 살펴보면, GA-JAYA-FLC를 포함한 기존의 모든 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들은 초기 세대에서 빠르고 급격한 수렴 과정을 보여주고 있다. 하지만 GA와 PSO는 약 70세대 이후 부터, JAYA, TLBO, GA-TLBO, GA-PSO는 약 25세대 이후부터, GA-JAYA, GA-JAYA-FLC는 약 10세대 이후부터 더 이상

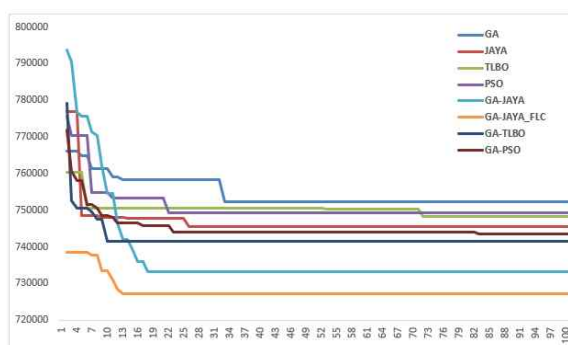


Fig. 4 Convergence Behaviors in S7

의 수렴과정을 보여주고 있지 않다. 하지만 전체적인 수렴과정을 살펴보면 GA-JAYA-FLC가 가장 빠르고 가장 우수한 수렴과정을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 결과분석과 비슷하게 Fig. 4에서도 모든 접근법들이 초기 단계에서 빠르고 급격한 수렴과정을 보여주고 있지만 전체적인 수렴과정을 살펴보면 GA-JAYA-FLC가 기존의 모든 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들 보다 더 우수한 수렴과정을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. Table 3, 4와 Fig. 3, 4의 결과 분석을 통해 다음을 알 수 있다.

- 수행도 척도 BS와 수렴과정을 살펴보면, 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법이 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들 보다 더 우수한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 GA-JAYA-FLC 접근법이 비교대상인 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들 보다 해의 탐색에 있어서 더 효율적이라는 것을 알 수 있다.
- 수행도 척도 AS에서 살펴보면, 본 연구에서

제안한 GA-JAYA-FLC 접근법이 S2, S3, S5, S7, S8에서 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들 보다 더 우수한 결과를 보여 주었다. 비록 GA-JAYA-FLC 접근법이 S1, S4, S6에서는 비교대상인 모든 기존의 접근법들 보다 약간의 열등한 결과를 보여주고 있지만, AS의 결과를 전체적인 측면에서 보면 GA-JAYA-FLC 접근법이 비교대상인 모든 접근법들 보다 약간의 우위를 보여주는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 위에서 언급한 BS의 수립과정 결과분석과 마찬가지로 GA-JAYA-FLC 접근법이 해의 탐색에 있어서 비교대상인 기존의 접근법들보다 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

- 수행도 척도 Time에서 살펴보면, 기존의 접근법들 보다 GA-JAYA-FLC 접근법이 모든 시나리오 (S1에서 S8까지)에서 가장 열등한 결과를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 GA-JAYA-FLC 접근법이 GA와 JAYA를 혼합하고, 여기에 GA에서 사용되는 모수(교차변이 및 돌연변이)의 적용비율을 자동으로 조절해 주는 FLC를 함께 사용하는 복잡한 구조를 가지고 있으며, 이러한 구조로 인해 해의 탐색 과정에서 기존의 접근법들보다 탐색시간이 길어지는 문제점을 가지고 있기 때문이다.

## 6.2 GA-JAYA-FLC 접근법에서 FLC의 성능 검증

이미 언급하였듯이 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법은 기존의 GA와 JAYA를 혼합한 메타휴리스틱 형태에 GA의 모수인 교차변이 및 돌연변이 적용비율을 자동화하기 위한 FLC를 함께 가지고 있다. 따라서 FLC를 GA-JAYA에 적용하는 경우의 수행도와 이를 적용하지 않는 경우의 수행도를 비교분석해 보면 FLC 적용의 효율성을 확인할 수 있을 것이다. Fig. 5, 6은 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법에서 FLC를 적용한 경우와 적용하지 않는 경우의 평균적합도(Average Fitness)값의 변동과정을 보여주고 있다.

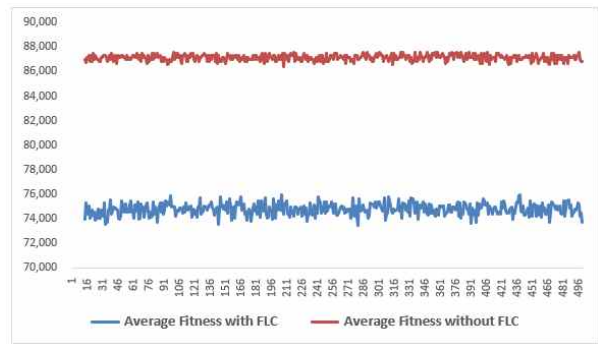


Fig. 5 Changes of Average Fitness in S7

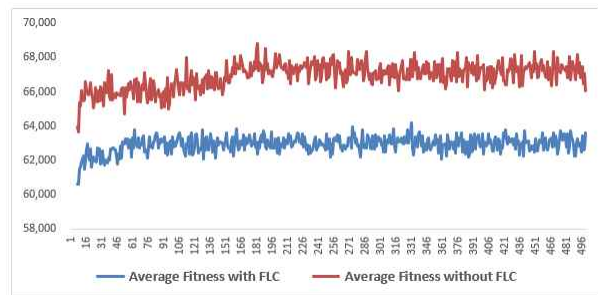


Fig. 6 Changes of Average Fitness in S8

Fig. 5를 살펴보면, FLC를 적용한 GA-JAYA 접근법과 적용하지 않는 GA-JAYA 접근법 모두는 전체 세대에서 다양한 평균적합도 값의 변동을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 전체적으로 보면 FLC를 적용한 GA-JAYA 접근법이 FLC를 적용하지 않는 GA-JAYA 접근법보다 더 낮은 평균적합도 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서도 Fig. 5와 비슷한 분석결과를 볼 수 있다. 즉 전체 세대에 대해 FLC를 적용한 GA-JAYA 접근법이 FLC를 적용하지 않는 GA-JAYA 접근법 보다 더 낮은 평균적합도 값을 나타내고 있다. Fig. 5, 6의 분석결과를 통해 GA-JAYA 접근법에서 GA의 모수인 교차변이 및 돌연변이 적용비율을 자동으로 조절해 주는 FLC를 적용하는 것이 이를 적용하지 않는 것 보다 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 붕괴위험을 가지는 SCN 모델

을 제안하였다. 제안된 SCN 모델에서 각 SG의 주 공급업체 혹은 주공급업체의 주 경로가 붕괴되는 상황과 각 RDCG에서 주 물류센터 혹은 주 물류센터의 주 경로가 붕괴되는 상황을 가정하여 이를 효율적으로 운영하기 위한 방안을 마련하였다. 즉 주 공급업체와 주 물류센터가 붕괴될 경우에는 백업 공급업체와 백업 물류센터를 각각 운영하는 방안, 주 공급업체의 주 수송경로와 주 물류센터의 주 수송경로가 붕괴될 경우에는 백업 공급업체의 백업 수송경로와 백업 물류센터의 백업 수송경로를 각각 운영하는 방안을 고려하였다. 이러한 붕괴위험을 가진 SCN 모델을 표현하기 위한 수리모형을 설계하였고, 이행하기 위한 혼합형 메타휴리스틱(GA-JAYA-FLC) 접근법을 제안하였다. 제안된 GA-JAYA-FLC 접근법은 GA의 장점인 전역적 탐색능력과 JAYA의 장점인 지역적 탐색능력을 가지며, GA의 모수인 교차변이와 돌연변이의 적용비율을 자동화하기 위한 FLC를 함께 가지고 있다.

수치실험에서는 각 단계별로 다양한 설비와 수송경로를 가지는 SCN 모델을 이용하여 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법과 기존의 단일형 메타휴리스틱(GA, JAYA, TLBO, PSO) 접근법 및 혼합형 메타휴리스틱 (GA-PSO, GA-TLBO) 접근법의 수행도를 다양한 붕괴상황의 시나리오를 가정하여 비교분석하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다. 첫째, 수행도 척도 BS와 AS에서는 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법이 비교대상인 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱보다 더 우수한 수행도를 보여주었다. 둘째, 수행도 척도 Time에 있어서는 GA-JAYA-FLC 접근법이 비교대상인 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱보다 더 열등한 결과를 보여주었다. 수치실험 결과분석을 종합하면, 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법은 그 탐색과정에서 더 우수한 해를 발견할 가능성이 비교대상인 기존의 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들보다 더 높다는 것을 알 수 있으며, 이는 GA-JAYA-FLC 접근법의 장점으로 판단할 수 있다.

본 연구를 종합적인 측면에서 살펴보면, 다음과 같은 그 우수성 및 의의를 확인할 수 있다.

첫째, 기존의 많은 연구들에서는 SCN 모델에서 설비 및 수송경로의 붕괴를 따로 구분하여 고려하고 있지만, 본 연구에서는 이를 함께 고려한 점이 가장 큰 특징이라고 볼 수 있다. 왜냐하면 실제 현실적인 측면에서 살펴보면, SCN 모델의 각 단계에서 설비 및 수송경로의 붕괴가 동시에 발생할 수 있는 많은 상황들이 존재하기 때문이다. 둘째, 이러한 붕괴상황을 모델화하고 이를 해결하기 위해 혼합형 메타휴리스틱 접근법인 GA-JAYA-FLC 접근법을 제안한 점이다. 기존의 많은 연구들에서도 단일형 및 혼합형 메타휴리스틱 접근법들을 적용하고 있지만 수치실험을 통해 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법이 기존의 접근법들보다 더 우수하다는 것을 증명하고 있다. 결국 본 연구는 붕괴위험을 가지는 SCN 모델과 이를 해결하기 위한 GA-JAYA-FLC 접근법을 제안한 점에서는 기존 연구들과의 차별성 및 그 우수성이 입증된다고 판단할 수 있다. 하지만 다음과 같은 몇 가지 내용에 있어서는 본 연구의 한계점으로 지적될 수 있다.

첫째, 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC 접근법의 수행속도가 기존의 비교대상 접근법들보다 다소 느리다는 단점이 있다. 따라서 탐색의 소요시간을 줄일 수 있는 방법이 필요하다. 둘째, 기존의 다른 단일형 메타휴리스틱 접근법들과의 혼합화(예를 들어, GA-TLBO-FLC 혹은 GA-PSO-FLC 등) 방법을 개발하여 이를 상호간 비교분석해 보는 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다. 또한 GA-JAYA-FLC 접근법이 두 가지의 기존 메타휴리스틱 접근법들(GA, JAYA)과 모수 자동화를 위한 FLC를 함께 사용하고 있기 때문에 이에 대한 보다 이론적인 측면에서의 타당성 및 그 활용성에 대한 연구가 필요할 것이다. 셋째, 본 연구에서 제안한 GA-JAYA-FLC의 적용에 있어서 사용되는 모수(예를 들어, 집단 크기, 교차변이 및 돌연변이 비율 등)들에 대한 민감도분석(Sensitivity Analysis)이 필요하다. 이러한 민감도 분석은 GA-JAYA-FLC 접근법의 강건성(Robustness)를 강화하는데 도움이 될 것이다. 넷째, 6장 수치실험에서 사용된 SCN 모델을 표현하기 위한 각종 데이터는 랜덤하게 발생된 모수값을 사용하였다. 하지만 현장의 실

제 데이터를 확보하여 사용하는 것이 보다 더 현실성을 강화할 수 있는 방안이 될 것이다. 이상과 같은 본 연구의 단점 및 한계점은 추후 연구 과제로 남겨둔다.

## References

- Alikhani, R., Eskandarpour, M. and Jahani, H. (2023). Collaborative Distribution Network Design with Surging Demand and Facility Disruptions, *International Journal of Production Economics*, 262, 108912.
- Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L. and Karaoglan, I. (2009). A Steady-state Genetic Algorithm for Multiproduct Supply Chain Network Design, *Computers and Industrial Engineering*, 56(2), 521 - 537.
- An, S., Cui, N., Bai, Y., Xie, W., Chen, M. and Ouyang, Y. (2015). Reliable Emergency Service Facility Location under Facility Disruption, En-route Congestion and in-Facility Queuing, *Transportation Research Part E*, 82, 199-216.
- Anudari, C. and Yun, Y. S. (2021). Supply Chain Network Model considering Supply Disruption in Assembly Industry: Hybrid Genetic Algorithm Approach, *Journal of Korea Society of Industrial Information Systems*, (26)3, 9-22.
- Anudari, C., Yun, Y. S. and Gen, M. (2021). Hybrid Meta-heuristics Approach for solving Supply Chain Network Model under Disruption Risk, *2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, Dec. 15-17, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 482-487.
- Anudari, C., Yun, Y. S. and Gen, M. (2022). Applying GA-VNS Approach to Supply Chain Network Model with Facility and Route Disruptions, *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 17(3). 151-165.
- Baghalian, A., Rezapour, S. and 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*, 227, 199-215.
- Cheng, C., Qi, M., Zhang, Y. and Rousseau, L-M. (2018). A Two-stage Robust Approach for the Reliable Logistics Network Design Problem, *Transportation Research Part B*, 111, 185-202.
- De Jong, K. A. (1975). *Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems*, Dissertation, University of Michigan (University Microfilms No. 76-9381), Michigan, USA.
- Fazel, S. J., Rostamkhani, M. and Rashidnejad, M. (2023). Proposing a Bi-objective Model for the Problem of Designing a Resilient Supply Chain Network of Pharmaceutical-health Relief Items under Disruption Conditions by considering Lateral Transshipment, *EURO Journal of Decision Processes*, 11, 100037.
- Ge, C., Zhang, L. and Yuan, Z. (2022). Distributionally Robust Optimization for the Closed-loop Supply Chain Design under Uncertainty, *Aichi Journal*, <https://doi.org/10.1002/aic.17909>
- Gen, M. and Cheng, R. (2000). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, John-Wiley & Sons.
- Gen, M., Yun, Y. S. and Erdenebaatar, T. (2023). Hybrid GA and Enhanced Jaya Algorithm for Supply Chain Network Model with Disruption Risk, *The 52nd Annual Meeting of the Southeast Decision Sciences Institute 2023(SEDSSI)*, Feb. 15-17, Wilmington, NC. USA. pp. 331-350.
- Ghadge, A. Er, M., Ivanov, D. and Chaudhuri, A. (2021). Visualisation of Ripple Effect in

- Supply Chains under Long-term, Simultaneous Disruptions: A System Dynamics Approach, *International Journal of Production Research*, 60(20), 6173-6186.
- Glover, F., Kelly, J. P. and Laguna, M. (1995). A Genetic Algorithms and Tabu Search: Hybrid for Optimization, *Computers and Operation Research*, 22, 111-133.
- Gucyetmez, M. and Çam, E. (2016). A New Hybrid Algorithm with Genetic-Teaching Learning Optimization (G-TLBO) Technique for Optimizing of Power Flow in Wind-Thermal Power Systems, *Electrical Engineering*, 98, 145 - 157.
- He, Y., Li, S., Xu, H. and Shi, C. (2018). An In-Depth Analysis of Contingent Sourcing Strategy for Handling Supply Disruptions, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67, 201-219.
- Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., Sheu, J. B. and Moghadam, H. S. (2016). Designing a Supply Chain Resilient to Major Disruptions and Supply/Demand Interruptions, *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 121 - 149.
- Jabbarzadeh, A., Houghton, M. and Khosrojerdi, A. (2018). Closed-Loop Supply Chain Network Design under Disruption Risks: A Robust Approach with Real World Application, *Computers and Industrial Engineering*, 116, 178-191.
- Jayaraman, V. and Pirkul, H. (2001). Planning and Coordination of Production and Distribution Facilities for Multiple Commodities, *European Journal of Operational Research*, 133, 394 - 408.
- Kao, Y-T. and Zahara, E. (2008). A Hybrid Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Multimodal Functions, *Applied Soft Computation*, 8, 849 - 857.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (1995). Particle Swarm Optimization, *Proceedings on IEEE International Conference on Neural Networks*, Nov. 27 - Dec. 1, Perth, WA, Australia, pp. 1942 - 1948.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr. C. D. and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220(4598), 671-680.
- Khan, A. S., Pruncu, C. L., Khan, R., Naeem, K., Gha, A., Ashraf, P. and Room, S. (2020). A Trade-off Analysis of Economic and Environmental Aspects of a Disruption based Closed-Loop Supply Chain Network, *Sustainability*, 12, 7056.
- Ma, R., Yao, L., Jin, M., Ren, P. and LV, Z. (2016). Robust Environmental Closed-Loop Supply Chain Design under Uncertainty, *Chaos, Solitons and Fractals*, 89, 195-202.
- Meena, P. and Sarmah, S. (2013). Multiple Sourcing under Supplier Failure Risk and Quantity Discount: A Genetic Algorithm Approach, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 50, 84 - 97.
- Peng, P. V., Snyder, L., Lim A. and Liu, Z. (2011). Reliable Logistics Networks Design with Facility Disruptions, *Transportation Research Part B*, 45, 1190-1211.
- Poudel, S. R., Marufuzzaman, M. and Bian, L. (2016). Designing a Reliable Bio-Fuel Supply Chain Network considering Link Failure Probabilities, *Computers and Industrial Engineering*, 91, 85-99.
- Ramshani, M., Ostrowski, J., Zhang, K. and Li, X. (2019). Two Level Uncapacitated Facility Location Problem with Disruptions, *Computers and Industrial Engineering*, 137, 106089.
- Ren, H., Mu, D., Wang, C., Yue, X., Li, Z., Du, J., Zhao, L. and Lim, M. K. (2024). Vulnerability to Geopolitical Disruptions of the Global Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Supply Chain Network, *Computers and Industrial Engineering*, 188, 109919.
- Rao, R. V. (2016a). *Teaching Learning based*

- Optimization Algorithm and Its Engineering Applications*, Springer.
- Rao, R. V. (2016b). A Simple and New Optimization Algorithm for Solving Constrained and Unconstrained Optimization Problems, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7, 19-34.
- Rao, R. V., Savsani, V. J. and Vakharia, D. P. (2011). Teaching Learning-based Optimization: A Novel Method for Constrained Mechanical Design Optimization Problems, *Computers Aided Design*, 43(3), 303-315.
- Sabouhi, S., Jabalameli, M. S., Jabbarzadeh, A. and Fahimnia, B. (2020). A Multi-Cut L-Shaped Method for Resilient and Responsive Supply Chain Network Design, *International Journal of Production Research*, 58(24), 7353-7381.
- Savaskan, R. C., Bhattacharya, S. and Van Wassenhove, L. V. (2004). Closed Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing, *Management Science*, 50, 239-252.
- Song, Y. H., Wang, G. S., Wang, P. T. and Johns, A. T. (1997). Environmental/Economic Dispatch using Fuzzy Logic Controlled Genetic Algorithms, *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, 144(4), 377-382.
- Syam, S. S. (2002). A Model and Methodologies for the Location Problem with Logistical Components, *Computers and Operations Research*, 29, 1173 - 1193.
- Snyder, L. V., Atan, Z., Peng, P., Rong, Y., Schmitt, A. J. and Sinsoysal, B. (2016). OR/MS Models for Supply Chain Disruptions: A Review, *IIE Transactions*, 48(2), 89-109.
- Taghavi, S. M., Ghezavati, V., Bidhandi, H. M. and Al-e-Hashem, S. M. J. M. (2023). Green Resilient Supplier Selection and Order Allocation under Disruption by Utilizing Conditional Value at Risk: Mixed Response Strategies, *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 7, 359-380.
- Taghavi, S. M., Ghezavati, V., Bidhandi, H. M. and Al-e-Hashem, S. M. J. M. (2024). Sustainable and Resilient Supplier Selection, Order Allocation, and Production Scheduling Problem under Disruption Utilizing Conditional Value at Risk, *Journal of Modelling in Management*, 19(2), 658-692.
- Tang, C. S. (2006). Perspectives in Supply Chain Risk Management, *International Journal of Production Economics*, 103, 451 - 488.
- Wang, X., Ruan, J. and Shi, Y. (2012). A Recovery Model for Combinational Disruptions in Logistics Delivery: Considering the Real-World Participators, *International Journal of Production Economics*, 140, 508-520.
- Wang, Y., Ji, X. and Lang, Y. (2023). A Bi-Objective Optimization Model for a Low-Carbon Supply Chain Network with Risk of Uncertain Disruptions, *Symmetry*, 15, 1707.
- Wang, M. and Yao, J. (2023). Intertwined Supply Network Design under Facility and Transportation Disruption from the Viability Perspective, *International Journal of Production Research*, 61(8), 2513-2543.
- Waters, D. (2007). *Supply Chain Risk Management: Vulnerability and Resilience in Logistics*, Kogan Page.
- Wilson, M. C. (2007). The Impact of Transportation Disruptions on Supply Chain Performance, *Transportation Research Part E*, 43, 295-320.
- Yun, Y. S. (2024). Sustainable Closed-Loop Supply Chain Model using Hybrid Meta-Heuristic Approach: Focusing on Domestic Mobile Phone Industry, *Journal of Korea Society of Industrial Information Systems*, 29(1), 49-62.
- Yun, Y. S. and Anudari, C. (2019). Green Supply Chain Network Model: Genetic Algorithm Approach, *Journal of Korea Society of Industrial Information Systems*,



24(3), 31-38.

Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B. and Mohammadi, M. (2016). Sustainable Design of a Closed-Loop Location-Routing-Inventory Supply Chain Network under Mixed Uncertainty, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 182-214.

Zhao, B., Su, K., Wei, Y. and Shang, T. (2024). Design of Distributionally Robust Closed-Loop Supply Chain Network based on Data-Driven under Disruption Risks, *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*, 11(1), 2309293.



**윤 영 수 (YoungSu, Yun)**

- 종신회원
- 대구대학교 산업공학과 학사
- 건국대학교 산업공학과 석사, 박사
- Waseda University 정보생산 시스템연구과 박사
- 현재: 조선대학교 경영학부 교수
- 관심분야: 물류/SCM, 유전알고리즘, 생산최적화