한국경영과학회지
제37권 제4호
2012년 12월, pp.197-209
http://dx.doi.org/10.7737/JKORMS.2012.37.4.197

시뮬레이션과 최적화 모형을 혼합 적용한 구급차 위치선정 모형의 해법연구*

임영선** · 김선훈**† · 이영훈**

A Study of Ambulance Location Problem Applying the Iterative Procedure of Simulation and Optimization

Young Sun Lim** · Sun Hoon Kim** · Young Hoon Lee**

■ Abstract ■

This paper studies an emergency service vehicle location problem, where minimum reliability level pre-specified at each demand point is assured. Several models are suggested depending on the busy fraction, which is the time proportion of unavailability for the ambulances. In this paper a new model on computing the busy fraction is suggested, where it varies depending on the distance between the demand point and ambulances, hence it may respond the more realistic situation. The busy fraction for the ambulance location determined by the optimization model is computed by the simulation, and updated through the iterative procedure. It has been shown that the performances of the solutions obtained by the algorithm suggested for the instances appeared in the literature.

Keyword : Ambulance, Probabilistic Location Set Covering Problem, Optimization, Simulation

논문접수일 : 2012년 10월 15일 논문게재확정일 : 2012년 12월 07일
논문수정일(1차 : 2012년 11월 27일)
* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0014530).
** 연세대학교 정보산업공학과
† 교신저자

1. 서 론

헬스케어는 사회가 진보되고, 급속한 고령화로 인해 그 중요성이 부각되고 있다. 그중 환자의 생명과 직결된다는 점에서 응급의료서비스는 헬스케어에 있어 중요한 부분이다. 응급의료서비스는 일정 지역 내에서 양질의 서비스를 제공하는 데 필요한 모든 요소를 조직화한 것으로 크게 병원 전 응급처치 단계와 병원 내 치료 단계로 구분할 수 있다. 구급업무는 이러한 응급의료 체계 중 가장 처음에 이루어지는 업무로써 응급의료 현장에서 필요한 응급처치를 하고, 병원으로의 이송을 빠르게 하는 것이 환자의 생명 및 건강을 보호한다는 점에서 중요한 역할을 차지하고 있다. 본 연구는 구급 업무 중 구급차 위치선정 문제에 대해 다루고자 한다.

구급차 위치선정 문제(ambulance location problem, ALP)는 구급차를 효율적인 위치에 배치하여 구급차의 수를 최소화하면서 사용자가 구급차를 사용할 수 있는 확률을 일정 이상 수준으로 보장하는 문제이다. 위와 같은 문제를 확률적 위치 세트 커버 문제(probabilistic location set covering problem, PLSCP)라고 부르며. 기존의 위치 세트 커버 문제(location set covering problem, LSCP)와 차이점은 서비스를 제공하는 서버가 하나의 사용자에게 점유되면, 다른 사용자가 해당 서버를 사용할 수 없다는 것이다. 따라서 PLSCP에서는 사용자가 서버에 의해 커버되는 것뿐만 아니라, 사용자에게 서버를 사용할 수 있는 확률을 일정 수준 이상으로 보장해야 한다. PLSCP는 구급차 수의 최소화라는 목적 함수와 보장확률(reliability level) 만족이라는 제약으로 이루어져 있다. 여기서 보장확률이란, 사용자가 구급차를 요구하였을 때 구급차가 사용 가능한지에 대한 확률을 의미한다. 예를 들어, 사용자가 10회의 구급차를 요청하였을 때, 7회를 사용하고, 3회는 사용하지 못했다면 보장확률은 70%가 된다. 보장확률 만족 제약은 확률적 요소의 특성상 최적화 모형에서 표현하기 어려운 특징이 있는데 기존의 연구에서는 다음과 같은 방법을 사용하였다.

Revell and Hogan[8-10]은 구급차의 예상 가동률(busy fraction)을 통해 보장확률 만족 제약을 표현하였다. 어떤 하나의 특정 노드(node)에 대하여 해당 노드를 커버하고 있는 모든 구급차의 예상 가동률을 추정하여, 해당 노드를 커버하고 있는 구급차가 모두 바쁘지 않을 확률이 보장확률보다 커야 한다는 식을 이용하여 보장확률에 대한 제약을 표현하였다. 그들의 문제 접근 방법에서 가장 큰 가정사항은 예상 보장확률 산출에 있어서 구급차의 설치 여부나 거리에 따른 노드별 구급차의 선호도에 상관없이 예상 보장확률 산출하였다는 것이다. Ball and Lin[3]은 푸아송 분포를 이용하여 보장확률 제약을 표현하는 모델을 제안하였다. 이 모델에서도 각 구급차의 설치 여부나 노드별 구급차의 선호도에 상관없이 각 구급차의 수요에 대한 평균을 산출하였다는 특징이 있다. Marianov and Revelle[6]은 대기 모델(queuing model)을 통하여 해당 문제에 접근하고자 하였으며, Borras and Pastor[4]은 해당 대기 모델을 이용하여 보장 확률 제약을 표현하는 모델을 제안하였다. 또한, 그들은 각 구급차의 설치 대수를 고려한 예상 가동률 산출 방법을 이용한 새로운 모델을 제안하였으나, 해당 산출 방법 또한 각 구급차의 설치 여부나 노드별 구급차의 선호도에 상관없이 각 구급차의 수요에 대한 평균을 산출하였다는 특징이 있다. 이영우[1]는 Borras and Pastor [4]의 모형을 한국의 각 지역에 적용하는 연구를 진행하였다. Rajagopalana et al.[7]은 Revelle and Hogan[9]에서 제안한 모형을 바탕으로 수요가 변동하는 상황에서 보장확률을 만족하게 하고자 하는 모형을 제안하였다. 본 모형은 예상 가동률에 대한 정교한 계산을 위해 Javis의 알고리즘을 사용하였지만, 구급차의 설치 여부나 노드별 구급차의 선호도에 상관없이 가동률을 예측했다는 측면에서 기존의 연구와 동일한 한계점을 가지고 있다. Schmid and Doerner[11]는 기간마다 변화하는 이동시간을 고려하는 최적화 모형을 제시하였고, 최영복[2]은 구급차의 위치선정을 위한 효율적 알고리즘을 제시하였으며, Iannoni et al.[5]은 구급차의 위치와 커버 범위를 결

정하는 하이퍼 큐브(hypercube) 모형을 제시하였으나, 본 모형들은 보장확률을 고려하지 않았다. Shariat-Mohaymany et al.[12]은 각 구급차의 설치 여부에 따라 워크로드(workload)를 동등하게 나눠 가지도록 예상 가동률을 산출할 수 있는 모델을 제안하였다. 또한, 해당 모델은 구급차 설치 여부에 따라 변화하는 예상 가동률을 선형의 제약식으로 고려하기 위해 목표 가동률(target utilization)에 대한 개념을 도입하였다. 이 모델은 구급차의 설치 여부에 따라 예상 가동률이 변화하도록 고려하였다는 점에서는 의의가 있으나, 예상 가동률을 산출할 때 거리에 따른 노드별 구급차의 선호도에 상관없이 동등하게 워크로드를 나누어 가진다고 가정하였다는 점에서 한계가 있다. 기존의 연구는 구급차의 설치여부나 거리에 따른 노드별 구급차의 선호도에 따라 변화하는 예상 가동률을 정확히 산출하지 못했다는 특징이 있으며, 이는 해당 문제의 해답이 반드시 보장확률을 만족하게 할 수 없다는 한계점으로 이어진다. 따라서 본 연구는 구급차의 설치 여부나, 거리에 따른 노드별 구급차의 선호도에 따라 변화하는 예상 가동률의 특징을 고려한 모델을 제안하고자 한다. 위와 같은 특징을 고려하기 위해서는 각 수요지점에서 구급차를 얼마의 비율로 사용할지에 대한 정보를 정확히 산출할 필요성이 있다. 위와 같은 정보는 이론적 수식으로 표현되기 어려우며 시뮬레이션(simulation)을 이용하여 산출되어야 한다. 따라서 시뮬레이션과 최적화 모형을 혼합 적용하여 PLSCP의 해법을 연구하고자 한다. 본 시뮬레이션과 최적화 모형을 혼합 적용한 모델은 기존의 연구보다 정교하게 예상 가동률을 산출함으로써 보장확률 측면에 있어 개선된 해답을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 문제 정의 및 모델링

PLSCP는 구급차의 수를 최소화하는 것을 목적함수로 가지고 있으며, 각 고객의 보장확률을 만족시키는 것을 제약으로 가지고 있다. PLSCP는 보장확률에 대한 제약을 제외하고는 LSCP와 유사한 결정변수와 제약을 가지고 있다. 하나의 구급차는 커버할 수 있는 거리가 한정되어 있으며, 동일한 노드에 여러 개의 구급차가 설치될 수 있다. 하나의 구급차가 하나의 고객에 의해 사용되면 일정 시간 사용할 수 없으며, 고객은 다른 구급차를 사용하여야 한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

● 인덱스

i, j, k : 노드
c : 구급차
f : 필요한 구급차의 수

● 결정변수

x_{ic} : i노드에 c번째 구급차가 설치되어 있으면 1, 아니면 0
r_f : 각 노드마다 필요한 구급차의 수가 f개이면 1, 아니면 0
p_i : 노드 i 구급차의 예상 가동률
y_{ic} : 노드 i에 위치하고 있는 구급차의 수가 c이면 1, 아니면 0

● 데이터

e_i : 노드 i의 평균 수요(평균 응급전화의 수)
S : 커버 할 수 있는 거리
d_{ij} : 노드 i와 노드 j의 거리
$N_j = \{i \mid d_{ij} \leq S\}$: 노드 j에 설치된 구급차에 의해 커버될 수 있는 노드들의 집합
tp_f : r_f가 1일 때, 구급차의 목표 가동률
α : 요구 보장확률
$\overline{t}$: 하나의 수요에 소비되는 평균 서비스 시간(시간)
q_{ij} : 노드 i에서 발생한 응급전화가 노드 j에 있는 구급차에 할당될 확률

● 수식 (1)

$$\text{minimize} \sum_{i,c} x_{ic} \tag{1}$$

subject to

$$\prod_{c,j\in N_i} p_j^{c\cdot y_{jc}} \le 1-\alpha \quad \forall i \tag{2}$$

$$x_{ic} \le x_{ic-1} \quad \forall i, c(c>1) \tag{3}$$

$$\sum_c c\cdot y_{ic} = \sum_c x_{ic} \quad \forall i \tag{4}$$

$$\sum_c y_{ic} \le 1 \quad \forall i \tag{5}$$

$$p_j = \frac{\sum_i \bar{t}\cdot q_{ij}\cdot e_i}{24\cdot \sum_c c\cdot y_{jc}} \quad \forall j(\sum_c y_{jc}=1) \tag{6}$$

$$p_j = 1 \quad \forall j(\sum_c y_{jc}=0) \tag{7}$$

$$x_{ic}, y_{ic} \in 0,1,\ 0 \le p_i \le 1 \tag{8}$$

식 (1)은 설치된 구급차의 수를 최소화하는 목적함수이다. 식 (2)는 보장확률 만족 제약으로 노드 i를 커버 하고 있는 구급차가 모두 바쁠 확률은 1-α보다 작아야 한다는 것을 의미한다. 식 (3)은 c-1번째 구급차가 설치되어야 c번째 구급차가 설치될 수 있다는 제약이다. 식 (4)와 식 (5)는 노드 i에 설치된 구급차의 수를 계산하기 위한 제약이다. 식 (6)과 식 (7)은 구급차의 예상 가동률을 구하는 제약이다. 식 (6)은 노드 i에 구급차가 설치되었을 경우를 나타내며, 예상 가동률은 해당 노드로 할당될 예상 응급전화 수에 평균 서비스 시간을 곱한 값에서 설치된 구급차의 전체 가용시간을 나눈 값이다. 구급차가 설치되지 않았을 때 예상 가동률을 1이라 가정하며, 이는 식 (7)에 나타나 있다. 식 (8)은 비음 성질을 나타내는 제약이다. 본 수식에서 식 (2)와 식 (6), 식 (7)은 비선형 수식으로 이를 선형화하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. Shariat-Mohaymany et al.[12]은 목표 가동률 개념을 이용하여 선형화된 수식을 제안하였으며, 본 연구 또한 목표 가동률 개념을 이용하여 본 수식을 선형화하였다. 그 수식은 다음과 같다.

• **수식 (2)**

minimize (1)

subject to

$$\sum_{j\in N_i}\sum_c x_{jc} \ge f\cdot r_f \quad \forall i,f \tag{9}$$

$$\sum_f r_f = 1 \tag{10}$$

$$M(1-r_f) + tp_f\cdot 24\cdot \sum_c c\cdot y_{jc} \ge \sum_i \bar{t}\cdot q_{ij}\cdot e_i \quad \forall j,f \tag{11}$$

식 (3)~식 (5)

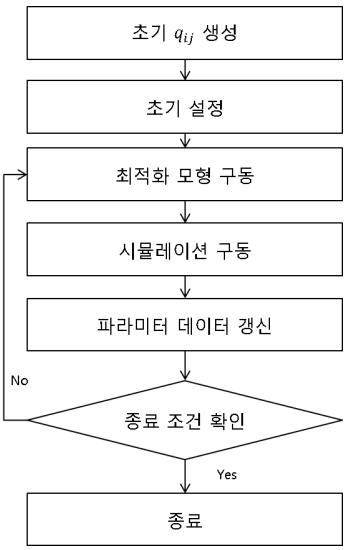
$$x_{ic},\ r_f,\ y_{ic} \in 0,1 \tag{12}$$

본 수식은 모든 구급차의 목표 가동률이 동일하다는 가정 하에 세워진 수식이다. 식 (9)는 각 노드를 커버 해야 할 구급차 수에 대한 요구 조건을 의미한다. 예들 들어, r_2가 1이라면 각 노드당 적어도 2개의 구급차가 필요하다는 것을 의미한다. 식 (10)은 모든 노드에 필요한 구급차의 수는 하나로 정해져야 한다는 것을 의미한다. 식 (11)은 설치된 구급차의 예상 가동률이 목표 가동률보다는 작아야 한다는 것을 의미한다. 여기서 $tp_f = \sqrt[f]{(1-\alpha)} - \epsilon$으로 산출할 수 있으며 Shariat-Mohaymany et al.[12]는 $\epsilon = 0.01$로 정의하였다. 위의 수식에서 식 (11)의 q_{ij}가 '1/(노드 i를 커버하고 있는 구급차의 수)'로 변경되면 Shariat-Mohaymany et al.[12]에서 제안한 수식과 거의 유사한 수식이 된다. 본 수식은 선형화된 형태를 보이고 있지만 q_{ij}를 산출하는 부분에서 거리에 상관없이 동등하게 워크로드를 나누어 갖는다는 점에서 한계점을 가지고 있다. i에서 발생한 응급전화가 노드 j에 할당될 확률인 q_{ij}는 결정 변수인 x_{ij}와 거리 d_{ij}에 의해 영향을 받는 값으로 이를 x_{ij}와 d_{ij}에 대한 수식으로 정의하기는 어려운 일이며 시뮬레이션 모델을 통해 관측될 수밖에 없다.

3. 시뮬레이션과 최적화 모형을 혼합 적용한 구급차 위치 선정 알고리즘

식 (2)는 PLSCP에 대한 선형화된 모델링을 제시하지만, q_{ij}가 결정변수인 x_{ij}와 d_{ij}에 영향을 받는 변수임에도 이를 표현하지 못한 한계점을 가지고 있다. Shariat-Mohaymany et al.[12] 연구에서는 q_{ij}를 '1/(노드 i를 커버 하고 있는 구급차의 수)'로 가

정하였지만, 이는 거리에 따른 노드 간의 구급차 선호도를 무시한 가정이다. 따라서 본 연구는 이에 대한 가정을 보완하기 위한 방법으로 시뮬레이션과 최적화 모형을 혼합 적용한 구급차 위치 선정 모형(OptSim)을 도입하였다. 본 모형은 최적화 모형에서 수립된 해를 기반으로 시뮬레이션에서 q_{ij}를 산출하면 이를 다시 최적화 모형에 대입하여 새로운 해답을 구하는 방식으로 시뮬레이션과 최적화 모형이 반복적으로 풀림으로써 q_{ij}에 대한 기존 연구의 가정을 보완할 수 있다. 본 알고리즘은 시뮬레이션과 최적화 모형을 번갈아 사용하는 휴리스틱 알고리즘으로써, 최적화 모델에서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 생성된 q_{ij}와 새롭게 주어진 파라미터(parameter)들을 바탕으로 구급차의 수를 최소화하는 해를 도출하며 전체 알고리즘 측면에서 봤을 때 이웃해를 생성하는 역할을 담당한다. 시뮬레이션은 최적화 모델에서 생성된 해를 검증하며 이를 바탕으로 새로운 q_{ij}를 최적화 모델에 제시함으로써 최적화 모델이 새로운 해를 찾을 수 있도록 하는 역할을 담당한다. 본 연구에서 제안하는 알고리즘의 순서도는 [그림 1]과 같다. 첫 번째 단계에서는 초기 q_{ij}를 생성하며, 다음 단계에서는 최적화 모형 구동



[그림 1] OptSim의 알고리즘 순서도

을 위한 초기 설정을 진행한 후 최적화 모형을 구동시킨다. 최적화 모형에 의해 해가 산출되면, 그 해는 시뮬레이션 모델에 들어간다. 시뮬레이션의 결과로 각 노드의 보장확률 및 q_{ij}가 산출되며 생성된 데이터를 바탕으로 파라미터들이 갱신하게 된다. 다음 단계로 넘어가서, 종료조건을 확인하고 종료조건에 부합할 시 알고리즘을 종료하며, 부합하지 않을 시 최적화 모형을 구동한다. 각 알고리즘의 단계에 대한 자세한 설명은 다음과 같다.

3.1 초기 q_{ij} 생성

수요가 공급을 초과하였을 시, 각 노드별로 구급차 이용 빈도를 산출함으로써 초기 이용 선호도에 대한 값을 추정할 수 있다. 초기 q_{ij}는 모든 노드에 하나의 구급차가 존재하고 모든 노드의 응급 전화의 발생횟수 평균이 100배 증가하였다는 가정 하에 시뮬레이션 모델을 구동하여 산출하였다.

3.2 초기 설정

초기 설정에서는 최적화 모형의 목적함수의 가중치에 대한 값을 설정한다. 구급차 수의 최소화에 대한 가중치는 100이 주어지고, 예상 이동거리 최소화에 대한 가중치는 1이 주어진다.

3.3 최적화 모형 구동

위에서 주어진 q_{ij} 및 가중치를 바탕으로 최적화 모형이 구동된다. 해당 최적화 모형은 시뮬레이션의 정보를 반영, 수렴하기 위하여 다음과 같이 변경하였다. 식 (3)은 첫 번째 반복(iteration)을 위한 수식이며, 식 (4)는 두 번째 이상 반복일 때를 위한 수식이다.

● 인덱스

i, j, k : 노드

c : 구급차

f : 필요한 구급차의 수

• **결정변수**

x_{ic} : i노드에 c번째 구급차가 설치되어 있으면 1, 아니면 0

z_{jk} : k노드에서 j노드로 이동할 것으로 예상되는 워크로드 비율

r_f : 각 노드마다 필요한 구급차의 수가 f개 필요하면 1, 아니면 0

• **데이터**

e_i : 노드 i의 평균 수요(평균 응급전화의 수)

S : 커버 할 수 있는 거리

d_{ij} : 노드 i와 노드 j의 거리

$N_j = \{i | d_{ij} \leq S\}$: 노드 j에 설치된 구급차에 의해 커버될 수 있는 노드들의 집합

tp_f : r_f가 1일 때의 구급차의 목표 가동률

α : 요구 보장확률

$\bar{t}$: 하나의 수요에 소비되는 평균 서비스 시간(시간)

β : 설치된 구급차 수 최소화에 대한 가중치

γ : 예상 이동거리 최소화에 대한 가중치

q_{ij} : 노드 i에서 발생한 응급전화가 노드 j에 있는 구급차에 할당될 확률

• **수식 (3)**

minimize

$$\beta \cdot \sum_{i,c} x_{ic} + \gamma \sum_i \sum_j \sum_k (e_i q_{ik} d_{ij} - e_i q_{ik} d_{ik}) z_{jk} \quad (13)$$

subject to

$$M \cdot (1 - r_f) + 24 \sum_c tp_f^c \cdot x_{jc} \geq \sum_k \left(\sum_{i \in N_k} \bar{t} e_i q_{ik} \right) z_{jk} \quad \forall j, f \quad (14)$$

$$\sum_j z_{jk} = 1 \quad \forall k \quad (15)$$

$$\sum_{j \notin N_k} z_{jk} = 0 \quad \forall k \quad (16)$$

식 (3), 식 (9)~식 (10)

$$x_{ic}, r_f \in 0,1, \; z_{jk} \geq 0 \quad (17)$$

식 (13)은 목적함수로서 설치된 구급차 수의 최소화와 예상 이동거리 최소화로 이루어져 있다. 식 (14)는 목표 가동률보다 실제 가동률이 낮아야 한다는 의미이다. 목표 가동률은 r_f에 따라 변화하게 되므로 r_f가 1인 경우에만 제약이 들어가며, 그렇지 않으면 의미 없는 제약이 된다. 식 (14)의 tp_f^c는 tp_f의 c승임을 의미한다. 식 (15)는 노드 k로 들어오는 워크로드는 반드시 어떤 노드든 모두 할당이 되어야 한다는 의미이다. 식 (16)은 커버할 수 있는 거리인 S보다 멀리 있는 노드에는 노드 k의 워크로드가 할당될 수 없다는 제약이다.

Shariat-Mohaymany et al.[12]에서 제안된 목표 가동률을 만족한다 하더라도 모든 노드의 보장확률이 요구 보장확률보다 커야 한다는 조건을 만족하지 않는다는 사실을 발견하였다. 따라 본 연구는 수식 $M \cdot (1 - r_f) + 24 \sum_c tp_f \cdot x_{jc} \geq \sum_k \left(\sum_{i \in N_k} \bar{t} e_i q_{ik} \right) z_{jk} \quad \forall j, f$ 이 아닌 식 (14)를 사용하였다. Shariat-Mohaymany et al.[12]에서 제안된 목표 가동률은 모든 구급차가 독립적이라는 가정 하에 산출된 값이다. 그러나 동일한 노드에 존재하는 구급차들의 경우 상당히 종속적인(dependent) 관계이므로 이들 간의 관계를 제약으로 표현해 줄 필요성이 있다. 실험 결과, 첫 번째로 주요하게 쓰이는 구급차의 가동률이 u라면 첫 번째가 쓰이고 난 후 쓰이는 두 번째 구급차의 가동률은 u^2과 거의 유사한 값을 보이는 경향이 있다. 이러한 관계를 식 (14)에 반영하기 위하여 첫 번째 구급차의 목표 가동률이 tp_f라면 두 번째 구급차의 목표 가동률은 tp_f^2으로 설정하였으며 c번째 구급차의 목표 가동률은 tp_f^c로 설정하였다. 또한, Shariat-Mohaymany et al.[12]에서 제안된 목표 가동률을 사용할 경우, 모든 구급차가 목표 가동률을 만족하게 하더라도 최소 보장확률을 만족하지 않는 결과가 도출되었다. 따라서 이를 보완하기 위하여 본 연구는 $tp_f = \sqrt[f]{(1-\alpha)} - \epsilon$에서 오차 ϵ를 0.01이 아닌 $0.03 - 0.1 \cdot (1-\alpha)$로 정의하였다. 오차 ϵ를 증가시킴으로써 목표 가동률을 만족하면 요구 보장확률을 만족하는 확률을 높일 수 있으며, 요구 보장확률을 만족하였으나 목표 가동률이 만족하지 않았을 경우는 종료조건에 요구 보장확률을 만족하게 했을 시 알고리즘을 종료하게 하는 조건을 추가하는 것

을 통해 고려할 수 있다. 또한 시뮬레이션 결과에서는 각 요구 보장확률 α마다 최대 $(1-\alpha)$의 응급전화를 놓칠 수 있으나 최적화 모델에서는 그에 대한 고려 없이 모든 응급전화를 구급차에 할당하므로 이에 대한 고려를 위하여 $0.1 \cdot (1-\alpha)$만큼의 여유를 목표 가동률에 더해줄 필요가 있다.

첫 번째 반복에서는 좋은 초기 해를 산출 할 필요성이 있지만, 두 번째 반복 이후에는 해의 수렴 및 해의 순환을 막는 것에 초점을 맞출 필요성이 있다. 따라서 두 번째 반복 이후에는 식 (3) 대신 식 (4)를 사용하였다.

• **수식 (4)**

$$\text{minimize } \beta \cdot \sum_{i,c} x_{ic} + \gamma \sum_{i} \sum_{j} \sum_{k} |e_i q_{ik} d_{ij} - e_i q_{ik} d_{ik}| z_{jk} \quad (18)$$

subject to

식 (3), 식 (9)～식 (10), 식 (14)～식 (17)

$$z_{kk} \geq x_{k1} \quad \forall k \quad (19)$$

$$\sum_{(i,c) \in B_t} x_{ic} \leq |B_t| \quad \forall t \quad (20)$$

식 (3)과 변경된 부분은 식 (18)이며, 식 (19)와 식 (20)이 추가되었다. 식 (18)의 예상 이동거리 최소화에서 이동거리의 차에 절대값을 붙였으며 이는 두 번째 반복부터 이동거리 최소화보다는 해의 수렴성을 조금 더 강조하기 위해서이다. 식 (19)는 노드 k에 구급차가 설치되었으면 해당 노드의 워크로드를 다른 노드에 보낼 수 없다는 제약으로 목표 가동률을 만족하지 않는 지점에서 수렴되는 것을 막기 위한 제약이다. 식 (20)은 해의 순환성을 막기 위한 제약으로 만약 이전 반복의 해가 기존에 한 번 도출된 적이 있는 해라면 그 다음 반복의 해는 도출될 수 없다고 막아주는 제약이다. 여기서 t는 그 다음 반복 해의 인덱스를 나타내며 B_t는 그다음 반복의 해에서 값이 1이었던 (i, c)의 집합을 의미한다.

3.4 시뮬레이션 구동

시뮬레이션은 기존의 Borras and Pastor[4]에서 제안된 시뮬레이션과 거의 유사한 시뮬레이션 모델을 사용하였다. 본 시뮬레이션은 최적화 모델과의 연동을 위해 JAVA를 통하여 개발되었다. 다음은 시뮬레이션 모델에 대한 가정 사항 및 투입, 결과 데이터이다.

3.4.1 시뮬레이션 모델 가정 사항

- 하루 동안 발생하는 응급전화는 푸아송 분포를 따른다.
- 한 대의 구급차는 정확히 하나의 응급전화에 할당된다.
- 각 수요지점은 거리에 따른 선호도가 존재한다.
- 모든 구급차가 바쁠 때 발생한 응급전화는 동등한 사설 시스템에 의해 할당된다(0-대기 가정).
- 응급전화를 처리하는데 요구되는 시간은 지수분포를 따르며 거리와 상관없이 동일하다.

3.4.2 시뮬레이션 모델의 투입 데이터

x_{ic} : i노드에 c번째 구급차가 설치돼 있으면 1, 아니면 0

e_i : 노드 i의 평균 수요(평균 응급전화의 수)

S : 커버 할 수 있는 거리

d_{ij} : 노드 i와 노드 j의 거리

$\bar{t}$: 하나의 수요에 소비되는 평균 서비스 시간(시간)

3.4.3 시뮬레이션 모델의 결과 데이터

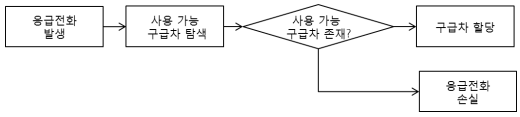
q_{ij} : 노드 i에서 발생한 응급전화가 노드 j에 있는 구급차에 할당될 확률

lr_i : 지역 보장확률(local reliability)으로 노드 i의 전체 응급전화에서 구급차가 할당될 비율

$MLR = \min(lr_i)$: 최소 보장확률(minimum local reliability)

3.4.4 시뮬레이션 구조도

다음의 그림은 본 시뮬레이션의 간략한 순서도를 나타낸다.



[그림 2] 시뮬레이션 모형의 알고리즘 순서도

어떤 노드에서 응급전화가 발생하면 가장 가까운 순서부터 사용 가능한 구급차를 찾아 만약 사용 가능한 구급차가 존재하면 구급차를 할당하고 서비스 시간동안 해당 구급차를 사용할 수 없게 한다. 만약 사용가능한 구급차가 없을 시, 응급전화는 손실되며 해당 응급전화는 동등한 사설 시스템에 의해 할당된다고 가정한다. 본 시뮬레이션은 Borras and Pastor[4]의 시뮬레이션과 동일하며 오직 2가지 점에서 차이가 존재한다. 첫 번째는, 응급 전화가 발생하였으나 커버할 수 있는 범위 내에 사용 가능한 구급차가 존재하지 않을 시, Borras and Pastor[4]의 시뮬레이션은 이를 커버할 수 있는 범위 밖의 구급차에 할당하였으나 본 연구의 시뮬레이션은 이를 할당하지 않고 손실한다고 가정하였다. 두 번째 차이는 Borras and Pastor[4]의 시뮬레이션은 50번의 반복 구동(run)을 하였으나 본 연구는 100번의 반복 구동을 수행하였다. 이외의 본 시뮬레이션에 대한 자세한 구조 및 설정은 Borras and Pastor[4]의 연구를 참조할 수 있다.

3.4.5 시뮬레이션 검증

Borras and Pastor[4]은 수식을 이용하여 MLR를 산출하는 방법을 제시하였다. 해당 수식은 구급차 위치 선정 문제에 대하여 어떤 해가 주어지면 그 해에 대한 MLR을 산출할 수 있으며, 해당 MLR이 시뮬레이션에서 도출된 MLR과 유사함을 보여주었다. 본 연구는 시뮬레이션 검증을 위하여, Borras and Pastor[4]이 제안한 수식에서 산출된 MLR과 본 시뮬레이션을 통해 산출된 MLR이 유사함을 보임으로써 본 연구의 시뮬레이션의 타당성을 검증하고자 한다. 시뮬레이션의 MLR은 q_{ij}와 lr_i에 의해 산출되는 값이므로 MLR에 대한 검증을 통하여 시뮬레이션 결과 데이터에 대한 타당성을 보일 수 있다. 본 검증을 위해 사용된 MLR은 본 연구에서 제안한 알고리즘을 통해 산출된 해를 바탕으로 각각 수식과 시뮬레이션을 통해 산출된 MLR이다. 본 검증을 위해 사용된 데이터는 Borras and Pastor[4]에서 사용한 79노드 케이스로 해당 데이터는 4개의 수요 시나리오와 2개의 커버할 수 있는 거리에 대한 시나리오, 그리고 9개의 요구 보장확률 시나리오가 있으며 해당 데이터에 대한 설명은 제 4장에 자세히 나와 있다.

<표 1>은 MLR을 수식으로 구한 값(MLR(E))과 시뮬레이션으로 구한 값(MLR(S))의 오차를 나타낸다. 시뮬레이션을 통해 구한 MLR(S)값과 수식을 바탕으로 구한 MLR(E)값의 오차범위가 [-0.0113~0.0192]로 근소한 차이를 나타낸 것을 확인할 수 있다.

3.5 파라미터 데이터 갱신

파라미터 데이터 갱신은 우선 크게 3가지로 구분된다. 첫 번째는 q_{ij}를 시뮬레이션 결과를 바탕으로 새로운 q_{ij}로 변경하는 것이다. 두 번째는 최적화 모델의 가중치를 변경하는 부분으로 S가 1.5일 경우 β는 30+it/10이 주어지고, γ는 1+it/10이 주어진다. 여기서 it는 반복의 횟수를 의미한다. S가 3.0일 경우 β는 50+it/10이 주어지고, γ는 1+it/10이 주어진다. 여기서 β는 설치된 구급차 수의 최소화에 대한 가중치이며 γ는 새로운 해를 도출함에 따라 발생하는 예상 이동거리 최소화를 의미한다. γ는 최적화 모델에서 예상 이동거리를 최소화시킴으로써 주어진 q_{ij}와 최대한 유사한 q_{ij}를 가지면서 동시에 목표 가동률을 만족하게 할 수 있는 새로운 해를 찾도록 하는 역할을 담당한다. 따라서 β에 대한 γ의 비율이 증가하면 구급차 수의 최소화보다 예상 이동거리 최소화에 대한 가중치가 증가하며, 더불어 최적화 모델이 보장확률을 만족하게 할 수 있는 해를 도출할 확률이 높아진다. 본 알고리즘은 반복의 횟수가 증가함에 따라 구급차 수가 증가하더라도 보장확률을 만족하게 할 수 있는 해를 찾을 수 있는 확률이 증가하도록 하였다. 마지막으로 해에 대한

〈표 1〉 시뮬레이션과 수식으로 얻은 MLR 오차

		수요시나리오 = 1			수요시나리오 = 2			수요시나리오 = 3			수요시나리오 = 4		
	α	MLR(E)	MLR(S)	오차	MLR(E)	MLR(S)	오차	MLR(E)	MLR(S)	오차	MLR(E)	MLR(S)	오차
S = 1.5	1	0.8041	0.8152	−0.0112	0.9373	0.9271	0.0102	0.8875	0.8728	0.0147	0.7945	0.8013	−0.0068
	2	0.8223	0.8285	−0.0061	0.9289	0.9204	0.0084	0.8999	0.8965	0.0034	0.8743	0.8823	−0.0080
	3	0.9705	0.9614	0.0091	0.9289	0.9181	0.0107	0.8840	0.8816	0.0023	0.8482	0.8595	−0.0113
	4	0.9709	0.9623	0.0086	0.9289	0.9214	0.0075	0.8789	0.8782	0.0007	0.8696	0.8780	−0.0084
	5	0.9709	0.9609	0.0100	0.9289	0.9199	0.0089	0.9209	0.9053	0.0156	0.9157	0.9074	0.0084
	6	0.9709	0.9614	0.0095	0.9370	0.9237	0.0134	0.9523	0.9364	0.0159	1.0000	0.9299	0.0701
	7	0.9709	0.9623	0.0085	0.9544	0.9501	0.0043	0.9863	0.9744	0.0119	1.0000	0.9511	0.0489
	8	0.9766	0.9751	0.0015	0.9941	0.9887	0.0054	0.9852	0.9764	0.0089	1.0000	0.9861	0.0139
	9	0.9983	0.9963	0.0020	0.9944	0.9871	0.0074	1.0000	0.9927	0.0073	1.0000	0.9909	0.0091
S = 3.0	1	0.8375	0.8430	−0.0055	0.7878	0.8019	−0.0140	0.7832	0.8037	−0.0204	0.8331	0.8404	−0.0073
	2	0.8375	0.8424	−0.0049	0.8836	0.8775	0.0061	0.8357	0.8392	−0.0035	0.8259	0.8458	−0.0199
	3	0.8625	0.8493	0.0132	0.8853	0.8855	−0.0002	0.8554	0.8508	0.0047	0.8427	0.8530	−0.0103
	4	0.8749	0.8768	−0.0019	0.8881	0.8854	0.0027	0.9360	0.9231	0.0129	0.8729	0.8786	−0.0057
	5	0.9070	0.8955	0.0115	0.9117	0.9030	0.0087	0.9260	0.9245	0.0015	0.9196	0.9161	0.0035
	6	0.9629	0.9478	0.0152	0.9359	0.9336	0.0023	0.9392	0.9332	0.0059	0.9141	0.9162	−0.0022
	7	0.9660	0.9551	0.0109	0.9499	0.9398	0.0101	0.9542	0.9350	0.0192	0.9572	0.9547	0.0025
	8	0.9755	0.9635	0.0120	0.9836	0.9767	0.0069	0.9859	0.9816	0.0042	0.9677	0.9577	0.0100
	9	0.9949	0.9903	0.0046	0.9897	0.9813	0.0084	0.9898	0.9761	0.0137	0.9938	0.9854	0.0083

히스토리 갱신(history update)으로 현재 해를 해 히스토리에 저장하고 만약 같은 해가 해 히스토리에 존재한다면 그 다음 반복에서 발생한 해들의 집합인 B_i와 t를 최적화 모델에 넘겨주게 된다.

3.6 종료 조건 확인

종료 조건은 다음과 같은 2가지 조건이 있다.

1) 기존의 도출된 해와 현재 해가 같으면 알고리즘을 종료한다(수렴).
2) 해당 솔루션이 이전 반복보다 구급차의 수를 증가시키지 않으며 모든 노드가 최소 보장확률을 만족하면 종료한다(보장확률 만족).

첫 번째 종료조건을 만족한다면 최적화 모델에 주어진 목표 가동률이 타당하다는 조건에서 반드시 모든 노드에 대해 보장확률을 만족한다. 두 번째 반복 이상부터 기존의 해를 최대한 변경하지 않으려 하지만 주어진 q_{ij}가 목표 가동률을 초과하면 반드시 해를 변경하기 때문이다. 또한, 주어진 해가 최소 보장확률을 만족시키면서도 설치된 구급차의 수를 증가시키지 않으면 종료하게 된다.

4. 실험 결과

4.1 실험 데이터

실험데이터는 Borras and Pastor[4]에서 사용한 79 노드 케이스에 대하여 실험하였다. Borras and Pastor[4]에서 사용된 케이스는 4개의 수요 시나리오(demand scenario)가 있으며 각각 [0.1365~1.4425], [0.2185~2.3092], [0.0147~4.9852], [0.0264~8.9309] 사이에서 값을 가지고 있다. S는 1.5와 3마일 두 가지 경우가 존재하며 평균 서비스 시간 $\bar{t}$는 0.75시간으로 정의되었다. 또한, 만족해야 할 9개의 최소 보장확률 α가 있으며(0.8, 0.825, 0.85, 0.875, 0.9, 0.925, 0.95, 0.975, 0.99), 총 실험의 경우 수는 72가지이다. 이 모든 실험 데이터는 기존의 연구[4]와 동일하다.

실험의 평가지표로는 구급차의 수, MLR, MLR 만족 여부를 사용하였다. MLR은 최소 보장확률로써, 각 노드별 보장확률 중 최소값을 의미한다. MLR이 α를 넘지 못하면 적어도 한 개의 노드는 요구보장확률을 만족하지 않는다. 요구보장확률 만족은 PLSCP

의 중요 제약으로 이를 만족시키는 것은 이 문제의 핵심 평가지표라고 할 수 있다. 따라서 MLR이 α를 넘는지 여부인 MLR 만족 여부를 중요한 평가지표로써 사용하였다.

본 연구에서 제안한 알고리즘(OptSim)과 비교평가 할 모델로서 Shariat-Mohaymany et al.[12]이 제안한 UBUL과 TUBUL 모델을 선택하였다. Shariat-Mohaymany et al.[12]의 연구는 본 연구와 같이 Borras and Pastor[4]에서 사용한 79노드 케이스에 대하여 실험하였으며, UBUL이 기존에 제안된 다른 모델에 비해 응급차 수 최소화에서 우수한 성능을 가짐을 보여주었다. UBUL은 모든 구급차가 독립적이라는 가정과 각 수요 지점에서 구급차를 동등한 비율로 사용한다는 가정하에 구급차의 수를 최소화하

〈표 2 실험 결과 데이터 $S=1.5$〉

수요 시나리오	α	UBUL			TUBUL			OptSim			
		구급차 수	MLR	MLR 만족	구급차 수	MLR	MLR 만족	구급차 수	MLR	MLR 만족	풀이시간/초
1	0.8	9	0.7713	×	9	0.8065	○	9	0.8152	○	505
	0.825	10	0.8341	○	10	0.8146	×	10	0.8285	○	1643
	0.85	12	0.9505	○	12	0.9516	○	12	0.9614	○	334
	0.875	12	0.9500	○	12	0.9511	○	12	0.9623	○	50
	0.9	12	0.9647	○	12	0.9517	○	12	0.9609	○	71
	0.925	12	0.9538	○	12	0.9501	○	12	0.9614	○	47
	0.95	12	0.9519	○	12	0.9487	×	12	0.9623	○	30
	0.975	12	0.9660	×	12	0.9584	×	13	0.9751	○	2005
	0.99	17	0.9776	×	17	0.9820	×	18	0.9963	○	31
2	0.8	12	0.8820	○	12	0.9069	○	12	0.9271	○	32
	0.825	12	0.9087	○	12	0.9046	○	12	0.9204	○	28
	0.85	12	0.8907	○	12	0.9042	○	12	0.9181	○	28
	0.875	12	0.8942	○	12	0.9035	○	12	0.9214	○	31
	0.9	12	0.9293	○	12	0.9046	○	12	0.9199	○	38
	0.925	12	0.9033	×	12	0.9121	×	12	0.9237	×	127
	0.95	14	0.9443	×	14	0.9369	×	14	0.9501	○	1159
	0.975	18	0.9698	×	18	0.9804	○	18	0.9887	○	46
	0.99	18	0.9859	×	18	0.9827	×	18	0.9871	×	60
3	0.8	17	0.7976	×	17	0.7759	×	18	0.8728	○	695
	0.825	18	0.8371	○	18	0.8372	○	18	0.8965	○	631
	0.85	18	0.8643	○	18	0.8403	×	18	0.8816	○	38
	0.875	18	0.8838	○	18	0.8567	×	18	0.8782	○	26
	0.9	19	0.8913	×	19	0.9007	○	20	0.9053	○	589
	0.925	21	0.9030	×	21	0.9084	×	21	0.9364	○	1707
	0.95	22	0.9047	×	22	0.9425	×	26	0.9744	○	3163
	0.975	24	0.9642	×	24	0.9443	×	25	0.9764	○	826
	0.99	26	0.9778	×	26	0.9719	×	30	0.9927	○	1617
4	0.8	23	0.7909	×	23	0.7762	×	22	0.8013	○	64
	0.825	23	0.7908	×	24	0.7908	×	24	0.8823	○	749
	0.85	24	0.8524	○	24	0.8594	○	24	0.8595	○	326
	0.875	24	0.8510	×	24	0.8645	×	24	0.8780	○	34
	0.9	25	0.8626	×	25	0.8591	×	26	0.9074	○	541
	0.925	28	0.8965	×	28	0.9203	×	27	0.9299	○	1075
	0.95	30	0.9079	×	30	0.9085	×	30	0.9511	○	3148
	0.975	34	0.9325	×	*	*	*	37	0.9861	○	1032
	0.99	35	0.9660	×	35	0.9636	×	38	0.9909	○	4279

는 모델이다. TUBUL은 목적계획법을 이용하여 UBUL에서 구해진 구급차 수를 바탕으로 이동시간(거리) 및 구급차를 최소화하는 모델이다. 본 실험에서 UBUL은 기존 문헌[12]에서 제시한 최적 목적 값(optimal value)을 기반으로 해를 구했으며, TUBUL의 경우 3시간의 시간제한을 두고 해를 구하였다. UBUL의 경우 10~180초 안에 해를 구하였으나, 목적함수가 알려진 최적 목적 값보다 크거나 같다는 제약 하에 풀었으므로 기존 문제의 풀이시간과 다를 수 있다. TUBUL의 경우, 모든 경우에서 3시간 안에 최적 해를 도출하지 못하였다.

<표 2>는 S = 1.5마일일 경우의 4개의 수요시나리오에 대한 실험 결과이다. 위 실험 데이터를 살펴보면, OptSim의 경우 94.4%의 MLR 만족률을 보이고 있다. 반면 UBUL의 경우 41.7%, TUBUL은 38.9%의 MLR 만족률을 보이고 있다. 또한, 2가지의 경우를 제외하고는 MLR을 만족시킬 때, OptSim이 UBUL과 TUBUL과 동일한 개수의 구급차 혹은 더 적은 개수로 만족시키는 것을 확인할 수 있다. 위의 표에서 *은 3시간의 시간제한 안에 해를 찾지 못했음을 의미한다. 본 연구에서 도출한 UBUL의 MLR은 Shariat-Mohaymany et al.[12]에서 도출한 UBUL의 MLR가 다른데, 이는 다음과 같은 2가지 이유 때문으로 판단된다. Shariat-Mohaymany et al.[12]의 연구에서는 MLR의 산출을 위해 시뮬레이션이 아닌 Borras and Pastor[4]에서 제안된 수식을 사용하였으며, 이 둘 간의 오차가 발생할 수 있다. 2번째는 Shariat-Mohaymany et al.[12]의 실험에서 도출한 최적해와 본 연구의 실험에서 도출한 최적해가 동일한 최적값을 갖는 다른 해일 수 있다. 본 연구의 실험은 UBUL과 TUBUL이 MLR를 만족시킬 수 있는 최적해를 도출할 수 있으나 이를 반드시 보장할 수 없다는 사실을 보여준다.

<표 3>은 S = 3.0마일일 경우의 4개의 수요 시나리오에 대한 실험 결과이다. OptSim의 경우 72.22%로 MLR을 만족시킴을 알 수 있다. 반면에, UBUL의 경우 44.44%, TUBUL은 30.56%의 MLR 만족률을 보이고 있으며 OptSim이 UBUL보다 1.63배, TUBUL보다 2.36배 개선되었음을 확인할 수 있다. 2개의 경우를 제외하고, MLR을 만족하는 경우 OptSim이 다른 두 모델에 비해 동일한 구급차 수 혹은 더 적은 구급차 수를 도출하였다. 실험을 통해 OptSim이 최소보장확률인 MLR을 만족시킴에 있어 UBUL이나 TUBUL보다 확실히 개선되었음을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해 구급차의 설치여부나 거리에 따라 변화하는 예상 구급차 할당 확률(q_{ij})를 정교하게 산출함으로써 보장확률을 더 만족시킬 수 있는 해답을 도출할 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 연구의 한계점

이 논문은 각 수요지점에서 주어진 최소 보장확률을 만족하게 하기 위한 구급서비스 차량 알고리즘을 제안하였다. 구급차의 설치 여부나 거리에 따라 변화하는 예상 구급차 할당 확률(q_{ij})의 특징을 고려하기 위해 시뮬레이션과 최적화 모형이 번갈아가며 돌아가는 시뮬레이션 기반의 최적화 모형을 적용하였다. 본 연구에서 제안한 모형은 예상 구급차 할당 확률에 대한 정확한 산출이 가능함으로써 기존 문헌보다 많은 경우에서 보장 확률을 만족시켰다. 기존 문헌의 결과가 보장확률을 만족시켰을 시, 본 모형은 거의 동일한 구급차 수에서 보장확률을 만족시켰으며, 기존 문헌의 결과가 보장확률을 만족시키지 못했을 시에는, 동일한 수로 보장확률을 만족시키거나 약 2~3대의 구급차를 증가시킴으로써 보장확률을 만족시키는 결과를 도출하였다. 본 논문의 한계점은 모든 노드의 필요한 구급차의 수와 모든 구급차의 목표 가동률이 동일하다고 가정한 것이다. 이러한 가정의 보완을 통해 더욱 개선된 해를 도출할 수 있을 것이라 기대된다. 나아가 본 알고리즘은 반복이 증가함에 따라 반드시 보장확률이 증가하는 알고리즘이 아닌 시행착오를 통해 보장확률을 만족시키는 해를 찾는 특징이 있다는 점에서 보완의 여지가 있다. 마지막으로 목표 가동률에 대한 개선을 통해 본 알고리즘의 실험 결과를 더욱 개선할 수 있을 것이라 판단한다.

〈표 3〉 실험 결과 데이터 S = 3.0

수요 시나리오	α	UBUL			TUBUL			OptSim			
		구급차 수	MLR	MLR 만족	구급차 수	MLR	MLR 만족	구급차 수	MLR	MLR 만족	풀이시간/초
1	0.8	4	0.8492	○	4	0.8367	○	4	0.8430	○	18
	0.825	4	0.8589	○	4	0.8409	○	4	0.8424	○	22
	0.85	5	0.8609	○	5	0.8558	○	5	0.8493	×	118
	0.875	5	0.8862	○	5	0.8658	×	5	0.8768	○	66
	0.9	6	0.9061	○	6	0.8690	×	6	0.8955	×	119
	0.925	7	0.9254	○	7	0.9181	×	6	0.9478	○	317
	0.95	7	0.9656	○	7	0.9669	○	6	0.9551	○	24
	0.975	7	0.9637	×	7	0.9629	×	7	0.9635	×	99
	0.99	8	0.9727	×	8	0.9736	×	8	0.9903	○	28
2	0.8	6	0.7740	×	6	0.8280	○	6	0.8019	○	389
	0.825	7	0.8346	○	7	0.7786	×	6	0.8775	○	316
	0.85	7	0.8096	×	7	0.8167	×	6	0.8855	○	36
	0.875	7	0.9079	○	7	0.9088	○	6	0.8854	○	22
	0.9	7	0.9120	○	7	0.9108	○	7	0.9030	○	58
	0.925	7	0.9128	×	7	0.9089	×	8	0.9336	○	1515
	0.95	8	0.9277	×	8	0.9274	×	8	0.9398	×	1644
	0.975	9	0.9818	○	9	0.9738	×	9	0.9767	○	174
	0.99	10	0.9845	×	10	0.9754	×	10	0.9813	×	3272
3	0.8	12	0.8542	○	12	0.8832	○	11	0.8037	○	506
	0.825	12	0.8274	○	12	0.8465	○	11	0.8392	○	331
	0.85	12	0.8187	×	12	0.8366	×	12	0.8508	○	57
	0.875	12	0.8689	×	12	0.8542	×	14	0.9231	○	668
	0.9	13	0.9107	○	13	0.8664	×	13	0.9245	○	378
	0.925	13	0.9173	×	13	0.8842	×	14	0.9332	○	1859
	0.95	14	0.9158	×	14	0.8941	×	15	0.9350	×	3536
	0.975	16	0.9486	×	16	0.9151	×	17	0.9816	○	1885
	0.99	16	0.9786	×	16	0.9500	×	18	0.9761	×	820
4	0.8	17	0.8091	○	17	0.8273	○	17	0.8404	○	586
	0.825	18	0.8121	×	18	0.8428	○	17	0.8458	○	422
	0.85	18	0.8566	○	18	0.8083	×	17	0.8530	○	324
	0.875	19	0.8371	×	19	0.8574	×	18	0.8786	○	369
	0.9	19	0.8320	×	19	0.8626	×	19	0.9161	○	542
	0.925	20	0.8579	×	20	0.8680	×	20	0.9162	×	1059
	0.95	21	0.8952	×	21	0.8755	×	22	0.9547	○	1080
	0.975	22	0.9218	×	22	0.9081	×	24	0.9577	×	1927
	0.99	23	0.9570	×	23	0.9380	×	26	0.9854	×	2248

참 고 문 헌

[1] 이영우, 장훈, 이태식, “병원 전 응급의료체계 선진화를 위한 응급차 최적 대수 산출에 관한 연구”, 대한산업공학회 춘계학술대회논문집, (2010), pp.1276-1283.

[2] 최명복 김봉경 한태용, “응급시설 위치 문제”, 「한국인터넷방송통신학회논문지」, 제11권 제6호(2011), pp.183-191.

[3] Ball, M. and F. Lin, “A reliability model applied to emergency service vehicle location,” *Operations Research*, Vol.41, No.1(1993), pp. 18-36.

[4] Borras, F. and J.R. Pastor, “The ex-post

evaluation of the minimum local reliability level : an enhanced probabilistic location set covering model," *Annals of Operations Research*, Vol.111(2002), pp.51-74.

[5] Iannoni, A.P., R. Morabito, C. Saydam, "An optimization approach for ambulance location and the districting of the response segments on highways," *European Journal of Operational Research*, Vol.195(2009), pp.528-542.

[6] Marianov, V. and C. ReVelle, "The Queuing Probabilistic Location Set Covering Problem and some extensions," *Socio-Economic Planning Science*, Vol.28(1994), pp.67-178.

[7] Rajagopalana, H.K., C. Saydamb, and J. Xiaoc, "A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances," *Computers and Operations Research*, Vol.35 (2008), pp.814-826

[8] ReVelle, C. and K. Hogan, "A reliability constrained siting model with local estimates of busy fractions," *Environment and Planning B : Planning and Design*, Vol.15, No.2(1988), pp.143 - 152.

[9] ReVelle, C. and K. Hogan, "The maximum reliability location problem and alpha reliable p-center problem : derivatives of the probabilistic location set covering problems," *Annals of Operations Research*, Vol.18(1989b), pp.155-174.

[10] ReVelle, C. and K. Hogan, "The maximum availability location problem," *Transportation Science*, Vol.23, No.3(1989a), pp.192-200.

[11] Schmid, V. and K.F. Doerner, "Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times," *European Journal of Operational Research*, Vol.207(2010), pp.1293 -1303

[12] Shariat-Mohaymany, A., M. Babaei, S. Moadi, and S.M. Amiripour, "Linear upper-bound unavailability set covering models for locating ambulances : Application to Tehran rural roads," *European Journal of Operational Research*, Vol.221(2012), pp.263-272.