

자연 재해로 인한 피해 경감을 위한 구호 물류 거점 계획에 대한 연구

Study on the Facility Planning for Relief Logistics Relieving Damage from Natural Disaster

한수민(Sumin Han)*, 정한일(Hanil Jeong)**, 박진우(Jinwoo Park)***

초 록

최근 들어 자연재해의 빈도 및 강도가 늘어나고 있으며, 이에 따른 피해 역시 늘어남에 따라, 재난 현장에 대한 대응이 점차 중요해지고 있다. 본 연구에서는 피해를 경감하기 위한 구호 물류에서 큰 비중을 차지하는 부분인 물류 거점의 위치와 규모를 선정하기 위한 연구를 수행하였다. 구호 물류에서의 거점은 물자의 비축을 수행하는 일반 물류 거점의 기능 외에도 이재민 수용, 부상자 응급 처치 등 다양한 기능을 겸비해야 하며, 거점의 위치를 선정하는 기준 역시 거리 외의 거점의 신뢰도 및 주변 환경의 위험성을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 IoT 센서를 이용하여 정보를 파악하기 위한 체계를 제안하였다. 또한 재난물류 거점 문제는 다양한 수요에 대응하기 위한 기능의 배치에 대한 고려 역시 포함하여야 한다. 이를 풀이하기 위하여, 혼합정수계획 모델에 기반을 둔 알고리즘을 제시하였고, 재해 발생 시나리오를 고려한 시뮬레이션 실험을 통하여 모델의 성능을 검증하였다.

ABSTRACT

Recently, the magnitude and frequency of the natural disaster have been increased, the damage has become severer. The importance of disaster response system to relieve the damage has arised continuously. This study has tried to develop the algorithm to solve the facility location and size problem in emergency logistics.

A facility in the emergency logistics has various roles in victim care, casualty treatment, relief resource management and relief vehicle assistance. Moreover, the location of facility in emergency logistics has to consider the safety and reliability. To gather these information, information management system with IoT sensors are suggested.

The location problem in this study also covers various features to response various demands in disaster. To solve this problem, this study suggested MIP based algorithm. Scenario based simulation experiments are conducted to verify the performance suggested algorithm.

키워드 : 물류 거점, 재난 물류, IoT, 혼합정수계획법

Logistics Facility, Emergency Logistics, IoT, Mixed Integer Programming

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호 NRF-2015R1D1A3A01020750).

* Department of Industrial Engineering, Seoul National University(hans8501@snu.ac.kr)

** Corresponding-Author, Department of IT Business Engineering, Daejeon University(hijeong@dju.ac.kr)

*** Smart Factory Promotion Group, Director(autofact@snu.ac.kr)

Received: 2018-06-04, Review completed: 2018-06-07, Accepted: 2018-06-12

1. 서 론

1.1 재해 현황

2000년대 들어, 세계적으로 자연 재해의 증가로 인한 피해가 크게 증가하였다[9]. 올해에도 미국의 허리케인 어마, 멕시코의 지진과 같은 자연 재해가 지속적으로 발생하여 큰 피해를 입힌 바 있다. 이는 지구온난화와 같은 기후 변화로 인하여 자연재해의 빈도가 증가하였고, 개발도상국 등지에서 이루어진 무질서한 도시화로 인하여 개별 재해로 인한 피해가 증가하였기 때문이다[10].

우리나라는 주로 태풍 및 호우와 같은 기상 재해에 의해 피해를 받고 있으며, 지진 등과 같은 재해에 대해서는 비교적 안전하다고 여겨져 왔다. 그러나 최근에 들어 경주 지진과 같은 재해 역시 벌어지기 시작하고 있으며, 이에 따른 재해 대비의 필요성이 점차 증가하고 있다.

1.2 재난 대응 시스템

이러한 재해에 대비하기 위한 재난 대응시스템의 중요도가 크게 증가하였다. 재난 대응 시스템은 재난 대응에 필요한 물자 조달 및 관리, 다양한 참여기관 간의 조율, 재난 정보 및 피해 정보의 관리 및 전달, 구호 물류의 관리 및 피해 지역의 응급 복구 등을 모두 총괄하여야 한다.

이를 위해 세계 각국에서는 재난 대응용 시스템을 구축하여 운영하고 있다. 대표적으로 미국의 경우, 연방 재난 관리청(FEMA)에서 NIMS(National Incident Management System)가 재난 대응을 총괄하고 있으며, 독일의 경우, 연방정부

의 연방국민보호재난지원청(BBK)의 긴급재난 대응시스템(deNIS: deutsche Notfallvorsorge-Informationssystem)이 필요한 정보를 관리 및 배포하고 있다. 우리나라 역시 NIMS(National Incident Management System)를 구축하여 재난 대응 시스템으로 활용하고 있다.

다만 해당 시스템은 정보의 전파 및 재난의 모니터링에 큰 비중을 두고 있으며, 구호 물류 관리 및 응급 복구와 같이 재난 현장 및 근접지역에서 수행되는 지원 활동에는 미비한 면이 있다.

1.3 연구개요

본 연구에서는 효율적 재난 대응을 위하여 구호 물류 시스템에서 중요한 역할을 수행하는 구호 거점의 선정 문제에 대하여 연구하였다. 해당 문제는 일반 물류와는 다른 특성을 가지고 있어, 다른 방식의 해법이 필요하다. 이를 위해 MIP(Mixed Integer Programming) 기법을 활용하여 문제를 모델링하고, 이를 반복적으로 수행하여 거점을 할당하는 모델을 제안하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 제 2장에서는 기존 연구에 대한 검토 결과를 다루고 있으며, 제 3장에서는 본 연구의 대상 문제 및 최적해 탐색을 위한 수리적 모형을 다루었다. 이어지는 제 4장에서는 위험도를 평가하기 위한 방법과 IoT 센서를 이용한 정보 수집을 다루었다. 제 5장에서는 이를 활용한 해당 문제의 풀이 알고리즘을 소개하고, 제 6장에서는 시뮬레이션 실험을 통한 검증을 다루었으며, 제 7장에서는 결론을 제시하였다.

2. 선행 연구

자연 재해 대응을 위한 수단의 필요성이 늘어남에 따라, 재난 물류 시스템 및 방재 시스템을 다룬 연구 역시 점차 증가하고 있다. 본 연구에서는 이에 관한 다양한 연구를 조사하여 참조하였다.

Cheng과 Lu[5]는 비상물류시스템과 수행될 오퍼레이션에 대한 분석을 바탕으로 비상사태 대응모델에 대한 연구를 수행하였다. Ren[20]의 경우, 구호물품물류의 불확실성의 원인을 분석하여 공급사슬 재설계를 위한 전략과 세부 요소의 관리 기법을 제시하였다. Dai and Yan[7]은 구호물품물류와 공급사슬 시스템과의 공통적인 특성에 착안하여 11개의 서브시스템을 정의하고 이들 간의 관계를 기술하였다.

재난 물류를 위한 거점 선정 문제는 재난 물류 문제에서 중요한 부분을 차지하는 문제로서, 이전에도 다양한 연구가 수행되어 왔다.

Balcik과 Beamon[1]의 연구에서는 거점과의 거리가 일정 거리 이하인 수요의 개수를 최대화 하는 수요 할당 모델에 의거하여, 재난 물류를 위한 거점 위치 모델을 풀이하였다. 해당 연구는 재난 수요의 예측이 어렵다는 점에 주목하여 전 세계를 무대로 하는 거대 NGO를 위한 연구를 수행하였다. Lin 등[14]은 지진이 발생한 후, 피해 구호물자를 공급하기 위한 거점의 위치에 대한 연구를 수행하였으며, 두 단계로 구성된 발견적 알고리즘을 제시하였다. 노세연 등[16]은 재난 물류의 거점 선정에 고려되는 다양한 요소를 분류하고, 개별 요소가 의사결정 과정에서 차지하는 비중을 AHP를 활용하여 도출하였다. Zhang 외 2명[15]의 연구는 스타이너 보틀넥 모델에 기초하여 다양한 목적

함수를 동시에 고려하는 거점 연구를 시도하였다. Barzinpour와 Esmail[2]는 재해 발생 시 도시 내의 재난 구호 물류를 위해 거점의 위치를 선정하는 연구를 제시하였다. 해당 연구는 도시를 격자 형태의 구역으로 나누고, Goal programming method를 적용하여 다양한 목적함수를 고려하여 거점 배치 문제를 풀이하였다. Chen과 Yu[4]의 연구는 재해 현장에서의 긴급 의료 서비스를 제공하기 위한 임시 거점의 설치에 대한 연구로서, 선형계획 모델을 세운 후, 이를 다양한 방식으로 완화하는 기법을 적용하였다. Baskaya 등[3]은 거점 선정의 문제와 물자 비축량의 문제를 결합하여 문제를 풀이하였다. 해당 연구는 거점 간의 물자 운송 및 외부 지원을 결합하여 보다 현실적인 문제에 근접한 모델을 다루었다. Salman과 Yucel[17]의 연구는 타부 서치를 이용하여 거점의 위치를 연구하는 알고리즘을 작성하였다. Verma와 Gaukler[18]의 연구는 샘플링 기반 근사법을 사용하여, 확률적으로 발생하는 수요에서의 거점 위치에 대한 연구를 수행하였다. Hernandez 외 2명[13]의 연구는 SNS 등에서 피해지역의 당사자가 제공한 정보를 반영하는 거점의 위치 선정 방법에 대하여 논하였다.

IoT 센서를 이용하여 재해에 대응하기 위한 방법에 대해서 탐구한 연구도 존재한다. 윤혁진 외 3명[19]의 연구는 자연재해로 인한 SOC 시설물의 복구를 위해 IoT를 이용하여 정보를 수집 및 활용하는 방법을 제시하였다. 최상윤 외 5명[6]의 연구는 자연 재해 발생시 IoT 센서를 이용하여 복구자원을 관리하는 방법에 대해서 논하였다.

기존의 연구는 다양한 방법을 고려하였다는 측면에서 본 연구 수행에 시사하는 점이 있으나,

재난 현장 및 근접지역에서의 지원 활동을 포함하는 미시적 관점에서의 문제 해결에는 한계점을 보여주고 있다. 본 연구에서는 이러한 점의 개선을 시도하였다. 그를 위해 본 연구에서는 IoT 센서를 활용하여 자연 재해 발생 현장과 설치 현장의 신뢰도를 산출하고, 이를 통한 물류 거점 계획 문제 풀이 알고리즘을 제시하였다.

3. 문제 정의

위에서 언급한 바와 같이, 재난 물류 거점은 재난 현장의 구호 물류의 수행에 있어서 시작점이자 보급기지로서의 역할을 수행하며, 이재민을 수용하고 응급처치를 수행하기 위한 기반이 된다. 본 연구에서는 해당 물류 거점의 위치 선정 및 규모를 정하는 문제를 다룬다.

재난 현장의 구호 물류는 피해 현장의 피해자들에게 구호물자를 전달하고, 현장의 부상자들을 빠르게 돕는 것을 목표로 한다. 따라서 본 연구의 거점 선정 역시 물류의 목적과 같이 최대한 많은 수의 구호 수요를 거점에서 담당하며, 수요 지점까지의 도달 거리를 되도록 줄이는 것을 목표로 한다.

또한 해당 거점은 자연 재해 발생 도중 및 그 후폭풍이 이어지는 상황에서도 역할을 수행해야 하므로, 거점이 위치한 곳의 위험도에 대한 고려 역시 필요하다.

3.1 문제의 가정

따라서 본 연구에서는 이들 사항을 모두 고려하는 거점 문제를 풀이하였다. 해당 문제는 거점의 위치, 거점의 기능 및 수요 할당에 대한

의사결정 문제로서, 다음과 같은 가정 아래 문제를 모델링하였다.

본 문제는 노드와 아크로 구성된 도로 네트워크를 바탕으로 하며, 노드는 지점, 아크는 지점간의 도로를 의미한다. 거리의 계산도 이에 기반을 둔다. 노드 및 아크는 재난 발생시 사용 불가능하게 될 확률에 기반을 둔 신뢰도를 가진 것으로 가정하였다.

거점은 다양한 종류의 수요를 만족시키기 위한 수요를 다루어야 하며, 이를 만족하기 위해서는 각 수요에 맞는 자원 및 공간을 위한 맞춤형 거점이 필요하다고 가정하였다. 모든 수요는 재난 시나리오에 따라 각 지점에서 다른 수요가 발생하는 것으로 가정하였다.

거점은 도로 네트워크의 노드에 설치된다. 거점은 기존에 미리 설치되어 있는 거점과 추가로 설치되는 거점을 모두 고려하였다. 각 거점은 자신에게 할당된 수요 간의 경로에서 일정 신뢰도 이상을 유지해야 하며, 거점으로 선정된 노드 역시 일정 신뢰도 이상을 유지해야 한다. 거점 설치를 위해서는 기본적으로 구호 물자 수요를 위한 거점이 설치되어야 하며, 다른 수요 유형을 위한 거점은 구호 물자 수요를 위한 거점에 추가하는 형태로만 지을 수 있다고 가정하였다.

마지막으로 거점의 설치비용은 거점의 규모에 비례하며, 거점 설치에 사용가능한 총 예산은 한정된 것으로 가정한다.

3.2 MIP 모델링

위에서 언급한 가정 및 정책에 따라 본 문제를 Mixed integer programming model로 나타내었다. 우선 본 모델링에서 사용한 결정 변수 및 파라미터는 다음 <Table 1>과 같다.

〈Table 1〉 Variables and Parameters of MIP model

Decision Variable		
y_{it}		Installation size of facility for demand type t on node i (integer)
m_{id_t}		Whether demand d with demand type t is allocated to facility on node i (0 or 1)
Parameter		
Policy	B	Budget limit
	D	Maximum distance between a facility and a demand
	R	Minimum reliability of facility location and route between a demand and a facility
Road	I	Group of total nodes($i: 1 \sim I $)
	d_{ij}	Distance between node i and j
Demand	T	Group of demand types($t: 1 \sim T $) -1: Relief goods demand -2 $\sim T $: Other types
	D_t	Group of demands with demand type t ($dt: 1 \sim D_t $)
	l_{id_t}	Whether demand d with demand type t is located on node i (0 or 1)
	a_{d_t}	Demand amount of demand d with demand type t
Facility	z_{it}	Size of existing facility on node i for demand type t (integer)
	C_t	Unit installation cost of facility for demand type t
	A_t	Unit capacity of facility for demand type t
	A'_t	Unit capacity of existing facility for demand type t
Reliability	L_i	Facility installation limit on node i
	r_{ij}	Reliability of route between node i and j
	R_i	Reliability of node i
	W	Big number

목적함수는 식 (1)과 같으며, [할당되지 않은 수요의 개수]와 [수요처까지의 거리 합계와 거리한도의 비율의 합]을 최소화하는 것을 목표로 하였다. 거리의 비율은 1을 넘을 수 없으므로, MIP 모델의 풀이 결과는 미할당 수요의 개수를 줄이는데 더 집중한 결과를 낳는다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \frac{\sum_{t \in T} \sum_{d \in D_t} \sum_{i \in I} m_{itd} \sum_{i^* \in I} (d_{ii^*} L_{i^*td})}{D \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \sum_{d \in D_t} |D_t|} \quad (1) \\ & + \left(\sum_{t \in T} |D_t| - \sum_{t \in T} \sum_{d \in D_t} \sum_{i \in I} m_{itd} \right) \end{aligned}$$

본 MIP 모델은 다음의 제약을 가진다.

$$\sum_{i \in I} C_t \left(\sum_{t \in T} \sum_{d \in D_t} y_{it} \right) \leq B \quad (2)$$

$$\sum_{i^* \in I} (l_{i^*td} r_{ii^*} m_{itd}) \geq R m_{itd} (\forall d, t, i) \quad (3)$$

$$R_i \sum_{t \in T} (y_{it} + z_{it}) \geq R \sum_{t \in T} (y_{it} + z_{it}) (\forall i) \quad (4)$$

$$\sum_{i^* \in I} (l_{i^*td} d_{ii^*} m_{itd}) \leq D (\forall d, t, i) \quad (5)$$

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

$$\sum_{d \in D_t} (m_{itd} a_{td}) \leq A_t y_{it} + A'_t z_{it} (\forall i, t) \quad (7)$$

$$\sum_{d \in D_t} m_{itd} < W (y_{it} + z_{it}) (\forall i, t) \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} (y_{it} + z_{it}) \leq L_i (\forall i) \quad (9)$$

$$y_{it} \leq W y_{i1} (\forall i) \quad (10)$$

거점 설치에 사용 가능한 예산의 한계를 식 (2)로 나타내었다. 식 (3)은 수요가 거점에 할당 되었을 경우, 할당된 거점과 수요를 잇는 경로의 신뢰도는 일정 수치 이상이 되어야 한다는 제약이며, 식 (4)는 거점을 설치한 곳의 신뢰도가 일정치 이상이 되어야 한다는 제약이다. 식 (5)는 수요와 할당된 지점간의 거리가 일정 한도 이하여야 한다는 제약이다.

식 (6)은 모든 수요는 최대 하나의 거점에 할당될 수 있다는 제약이며, 식 (7)과 식 (8)은 수요는 거점이 할당된 노드에 할당되어야 하며, 할당된 수요의 양은 해당 거점에서 감당 가능한 규모를 넘어서면 안 된다는 제약이다. 마지막으로 식 (9)는 거점의 규모는 해당 노드의 한계를 넘어서지 못한다는 제약이다. 마지막으로 식 (10)은 구호 물류를 위한 수요를 위한 거점이 존재하여야 해당 거점에 다른 종류의 거점을 추가가능한 제약이다.

해당 모델의 복잡도는 낮아 CPLEX 등을 이용하면 빠른 시간 안에 풀이가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 해당 모델을 사용하여 거점 문제를 풀이하였으며, 다양한 재해 상황 및 수요 상황에 따라 달라지는 해법의 변화에 대해 논의하였다.

4. 위험도 분석

4.1 위험도 평가

본 연구에서는 도로 네트워크상의 거점 및 도로의 신뢰도를 주변의 취약지점의 위험도 데이터를 사용하여 산출하였다. 취약지점과의 거리가 가까울수록 더 위험도가 높을 것이므로,

거리에 기반을 둔 위험도의 분석이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 도로 네트워크의 지점 및 도로의 신뢰도는 주변의 취약지점의 위험도 및 거리에 기반을 두어 계산하였다.

위험도 R 을 산출하기 위한 수식은 다음 식 (11)과 같다.

$$R = \max_{e \in E} \{r_e \times \max(0, l_e - d_e)\} \quad (11)$$

E : 모든 취약지점의 집합

r_e : 각 취약지점의 위험도($e: 1 \sim |E|$)

l_e : 각 취약지점의 최대 영향 거리($e: 1 \sim |E|$)

d_e : 각 취약지점과 대상 도로 및 거점간의 거리($e: 1 \sim |E|$)

이렇게 계산된 위험도를 이용하여 도로 및 거점 후보지역의 신뢰도를 계산한다. 신뢰도는 다음 식 (12)와 같다.

$$R' = 1 - R \quad (12)$$

각 취약지점의 위험도는 재해의 종류, 발생 지점 등에 따라 달라지므로, 도로 및 거점 후보지역의 신뢰도 역시 이에 따라 계산되어야 한다.

본 연구에서는 도로 네트워크에 영향을 미치는 취약 지점으로 다음 <Table 2>와 같은 구조물을 고려하였다.

<Table 2> List of Vulnerable Structures

Slope	vulnerable slope
Bridge	structures to pass the rivers and valley
Small Dam	Small dam construction built for water supply
lowland	Areas easily flooded during disasters

4.2 IoT 센서를 활용한 위험도 평가

기존의 많은 연구가 재해 발생시 취약한 구조물인 사면, 교량, 보와 같은 구조물의 재난 발생시의 위험도에 대한 연구가 진행되어 왔다. [8, 11 12].

이런 방법을 통해서 취약지점의 위험도를 파악하기 위해서는 취약 구조물의 관련 정보를 수집하여 활용하여야 한다. 이를 위해서 각 구조물의 중요 지점에 IoT 기반 센서를 부착하여 해당 정보를 실시간으로 파악하고, 이를 통하여 재난 환경에서 변화하는 위험도를 지속적으로 평가한다.

다음 <Table 3>과 같이 센서를 각 취약 시설물에 설치하여 활용한다.

사면에서 수집된 데이터는 사면의 붕괴 가능성을 예측하는데 사용된다. 교량의 경우 교각의 기울기 및 높이를 계산하는데 활용되며, 교량의 상판에 설치한 변위센서는 교각간의 거리 및 상판의 뒤틀림을 측정하는데 사용된다. 보 및 저지대의 주변 하천에는 수위계를 통해 범람 위험을 평가하고, 보 전체에는 변위 센서와 경사계를 설치하여 보의 붕괴 가능성을 평가한다.

해당 평가의 상세는 기존의 토목 분야에서의 연구를 적용하는 것이 가능하다. 이와 같은 방식으로 실시간으로 위험도를 평가하고, 이를

거점 계획에 곧바로 적용하는 것이 가능하다.

5. 배치 알고리즘

본 연구에서 제안한 모델은 재해가 발생하기 전 다양한 재해 시나리오를 고려하여 다양한 유형의 수요 별 고정 거점을 선정하고, 재해가 예보된 후, 고정 거점을 보조하기 위한 임시 거점을 추가로 설치하는 구호 물류 거점 계획 모델이다. 본 문제의 고정 거점은 설치에 시간이 오래 걸리지만, 더 많은 수요를 낮은 가격에 감당할 수 있는 형태의 거점이며, 임시 거점은 빠른 시간 안에 설치가 가능하지만 비용이 많이 드는 형태의 거점이다.

MIP 모델에서 설명한 것과 같이, 최저 신뢰도 및 예산 제약 등과 같은 다양한 정책적인 설정을 사용자가 설정해야 한다. 해당 설정의 변화에 따라 결과로 얻어지는 계획에 차이가 생기게 되므로, 이에 대한 고려를 사전에 수행해야 한다.

또한 본 모델에서는 다양한 재해 시나리오를 고려하기 위해, 각 시나리오의 발생 확률 및 재해의 특성을 반영하여 무작위로 수요를 발생시키고, 모델을 풀이하는 것을 반복하여 다양한 결과를 얻고, 이를 종합하여 각 재해 거점에 맞는 수요 거점과 규모를 선정하는 방법을 사용하였다.

<Table 3> List of IoT Sensors

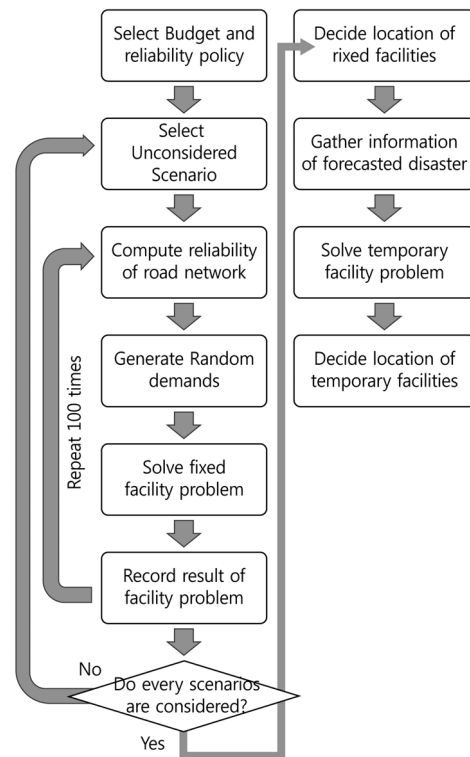
Name	Installing point	Sensor type
Slope	Whole slope	accelerometer, clinometer, gyro sensor
Bridge	Bridge pier	displacement sensor, clinometer
	Bridge deck	displacement sensor
Small Dam	River	hydrograph
	Body	displacement sensor, clinometer
Lowland	River	hydrograph

이를 고려한 알고리즘은 <Figure 1>과 같이 거점 문제를 풀이하였다. 고정 거점의 선정을 위한 MIP에서는 기존에 설치된 고정 거점이 없다고 설정하고 문제를 풀이한다. 각 수요 유형을 위한 고정 거점은 가능한 모든 재해 시나리오를 고려한 MIP 모델의 풀이의 결과로 얻어진 결과 중, 최빈 거점의 위치와 규모를 통하여 결정된다. 최빈 거점의 선정 기준은 다양한 방법이 가능하나, 본 연구에서는 모든 해의 결과를 평균한 결과를 사용하고, 해당 결과값 중 일정 수치 이상의 규모를 가지는 위치의 규모를 고정 거점의 위치로 확정하였다. 그리고 남은 예산을 사용하기 위하여 각 현 고정거점의 위치를 사용해 수요를 발생시킨 후 할당하여, 만족시키지 못한 수요의 위치별 발생 양을 평균하여 가장 많이 발생한 위치 순서대로 남은 예산을 사용하여 고정 거점을 설치하는 방식을 사용하였다.

설치된 고정 거점은 후에 임시 거점을 구하는 시점에서 기초 정보로 활용된다.

이후 실제 자연 재해가 발생하면, 해당 재해의 시나리오에 따라 수요가 발생할 것이라고 가정하고, 이에 맞추어 임시 거점을 작성하는 MIP 문제를 풀이하여 임시 거점 설치 계획을 수립하였다. 해당 문제의 풀이를 위한 MIP에서는 이미 설치된 고정 거점을 포함하여 문제 풀이를 수행한다.

<Figure 1> 같은 해법을 적용하기 위해서는 고정 거점의 선정 시 필요한 무작위 수요가 실제 발생하는 수요와의 유사성이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서 고려한 재해 시나리오는 다양한 재해가 무작위 지점에서 발생하는 것을 고려하였으며, 재해의 특성에 따라 영향 받는 지역의 넓이 및 수요 발생 추세가 달라지도록 설정하였다. 본 연구에서 고려한 재해의 종류는 태풍, 지진, 산불 및 집중호우이다.



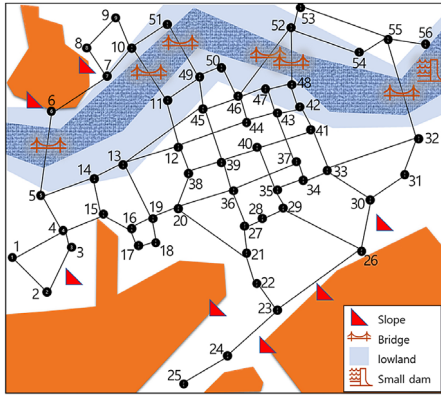
<Figure 1> Process of Suggested Algorithm

본 시뮬레이션 실험에서는 4종류의 재해를 같은 비중으로 고려하였다. 실제 적용 시에는 해당 비중은 지역의 특성 및 기록을 고려하여 적용하여야 할 것으로 생각된다.

6. 실험 및 검증

6.1 실험 설정

본 연구에서는 서울시 강남구 일부 지역에 기반을 두어 도로 네트워크를 작성하고, 시뮬레이션 실험을 진행하였다. 해당 부분의 지도는 다음과 같으며, 도로 네트워크는 다음 <Figure 2>와



〈Figure 2〉 Traffic Network for Simulation Experiment

같이 구성되었다. 또한 MIP 문제의 풀이를 위한 파라미터를 설정하기 위하여, 본 연구에서는 다음과 같이 가정하였다.

수요의 경우 일반 구호 수요와 이재민 수용을 위한 수요 2가지를 가정하였다. 일반 구호물자 수요는 이재민이 하루에 사용할 물자를 모은 팩이며, 본 연구에서는 최소단위의 고정 거점에서는, 총 400개의 물자를 비축한다고 설정하였으며, 해당 거점의 구축에는 총 5천만 원의 예산이 소요된다고 설정하였다. 반면 임시 거점의 경우, 총 100개의 물자를 비축 가능하며, 구축에는 총 2천만 원이 든다고 가정하였다.

이재민 수용을 위한 수요의 경우, 본 연구에서는 최소 단위로 고정 거점에 관련 공간을 구축할 경우, 4인 가족 기준 20가구를 수용할 수

있는 공간을 확보할 수 있으며, 이를 위해서 총 2,500만 원의 예산이 소요된다고 가정하였다. 반면 임시 거점에 해당 공간을 구축할 경우, 4인 가족 기준 10가구를 수용할 수 있는 공간을 확보하며, 이를 위해 같은 비용이 든다고 가정하였다. 해당 가정은 기존의 재해 대응 데이터를 기반으로 설정하였다.

6.2 수요의 생성

시뮬레이션 실험을 위한 수요의 무작위 생성은 다음과 같은 과정을 거쳐 수행되었다. 우선 재난의 발생 지역을 무작위로 설정하였다. 그리고 재해의 특성에 따라 영향을 받는 반경을 확정하고, 재해의 특성에 맞추어 영향 받기 쉬운 취약지점인 저지대나 산림 근처와 같은 특성을 고려하여 구호 수요의 발생지역으로 설정하였다. 이를 통해, 구호 수요의 발생에 재해의 특성이 반영되도록 하였다.

그 후, 영향을 받은 지역에서 수요가 발생하는지의 여부를 확률에 따라 무작위로 결정한 후, 수요가 발생하였다면 해당 지역의 가구 수 비율에 맞추어 각 수요가 필요로 수요 자원의 양을 생성하였다. 또한 영향을 받는 지역의 취약 시설의 신뢰도는 재해에 따라 다르게 변화하도록 조정하였다. 해당 수치는 다음 <Table 4>와 같다.

〈Table 4〉 Change of Reliability and Demand Occurrence According to the Disaster Type A

Disaster	Probability		Amount of Required resource per population		Reliability of vulnerable structures	Radius
	Relief	Refuge	Relief	Refuge		
Typhoon	0.7	0.35	0.005	0.001	0.5	5km
Earthquake	0.8	0.5	0.01	0.01	0.5	10km
Forest fire	0.5	0.5	0.005	0.002	0.3	2km
Torrential downpour	0.3	0.2	0.001	0.0005	0.7	3km

6.3 예산 및 신뢰도 정책

제 3.3절 및 제 4장에서 서술한 바와 같이, 본 연구에서 제시한 방법은 수행하기 전 예산 한도 및 신뢰도에 대한 한도라는 정책적 결정이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 다양한 예산 세팅과 신뢰도 정책을 적용한 실험을 수행하였다. 파일럿 스터디를 통해, 예산의 경우는 50억과 70억으로, 최소 신뢰도의 경우는 각각 0.3, 0.5, 0.7로 설정한 후 시험하였다. 최소 거리는 4km로서, 혼잡한 상황 하에서도 30분 안에 달할 수 있는 거리를 목표로 하였다.

6.4 실험 결과

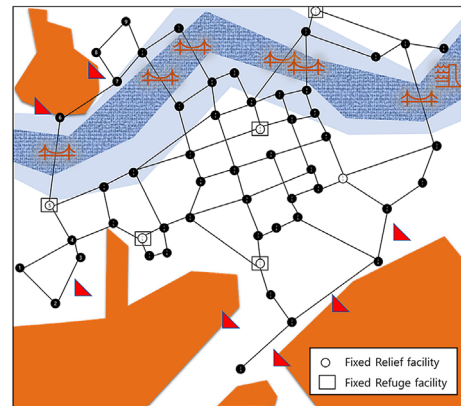
총 100회의 시뮬레이션 실험 결과 실험 결과, 다음 <Figure 3>과 같은 위치에 고정 거점이 매우 높은 빈도로 설치되었다.

각 재해 및 수요 별로 높은 빈도로 임시 거점이 설치된 위치는 다음 <Table 5>와 같다. 해당 위치는 해당 재해에 의한 위험도를 적게 받으면서도 각 재해로 인해 발생하는 수요에 가까운 지점이다.

재해에 따라 설치된 구호 수요를 위한 거점과 이재민을 위한 거점의 성능 및 비용은 다음 <Table 6>과 같다.

<Table 5> Location of Temporary Facilities

	Relief demand	Refuge demand
Typhoon	6, 13, 42, 53	6, 42, 53
Earthquake	12, 20, 21, 28	12, 21
Forest fire	33, 41, 42	33, 41
Torrential downpour	4, 12, 23, 28, 44	4, 12, 28



<Figure 3> Location of Fixed Relief Facilities

실험 결과, 평균적으로 3.5%의 수요를 제외한 모든 수요를 만족시키는 결과를 내었으며, 평균 수요까지의 거리 역시 제한거리인 4km의 절반 이하 비율로서 가까운 거리를 보인 결과를 얻었다.

<Table 6> Experiment Result According to Disaster Type

Disaster	Computing Time	Distance Ratio	Used Budget	Number of Unallocated Demands	Avg. Number of demand points	Avg amount of demand
Typhoon	3.09	0.53	5.88 billion	0.62	15.32	37.32/74.0
Earthquake	0.17	0.38	4.14 billion	0.37	6.69	72.19/74.28
Forest fire	0.21	0.19	2.19 billion	0.17	5.31	37.71/14.82
Torrential downpour	97.03	0.45	4.82 billion	1.21	40.1	7.40/3.78
Summary	25.13	0.39	4.26 billion	0.59	16.86	38.85/24.98

재해에 따라서 계획의 결과는 다음과 같이 발생하였다. 수요가 넓은 범위에서 다수 발생하는 태풍에서 거점과 수요 사이의 거리 비율이 높게 나타났고, 반면 수요의 수가 적고 영향을 받는 범위도 적은 호우에서 거리의 비율이 가장 낮게 나타났으며, 산불의 경우, 피해지역까지의 도로의 길이가 긴 측면이 있어, 호우에 비해 크게 수요까지의 길이가 긴 모습을 보였다.

소요 비용의 경우, 넓은 지역에 영향을 받는 태풍과 지진의 사용비용이 가장 크게 나타났으며, 피해지역까지의 거리가 멀며, 수요의 숫자가 적은 산불의 경우 적은 수의 임시 거점을 필요로 하여, 다른 재해에 비해서 더 적은 비용으로 발생한 수요를 만족시키는 결과를 얻었다.

마지막으로 미할당 수요의 경우, 수요의 수가 많고 넓은 지역에 퍼져있는 경우가 많은 태풍과 지진이 상대적으로 많은 미할당 수요 수를 보였다.

신뢰도 정책에 따른 실험 결과는 다음 <Table 7>과 같다. 신뢰도 하한이 높아져도 계산에 걸리는 시간과 사용한 예산에는 큰 영향이 없었다. 이는 사용 예산은 수요의 양에 큰 영향을

받기 때문이다. 반면 거리의 비율 및 미할당 수요의 수에는 큰 영향을 주며, 하한이 높아질수록 거리의 비율이 증가하고, 미할당 수요의 수가 늘어나는 모습을 보여 점차 성능이 좋지 못한 모습을 보인다.

<Table 8>은 예산 상한에 따른 실험 결과의 변화이다. 예산이 늘어날수록 사용 예산을 제외한 다른 수치는 개선된 모습을 보이나, 상한을 모두 활용하는 경우가 많지는 않다는 사실을 사용 예산의 평균을 통해 알 수 있다. 따라서 실제 적용 시에는 상황과 재해를 모두 고려하여 유연한 예산 정책을 결정할 필요가 있을 것으로 생각된다.

7. 결 론

본 연구에서는 재난 물류를 위한 거점 선정에 대한 문제를 다루었다. 해당 문제는 재난 발생 이전에 고정 거점의 위치 및 규모를 미리 정하고, 재난이 발생한 후 재난 상황에 맞추어 임시 거점의 위치와 규모를 선정하는 문제이다.

<Table 7> Experiment Result According to Reliability

Reliability Limit	Computing Time	Distance Ratio	Used Budget	Number of Unallocated Demands
0.3	21.04	0.165	4.25 billion	0.34
0.5	22.04	0.301	4.27 billion	0.69
0.7	22.29	0.497	4.26 billion	0.75

<Table 8> Experiment Result According to Budget Policy

Budget Limit	Computing Time	Distance Ratio	Used Budget	Number of Unallocated Demands
5 billion	18.73	0.51	3.8 billion	0.66
7 billion	17.00	0.29	4.7 billion	0.54

해당 문제의 정의를 위하여 우선 MIP 모델을 작성하였으며, 해당 MIP 모델의 복잡도가 낮아 빠른 시간 안에 풀이가 가능한 점을 근거하여, 해당 모델을 다양한 환경에서 반복적으로 풀이하는 해법을 제시하였다. 본 연구에서는 제시한 해법을 다양한 예산 제약 및 신뢰도 정책에 적용하고, 그에 따른 변화에 대해서도 알아보았다. 실험의 결과 모델은 좋은 성과를 보였다.

본 모델은 고정 거점을 통하여 기본적인 재해 수요에 대응하고, 재해의 종류 및 특성에 따라 변동하는 수요를 효과적으로 감당할 수 있는 임시 거점을 추가로 선정하는 방식을 적용하였다. 따라서 고정 거점의 선정에는 수요 발생에 대한 신뢰성 있는 예측 정보가 필요하다. 이 외에도 제안한 MIP 모델의 계산 시간이 문제의 크기가 커졌을 경우, 얼마나 늘어날지에 대한 고려도 필요하다.

본 모델은 과거의 재해 기록에 따라 수요를 무작위로 생성하고, 이를 반영하여 거점의 위치를 정하는 모델이다. 따라서 본 모델을 활용하기 위해서는 기존의 피해 및 구호 수요에 대한 기록을 관리하기 위한 시스템의 뒷받침이 필요할 것으로 보인다.

추후 연구에서는 현실의 제약을 더 반영하고, 경로의 신뢰도 반영 방식을 더 현실적으로 개선할 예정이다. 또한 위에서 언급한 모델의 한계를 넘기 위한 개선도 다룰 예정이다. 또한 실제 수요 기록에 개선된 모델을 적용하여 추가 검증을 시도할 것이다.

References

- [1] Balcik, B. and Beamon, B. M., "Facility location in humanitarian relief," *International Journal of Logistics*, Vol. 11, No. 2, pp. 101-121, 2008.
- [2] Barzinpour, F. and Esmaeili, V., "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, 2014.
- [3] Baskaya, S., Ertem, M. A., and Duran, S., "Pre-positioning of relief items in humanitarian logistics considering lateral transportation opportunities," *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 57, pp. 50-60, 2017.
- [4] Chen, A. Y. and Yu, T.-Y., "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, 2016.
- [5] Cheng, W. and Lu, J., "Operational analysis on emergency logistics system and emergency response model," *Service Operations and Logistics, and Informatics*, 2008, IEEE/SOLI 2008, IEEE International Conference on., Vol. 1, pp. 1323-1328, 2008.
- [6] Choe, S.-Y., Park, J.-H., Han, S.-M., Park, J. W., Jang, T.-W., and Yun, H.-J., "IoT-Based Module Development for Management and Real-time Activity Recognition of Disaster Recovery Resources," *Journal of Society for e-Business Studies*, Vol. 22, No. 4, pp. 103-115, 2017.

[1] Balcik, B. and Beamon, B. M., "Facility

- [7] Dai, W., Yan, H., and Liu, X., "Supply chain system for emergency rescue of natural disasters," *Information Science and Management Engineering(ISME)*, 2010 International Conference of., Vol. 1, pp. 218-221, 2010.
- [8] Han, J.-T. and Lee, J.-Y., "Construction of Seismic Landslide Hazard Map in Korea," *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 17, No. 2, pp. 37-48, 2013.
- [9] http://cred.be/sites/default/files/2015_DisastersInNumbers.pdf (Accessed on 2018/06/08).
- [10] <https://www.unisdr.org/archive/17613> (Accessed on 2018/06/08).
- [11] Kim, M.-K., Hahm, D.-G., and Choi, I.-K., "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, 2009.
- [12] Kwon, S.-H. and Oh, H.-S., "Forecasting Model for Flood Risk at Bo Region," *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 91-95, 2014.
- [13] Li, B. et al., "Integrating uncertain user-generated demand data when locating facilities for disaster response commodity distribution," *Socio-Economic Planning Sciences*, 2017.
- [14] Lin, Y.-H. et al., "Location of temporary depots to facilitate relief operations after an earthquake," *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 46, No. 2, pp. 112-123, 2012.
- [15] Ren, Z. and Zhang, Y., "Emergency Logistics Design in Disasters," *Logistics Engineering and Intelligent Transportation Systems(LEITS)*, 2010 International Conference on., pp. 1-4, 2010.
- [16] Roh, S., Jang, H., and Han, C., "Warehouse location decision factors in humanitarian relief logistics," *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Vol. 29, No. 1, pp. 103-120, 2013.
- [17] Salman, F. S. and Yücel, E., "Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case," *Computers and Operations Research*, Vol. 62, pp. 266-281, 2015.
- [18] Verma, A. and Gaukler, G. M., "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, 2015.
- [19] Yun, H.-J., Lee, K.-T., Kim, J.-S., and Jang, T.-W., "Design and Implementation of Web-Based Support System for Disaster Damage Recovery of SOC Facility," *Journal of Society for e-Business Studies*, Vol. 20, No. 4, pp. 227-239, 2015.
- [20] Zhang, J., Dong, M., and Chen, F. F., "A bottleneck Steiner tree based multi-objective location model and intelligent optimization of emergency logistics systems," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 29, No. 3, pp. 48-55, 2013.

저 자 소 개



한수민
2010년
2010년~현재
관심분야

(E-mail: hans8501@snu.ac.kr)
서울대학교 산업공학과 (학사)
서울대학교 산업공학과 (박사과정)
재난 대응, 스마트공장, 사물인터넷



정한일
1989년
1991년
1996년
1997년~현재
관심분야

(E-mail: autofact@snu.ac.kr)
서울대학교 산업공학 (학사)
서울대학교 대학원 산업공학 (석사)
서울대학교 대학원 산업공학 (박사)
대전대학교 IT경영공학과 교수
ERP/SCM, Logistics, 재난대응, 스케줄링 및 시뮬레이션



박진우
1974년
1976년
1985년
1985년~2018년
2015년~현재
관심분야

(E-mail: autofact@snu.ac.kr)
서울대학교 산업공학과 (학사)
한국과학기술원 산업공학과 (석사)
미국 U.C. Berkeley 산업공학과 (박사)
서울대학교 산업공학과 교수
현재 민관합동 스마트공장 추진단 단장
스마트공장, ERP/SCM, 스케줄링 및 시뮬레이션