자연재난 하에서의 구호 물류 거점 계획 연구

A Study on the Facility Planning under Natural Disaster

한수민* · 정한일** · 박진우***

Han, Sumin*, Jeong, Hanil**, and Park, Jinwoo***

Abstract

The frequency of and damage caused by natural disasters are continuously increasing due to climate change and urbanization. There is growing interest in countermeasures aimed to relieve the damage caused by such disasters. Emergency logistics for relief supplies is one of the most important countermeasures. This study examines the logistics of the facility planning algorithm. Facility planning focuses on storing and providing relief supplies, as well as accommodating the victims of natural disasters. Although a similar point is noted in general logistics problems, a significant difference is also pointed out that stability must be considered for supporting stable emergency logistics. Therefore, this study evaluates the risk of the route and candidate point by considering the vulnerable site at the disaster scene and suggests the facility planning algorithm based on the genetic algorithm. Finally, the performance of the suggested algorithm is verified by conducting a simulation experiment.

Key words : Disaster Response, Emergency Logistics, Genetic Algorithm, Facility Planning

요 지

기후 변화 및 지속적인 도시화로 인해 자연재난의 발생빈도 및 그로 인한 피해의 규모는 점차 증가하고 있다. 이로 인한 대규모 피해의 경감을 위하여, 다양한 대응 수단에 관한 연구가 수행되고 있다. 재난 피해자를 위한 구호 물자 공급을 위한 구호 물류 체계는 가장 중요한 대응 수단 중 하나로서, 본 연구에서는 이를 지원하기 위한 구호 물류 거점 계획 문제를 다루었다. 구호 물류 거점 계획은 구호 물자를 비축하고, 필요 시 피해자들에게 제공하며 이재민을 수용할 수 있는 물류 거점의 위치 및 규모를 선정하는 의사결정에 해당하며, 일반적인 물류시스템에서의 거점 계획과 유사한 점이 존재하지만, 일반적인 비용 최소화보다는 필요한 시점에 필요한 구호 서비스를 안정적으로 제공할 수 있도록 안정성 및 효율성을 함께 고려해야 하는 차이점이 있다. 따라서 본 연구에서는 피해 현장의 취약시설을 고려하여 거점 후보 및 거점 간 경로의 위험도를 평가하고, 이를 바탕으로 거점 위치 및 규모를 결정함으로써 안정성과 효율성을 함께 제고시킬 수 있는 유전 알고리즘을 제시하였다. 그리고 재난 시나리오에 기반을 둔 시뮬레이션 실험을 통하여 제시된 알고리즘의 성능을 검증하였다.

핵심용어 : 재난 대응, 구호 물류, 유전 알고리즘, 거점 계획 문제

1. 서 론

태풍, 호우, 지진 등과 같은 자연재난은 역사적으로 큰 피해를 입혀 왔다. 한국의 경우 주변국에 비해서는 지진 등과 같은 재난에 대해 비교적 안전한 편이었으나, 대형재난

에 대한 대응 체제에 관한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 이는 UNISDR et al. (2015) 등에서 보고한 2000년대 이후의 세계적인 자연재난으로 인한 피해의 증가 추세와도 일치하고 있다. UNISDR (2010)은 피해 증가 추세의 원인으로 기후 변화로 인한 자연재난의 발생빈도와 규모 증가

*정회원, 서울대학교 산업공학과 박사과정(E-mail: hans8501@snu.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Industrial Engineering, Seoul National University

**교신저자, 정회원, 대전대학교 컴퓨터공학과 교수(Tel: +82-42-280-2562, Fax: +82-42-280-2889, E-mail: hijeong@dju.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Computer Engineering, Daejeon University

***서울대학교 산업공학과 명예교수

Emeritus Professor, Department of Industrial Engineering, Seoul National University

및 도시화율 증가 및 인구 집중도 증가로 인한 개별 재난의 피해 증가 등을 지목하였다.

이에 대비하기 위하여, 세계 각국에서는 대형재난으로 인한 피해를 줄이기 위한 대응시스템을 갖추기 위해 노력하고 있다. 해당 시스템은 부상자 구호 및 긴급 복구와 같은 재난 대응 활동에 필요한 물자의 확보 및 비축, 재난 대응을 수행하기 위한 수행기관의 조직, 봉사단체 및 정부 기관과 자치단체 간의 의사소통 및 활동 조율, 재난 및 피해 정보와 발생한 수요정보의 수집을 수행하며, 전술한 활동 결과를 활용하여 부상자 구호, 수요의 충족 및 중요 시설의 긴급 복구와 같은 활동을 수행해야 한다. CDP (2017), Kwak et al. (2019) 등이 분석한 FEMA와 NDMS의 구성에 따르면, 세계 각국의 대응 시스템에서는 주로 행정적인 지원 및 정보의 수집 및 전파에 중점을 두고 있는 것이 현실이다.

본 연구에서는 대응시스템의 운영 측면에서 매우 중요한 기능을 제공하는 구호 물류 거점 계획에 관한 연구를 수행하였다. 구호 물류 거점 문제는 일반적인 물류 시스템과는 다른 환경을 전제로 하므로, 다른 방식의 해법이 필요하다. Han et al. (2018)이 수행한 연구는 같은 주제를 다루었으나, 문제의 가정에 비현실적인 면이 있어 한계가 존재하였고, 해법의 성능 개선의 필요성이 요구되어 본 연구에서는 이를 개선한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 Mixed Integer Programming (MIP) 기법을 활용하여 문제를 모델링하고 바로 풀이하였으나, 본 연구의 모델에는 할당의 신뢰도 계산에 변수 간의 곱이 들어가 같은 방법의 적용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 유전 알고리즘을 적용한 해법을 제안하였으며, 개선된 거점 및 도로의 신뢰도의 추산방법에 대해서도 논의하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 기존 연구에 대한 검토 결과를 다루고 있으며, 3장에서는 본 연구의 대상 문제 및 최적해 탐색을 위한 수리적 모형을 다루었다. 이어지는 4장에서는 취약시설의 위험도에 기반을 두어 신뢰도를 평가하는 방법을 다루었다. 5장에서는 이를 활용한 해당 문제의 풀이 알고리즘을 소개하고, 6장에서는 시뮬레이션 실험을 통한 검증을 다루었으며, 7장에서 결론을 제시하였다.

2. 기존 연구

자연재난 대응을 위한 수단의 필요성이 늘어남에 따라, 구호 물류 시스템 및 방재 시스템을 다룬 연구 역시 점차 증가하고 있다. 본 연구에서는 해당 연구 중, 거점의 위치를 다룬 다양한 연구를 조사하여 참고하였다.

Balcik and Beamon (2008)의 연구는 할당 가능한 수요의 숫자를 최대화 하기 위하여 셋 커버링 모델에 기반한 수요 할당 모델을 제안하였고, 이를 통해 거점 문제를 풀이하였고,

해당 모델을 통해 재난 상황에서의 수요의 불확실성을 감안하여 이에 대응하기 위한 대규모의 구호 물류를 위한 거점 계획 모델을 다루었다. Lin et al. (2012)은 지진의 발생 시, 구호 물류의 수행을 보조하기 위한 거점 위치 계획 문제를 풀이하였다. 이를 위해 두 단계로 나뉘어 수행되는 발견적 알고리즘을 개발 및 적용하였다. Roh et al. (2013)은 AHP를 통하여 구호 물류 거점 계획을 위한 의사결정 과정에서 고려되는 요소를 분석하고, 각 요소의 중요도를 산출하였다. Ren and Zhang (2010)은 Fuzzy Clustering을 통하여, 다양한 요소를 동시에 고려하는 목적함수를 가지는 다목적 거점 계획 문제를 풀이하였다. Barzinpour and Esmacili (2014)은 인구 밀집 지역을 대상으로 한 구호 물류 시스템을 지원하기 위한 물류 거점 계획 문제를 다루었다. 우선 격자 형태의 구역으로 대상 구역을 나눌 수 있다고 보고, 이를 배경으로 다목적 최적화 문제를 목적 계획법을 응용한 알고리즘을 통해 풀이하였다. Caunhye et al. (2016)은 경로 계획을 고려한 거점 위치 모델을 제시하였다. 해당 연구에서 제시된 알고리즘은 두 단계로 이루어져 있으며, 첫 단계에서는 거점의 위치를, 이어지는 두 번째 단계에서는 경로를 정하는 과정을 통해 거점 계획을 완성한다. Yang et al. (2018)의 연구에서는 경로 계획을 수행할 경우, 각 물류 거점이 가지게 되는 여유 시간을 고려하여 이에 따른 차량 경로를 계획하고, 거점 계획을 작성하는 알고리즘을 제시하였다. 제시된 알고리즘은 두 단계로 통하며, 거점 위치 계획과 차량 경로 차례로 작성한다. Moreno et al. (2016)의 연구에서는 타 연구에서는 고려되지 않았던 차량의 재할당을 거점 위치 계획 및 차량 경로 계획 문제를 풀이하였으며, 이들은 정수 계획법을 두 단계로 나누어 적용함으로써 문제를 풀이하였다. Chen and Yu (2016)의 연구는 재난 발생시, 필수적인 응급 의료 거점의 계획 문제를 다루었다. 풀이를 위해서는 기존의 정확한 선형 계획 모델을 완화하여 문제를 풀이하는 형태를 취하고, 거점 계획을 수립하였다. Baskaya et al. (2017)은 거점의 위치 및 비축된 물자의 양을 동시에 고려하는 현실적인 거점 관리 계획 문제를 풀이하였다. 해당 연구에서는 물자의 양이 부족한 경우를 위한 외부에서의 물자 수급 역시 고려하였다. Salman and Yücel (2015)는 구호 물류 거점 계획 문제에 타부 서치를 응용한 메타 휴리스틱을 적용하여 구호 물류 거점 계획을 작성하였다. Verma and Gaukler (2015)의 연구는 구호수요의 무작위성에 집중하여 이에 대응하기 위한 방법을 논의하였다. 해당 연구는 통계적 계획법에 기반한 샘플링 기반 근사법을 적용하여 거점에 수요를 할당하는 방법을 통하여 구호 물류 거점 위치 계획을 확정하였다. Li et al. (2018)의 연구는 재난 발생시의 불확실한 상황에 따른 정보의 누락 및 혼선에 대응하기 위하여 SNS에서 유통되는 피해 지역의 수요정보 및 피해 정보를 활용한 거점 계획 알고리즘을 제시하였다.

이들의 연구는 다양한 방법을 고려하였다는 측면에서

본 연구 수행에 시사하는 점이 있으나, 미시적인 실제 도로상에서의 문제를 다루지 못한 점과 재난 환경에서 빼놓을 수 없는 불확실성을 고려하지 못한 한계점이 있다. 이를 극복하기 위하여 Han et al. (2018)의 연구는 불확실성을 고려한 실제 도로를 배경으로 한 미시적 거점 계획 알고리즘에 대해서 논하였다. 해당 연구의 결과로 얻어진 알고리즘은 다양한 시뮬레이션 실험에서 좋은 결과를 보여주었으나, 도로 네트워크의 신뢰성 계산, 수요 할당시의 신뢰성 계산 및 설치 비용 등의 부분에서 비현실적인 부분이 존재한다는 한계점을 보였다.

본 논문에서는 기존의 연구를 보완하여 도로 네트워크의 신뢰성 계산, 수요 할당 시의 신뢰도 산출을 개선하고, 설치 비용을 현실화한 모델을 제시하고 이를 풀이하기 위하여 새로운 구호 물류 거점 계획 알고리즘을 제시하고자 한다.

3. 문제의 정의

3.1 문제의 가정

본 연구에서는 재난의 영향권 내의 기반 시설이 그 영향 아래에서도 사용 가능한 상태가 유지될 확률인 신뢰도를 고려한 구호 거점 계획 문제를 풀이하였다. 해당 문제는 구호 물류 거점의 위치, 거점의 기능 및 규모에 대한 의사결정 문제로서, 다음과 같은 가정 아래 모델링하였다.

본 문제는 노드와 아크로 구성된 도로 네트워크를 바탕으로 정의되었다. 노드는 거점 후보 지점 및 수요의 발생 지점, 아크는 지점 간의 도로를 의미하며, 할당은 아크를 통해서만 이루어지도록 가정하였다. 또한, 수요의 발생 및 도로 네트워크의 신뢰도 변화는 재난의 종류와 발생 위치를 포함한 재난 시나리오에 따랐다.

거점의 경우, 기존에 설치된 거점을 고려하였으며, 거점 계획에서 새로 설치하는 거점에는 재난이 발생하기 전에 설치되는 고정 거점과 재난이 발생하거나 예견된 후에 설치되는 임시 거점의 두 종류의 거점을 고려하였고, 이렇게 설치된 거점의 할당된 모든 종류의 수요를 만족시키기 위한 자원 및 공간을 갖추도록 하였다.

고정 거점과 임시 거점은 서로 다른 특성을 갖는 것으로 설정하였다. 고정 거점의 경우, 긴 시간과 넓은 선택지가 존재하므로, 상대적으로 낮은 가격에 넓은 공간의 확보 및 많은 물자의 비축이 용이하다. 반면 임시 거점의 경우, 긴박한 상황에서 설치되어야 하므로, 고정 거점에 비해서는 넓은 공간을 확보하는 것이 힘들다.

거점 설치에는 초기 설치 비용과 거점의 규모에 비례하는 가변비용이 소요되며, 거점의 규모는 단계적으로 증가시킨다고 가정하였다. 초기 설치 비용은 거점이 없는 노드에 거점을 새로이 설치할 경우에 한정하여 발생하고, 노드별로 설치 비용은 모두 다르다고 가정하였다. 또한, 노드별로

설치 가능 거점 규모에는 상한이 존재하며, 이 역시 거점별로 다르다고 가정하였다.

수요의 경우, 구호 물자를 요하는 구호수요와 공간을 요하는 피난수요의 두 가지 수요를 가정하였고, 각 수요는 최대 할당 거리 이내의 거점에만 할당될 수 있다고 가정하였다.

위에서 언급한 바와 같이, 재난이 발생하여 노드와 아크가 그 영향권에 있을 경우, 거점이 위치한 노드가 이용 가능한 상태일 확률을 거점의 신뢰도로 정의하였다.

각 수요가 거점에 할당될 경우, 수요의 할당 성공 확률은 할당 경로 전체가 이용 가능할 확률로 계산할 수 있다. 이를 통하여 거점이 자신에게 할당될 수요를 모두 무사히 할당시킬 수 있는 확률을 수요 할당 신뢰도로 정의하였다. 이때, 할당을 위한 경로는 최단 거리로 한정하지 않으며, 다수의 경로 대안을 모두 고려하도록 하였다.

거점의 설치에 소모되는 예산의 경우, 거점 설치에 사용할 수 있는 총예산은 한정되어 있다. 전체 예산 및 고정 거점과 임시 거점의 설치 비용 분배는 정책적 결정을 통해 사전에 정해진다. 또한, 거점의 신뢰도와 거점의 수요 할당 신뢰도는 일정 수준 이상으로 유지하도록 하였으며, 거점의 신뢰도 하한과 수요 할당 신뢰도의 하한 역시 정책 결정을 통하여 정해진다.

3.2 MIP 모델링

앞 절에서 나열한 가정에 따라서 거점 계획 및 수요 할당 문제를 Mixed Integer Programming (MIP) 기법을 사용하여 모델링 하였다. 이를 위해 사용한 의사결정 변수 및 파라미터는 Table 1과 같으며, 본 연구의 모델은 Han et al. (2018)의 모델을 개선한 것이다. 본 모델은 경로의 다양성을 고려하도록 하여 현실에 가까운 해법을 얻을 수 있게 하였으며, 거점의 수요 할당 신뢰도 산출방법을 현실적으로 개선하여 경로의 신뢰도를 곱을 통해 계산하도록 하여, 거점의 종합 할당 신뢰도를 고려할 수 있도록 하였다. 그 외에도, 거점 설치 비용의 고정비용 추가하여 거점 설치 비용을 현실적으로 산출하도록 하였다. 모델의 파라미터 중 경로의 신뢰도인 $r_{i,j,l_{i,j}}$ 의 계산은 다음 4장의 방법을 통하여 계산된다.

의사결정 변수로는 거점 계획의 정의에 사용되는 x_i 와 $y_{i,t}$, 수요의 할당 결과를 통해 거점 계획의 평가할 때 사용되는 $m_{i,t,d_t,l_{i,j}}$ 가 존재한다.

목적함수는 Eq. (1)과 같으며, 해당 수식은 할당 거리와 미할당 수요의 수를 모두 고려하되, 미할당 수요의 개수를 최소화하는데 우선순위를 둔 수식이다.

$$\begin{aligned} \text{Min} & \left(\sum_{t \in T} |D_t| - \sum_{t \in T} \sum_{d_t \in D_t} \sum_{i \in I} \sum_{l_{i,j} \in L_{i,j}} m_{i,t,d_t,l_{i,j}} \right) \\ & + \frac{\sum_{t \in T} \sum_{d_t \in D_t} \sum_{i \in I} \left(\sum_{l_{i,j} \in L_{i,j}} m_{i,t,d_t,l_{i,j}} \sum_{i^* \in I} (d_{i,i^*,l_{i,j}} p_{i^*,t,d_t}) \right)}{d_{\max} \sum_{t \in T} |D_t|} \end{aligned} \quad (1)$$

Table 1. Variables and Parameters of MIP Model

Decision Variable				
x_i	Whether a facility is located at node I (0 or 1)			
$y_{i,t}$	Scale of a facility for demand type t at node i			
$m_{i,t,d,l,j}$	Whether demand d with type t at node j is allocated by facility at node i through route l (0 or 1)			
Parameter				
Policy	B	Limitation of the budget	$d_{\max}$	Limitation of allocation distance
	R	Minimum reliability of facility to satisfy every allocated demands	R'	Minimum reliability of node to set a facility
Road	I	Set of entire nodes (i: 1~ I)	$d_{i,j,l,j}$	Length of the lth route between node i and j
	$L_{i,j}$	Set of available routes between node i and j (l_{ij} : 1~ L_{ij})		
Demand	T	Set of demand types (t: 1~ T)	p_{i,t,d_t}	Whether demand d with type t is located at node i (0 or 1)
	D_t	Set of demand with type t (d_t :1~ D_t)	a_{t,d_t}	amount of demand d with type t
Facility	$z_{i,t}$	Scale of facility for demand type t at node i (integer)	A_t	Capacity of new facility per unit scale for demand type t
	$C_{i,t}'$	Fixed Cost of facility at node i for demand type t	A_t'	Capacity of existing facility per unit scale for demand type t
	$C_{i,t}$	Variable Cost of facility per unit scale at node i for demand type t	L_i	Scale limitation of facility at node i
Reliability	$r_{i,j,l,j}$	Reliability of lth route between node i and node j	R_i	Reliability of node i
Etc.	W	Big number		

MIP 모델은 다음과 같은 제약식을 가진다.

$$\sum_{i \in I} \left\{ C'_{i,t} x_i + \sum_{t \in T} C_{i,t} y_{i,t} \right\} \leq B \quad (2)$$

$$\bigcap_{t \in T} \bigcap_{d_t \in D_t} \begin{cases} \sum_{i^* \in I} \left(p_{i^*,t,d_t} r_{i^*,i^*,l_{i^*}} \sum_{l_{i^*} \in L_{i^*}} m_{i^*,t,d_t,l_{i^*}} \right) \neq 0 \\ \vdots \\ \sum_{i^* \in I} \left(p_{i^*,t,d_t} r_{i^*,i^*,l_{i^*}} \sum_{l_{i^*} \in L_{i^*}} m_{i^*,t,d_t,l_{i^*}} \right) \geq R (\forall i) \\ \sum_{i^* \in I} \left(p_{i^*,t,d_t} r_{i^*,i^*,l_{i^*}} \sum_{l_{i^*} \in L_{i^*}} m_{i^*,t,d_t,l_{i^*}} \right) = 0 \\ \vdots \\ 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$R_i \sum_{t \in T} (y_{i,t} + z_{i,t}) \geq R' \sum_{t \in T} (y_{i,t} + z_{i,t}) (\forall i) \quad (4)$$

$$\sum_{i^* \in I} \left(p_{i^*,t,d_t} d_{i^*,i^*,l_{i^*}} \sum_{l_{i^*} \in L_{i^*}} m_{i^*,t,d_t,l_{i^*}} \right) \leq d_{\max} (\forall d,t,i) \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in I} m_{i,t,d_t,l_{i,j}} \leq 1 (\forall t,d) \quad (6)$$

$$\sum_{d_t \in D_t} \left(a_{t,d_t} \sum_{i^* \in I} m_{i^*,t,d_t,l_{i^*}} \right) \leq A_t y_{i,t} + A'_t z_{i,t} (\forall i,t) \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} (y_{i,t} + z_{i,t}) < W x_i (\forall i) \quad (8)$$

$$\sum_{d \in D_t} \sum_{i^* \in I} m_{i^*,t,d_t,l_{i^*}} < W (y_{i,t} + z_{i,t}) (\forall i,t) \quad (9)$$

$$\sum_{t \in T} (y_{i,t} + z_{i,t}) \leq L_i (\forall i) \quad (10)$$

Eqs. (4), (5), (6), (7), (10)은 각각 거점의 신뢰도의 하한과 최대 할당 거리 제약, 단일 수요 할당, 거점의 할당 가능 용량, 거점 설치 가능 규모의 상한에 관한 제약으로, 유사 연구에서 많이 사용된 제약이다. 반면 관련 연구에서 사용되었던 임시 거점은 고정 거점에만 설치가 가능하다는 제약은 임시 거점의 유연성을 제약하여 비현실적인 면이 존재하므로 본 연구에서는 적용되지 않았다.

Eq. (2)는 거점 설치에 사용할 수 있는 총예산의 한계로서, 가변비용에 초기 설치 비용을 추가하도록 수정되었다. Eq. (3)은 수요 할당 신뢰도에 관한 제약으로서, 각 거점이 할당받은 수요를 모두 할당시킬 수 있을 것으로 기대되는 신뢰도는 일정 수치 이상이 되어야 한다는 것을 보인다. 이는 수요 할당 신뢰도를 고려할 때, 모든 할당 수요를 고려하기 위해

해당 거점에 할당된 모든 수요의 할당 경로 신뢰도를 곱하는 형태이다. Eq. (8)은 거점의 설치 여부를 가리기 위한 식이며, 이어지는 Eq. (9)는 수요가 할당 가능한 노드는 해당 종류의 수요 거점이 존재하는 곳으로 한정하는 제약으로, 의사결정 변수의 변화에 따라 새롭게 정의되었다.

본 모델은 변수 간의 곱셈이 존재하여 문제의 크기가 커질 경우 빠른 시간 안에 최적해를 구하는 것이 어렵다. 본 연구에서는 해당 모델을 풀이기 위한 짧은 시간 안에 우수한 성능의 해를 구하기 위한 별도의 알고리즘을 제시하였다.

4. 신뢰도의 계산

본 연구의 모델에서는 노드 및 경로의 사용 가능 확률을 통하여 거점의 신뢰도 및 수요 할당 신뢰도를 산출한다. 중요 시설인 교량이나 보 등의 위험도를 산출하는 방법은 기존의 연구에서 다루어진 바 있으며(Kim et al., 2009; Han and Lee, 2013; Kwon and Oh, 2014), 이들의 방법이 기존의 관리 시스템에 적용되어 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 시스템이 가진 취약시설의 위험도 정보를 사용할 수 있다고 가정하고, 주변의 취약시설로부터 노드와 경로가 영향을 받는 것을 고려하여 신뢰도를 계산하였다.

일반적으로 취약시설과의 거리가 가까울수록 더 많은 영향을 받으며, 거리가 멀어질수록 그 영향이 적어진다. 본 연구에서는 Han and Lee (2013)와 Kim et al. (2009) 등의 연구를 참고하여, 이들의 연구에서 계산한 곡선 형태로 변화하는 형태의 함수를 참고하여, 이와 유사한 형태의 신뢰도 함수를 사용하였다. 본 연구에서는 이를 반영하여, 거리에 따라 변화 속도가 줄어드는 방식을 통해 현실적인 신뢰도의 산출을 시도하였다. 거점 후보 노드와 경로의 신뢰도 R 은 이를 반영한 지수함수를 적용한 Eq. (11)에 의해 산출하였다.

$$R = \min_{e \in E} \begin{cases} d_e \leq l_e : 1 - \frac{(1-r_e)}{e^{4d_e/l_e}} \\ d_e > l_e : 1 \end{cases} \quad (11)$$

여기서 E 는 모든 취약시설의 집합이며 $e(1 \sim |E|)$ 는 각 취약시설을 나타낸다. r_e , l_e , d_e 는 각각 취약시설 e 의 위험도,

최대 영향 거리, 취약시설과 신뢰도 산출 대상 간의 거리이다.

신뢰도 계산에서 고려할 취약시설로 Table 2와 같은 구조물을 고려하였다. 위험도 및 최대 영향 거리와 같은 수치는 취약시설의 형태에 따라 달라진다. 보와 같은 형태의 취약한 구조물의 경우 넓은 지역에 영향을 미치므로, 최대 영향 거리가 긴 반면, 사면과 같은 구조물의 경우, 최대 영향 길이가 가장 짧도록 설정하였다.

5. 거점 계획 수립 알고리즘

5.1 거점 계획 수립 절차

전체 구호 물류 거점 계획은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 고정 거점 계획 및 임시 거점 계획을 제안된 유전 알고리즘을 통해 작성하는 방법으로 수행된다.

Fig. 1. Entire Planning Process

계획을 수행하기 전 거점 계획 수립 전에 현실적 상황을 바탕으로 설치될 거점의 신뢰도, 수요 할당 신뢰도의 하한, 그리고 고정 거점과 임시 거점의 예산 제약을 정책적인 결정을 통하여 확정한다. 그리고, 재난 시나리오를 생성하여 재난의 발생 지점에 따른 수요의 발생 확률을 확정한다.

Table 2. List of Vulnerable Locations

Category	Detail	Vulnerable Level	Influence Distance
Slop	Vulnerable Slop	High	Short
Bridge	Route to pass through valleys and rivers	Low	Middle
Small Dam	Small dam to store and supply water	Low	Long
Lowland	Low area that is vulnerable to flooding	Middle	Middle

그 후, 유전 알고리즘을 활용하여 고정 거점 계획을 수립한다. 고정 거점 계획은 일상적인 상황에서 수립되며, 기존에 존재하는 거점 역시 제약 조건으로 포함한다. 이 시점에서는 재난이 발생하지 않았으므로, 가능한 재난 시나리오를 계획 작성 시 모두 고려한다. 계획이 확정되면 그 결과에 따라 거점을 설치한 후, 재난이 발생하거나 예보되어 재난에 관한 정보가 수집될 때까지 대기한다.

재난 관련 정보 수집을 통해 수요 발생에 대한 신빙성 있는 예측이 가능해지면 이를 바탕으로 임시 거점 계획을 수립한다. 이때는 이전 단계에서 설치된 고정 거점을 바탕으로, 수집된 재난 관련 정보를 반영하여 유전 알고리즘을 통해 임시 거점 계획 수립을 마무리하여, 구호 물류 운영을 위한 거점 계획을 완료한다.

5.2 제안된 유전 알고리즘

전체 거점 계획의 수립 과정 중에서 고정 거점과 임시 거점의 계획을 작성하는 부분에 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용하였다. 이는 문제의 정의에서 언급한 바와 같은 이유로 짧은 시간 안에 최적해를 구하는 것이 불가능하기 때문이며, 본 연구에서는 빠른 시간 안에 우수한 해를 찾는 것을 목표로 하였다. 유전 알고리즘은 다양한 해를 포함하는 염색체 집단을 진화시켜나가며 우수한 해를 찾는 알고리즘으로, 제안된 알고리즘은 2차원으로 정의된 염색체에 기반을 두고 이에 맞는 교차 연산(Crossover), 변이 연산(Mutation) 및 수정 연산을 포함한다.

5.2.1 염색체의 구조

본 연구의 유전 알고리즘에서 사용되는 염색체의 구조는 Fig. 2와 같다. 염색체에는 제안된 MIP 모델의 $x_i, y_{i,t}$ 정보가 포함되며, 이를 통해 거점 계획을 수립한다.

Node Demand type	1	...	i	...	I
1	30	...	0	...	40
...	...	...	...	...	...
t	0	...	20	...	12
...	...	...	...	...	...
I	0	...	10	...	0

← Facility scale for demand type 1

...

← Facility scale for demand type t

...

← Facility scale for demand type |I|

Fig. 2. Chromosome of Suggested GA

해당 염색체의 각 열은 각 노드에 설치된 거점의 규모를 나타내며, 각 행은 수요의 종류를 나타낸다. 염색체의 초기화에서는 수요의 종류 및 거점 규모 제약을 모두 고려하고, 난수를 통해 무작위로 염색체를 생성하는 방법으로 유전자 풀의 다양성을 확보하였으며, 초기화에 한정하여 각 열이

나타내는 후보 노드의 설치 가능 거점 규모 제약을 2배로 완화하여 더 다양한 해가 가능하도록 하였다.

초기화는 모든 거점 후보 지점인 노드에 대하여 일정 확률로 거점이 설치될지의 여부를 정하고, 설치될 거점이 담당할 수요의 목록을 무작위로 선택한 후, 각 수요를 위해 거점에 할당해야 하는 공간의 규모를 무작위로 설정하는 과정을 거친다. 거점 설치 여부의 확률은 임의로 30%, 50%, 70%의 세 가지 확률을 적용하였으며, 각 초기 염색체의 1/3에 적용되었다.

5.2.2 연산자 설계

본 연구에서는 2차원 염색체에 대하여 Fig. 3과 같은 블록 균등교차(Block Uniform Crossover) 방법을 적용하여 차세대 염색체를 생성하였다(Anderson et al., 1991).

Fig. 3. Block Uniform Crossover

교차 연산을 위한 절단은 최소 1회 이상을 필수로 하고, 가로와 세로의 길이에 비례한 수만큼 수행되되 각각의 길이를 4로 나눈 횟수만큼의 절단이 있도록 하였다. 이는 다음 세대 염색체의 다양성과 염색체 구조의 보존을 모두 고려한 것이다.

변이 연산자는 각 행별로 하나의 노드를 무작위로 선택하고, 해당 노드의 수치를 무작위로 수정한다. 이때, 각 노드는 동일한 확률로 선택되도록 하였으며, 0과 거점 규모 한계 사이의 무작위 값으로 수정한다.

새로이 생성된 차세대의 염색체는 부모 양측의 특성을 반영하지만, 각 거점 후보 지역의 용량 한계 및 전체 예산 제약을 초과하여 가능하지 않은 해를 나타내기도 한다. 따라서 이를 수정하기 위해 Fig. 4와 같은 프로세스를 따르는 수정 연산자를 통해 거점 용량 한계 및 총예산 제약을 초과한 염색체를 수정하여 가능해가 되도록 한다.

5.2.3 염색체 평가

염색체를 통해 제시된 거점 계획은 수요의 할당 처리

Fig. 4. Process of Fix Operator

능력을 통해 평가되어야 한다. 설치된 거점은 미래의 재난 상황에서 발생할 수요에 대응해야 하므로, 과거의 피해 기록을 기반으로 설계된 재난 시나리오를 바탕으로 수요를 생성하고, 생성된 수요를 거점에 할당하고, 설치된 거점이 수요를 만족시키는 능력의 평가를 반복하는 방법으로 염색체를 평가하며, 세부 과정은 Fig. 5와 같다.

Fig. 5. Evaluation Process of Chromosome

수요를 거점에 할당하는 과정에서는 간략한 발견적 해법이 적용되었다. 해당 해법에서는 모든 수요와 모든 거점의 쌍에 대하여 이를 연결하는 경로를 거리가 짧은 순서대로 컴퓨터의 메모리가 허락하는 만큼 추출한 후, 이를 가까운 순서대로 정렬하여 차례대로 할당한다. 이때 신뢰도 제약 및 용량 제약을 만족시키지 못하면 다음 순위의 수요와 거점의 쌍을 할당한다. 이런 과정을 통해 MIP 모델에서의 m_{i,t,d_i,h_i} 값을 정하여 수요를 거점에 할당하고, 그 결과의 성능을 모델의 목적함수인 Eq. (1)을 통해 평가한다.

다양하게 나타날 수 있는 미래 구호수요에 대한 염색체 평가를 위하여 주어진 염색체에 의한 계획에 대하여 ‘재난 시나리오 선택 - 구호수요 생성 - 성능 평가’ 과정을 100회

반복하고, 이 결과를 평균하여 평가치로 사용한다. 시나리오 및 수요 생성에 대한 세부적 설명은 62절에서 설명한 방법을 따른다.

5.2.4 기타 설정

알고리즘 수행 시간을 고려하여 전체 염색체 풀의 인구수는 1,000으로 설정하였다. 또한, 최대 세대 수는 1,000으로 설정하여, 해당 세대 수만큼 진행되면 알고리즘을 종료하도록 하였고, 100세대 이상 최적해가 개선되지 않을 경우 역시 알고리즘을 종료하도록 하였다.

교차 연산에서의 부모 선택확률과 변이 연산 및 수정 연산자의 적용 확률은 Eq. (12)와 같이 계산하였다(Moon, 2003).

$$\begin{aligned}
 (a) \quad f_i &= \frac{(c_b - c_i) + \frac{c_b - c_w}{3}}{\sum_{i \in I} \left((c_b - c_i) + \frac{c_b - c_w}{3} \right)} \\
 (b) \quad p_m^t &= 0.1 \left(1 - \frac{t}{T} \right)^b \\
 (c) \quad p_f^t &= \left(\frac{t}{T} \right)^b
 \end{aligned} \tag{12}$$

부모 선택확률은 염색체의 성능을 고려하며, 그에 비례하는 부모 선택확률 계산법은 Eq. (12)의 (a)와 같다. 이는 염색체 평가치에 비례하여 각 염색체가 평가될 확률을 조정하되, 낮은 평가치의 염색체의 선택확률을 보장하여 전체 염색체의 다양성을 보장하기 위한 것이다. 여기서 f_i 는 염색체 i 의 선택확률이며, c_i , c_b , c_w 는 각각 염색체 i 의 평가치, 가장 좋은 염색체의 평가치, 가장 나쁜 염색체의 평가치이다.

변이 연산자의 적용 확률은 초기 세대에서는 높게 설정하고, 후기 세대로 갈수록 점차 낮아지도록 설정하였는데, 이는 초기 세대에서는 염색체 풀의 다양성을 높이고, 후기 세대에서는 수렴되어 가는 염색체 풀의 품질을 유지하기 위함이다. 확률은 Eq. (12)의 (b)와 같이 계산한다. 수정 연산자의 확률 역시 비슷한 방식을 적용하여, 후기 세대로 갈수록 확률이 점차 높아지도록 하였다. 실제 확률은 Eq. (12)의 (c)와 같이

계산한다. p_m^t 은 t 세대에서의 변이 연산자 적용 확률이며, p_f^t 는 t 세대에서의 수정 연산자 적용 확률이다. T 는 최대 세대 수이며, b 는 속도 조정용 파라미터다. 이때 두 수식의 속도 조정용 파라미터는 0.8로 설정하였다.

6. 시뮬레이션 실험

재난 상황을 가정한 시뮬레이션 실험을 통하여, 본 연구에서 제시한 구호 물류 거점 계획 알고리즘의 성능 평가를 수행하였다.

6.1 실험 설정

본 연구에서는 Fig. 6과 같이 서울시 강남구 일부 지역을 기반을 두어 도로 네트워크를 작성하고, 시뮬레이션 실험을 진행하였다. 이는 해당 지역에 밀집한 인구 및 취약시설의 존재를 고려하여 선정한 것이다. 실험의 배경이 되는 도로 네트워크는 서울 강남의 도로 네트워크에 기초하여 약간의 변형을 가한 것이다. 각 노드에는 만 가구에서 이만 가구 사이의 가구 수를 무작위로 설정하였다.

Fig. 6. Simulation Environment

반면 재난 시나리오에서 고려되는 재난의 종류와 수요를 생성하기 위한 확률과 거점의 설치 비용을 현실적으로 수정하여 일정 범위 내에서 무작위로 발생하도록 하여, 노드별 차이가 존재하도록 하였으며, 수요의 양에도 Table 3의 수치

를 사용하여 변동을 발생시켰다.

도로 및 거점의 신뢰도에 영향을 주는 취약시설은 Table 4와 같이 설정하며, 위험도 수치는 관련 논문에서의 위험도 수치를 고려하여 설정하였다(Kim et al., 2009; Han and Lee, 2013; Kwon and Oh, 2014; Nam et al., 2018).

문제의 가정에서 언급한 바와 같이, 본 실험에서는 두 종류의 수요를 가정하였다. 구호수요는 이재민이 피난처 및 임시 거처에서 일상생활을 유지하는 데 필요한 물자의 수요로서, 본 연구에서는 4인 가족이 하루에 사용할 물자를 모은 팩을 물자의 최소단위로 놓고 풀이하였다.

각 거점의 규모를 1단계 증가시키는 데 필요한 비용은 Table 5와 같은 균등 분포 하에서 결정되었다. 구호수요의 경우, 고정 거점에서는 각 단계를 증가시킬 때마다 400개의 물자를 비축하며, 임시 거점에서는 200개의 물자를 비축한다고 설정하였다. 피난수요의 경우, 4인 가구의 공간을 기준으로 하여 각 단계를 증가시킬 때마다 고정 거점에서는 20가구, 임시 거점에서는 10가구의 공간을 확보한다고 가정하였다.

거점을 설치할 때는 임시 건물의 설치, 신규 창고의 신축, 기존의 창고 계약 등과 같은 다양한 수단을 사용해야 하며, 이는 거점 후보인 노드의 사정에 따라 사용 가능 여부가 달라지기도 한다. 따라서 제시된 알고리즘의 수행도 평가에서는 이런 환경을 반영하기 위해서 각 노드에 거점 설치 시 소요비용을 무작위로 선정하되, 선택지가 더 많은 고정 거점에서는 더 적은 비용이 소모될 확률이 높으며, 효율적인 적재 및 공간 확보가 가능한 것으로 설정하였다.

이와 같은 가정에 기초하여 다양한 신뢰도 및 예산 정책에 따라 재난이 발생하기 전 고정 거점을 설정하고 무작위로 선정한 이 시나리오에 맞추어 임시 거점을 선정하는 시뮬레이션 실험을 수행하였다.

6.2 재난 시나리오

재난 발생 시 환경의 변화는 Table 4의 취약시설의 위험도 정보를 사용하여 설정되었으며, 수요의 생성을 위해서는 Table 3의 수요 발생 확률, 수요의 발생량 및 비율에 대한 설정이 적용되었다. 실험을 위한 무작위 수요 생성 및 신뢰도 산출은 Fig 7의 과정을 따른다. 본 연구의 시뮬레이션 실험에서 고려된 재난은 태풍과 지진, 집중호우이다.

Table 3. Environment Parameters According to Disaster Type

Disaster	Demand Existence Probability		Demand Amount Ratio To Population		Ratio of Refuge Demand	Influence Distance
	Within Affected Areas	Outside Affected Areas	Within Affected Areas	Outside Affected Areas		
Typhoon	70%	35%	[0.5%, 1.0%]	[0.1%, 0.3%]	[40%, 60%]	5 km
Earthquake	80%	50%	[1.0%, 2.0%]	[1.0%, 1.5%]	[50%, 70%]	10 km
Heavy rain	30%	20%	[0.1%, 0.3%]	[0.05%, 0.08%]	[20%, 40%]	3 km

Table 4. Parameters of Vulnerable Points

Category	Location		Risk			Influence Distance
	No.	Name	Heavy rain	Earthquake	Typhoon	
Bridge	1	Dongjakdaegyo	[0.05, 0.15]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.3]	1 km
	2	Banpodaegyo	[0.05, 0.15]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.3]	1 km
	3	Donghodaegyo	[0.05, 0.15]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.3]	1 km
	4	Yeongdongdaegyo	[0.05, 0.15]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.3]	1 km
	5	Cheongdamdaegyo	[0.05, 0.15]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.3]	1 km
	6	Jamsildaegyo	[0.05, 0.15]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.3]	1 km
Slop	1~7		[0.2, 0.4]	[0.7, 0.8]	[0.3, 0.5]	0.3 km
Small Dam	Yeoju bo		[0.05, 0.1]	[0.3, 0.4]	[0.4, 0.6]	3 km
Lowland	Lowland		[0.4, 0.6]	[0.1, 0.3]	[0.4, 0.6]	1 km

Table 5. Parameters for Facility Cost

	Fixed Cost (10,000₩)	Variable Cost (10,000₩)	
		Fixed Facility	Temporary Facility
Relief	[1,000, 4,000]	[500, 1,500]	[1,000, 2,000]
Refuge	[1,000, 2,000]	[500, 1,000]	[1,000, 2,000]

Fig. 7. Process of Demand and Reliability Generation

6.3 예산 및 신뢰도 정책

앞 장에서 서술한 바와 같이, 본 연구에서 제시한 알고리즘은 수행하기 전 예산 한도 및 분배와 최저 신뢰도를 정하는 정책적 결정이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 다양한 예산 정책과 신뢰도 정책을 적용한 실험을 수행하였다. 수요 할당 신뢰도 하한과 거점의 신뢰도 하한은 각각 [0.3, 0.5, 0.7]과 [0.7, 0.8, 0.9]의 세 가지 설정을 활용하였고, 고정 거점과 임시 거점의 최대 예산은 각각 [30억, 50억]과 [10억, 20억]의 두 가지 설정을 활용하였다. 마지막으로 최대 할당 거리는 4 km로 설정하였다. 총 3가지 재난에 대해 다양한 신뢰도 및 예산 정책을 적용하여, 총 108가지의 환경에 대해서 실험을 수행하였다.

6.4 실험 결과

각 재난에 대해서 실험한 결과 Table 6과 같은 결과를 얻었다. 실험 결과는 할당된 수요와 거점 간 거리의 평균과

최대 할당 거리의 비율(Distance Ratio), 수요의 기한에 맞추어 할당된 수요의 비율(Allocated Demand Ratio), 할당에 사용된 자원의 양(Allocated Resource), 사용 예산 및 계산시간의 항목에서 비교되었다.

실험 결과, 본 연구에서 제안한 알고리즘은 다양한 재난에 대해서 안정적인 할당 결과를 보여주었다. 이는 다양한 재난의 종류와 발생 상황에도 큰 영향을 받지 않고, 대부분의 수요를 안정적으로 만족시키는 것이 가능하다는 것을 나타낸다.

재난으로 인하여 발생한 수요의 양이 상대적으로 적은 집중호우의 경우, 더 짧은 거리에서 수요를 만족시키며, 할당 수요의 비율도 높은 결과를 얻었다. 반면 지진과 같이 넓은 범위에서 많은 수요를 발생시키는 재난의 경우, 거리 비율 및 할당 수요의 비율에서 낮은 결과를 얻었다. 이 둘의 중간 특성을 지닌 태풍의 경우, 이 둘의 중간 정도의 결과물을 얻었다. 사용 예산의 경우, 수요 할당 자원량은 늘어날수록

Table 6. Experiment Result According to Disaster

Disaster	Distance Ratio	Allocated Demand Ratio	Allocated Resource	Used Budget (10,000₩)	Calculation Time (sec)
Typhoon	0.284	75.896	972.86	183,047.32	123.76
Heavy rain	0.267	77.774	892.63	175,099.46	118.24
Earthquake	0.288	68.508	1,017.23	191,433.02	131.32
Avg.	0.279	74.095	960.91	183,193.27	124.44

사용 예산 역시 늘어나는 모습을 보였다. 반면 계산시간의 경우, 고정 거점과 임시 거점을 모두 합한 계산시간이 최대 140초를 넘지 않는 결과를 얻었으며, 빠른 계산이 필요한 임시 거점에 소요되는 시간은 전체 시간의 절반을 넘지 않았다.

예산 사용 계획에 따른 결과는 Table 7과 같다. 고정 거점과 임시 거점의 예산 제약에 따른 실험 결과, 예산 제약에 여유가 생길수록 거리 비율이 감소하고, 할당 수요 비율이 늘어나는 결과를 얻었다. 이는 당연한 결과로 해석되나, 고정 거점의 예산과 임시 거점의 예산 배분에 따라 다른 결과가 나타날 수 있음도 확인하였다. [30억, 20억] 및 [50억, 10억] 예산 계획을 [30억, 10억] 예산 계획과 비교할 때, 예산의 총액이 각각 10억, 20억 증가하였으나, 할당 수요의 비율 증가는 그에 못 미치는 사실에서 확인할 수 있으며, 이는 고정 거점의 설치에 사용하는 예산보다, 임시 거점의 설치에 사용하는

예산이 더 효율적일 수도 있다는 사실을 보여주고 있다. 다만 임시 거점은 같은 비용으로 더 적은 양의 물자를 제공하므로, 임시 거점만으로는 전체 수요를 감당하는 것이 불가능하다. 따라서 본 모델을 실제 적용할 경우, 고정 거점에 사용할 예산과 임시 거점에 사용할 예산의 비율이 효율적으로 되도록 결정할 필요가 있다.

최저 신뢰도의 정책에 따른 예산 설정에 따른 실험 결과는 Table 8과 같다. 신뢰도 하한 제약은 거점의 신뢰도 및 수요 할당 신뢰도의 하한에 관한 제약으로, 제약이 약할수록 (하한값이 작을수록) 설치가 가능한 거점 후보 및 할당 가능 경로의 수가 많아지기 때문에 다양한 거점 위치 및 할당 선택이 가능해지지만, 선택지가 많아져 계산시간이 늘어나는 효과가 있다. 따라서 이는 현실적인 신뢰도 제약을 설정하는 것이 거점 계획의 작성에 중요하다는 사실을 알 수 있다.

Table 7. Experiment Result According to Budget Policy

Fixed Facility (Billion₩)	Temporary Facility (Billion₩)	Distance Ratio	Allocated Demand Ratio	Allocated Resource	Used Budget (10,000₩)	Calculation Time (sec)
3	1	0.288	68.508	892.63	175,099.46	131.32
3	2	0.284	74.095	960.91	183,193.27	123.76
5	1	0.279	75.896	972.86	183,047.32	118.24
5	2	0.267	77.774	1,017.23	191,433.02	124.44

Table 8. Experiment Result According to Reliability Policy

Route Reliability	Facility Reliability	Distance Ratio	Allocated Demand Ratio	Allocated Resource	Used Budget (10,000₩)	Calculation Time (sec)
0.3	0.7	0.285	77.41	1,013.46	189,833.38	126.11
	0.8	0.286	77.22	1,006.26	185,213.71	126.52
	0.9	0.286	77.20	1,005.97	183,676.74	126.82
0.5	0.7	0.278	73.83	952.51	185,173.76	122.48
	0.8	0.279	73.80	948.73	183,472.42	122.25
	0.9	0.279	72.94	946.02	180,990.90	121.62
0.7	0.7	0.273	71.87	927.12	180,582.00	118.11
	0.8	0.274	71.16	926.51	180,427.05	115.94
	0.9	0.275	70.77	921.59	179,369.43	115.12

본 연구에서 제시한 알고리즘에서는 가능한 다양한 경로를 고려하여 할당 계획을 작성하나 고려하는 수에는 한계가 존재하므로, 실제 적용 시 할당 경로에서 문제가 발생하였을 경우, 다른 우회경로를 택하는 등의 방식으로 대응이 가능한 경우가 존재한다. 반면 물류 거점에서 자체적인 문제가 발생하였을 경우는 현장에서 대안을 찾는 등의 대응이 힘든 경우가 많다. 따라서 본 연구에서 제시한 결과물을 적용할 경우, 거점의 신뢰도 하한은 안전을 중심으로 보수적으로 설정하고, 수요 할당 신뢰도는 선택 가능성을 늘리는 방향으로 설정한다면, 실제 현장에서도 활용 가능한 거점 계획을 작성할 수 있을 것으로 판단된다.

실험 결과, 제안한 구호 물류 거점 계획 알고리즘은 다양한 재난에 대해서 안정적으로 대처할 수 있는 거점을 선정하는데 있어서 좋은 성능을 보여주었다. 또한, 다양한 신뢰도 및 예산 정책하에서도 안정적으로 동작하는 모습을 보여주었으며, 신뢰도 정책 및 예산의 분배를 어떻게 설정해야 하는지에 대해서도 시사점을 보여주고 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 자연재난 발생 시의 물류 거점의 위치와 규모를 설정하기 위하여 두 단계로 진행되는 구호 물류 거점 계획 알고리즘을 제시하였다.

본 연구에서 제시한 물류 거점 계획 알고리즘은 다양한 자연재난에 탄력적으로 대응할 필요가 있는 구호 물류의 특성을 고려하여, 재난이 발생하기 전에 과거 자료를 기반으로 다양한 재난 시나리오를 동시에 고려한 고정 거점 계획을 통해 거점을 설치하고, 재난 예보 및 발생 후에는 해당 정보를 바탕으로 빠르게 설치할 수 있으나 상대적으로 소규모인 임시 거점의 설치 계획을 작성하는 형태이다. 이에 사용되는 재난 물류 거점 계획 작성에는 현실적인 제약인 거점의 수요 할당 신뢰도를 반영하였으며, 무작위로 발생하는 재난 수요를 통해 재난 계획을 평가하는 과정을 거치는 유전 알고리즘을 적용하였다.

본 연구의 결과로 제시된 거점 계획 알고리즘은 시뮬레이션 실험을 통하여 검증되었다. 실험은 서울의 일부 지역의 도로 상태를 참조한 배경 및 지형에서 수행되었으며, 다양한 재난 발생 시나리오, 예산 제약 및 신뢰도 하한 정책에서 안정적인 결과를 보였다. 또한, 제시된 알고리즘을 현실에 적용할 경우 예산과 신뢰도 정책의 설정에 대한 시사점을 얻을 수 있었다.

본 연구의 결과물을 통하여 다양한 재난에 대응할 수 있는 유연성 있는 구호 거점의 설치 계획을 작성할 수 있을 것이며, 개선된 거점을 통하여 실제 재난 대응 시 재난 물류에서 걸리는 시간 및 신뢰도의 면에서 개선이 가능할 것으로 기대된다. 다만 실제 적용 시 필요한 정책적 결정을 위한 방법을 고려하여야 할 것으로 보이며, 거점 설치 비용을

산정하기 위한 수단을 고안할 필요가 있어, 후속연구에서는 이런 부분이 고려되어야 할 것으로 보인다. 또한, 더욱 다양한 재난에 대한 데이터를 고려한 실험을 수행하여 모델의 현실성을 더욱 증가시키기 위한 연구 역시 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2018학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

- Anderson, C.A., Jones, K.F., and Ryan, J. (1991). A two-dimensional genetic algorithm for the Ising problem. *Complex Systems*, Vol. 5, No. 3, pp. 327-334.
- Balcik, B., and Beamon, B.M. (2008). Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 101-121.
- Barzinpour, F., and Esmaeili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 5-8, pp. 1291-1302.
- Baskaya, S., Ertem, M.A., and Duran, S. (2017). Pre-positioning of relief items in humanitarian logistics considering lateral transshipment opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 57, pp. 50-60.
- Caunhye, A., Zhang Y., Li, M., and Nie, X. (2016). A location-routing model for prepositioning and distributing emergency supplies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 90, pp. 161-176.
- Center for Disaster Philanthropy (CDP). (2017) *Issue insight: FEMA*.
- Chen, A.Y., and Yu, T.Y. (2016). Network based temporary facility location for the emergency medical services considering the disaster induced demand and the transportation infrastructure in disaster response. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 91, pp. 408-423.
- Han, J.T., and Lee, J.Y. (2013). Construction of Seismic Landslide Hazard Map in Korea. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 17, No. 2, pp. 11-37.
- Han, S.M., Jeong, H.I., and Park, J.W. (2018). Study on the Facility Planning for Relief Logistics Relieving

- Damage from Natural Disaster. *The Journal of Society for e-Business Studies*, Vol. 23, No. 3, pp. 51-64.
- Kim, M.K., Hahm, D.G., and Choi, I.K. (2009). Seismic fragility evaluation for railway bridge structures using results of a safety factor. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 13, No. 4, pp. 57-65.
- Kwak, J.Y., Son, B.K., Lee, J.H., Kim, H.S., and Kim, G.B. (2019). A Study on improvement of national disaster management system (NDMS). *Proceedings of 2019 Fall Symposium*, Korean Institute of Communications and Information Sciences, pp. 125-126.
- Kwon, S.H., and Oh, H.S. (2014). Forecasting model for flood risk at bo region. *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 91-95.
- Li, B., Hernandez, I., Milburn, A.B., and Ramirez-Marquez, J.E. (2018). Integrating uncertain user-generated demand data when locating facilities for disaster response commodity distribution. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 62, pp. 84-103.
- Lin, Y.H., Batta, R., Rogerson, P.A., Blatt, A., and Flanigan, M. (2012). Location of temporary depots to facilitate relief operations after an earthquake. *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 46, No. 2, pp. 112-123.
- Moon, B.R. (2003). *Genetic algorithm*. Seoul: Dooyang Publishing.
- Moreno, A., Alem, D., and Ferreira, D. (2016). Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics. *Computers and Operations Research*, Vol. 69, pp. 79-96.
- Nam, M.J., Lee, J.Y., Jeong, W.Y., and Shin, D.H. (2018). Development of compound risk assessment method for a weir structure using hydrologic and hydraulic uncertainty: A case study of the Gangjeong-Goryeong weir. *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 9, No. 1, pp. 34-43.
- Ren, Z., and Zhang, Y. (2010). Emergency logistics design in disasters. *Proceedings of 2010 International Conference on Logistics Engineering and Intelligent Transportation Systems (LEITS)*, pp. 1-4. doi.org/10.1109/LEITS.2010.5664950
- Roh, S.Y., Jang, H.M., and Han, C.H. (2013). Warehouse location decision factors in humanitarian relief logistics. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Vol. 29, No. 1, pp. 103-120.
- Salman, F.S., and Yücel, E. (2015). Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case. *Computers and Operations Research*, Vol. 62, pp. 266-281.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), U.S. Agency for International Development (USAID), and Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). (2015). *2015 disasters in numbers*.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2010). *Killer year caps deadly decade-reducing disaster impact is "critical" says top UN disaster official*.
- Verma, A., and Gaukler, G.M. (2015). Pre-positioning disaster response facilities at safe locations: An evaluation of deterministic and stochastic modeling approaches. *Computers and Operations Research*, Vol. 62, pp. 197-209.
- Yang, X., Hao, W., and Lu, Y. (2018). Inventory slack routing application in emergency logistics and relief distributions. *PloS one*, Vol. 13, No. 6, e0198443. doi:10.1371/journal.pone.0198443

Received	February 20, 2020
Revised	February 21, 2020
Accepted	April 1, 2020