

재난 현장의 구호 자원 운송 차량 경로에 관한 연구*

한수민¹ · 정한일^{2†} · 김기동³ · 박진우¹

¹서울대학교 산업공학과, ²대전대학교 컴퓨터공학과, ³강원대학교 시스템경영공학과

A Research on the Vehicle Routing Problem in the Disaster Scene

Sumin Han¹ · Hanil Jeong^{2†} · Kidong Kim³ · Jinwoo Park¹

¹Industrial Engineering, Seoul National University

²Computer Engineering, Daejeon University

³System and Management Engineering, Kangwon National University

■ Abstract ■

In 2000s, incidence of natural disaster is increasing continuously. Therefore, the necessity of research on the effective disaster response is emphasized.

Korea is not safe from natural disaster. Natural disasters like torrential downpours, typhoons have occurred more frequently than before. In addition disasters like droughts and MERS has also occurred. Therefore, needs for effective systems and algorithms to respond disaster are increased.

This study covers the vehicle routing problem for effective logistics in disaster situations caused by natural disasters. The emergency vehicle route problem has different property from the general vehicle route problem. It has the property of the importance of deadline, the uncertain and dynamic demand information, and the uncertainty in information transfer. In this study, a solution that focused on the importance of deadline.

In this study, the heuristic solution using the genetic algorithm are suggested. Finally the simulation experiment which reflects the actual environment are conducted to verify the performance of the solution.

Keywords : Emergency Logistics, Disaster Response, Genetic Algorithm

논문접수일 : 2016년 01월 08일 논문게재확정일 : 2016년 02월 11일

논문수정일 : 2016년 01월 28일

* 이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호 NRF-2015R1D1A3A01020750).

† 교신저자, hijeong@dju.kr

1. 서 론

2000년대 들어 자연 재해로 인한 인명 피해 및 재산 피해가 발생하는 빈도가 늘어나고, 그 강도가 점차 심해지고 있다. 이는 지구 온난화 등으로 대표되는 기후의 변화, 도시화에 따른 환경의 변화, 인구 밀집도의 변화 등에 의한 결과로 해석되고 있다. 대표적인 최근의 대형 자연 재해로는 2011년 일본의 동북 대지진에 의한 쓰나미(tsunami)를 예로 들 수 있다. 재난역학연구센터(Centre for Research on the Epidemiology of Disasters)에 따르면, 2010년 한 해 동안 373건의 자연 재해로 296,800명이 넘는 사람이 사망하였고, 거의 2억 8백만 명이 심각한 타격을 받았으며, 약 110억 달러에 달하는 경제적 손실이 발생한 것으로 나타났고[7], 또한 점진적으로 피해의 규모가 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 더욱 심각한 것은 잘 계획되지 못한 도시화, 환경 악화, 기후 변화 등에 의해 보다 많은 재난이 발생할 것으로 예측되고 있다는 것이다[23].

우리나라 역시 자연 재해로 인해 많은 피해가 발생하고 있으며 기후 변화 등도 지적되고 있어, 이러한 자연 재해를 포함한 재난에 관하여 더 이상 안전지대가 아닌 것으로 인식되고 있다. 매년 여름에 발생하는 태풍으로 인한 피해는 계속되고 있으며, 집중 호우로 인한 피해 역시 지속적으로 나타나고 있다. 2014년의 동남권 집중호우로 인한 부산의 마비는 해당 사례의 대표적인 예이다. 이웃나라 일본에 비하면 낮은 빈도이나 지진 역시 그 발생 빈도가 점차 늘어나는 추세로서 이 역시 무시할 수 없는 수준이다. 따라서 대한민국 역시 기상변화에 기인한 집중호우 및 홍수, 지질학적 위치에 의한 지진, 쓰나미 등의 자연 재해 및 인적·사회적 재해에 대한 인식 및 이에 대한 대비의 필요성이 커지고 있는 실정이다[1, 2].

재난 대응을 위해서는 구조/지원 조직 구성, 접근성 확보, 구호 자원(구호 물품, 구조 대원, 의료팀 등) 확보 및 운송/수송, 피해지역 관리, 피해지역 복구 등의 다양하고도 중요한 활동들이 필요하다[11]. 그

중에서도 재난 영향권 지역에 갇힌 피해자들에게 생명유지 및 기본적 생활을 위해 필요한 구호 자원(구호 물품, 구조대원, 의료팀 등)을 효과적이고 효율적으로 제공할 수 있도록 지원하는 시스템은 재난 등에 의한 비상사태 관리를 위해 반드시 다루어져야 하는 중요한 활동이다[9, 16].

재난 등에 의한 비상사태에서의 구호 자원 등의 물류에 대한 문제는 비상물류(Emergency Logistics) 문제에 속하며, 효과적/효율적인 비상물류를 위해서는 다양한 수송 능력을 가진 다수의 구호 차량에 대하여 구호 요청 지역(다수의 지점으로 구성) 배정, 우선순위 지정, 경로계획 수립 등의 운영 문제 해결이 요구되며, 나아가 이들 운영 문제 해결에 사용될 정보의 불확실성 해결이 요구된다.

본 연구진은 (a)구호 요청 지역이 정의된 단일 구호 차량에 대한 차량 경로계획 문제 해법 제시, (b) 구호 차량을 에이전트로 하는 분산 아키텍처 기반 해법 제시의 과정을 통하여 지역 배정, 우선순위 지정, 정보의 불확실성 등의 문제를 해결하고자 한다. 그 첫 번째 과정으로 본 연구에서는 단일 구호 차량을 대상으로 비상물류를 위한 차량 경로계획 해법을 제시하고자 한다.

이후 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서 관련 문헌 조사 결과를, 제 3장에서는 재난 상황에서의 차량 경로계획 문제의 특징 및 유전 알고리즘을 적용한 메타 휴리스틱 알고리즘을 제시하며, 알고리즘 검증을 위한 실험계획 및 실험 결과를 제 4장에서 제시한다. 마지막으로 제 5장에서 결론 및 추후 연구 방향에 대하여 소개한다.

2. 기존 연구

본 연구와 관련이 있는 연구로 일반적인 차량 경로계획 문제에 관한 연구와 재난 상황을 바탕으로 한 차량 경로계획 문제에 관한 연구를 들 수 있다.

차량 경로계획 문제(Vehicle Routing Problem, VRP)는 차량의 최적 경로를 계산하는 문제로서 1950년대부터 연구되어 왔던 문제이다. 해당 문제

는 차량의 이동거리 및 이동에 소요되는 시간을 최소화하기 위한 경로를 도출하고자 하는 문제로서, 시간이 지남에 따라 현실의 다양한 제약을 반영한 다양한 변형 경로계획 문제가 제시되었다.

가장 간단하며 많이 연구된 변형문제는 용량제약을 가진 차량 경로계획 문제(Capacitated Vehicle Routing Problem, CVRP)로서, 해당 문제는 수요를 만족시키기 위한 한정된 자원인 화물의 제약을 추가한 문제이다. 해당 문제는 현실적인 제약을 반영시키기 용이하여 많은 관심을 받아왔다. Lee[12]의 경우, ant colony optimization을 변형한 형태의 알고리즘을 적용하여 CVRP 문제를 풀이하였고, 이를 시뮬레이션 실험을 통하여 검증하였다. 또한 Ngueveu[15]의 경우, genetic algorithm을 변형한 memetic algorithm을 제안하고 이를 통해 문제의 풀이를 시도하였다. memetic 알고리즘은 genetic algorithm에 이웃 탐색 알고리즘을 더한 형태이며, 해당 연구에서는 알고리즘의 성능을 시뮬레이션 실험을 통하여 검증하였다.

일반 경로계획 문제에 상품을 인수하여 배달해야 하는 제약을 추가한 인수 및 배달을 고려한 차량 경로계획 문제(Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery, VRPPD) 역시 다양한 관심을 얻었다. Cristián[10]의 연구는 기존의 VRPPD에 상품을 인수한 차량이 반드시 통과해야 하는 노드가 존재하는 transfer 제약을 추가한 문제를 branch and cut 방식을 이용하여 풀이하였다. Subramanian[19]의 경우, 여러 지점을 동시에 고려하는 이웃 탐색 알고리즘을 제시하였고, 이를 시뮬레이션 실험을 통해서 검증하였다.

차량의 경로에 도착할 수 있는 시간의 제약을 더한 문제로는 시간제약을 가진 차량 경로계획 문제(Vehicle Routing Problem with Time Window)가 존재한다. 해당 문제는 각 노드에 방문 가능한 시간대가 존재하여, 해당 시간대 외에는 노드에 방문이 불가능하거나 추가 패널티를 받는 형태의 문제이다. 해당 문제를 다룬 연구는 매우 다양하다. Azi[5]의 경우, Branch and price 기법과 column gen-

eration을 활용해 최적해를 도출하는 알고리즘을 제시하였다. Nagata[14]의 경우, edge assembly crossover를 도입한 hybrid Genetic algorithm를 사용한 연구를 수행하였고, 시뮬레이션 실험을 통해 이의 효율을 증명하였다. Lai Mingyong[13]의 경우, time window와 pickup and delivery 제약을 모두 포함한 문제를 Genetic Algorithm을 통하여 풀이하였고, 해당 실험의 결과물을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

재난 상황에서의 차량 경로계획 문제를 다룬 연구도 다수 존재한다. Cao 등이 수행한 연구는 지진이 발생했을 경우의 경로계획에 관한 연구이다. 이들의 연구에서는 지리정보시스템에서 얻어진 도로의 안전도를 평가하여 경로계획의 총 안전도를 목적함수에 포함시키고, 시간, 거리, 안전도의 세 목적함수를 동시에 고려하는 형태의 경로계획을 제안하였다[6].

Parragh 등이 수행한 연구는 Dial-a-ride 문제에 관한 연구로서, 해당 연구는 직접적으로 수요가 발생한 후, 최대한 빠른 시간 안에 해당 수요를 만족시키는 것에 집중한 연구로 재난상황에서도 충분히 활용할 수 있을 것으로 보인다. 이들의 연구는 2단계로 구성된 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다[17].

Yue 등은 구급차의 서비스 수준을 높이기 위하여, 구급차의 출발지가 여러 곳이 존재하는 상황에서 구급차 배치 문제에 관한 연구를 수행하였다. 이들은 탐욕 알고리즘의 성격을 가진 휴리스틱을 활용하였다[22].

Ren-Zezhu와 Zhang-Yu는 fuzzy cluster analysis와 fisher discrimination을 이용하는 차량계획에 대해서 연구하였다. fuzzy cluster analysis를 통해 재난 지역을 분류하고, fisher discrimination을 이용하여 새로운 재난 지역을 분류하여 차량계획을 세우고, 의료 물자 및 의료 인력을 분배하는 문제에 대한 해법을 제안하였다[18].

Ozdamar 등은 재난 상황에서의 물류계획에 대한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 구호 자원을 운송하는 차량이 구호 자원을 전달한 후, 해당

지역에서 대기하며 투어를 만들지 않는 모델을 구축하였다[16].

Chang 등의 연구는 대만의 실제 행정지역 구분을 이용하여 3단계의 구호 조직을 구성하고, 중간 물류센터에 자원을 할당하는 모델을 구성하였다. 구호 자원의 수요가 확률적으로 정해지는 상황을 가정하고, 실제 타이베이의 지형 데이터를 기반으로 홍수가 발생했을 경우의 피해 정도와 구호 자원의 수요를 생성하여 모델의 성능을 시험하였다[8].

Yi와 Ozdamar의 연구에서는 재난 지역에서의 구호 자원을 분배하고, 재난 지역의 부상자를 외부로 수송하는 재난 물류문제에 대해서 다루었다. 이들은 이스탄불의 지형데이터, 도로 데이터를 기반으로 하여 지진을 가정하고, 모델을 적용하여 그 성능을 검증하였다[21].

이와 유사하게 Yi와 Kumar의 연구에서는 Ant Colony Optimization을 기반으로 하여, 각 차량의 최적 경로를 찾는 알고리즘을 제시함으로써 유사한 결과를 얻는데 소요되는 탐색시간을 크게 줄였다[20].

본 연구에서 다루고자 하는, 재난 상황에서 구호 자원을 수송하는, 즉 비상물류를 위한 구호 차량의 경로계획 문제는 다음 절에서 상세히 설명된 ‘재방문 허용’ 및 ‘방문 기한 준수’라는 2가지 측면에서 기존 연구와 차이점을 보이고 있어, 이를 고려한 해법의 개발이 필요하다.

3. 비상물류를 위한 구호 차량 경로 계획 문제의 특징 및 해법

3.1 비상물류를 위한 구호 차량 경로계획 문제의 특징

비상물류를 위한 구호 차량의 경로계획 문제는 큰 범주에서 볼 때 일반적인 차량 경로계획 문제의 한 유형으로 볼 수 있으나, 재난 상황에서의 불확실성으로 기존의 기업 물류 문제에 불확실성을 더한 형태로 풀이되기도 한다. 그러나 구호 차량 경로계획

문제는 불확실성 외에도 여러 면에서 차이가 있다. 수요 측면에서 볼 때, 재난 구호 요청에 의한 수요는 매우 빠른 빈도로 발생하며, 수요의 긴급한 정도 및 필요로 하는 자원의 양의 편차가 매우 큰 경향이 있다. 따라서 한 번의 방문으로는 특정 지점의 수요를 만족시키지 못해 여러 번 방문해야 하는 경우도 존재하므로 일반적인 차량 경로계획 문제와는 달리 재방문을 고려해야 하는 특성이 있다.

또한 구호 차량 경로계획 문제에서는 구호 요청 지점의 ‘방문 기한 준수’는 반드시 지켜야 하는 제약에 해당되는데, 재난에 의한 피해 발생의 경우 골든타임이 지나고 난 후의 의료팀 도착은 무용지물이 되기 때문이다. 앞 절에서 설명한 바와 같이, 이와 유사한 연구로 특정 지점에 방문이 가능한 ‘시간제약을 가진 차량 경로계획 문제’에 관한 연구들 있으며, 위배된 방문 기한 값에 페널티를 부과하고 이들의 합을 최소화하는 방법을 적용하고 있다. 그러나 재난 구호 요청의 경우 방문 기한이 위배될 경우 효과가 전혀 없다는 조건을 고려할 때 전체적으로 방문 기한이 위배되는 구호 요청 수를 최소화(또는 방문 기한을 준수하는 구호 요청 수의 최대화)를 추구해야 하는 특성이 있다.

따라서 ‘재방문 허용’ 및 ‘방문 기한 준수’ 등의 특성을 반영한 차량 경로계획 문제에 대한 해법이 필요하다. 먼저 최적해를 제시할 수 있는 수리모형에 대하여 검토하고자 하며, 수리모형 개발을 위한 문제의 세부적 정의에 대하여 설명하고자 한다.

연구 대상인 재난 지역은 구호를 요청하는 지점과 구호 자원을 보관하고 있는 구호 거점으로 구성되는데, 편의상 이들 지점을 노드로 연결 도로는 아크로 하는 네트워크로 나타냈다. 구호 요청은 긴급 구호 요청과 일반 구호 요청의 2가지가 존재하는 것으로 가정하고, 각 구호 요청별로 한 유형의 구호 자원을 필요로 하는 것으로 하며(수요량은 임의로 할당), 모든 구호 요청에는 각기 방문 기한이 지정된다.

이러한 상황에서 1대의 구호 차량으로 노드(구호 거점 및 구호 요청 지점)를 방문하여 접수된 구

호 요청 중 방문 기한을 충족하는 수를 최대로 하는 경로계획을 수립하여야 한다. 차량은 노드 사이의 이동과 자원의 적재 및 분배에 시간을 소비하며, 본 연구에서는 자원의 적재와 분배에 드는 시간이 같다고 가정하였다.

이를 위한 수리모형은 식 (1)~식 (21)과 같으며, 관련 변수 및 파라미터는 <표 1>에 제시되었다.

$$Max \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} d_{dk} \quad (1)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} x_{nn'}^i \leq 1 (\forall i) \quad (2)$$

$$s_n = \sum_{n \in N} x_{nn}^1 (\forall n) \quad (3)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{i \in I} f_n^i = 1 \quad (4)$$

$$x_{nn}^i = 0 (\forall n, i) \quad (5)$$

$$\sum_{n^* \in N} x_{n^*n}^i = e_n^{i+1} + \sum_{n' \in N} x_{nn'}^{i+1} (\forall n, i) \quad (6)$$

$$t^1 = 0 \quad (7)$$

$$t^{i+1} = t^i + \sum_{n \in N} \sum_{n' \in N} t_{nn'}^i x_{nn'}^i \quad (8)$$

$$+ R \sum_{k \in K} (z_k^i + \sum_{d \in D} y_{dk}^i) (\forall i) \quad (9)$$

$$g_k^1 = g_k^0 (\forall k) \quad (10)$$

$$g_k^{i+1} = g_k^i + \sum_{d \in D} y_{dk}^i + z_k^i (\forall i, k) \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} g_k^i \leq C (\forall i) \quad (12)$$

$$y_{dk}^i \leq M \sum_{n^* \in N} (l_{dkn^*} \sum_{n \in N} x_{n^*n}^i) (\forall i, k, d) \quad (13)$$

$$z_k^i \leq M \sum_{n^* \in N} (f_{n^*} \sum_{n \in N} x_{n^*n}^i) (\forall i, k) \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I y_{dk}^i = a_{dk} (\forall k, d) \quad (15)$$

$$\sum_{d \in D} y_{dk}^i \leq g_k^i (\forall i, k) \quad (16)$$

$$c_{d,k}^i = \begin{cases} 1: t^i < t_{dk} \\ 0: t^i \geq t_{dk} \end{cases} (\forall i, d, k) \quad (17)$$

$$p_{dk}^i \leq y_{dk}^i (\forall d, k, i) \quad (18)$$

$$p_{dk}^i \leq M \times c_{d,k}^i (\forall d, k, i) \quad (19)$$

$$d_{dk} = \begin{cases} 1: \sum_{i \in I} p_{dk}^i = a_{dk} \\ 0: \sum_{i \in I} p_{dk}^i < a_{dk} \end{cases} (\forall d, k) \quad (20)$$

<표 1> 수리모형 관련 변수 및 파라미터

결정 변수	기호	상세 설명		
	$x_{nn'}^i$	차량의 i번째 이동이 노드 n에서 n'으로 이동하는 것인지의 여부		
	y_{dk}^i	차량이 i번째 이동의 출발지에서 수요 d를 만족시키기 위해 사용한 유형 k의 자원 양		
	z_k^i	차량이 i번째 이동의 출발지에서 보급 받은 유형 k의 자원 양		
기타 변수	기호	상세 설명	기호	상세 설명
	$c_{d,k}^i$	i번째 이동의 출발지에서 사용하는 자원이 유형 k의 수요 d의 기한을 초과했는지의 여부	d_{dk}	유형 k의 수요 d가 기한 안에 만족되었는지의 여부(0 or 1)
	p_{dk}^i	i번째 이동에서 유형 k의 수요 d에 기한 안에 사용된 자원의 양	g_k^i	i번째 이동의 출발 시 보유한 유형 k의 양
	e_n^i	차량이 i번째 이동을 수행하지 않고, 노드 n에서 멈추는지의 여부(0 or 1)	t^i	i번째 이동에서 출발하는 시각
파라미터	기호	상세 설명		
	N	노드의 집합(n: 1~ N)		
	K	수요 유형의 집합(k: 1~ K)		
	R	수요 1단위를 적재하거나 분배하는데 걸리는 시간		
	s_n	노드 n의 차량의 출발지 여부(0 or 1)		
	t_{dk}	유형 k의 수요 d의 기한		
	l_{dkn}	유형 k의 수요 d가 노드 n에 위치하는지의 여부(0 or 1)		
	g_k^0	유형 k 자원의 초기 보유량		
C	차량의 최대 적재량			
i	계획의 순번을 나타내는 번호 (i: 1~ I)			
D_k	유형 k의 수요 집합(d: 1~ Dk)			
f_n	거점이 노드 n에 존재하는지의 여부			
$t_{nn'}$	노드 n에서부터 n'까지의 이동시간			
a_{dk}	유형 k 수요 d의 수요량			

$$0 \leq y_{i,k}^j (\forall i, k, d) \quad (20)$$

$$0 \leq z_k^i (\forall i, k) \quad (21)$$

식 (1)은 기한 내에 충족되는 구호 요청 수를 최대화 하는 목적함수를 나타낸다. 식 (2)~식 (6)은 차량의 이동에 관련된 제약으로, 식 (2)는 차량이 하나의 경로로만 움직이게 하는 제약을, (3)은 차량의 출발지 제약이다. 식 (4)는 차량의 종착지 제약이며, 식 (5)는 차량이 특정 지점에 머무르는 것을 막기 위한 제약이다. 그리고 식 (6)은 차량이 도착한 지점에서 멈추거나 출발하여 다음 지점으로 이동하도록 하는 제약을 나타낸다.

식 (7)과 식 (8)은 이동 경로상의 각 지점에서 출발하는 시각에 관련된 제약이다. 식 (7)은 차량이 이동 계획의 시작점에서 출발하는 시간을 0으로 맞추기 위한 제약이며, 식 (8)은 차량이 경로 계획상의 각 지점에서 출발하는 시각을 계산하기 위한 제약식이다.

식 (9)~식 (11)은 차량의 자원 보유량에 관련된 제약을 나타내는데, 식 (9)는 차량의 초기 자원 보유량에 관한 제약을, (10)은 차량의 자원 보유량, 사용량, 보급량 사이의 보존관계를, 그리고 식 (11)은 차량의 자원 보유량 상한에 관한 제약을 나타낸다.

식 (12)~식 (15)는 자원의 사용에 관련된 제약식이다. 식 (12)는 자원의 사용이 차량이 거쳐 가는 수요의 지점에서 발생하도록 하는 제약을, 식 (13)은 자원의 보급이 구호 거점에서만 이루어지도록 하는 제약을, 식 (14)는 자원의 사용량의 합이 필요 수요량을 모두 만족시키도록 하는 제약을, 그리고 식 (15)는 자원의 사용량이 해당 유형의 자원 보유량을 넘지 않도록 하는 제약을 나타낸다.

식 (16)~식 (19)은 구호 요청에 대한 방문 기한 준수에 관한 제약을 나타낸다. 식 (16)은 이동 경로상의 각 지점에서의 자원 분배 시점이 각 수요의 기한을 충족시키는 지에 관한 제약을, 식 (17)과 식 (18)은 기한 내에 유효하게 사용된 자원의 양 산출에 관한 제약을, 그리고 식 (19)는 유효하게 사용된 자원의 양이 구호 요청에 따른 수요량을 충족시키

는 지에 관한 제약을 나타낸다. 마지막으로 식 (20), 식 (21)은 변수 값의 비음 조건을 나타낸다.

제시된 수리모형에서 확인할 수 있듯이, 본 연구의 대상 문제는 NP-Hard인 일반적인 차량의 경로계획 문제에 구호 자원 수송 계획, 재방문 허용, 방문 기한 준수 등이 더해진 문제로, 역시 NP-Hard에 속하는 문제일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 실시간에 우수한 해를 구할 수 있는 해법을 개발하고자 하며, 다음 절에서 이를 다루고자 한다.

3.2 제안된 해법

앞 절에서 언급한 바와 같이, 구호 차량경로 문제는 NP-Hard 문제에 속하므로, 문제의 특성상 빠른 시간 내에 좋은 해를 구할 수 있는 해법이 필요하다. 차량 경로계획 문제를 다룬 연구에서는 주로 이웃 해법 탐색 기법을 발전시킨 타부 서치 알고리즘(Tabu Search Algorithm)과 메타 휴리스틱 기법 중 하나인 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)이 주로 활용되었으며, 본 연구에서는 유전 알고리즘을 활용한 해법을 개발하였다. 해법에 대한 설명은 해의 표현을 위한 염색체 정의 부분과 해법의 세부 과정으로 나누어 제시되었다.

3.2.1 염색체 정의 및 해석

앞 장의 수리모형에서 제시된 바와 같이 본 연구에서 다루는 구호 차량 경로계획 문제에는 차량의 이동 경로 외에 구호 요청에 대응하기 위한 구호 자원 수송이 포함되어 있으므로, 해의 표현을 위한 염색체를 통해 이 두 가지를 모두 반영하여야 한다. 이를 위한 방법으로 2가지를 고려할 수 있다.

첫 번째 방법은 염색체가 차량 이동 경로 및 구호 자원 수송량을 모두 포함하도록 그 구조를 정의하는 것이다. 구호 자원이 두 가지 유형인 경우의 예를 나타내면 <그림 1>의 (A)와 같다. (A)의 경우 노드 '91'과 '92'는 구호 거점을 나타내고, 원으로 표현된 숫자(40, 10, 40, 40 등)는 구호 거점에서의 자원별 적재량을 나타내며, 다른 노드와 해당

	2	91	5	1	92	7	6	R3	...	4	←노드 번호(수요지 또는 구호 거점)
(A)	30	40	0	50	40	30	20		...	25	←자원 종류1의 노드별 수송량/적재량
	20	10	20	10	40	20	20		...	25	←자원 종류2의 노드별 수송량/적재량

(B)	2	91	5	1	92	7	6	R3	...	4	→	2	5	1	7	6	...	4	

〈그림 1〉 탐색체 정의 및 해석

노드의 수량은 구호 요청 지점과 수요량을 나타낸다. 만약 두 유형의 구호 자원이 크기, 무게가 같고, 구호 차량에 합쳐서 총 80개만 적재가 가능하며, 노드 2로 출발할 때 유형 1과 2를 각각 40개씩 적재하고 있었다면 해(A)는 불가능한 해(Infeasible Solution)가 된다. 구호 거점 92에서 어떤 조합으로 적재를 하더라도 노드 7과 6에서 필요한 수요량을 충족시킬 수 없기 때문이다. 이 방법은 쉽게 이해할 수 있는 장점이 있지만, 교배 연산, 돌연변이 연산 등에서 해의 가능성 유지를 위한 추가 연산이 필요하다는 단점이 있고, 예에서 본 바와 같이 이동 경로에 따른 최적의 수송 계획을 별도로 수립할 수 없다는 단점이 있다.

두 번째 방법은 (B)의 왼쪽과 같이, 구호 차량의 이동 경로만 나타내도록 탐색체 구조를 정의하는 것이다. 탐색체로 표현된 해를 평가하거나 해석할 때, 각 노드에서의 수요량을 반영함으로써 해의 가능성을 높일 수 있다. 해 (A)의 경우, 처음 노드 2로 출발할 때 유형별 적재량이 (40, 40)이 아니고 (30, 50)이었다면, 구호 거점 91에서 (40, 10)의 수량을 적재하는 것은 노드 5와 1의 수요를 충족시킬 수 없어 불가능해가 된다. 그런데 (B)와 같이 나타내고 구호 거점 91에서의 적재량을 (50, 0)으로 해석하면 구호 거점 91에 의한 비가능성은 해소된다. 이와 같이 이 방법은 해의 가능성 해석을 위한 시간이 소요되는 단점이 있으나, 해의 가능성을 높일 수 있으며 최적의 적재 계획을 반영할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 두 번째 방법을 적용하여 탐색체를 정의하되 추가의 수정을 통하여 해의 가능성을 더 높이고자 한다. 본 연구에서는 (B)의 오른쪽과

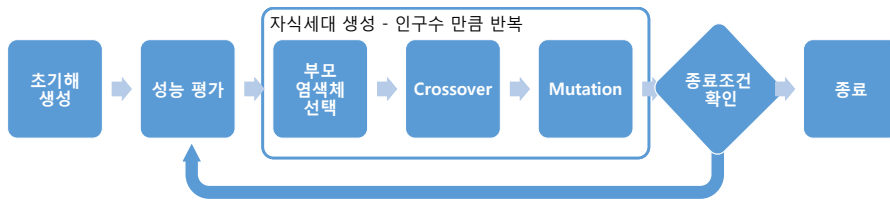
같은 형태로 탐색체를 정의한다. (B)의 왼쪽과의 차이점은 구호 자원 적재를 위한 ‘구호 거점’을 해에 나타내지 않는 것이며, 이를 통해 해의 가능성을 더 높일 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 (B)의 왼쪽 해는 노드 ‘92, 7, 6’에서의 적재량 및 수요량 관계로 불가능해가 되는데, (B)의 오른쪽에서는 화살표로 표시된 지점(노드 1 가기 전, 노드 7 가기 전, 노드 6 가기 전)에서 구호 거점을 방문하도록 해석함으로써 가능해가 된다.

즉, 구호 차량은 해에 나타난 노드 순서로 방문하면서 해당 노드에서 요구되는 구호 자원을 제공하며, 다음 노드로 가기 전에 구호 자원 보급을 위해 구호 거점을 방문하거나 다음 노드에 도착하여 현재 보유량을 제공하고 필요 시 구호 거점을 방문하는 방식을 반복하여 각 노드에 구호 자원을 제공한다. 그러므로 해에서는 특정 노드가 한 번만 나타나지만, 해당 노드의 구호 자원 요구량이 매우 클 경우, 구호 거점과 해당 노드를 여러 번 방문하는 중복 방문이 발생할 수 있다.

따라서 각 구호 차량은 하나의 이동 경로가 주어졌을 경우, 방문 기한을 만족하는 구호 요청의 수가 최대가 되도록 구호 자원을 제공할 수 있는 자원 분배 계획 문제를 풀어야 하는데, 이는 구호 거점 방문 시기와 방문 시점에서의 구호 자원별 보급량을 결정하는 문제가 된다.

3.2.2 제안된 해법의 세부 절차

제안된 해법의 전체적인 과정은 <그림 2>에 제시된 바와 같이 일반적인 유전 알고리즘 적용 과정과 동일하다. 세부적인 과정에 대한 설명은 다음과 같다.



<그림 2> 유전 알고리즘의 프로세스

• 초기해 생성

초기해 집단의 크기는 '500'으로 하였으며, 초기해 생성에 휴리스틱 기법(20%)과 무작위 기법(80%)을 함께 적용하였다. 휴리스틱 기법은 각 구호 요청에 대하여 방문 기한의 역수를 계산한 후 이들 합에 대한 각 역수의 비율을 각 구호 요청 선택 확률로 정의하고, 누적확률이 1이 되도록 정규화한 후 [0, 1] 범위의 난수를 이용해 노드의 방문 순서를 정하는 방법이다. 예를 들어, 노드 1, 2, 3,...에서 구호 요청이 있으며 이들의 방문 기한은 현재부터 각각 5시간, 10시간, 4시간이라 할 경우, 각 구호 요청의 정규화된 확률은 다음의 <그림 3>과 같은 과정으로 계산된다.

다음으로 생성한 난수가 '0.5, 0.8, 0.1, ...'라 가정할 경우 누적확률에서 각각이 속하는 구간을 찾는 (2, 3, 1,...)이 방문 순서가 된다. 동일 노드의 중복 방문은 허용되나 해당 노드 번호가 해에 한 번만 나타나야 하며, 동일한 해가 초기해 집단에 포함되지 않도록 한다.

• 해의 성능 평가 및 부모 염색체의 선택

앞 절에서 언급한 바와 같이, 구호 차량 경로를 나타내는 해에는 구호 자원 보급을 위해 방문해야 하는 구호 거점이 표현되지 않으므로 해의 평가 과정에서 이것이 반영되어야 한다.

해에 제시된 방문 경로를 따라 이동할 때 특정 노드에 도착하는 시각은 그 전에 구호 거점 방문 여부에 따라 달라지고 이에 따라 구호 방문 기한 충족 여부도 달라지므로, 각 구호 요청에 의한 구호 자원별 필요량에 따른 최적 적재계획을 바탕으로 시뮬레이션을 통해 구호 거점 방문 시점 및 각 지점의 구호 요청의 방문 기한 충족 여부 등을 파악하여야 한다.

해의 성능을 나타내는 적합도 함수(Fitness Function)를 아래와 같이 정의하고, 적합도 값에 비례하는 확률로 정의된 룰렛 휠(Roulette Wheel)을 통해 교배 연산을 위한 부모 염색체를 선택한다.

$$Fitness\ Value(i) = \frac{S(i)}{1 + U(i)} \quad (22)$$

여기서 i : 해(chromosome) i

$S(i)$: 한계시간이 충족된 구호요청 수

$U(i)$: 한계시간이 충족되지 못한 구호 요청 수

앞 절에서 설명한 바와 같이, 해 i 에 대한 $S(i)$ 및 $U(i)$ 값은 구호 차량이 언제 구호 거점을 방문할 것인지 그리고 방문 시점에 구호 자원 유형별 보급량을 얼마로 할 것인지에 따라 다르게 나타난다.

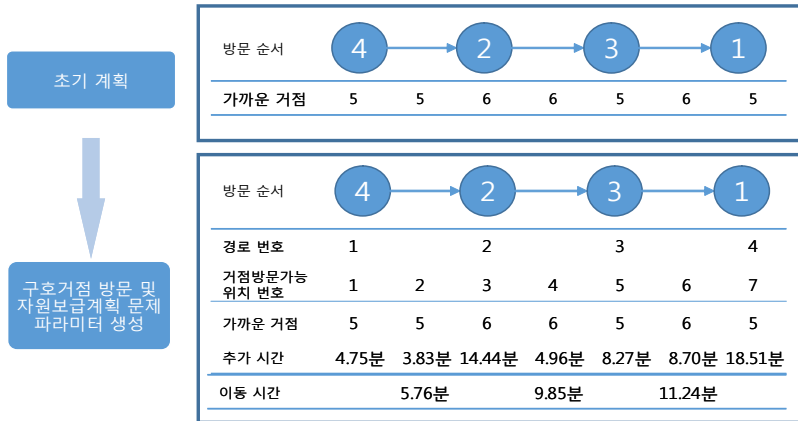
노드별 한계시간			역수	한계시간의 역수			정규화 [$\times \frac{1}{0.55}$]	노드별 확률		
1	2	3		1	2	3		1	2	3
5	10	4	→	0.2	0.1	0.25	→	0.364	0.182	0.454

<그림 3> 초기해 생성을 위한 휴리스틱 알고리즘 예시

구호 거점을 방문하는 형태는 특정 노드에서 구호 거점을 거친 후 다음 노드로 가는 형태와 특정 노드에서 해당 노드의 수요량을 충족시키지 못해 구호 거점을 다녀오는 형태의 2가지가 존재한다.

따라서 거점 방문 경로를 추가하여 계획을 완성시

키기 위해, 해 i 의 적합도 값을 $S(i)$ 를 최대로 할 수 있는 구호 거점 방문 및 자원 보급 계획 문제를 풀어야 한다. 당 문제는 기존의 경로 계획의 결과를 사용하여 도출한 파라미터를 사용하며, 해당 파라미터를 도출하기 위해 <그림 4>와 같은 과정을 거친다.



<그림 4> 구호 거점 방문 계획 문제를 위한 파라미터 생성

<표 2> 구호 거점 방문 및 자원 보급 계획 문제 모형을 위한 변수 및 파라미터

범주	기호	상세 설명
결정 변수	x_i	지점 i 에서 구호 자원 보급(구호 거점 방문) 횟수(정수)
	y_{ij}	지점 i 에서의 자원 유형 j 의 보급량(정수)
	v_{oj}	자원 유형 j 의 초기 보유량(정수)
기타 변수	v_{ij}	지점 i 를 떠날 때의 자원 유형 j 의 보유량
	a_n	노드 n 에 차량이 도착할 때의 시각
	s_{jk}	자원 유형 j 의 수요 k 가 기한을 지켰는지의 여부(0 or 1)
파라미터	n	거점 방문 계획의 추가 이전 경로에서 방문하는 노드 번호($1 \sim N $)
	i	거점 방문 경로를 추가 가능한 지점의 번호($1 \sim 2 N -1$) (방문 노드(n)과 방문 노드의 사이($n-1$)를 포함하여 $2 N -1$ 개)
	j	자원 유형의 번호
	k	개별 수요의 번호
	V	차량의 최대 적재량
	C	1단위의 자원 보급 및 사용 시 필요로 하는 시간
	$e_{n(n+1)}$	거점 방문 계획의 추가 이전 경로에서 노드 n 에서 출발하여 노드 $n+1$ 에 도착하기까지 걸리는 시간
	p_{jkn}	자원 유형 j 의 수요 k 가 노드 n 에 위치하는지의 여부(0 or 1)
	l_{jk}	자원 유형 j 의 수요 k 의 기한
	t_i	지점 i 에 거점 방문 경로를 1회 추가했을 경우 추가 이동 시간
	d_{nj}	노드 n 에서 필요로 하는 자원 j 의 양의 총합

이 문제에 대한 수리적 모형은 식 (23)~식 (31)과 같으며, 관련 변수 및 파라미터는 <표 2>와 같다.

$$Max \sum_j \sum_k s_{jk} \quad (23)$$

$$s_{jk} = \begin{cases} 1: \sum_{n \in N} (p_{kjn} a_n) \leq l_{jk} \\ \quad - \text{수요가 기한보다 빨리 만족됨} \\ 0: \sum_{n \in N} (p_{kjn} a_n) > l_{jk} \\ \quad - \text{수요가 기한을 맞추지 못함} \end{cases} (\forall j, k) \quad (24)$$

$$v_{nj} = v_{(n-1),j} - d_{nj} + y_{(2n-2)j} + y_{(2n-1)j} (\forall i, j) \quad (25)$$

$$0 \leq \sum_j y_{ij} \leq Vx_i (\forall i) \quad (26)$$

$$0 \leq \sum_j v_{ij} \leq V (i=0 \sim (2n-1)) \quad (27)$$

$$a_{n+1} = a_n + e_{n(n+1)} + t_{(2n-2)x(2n-2)} \quad (28)$$

$$+ t_{(2n-1)x(2n-1)} + C(\sum_j d_{nj} + \sum_j y_{(2n-2)j} + \sum_j y_{(2n-1)j}) (\forall i)$$

$$a_1 = 0 \quad (29)$$

$$0 \leq x_i (\forall i) \quad (30)$$

$$x_i \leq 1 (\forall \text{ 짝수 } i) \quad (31)$$

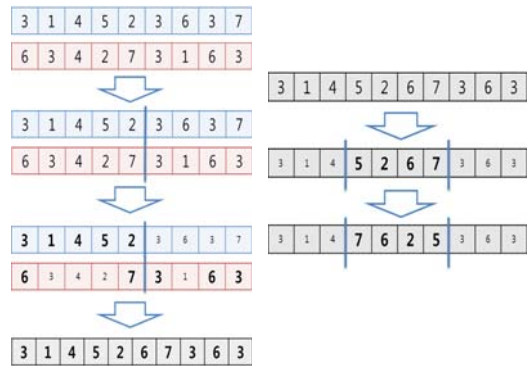
식 (23)은 목적함수로서, 방문 기한이 충족되는 구호 요청 수의 최대화를 나타낸다. 식 (24)는 개별 구호 수요에 대한 기한 만족 여부의 판별을 나타내며, 식 (25)는 연속적으로 방문하는 두 지점(지점 $2n-1$ 과 $2n-2$)간 구호 거점 방문을 고려한 자원 보존관계를 나타낸다. 식 (26)과 식 (27)은 보급 횟수 및 차량의 자원 보유량의 범위에 대한 제약을 나타내고, 식 (28)과 식 (29)는 구호 차량이 각 노드에 도착하는 시각에 관한 제약을 나타내며, 식 (30)과 식 (31)은 보급 횟수에 관한 제약을 나타낸다.

구호 자원 분배 계획 문제는 초기 자원 보유량, 수요량, 보급량, 경로의 추가 횟수 등의 관련 변수들이 모두 정수인 특성을 갖는 정수계획법 문제에 속한다. 변수의 특성상 경로 관련 변수(x_i)는 실수로 완화하는 것이 힘들지만, 자원의 양에 관련된 변수는 실수로의 완화가 가능하며 이를 통해 해의 탐색 시간을 크게 줄일 수 있다. 자원의 초기 보유량과 수요량이 정수로 주어질 경우 보급량 역시 정수로 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 자원의 보급량을 실수로 완화한 모형을 적용하였다.

• 교배 연산(Crossover) 및 돌연변이 연산(Mutation)

염색체 정의에서 언급했듯이 염색체의 구조가 일반적인 차량 경로계획 문제에서와 같이 동일하게 정의되었으므로 교배 연산이나 돌연변이 연산 역시 일반적인 방법을 적용할 수 있다. 일반적인 차량 경로계획 문제에서 가장 많이 사용되는 교배 연산은 순서 기반 교배 연산(Order-based Crossover)으로 구체적 과정은 <그림 5>의 (A)에 제시되었다. 단 교차점은 일양분포(Uniform Distribution)를 이용해 생성한다.

한편 돌연변이의 구체적 과정은 (B)에 제시되었으며, 돌연변이 연산을 위한 양 끝 지점 역시 일양분포(Uniform Distribution)를 이용해 생성한다. 한편 돌연변이는 20%의 확률로 발생하는 것으로 간주하였다.



(A) 순서 기반 교배 연산기 (B) 돌연변이 연산자
<그림 5> 교배연산 및 돌연변이 연산

• 종료 조건

세대 간 진화를 통해 해가 수렴해갈수록 현재의 해를 대체할 수 있는 좋은 해를 생성하는 것이 점점 어려워진다. 이와 같이 새로운 좋은 해를 통한 해의 대체가 이미 설정된 임계횟수 만큼 연속적으로 실패할 경우, 해가 충분히 수렴된 것으로 판단하여 해법을 종료한다. 본 연구에서는 임계 횟수를 50회로 설정하였다.

4. 실험 결과

4.1 실험 설계

제안된 해법의 성능 검증을 위한 실험에 있어, 실험 환경이 우리나라 실제 상황에 가깝도록 설정하기 위해 노력하였다. 통상적으로 볼 때 재난 상황 대응의 기본적 조직은 행정구역의 관공서라 할 수 있으나, 본 연구의 대상이 되는 구호 요청 대응의 기본적 조직은 소방서라 할 수 있다. 따라서 전국 소방서 운영 기준 또는 단위를 바탕으로 한 자료 조사 결과를 토대로 재난 지역 규모(3가지), 구호 요청 유형(3가지)의 파라미터를 설정하였다.

• 재난 지역 규모

본 연구에서는 기본적인 구호 요청의 근원을 가구(또는 세대)로 규정하고, 재난 지역의 규모를 ‘가구 수’로 구분한다. 본 연구의 주된 대상이 되는 인구 밀집지역인 광역시를 대상으로 할 때, ‘구’ 단위를 담당하는 소방서별 담당 가구 수는 최소 11,220가구, 최대 257,852가구, 평균 124,835가구, 표준 편차는 61086.76으로 조사되었으며, 이를 기준으로 정규 분포를 가정할 때 한 소방서가 담당하는 가구 수는 $N(124, 835, 61, 068.76^2)$ 을 따른다고 할 수 있다[4].

재난 지역의 규모를 ‘대’, ‘중’, ‘소’의 3가지로 나누어 제안된 해법의 규모에 따른 성능을 평가하고자 하며, $N(124, 835, 61, 068.76^2)$ 로부터 상위 10%에서 30%의 범위에서 무작위로 선택한 가구 수를 ‘대’, 상위 40%에서부터 상위 60%까지의 범위를 ‘중’, 상위 70%부터 상위 90%까지의 범위에서 무작위로 생성한 가구 수를 ‘대’로 놓아 재난 지역의 가구 수를 무작위로 생성하였다.

해당 가구 수는 1대의 차량이 모두 분담하기에는 너무 많은 규모의 수요를 다루고 있어, 일반적으로 여러 대의 구호 차량이 배치되어 구호 자원을 전달하게 된다. 본 연구에서는 해당 지역을 4대의 구호차량이 전담한다고 가정하여, 해당 가구 수로부터 도출된 구호 수요의 1/4을 한 대의 차량이 담당하

다고 가정하였다.

또한 현장의 면적은 구의 평균 면적인 73.02km²를 4로 나눈 18.25km²로 가정하였으며, 본 실험에서는 한 변이 약 4.5km인 정사각형으로 하였다[4].

• 구호 요청의 개수 설정

본 연구에서 구호 요청 수는 해당 지역의 가구 수에 대해 특정 비율을 곱하여 산출한다. 현재 소방서에서는 재난에 의한 구호요청과 일상적인 사고로 발생한 구호 요청을 명확히 구별하여 집계하지 않기 때문에, 자연 재해에 의한 재난이 주로 발생한 7월에서부터 10월의 출동 건수를 기반으로 하여 구호 요청의 수를 도출하였다.

2004년부터 2014년까지의 통계로 볼 때, 서울 및 광역시의 경우 구조와 구급을 합쳐 연간 평균 978,695건의 신고가 접수되었다. 이중 50%가 7월에서 10월 사이에 발생하였으며, 이를 통해 해당 기간에 일일 평균 4011건의 구호 수요가 발생하였다고 볼 수 있다. 해당 지역의 소방서에서 관할하고 있는 총 가구 수는 9,237,765가구이므로, 해당 기간에는 백 가구당 평균 0.04건의 구호 건수가 발생한다고 볼 수 있다[4].

해당 수치는 재난이 발생하지 않은 상황의 구호 요청의 발생 건수이다. 본 연구에서는 해당 수치를 하한으로 놓은 상태에서 비율의 상한을 정하였으며, 비율의 상한은 재난이 발생하지 않은 상황의 10배로 하였다. 이를 통해 백 가구 당 구호수요 발생 비율의 범위 [0.04, 0.4]를 설정하고, 일양 분포를 통해 얻은 난수에 가구의 수를 곱하여 구호 요청의 건수를 무작위로 생성하였다.

• 방문 기한의 설정

본 연구에서 구호 요청의 유형은 긴급 구호 요청과 일반 구호 요청의 2가지로 구분하였다. 긴급 구호 요청은 방문 기한이 짧아 아주 빠른 대응이 요구되는 것을 말하고, 일반 구호 요청은 상대적으로 대응에 여유가 있는 것을 말한다. 재난 상황에서 실제 데이터가 없어 긴급 구호 요청은 소방서

의 구급차량 출동에, 일반 구호 요청은 소방서의 구조차량 출동에 대응시켜 구호 요청 방문 기한을 설정하였다.

2013년의 구급차량 출동 소요시간을 살펴보면, 전체 구급 출동에서 빠른 순으로 상위 10%의 출동 소요시간이 2.09분 이내로 그리고 하위 10%의 출동 소요시간이 13.34분 이내로 나타나고 있다[4]. 극단적인 20%를 제외하고 80%를 포함하도록 긴급 구호 요청의 방문 기한의 범위를 [2.09분, 13.34분]로 설정하고 재난 상황임을 감안하여 일양분포를 적용한다.

<표 3>은 구조차량 출동 세부 사유별 건수 및 비율을 나타낸다. 구조차량 출동 역시 긴급한 출동이 필요한 경우를 포함하고 있는데, <표 3>에서 볼 수 있듯이 ‘별집제거’, ‘동물구조’, ‘위치확인’ 등과 같이 상대적으로 긴급하지 않은 출동 사유가 거의 60%를 차지한다. 이를 바탕으로 하여 2013년의 구조차량 출동 시간의 하위 60%에 해당되는 [6.75분, 60분] 구간을 일반구호 요청의 방문 기한의 범위로 정하고, 긴급 구호 요청의 경우와 동일하게 일양분포를 적용하여 방문 기한을 설정한다[4].

또한 본 연구에서는 전체 구호 요청 중에서 긴급 구호 요청이 차지하는 비율에 따른 제안된 해법의 성능 평가를 위하여 긴급 구호 요청 비율이 높

은 경우와 중간인 경우, 낮은 경우의 3가지 경우를 고려하였다. 비율이 높은 ‘고’의 경우는 전체 구호 요청 비율의 30%가 긴급 구호 요청에 해당되는 경우를 나타내고, ‘중’인 경우는 20%, ‘저’의 경우는 10% 수준인 경우를 나타낸다.

● 구호 자원의 정의 및 자원의 필요량

실제 재난 현장에서는 구조 장비 및 기술자, 의료인 및 의료 장비, 식음료, 담요 등 생활용품 등 다양한 구호 자원이 요구되나, 본 연구에서는 문제의 단순화를 위하여 긴급 구호 요청과 일반 구호 요청에 각기 다른 하나의 구호 자원을 대응시킴으로서 2가지의 구호 자원이 있는 것으로 가정하였다. 일반 구호 요청의 경우, 식음료와 생활 용품을 요청하며, 긴급 구호 요청의 경우 의약품을 요청하는 경우이다.

구호 요청에서 필요로 하는 구호 자원의 양은 한 가구의 구성원의 수에 1인당 자원의 필요량을 곱하여 도출하였다. 가구당 구성원의 수는 다음 <표 4>에 제시된 한국의 가구당 구성원 수 자료를 활용하여 도출하였으며, 최대 구성원의 수는 7명으로 한정하였다[4]. 본 실험에서는 1회의 일반 구호 요청에서 1인당 3일을 사용할 수 있는 9단위의 구호 자원을 보급한다고 설정하였다.

<표 3> 구조차량 출동 세부 사유별 건수 및 비율

종류	별집제거	화재	동물구조	교통	위치확인	시건개방	안전조치	승강기	산악	실내간헐	자연재해
건수	129,524	42,335	39,831	36,893	36,346	29,614	14,232	12,521	8,602	7,717	7,640
비율	30.28%	9.90%	9.31%	8.63%	8.50%	6.92%	3.33%	2.93%	2.01%	1.80%	1.79%
종류	수난	추락	자해범죄	기계	고립	붕괴	약물	유독물질	폭발	위험물	기타
건수	6,226	3,418	2,688	2,291	943	573	393	247	210	1	45,490
비율	1.46%	0.80%	0.63%	0.54%	0.22%	0.13%	0.09%	0.06%	0.05%	0.00%	10.64%

<표 4> 가구당 구성원의 수

가구원 수	1인	2인	3인	4인	5인	6인	7인 이상
가구 수	4,538,642	4,527,370	3,830,458	3,759,504	1,001,858	222,066	70,777
비율(%)	25.28	25.22	21.34	20.94	5.58	1.24	0.39

● 구호 거점 수

전국의 시·도에는 재해구호법에 따라, 재해구호 자원을 비축하고 있는 구호 거점이 마련되어 있다. 관련 규정에는 재해구호 자원 비축 창고는 각 시군구별로 최소 한 곳을 지정하여 관리하도록 규정되어 있으며, 지정과 관리는 모두 지방자치단체의 자율에 맡겨져 있어 창고의 개수 및 관리 정책이 모두 상이하다. 일반적으로는 관공서의 창고가 이용되며, 이에 더하여 별도의 창고가 사용되거나 재해구호 관련 단체의 시설이 사용되는 경우도 있다. 이로 인해 개별 비축 창고의 위치나 개수에 대한 상세한 데이터가 존재하지 않아 본 연구에서는 구호 거점의 수를 3곳으로 가정하고 실험을 수행하였다.

● 구호 차량

경로계획 대상이 되는 구호 차량은 1대로 한정하며, 두 유형의 구호 자원을 모두 적재할 수 있으며, 1단위 적재에 소요되는 시간은 같은 것으로 가정하였다. 구호자원의 1단위는 2kg 정도로 가정하여 이에 맞추어 적재량을 가정하였다. 차량의 속도는 40km/h로 가정하였으며, 적재량 400단위로 가정하였다. 마지막으로 1단위의 자원을 적재하는데 소요되는 시간은 10초로 가정하였다.

따른 성능 평가의 2가지 관점에서 실시되었으며, 성능 평가 기준으로 기한을 만족시킨 구호 요청 수요의 수와 전체 수요에 대한 비율을 활용하였다.

앞 절의 실험 설계에서 설명한 바와 같이, 재난 지역 규모(3가지), 구호 요청 유형의 비율(3가지) 등에 의해 총 9가지 문제 유형에 대하여 각각 100회의 반복 실험을 수행하였다.

● 최적해와의 비교

앞 제 3.1절에서 언급한 바와 같이 구호차량 경로 계획 문제는 NP-hard 문제에 해당되어 실험 설계에서 언급한 규모의 문제에 대한 최적해를 구하는 데는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 규모보다 더 적은 규모의 문제에 대해서 최적해를 구하여, 제안한 알고리즘의 성능과 비교하였다. 시험한 문제의 규모는 각각 수요 10개, 수요 30개, 수요 50개이며, 100회 반복하여 실험한 결과를 <표 5>에 제시하였다.

해당 실험의 결과, 본 연구에서 제안한 Genetic algorithm의 성능은 최적해에는 미치지 못하나 그 차이는 작았다. 반면 계산에 소요되는 시간이 최적해를 구하기 위한 시간에 비해 현격히 작아 빠른 경로계획의 도출이 필요한 본 재난 경로계획 문제에 더 적합하다고 볼 수 있는 결과를 얻었다.

4.2 실험 결과

제안된 알고리즘 성능 평가는 iLog CPLEX의 결과와의 비교를 통한 순수 성능 평가와 실험 환경에

● 재난 지역 및 상황의 특성에 따른 해법 성능 비교

현실에 기반하여 수요의 양과 환경을 설정한 문

<표 5> 최적해와 제안 알고리즘의 비교

문제 크기	사용 기법	충족시킨 수요의 개수			충족시킨 수요의 비율(%)			비율 (%)	계산 소요 시간(초)
		최대	최소	평균	최대	최소	평균		
10개	최적해	10	3	6.25	100.00	30.00	62.50	79.52	314.87
	GA	10	2	4.97	100.00	20.00	49.70		25.54
30개	최적해	16	3	12.41	53.33	10.00	41.30	75.18	1488.05
	GA	14	2	9.33	46.67	6.67	31.10		41.76
50개	최적해	24	5	14.16	48.00	10.00	28.32	83.40	22650.51
	GA	21	4	11.81	42.00	8.00	23.60		44.91

제의 경우, 문제의 규모가 커 최적해를 구하는데 너무 오랜 시간이 걸리므로, 해당 문제의 풀이는 오로지 본 문제에서 제안한 Genetic algorithm만을 사용하여 실험하였다.

환경에 따른 실험의 결과는 다음 <표 6>과 같다.

실험 결과, 가구 수의 증가 및, 긴급 수요의 비율에 따라 알고리즘의 성능이 점차 하락하는 것을 볼 수 있다. 다만 해당 결과만으로는 가구의 수와 긴급 수요의 비율이 실제 실험의 결과에 영향을 미치는지의 여부를 통계적으로 확신할 수 없으므로, 분산분석을 통하여 영향의 여부를 검증하였고, 그 결과로 가구의 수와 긴급수요의 비율 모두 0에 가까운 P값을 얻어 실험 환경의 설정에 따라 실험결과가 변화한다는 통계적인 근거를 얻었다.

현장의 크기에 따라 정리한 실험 결과는 다음 <표 7>와 같다.

실험 결과, 가구 수가 늘어날수록, 충족시킨 수

요의 숫자가 미세하게 줄어들고, 충족시킨 수요의 비율은 역시 줄어드는 것을 알 수 있다. 기한을 충족한 수요의 수의 변화는 수요의 변화에 비해서 매우 적으므로, 본 알고리즘에서 얻을 수 있는 차량의 경로 계획으로 만족되는 수요의 수는 가구 수에 큰 영향을 받지 않는다고도 볼 수 있다. 다만 가구 수의 증가로 인해, 충족 수요의 비율은 크게 감소하는 모습을 보였다.

충족시킨 수요의 비율은 10%와 30% 사이로서, 다소 낮은 편이라고 볼 수 있으나, 최대치를 볼 때에는 환경에 따라 달라질 수 있을 것으로 보이며, 실제 현장에서 본 알고리즘이 적용될 환경에서는 해당 환경에 여러 대의 차량이 할당될 것이므로 해당 알고리즘의 현장 적용에는 문제가 없을 것으로 보인다.

또한 알고리즘의 소요 시간은 가구 수가 늘어날수록 더 증가하는 결과를 얻었다. 그러나 가구 수

<표 6> 알고리즘의 성능

가구 수	긴급 수요 비율	기한 충족 수요 수	충족 수요 비율(%)	소요 시간(초)
소 [46549, 92801]	10%	7.00	23.97	44.24
	20%	6.80	25.09	44.50
	30%	6.31	21.59	43.19
중 [109358, 140311]	10%	7.02	13.81	59.18
	20%	6.39	12.86	56.56
	30%	6.23	13.89	53.77
대 [156868, 203120]	10%	6.88	11.36	70.84
	20%	6.42	10.15	75.01
	30%	5.89	9.23	71.54

<표 7> 거주현장의 가구 수에 따른 알고리즘의 성능

가구 수	기한 충족 수요 수			충족 수요 비율(%)			소요 시간(초)
	최대	최소	평균	최대	최소	평균	
소 [46549, 92801]	11	5	7.41	100.00	6.17	27.84	126.58
중 [109358, 140311]	10	5	6.96	78.43	4.12	15.37	212.72
대 [156868, 203120]	10	5	6.91	48.00	2.47	10.07	365.45

를 크게 설정한 실험에서도 알고리즘의 수행에 걸리는 시간이 2분을 넘기지 않으므로 본 알고리즘을 실제로 적용하는 데 큰 문제가 없을 것으로 보인다.

긴급 수요의 비율에 따라 정리한 결과는 다음 <표 8>와 같다.

실험 결과, 긴급 수요의 비중이 증가할수록, 알고리즘의 성능에 관련된 지표는 모두 하락하는 것을 볼 수 있으나, 그 변화량은 가구 수가 변화할 때에 비해서는 미미하다. 따라서 본 알고리즘을 적용할 경우, 긴급 수요의 비중이 큰 상황에서도 알고리즘의 성능이 크게 떨어지지 않는다는 사실을 확인할 수 있으며, 이는 긴급 수요의 비중이 50%가 넘어가는 극한 상황에서도 본 알고리즘의 성능이 크게 하락하지 않으며, 활용이 가능할 것이라는 사실을 보여준다.

본 실험의 결과를 통해 본 연구에서 제안한 알고리즘의 성능이 최적해와 비교하여 보았을 때 큰 차이를 보이지 않는다는 사실을 알 수 있었으며, 큰 규모의 문제에서도 해를 도출하는데 걸리는 시간은 짧아 실제 활용이 가능하다는 사실을 보였다. 또한 다양한 환경을 가정하여 실험함으로써, 제안한 알고리즘의 성능이 안정적이라는 사실을 검증하였다. 다만 본 실험에서 해당 알고리즘은 차량 1대를 기준으로 하여 수행하였기 때문에, 해당 차량 한 대가 감당할 수 없는 크기인 본 실험에서는 알고리즘의 성능이 좋지 않았으나, 해당 지역의 수요를 다수의 차량이 나누어 할당 받는 실제 현장에서는 이 결과에 비해 훨씬 더 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 보인다. 향후, 알고리즘을 재난 현장의 차량 배치에 적용할 경우 본 실험의 결과가 이

용하여 재난 피해 지역에 차량 배정 대수에 관한 의사결정에도 도움을 줄 수 있을 것으로 보인다.

5. 결론 및 추후 연구 방향

현재 재난 구호 현장에서의 구호 물류는 대규모 물류 센터간의 자원 수송에 중점을 두어 관리되고 있으며, 재난 현장에서의 물류에 대해서는 세세한 관리를 수행하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 재난 현장에서 활용 가능한 구호 물류 차량 계획을 수립하기 위한 차량 경로계획 및 자원 사용계획 작성 알고리즘에 대해서 논하였다. 그리고 해당 알고리즘을 시뮬레이션 실험을 통하여 평가하였다.

재난 현장의 특성에 의해서, 차량의 경로는 일반 차량 경로계획에서는 허락되지 않는 노드의 중복 방문을 고려해야 할 경우가 많으며, 수요를 타이트한 기한 안에 만족시키는 경로계획이 필수적이다. 따라서 이에 적합한 경로계획을 작성하기 위해, 본 논문에서는 유전 알고리즘을 적용한 알고리즘을 제시하였다.

해당 유전 알고리즘에서 사용된 염색체는 차량의 이동경로를 표시하고 있으며, 작성된 이동 경로에 맞추어 자원 사용계획이 작성하는 방식을 적용하였다. 또한 다양한 환경에서의 실험을 위해, 실제 한국의 피해 데이터를 이용하여 다양한 실험 환경을 설정하고 이에 따른 성능을 살펴보았다.

해당 실험의 결과 본 연구에서 제시한 알고리즘의 성능이 CPLEX를 통해 구한 최적해와 큰 차이를 보이지 않았으며, 최적해에 비해 짧은 시간 안에 해를 도출하였다. 또한 시간이 너무 오래 걸려 CPLEX와의 비교를 수행하지 못한 큰 규모의 경

<표 8> 긴급 수요의 비율에 따른 알고리즘의 성능

긴급 수요 비율	기한 충족 수요 수			충족 수요 비율(%)			소요 시간 (초)
	최대	최소	평균	최대	최소	평균	
10%	11	5	7.50	100.00	2.47	19.10	224.10
20%	11	5	7.09	100.00	2.73	19.79	233.57
30%	10	5	6.68	100.00	2.71	17.19	222.95

로계획에서도 짧은 시간 안에 좋은 경로계획을 만들어 내는 모습을 보여주었다.

본 연구의 결과에 의한 단일 차량의 경로계획을 기반으로 다중 차량이 다수 존재하는 경로계획에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 실시간으로 발생하는 수요에 대응할 수 있도록 해법 개선 연구가 필요하다. 또한 제시된 모형에 대한 복잡도(Complexity)에 대한 심도 있는 분석이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] 강익범, “우리나라의 지진해일 원인 분석과 지진방재대책”, 『한국방재학회지』, 제5권, 제2호(2005), pp.89-93.
- [2] 박정훈, 오정립, 박덕근, “우리나라 태풍피해 현황조사 및 분석”, 『방재연구지』, 제9권, 제3호(2007), pp.64-74.
- [3] 이상화, 손영태, 유형목, 교통방재 도입 및 필요성”, 『방재연구지』, 제13권, 제5호(2011), pp. 20-22.
- [4] e-나라지표, “www.index.go.kr.”
- [5] Azi, N., M. Gendreau, and J.Y. Potvin, “An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles,” *European Journal of Operational Research*, Vol.202, No.3(2010), pp.756-763.
- [6] Cao, Z. et al., “Optimum Path analysis of post-earthquake transportation considering multi-objective based on GIS,” *International Conference on Transportation Engineering*, (2009), pp.1104-1109.
- [1] Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, “http://cred.be/.”
- [8] Chang, M.S., Y.L. Tseng, and J.W. Chen, “A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty,” *Transportation Research Part E*, Vol.43, No.6(2007), pp.737-754.
- [9] Cheng, W. and L. Ling, “Operational analysis on emergency logistics system and emergency response model,” *Service Operations and Logistics, and Informatics, IEEE/SOL I IEEE International Conference on.*, Vol.1 (2008), pp.1323-1328.
- [10] Cortés, C.E., M. Matamala, and C. Contardo, “The pickup and delivery problem with transfers : Formulation and a branch-and-cut solution method,” *European Journal of Operational Research*, Vol.200, No.3(2010), pp. 711-724.
- [11] Haddow, G., J. Bullock, and D.P. Coppola, *Introduction to Emergency Management, 4th ed.*, Butterworth-Heinemann, London, 2007.
- [12] Lee, C.Y. et al., “An enhanced ant colony optimization (EACO) applied to capacitated vehicle routing problem,” *Applied Intelligence*, Vol.32, No.1(2010), pp.88-95.
- [13] Mingyong, L. and C. Erbao, “An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.23, No.2(2010), pp.188-195.
- [14] Nagata, Y., O. Bräysy, and W. Dullaert, “A penalty-based edge assembly memetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows,” *Computers and Operations Research*, Vol.37, No.4(2010), pp.724-737.
- [15] Nguveu, S.U., C. Prins, and R.W. Calvo, “An effective memetic algorithm for the cumulative capacitated vehicle routing problem,” *Computers and Operations Research*, Vol.37, No.11(2010), pp.1877-1885.
- [16] Özdamar, L., E. Ekinçi, and B. Küçükayazıcı, “Emergency logistics planning in natural disasters,” *Annals of Operations Research*,

- Vol.129(2004), pp.217 - 245,
- [17] Parragh, S.N. et al., "A Heuristic Two-phase solution approach for the multi-objective dial-a-ride problem," *Networks*, Vol 54, No.4 (2009), pp.227-242.
- [18] Ren, Z. et al., "Emergency logistics design in disasters," *Logistics Engineering and Intelligent Transportation Systems(LEITS), International Conference on*, (2010), pp.1-4.
- [19] Subramanian, A. et al., "A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery," *Computers and Operations Research*, Vol.37, No.11(2010), pp. 1899-1911.
- [20] Yi, W. and A. Kumar, "Ant colony optimization for disaster relief operations," *Transportation Research Part E*, Vol.43, No.6(2007), pp.660-672.
- [21] Yi, W. and L. Özdamar, "A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities," *European Journal of Operational Research*, Vol.179, No.3(2007), pp.1177-1193.
- [22] Yue, Y., L. Marla, and R. Krishnan, "An efficient simulation-based approach to ambulance fleet allocation and dynamic redeployment," *Proceedings of the Twenty-sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2012.
- [23] UNISDR, "Killer year caps deadly decade," 2011.