

재난 취약도 지수를 고려한 재난 대응 드론 거점 입지 선정

Designing a Drone Delivery Network for Disaster Response Considering Regional Disaster Vulnerability Index

임옥경¹ · 송상화^{2*}

CJ대한통운¹, 인천대학교²

요약

전세계적으로 재난은 발생 규모와 피해액이 증가하고 있으며, 재난 대응을 위한 물류 활동의 중요성이 높아지고 있다. 재난 대응을 위한 물류 네트워크는 재난으로부터 상대적으로 안전한 지역에 물류 거점을 설치하고 재난 발생 지역으로 구호물자 및 긴급 의약품을 안정적으로 공급할 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 재난 대응을 위한 구호물자 배송 네트워크 설계를 위해 재난 취약성을 최소화시키는 드론 배송 거점 입지 선정에 대해 연구를 진행하였다. 드론을 통한 구호품 수송을 위해 드론의 최대 배송 가능 거리를 고려하고, 자연재해 취약도 지수를 활용하여 재난 취약도를 최소화 시키는 드론 배송 거점 입지를 선정하는 최적화 모델을 도출하였다. 분석 결과 재난 취약도를 최소화하기 위한 배송 거점 투자는 재난 대응을 위한 거점이 증가하지만, 이를 통해 재난 취약도를 완화하여 상대적으로 안전하고 효과적으로 드론 배송을 활용한 재난 대응 물류 체계 운영이 가능할 것으로 분석되었다.

■ 중심어 : 네트워크 설계, 물류, 최적화, 드론배송, 재난 취약도

Abstract

The scale and cost of disasters are increasing globally, emphasizing the importance of logistics activities in disaster response. A disaster response logistics system must place logistics hub centers in regions relatively safe from disasters and ensure the stable supply of relief goods and emergency medicines to the affected areas. Therefore, this study focuses on locating drone delivery centers that minimize disaster vulnerability when designing a disaster response delivery network. To facilitate the transport of relief supplies via drones, the maximum delivery range of drones is considered and we employed a natural disaster vulnerability index to develop optimization models for selecting drone delivery center locations that minimize disaster vulnerability. The analysis indicates that while the optimization models to minimize disaster vulnerability increase the number of hub investments, these approaches mitigate disaster vulnerability and allows the safe and effective operation of a disaster response logistics system utilizing drone deliveries.

■ Keyword : Network Design, Logistics, Optimization, Drone Delivery, Disaster Vulnerability

2024년 05월 28일 접수; 2024년 06월 17일 수정본 접수; 2024년 06월 24일 게재 확정.

* 본 연구는 2017년 인천대학교에서 지원된 연구비로 수행되었음

† 교신저자 (songsh@inu.ac.kr)

I. 서론

CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) 자료에 따르면 2021년 전세계적으로 발생한 재난 건수는 432건으로 2001년부터 2020년까지 연 평균 재난 발생 건수 357건보다 높은 수준을 기록하였고, 재난으로 인한 피해액은 약 2,520억 달러 수준이었다. 국내의 경우에도 자연 재난이 증가하고 있는데, 대표적으로 지진의 경우 2009년부터 2015년까지 연평균 약 57회 발생하였으나 2016년 252회, 2017년 223회로 발생 빈도가 급증하였다.

재난 발생은 시기와 장소가 불확실하기 때문에 언제 구호품 수요가 발생할지 예측이 불가능하고, 구호품이 적시에 수요지로 공급되지 못하면 피해가 지속적으로 누적된다는 특성이 있다 [1]. 또한, 재난 발생시 구호품을 전달하기 위한 물류활동은 재난 대응을 위한 총 비용 중 최대 80%까지 소요되어 재난 대응을 위한 물류활동에서 효율성이 요구된다. 하지만, 재난이 발생한 경우 물류 활동을 수행하기 위한 인프라가 파괴되는 경우도 발생하여 재난 현장까지의 접근이 어려운 경우도 발생한다 [2].

최근 이러한 상황에 대응하기 위한 방법으로 재난 현장에서 드론(Drone)의 활용이 주목받기 시작하였다. 재난 상황에서 드론은 현장 모니터링과 의약품 및 긴급 구호품 배송 수단으로 활용될 수 있다. 대표적으로 2018년 태풍 솔릭 발생시 ‘재난대응 드론긴급운영팀’이 운영되어 재난 정보를 수집하고 상황판단을 지원한 사례가 있으며, 전남 신안군에서는 도서지역으로 의약품을 수송하기 위한 ‘메디컬 드론’을 시연하였다. 또한, 정부에서는 ‘드론산업 발전 기본계획’을 통해 드론 활용 유망분야 중 하나로 재난 감시 및 대응을 제시하고, 드론을 실종자 수색, 긴급 구호품 수송 등에 활용할 것을 발표하였다.

산업계 및 학계에서도 재난 상황에서 드론을

현장에 적용하기 위한 연구가 시작되고 있다. 하지만 국내의 드론 관련 연구는 물류 분야에서 활용하기 위한 연구 [3], 해외 사례 분석 [4], 재난 드론 활용 방안 제시 [5,6] 등에 관한 연구가 진행되었다. 하지만 재난 상황을 고려한 드론 거점 위치 선정 및 네트워크 구성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 국내를 대상으로 자연 재난 발생시 의약품이나 긴급 구호물자 수송을 위한 드론 배송 거점의 입지 선정에 대해 연구하고자 한다. 특히, 재난 발생시에는 관련 인프라가 파괴될 수 있다는 한계점이 존재하므로 거점 위치 선정시 재난 취약성을 고려하고자 하며, 링크 단절시에도 구호품을 전달할 수 있는 수단인 드론을 활용한 배송에 대해 연구하고자 한다. 이를 위해 고려한 사항으로 재난으로 인해 피해를 입을 수 있는 위험 지역(공업단지, 상업지역 등) 및 시설(도로, 지하도, 교량 등)이 집중적으로 위치한 경우 재난에 취약하다고 평가할 수 있다. 국립재난안전연구원에서는 재난 유형별 취약 지역 및 시설을 고려하여 시군구의 재난 취약 등급을 발표한 바 있다. 본 연구에서는 국립재난안전연구원의 자료 중 자연재난의 시군구별 취약 등급 지수를 고려하여 재난 대응을 위한 드론 배송 거점 입지를 선정하고자 한다.

II. 문헌연구

2.1 재난 대응 물류 관련 연구

재난 발생은 예측이 어렵고, 발생 시 구호품에 대한 수요가 급증하여 대응이 어렵다는 특성이 있다. 또한, 재난 대응을 위한 비용 중 최대 80%가 구호품 공급을 위한 물류비용에 소요되므로 재난 대응시에는 효율적인 물류 관리가 중요하다 [2]. 재난상황에서 효율적 물류 관리를 위해 재난대응 네트워크 설계 시 고려해야 할

요인에 관한 연구, 재난대응 네트워크 설계 관련 연구가 다수 진행되었으며, 국내의 재난대응 체계 효율화를 위한 연구도 진행되었다.

재난 발생시에는 운송 관련 인프라가 파괴되므로 구호물자 운송시 비효율성이 극도로 증가할 수 있다. 이에 따라 재난 대응을 위한 네트워크를 효율적으로 설계하기 위해 고려해야 할 요인에 대한 연구가 진행되었다. 먼저 Kovács & Spens (2009)는 재난대응을 위한 네트워크 설계시 사용 가능 물류 인프라의 안정성을 고려해야 하며, 운송 계획 수립시 병목현상에 대해 필수적으로 고려하여야 함을 언급하였다 [7]. Roh et al.(2013)은 재난 물류의 거점 선정시 고려해야 할 요소를 입지, 물류, 국가 안정성, 비용, 협력으로 구분하여 AHP 분석을 실시하였다 [8]. 분석 결과 정치적 요인과 물류 편의성을 우선적으로 고려해야 함을 제시하였다.

또한, 재난 상황에서 입지선정에 관한 연구는 구호활동의 효율성을 좌우할 수 있어 구호 거점의 위치와 구호 거점별 수요지 및 구호물자 이송 거리에 대한 충분한 계획이 필요하다 [9,10]. 이에 따라 재난 대응을 위한 네트워크 설계도 연구되었다. Jia et al.(2007)은 구호 거점 선정을 위해 수요량을 최대로 커버할 수 있는 모델, 수요량으로 가중 평균된 거리를 최소화하는 모델, 최대 운송 거리를 최소화시키는 모델을 각각 수리모형화 하였다 [9]. Balcik & Beamon(2008)의 연구에서는 예산 제약과 거점 시설의 용량 제약을 바탕으로 구호물자를 비축한 물류 거점과 가까운 수요 지역을 최대화하는 수요 할당 모델을 제시하였다 [1].

Lin et al.(2012)은 재난 발생 즉시 의약품 및 생필품의 공급이 중요함을 지적하고, 지진 발생 후 구호물자 공급을 위한 임시거점의 입지 선정 방법으로 2단계 발전적 알고리즘을 제시하였다 [11]. 한수민, 정한일, 박진우 (2018)는 재난대응을 위해 거점 및 링크 인근에 사면이나 교량, 보,

저지대가 있는지 여부를 고려하여 각 노드와 링크의 신뢰도를 계산하여 재난 거점 입지 선정시 최소 신뢰도 이상을 충족하는 연구를 진행하였다. 재난 대응을 위해 구호 거점 선정시 미할당 수요와 수요지까지의 거리를 최소화시키는 문제를 수리모형화하고, 예산 제약, 노드와 아크의 신뢰도 제약, 공급지와 수요지간 거리 제약, 공급지와 수요지가 연결된 경우 구호물자를 전달할 수 있음을 고려하여 입지 선정 문제를 해결하였다 [12].

국내의 재난 대응 체계 효율화를 위한 연구도 진행되었다. 이정화·김동진(2012)에서는 현행 구호 물류체계인 지자체의 구호 활동과 및 파주·함양 물류센터에서의 원거리 조달 체계를 자체 구호활동과 인근 지자체의 근거리 조달을 결합한 체계로 개선하는 방안을 제시하였다 [13]. 옥영식, 박미리, 전재준 (2017)에서는 국내의 재난 대응 및 구호활동이 비효율적이고 대응 능력이 부족함을 제시하고, 이를 개선하기 해외 사례를 검토하여 재난대응 거점기지 구축방안과 민간 협력 네트워크 방안에 대하여 제시하였다 [14]. 분석 결과, 재난 대응을 위한 거점은 재난 피해 발생률과 위험성이 큰 지자체와 물리적으로 가까우면서 재난의 피해 영향 범위에서 벗어난 곳으로 선정되어 물자 비축과 재난 발생시 효율적인 분배 기능을 담당할 수 있어야 한다.

2.2 드론 배송 거점 관련 연구

IT 기술 발달에 따라 군사용으로 개발되었던 드론은 농업용, 여가용, 서비스용 드론 등 다양한 형태로 개발되어 산업군에 테스트 및 적용되고 있다. 이에 따라 물류 및 재난 분야의 드론 관련 연구가 시작되고 있다.

물류 분야에서 드론을 적용하기 위한 연구로 임진우·정호상(2016)은 물류 사각지대 해소를 위해 드론을 활용하는 방법으로 배송 차량을 활

용하여 최종 배송지와 가까운 육지까지 이동 후 드론으로 물품을 배송하는 트럭-드론 모드, 정기선에서 드론을 활용하여 도서지역으로 물품을 배송하는 정기선-드론모드, 드론 직접 배송 모드를 제시하였다 [3]. 제시된 모드 중 트럭-드론모드가 효율적일 것으로 분석되었는데, 이 모드는 운영편의성, 확장성 부분에서 다른 모드보다 선호도가 높은 것으로 나타났다. 드론 직접 배송 모형은 실현가능성 및 운영 편의성은 높으나 확장성이 제한적인 것으로 분석되었다. Shavarani et al.(2018)은 최근 드론이 교통 체증 증가와 운송 수요 증가에 대한 유망한 대응책으로 제시됨을 언급하고, 드론 배송 시스템의 총비용 최소화를 위한 연구를 진행하였다 [15]. 본 연구에서는 드론 배송 거점 위치와 충전소의 최적 입지를 선정하기 위해 MIP 모형을 설계하였는데, 드론의 최대 배송거리, 배송비용, 재충전 비용, 드론 구매비용 등을 고려하였으며, 유전자 알고리즘을 적용하여 문제를 해결하였다.

재난 상황에 드론의 유용성을 검증한 연구로 백석기(2017)는 해외에서 재난분야에 드론이 적용되거나 재난용 드론으로 개발된 사례를 분석하였다 [4]. 재난 발생 시 실시간 상세정보 파악 및 초기 대응이 중요하나, 화재나 테러, 원전사고, 건물 붕괴 등에는 구조대원의 현장 접근이 어려워 드론이 재난상황에서 활용도가 높음을 언급하였다. 조한광, 강휘진, 양옥희 (2017)에서는 재난 발생 시 초기 대응단계에 25kg 이하인 소형 드론을 활용하기 위한 방안을 제시하였다 [6]. 하지만 국내의 경우 비행금지구역 및 제한구역 관련 규제, 교육정책 및 적용분야 연구 미흡, 재난별 적용 가능 드론의 구분 및 연구 부족 등의 문제로 관련 규제의 완화, 재난 관련자의 드론 운영기술 교육 등이 필요함을 언급하였다. 양혜진·김동현(2018)은 산악 지역, 해양 지역, 고층 건물 등 재난 발생 지역에서 해당 지역 정보를 취득하고 구조자 탐색 및 발견에 소방용

드론을 활용하는 방안에 대해 연구하였다 [5]. 연구 결과 소방용 드론을 활용하는 경우 기존 방식의 화재 진압 및 구조, 구급 대응 대비 최대 5배 이상 빠른 시간 안에 대응할 수 있다는 결과를 제시하였다.

재난 상황에서 드론으로 구호품을 수송하기 위한 연구로 Scott & Scott(2017)은 의료용품 전달을 위해 드론을 활용하는 방안에 대해 연구하였다 [16]. 본 연구에서는 중앙 의료 거점으로부터 드론 거점까지 차량이 의료용품을 수송하고, 드론 거점부터 수요지까지는 드론으로 의약품을 배송하는 네트워크 형태를 고려하였다. 효율적인 배송 네트워크 설계를 위해 배송 시간을 최소화하는 모델과 최대 배송시간을 최소화하는 두가지 모형을 설계하였다. Walia et al.(2018)은 탄자니아에서 백신 및 의료용품 전달할 때 트럭과 드론을 혼용하는 경우의 비용을 시뮬레이션 하였다 [18]. 본 연구에서 고려한 네트워크는 중앙 거점으로부터 드론 거점까지는 트럭을 통해 수송하고, 드론 거점부터 수요지까지 드론을 활용하는 형태로, 거점별 배송 비용을 시뮬레이션하여 드론 배송 거점을 선정하였다.

2.3 본 연구의 차별성

재난은 발생 빈도 및 규모가 불확실하여 재난 대응 활동이 어렵다는 특성이 있다. 이에 따라 재난에 효율적으로 대응하기 위해 재난과 관련한 다양한 연구가 진행되었다. 특히, 재난 대응 물류활동을 위해 고려해야 할 사항으로 인프라의 안정성, 물류 편의성 등이 제시되었다[7,8]. 또한, 재난 대응을 위한 입지 선정 시 이송 거리에 대한 고려가 필요하며 [9,10], 입지의 신뢰도가 일정 수준 이상을 충족하는 입지 선정에 대해서도 연구가 진행되었다 [12].

최근 IT 기술 발전에 따라 드론이 재난 현장에 활용되기 시작하였다. 드론은 재난 전 예방

및 조기감지용으로 활용 가능하며, 재난시 경감 모니터링 및 의사 결정 지원 역할을 수행할 수 있다. 재난 발생 후에는 신속한 진단 및 복구용으로 드론 활용이 가능하다. 이에 따라 재난이나 긴급 상황에 드론을 활용하기 위해 해외 사례 분석, 재난 드론 활용 방안 연구가 진행되었다 [4-6].

재난 상황을 고려한 드론 거점 위치 선정 및 네트워크 구성에 관한 연구에서는 1회 발생시에도 관련 인프라를 모두 파괴할 수 있다는 특성이 있어 입지 선정시 해당 지역의 재난 취약성이 고려되어야 한다. 재난 상황에 대비하기 위해서 재난 발생건수, 사망자수, 피해액 외에도 관련 인프라 정보 등을 고려할 필요가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 효율적인 재난 대응을 위해 재난 취약성을 고려한 재난 대응 드론 거점 입지 선정에 대해 연구하였다. 특히, 재난 통계자료 외에도 시군구의 관련 인프라 자료를 고려하여 제시하는 국립재난안전연구원의 ‘재난 유형별 시군구 취약 등급’을 고려하여 재난 대응을 위한 드론 배송 거점 입지를 선정하는 방법론을 제시하였다. 해당 지표는 발생건수, 사망자수, 부상자수, 재산피해액 뿐 아니라, 지역 및 위치 특성, 인프라 정보 등을 바탕으로 자연재해, 사회재난, 안전사고에 대해 국내 시군구의 재난 유형별 시군구 취약 등급을 제시한다. 재난 관련 정량적 지표와 드론 배송 네트워크 설계를 연계함으로써 보다 객관적인 재난 대응을 위한 드론 배송 네트워크 구축이 가능할 것으로 기대된다.

총 비용을 최소화시키는 거점 입지 선정에 대해 연구되었고, 설치되는 물류 거점 수 및 물류 거점과 수요 지역간 거리를 최소화하는 목적함수를 활용하였다. 하지만, 재난 상황에 대비하기 위해서는 재난에 취약한 인프라 정보를 고려할 필요가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 재난 취약성을 고려하기 위해 국립재난안전연구원의 ‘재난 유형별 시군구 취약 등급’을 활용하고자 한다. 재난 유형별 시군구 취약등급은 자연재해, 사회재난, 안전사고에 대해 시·도 및 시·군·구를 대상으로 재난 취약 시설 정보 및 통계자료를 이용하여 재난별 취약 등급을 1~5단계로 구분한다. 등급 중 5단계인 경우 상대적으로 발생 가능성 및 재난에 따른 피해액이 높아 위험성이 높은 재난이다. 본 연구에서는 재난 유형별 시군구 취약 등급 중 재난 발생에 대한 예측이 거의 불가능한 자연재해 취약성을 최소화시키는 구호품 배송 거점을 선정하고자 한다.

〈표 1〉 재난 등급 분류표

재난 등급	구분		
	자연재난	사회재난	안전사고
5	풍수해, 지진	화재, 미세먼지	-
4	가뭄, 폭염	시설물 붕괴, 교통사고 등	범죄
3	황사, 산지재해, 조류	폭발, 철도사고 등	승강기사고, 안전 취약계층 사고 등
2	-	산불, 수질오염 등	전기·가스사고

III. 연구 모형 설계

3.1 연구 문제 설명

기존의 재난 관련 입지 선정 연구에서는 대부분 재난 발생시 비용 최소화 관점에서 접근하여

재난 유형별 시군구 취약 등급으로부터 자연재해 지역안전도를 측정하기 위하여 자연재해에 해당하는 풍수해, 지진, 가뭄, 폭염, 황사, 산지재해, 조류의 7개 항목에 대해 각각의 지역별 점수를 합산한 점수를 자연재해 취약도 지수로 정의하고, 이를 최적화의 목적함수에 반영한다.

표 2는 각 항목별 재난 등급을 바탕으로 재난 취약도 지수를 산정하는 예시를 보여주고 있다. 표에서 각 자연재난 유형별 5등급은 해당 지역이 취약하다는 의미이며, 각각의 자연재난별 취약등급을 합산한 합계값이 높을수록 자연재해에 더 취약하다는 것을 나타낸다.

〈표 2〉 재난 취약도 지수 예시

재난	지역 (시도/시군구)		
	의정부	파주	울산 남구
풍수해	2	5	4
지진	3	4	5
가뭄	2	4	5
폭염	2	4	4
황사	2	4	5
산지재해	2	3	5
조류	1	4	5
합계	14	28	33

재난 발생 시 도로 단절이나 유실로 인해 수요지까지의 접근이 어려운 경우도 발생한다. 최근 이러한 상황에 대비하기 위해 드론을 활용하여 구호물품이나 의약품을 배송하기 위한 테스트가 진행되고 있으며, 관련 계획이 검토 중이다. 최근 드론이 재난 및 물류 현장에 모니터링 및 배송 기능을 담당하는 사례가 증가하고 있는

〈표 3〉 배송 드론 제원표

회사	운송 중량	최대 속도	운행 범위	운송 지역	운송 물품
Matter-net	2kg	70km/h	20km	아이티, 도미니카 공화국, 스위스 등	의약품, 혈액
DHL	3kg	70km/h 이상	60km	독일, 탄자니아	의약품, 혈액
Zipline	1.8kg	128km/h	80km	르완다	백신, 혈액
Flirtey	2kg	80km/h	32km	미국 버지니아, 네바다	의약품, 심장 제세동기

며, 실제로 의약품이나 구호물자 배송 테스트에 활용된 드론 제원은 표 3과 같다.

본 연구에서는 링크 단절에 대비하여 구호품 및 의약품을 드론으로 배송하기 위한 배송 거점 설계를 연구하고자 한다. 드론의 경우 배터리로 이동하기 때문에 운행 범위에 대한 제약이 가진다. 이에 따라 본 연구에서는 재난 취약성을 최소화하는 입지 선정시 공급 가능 거리를 드론의 최대 공급 가능 거리로 제한하고자 한다.

이에 따라 본 연구에서는 재난 취약성을 최소화하는 드론 배송 거점의 입지 선정에 대해 다음과 같은 연구 문제를 정의하고자 한다. 첫째, 재난 대응을 위한 구호품 및 의약품 배송 거점에서 드론을 활용하기 위해서 드론 거점의 위치를 선정하고자 한다. 드론의 경우 최대 공급 가능 거리가 제한되어 있으므로 기존 사례에서 제시되었던 배송 가능 거리인 60km부터 최대 100km까지 공급이 가능할 때, 드론 배송 거점의 입지를 선정하고자 한다. 둘째, 드론 배송 거점이 위치하는 시·군·구의 재난 취약성을 최소화하는 드론 배송 거점 입지를 선정하고자 한다. 이 경우 첫 번째 연구문제에 따른 배송 거점의 위치와 총 배송거리를 살펴보고, 취약성을 고려하는 경우 그렇지 않은 경우보다 추가적으로 소요되는 비용에 대해 비교하고자 한다.

3.2 수리적 모델 설계

3.1에서 제시한 연구문제 해결을 위해 3가지 모델을 구성하여 각 결과를 비교하고자 한다. 기본적인 수리적 모델은 거점입지 선정에 널리 활용되는 시설 입지 선정 모델(Facility Location Problem)을 활용한다. 시설 입지 선정 모델은 후보 지역별 거점 설치 여부와 거점이 설치된 지역과 수요 지역을 연결하는지 여부를 확인하는 변수로 최적화 모델을 구성한다. 연구 모델 구성을 위한 인덱스 및 변수는 표 4와 같다.

〈표 4〉 변수 정의

변수	정의
I	지역 집합
y_i	지역 i 에 구호물자 배송 거점을 오픈할 것인지 여부
x_{ij}	지역 i 의 배송 거점에서 지역 j 로 공급할지 여부
$MaxD$	드론의 최대 공급 가능 거리
D_{ij}	지역 i 와 지역 j 간 거리
N	최대 배송 거점의 수
V_i	지역 i 의 재난 취약도 지수

3.2.1 모델 1: 드론 배송 거점 최소화

모델 1은 드론 거점 수를 최소화하는 모형으로, 드론의 최대 배송 거리를 제약사항으로 하여 드론 배송 거점 입지를 선정하고자 한다. 이 모델은 드론 배송 거점 투자를 최소화하는 것을 목표로 한다. 모델 1의 목적식 및 제약식은 다음과 같다.

$$Minimize \sum_{i \in I} y_i \tag{1}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in I \tag{2}$$

$$x_{ij} \leq y_i, \quad \forall i, j \in I \tag{3}$$

$$D_{ij} x_{ij} \leq MaxD, \quad \forall i, j \in I \tag{4}$$

$$x_{ij}, y_i \in \{1, 0\}, \quad \forall i, j \in I \tag{5}$$

식 (1)은 모델 1의 목적식으로, 드론 배송 거점을 최소화하는 것을 의미한다. 식 (2)는 각각의 수요지에 배송거점이 1곳 배치되어야 한다는 것을 제약한다. 식(3)은 배송거점이 설치된 지역에서만 수요지로 구호품을 공급할 수 있다는 제약이다. 식 (4)는 설치된 배송 거점과 수요지까지의 거리가 드론의 최대 공급 가능 거리를 초

과할 수 없다는 제약이다. 식 (5)은 의사결정변수는 이진변수라는 제약이다.

3.2.2 모델 2: 재난 취약성을 최소화하는 드론 배송 거점 선정

모델 2는 설치되는 드론 배송 거점의 재난 취약성을 최소화하는 모형으로, 모델 1과 같이 드론의 최대 배송 거리를 제약하는 모델이다. 모델 2의 목적식은 다음과 같다.

$$Minimize \sum_{i \in I} V_i y_i \tag{6}$$

식 (6)은 배송 거점이 위치하는 지역의 재난 취약성을 최소화하는 모델이다. 모델 2는 모델 1의 목적식을 식 (6)과 같이 수정하고, 제약식은 모델 1과 동일하게 구성한다. 모델 2는 드론 배송 거점 수에 각 지역별 재난 취약성을 가중곱셈하여 목적함수를 반영하기 때문에 모델 1에 비해 설치되는 거점 수가 다소 증가할 수 있으나, 전체 재난 취약도 지수는 감소한다. 재난 취약도가 높은 지역에 거점을 설치하지 않음으로 인해 각 드론 배송 거점이 담당하는 권역에 변화가 있고, 이는 곧 추가적인 거점 투자가 필요함을 의미한다.

3.2.3 모델 3: 재난 취약성 및 배송 거리를 최소화하는 드론 배송 거점 선정

모델 3은 드론 배송 거점 선정 시 재난 취약성을 최소화할 뿐 아니라 드론 거점에서 수요지까지의 배송 거리를 최소화하는 모델이다. 모델 3의 목적식은 다음과 같다.

$$Minimize \sum_{i \in I} V_i y_i + \alpha \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} x_{ij} \tag{7}$$

식 (8)은 배송 거점이 위치하는 지역의 재난 취약성을 최소화하고, 배송 거점에서 수요지까지의 거리의 합을 최소화하는 모델이다. 모델 3

은 모델 1의 목적식을 식 (7)과 같이 수정하고, 제약식은 모델 1과 동일하게 구성한다. 기본적으로 재난 취약도 지수에는 큰 차이가 없으면서도 드론 배송 거리를 최소화하여 재난 취약성과 배송 거리 사이의 균형을 조절할 수 있다. 재난 취약성을 우선적으로 최소화하고, 재난 취약성이 유사한 수준에서 드론 배송 거리를 최소화하기 위하여 α 값은 0.1로 설정하여 취약도 지수 대비 드론 배송 거리에 의한 효과를 상대적으로 낮게 설정하고자 한다.

IV. 컴퓨터 실험설계 및 분석

4.1 실험 데이터 및 시나리오 구성

본 연구에서는 전국 시·군·구를 대상으로 재난 대응 드론 거점의 입지를 선정하고자 한다. 이를 위해 전국 228개 시·군·구청 소재지의 위·경도 좌표를 수집하여 드론 배송 거점 후보지 및 수요발생지로 가정하였다. 수요량은 국가 통계의 지역별 인구를 활용하였다.

드론의 최대 공급가능 거리는 DHL과 Zipline의 드론 운행 범위를 고려하여 60km 이상 배송이 가능하다고 가정하였으며, 실험에는 60~100km 범위에서 10km씩을 증가시키며 실험하였다.

4.2 실험 결과 분석

표 5는 모델별 최적 드론 배송 거점 수를 보여주고 있다. 모델 1은 설치되는 드론 배송 거점 수를 최소화하는 것이 목적이므로 드론 배송 거리 제약이 동일할 경우 모델 1의 드론 배송 거점 수가 최소화된다. 반면 모델 2와 모델 3은 재난 취약성을 우선적으로 반영하고 있어 설치되는 드론 배송 거점의 수가 동일하다.

모델 2와 모델 3의 드론 거점 설치 개수는 동일하지만, 모델별로 거점의 재난 취약 정도를

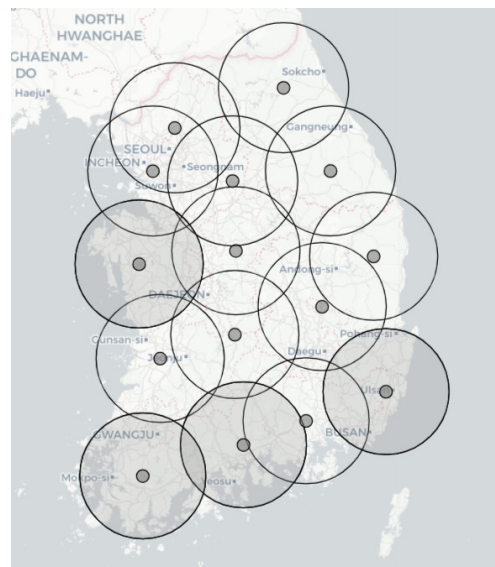
〈표 5〉 모델별 최적 드론 배송 거점 수

최대 배송 거리	60km	70km	80km	90km	100km
모델 1	17	13	12	10	8
모델 2	20	16	13	12	9
모델 3	20	16	13	12	9

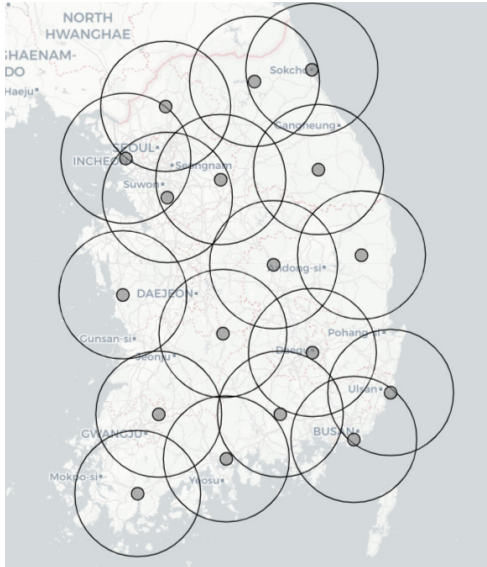
살펴보면 모델 2에서 재난 취약도 지수 합계가 제일 낮은 것을 확인할 수 있다. 모델 2 결과에서 모델 1에 비해 거점 개수가 큰 차이가 나지 않음에도 취약성을 최대 40%까지 감소시킬 수 있었다. 이는 재난 대응을 위한 배송 거점 선정에 취약성을 고려한 경우 예측이 불가능한 재난 상황에 선제적으로 대응할 수 있음을 나타낸다.

〈표 6〉 모델별 재난 취약도 지수 합계

최대 배송 거리	60km	70km	80km	90km	100km
모델 1	334	273	241	189	123
모델 2	271	183	145	123	104
모델 3	306	223	185	155	142



〈그림 1〉 모델1 최적해 예시 (배송거리 60km 제약, 15개 거점 설치)



〈그림 2〉 모델2 최적해 예시
(배송거리 60km 제약, 18개 거점 설치)

동일한 드론 배송 거리 제약 하에서 모델 1과 모델 2의 최적해를 비교해보면, 그림 1에서 회색 음영으로 표시된 4개의 드론 배송 권역은 전체 15개 드론 배송 거점 중 재난 취약도 지수가 가장 높은 상위 4개의 지역을 보여주고 있으며 주로 해안과 상대적으로 가까운 지역에 위치하고 있다. 모델 2에서는 재난 취약도 지수가 높은 4개의 지역이 재난 취약도 지수가 낮은 지역으로 대체되면서 드론 배송 거점이 15개에서 18개로 3개 증가하는 모습을 보여주고 있다. 드론 배송 거점은 3개 증가하였지만, 재난 취약도 지수는 표 6에 나와 있는 것처럼 334에서 271로 감소하는 것을 보여준다.

재난 취약성을 완화하기 위하여 추가로 거점을 설치하게 될 경우 운영비용이 증가하여야 한다는 점을 고려하여 모델 3에서는 재난 취약도 지수에 더해 드론 배송 거리의 합을 동시에 최소화하는 목적함수를 도입하였다. 표 7과 표 8에 나온 바와 같이 모델 3은 모델 1과 모델 2에 비해 드론 배송 평균 거리와 배송 거리 합계가 가장 낮은 것으로 나타났다. 모델 2와 모델 3을

〈표 7〉 모델별 평균 드론 배송 거리

최대 배송 거리	60km	70km	80km	90km	100km
모델 1	36.86	39.48	50.13	54.48	56.44
모델 2	34.39	37.17	39.27	47.86	53.49
모델 3	25.08	28.95	33.26	34.52	42.70

〈표 8〉 모델별 드론 배송 거리 합계

최대 배송 거리	60km	70km	80km	90km	100km
모델 1	7,778	8,489	10,828	11,877	12,417
모델 2	7,152	7,881	8,442	10,337	11,715
모델 3	5,216	6,138	7,151	7,457	9,351

비교할 경우 설치되는 드론 배송 거점의 수는 동일하지만, 재난 취약도 지수와 드론 배송 거리에서 차이가 있다.

모델 3에서 α 값을 조정할 경우 재난 취약도 지수와 설치되는 거점 수, 드론 배송 거리를 조절할 수 있다. 모델3에서 α 값을 0으로 설정할 경우 모델 3의 목적함수는 모델 2와 동일하게 재난 취약성을 최소화하는 모델이 되어 모델 3의 재난 취약성 지수 합계는 모델 2와 동일하고 드론 배송 거리 역시 모델 2와 동일하게 결정된다. 반면, 모델 3의 α 값을 1로 설정할 경우 재난 취약성 지수는 매우 작은 비중이 되어 무시되고, 재난 취약성과 상관없이 전체 드론 배송거리를 최소화하는 모델이 되어 재난 취약성 지수는 모델 1 보다 증가하는 반면 드론 배송 거리는 모델 3보다 더 증가하게 된다. 실제 현장에서 활용할 경우 α 값을 0부터 1까지 0.1과 같이 일정 단위로 증가하며 변화시켜 드론배송거리와 재난 취약성 지수간 절충되는 수준에서 결과를 도출하는 것이 추천된다.

V. 결론

최근 재난은 발생 규모가 커지고 있고, 이에 따른 피해액도 증가하고 있다. 국내의 경우에도

지진 발생 빈도가 증가하고 있어 재난 대응에 대한 노력이 필요하다. 또한, 재난 발생시 관련 인프라가 파괴될 수 있어 재난 대응을 위한 물류 활동의 어려움이 가중된다. 이에 따라 재난 취약성 및 지역 안전도 관련 지표가 제시되어 취약 부분에 대한 관리가 진행되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 재난 대응을 위한 구호물자 배송 네트워크 설계를 위해 재난 취약성을 최소화시키는 드론 배송 거점 입지 선정에 대해 연구를 진행하였다. 재난 관련 통계지표 및 관련 인프라를 고려하여 제시되는 국립재난안전연구원의 ‘재난 유형별 시군구 취약 등급’을 활용하여 재난 취약도 지수를 산정하고, 이를 바탕으로 재난 발생시 드론을 활용한 구호품 및 긴급 의약품의 배송 거점 입지를 선정하는 최적화 모형 도출에 활용하였다. 최적화 모형은 드론 배송 거점 수 최소화, 재난 취약도 최소화, 드론 배송 이동 거리 최소화로 구성된다.

본 연구에서는 재난 대응 물류 역량을 증대시키기 위한 방안으로 재난 취약성을 최소화하는 재난 대응 드론 거점 입지 선정에 대해 분석하였다. 재난 취약도 지수는 지역별로 큰 편차를 보이며, 이로 인해 드론 배송 거점의 입지를 선정할 때 이러한 지역별 취약성을 충분히 고려해야 한다. 재난 발생 시 상대적으로 안전한 지역에 드론 배송 거점을 설치함으로써 효율적인 재난 대응이 가능하도록 하고, 물류 체계의 신뢰성을 높이기 위해서는 취약도 지수의 변화를 반영하는 입지 선정이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 다양한 지역의 재난 취약성을 면밀히 분석하고, 이를 토대로 드론 거점 입지를 최적화함으로써 재난 상황에서의 물류 대응 능력을 강화하는데 활용 가능한 3개의 드론 배송 거점 입지 선정 모델을 제시하였다. 각각의 입지 선정 모델은 목적함수에서 차이가 있으며, 재난 취약도와 드론 배송 이동 거리를 복합적으로 활용한 모델 3에서 목적함수 간 가

중치를 조정하는 파라미터를 활용하여 재난 취약도 지수 최소화와 드론 배송 거리 최소화 사이의 적절한 균형을 잡는 것이 가능하다.

컴퓨터 실험 결과를 살펴보면 재난 취약도 지수를 고려할 경우 드론 배송 거점 수가 증가하지만, 재난 취약도가 감소하여 보다 안전한 재난 대응 물류 네트워크 운영이 가능하며, 재난 취약도 지수와 드론 배송 거리를 적절히 조절할 경우 보다 효율적인 재난 대응이 가능하다는 결과를 보여주고 있다.

드론 배송은 지역별 자연재해 발생 여부와 상관없이 공중으로 필요한 물품을 신속하게 공급 가능한 장점이 있지만, 드론 배송 거점 자체가 재난에 영향을 받을 경우 운영이 어렵다는 점을 고려할 때 재난 취약도 지수를 반영한 드론 배송 네트워크 설계는 보다 안전하고 효과적인 재난대응 물류 시스템 운영에 도움이 될 것으로 예상된다. 향후 연구에서는 재난 대응 수요를 보다 세분화하고 불확실성을 고려한 재난 대응 물류 네트워크 구성에 관한 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] B. Balcik and B. M. Beamon, "Facility location in humanitarian relief", *International Journal of Logistics*, Vol.11, No.2, 101-121, 2008.
- [2] L. N. Van Wassenhove, "Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear", *Journal of the Operational research Society*, Vol.57, No.5, 475-489, 2006.
- [3] J.W. Lim and H.S. Jeong, "An exploratory study on drone-based logistics services for resolving logistics blind spots", *Journal of Korea SCM Society*, Vol.16, No.2, 23-33, 2016.
- [4] S.K. Baik, "A Study on the Utilization of Drones

- in Disaster Fields”, Korean Maritime Police Association Conference, 2017.
- [5] H.J. Yang and D.H. Kim, “A study on the use of drones in disaster areas”, Korea Disaster Information Society Conference, 2018.
- [6] H.G. Cho, H.J. Kang and O.H. Yang, “A study on the improvement of problems in disaster management using drones”, Journal of Korean Society for Disaster Prevention and Safety, Vol.10, 67-74, 2017.
- [7] G. Kovács and K. Spens, “Identifying challenges in humanitarian logistics”, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol.39, No.6, 506-528, 2009.
- [8] S. Y. Roh, H. M. Jang and C. H. Han, “Warehouse location decision factors in humanitarian relief logistics”, The Asian Journal of Shipping and Logistics, Vol.29, No.1, 103-120, 2013.
- [9] H. Jia, F. Ordóñez and M. Dessouky, “A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies”, IIE transactions, Vol.39, No.1, 41-55, 2007.
- [10] C. G., Rawls and M. A. Turnquist, “Pre-positioning of emergency supplies for disaster response”, Transportation research part B: Methodological, Vol.44, No.4, 521-534, 2010.
- [11] Y. H. Lin, R. Batta, P. A. Rogerson, A. Blatt and M. Flanigan, “Location of temporary depots to facilitate relief operations after an earthquake”, Socio-Economic Planning Sciences, Vol. 46, No.2, 112-123, 2012.
- [12] S.M. Han, H.I. Jeong and J.W. Park, “A study on a relief logistics base plan for mitigation of damage caused by natural disasters”, Journal of the Korean Electronic Transaction Association, Vol.23, No.3, 51-64, 2018.
- [13] J.H. Lee and D.J. Kim, “A study on domestic natural disaster logistics system improvement plan-Focused on the case of Typhoon Gonpas”, Korea Logistics Review, Vol.20, No.2, 75-92, 2012.
- [14] Y.S. Ok, M.R. Park and J.J. Jeon, “A study on establishing a base for disaster response through overseas cases”, Journal of the Korean Society of Industrial Academia and Technology, Vol.18, No.11, 668-675, 2017.
- [15] S. M. Shavarani, M. G. Nejad, F. Rismanchian and G. Izbirak, “Application of hierarchical facility location problem for optimization of a drone delivery system: a case study of Amazon prime air in the city of San Francisco”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.95, No.9-12, 3141-3153, 2018.
- [16] J. Scott and C. Scott, “Drone delivery models for healthcare”, Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences, 3297-3304, 2017.
- [17] S. S. Walia, K. U. S. Somarathna, R. Hendricks, A. Jackson and N. Nagarur, “Optimizing the Emergency Delivery of Medical Supplies with Unmanned Aircraft Vehicles”, Proceedings of the 2018 IISE Annual Conference, 1588-1593, 2018.

저자 소개



임 옥 경(OkKyung Lim)

- 2014년 2월 : 인천대학교 무역학과 (무역학사)
- 2019년 2월 : 인천대학교 동북이물류대학원 물류시스템학과(물류학박사)
- 2019년 2월~현재 : CJ대한

통운 비즈니스솔루션그룹 책임연구원
<관심분야> 네트워크 최적화, 물류신기술



송 상 화 (SangHwa Song)

- 1997년 2월 : KAIST 산업공학과 (공학사)
- 2003년 8월 : KAIST 산업공학과 (공학박사)
- 2003년 8월~2006 2월 : 한국 IBM 시니어 컨설턴트

· 2006년 3월~현재 : 인천대학교 동북이물류대학원 교수
<관심분야> 물류 최적화, SCM