

조립산업에서 공급 붕괴를 고려한 공급망 네트워크모델: 혼합유전알고리즘 접근법

(Supply Chain Network Model Considering Supply Disruption in Assembly Industry: Hybrid Genetic Algorithm Approach)

추룬수크 아누다리¹⁾, 윤 영 수^{2)*}
(Chuluunsukh Anudari and YoungSu Yun)

요약 본 연구에서는 조립산업의 공급망(Supply chain)에서의 발생할 수 있는 공급붕괴(Supply disruption)를 고려한 공급망 네트워크(Supply chain network: SCN) 모델이 제안된다. 공급붕괴를 위해 공급자 붕괴(Supplier disruption)와 경로 붕괴(Route disruption)가 함께 SCN 모델에서 고려되며, 이러한 두 가지의 붕괴 현상을 함께 고려한 SCN 모델은 유연성(Flexibility)과 효율성(Efficiency)을 성취할 수 있게 된다. SCN 모델은 수리모형으로 표현되며, 혼합유전알고리즘(Proposed hybrid genetic algorithm: pro-HGA) 접근법을 이용해 이행된다. 수치실험에서는 몇몇 상이한 규모를 가진 SCN 모델을 이용해 제안된 pro-HGA 접근법의 수행도와 기존 접근법의 수행도를 비교분석하였으며, 공급자 수와 백업경로(Backup route) 수의 변화를 통한 민감도 분석을 실시하였다. 실험 결과, 제안된 pro-HGA 접근법의 효율성을 입증하였고, SCN 모델의 유연성과 효율성을 검증하였다. 마지막으로 본 연구 수행의 의의 및 향후 개선방향에 대해 논하였다.

핵심주제어: 공급망 네트워크 모델, 공급 붕괴, 공급자 붕괴, 경로 붕괴, 혼합유전알고리즘

Abstract This study proposes a supply chain network (SCN) model considering supply disruption in assembly industry. For supply disruption, supplier disruption and its route disruption are simultaneously taken into consideration in the SCN model. With the simultaneous consideration, the SCN model can achieve its flexibility and efficiency. A mathematical formulation is suggested for representing the SCN model, and a proposed hybrid genetic algorithm (pro-HGA) is used for implementing the mathematical formulation. In numerical experiment, the performance of the pro-HGA approach is compared with those of some conventional approaches using the SCN models with various scales, and a sensitivity analysis considering the change of the numbers of suppliers and backup routes is done. Experimental results show that the performances of the pro-HGA approach are superior to those of the conventional approaches, and the flexibility and efficiency of the SCN model considering supply disruption are proved. Finally, the significance of this study is summarized and a potential future research direction is mentioned in conclusion.

Keywords: Supply chain network model, Supply disruption, Supplier disruption, Route disruption, Hybrid genetic algorithm

* Corresponding Author: ysyun@chosun.ac.kr
Manuscript received May 05, 2021 / revised June 07,
2021 / accepted June 07, 2021

1) 조선대학교 대학원 경영학과, 제1저자
2) 조선대학교 경상대학 경영학부, 제2저자, 교신저자

1. 서론

공급망네트워크(Supply chain network: SCN) 모델은 자재 혹은 부품의 조달에서 시작하여 제품생산 및 유통단계를 거쳐 최종적으로 소비자에게 전달되는 구조를 가지는 것이 일반적이다. SCN 모델 구축에 있어서 중요한 것은 공급망 각 단계에서 개설되어야 하는 설비들과 각 단계를 연결하는 수송경로(Transportation route)를 통합적으로 고려하는 것이다. 이러한 통합적 고려를 통해 구축된 SCN 모델은 운영상의 유연성과 고객으로의 효율적 제품수송을 동시에 성취할 수 있다. 하지만 현실적으로 SCN 모델이 잘 운영되지 못하는 많은 상황들이 존재한다. 그 대표적인 것이 SCN 모델에서 붕괴(Disruption)가 발생하는 것이다.

SCN 모델 운영에서 발생하는 많은 위험(Risk) 요소 중의 하나인 공급 붕괴(Supply disruption)는 기존의 문헌들(Chopra and Sodhi, 2004; Tang, 2006; Waters, 2007; Jabbarzadeh et al., 2018; Ramshani et al. 2019)에서 많이 연구된 분야이다. Waters (2007)는 공급 붕괴를 SCN 모델 외부에서 발생하는 위험요소 중의 하나로 분류하였으며, 주로 지진, 홍수, 태풍, 기상이변 등과 같은 자연재해로 인해 발생한다고 정의하였다. Chopra and Sodhi(2004)와 Tang(2006)의 연구에서는 공급 붕괴가 Waters(2007)의 연구에서 분류한 자연재해 뿐만 아니라 테러리스트(Terrorist)에 의한 공격, 국가간 혹은 특정지역에서의 전쟁 등과 같은 인적재앙(Human-made disaster)에 의해서도 발생한다고 정의하였다.

이와 같이 기존 연구문헌들에 의한 이론적 공급 붕괴 뿐만 아니라 실제 기업경영에서도 공급 붕괴가 발생하는 경우가 많이 보고되었다. 1998년 북대서양에서 발생한 허리케인 미치(Mitch)로 인해 내륙지역에 위치한 바나나 농장이 침수피해를 입어 바나나 생산 및 공급이 일시 중단되었고, 이들 농장으로부터 바나나를 공급받아 제품을 생산하였던 미국의 식품업체인 Dole은 막대한 수익감소를 겪었다(Baghalian et al., 2013). 1999년에는 타이완에서 발생한 지진으로 인해 자국내 소재 DRAM 공급업체의 생산이 중단되었으며, 이로 인해 DRAM 공급을 받아서 제품을 생산할 예정이었던 미국의 전자업체인 Apple은 대규모의 고객 주문을 취소할 수밖에 없었다. 또한 2011년에는 일본 대지진으로 인해 해당 지역에 소재한 자동차 부품공급업체의 부품생산이 중단되었으며, 이들 부품을 공급받아 자동차를 생산할 예정이었던 Toyota 자동차는 약 14만여대의 자동차 생산 차질을 겪었다(Baghalian et al., 2013). 비교적 최근의 사례를 살펴보면, 2019년 일본의

한국에 대한 반도체 부품 수출 규제 시행으로 인해 반도체 생산을 위한 중요 부품 일부가 일본 공급업체로부터 공급이 중단되었다. 이로 인해 한국의 삼성전자, SK하이닉스 등은 자사의 반도체 생산 차질을 겪게 되었고, 일본산 부품 공급을 대체할 수 있는 대체 공급업체 및 대체 공급경로를 구축하는데 많은 시간과 노력을 투입할 수밖에 없었다. 또한 2021년에는 초대형 컨테이너선이 이집트 수에즈 운하(Suez canal)를 가로막는 사고가 발생하여 해당 경로로의 통행이 일시 중단되었다. 이에 세계적인 선사들은 수에즈 운하 경로를 대체하여 남아공의 희망봉을 경유하는 새로운 경로를 이용하는 방안을 고려하였다. 비록 이러한 대체 경로로의 수송비용은 기존 경로인 수에즈 운하로의 수송비용보다 훨씬 더 많이 소요되지만 수송 지연에 따른 손해가 더 크기 때문에 대체경로로의 수송 방안 마련을 진행할 수 밖에 없었다.

위에서 언급하였듯이 제품생산에 위한 원재료 및 부품의 공급 중단은 제품을 생산하는 제조업체 뿐만 아니라 이를 구매하는 소비자에게 심각한 위협이 되고 있다. 따라서 현실적으로 발생할 가능성이 있는 공급 붕괴를 SCN 모델에서 고려하는 것은 필수적이라고 하겠다. 일반적으로 공급 붕괴는 두 가지 방식으로 분류될 수 있다. 첫째는 공급자 붕괴(Supplier disruption)로 원자재 및 부품을 공급하는 공급업체 자체적으로 발생하는 붕괴 현상을 말한다. 둘째는 경로 붕괴(Route disruption)로 공급자가 준비한 원자재 및 부품을 다음 단계인 제조업체로 보내는 경로에서 붕괴 현상이 발생하는 것을 말한다.

먼저 공급자 붕괴에 대한 기존연구 결과들을 살펴본다. Xiao and Yu(2006)의 연구에서는 원자재 공급업자, 제조업자, 소매업자로 연결되는 SCN 모델을 제안하였으며, 제안된 SCN 모델에서 원자재 공급업자의 붕괴로 인해, 제조업자로의 원자재 공급이 중단되는 현상을 고려하였다. Xiao and Yu(2006)의 연구와는 다르게, Baghalian et al.(2013)의 연구에서는 제조업자의 붕괴를 고려한 3단계 SCN 모델을 제안하였다. 제조업자, 물류센터, 소매업자로 구성된 SCN 모델은 전체 이익 최대화(Maximizing total profit)를 목표로 하였다. 사례연구에서는 실제 현장 적용능력을 평가하기 위해 세 군데의 제조업자 및 물류센터, 아홉 군데의 소매업자로 구성된 소규모 SCN 모델을 사용하여 SCN 모델 운영의 효율성을 검증하였다. 또한 Baghalian et al. (2013)의 연구에서는 대규모의 SCN 모델을 운영하고 평가하기 위해서는 유전알고리즘(Genetic algorithm: GA), 타부서치(Tabu search) 등과 같은 메타 휴리스틱 접근법(Meta-heuristic approach)

사용을 추천하였다.

둘째, 경로 붕괴에 대한 기존 연구결과들을 살펴본다. Lo and Tung(2003)은 교통사고로 인해 공급 경로 상에서 교통혼잡이 발생하였을 때, 공급경로의 공급능력이 줄어들 수 있는 네트워크 모형을 제안하였다. Wang et al.(2012)의 연구에서는 수송 차량 고장에 의한 공급경로 붕괴를 고려하였으며, 이러한 붕괴가 발생할 경우에 대체 경로를 함께 고려하여 제안된 SCN 모델이 유연성(Flexibility)을 가지도록 하였다. Server et al.(2013)의 연구에서는 네트워크 내에서의 수송경로가 붕괴되는 다양한 상황을 고려한 SCN 모델을 제안하였다. 제안된 SCN 모델에서는 현재의 위치에서 다음 단계로의 수송을 위해 가능한 모든 경로 중에서 최적의 경로를 선택하는 방법을 개발하였으며, 이를 통해 전체 수송시간을 최소화하였다. Poudel et al.(2016)은 바이오 연료(Bio-fuel)의 효율적 공급을 위한 4단계 SCN 모델을 제시하였다. 각 단계별로 고장확률을 가진 경로가 존재하며, 이를 경로는 랜덤하게 발생된 고장확률에 따라 붕괴될 수 있다. 사례연구에서는 단계별로 경로가 붕괴되는 몇 가지 시나리오를 고려하여 전체 비용 최소화를 달성하기 위한 수리모형을 이행하였다. 이러한 방법을 통해 만일 특정 경로가 붕괴되었을 때 백업 경로(Backup route) 혹은 대체 경로(Alternative route)를 이용하여 수송이 지속적으로 가능하도록 하였다.

위에서 분석한 기존연구들 대부분은 SCN 모델에서 공급자 붕괴만을 고려하거나 혹은 경로 붕괴만을 고려하였다. 즉 SCN 모델에서 공급자 붕괴와 경로 붕괴를 함께 고려한 기존 연구는 거의 없었다. 하지만 현실상황에서 보면 공급자 붕괴와 경로 붕괴가 함께 발생하는 많은 상황이 존재한다. 예를 들어, 공급자 --> 제조자 --> 소매업자로 연결된 SCM 모델을 고려해 보자. 만일 어떤 공급자가 붕괴된다면, 이 공급자에서 다음 단계인 제조자로 연결되는 경로 또한 함께 붕괴될 것이다. 결국 공급자의 붕괴는 경로의 붕괴로 이어지게 된다. 이와 같은 연계된 붕괴 현상을 해결하기 위해서는 붕괴된 공급자를 대체할 수 있는 백업 공급자(Backup supplier)와 백업 경로를 사전에 확보하여야 할 것이며, 이를 통해 다음 단계로의 지속적인 공급이 가능하도록 해야 할 것이다.

본 연구는 SCN 모델에서 발생할 수 있는 공급붕괴 현상을 파악하고, 기존 연구들의 단점으로 지적된 공급자 붕괴 혹은 경로 붕괴의 개별적 적용 문제를 개선하여, 하나의 SCN 모델에서 공급자 붕괴와 경로 붕괴를 함께 고려한다. 제안된 SCN 모델에서 이러한 공급붕괴현상을 고려하기 위하여 주 공급자(Main supplier)

와 백업 공급자, 주 공급자의 주 경로(Main route)와 백업공급자의 백업경로를 각각 중복(Redundancy)하여 고려하게 되며, 이러한 SCN 모델에서의 중복의 고려는 기존 연구들(Baghalian et al., 2013; Ramshani et al. 2019)들에서 이미 검증된 방법이다.

제안된 SCN 모델은 메타 휴리스틱 접근법 중의 하나인 혼합유전알고리즘(Proposed hybrid genetic algorithm: pro-HGA)을 이용하여 이행되며, 다양한 수치실험 분석을 통해 pro-HGA의 효율성을 입증하고, 제안된 SCN 모델의 유효성을 검증한다. 본 연구의 구성은 다음과 같다.

1장에서는 본 연구의 배경 및 SCN 모델에서의 붕괴현상을 고려한 기존 연구들을 분석하고 그 장단점을 파악한다. 이를 통해 본 연구 수행의 필요성을 제시하였다. 2장에서는 공급자 붕괴 및 경로 붕괴를 함께 고려한 SCN 모델을 설계하였다. 설계된 SCN 모델은 3장에서 수리모형 형태로 표현되며, 4장에서는 수리모형을 이행하기 위한 pro-HGA 접근법을 제안하였다. 5장에서는 다양한 규모의 SCN 모델을 제시하였으며, 이를 통해 pro-HGA 접근법의 수행도와 기존의 메타 휴리스틱 접근법들의 수행도를 비교분석하였다. 또한 설계된 SCN 모델의 공급자 붕괴와 경로 붕괴에 대한 민감도 분석을 실시하여 SCN 모델의 유효성을 검증하였다. 마지막 6장에서는 본 연구 수행의 의의 및 향후 개선방향 등에 대해 논하였다.

2. 제안된 SCN 모델

제안된 SCN 모델의 개념적 흐름은 Fig. 1과 같다. 공급자(Supplier), 제조자(Manufacturer), 소매업자(Retailer)의 3단계로 구성된 SCN 모델은 공급자로 부터의 부품 공급을 시작으로 제조자의 제품 생산 단계를 거쳐 최종적으로 소매업자에게 제품이 공급된다. 일반적으로 제품 생산을 위해서는 다양한 부품들의 공급이 필요하며, 특히 조립산업의 경우 다양한 부품의 공급이 원활하게 수행되어야만 다음 단계인 제조과정에서 문제가 발생하지 않는다.

이와 같이 다양한 부품의 공급을 고려하기 위해 제안된 SCN 모델에서는 공급자를 몇몇 그룹으로 구분하여 부품을 공급하는 형태로 처리하였다. 예를 들어, Fig. 1의 공급자 그룹 1(Supplier group 1)에 속한 주 공급자(Main supplier)와 백

업 공급자(Backup supplier)는 동일한 부품을 생산하여 다음 단계인 제조자에게 공급할 수 있다. 공급자 그룹 2(Supplier group 2)에 속한 주 공급자와 백업 공급자는 동일한 부품을 생산하여 제조자에게 공급할 수 있지만 여기서 생산하는 부품은 공급자 그룹 1에 속한 주 공급자와 백업 공급자가 생산한 부품과는 다른 것이다. 이와 같이 각 공급자 그룹에서 생산한 상이한 부품들은 다음 단계인 제조자에게 공급되어 함께 조립된 후 제품이 완성된다. 결국 Fig. 1에 제시된 공급자와 제조자의 공급 흐름은 조립산업의 특성을 반영한 것이다.

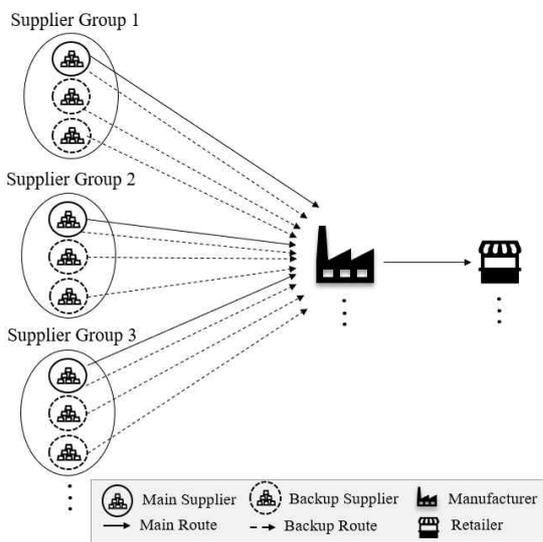


Fig. 1 A Conceptual Flow of the Proposed SCN Model

제안된 SCN 모델에서 공급자 붕괴와 경로 붕괴 현상을 고려한 것이 Fig. 2이다. Fig. 2의 (A)와 (B)는 공급자 붕괴를 고려한 것으로, 만일 공급자 그룹 1의 주 공급자가 붕괴될 경우((A)의 X 표시)에는 주 공급자의 주 경로(Main route)와 백업 경로(Backup route)도 함께 붕괴된다((B)의 X 표시). 따라서 다음 단계의 제조자에게 부품을 공급하기 위해서는 나머지 두 군데의 백업 공급자 중에서 하나를 선정하고, 선정된 백업 공급자의 백업 경로를 통해 부품을 공급할 수 있다((B) 상황). Fig. 2의 (C)와 (D)는 경로 붕괴를 고려한 것으로, 만일 공급자 그룹 1의 주 공급자의 주

경로가 붕괴될 경우((C)의 X 표시)에는 주 공급자의 백업 경로와 백업 공급자의 백업 경로 중에서 하나를 선정하고, 선정된 주 공급자 혹은 백업 공급자의 백업 경로를 통해 부품을 공급할 수 있다((D) 상황).

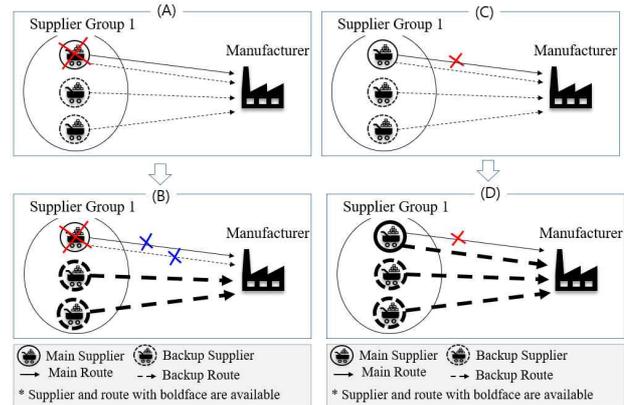


Fig. 2 Situations under Considering Main Supplier and Route Disruptions

3. 수리모형 설계

제안된 SCN 모델의 수리모형 설계에 필요한 몇몇 가정들은 다음과 같다.

- 조립산업의 특성을 고려하여 각 공급자 그룹을 통해 다양한 형태의 부품들이 공급자에서 제조자로 공급된다.
- 각 공급자 그룹에서 고려되는 주 공급자 및 백업 공급자는 동일한 부품을 제조자에게 공급한다.
- 각 공급자 그룹에서 고려되는 다수의 백업 공급자의 선택에 있어 우선순위는 고려하지 않는다.
- 각 공급자 그룹에서는 하나의 공급자와 하나의 경로만이 선택된다. 즉 중복 선택은 고려하지 않는다.
- 각 공급자 그룹에서 고려되는 주 공급자, 주 경로, 백업 공급자, 백업 경로와 제조자 및 소매업자의 수는 사전에 알려져 있다.
- 각 공급자 그룹의 공급자, 제조자의 운영비용, 단위당 수송비용 및 단위당 처리비용 등은 사전에 알려져 있다.

수리모형에 사용되는 인덱스(Index), 파라미터(Parameter) 및 의사결정변수(Decision variable)은 다음과 같이 정의된다.

. 인덱스

- s : 주 공급자 인덱스, $s \in S$, S : 주 공급자 셋(Set).
- s' : 백업 공급자 인덱스, $s' \in S'$, S' : 백업공급자 셋(Set).
- r : 주 경로 인덱스, $r \in R$, R : 주 경로 셋(Set).
- r' : 백업 경로 인덱스, $r' \in R'$, R' : 백업 경로 셋(Set).
- g : 공급자 그룹 인덱스, $g \in G$, G : 공급자 그룹 셋(Set).
- m : 제조자 인덱스, $m \in M$, M : 제조자 셋(Set).
- t : 소매업자 인덱스, $t \in T$, T : 소매업자 셋(Set).

. 파라미터

- M_{mgsr} : 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 주 경로 r 을 이용해 제조자 m 으로의 수송량
- $M_{mgsr'}$: 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 백업 경로 r' 를 이용해 제조자 m 으로의 수송량
- $M_{mgs'r}$: 공급자 그룹 g 의 백업 공급자 s' 에서 백업 경로 r 를 이용해 제조자 m 으로의 수송량
- M_{tmr} : 제조자 m 에서 주 경로 r 을 이용해 소매업자 t 로의 수송량
- N_{gs} : 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 처리되는 양
- $N_{gs'}$: 공급자 그룹 g 의 백업 공급자 s' 에서 처리되는 양
- N_m : 제조자 m 에서 처리되는 양
- T_{mgsr} : 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 주 경로 r 을 이용해 제조자 m 으로의 단위당 수송비용
- $T_{mgsr'}$: 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 백업 경로 r' 을 이용해 제조자 m 으로의 단위당 수송비용
- $T_{mgs'r}$: 공급자 그룹 g 의 백업 공급자 s' 에서 주 백업경로 r 를 이용해 제조자 m 으로의 단위당 수송비용
- T_{tmr} : 제조자 m 에서 주 경로 r 을 이용해 소매업

- 자 t 로의 단위당 수송비용
- H_{gs} : 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 단위당 처리비용
- $H_{gs'}$: 공급자 그룹 g 의 백업 공급자 s' 에서 단위당 처리비용
- H_m : 제조자 m 에서 단위당 처리비용
- F_{gs} : 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 고정비용
- $F_{gs'}$: 공급자 그룹 g 의 백업 공급자 s' 에서 고정비용
- F_m : 제조자 m 에서 고정비용
- C_m : 제조자 m 의 용량
- C_t : 소매업자 t 의 용량

. 의사결정변수

- x_{gs} : 만일 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 가 이용 가능할 경우 1. 그렇지 않을 경우 0
- $x_{gs'}$: 만일 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s' 가 이용 가능할 경우 1. 그렇지 않을 경우 0
- x_m : 만일 제조자 m 이 이용가능할 경우 1. 그렇지 않을 경우 0
- y_{gsr} : 만일 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 주 경로 r 이 이용가능할 경우 1. 그렇지 않을 경우 0
- $y_{gsr'}$: 만일 공급자 그룹 g 의 주 공급자 s 에서 백업 경로 r' 가 이용가능할 경우 1. 그렇지 않을 경우 0
- $y_{gs'r}$: 만일 공급자 그룹 g 의 백업 공급자 s' 에서 백업 경로 r 가 이용가능할 경우 1. 그렇지 않을 경우 0
- y_{mr} : 만일 제조자 m 에서 주 경로 r 이 이용가능할 경우 1. 그렇지 않을 경우 0

수리모형의 목적함수는 전체 비용(Total cost: TC)의 최소화이며, TC 는 SCN 모델에서 고려되는 고정비용, 처리비용, 수송비용의 총합을 나타낸다. 수식 (1)은 TC 를 나타내고 있으며, TC 의 최소화를 위해 수식 (2) - (8)에서 제시된 다양한 제약조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \min. TC = & \sum_m \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr} \cdot T_{mgsr} \cdot x_{gs} \cdot y_{gsr} + \\ & \sum_m \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr'} \cdot T_{mgsr'} \cdot x_{gs'} \cdot y_{gsr'} + \\ & \sum_m \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr''} \cdot T_{mgsr''} \cdot x_{gs''} \cdot y_{gsr''} + \\ & \sum_t \sum_m \sum_r M_{tmr} \cdot T_{tmr} \cdot x_m \cdot y_{mr} + \\ & \sum_g \sum_s N_{gs} \cdot H_{gs} \cdot x_{gs} + \\ & \sum_g \sum_s N_{gs'} \cdot H_{gs'} \cdot x_{gs'} + \\ & \sum_m N_m \cdot H_m \cdot x_m + \\ & \sum_g \sum_s F_{gs} \cdot x_{gs} + \\ & \sum_g \sum_s F_{gs'} \cdot x_{gs'} + \\ & \sum_m F_m \cdot x_m \end{aligned} \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} \sum_s \sum_r y_{gsr} + \sum_s \sum_r y_{gsr'} + \sum_s \sum_r y_{gsr''} = 1, \\ \forall g \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr} \cdot x_{gs} \cdot y_{gsr} + \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr'} \cdot \\ x_{gs'} \cdot y_{gsr'} \leq \sum_g \sum_s N_{gs} \cdot x_{gs}, \quad \forall m \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr''} \cdot x_{gs''} \cdot y_{gsr''} \\ \leq \sum_g \sum_s N_{gs'} \cdot x_{gs'}, \quad \forall m \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr} \cdot x_{gs} \cdot y_{gsr} + \\ \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr'} \cdot x_{gs'} \cdot y_{gsr'} + \\ \sum_g \sum_s \sum_r M_{mgsr''} \cdot x_{gs''} \cdot y_{gsr''} \leq C_m, \quad \forall m \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sum_m \sum_r M_{tmr} \cdot x_m \cdot y_{mr} \leq C_t, \quad \forall t \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_{gs}, x_{gs'}, x_m, y_{gsr}, y_{gsr'}, y_{gsr''}, y_{mr} \in \{0,1\}, \\ \forall s, s', r', g, m \end{aligned} \quad (8)$$

수식 (1)의 첫 번째 항에서 네 번째 항까지는 각 경로에서 발생하는 수송비용의 합을 나타내고 있다. 주 공급자, 백업 공급자, 제조자에서의 처리비용과 고정비용은 다섯 번째 항에서 일곱번째 항까지, 그리고 여덟 번째 항에서 마지막 항까지에서 각각 나타내고 있다. 수식 (2)는 각 공급자 그룹에 속한 주 공급자 및 백업 공급자 중에서 반드시 하나의 공급자는 개설되어야 한다는 제약이다. 비슷한 의미로 수식 (3)은 각 공급자 그룹에 속한 주 공급자의 주 경로 및 백업 경로와 백업 공급자의 백업 경로 중에서 반드시 하나의 경로는 개설되어야 한다는 제약이다. 수식 (4) - (5)는 각 공급자 그룹에서 속한 주 공급자 및 백업 공급자로부터 수송할 수 있는 양을 제약한다.

비슷한 의미로 수식 (6) - (7)은 제조자 및 소매업자로 보낼 수 있는 수송량의 제약을 의미한다. 마지막 수식 (8)은 주 공급자, 백업 공급자, 주 경로, 백업 경로의 개설여부를 제약하고 있다.

4. pro-HGA 접근법

1장 서론에서 이미 언급하였듯이 SCN 모델과 같이 다단계로 구성된 복잡한 네트워크 모형들 대부분은 NP-complete 문제 형태인 것으로 알려져 있다(Savaskan, 2004; Gen et al., 2018; Yun et al., 2020). 이들 NP-complete 문제를 해결하기 위해서는 GA, 타부 서치, 입자군집 최적화(Particle swarm optimization), 쿠쿠서치(Cuckoo search: CS) 등과 같은 메타 휴리스틱 접근법을 사용하는 것이 효율적이라고 알려져 있다(Savaskan, 2004; Gen and Cheng, 2000; Gen et al., 2018; Yun et al., 2018, 2020). 하지만 이들 메타 휴리스틱 접근법들이 단독으로 사용될 경우, 구해진 최적해의 품질이 떨어지거나, 적용 자체가 어려운 경우가 종종 발생한다(Yun, 2006; Yun et al., 2013; Gen and Cheng, 2020). 이러한 적용상의 한계점을 극복하기 위해서 최근에는 단일 접근법들의 특성을 고려하여 두 가지 이상의 접근법들을 함께 사용하는 혼합형 메타 휴리스틱(Hybrid meta-heuristics) 접근법들이 개발되었고, 이들을 복잡한 네트워크 문제들에 적용한 결과가 단일 메타 휴리스틱 접근법을 적용한 결과보다 더 우수하다는 기존연구들이 발표되었다(Lin et al., 2009; Zhang et al., 2012; Xinyu and Liang, 2016).

이러한 기존 연구결과들을 바탕으로 본 연구에서도 새로운 형태의 혼합형 메타 휴리스틱 접근법들을 개발하여 SCN 모델에 적용하고자 한다. 개발된 pro-HGA 접근법은 탐색공간에서 전역적 최적해(Global optimal solution)을 찾는 데 유리한 GA 접근법과 지역적 최적해(Local optimal solution)를 찾는 데 유리한 CS 접근법을 함께 사용한다. 먼저 GA 접근법을 사용하여 전체 탐색공간에서 일정한 개체(Individual) 수의 집단(Population)을 생성하며, 생성된 집단을 이용해

GA 접근법의 유전 연산자(Genetic operator)인 교차변이(Crossover), 돌연변이(Mutation)를 적용해 새로운 집단을 생성한다. 이렇게 생성된 새로운 집단에 대해 CS 접근법을 적용한다. 먼저 집단 주위에 대해 지역적 탐색(Local search) 방법을 이용해 재 탐색을 실시한다. 이렇게 재 탐색과정에서 기존의 개체들 보다 우수한 개체가 발견될 경우에는 그 우수 개체를 새로운 집단 속에 포함시킨다. 마지막 단계로서 GA 접근법을 이용한 생성된 기존의 집단과 GA 접근법의 탐색과정과 CS 접근법의 탐색과정을 통해 생성된 새로운 집단을 함께 혼합한 후 우수한 개체들로만 구성된 새로운 집단을 만든다. 이러한 과정을 일정 횟수 만큼 반복하면서 우수한 개체들을 지속적으로 생성하여 최적해를 찾게 된다. pro-HGA 접근법의 상세한 이행절차는 다음과 같다.

Step 1: (초기화)

$t \leftarrow 0$; 반복수

$GO_{bst} \leftarrow 0$; 전역적 최적해 초기값

Step 2: (초기집단 생성)

사전에 설정된 집단의 크기 $P(t)$ 만큼의 개체를 랜덤하게 생성한다.

Step 3: (자손집단 생성)

$P(t)$ 에 1X 교차변이 연산자(One-point crossover operator)(Gen and Cheng, 1997)와 랜덤 돌연변이 연산자(Random mutation operator)(Gen and Cheng, 1997)를 적용하여 자손집단 $O(t)$ 를 생성한다.

Step 4: (우수해 저장)

$O(t)$ 의 모든 개체를 평가하여 가장 우수한 개체를 GA_{bst} 에 저장한다.

Step 5: (해의 개선)

$O(t)$ 의 개체들 중에서 하나의 개체(x_i)를

랜덤하게 선택한 후 Lévy flight scheme (Kanagaraj et al., 2013)을 적용하여 새로운 개체(x_{new})를 생성한다. 또한 $O(t)$ 의 개체들 중에서 또 다른 하나의 개체(x_j)를 랜덤하게 선택한다.

만일 $f(x_{new}) \geq f(x_j)$ 라면, x_{new} 를 $N(t)$ 에 포함시킨다.

이러한 절차를 집단의 크기 만큼 반복한다.

Step 6: ($N(t)$ 집단의 완성)

만일 Step 5를 통해 생성된 $N(t)$ 집단의 개체수가 집단의 크기보다 작다면, 부족한 개체수 만큼을 랜덤하게 생성하여 $N(t)$ 에 포함시킨다.

$N(t)$ 의 모든 개체에 대해 적합도 값을 평가하여 적합도 값이 우수하지 못한 일부의 개체를 사전에 설정된 f 의 비율에 따라 탈락시키고, 탈락된 개체 수만큼을 다시 랜덤하게 발생시켜 $N(t)$ 에 포함시킨다.

Step 7: (우수해 저장)

$N(t)$ 의 모든 개체를 평가하여 가장 우수한 개체를 NT_{bst} 에 저장한다.

Step 8: (해의 개선)

만일 $f(GA_{bst}) \geq f(NT_{bst})$ 라면, GA_{bst} 의 적합도 값을 GO_{bst} 에 저장하고, 그렇지 않을 경우에는 NT_{bst} 의 적합도 값을 GO_{bst} 에 저장한다.

Step 9: (집단의 개선)

Elitist 선택전략(Gen and Cheng, 1997)을 사용하여 새로운 $P(t)$ 를 생성한다.

반복수 t 를 하나 증가시킨 후 사전에 설정된 전체 반복수를 만족하지 못할 경우 Step 3으로 간다.

Step 10: (최적해 도출)

GO_{bst} 값을 도출한다.

Table 1 SCN Model with Four Different 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 Manuf acturer	# of Main route in Manufacturer	# of Retailer
1	6	10	1	9	1	1	9	1	1	1
2	9	13	1	12	1	1	12	1	1	1
3	12	15	1	14	1	1	14	1	1	1
4	15	30	1	29	1	1	29	1	1	1

5. 수치실험

수치실험에서는 Table 1과 같이 상이한 네 가지 규모(Scale 1, 2, 3, 4)의 SCN 모델을 이용하여 제안된 pro-HGA 접근법의 우수성을 비교 분석한다. Table 1에서 Scale 1의 경우 공급자 그룹은 총 6개이며, 각 공급자 그룹에 총 10개의 공급자(=1개의 주 공급자 + 9개의 백업 공급자)가 존재하는 것을 알 수 있다. 각 Case에서 고려된 공급자 그룹의 수, 공급자의 수 등은 임의로 선정된 것이며, Case 1에서 Case 4로 갈수록 공급자 그룹의 수와 공급자의 수가 점차 증가하도록 설정하였다.

pro-HGA의 수행도 비교분석을 위해 기존의 메타 휴리스틱 접근법인 GA(Gen and Chang, 2000)와 HGA(Kanagaraj et al., 2013) 접근법을 함께 사용한다. 이들 접근법들 모두는 동일한 컴퓨터 환경(MATLAB: Ver. 2014b, CPU: 1.3 GHz Intel Core I5-1600, RAM: 4GB, OS: OS-X EI)에서 프로그래밍되고 실행되었다.

각 접근법에 사용된 파라미터 설정은 다음과 같다. 전체 세대수: 50, 집단의 크기: 6, 교차변이 비율: 0.8, 돌연변이 비율: 0.2, Lévy flight scheme을 위한 탐색범위: 1, α 비율: 0.25. 또한 3장 수리모형의 실행을 위해 필요한 파라미터 설정은 Table 2와 같다. 각 접근법들에 대해 설정된 파라미터 값들은 사전 조율과정(Fine tuning)을 거쳐 설정되었으며, Table 2에 제시

된 파라미터 값들은 기존 연구들(Jabbarzadeh et al., 2018; Yun et al., 2020)을 참조하여 임의로 설정된 값을 사용하였다. 실행된 각 접근법의 수행도는 Table 3의 척도에 의해 비교 분석된다.

Table 2 Parameter Setting Value

Parameter	Setting Value
$M_{mgsr}, M_{mgsr'}, M_{mgsr''}, M_{tmr}, N_{gs}, N_{gs'}, N_m$	1,500
$T_{mgsr}, T_{mgsr'}, T_{mgsr''}, T_{tmr}$	$U [2.5, 3.5]$
$H_{gs}, H_{gs'}, H_m$	$U [6.0, 10.0]$
C_m, C_t	1,500

Table 3 Performance Measures

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

본 연구의 목적이 SCN 모델에서 공급붕괴를 고려하는 것이기 때문에 다음과 같은 다양한 형태의 공급붕괴가 발생하는 Scenario를 가정한다.

- **Scenario 1:** 전체 공급자 그룹에서 하나의 공급자 그룹의 주 공급자가 붕괴된다. 이 경우에는 백업 공급자의 백업 경로가 이용될 수 있다.

Table 4 Experiment Results using GA, HGA and pro-HGA in Scenarios 1 - 3

	Scenario 1											
	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA
BS	45,796	45,796	45,796	64,450	64,450	64,450	80,742	80,669	80,742	94,119	94,115	93,752
AS	46,263	46,296	45,796	65,144	65,238	64,450	81,482	81,462	80,744	95,966	95,635	93,769
CPU	0.820	0.860	1.070	0.840	0.890	1.110	0.940	0.989	1.120	0.994	1.001	1.160
	Scenario 2											
	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA
BS	45,796	45,796	45,796	65,702	64,678	64,450	81,669	81,808	80,742	95,986	95,858	93,752
AS	47,612	47,056	45,796	67,492	66,988	64,585	83,018	83,766	81,113	97,522	97,749	94,676
CPU	0.820	0.860	1.070	0.840	0.890	1.110	0.940	0.989	1.120	0.994	1.001	1.160
	Scenario 3											
	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA
BS	48,193	48,045	45,796	65,508	65,508	64,677	83,627	83,520	81,482	98,329	97,052	95,286
AS	50,008	49,323	46,298	67,999	68,497	65,665	85,912	86,046	82,502	100,523	100,272	96,189
CPU	0.820	0.860	1.070	0.840	0.890	1.110	0.940	0.989	1.120	0.994	1.001	1.160

* Boldface is the best value at each performance

- . **Scenario 2:** 전체 공급자 그룹에서 두 개의 공급자 그룹의 주 공급자가 붕괴된다. 이 경우에는 백업 공급자의 백업 경로가 이용될 수 있다.
- . **Scenario 3:** 전체 공급자 그룹에서 세 개의 공급자 그룹의 주 공급자가 붕괴된다. 이 경우에는 백업 공급자의 백업 경로가 이용될 수 있다.
- . **Scenario 4:** 전체 공급자 그룹에서 하나의 공급자 그룹의 주 공급자의 주 경로가 붕괴된다. 이 경우에는 주 공급자의 백업 경로와 백업 공급자의 백업 경로가 이용될 수 있다.
- . **Scenario 5:** 전체 공급자 그룹에서 두 개의 공급자 그룹의 주 공급자의 주 경로가 붕괴된다. 이 경우에는 주 공급자의 백업 경로와 백업 공급자의 백업 경로가 이용될 수 있다.
- . **Scenario 6:** 전체 공급자 그룹에서 세 개의 공급자 그룹의 주 공급자의 주 경로가 붕괴된다. 이 경우에는 주 공급자의 백업 경로와 백업 공급자의 백업 경로가 이용될 수 있다.

Table 4는 Scenario 1에서 3 까지, Table 5는 Scenario 4에서 6 까지에 대해 GA, HGA, pro-HGA 접근법의 수행도 결과를 보여주고 있다. 수행도 결과는 탐색과정에서의 랜덤성을 제거하기 위해 모든 접근법에 대해 10회 반복 수행 후 구해진 것이다.

Table 4에서 Scenario 1의 Case 1의 결과를 보면, BS 척도에서 GA, HGA, pro-HGA 접근법 전부가 동일한 결과를 얻은 것을 알 수 있다. 하

지만 AS 척도에서는 pro-HGA 접근법이 기존 접근법인 GA, HGA 보다 약간 더 우수하며, CPU 척도에서는 GA 접근법이 HGA, pro-HGA 접근법보다 더 우수한 수행도를 얻은 것을 알 수 있다. 또한 Case 1의 결과 분석은 Case 2의 결과분석과 동일한 것을 알 수 있다. 하지만 Case 3와 Case 4에서는 BS 척도에서 HGA, pro-HGA 접근법이 각각 우수한 수행도를 나타내고 있다. AS 척도에서는 pro-HGA 접근법의 수행도가 가장 우수하며, CPU 척도에서는 GA 접근법의 수행도가 가장 우수한 것을 알 수 있다. 결국 Scenario 1의 Case 1에서 Case 4 까지의 결과분석을 종합해 보면, SCN 모델의 규모가 작은 Case 1과 Case 2에서는 BS 척도에서 각 접근법들의 수행도 차이가 거의 발생하지 않았지만, SCN 모델의 규모가 비교적 커지는 Case 3과 Case 4에서는 BS 척도에서 HGA와 pro-HGA 접근법의 수행도가 GA 접근법의 수행도 보다 더 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 AS 척도에서는 pro-HGA 접근법, CPU 척도에서는 GA 접근법의 수행도가 비교 대상인 다른 접근법들의 수행도 보다 더 우수한 것을 알 수 있다.

Table 4에서 Scenario 2를 보면 BS와 AS 척도 에서 Case 1을 제외하고 Case 2, Case 3, Case 4 에서 pro-HGA 접근법이 가장 우수한 것을 알 수 있다. 하지만 CPU 척도에서는 pro-HGA 접근법의 탐색 속도가 가장 느리며, GA 접근법의 탐색 속도가 가장 빠른 것을 알

Table 5 Experiment Results using GA, HGA and pro-HGA in Scenarios 4 - 6

	Scenario 4											
	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA
BS	45,796	45,796	45,796	64,677	64,508	64,450	80,750	80,750	80,742	94,958	94,396	93,752
AS	46,276	46,225	45,796	65,222	65,195	64,450	81,525	81,510	80,742	95,995	95,773	93,811
CPU	0.820	0.860	1.070	0.840	0.890	1.110	0.940	0.989	1.120	0.994	1.001	1.160
	Scenario 5											
	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA
BS	46,042	45,796	45,796	65,508	65,501	64,450	81,650	80,742	80,742	94,681	94,427	93,816
AS	47,565	47,834	45,796	67,100	66,247	64,659	83,358	83,891	81,073	97,340	97,655	94,779
CPU	0.820	0.860	1.070	0.840	0.890	1.110	0.940	0.989	1.120	0.994	1.001	1.160
	Scenario 6											
	Case 1			Case 2			Case 3			Case 4		
	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA	GA	HGA	pro-HGA
BS	48,146	48,629	45,796	66,418	66,177	64,678	81,911	81,587	80,970	97,430	96,197	95,701
AS	49,279	49,642	45,918	69,169	68,494	65,539	85,345	85,506	82,172	100,127	99,082	96,470
CPU	0.820	0.860	1.070	0.840	0.890	1.110	0.940	0.989	1.120	0.994	1.001	1.160

* Boldface is the best value at each performance

수 있다. 비슷한 결과분석이 Scenario 3에서도 발생한다. 즉 BS, AS 척도에서 pro-HGA 접근법의 수행도가 가장 우수하며, CPU 척도에서는 GA 접근법의 수행도가 가장 우수한 것을 알 수 있다.

Scenario 1, 2, 3의 결과분석을 종합하면, 공급자 그룹에서 발생하는 주 공급자의 붕괴가 더 많은 비율로 발생할 수록 pro-HGA 접근법을 적용하는 것이 GA 혹은 HGA 접근법을 적용하는 것보다 SCN 모델의 운영에 더 효율적이라는 것을 알 수 있다. 다만 pro-HGA 접근법을 적용할 경우 실행속도가 느려진다는 단점이 존재한다.

Table 5에서 Scenario 4의 Case 1의 결과를 보면, BS 척도에서는 GA, HGA, pro-HGA 접근법 전부가 동일한 결과를 보여 주고 있지만, AS 척도에서는 pro-HGA 접근법이, CPU 척도에서는 GA 접근법의 수행도가 가장 우수한 것을 알 수 있다. Case 2, Case 3, Case 4의 결과를 보면, BS 및 AS 척도에서는 pro-HGA 접근법의 수행도가 가장 우수하며, CPU 척도에서는 GA 접근법의 수행도가 가장 우수한 것을 알 수 있다. Scenario 5와 6의 결과를 전체적으로 살펴보면, BS와 AS 척도에서는 pro-HGA 접근법의 수행도가 GA와 HGA 접근법의 수행도 보다 더 우수한 것을 알 수 있다. 다만 CPU 척도에서는 pro-HGA 접근법이 가장 느린 수행도를, GA 접근법이 가장 빠른 수행도를 보여주고 있다.

Table 5의 Scenario 4, 5, 6의 적용 결과를 요약하면, 공급자 그룹에서 발생하는 주 공급자의 주 경로 붕괴가 더 많은 비율로 발생할 수록 pro-HGA 접근법을 적용하는 것이 GA 혹은 HGA 접근법을 적용하는 것 보다 SCN 모델의 운영에 더 효율적이라는 것을 알 수 있다. 다만 pro-HGA 접근법을 적용할 경우 실행속도가 느려진다는 단점이 존재한다.

Fig. 3와 Fig. 4는 Scenario 3과 6의 Case 4에 대해 BS 척도에서 GA, HGA, pro-HGA 접근법의 수렴과정을 보여주고 있다. Fig. 3와 Fig. 4를 살펴보면, GA, HGA, pro-HGA 접근법들 모두는 초기 세대에서 급격하고 빠른 수렴현상을 보이고 있지만, 세대가 진행될수록 그 수렴속도는 느려지고 있는 것을 볼 수 있다. 결국 모든 접근법들이 세대가 진행될 수록 점차적으로 더 나은 목적

함수 값으로 수렴하고 있지만 pro-HGA 접근법이 GA와 HGA 접근법 보다 더 우수한 수행도를 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

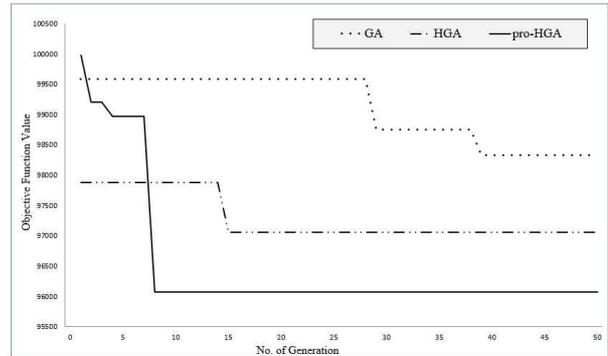


Fig. 3 Convergence Behaviours of the GA, HGA and pro-HGA Approaches in Case 4 of Scenario 3

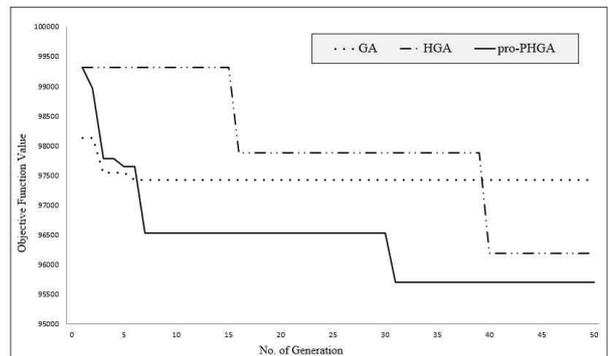


Fig. 4 Convergence Behaviours of the GA, HGA and pro-HGA Approaches in Case 4 of Scenario 6

Table 4와 Table 5의 결과는 Table 1에서 제시된 상이한 네 가지 규모의 SCN 모델을 이용하여 각 Scenario별 적용 결과를 나타낸 것이다. 하지만 Table 1에 제시된 Scale 1에서 Scale 4까지의 SCN 모델은 모두 사전에 정해진 고정된 공급자의 수, 주 공급자의 수, 백업 공급자의 수 등을 사용하였다. 따라서 만일 이들 고정된 수가 변동될 경우 BS 척도에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 민감도 분석을 고려해 볼 필요가 있다. 예를 들어, 주 공급자의 주 경로가 붕괴될 경우, Table 1에 의하면 이용 가능한 백업 경로는 단지 하나 뿐이다. 하지만 현실적인 측면을 고려해

불 때 제조기업의 경우 자신들에게 부품을 공급해 주는 공급업자의 주 경로가 붕괴될 경우, 이를 대체하여 이용할 수 있는 백업 경로는 다수를 고려하는 것이 더 일반적일 수 있다. 또한 Table 1의 각 Case 에서는 공급자 수가 고정되어 있는데 만일 공급자 수의 변동이 발생할 경우, 주 공급자 및 백업 공급자의 수 또한 변할 것이며, 이러한 상황이 발생할 경우, BS 척도에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴볼 필요가 있을 것이다.

Fig. 5는 Table 1의 Case 4의 경우에 대해 Scenario 3 상황에서 공급자의 수가 다양하게 변동하는 경우를 고려한 pro-HGA 적용결과를 보여주고 있으며, Fig. 6는 Table 1의 Case 4의 경우에 대해 Scenario 6 상황에서 주 공급자의 백업 경로의 수가 다양하게 변동하는 경우를 고려한 pro-HGA 적용결과를 보여주고 있다.

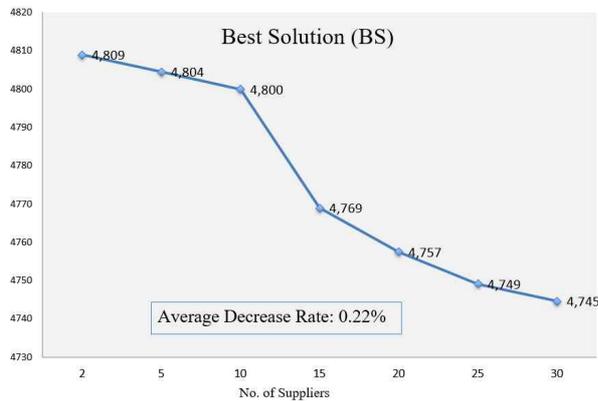


Fig. 5 Performance of the pro-HGA Approach for the Change of the Number of Supplier

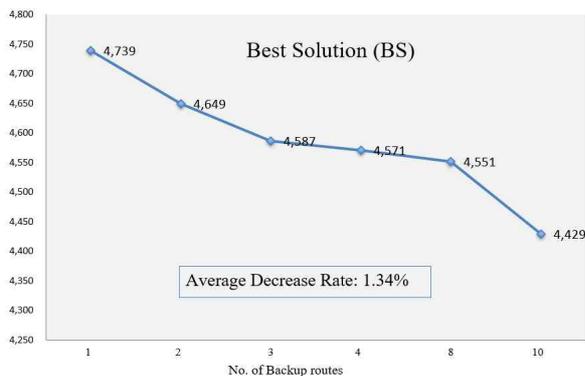


Fig. 6 Performance of the pro-HGA Approach for the Change of the Number of Backup Route

Fig. 5를 살펴보면, 공급자의 수가 점차적으로 증가할수록 BS 척도값은 점차적으로 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Scenario 3이 주 공급자의 붕괴를 고려하기 때문에, 이용 가능한 백업 공급자의 수가 많을수록 비용 최소화의 목적하에서 고정비용, 처리비용 및 수송비용이 적게 소요되는 백업 공급자를 선택하는 방향으로 결과를 도출하기 때문이다. 이러한 결과 분석을 통해 우리는 만일 주 공급자의 붕괴를 고려할 경우, 가능하면 이용 가능한 백업 공급자의 수를 늘리는 것이 전체 비용최소화에 더 기여할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6을 살펴보면, 주 공급자의 백업 경로의 수가 점차적으로 증가할수록 BS 척도값은 점차적으로 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 Scenario 6가 주 공급자의 주 경로의 붕괴를 고려하기 때문에, 이용 가능한 대체 경로 (즉, 주 공급자의 백업 경로, 백업 공급자의 백업 경로) 중에서 주 공급자의 백업 경로의 수가 증가할수록 비용 최소화의 목적하에서 각 경로의 수송비용이 적게 소요되는 경로를 선택하는 방향으로 결과를 도출하기 때문이다. 이러한 결과 분석을 통해 우리는 만일 주 공급자의 주 경로가 붕괴되는 상황을 고려할 경우, 가능하면 이용 가능한 백업 경로의 수를 늘리는 것이 전체 비용최소화에 더 기여할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6는 각각 주 공급자의 붕괴와 주 공급자의 주 경로 붕괴가 발생할 경우를 고려하여 공급자의 수를 증가시키는 방법과 주 공급자의 백업경로의 수를 증가시키는 방법에 대한 결과를 보여주고 있다. 첫 번째의 경우인 공급자의 수를 점차적으로 증가시킬 경우, BS 척도값은 평균적으로 0.22% 만큼 감소하며, 두 번째 경우인 주 공급자의 백업 경로의 수를 점차적으로 증가시킬 경우, BS 척도값은 평균적으로 1.34% 만큼 감소한 것을 알 수 있다. 결국 SCM 모델 운영에서 발생하는 붕괴현상을 고려할 경우, 주 공급자의 수를 증가시키는 방법보다 주 공급자의 백업 경로의 수를 증가시키는 것이 전체비용 감소 측면에서 더 유리한 것을 알 수 있다.

6. Conclusion

본 연구에서는 공급 붕괴를 고려한 SCN 모델이 제안되었다. 제안된 SCN 모델은 공급자로 부터의 부품 공급을 시작으로 제조자의 제품 생산 단계를 거쳐 최종적으로 소매업자에게 제품이 공급되는 다단계 구조를 가지고 있으며, 이러한 공급망에서 발생할 수 있는 공급자 붕괴와 경로 붕괴를 함께 고려하였다. 제안된 SCN 모델은 다양한 제약조건하에서 전체비용 최소화의 목적으로 하는 수리모형으로 표현되며, pro-HGA 접근법을 적용해 해결하였다.

수치실험에서는 네 가지 상이한 규모의 SCN 모델에 대해 다양한 Scenario 상황(Scenario 1에서 Scenario 3까지는 주 공급자의 붕괴를 고려, Scenario 4에서 Scenario 6까지는 주 공급자의 주 경로 붕괴를 고려)하에서의 본 연구에서 제안된 pro-HGA 접근법의 우수성을 비교분석하였다. 비교분석을 위해 기존의 메타휴리스틱 접근법인 GA(Gen and Chang, 2000)와 HGA(Kanagaraj et al., 2013) 접근법을 함께 사용하였다. 실험결과 pro-HGA 접근법이 GA와 HGA 접근법 보다 BS 및 AS 척도에서 우수한 성능을 보인 것을 확인할 수 있었다. 또한 공급자 수의 변동 및 주 공급자의 백업 경로 수의 변동에 따른 민감도 분석을 실시하였다. 실험결과는 공급자 수의 증가와 주 공급자의 백업 경로 수의 증가는 전체비용을 점차적으로 감소시킨다는 것을 파악하였으며, 특히 공급자 수의 증가보다는 주 공급자의 백업 경로 수의 증가가 전체비용 최소화에 더 크게 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 본 연구는 다음과 같은 몇몇 한계점을 가지고 있다. 첫째, 본 연구에서 제안한 pro-HGA 접근법의 경우 비교대상인 GA와 HGA 접근법보다 그 실행속도가 다소 느리다는 단점을 가지고 있다. 이러한 현상은 pro-HGA 접근법의 이행과정에서 Step 5(해의 개선) 절차를 집단의 크기 만큼 반복 수행하기 때문에 그 실행속도가 다소 떨어진다는 것이다. 따라서 이러한 실행속도를 높일 수 있는 방법이 개발되어야 할 것이다. 둘째, 수치실험에서

다루어진 네 가지 상이한 규모의 SCN 모델보다 더 큰 규모의 SCN 모델을 사용하거나, 만일 가능하다면, 실제 현장에서 얻어진 다양한 데이터(즉, 고정비용, 단위당 처리비용, 단위당 수송비용 등)를 사용하여 pro-HGA 접근법을 적용해 볼 필요가 있을 것이다. 이를 통해 pro-HGA 접근법의 유용성과 현장적용능력을 확인할 수 있을 것이다. 셋째, 본 연구에서는 각 공급자 그룹에서 각각 상이한 부품을 공급받는 멀티 소싱(Multiple sourcing) 개념과 함께 복수의 경로(Multiple route)를 고려하는 방식을 사용하였다. 따라서 이러한 개념을 바탕으로 본 연구를 새롭게 구성해 볼 수 있을 것이다. 아울러 공급자 붕괴 및 경로 붕괴에 대해 확률적 개념을 도입할 경우에도 그 실험결과를 비교해 볼 필요가 있을 것이다. 위에서 제시한 세 가지 본 연구의 한계점은 추후 개선된 연구의 진행 방향이 될 것이다.

References

- 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.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.017>
- Chopra, S., and Sodhi, M. S. (2004). Managing risk to avoid supply chain breakdown, *MIT Sloan Management Review*, 46(1), 53 - 62.
- Gen, M. and Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John-Wiley & Sons. New York, NY, USA.
- Gen, M., and Cheng, R. (2000). *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, John-Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Gen, M., Lin, L., Yun, Y. S., and Inoue, H. (2018). Recent advances in hybrid priority-based genetic algorithms for logistics and SCM network design,

- Computers and Industrial Engineering*, 115, 394 - 412.
- Jabbarzadeh, A., Haughton, 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.
- Kanagaraj, G., Ponnambalam, S. G., and Jawahar, N. (2013). A hybrid cuckoo search and genetic algorithm for reliability-redundancy allocation problems, *Computers and Industrial Engineering*, 66, 1115-1125.
- Lin, L., Gen, M., and Wang, X. (2009). Integrated multistage logistics network design by using hybrid evolutionary algorithm, *Computers and Industrial Engineering*, 56, 854 - 873.
- Lo, H. K., and Tung, Y. K. (2003). Network with degradable links: capacity analysis and design, *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(4), 345-363.
[https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(02\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00017-6)
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106089>
- Savaskan, R. C., Bhattacharya, S., and Van Wassenhove, L. V. (2004). Closed-loop supply chain models with product manufacturing, *Management Science*, 50, 239 - 252.
- Sever, D., Dellaert, N., Van Woensel, T., and Kok, T. D. (2013). Dynamic shortest path problems: Hybrid routing policies considering network disruptions, *Computers and Operations Research*, 40, 2852-2863.
- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management, *International Journal of Production Economics*, 103, 451 - 488.
- Waters, D. (2007). *Supply Chain Risk Management: Vulnerability and Resilience in Logistics*, Kogan Page limited, London, UK.
- 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.
- Xiao, T., and 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*, 173, 648 - 668.
- Xinyu, L., and Liang, G. (2016). An effective hybrid genetic algorithm and Tabu search for flexible job shop scheduling problem, *International Journal of Production Economics*, 174, 93 - 110.
- Yonhap News. (2021). *Suez Canal Obstruction*, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20210326006400111?input=1195m> (Accessed on Mar. 26th, 2021)
- Yun, Y. S. (2006). Hybrid genetic algorithm with adaptive local search scheme, *Computers and Industrial Engineering*, 51, 128 - 141.
- Yun, Y. S., Chuluunsukh, A., and Gen, M. (2020). Sustainable closed-loop supply chain design problem: A hybrid genetic algorithm approach, *Mathematics*, 8(1), 84
<https://doi.org/10.3390/math8010084>
- Yun, Y. S., Chuluunsukh, A., and Chen, X. (2018). Hybrid genetic algorithm for optimizing closed-loop supply chain model

with direct shipment and delivery, *New Physics: Sae Mulli*, 68(6), 683-692.

Yun, Y. S., Chung, H. S., and Moon, C. U. (2013). Hybrid genetic algorithm approach for precedence-constrained sequencing problem, *Computers and Industrial Engineering*, 65, 137 - 147.

Zhang, Q., Manier, H., and 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*, 39, 1713 - 1723.



추룬수크 아누다리
(Chuluunsukh Anudari)

- 비회원
- 전남대학교 경영학과 학사
- 현재: 조선대학교 경영학과 박사
- 관심분야: SCM, 생산최적화



윤영수 (YoungSu, Yun)

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