

# 재난 물류를 위한 거점 선정에 대한 연구

한수민<sup>†</sup>, 정한일, 박진우  
서울대학교 산업공학과  
대전대학교 IT경영공학과

## Study on the facility problem of emergency logistics in disaster scene

Sumin Han, Hanil Jeong, Jinwoo Park  
Department of Industrial Engineering, Seoul National University  
Department of IT Business Engineering, Daejeon University

### Abstract

최근 들어, 지진, 태풍 및 집중호우가 늘어남에 따라, 재난 현장에 대한 대응이 점차 중요해지고 있다. 해당 대응 중에서 가장 중요한 것 중 하나는 구호 물자의 신속한 전달이다.

그러나 현존 재난 대응 시스템의 기능은 피해 파악 및 정보 공유에 집중되어 있어, 구호 물자를 위한 물류에 대해서는 미흡한 부분이 있다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 구호 물류에서 중요한 역할을 수행하는 물류 거점 위치 선정에 대한 연구를 수행하였다.

재난 물류에서의 거점은 기존의 물류 거점의 기능 외에도 피난민 수용, 부상자 처치 등의 다양한 기능을 수행하여야 하며, 위치의 선정에 있어서도 거점의 신뢰도 및 주변 환경의 위험성을 고려하여야 한다. 따라서 재난물류 거점 문제는 기존의 물류 거점 문제와는 다르게 재해 발생 시의 거점의 신뢰도 및 거점이 수행할 다양한 기능의 배치에 대한 고려를 모두 포함하여야 한다.

본 연구에서는 재난 환경을 고려한 재난 물류의 거점 문제에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 혼합정수계획 모델을 적용하였고, 시나리오에 기반을 둔 시뮬레이션 실험을 통하여 모델의 성능과 환경에 따른 변화를 검증하였다.

### Key words

물류 거점, 재난 물류, 구호 업무, Mixed integer Programming

### 1. 서론

#### 가. 재해 현황

2000년대 들어, 세계적으로 자연 재해의 증가로 인한 피해가 크게 증가하였다. 이는 지구온난화와 같은 기후 변화로 인하여 자연재해의 빈도가 증가하였고, 지속적으로 증가한 도시화에 인하여 개별 재해로 인한 피해가 증가하였기 때문이다.

재해에 대해서 비교적 안전하다고 여겨진 우리나라도 매해 벌어지는 게릴라성 집중호우 및 태풍에 의한 피해를 받고 있으며, 경주 지진과 같은 재해 역시 벌어지기 시작하여, 재해 대비의 필요성이 점차 증가하고 있다.

이러한 재해에 대비하기 위한 재난 대응 시스템의 중요도가 크게 증가하였다. 재난

대응 시스템은 재난 대응에 필요한 물자 조달 및 관리, 다양한 참여기관 간의 조율, 재난 정보 및 피해정보의 관리 및 전달, 구호 물류의 관리 및 피해지역의 응급 복구 등을 모두 총괄하여야 한다. 그러나 현재의 대응 시스템은 구호 물류 관리 및 응급 복구와 같이 재난 현장 및 근접지역에서 수행되는 지원 활동에 대해서는 효율적인 관리를 수행하지 못하고 있다.

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.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 기존 연구에 대한 검토 결과를 다루고 있으며, 3장에서는 본 연구의 대상 문제 및 최적해 탐색을 위한 수리적 모형을 다루고 있다. 4장에서는 해당 문제의 풀이 방법을 소개하고, 5장에서는 실험을 통하여 이를 검증하였으며, 6장에서는 결론에 대해서 다루었다.

## 2. 문헌 조사

재난 물류를 위한 거점 선정 문제는 재난 물류 문제의 일부로서, 이전에도 다양한 연구가 수행되었다. B. Balcik과 B. M. Beamon(2007)의 연구에서는 거점과의 거리가 일정 거리 이하인 수요의 개수를 최대화하는 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. 노세연 외 2명(2013)은 재난 물류의 거점 선정에 고려되는 다양한 요소를 분류하고, 요소간의 비중을 AHP를 활용하여 도출하였다. Serhat Baskaya 외 2명(2017)은 거점 선정의 문제와 물자 비축량의 문제를 결합하여 문제를 풀

이하였다. 해당 연구는 거점 간의 물자 운송 및 외부 지원을 결합하여 보다 현실적인 문제에 근접한 모델을 다루었다. Jin Zhang(2013)외 2명의 연구는 스타이너 보트넥 모델에 기초하여 다양한 목적 함수를 동시에 고려하는 거점 연구를 시도하였다.

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. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 반영하여 미시적 관점에서의 물류 거점 선정 문제를 다룬다.

## 3. 문제 정의

본 연구에서 다루는 문제는 재난 현장의 구호 물류의 수행에 있어서 중요한 역할을 하는 물류 거점의 선정에 대한 문제이다.

재난 현장의 구호 물류는 피해 현장의 피해자들에게 구호 물자를 전달하고, 현장의 부상자들을 빠르게 돕는 것을 목표로 한다. 따라서 본 연구의 거점 선정 역시 물류의 목적과 같이 예상 수요 지점까지의 도달 시간을 최소화 하는 것을 목표로 한다.

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

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

해당 문제는 다음과 같은 가정을 가진다.

### ● 정책

■ 거점은 모든 할당 수요까지의 경로의 최저 신뢰도를 유지해야 한다.

■ 거점 설치에 들일 수 있는 예산은 한정되어 있다.

### ● 거점 위치

- 거점의 위치는 도로 네트워크의 노드 중 하나이다.
- 거점의 설치비용은 거점의 규모에 비례한다.
- 환경
  - 해당 환경의 도로 네트워크에 기반을 두어 거리를 계산한다.
  - 도로 네트워크는 노드와 아크로 이루어져 있으며, 노드는 지점, 아크는 지점간의 도로를 의미한다.
- 수요
  - 수요는 구호물류 수요와 피난민의 수요가 존재한다.
  - 재난 시나리오에 따라 각 지점에서 다른 수요가 발생한다.
  - 모든 수요는 반드시 하나의 거점에 할당되어야 한다.

#### 가. MIP 모델

위에서 언급한 가정에 따라 본 문제를 Mixed integer programming model로 나타내었다. 우선 본 모델링에서 사용한 결정 변수 및 파라미터는 다음 [표 1]과 같다.

표 1 결정변수 및 파라미터

결정 변수	
$y_{it}$	노드 i에 수요 유형 t를 위한 시설 규모(정수)
$m_{itd}$	노드 i의 거점에 유형 t인 수요 d가 할당되었는지의 여부( 0 or 1)
파라미터	
$B$	전체 예산의 한계
$I$	전체 노드의 집합
$T$	수요 유형의 집합
$D_t$	수요 유형 t에 속하는 수요의 집합
$C_t$	수요 유형 t를 위한 거점의 단위 규모당 설치비용
$A_t$	수요 유형 t를 위한 거점의 단위 규모당 감당 수요 수
$L_i$	노드 i에 설치 가능한 거점시설의 규모
$R$	최소 신뢰도

$r_{ij}$	노드 i, j간의 경로 신뢰도
$R_i$	노드 i의 거점 추가시 신뢰도
$D$	최대 거리
$d_{ij}$	노드 i, j간의 경로 거리
$W$	큰 수
$l_{itd}$	유형 t인 수요 d가 노드 i에 위치하는지의 여부( 0 or 1)
$a_{td}$	유형 t인 수요 d의 수요량

목적 함수는 예상 수요처까지의 소요시간에 직접적으로 영향을 끼치는 수요처까지의 거리 합계와 최대한도와와의 비율의 합과 할당되지 않은 수요의 개수를 최소화 하는 것을 목표로 하여 수식 (1)과 같은 목적함수를 작성하였다. 거리의 비율은 절대 1을 넘을 수 없으므로, 본 목적함수에서는 미할당 수요의 개수에 더 큰 비중을 두었다.

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

본 MIP모델은 다음의 제약을 가진다.

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

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

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

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

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

$$\sum_{d \in D_t} (m_{itd} a_{td}) \leq A_t y_{it} (\forall i, t) \quad \text{..... (7)}$$

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

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

거점 설치에 사용 가능한 예산의 한계를 수식 (2)로 나타내었다. 수식 (3)은 수요가 거점에 할당되었을 경우, 할당된 거점과 수요를 잇는 사이의 경로의 신뢰도는 일정 수치 이상이어야 한다는 제약이며, 수식

(4)는 거점을 설치한 곳의 신뢰도가 일정치 이상이 되어야 한다는 제약이다. 수식 (5)는 수요와 할당된 지점간의 거리가 일정 한도 이하여야 한다는 제약이다.

수식 (6)는 모든 수요는 반드시 하나의 거점에 할당되어야 한다는 제약이며, 수식 (7)과 수식 (8)은 수요는 거점이 할당된 노드에 할당되어야 하며, 할당 된 수요의 양은 해당 거점에서 감당 가능한 규모를 넘어서면 안 된다는 제약이다. 마지막으로 수식 (9)은 거점의 규모는 해당 노드의 한계를 넘어서지 않는다는 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. 연구 내용

본 연구에서 제안한 모델은 최저 신뢰도 및 예산 제약 등과 같은 다양한 정책적인 설정을 사용자가 설정해야 하며, 해당 설정의 변화에 따라 결과로 얻어지는 계획에 차이가 생기게 된다. 또한 본 모델에서는 다양한 수요에 대한 정보가 필요하므로, 재해의 특성을 반영하여 무작위로 수요를 발생시키고, 모델을 풀이하는 것을 반복하여 다양한 결과를 얻고, 이를 종합하여 각 재해 거점에 맞는 수요 거점과 규모를 선정하였다. 또한 다양한 신뢰도 및 예산 설정에 대한 점 역시 고려하여, 추가 예산 사용에 따른 전체 계획의 목적함수 변화 및 신뢰도 설정에 따른 추가 비용의 소모 등에 대해서도 연구를 수행하였다.

본 연구에서 고려한 재해는 다음 [표 2]와 같다.

표 2 본 연구에서 고려된 재해의 목록

재해	영향
홍수	환경 고정된 저지대의 경로 및

		노드의 신뢰도 대폭 감소
	수요	고정된 지점인 저지대 및 주변의 좁은 범위에서 수요 대량 발생
지진	환경	무작위 넓은 범위의 경로 및 노드의 신뢰도 대폭 감소
	수요	같은 범위 내에서 수요 대량 발생
산불	환경	고정된 산림 주변 경로 및 노드의 신뢰도 대폭 감소
	수요	고정된 산림 주변의 넓은 범위에서 수요 대량 발생
집중호우	환경	무작위 좁은 범위 및 이어진 저지대의 경로 및 노드의 신뢰도 감소
	수요	연결된 저지대에서 수요 대량 발생

#### 5. 시뮬레이션 실험

##### 가. 실험 세팅

본 연구에서는 서울시의 강남구 일부 지역에 기반을 두어 도로 네트워크를 작성하고, 해당 도로 네트워크를 사용하여 시뮬레이션 실험을 진행하였다. 해당 부분의 지도는 다음과 같으며, 도로 네트워크는 다음 [그림 1]과 같이 구성되었다.

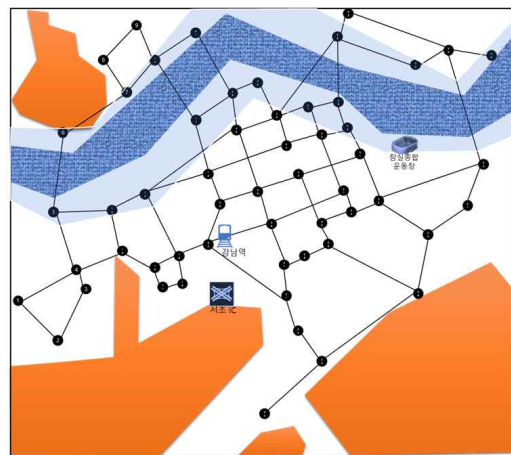


그림 1 실험을 위한 도로 네트워크

시뮬레이션 실험을 위한 비용 및 건물에 대한 세팅은 다음과 같이 설정하였다.

일반 구호물자 수요는 지역의 이재민이 하루에 사용할 물자를 모은 팩으로서, 본 연구에서는 최소 단위로 거점을 만들 경우, 400개의 물자를 비축한다고 설정하였으며, 해당 거점의 구축에는 총 5천만 원의 예산이 소요된다고 설정하였다.

피난민 수용을 위한 수요의 경우, 본 연구에서는 최소 단위로 거점에 관련 공간을 구축할 경우, 4인 가족 기준 20가구를 수용할 수 있는 공간을 확보할 수 있으며, 이를 위해서 총 2500만원이 예산이 소요된다고 설정하였다.

시뮬레이션 실험을 위한 수요의 무작위 생성은 다음과 같은 가정 하에 수행되었다. 우선 영향을 받은 지역에서 수요가 발생하는지의 여부를 확률에 따라 무작위로 결정한 후, 수요가 발생하였다면 발생한 수요의 양을 생성하였다. 해당 양은 해당 지역의 가구 수에 비례한다. 또한 영향을 받는 지역의 도로 및 거점후보 노드의 신뢰도도 기존 수치에서 가중치를 곱한 수치로 변화한다. 해당 수치는 다음 [표 3]과 같다.

표 3 재해에 따른 수요 및 신뢰도 변화

재해	발생 확률		수요량		신뢰도 가중치
	구호 수요	피난 수요	구호 수요	피난 수요	
홍수	0.7	0.35	0.005	0.001	0.5
지진	0.8	0.5	0.01	0.01	0.5
산불	0.5	0.5	0.005	0.002	0.3
집중 호우	0.3	0.2	0.001	0.0005	0.7

거점 및 주변 경로에 대한 신뢰도 역시 재해의 종류에 따라 변화도록 설정하였다.

실제 실험에서는 다음과 같은 정책 수치를

를 시험하였다. 예산의 경우, 50억과 70억의 두 세팅을 시험하였으며, 신뢰도 정책의 경우 최소 신뢰도를 0.3, 0.5, 0.7로 놓고 시험했다. 최소 거리는 4km이다.

#### 나. 실험 결과

재해에 따른 실험 결과는 다음 [표 4]와 같다.

표 4 재해 종류에 따른 실험 결과

재해	계산 시간	거리 비율	사용 예산	미할당 수요
홍수	3.09	0.51	57.9억	1.02
산불	0.17	0.36	40.0억	0.53
호우	0.21	0.12	21.1억	0.23
지진	97.03	0.35	46.5억	2.56

재해에 따라 다음과 같은 결과의 차이가 있었으며, 수요가 넓은 범위에서 다수 발생하는 홍수에서 거리의 비율이 높게 나타났고, 사용 예산 역시 가장 크게 나타났다. 수요의 양이 더 많이 발생하는 지진의 경우 가장 많은 미할당 수요의 수를 보였다. 반면 수요의 수가 적고 영향을 받는 범위의 수도 적은 산불이나 호우의 경우 적은 수량과 거리 비용을 보였다.

신뢰도에 정책에 따른 실험 결과는 다음 [표 5]와 같다.

표 5 신뢰도 하한에 따른 실험 결과

신뢰 하한	계산 시간	거리 비율	사용 예산	미할당 수요
0.3	21.04	0.161	42.5억	0.34
0.5	22.04	0.293	42.6억	0.69
0.7	22.29	0.467	42.4억	0.75

신뢰도 하한이 높아질수록, 계산에 걸리는 시간과 사용한 예산에는 큰 변화가 없었다. 반면 거리의 비율 및 미할당 수요의 수에는 큰 변화가 있어, 하한이 높아질수록 거리의 비율이 증가하고, 미할당 수요의 수가 늘어나는 모습을 보여 점차 성능이 좋지

못한 모습을 보인다.

[표 6]은 예산 상한에 따른 실험 결과의 변화이다.

표 6 예산 상한에 대한 실험 결과

예산 상한	계산 시간	거리 비율	사용 예산	미할당 수요
50.0억	18.73	0.34	38.0억	0.86
70.0억	17	0.28	47.0억	0.56

예산이 늘어날수록 사용 예산을 제외한 다른 수치는 크게 개선된 모습을 보인다.

한 환경 당 100회의 실험 결과 얻어진 실험 결과, 각 재해 및 수요 별로 높은 빈도로 거점이 설치된 위치는 다음 [표 7]과 같다. 실제 거점의 설치 시에는 각 재해의 발생 빈도를 고려하여 표의 결과를 조합한 거점 배치를 수행할 것이다.

표 7 구호 거점의 위치결과

재해	구호 수요	피난 수요
홍수	6,13,42,52,53	5,8,9,11,51,53
산불	20,21,22,23,28	12,14,21,22,25,27
호우	30,33,41,42,48	29,39,33,34,36
지진	22,23,27,28,44	2,4,5,13,12,15,

## 6. 결론

본 연구에서는 재난 물류를 위한 거점 선정에 대한 문제를 다루었다. 해당 문제는 재난 발생에 따른 환경의 변화를 고려하여 물류 거점의 위치 및 규모를 선정하는 문제이다.

본 연구에서는 해당 문제의 풀이를 위하여 MIP모형을 작성하고, 해당 모형을 사용하여 문제를 풀이하였다. 해당 모형의 복잡도는 낮은 편으로서, 빠른 시간 안에 풀이가 가능하다. 본 연구에서는 해당 모형을 다양한 예산 제약 및 신뢰도 정책에 적용하고, 그에 따른 변화에 대해서 알아보았다. 해당 실험의 결과 모형은 좋은 성과를 보였다.

본 모형은 재해의 종류에 따라 수요를 효

과적으로 감당할 수 있는 거점을 선정하는데 집중하였다. 본 모형은 수요 발생 추세에 대한 예측 정보가 필요하며, 사전에 설치된 거점에만 의존한다는 한계 역시 존재한다. 이 외에도 제안한 MIP 모형의 계산 시간이 문제의 크기가 커졌을 경우, 얼마나 늘어날지에 대한 고려도 필요하다.

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

## 사사

본 연구는 지식경제부/한국연구재단 중견연구자 연구 지원 사업(NRF-2015R1D1A3A01020750)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] Balcik, B., & Beamon, B. M. (2008). Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics*, 11(2), 101-121.
- [2] Roh, S. Y., Jang, H. M., & Han, C. H. (2013). Warehouse location decision factors in humanitarian relief logistics. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 29(1), 103-120.
- [3] Baskaya, S., Ertem, M. A., & Duran, S. (2017). Pre-positioning of relief items in humanitarian logistics considering lateral transshipment opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 57, 50-60.
- [4] Zhang, J., Dong, M., & Chen, F. F. (2013). A bottleneck Steiner tree based multi-objective location model and intelligent optimization of emergency logistics systems.

Robotics and Computer-Integrated  
Manufacturing, 29(3), 48-55.