

# 병원 외 심장마비 적시 대응을 위한 자동심장충격기(AED) 배치 최적화

손정민 · 임정호 · 김도원<sup>†</sup>

부산대학교 산업공학과

## Optimizing AED Placement for Timely Response to Out-of-Hospital Cardiac Arrests

Jeongmin Son · Jeongho Im · Dowon Kim

Department of Industrial Engineering, Pusan National University

The number of out of hospital cardiac arrests has been on the rise for a variety of reasons. While cardiac arrest poses a serious threat to life, the timely use of an Automated External Defibrillator (AED) can greatly increase a patient's survival rate. The distance between the AED and the site of the cardiac arrest can impact the patient's survival rate. As such, when determining the location of AEDs, it is crucial to take into account the inverse relationship between distance and response time. In situations where multiple cardiac arrests occur in close proximity, it may be necessary to have several AEDs available at a single location. This study examined the impact of repositioning AEDs based on their distance from patients and the potential need for multiple devices at one location. By comparing these results with the current placement of AEDs, we found that strategic positioning can improve survival rates and better prepare for multiple simultaneous incidents.

**Keywords:** Out of Hospital Cardiac Arrest(OHCA), Automated External Defibrillator(AED), Facility Location, Fractional Coverage, Simultaneous Incidents

### 1. 서론

최근 들어 전 세계적으로 야외에서 발생하는 급성 심정지(OHCA, Out of Hospital Cardiac Arrest) 발생 횟수가 기하급수적으로 늘고 있다(KDCA, 2022). 급성심정지는 환자의 생명과 직결되므로 빠른 시간 내에 적절한 조치를 취하지 않으면 목숨을 앗아갈 수 있는 심각한 질병이다. Won and Go(2016)에 따르면 급성 심정지가 발생했을 시, 골든 타임이라고 불리는 4분 혹은 5분 내에 심폐소생술을 실시하고 자동심장충격기(AED, Automated External Defibrillator)를 사용하면 환자의 생존율을 급격히 올릴 수 있다고 한다. 심정지 발생 환자의 생존율을 상

승시킬 수 있음에도 불구하고, 현재 대한민국의 AED의 사용률은 저조하다(KDCA, 2022). AED 사용에 대한 부족한 교육, 인식과 같은 이유도 있지만 접근성을 고려하지 않은 AED의 배치가 대표적인 이유다(KCA, 2018). 따라서 심정지 환자 발생 시 골든 타임 내에 조치를 하기 위해, 현실적인 요소들을 고려하여 적절한 위치에 AED를 배치할 필요가 있다.

응급 의료 서비스(Emergency medical service) 설비 배치와 관련된 선행연구들은 주로 구급차(Ambulance)와 같은 설비 위주로 진행되었다. 앰블런스는 응급 설비 중 이동 설비에 해당한다. 거리뿐만 아니라 운행속도, 교통상황 등 다양한 요소들이 커버 확률에 영향을 끼친다. 그러나 AED는 고정설비이기 때문에 초기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(테이터사이언스융합인재양성)의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00242528).

<sup>†</sup> 연락저자 : 김도원 교수, 46241 부산광역시 금정구 부산대학교 63번길 2 부산대학교 산업공학과, Tel : 051-510-2303, Fax : 051-512-7603, E-mail : down.kim@pusan.ac.kr

2023년 6월 28일 접수; 2023년 7월 31일, 2023년 8월 27일 수정본 접수; 2023년 9월 19일 게재 확정.

위치에 커버 확률이 더 많은 영향을 받는 경향이 있다. 고정설비 또한 교통상황과 같은 요소에 영향을 받지만 다시 배치를 하지 않는 한, 입지를 바꿀 수 없기에 거리에 더욱 엄격하게 근거하여 입지를 선정할 필요가 있다. 기존 연구에서는 설비 지점으로부터 사전에 정해진 반경(거리) 내에 존재하면 수요가 커버된다고 간주하는 경우가 많았다. 그러나 정해진 거리 척도 내에 있다 해도 현실에서의 발생할 수 있는 다양한 불확실성을 고려한다면, 설비가 커버하는 확률은 반경 내에 있는 수요 지점과의 거리에 따라 상이하다. 이 점을 고려한다면 확정적인 경우에 대비하여 더욱 효율적인 설비 배치를 할 수 있다.

한편 최근 들어 국한된 지역에서 동시다발의 다수 환자가 발생하는 ‘국지적 재난상황(다중 손상사고)’에 대한 관심이 커지고 있다. 국지적 재난 발생 시 의료자원의 부족 상황을 초래할 수 있다. 이러한 재난은 대부분 발생 이전에 각종 정책과 지침들이 효과적이었는지 평가하는 것이 어려우며, 재난 당시 현장에서 바로 측정하기도 어렵다. 실제로 정책이나 지침의 효과성에 대해서는 사후에 교훈(Lesson)의 형태로 얻게 된다(Kim, 2021). 최근 국내에서 발생한 국지적 재난상황들은 이를 반증하는 사례라고 할 수 있으며 이에 대한 대비가 되어야 함은 분명하다. 본 연구에서는 국지적 재난으로 인해 하나의 지점에 여러 개의 AED가 동시에 필요한 상황에 대비할 수 있는 모델을 제시하고자 한다. 이는 앞서 언급하였던 최대한 넓은 범위의 지역을 커버해야 하는 문제 상황과 배치된다. AED를 비롯한 다른 설비에서도, 수요 최대화의 관점에서, 수요가 적은 지점을 한번 커버하는 것보다, 수요가 많은 지점을 여러 번 커버하는 것이 전체 수요에 대한 커버율을 향상시킬 수 있다. 국지적 재난 상황을 고려한 야외 심정지(OHCA)의 경우에, 지점별로 수요(발생 확률)의 편차가 크기 때문에 이를 고려하여 수요 발생이 잦은 수요 지점이 여러 개의 설비에 의해 커버되는 것이 합리적일 수 있다. 본 연구에서는 하나의 수요 지점이 하나의 설비에만 커버되는 것이 아닌, 여러 개의 설비에 의해 커버되는 다중 커버(Multiple cover) 경우를 고려함으로써, 심정지 발생 수요에 대한 커버율을 향상시키려고 한다.

제2장에서는 앞서 이뤄진 선행연구를 분석하고 어떤 목적을 달성하고자 했는지 파악해 본다. 제3장에서는 해당 연구에서 제시하는 모델의 자세한 설명과 수식을 제시하며 제4장에서는 해당 연구에 사용될 데이터 및 파라미터 등에 대한 소개를 한다. 제5장에서는 도출된 결과를 분석하여 해당 연구의 효과성을 입증할 것이며 제6장에서는 연구를 정리하며 결론을 내린다.

## 2. 선행연구

수리적 모델링을 바탕으로 한 최적의 응급 설비 입지 선정에 대한 연구는 지속적으로 이루어져왔다. 기존의 설비 입지 선정에 사용되는 대표적인 기법으로는 MCLP(Maximal covering location problem)와 LSCP(Location set covering problem)가 있

다. 먼저 ReVelle *et al.*(1974)이 제시한 MCLP는 제한된 자원 내에서 정해진 기준(거리, 시간) 내의 포함되는 커버리지(Coverage)를 최대화하는 설비 배치를 찾는 문제이며 아래와 같은 형태를 가진다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } Z^M = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h_i y_{ij} \\ & \text{subject to } y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall i, \forall j \\ & \sum_{j \in J} x_j = p \\ & y_{ij}, x_j \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

여기서  $I$ 는 수요 지점 노드의 집합,  $J$ 는 설비 후보 지점의 집합을 뜻한다. 또한  $h_i$ 는 수요지점  $i$ 에서의 잠재적인 수요,  $p$ 는 설치 가능한 설비의 총 대수를 의미한다.  $x_j$ 는 설비 후보 지점  $j$ 에 설비의 설치 여부,  $y_{ij}$ 는 수요 지점  $i$ 가 설비  $j$ 에 의해 커버가 되었는지에 대한 여부를 나타낸다.

한편 Toregas *et al.*(1971)이 제시한 LSCP 모델에서는 모든 수요 지점을 한 번 이상 커버하면서 설치되는 설비의 수를 최소화하고자 한다. 하나의 설비가 커버 가능한 반경 내에 존재하는 여러 수요 지점을 커버할 수 있게 하여 설치되는 설비 대수의 최소화라는 목표를 달성하는 방식으로 다음과 같은 형태의 문제로 잘 알려져 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } Z^L = \sum_{j \in J} x_j \\ & \text{subject to } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1 \quad \forall i \\ & x_j \in \{0, 1\}, \end{aligned}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{수요 지점 } i \text{가 설비 } j \text{의 cover 가능한 반경 내에 존재} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

이러한 대표적인 두 입지 선정 기법인 MCLP, LSCP를 바탕으로 현실에서의 더욱 다양한 요소들을 고려하여 발전적인 모델들이 제시되어왔다. 본 연구에서 제시한 방법론과 두 가지 대표적인 방법론 또한 비교해 보고자 한다.

위의 두 가지 기본 모델을 바탕으로 Daskin(1983)은 모든 설비가 수요에 항상 가용한 상태가 아닐 수 있다는 더욱 현실적인 가정을 고려하기 위해 불가용 기간(Busy period)라는 확률 개념을 도입하였다. 모든 설비의 불가용 기간이 동일하다고 가정하여, 목적식에 불가용 기간을 도입함으로써 시간 제약(Time threshold)을 준수하는 커버 수준의 기댓값(Expected coverage)을 최대화하는 설비 배치를 도출하였다. Hogan and ReVelle(1986)은 하나의 시설이 둘 이상의 설비에 의해 커버 가능한 다중 커버를 고려하였다. 하나의 설비 지점에 두 개 이상의 설비가 설치될 수 있다고 가정하여 백업 커버(Backup cover)의 개념을 도입하였다. 설치되는 설비의 숫자를 최소화하는 것을 우선으로 백업 커버를 최대화하는 계층적인 목적식을 가진 모델과 첫 번째 커버와 두 번째 커버의 상충(Tradeoff)

을 가중치 조정을 통해 커버되는 수요를 최대화하는 모델을 제시함으로써 각각의 효과를 입증하였다. ReVelle(1989)는 기회 제약(Chance constraint)를 도입하여 사전에 정해진 시간 한계점 내에서 특정 확률 이상 수준의 서비스를 보장받도록 수요 지점을 커버하는 설비 지점을 결정하고자 하였다. 기존 연구와 달리 각 설비마다 상이한 불가용 기간을 고려하여 더욱 현실적이고 높은 커버율을 나타내는 배치를 제시하였다. Van den Berg *et al.*(2016)는 사전에 정해진 시간 한계점 내에 구급차가 설비 설치지점에서 수요 지점까지 도달할 수 있는 확률을 고려한 부분적 커버리지(Fractional coverage)라는 개념을 도입한 설비 배치 모델을 제시하였다. 따라서 현실의 확률적인 요소들이 고려됨으로써 확정적인 모델과 비교했을 때 수요가 과대 추정되는 것을 방지하였다. Grot *et al.*(2021)은 Daskin이 제시한 논문에서 각 설비가 독립적으로 불가용 기간이 동일하다는 가정, 설비들의 의존성(Interdependencies)을 고려하여 변형한 더욱 현실적인 설비 배치 모델을 제시하였다. 해당 논문에서는 ReVelle(1989)와 마찬가지로 장소 별로 상이한 불가용 기간을 계산하는 공식을 사용했고 추가로 각 앰블런스가 불가용할 확률에 대한 상한선(Upper bound) 제약을 추가하여 더욱 현실적이고 향상된 결과를 제시하였다. Marianov and ReVelle(1996)는 대기행렬 이론을 이용해 기존에 서버가 독립하다는 가정을 완화하여 서버거리 종속적인 관계를 고려하였다. 또한 각 수요 지점에 대한 서비스 가능성이 특정 수준의 신뢰성(Reliability)을 만족해야 한다고 정의하였다. 앞선 연구들과 마찬가지로 현실 속 여러 요인의 불확실성을 고려하여 거리가 확률적이라고 가정하였다.

Rajagopalan and Cem(2009)는 시스템 전체 응답 거리를 최소화하면서 적용 범위의 요구사항을 충족할 수 있는 구급차의 위치를 도출하는 모델을 소개하였다. 커버 변경 안에서 응답 및 이동거리 서비스 시간을 줄이는 문제를 다루었다. 응급 설비 특성상 거리에 가장 큰 영향이 있다는 것을 시사하였다. Schilling(1980)은 고정적인 설비 특성상 시간에 따라 변동하는(Dynamic)한 외부 시스템과의 충돌이 존재함을 고려하였다. 현재 상황에 맞춘 최적의 의사결정이 변화된 미래에는 최적이지 아니라는 점을 시사하였으며 고정설비 특성상 이동할 수 없기에 미래에 초점을 두어 모델링 할 소요가 있음을 반영하여 수립하였다. 이러한 두 지점을 모두 고려한 다중 목적함수 모델(Multi-objective function model)을 제시하였다.

앞서 언급한 선행연구를 비롯하여, 대부분의 EMS(Emergency medical services) 설비 배치 연구는 구급차를 대상으로 이루어져왔다. 사실상 EMS 중에서도 AED는 구급차와는 이동성을 비롯하여 다소 다른 특징을 가지므로, AED의 특성에 초점을 맞춘 연구들에 대한 검토가 필요하다. Metrot *et al.*(2019)은 실제 거리(Realtime distance) 거리 척도를 사용함으로써, 현실에서의 교통체증과 같은 불확실성을 고려하여 시간대마다 같은 설비 지점에서 수요 지점까지 도달할 수 있는 시간을 상이하게 보였다. 따라서 같은 지점이더라도 시간대별로 커버되는

정도를 다르다고 가정하여 시점별로 커버되는 수요에 상수( $\alpha_1 = 5$ )를 곱한 값에서, 수요 지점까지 도달하는 시간에 상수( $\alpha_2 = 1$ )를 곱한 값의 차이를 최대화하는 설비 배치 모델을 제시하였다. Dahan *et al.*(2016)은 AED 배치에 대한 전략별 분석을 통해 최적의 수와 배치를 도출하고자 하였다. 지침 기반 전략, 그리드 기반 전략, 랜드마크 기반 전략을 예로 들며 연구를 진행하였다.

Waalewijn *et al.*(2001)은 수요 지점과의 거리에 따라 생존율이 지수적으로 감소함을 제시하였다. 또, 야외 급성심정지(OHCA)가 목격된 즉시 바로 대처하는 것이 아닌 현실에는 대응하기 전 소요 시간, 목격자의 유무, 대처에 따른 생존율이 상이함을 반영하여 케이스스터디를 통해 다양한 요소들을 고려한 생존율에 대한 분석을 진행하였다. Chan(2016)은 감소 커버리지 함수(Decaying coverage function)을 사용함으로써 현실적 요소를 반영하여 수요 지점과의 거리 증가가 커버율 감소와 직결됨을 시사하였다. 또한 동일 수요 지점을 여러 설비가 커버할 때 어떠한 설비를 기준으로 커버할지에 따라 다중 응답자, 단일 응답자 최선 경우, 단일 응답자 최악 경우를 분리하여 모델을 분석하였다.

앞서 논의한 설비 배치 모델의 기본이 되는 MCLP, LSCP를 근간으로 현실적인 요소들을 고려한 여러 모델들이 제시되어 왔으나 각 연구들에서 제시한 모델의 목적함수의 형태가 달라 각 모델에서 구한 해들의 성능을 비교하기가 어려운 것이 사실이다. Chan(2016)에서 여러 모델들을 통일된 하나의 목적함수 형태로 비교 분석을 시도했으나 여기서도 커버리지 수준(Level of coverage)이라는 다소 해석하기 어려운 수치로 환산하여 비교한 바 있다. 예를 들어, 두 모델을 비교함에 있어서 커버리지 수준이 각각 10, 20이 나왔다고 했을 때, 커버리지 수준이 높은 모델이 더 좋을 것이라고 짐작해 볼 수 있으나 커버리지 수준이 2배라는 점이 실제로 어떤 의미를 가지는지에 대해서는 해석하기가 어렵다. 본 연구에서는 확률적인 접근을 통해 의미를 해석할 수 있는 목적함수를 제안하고, 앞서 언급했던 지점 간 거리에 따라 상이해지는 반응 시간을 고려한 부분적 커버리지 및 다수의 응급상황이 발생할 수 있는 형태의 모델을 제시한다. 이를 통해 기존 설비 배치에 대해 이해할 수 있는 수치로 평가를 할 수 있도록 하며, 이러한 모델을 혼합 정수 선형계획법(Mixed integer linear programming)으로 수식화하여 최적 배치를 도출한다. 끝으로 제안한 모델을 기반으로 실제 사례의 분석을 통해 현재 AED 배치의 적정성을 평가하고, 재배치를 통한 및 추가 배치 가능 지점으로 인한 개선 정도를 정량적으로 분석해 보고자 한다.

### 3. 연구모델

#### 3.1 모델설명

앞서 언급된 구급차를 대상으로 한 대다수의 연구들은 특정 구급차가 다른 응급상황에 대응하고 있어 가용한 상태가

아님을 뜻하는 불가용 기간이라는 개념을 도입하여 더욱 현실적인 경우를 고려하고자 하였다. 구급차는 운전자가 상황에 맞게 속도를 조절할 수 있는 이동 가능한 설비라는 특성을 가진다. 그러나 AED는 주변인이나 관계자가 직접 설비 위치까지 가서 응급상황이 발생한 지점(수요 지점)까지 AED를 가져와야 하므로 구급차와 비교했을 때 이동에 대한 제약을 가진다. 또한, 수요 발생 상황의 관점에서 구급차의 경우 긴급 상황뿐만 아니라 다양한 상황에 사용되는 경향이 있으나 AED는 심정지가 발생하였을 때만 소요가 있다. 앞서 제시한 차이에 따라, 보다 사용 소요가 많고, 이동이 더욱 편리한 유연한 설비인 앰블런스는 동일한 시점에 가용 중 일 수 있는 상황이 많으므로 불가용 기간 개념을 도입하는 것이 타당하다. 그러나 AED의 경우 앰블런스에 비해 사용 소요가 많지 않으므로 불가용 기간이라는 확률성 대신 거리에 따라 변하는 생존 확률을 도입한다. 이와 같이 AED의 특성에 더욱 적합한 확률성을 고려해 생존율을 최대화하는 배치를 하고자 한다.

Van den Berg *et al.*(2016)은 수요 지점들이 하나의 설비로부터 같은 거리 표준 내에 존재하더라도 설비 설치지점에서 수요 지점까지의 거리에 따라 커버할 수 있는 확률이 상이해지는 부분적 커버리지 개념을 도입하여 수요의 과대 추정을 방지하는 더욱 현실적인 설비 배치 모델을 제시하였다. 본 연구에서도 부분적 커버리지의 도입을 통해 거리에 반비례하는 생존 확률을 고려하여 생존율을 향상시킬 수 있는 더 현실적인 배치를 하고자 한다. De maio *et al.*(2003)과 Waalewijn *et al.*(2001)은 AED 설치 지점과 수요 지점 간의 거리에 비례하는 반응 시간이 환자의 생존율과 지수적으로 감소하는 관계를 가짐을 제시했다. 해당연구에서도 선행연구에서 제시한 감소 커버리지 함수를 사용하여 거리에 따른 생존 확률을 고려함으로써 현실성을 고려한 설비 배치 모델을 제시하고자 한다.

AED를 설치하는데 필요한 예산은 제한적이기 때문에 (Emedia, 2021) 하나의 AED로 여러 지점의 수요를 커버하는 설비 배치를 하는 것이 효율적이다. Hogan and ReVelle(1986)에서 언급한 다중 커버의 개념을 알아볼 필요가 있다. 다중 커버는 수요 지점이 둘 이상의 설비의 거리 표준 내에 존재하는 것을 의미하며, 보다 정확하게 수요 노드가 기본 요구 사항을 초과하여 커버되는 횟수라고 정의했다. 본 연구에서도 다중 커버 개념을 사용하는 것에 추가로, 수요가 많이 발생하는 지점에 한 개 이상의 설비가 할당될 수 있게끔 한다.

### 3.2 수리 모델

해당 모델은  $N$ 개의 수요 지점과  $M$ 개의 설비 후보 지점이 있고 각 수요 지점에서 발생하는 수요는 상이하다고 가정한다.

- 인덱스(Indices & Sets)

- $i \in I$ : 수요 지점 노드의 집합
- $j \in J$ : 설비 후보 지점의 집합
- $k \in K$ : 심정지 발생횟수의 집합

- 파라미터(Parameters)

$d_{ij}$  = 수요 지점  $i$ 와 설비 후보 지점  $j$ 간의 거리  
 $d_{\max}$  = 모든 수요 지점  $i$ 와 설비 후보 지점  $j$ 간 거리의 최댓값

$$w_{ij} = \begin{cases} e^{-\alpha d_{ij}} & (0 \leq d_{ij} \leq S_1) \\ 0 & (d_{ij} > S_1) \end{cases} = \text{수요 지점 } i \text{와 설비 후보 지점 } j \text{간 거리에 따라 반비례하는 감소 커버리지 함수(생존율)}$$

$h_i$  = 수요 지점  $i$ 에서의 수요

$p$  = 설치가능한 총 설비(AED) 대수

$S_k = k_{th}$  커버의 거리표준(Distance standard)

$M$  = 인공변수(Artificial Variable)

- 결정변수(Decision Variable)

$x_j$  = 설비 후보 지점  $j$ 에 설치된 설비 개수,  $x_j$ 는 정수

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{수요 지점 } i \text{가 설비 } j \text{에 의해 } k_{th} \text{ cover} \\ 0 & \text{아닌 경우(otherwise)} \end{cases}$$

$Z_{ik}$  = 수요 지점  $i$ 에서 발생한  $k$ 건의 심정지 환자가 가장 가까이 설치된 설비 지점의 AED에 의해 생존할 확률

$t_{ijk}$  =  $Z_{ik}$  도출을 위해 사용되는 변수

본 연구에서는 앞서 언급하였듯, 확률적인 접근을 통해 의미를 해석할 수 있는 목적함수를 제안한다. AED 설비 특성상 빠른 시간 내에 적절히 활용된다면, 심정지 환자의 생존율 향상에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 거리를 고려한 적절한 위치에 AED를 배치하여 심정지 환자의 생존율을 향상시키고자 MILP 모델의 목적식을 심정지 환자의 생존율로 설정한다. Chan(2016)가 제시한 감소 커버리지 함수( $w_{ij}$ )를 도입해 설비 지점과의 거리가 증가함에 따라 환자의 생존 확률이 연속적으로 감소할 수 있도록 한다. 이를 통해 목적식에서 부분적 커버리지를 고려할 수 있다. 설비 지점과의 거리에 영향을 받는 심정지 환자의 생존율에 조건부 확률을 도입하여 확률적인 접근을 하고자 한다. 야외 심정지 발생 시 환자의 생존율에 조건부 확률을 도입했을 때, 특정 수요 지점  $i$ 에서 심정지가 1건 발생했을 시의 생존율은 다음과 같다.

$$P[i \text{에서 심정지 1건 발생} \cap \text{생존}] = P[i \text{에서 심정지 1건 발생}] \times P[\text{생존} \mid i \text{에서 심정지 1건 발생}]$$

모든 수요 지점에서 심정지가 1건 발생했을 시의 생존율은 다음과 같다.

$$\sum_{i \in I} P[i \text{에서 심정지 1건 발생}] \times P[\text{생존} \mid i \text{에서 심정지 1건 발생}]$$

앞서 언급한 동시다발의 다수 환자가 발생하는 ‘국지적 재난상황’의 경우를 고려할 때, 하나의 수요 지점  $i$ 에서 심정지가  $k$ 건 발생하는 경우도 따져보아야 한다. 이에 대한 식은 다

음과 같다.

$$P[i \text{에서 심정지 발생} \cap \text{생존}] = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i \in I} P[i \text{에서 심정지 } k \text{건 발생}] \times P[\text{생존} \mid i \text{에서 심정지 } k \text{건 발생}]$$

이때 특정 수요 지점  $i$ 를 커버할 수 있는 거리 내에 AED가 여러 개 존재하는 경우 심정지 발생 시, 발생지점과 가장 가까운 AED에 의하여 수요가 커버된다고 가정하는 것이 합리적이다. 따라서 가장 가까운 설비에 의해 커버될 수 있는 확률에 수요 지점의 커버 여부를 곱한 값을 생존율로 간주하여 직전에 언급한 확률적 접근을 수식화하면 다음과 같다.

$$\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i \in I} P[i \text{에서 심정지 } k \text{건 발생}] \times \max_{j \in J} \{w_{ij} y_{ijk}\} \quad (1)$$

현실에서의 심정지 발생 횟수는 지점별로 상이하다. 이를 반영하기 위해 특정 수요 지점  $i$ 에서의 심정지 발생 확률을 전체 수요 대비 지점  $i$ 의 수요 비율로 산정한다. 만약 수요 지점  $i$ 에서의 심정지 발생 확률을 아는 상황이면, 앞서 제시한 확률을 대체하여 생존율을 파악할 수 있다. (1)을 목적식으로 사용하게 되면 효율적인 문제 해결이 어려우므로, MILP로 효율적인 문제 해결을 위해 (1)을 다음과 같이 변환한다.

$$\max_{j \in J} \{w_{ij} y_{ijk}\} = Z_{ik}$$

특정 수요 지점  $i$ 에서 심정지가  $k$ 번 발생하였을 때, 설치된 지점 중 가장 가까운 AED  $j$ 에 의해 생존할 확률을  $Z_{ik}$ 로 정의하였다. 이는 Big-M Method의 도입으로 MILP로 변환할 수 있으며 다음 장에서 자세하게 다룬다.

- 목적식(Objective Function)

$$\text{Maximize } Z = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i \in I} P[i \text{에서 심정지 } k \text{건 발생}] \times Z_{ik}$$

- 제약식(Constraints)

$$\sum_{k=1}^{\infty} y_{ijk} - x_j \leq 0 \quad \forall i, \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (3)$$

$$y_{ijk+1} - y_{ijk} \leq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (4)$$

$$y_{ijk} \leq 1 - \frac{d_{ij} - S_k}{d_{\max}} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (5)$$

$$Z_{ik} \geq w_{ij} y_{ijk} \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (6)$$

$$Z_{ik} \leq w_{ij} \cdot y_{ijk} + M(1 - t_{ijk}) \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} t_{ijk} = 1 \quad \forall i, \forall k \quad (8)$$

목적식은 부분적 커버리지 도입을 통해 각 수요 지점에서 가장 가까운 설비 기준으로 커버되도록 하여 생존율을 최대화한다. 이때 각 수요 지점에서 동시간대 발생 횟수의 발생률을 고려해 생존율을 산출한다. 또한 국지적 재난 상황에 대비한 개념이  $k_{th}$  커버로 인한 생존율이라고 할 수 있다. 제약식 (2)는 특정 수요 지점이 설비 지점  $j$ 에 의해 커버 될 때, 설비 지점  $j$ 에 설치된 대수를 초과하는 횟수만큼 커버될 수 없다는 제약이다. (3)은 사전에 정해진 설치될 수 있는  $p$ 개의 대수만큼만 모든 설비 후보 지점에 걸쳐 설치될 수 있도록 한다. (4)는  $k_{th}$  커버가 활성화된 후에  $k+1_{th}$  커버가 활성화될 수 있게 만드는 제약이다. 해당 제약을 통해 관대한 거리 표준( $S_k$ )이 적용되어 최소한의 서비스 수준을 보장하는  $k_{th}$  커버가 활성화된 상황에서, 엄격한 거리 표준( $S_{k+1}$ )이 적용되는 부가적인  $k+1_{th}$  커버가 활성화되도록 보장한다. (5)는 수요 지점  $i$ 와 설비 후보 지점  $j$ 간의 거리가 사전에 정해진 거리 표준을 벗어나면 커버를 하지 못하게 만드는 제약이다. 또,  $y_{ijk}$  변수의 이진성(Binary)을 보장하기 위해서 우항의 분모에 모든 수요 지점  $i$ , 설비 후보 지점  $j$ 간 거리의 최댓값인  $d_{\max}$ 가 필요하다. (6), (7)은 수요 지점  $i$ 에서 심정지가  $k$ 번 발생했을 때 부분적 커버리지 함수를 고려하여, 설치되는 지점 중 가장 가까운 설비로부터의  $k_{th}$  커버에 의한 수요 지점  $i$ 에서의 생존율을  $Z_{ik}$ 으로 정의한다. 이때 Big-M Method를 통해 가장 가까운 지점에 의해 커버되어 생존율을 최대화 할 수 있도록 한다. (8)는  $t_{ijk}$ 의 합이 1이 되도록 하여 (7)의 인공 변수를 제거함으로써 가장 가까운 설비  $j$ 에 의한 생존율을 도출한다. 예를 들어, 특정 수요 지점  $i$ 를 커버할 수 있는 반경내에 있는 설비  $j$ 중에서 가장 가까운 설비에 의해 커버되는 경우에  $t_{ijk} = 1$ 이 된다. 이를 통해  $Z_{ik}$ 가 (6),(7)이 속박 제약식(Binding constraint)가 되어 생존율을 결정한다.

## 4. 척도, 데이터, 파라미터

### 4.1 거리 척도(Distance Measurement)

본 연구에서는 거리 척도로 수요 지점, 설비 설치 후보 지점의 위도, 경도 데이터를 바탕으로 계산된 실제 거리를 사용한다. 실제 거리를 사용하여 타 거리 척도를 사용하였을 시와 대비하여 교통체증과 같은 현실적인 요소들을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 두 지점 간 직선거리가 아닌 위도, 경도를 이용하여 구(Sphere)에서의 곡률을 고려한 실제 거리를 계산하기 위해 Python의 haversine 라이브러리를 활용하였다.

### 4.2 지점별 수요 및 발생률 산정 방법

현재 국내에서는 심정지 발생 지점의 위도, 경도 좌표 데이터는 제공하지 않고 있어 확보에 어려움이 있다. 본 연구는 야

외에서 발생하는 급성심정지(OHCA)의 경우에 집중하고 있고, 급성심장정지조사 통계(KDCA,2022)에 따르면 대다수의 심정지는 야외에서 발생함에 근거하여 수요 지점의 위도, 경도 및 지점별 수요 산정을 위해 대한민국 인천광역시 연구구의 유동인구 데이터(2021.9)를 활용하였다. IOT 센서를 통하여 파악한 데이터이므로, 동일 위치에 여러 번 기록된 데이터는 기록된 만큼 수요로 산정하였다. <Figure 1>의 원의 사이즈는 지점별 수요의 크기이고, 지점별로 상이함을 파악할 수 있다. 본 연구에서 사용한 유동인구 데이터의 특징을 보았을 때, 지점별 수요가 상이함을 고려하여 특정 수요 지점  $i$ 에서 심정지가 발생할 확률은 전체 수요 대비 지점  $i$ 의 수요로 정의한다. 또, 하나의 수요 지점에 심정지가 발생하는 확률을 독립적이라고 가정하여 각 수요 지점에서 동시간대 발생 횟수의 발생률을 고려하기 위해  $k$ 건 발생하는 확률은 앞서 정의한 발생률을  $k$ 번 곱하여 계산한다. 해당 수식은 다음과 같다.

$P[i$ 에서 심정지  $k$ 건 발생] =  $(\frac{h_i}{\sum_{i=1} h_i})^k$ . 본 연구에서는 계산의

효율성과 수리적 모델의 단순화를 위해 하나의 수요 지점에 심정지가 최대 2건 발생하는 경우까지만 고려하나, 제안하는 수리모델로  $k$ 건의 심정지 발생에 대응 가능함을 보이기 위해 문제 사이즈를 축소한 실험 결과는 <Appendix>에 첨부하였다. 특정 수요 지점  $i$ 에서의 정확한 심정지 발생 확률을 적용하면 더 정확한 생존율을 도출할 수 있다. 예를 들어, 국지적 재난 상황에 취약한 지점의 심정지 발생 확률을 알면 해당 연구를 활용하여 더 정확한 AED 배치를 할 수 있다.

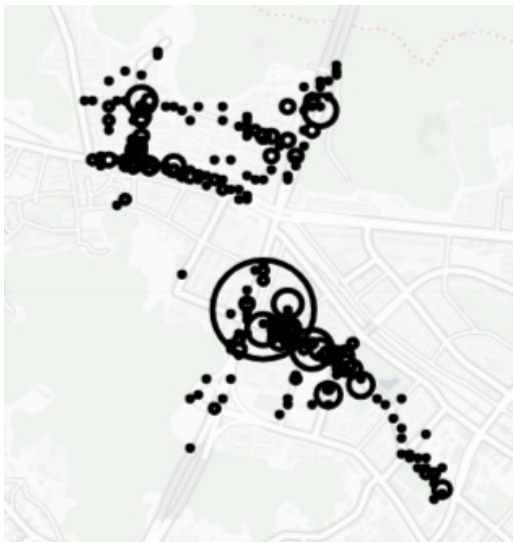


Figure 1. Demand POINT

#### 4.3 거리 표준(Distance standard)

Folke *et al.*(2009)와 Huang *et al.*(2014)은 하나의 AED가 특정 설치 후보 지점에 설치되었을 때 시간 내에 서비스 가능한

거리 표준은 100m 임을 제시하였다. 본 연구에서는 대한민국의 데이터를 대상으로 연구를 진행하였으므로 Park *et al.*(2017)에서 제시한 대한민국 인구의 평균 보행 속도인 1.41125m/s를 적용해 보았을 때 100m는 다소 엄격한 지표임을 파악하였다. 따라서 엄격한 기준을 가져야 하는 2<sup>nd</sup> 커버의 거리 표준( $S_2$ )을 100m로 산정하였다. 골든 타임 4분 중 20초를 AED를 꺼내는(Hands-off) 시간으로 가정하고, 나머지 220초에 대한민국 인구의 평균 보행 속도인 1.41125m/s를 곱하여 구한 거리인 310.5m에 왕복을 고려하여 2로 나눈 값을 반올림하여 얻은 160m를 1<sup>st</sup> 커버의 거리 표준( $S_1$ )으로 산정하였다. 거리 표준 내에서 거리가 증가함에 따라 연속적으로 커버 확률이 감소하되, 수요 지점  $i$ 와 설비 후보 지점  $j$ 간 거리가 사전에 정의된 커버 가능한 최대 거리 표준인 160m를 초과할 시 커버 확률이 0이 되어야 한다. 따라서, 수요 지점  $i$ 와 설비 후보 지점  $j$ 간 거리가 160m 일 때 커버 확률이 1%가 될 수 있도록 감소 커버리지 함수의  $\alpha$  값을 0.027으로 설정하였다.

수립한 모델을 대한민국 인천광역시 연구구 내의 행정동을 대상으로 최적해를 찾고자 ILOG CPLEX Optimization Studio (version 20.1.0)을 사용하였다. 구동한 컴퓨터 사양은 다음과 같다. Window 11(64-bit OS) Intel(R) Core(TM) i7-8550U @ 1.80 GHz 8.00 GB LAM. 또한 시각화 및 결과 분석을 위해 Python의 folium 라이브러리를 사용하였다.

## 5. 결과

### 5.1 기존 설치현황 평가 및 재배치

KDCA(2022)에 따르면 심정지 발생 사례의 절반 이상이 70세 이상의 노인층에서 발생한다. 따라서 적절한 AED 배치에 따른 기대효과가 가장 높은 행정동을 바탕으로 결과를 분석하고자 연구구 내 인구 대비 노인 비율이 15.8%로 가장 높은 청학동을 대상으로 분석을 진행하였다. 우선 2021년 9월 기준 청학동의 기존 AED 위치와 수요 지점 간의 거리를 계산한다. 이를 바탕으로 앞서 제시한 심정지 발생 시 생존율을 계산하여 현재 배치의 효과성을 평가한다. 또 본 연구에서 제시한 모델을 통해 기존 설비 지점을 설비 후보 지점으로 선정하여 재배치를 함으로써 심정지 발생시 생존율, 지점별 배치 결과와 동시다발적인 심정지 발생에 대비한 중복 설치 결과를 파악하고 현재 배치 현황과 비교한다. 앞서 언급하였듯이 심정지 발생 시 수요 지점으로부터 가장 가까운 설비 지점에 의해 커버됨을 고려하여 생존율을 계산한다. 2021년 9월 기준 청학동에 3개의 AED가 배치된 지점이 한 곳 존재한다. 앞서 언급하였듯, 해당 모델에서는 수요 지점에서 가장 가까운 위치의 AED로부터 커버되도록 하여 생존율을 최대화함과 동시에 계산의 효율성을 위해 하나의 설비 후보 지점에 최대 2개의 설비 배치를 허용하도록 가정하였다. 따라서 현실에 3개 이상 비치되어 있는 경우는 2개가 설치되어 있다고 가정하여 앞서 언급하였듯

하나의 수요 지점에서 심정지가 동시에 2건까지 발생하는 경우를 고려하였다. 청학동의 수요 지점과 설비 후보 지점, 설비 대수는  $|A| = 213, |A| = 12, p = 13$ 로 나타난다. 이때의 계산 시간은 5초이며 optimality gap은 0.00%이다.

**Table 1.** Comparison between Current Deployment and Relocation

$j$	Latitude	Longitude	Current deployment	Relocation
1	37.424352	126.661532	1	0
2	37.424963	126.666087	1	1
3	37.427657	126.666587	1	1
4	37.420547	126.668587	1	2
5	37.419741	126.669166	1	0
6	37.423158	126.669892	1	1
7	37.418361	126.670609	1	1
8	37.419883	126.67098	1	2
9	37.41901	126.671071	2	2
10	37.421214	126.671226	1	1
11	37.415971	126.674089	1	1
12	37.415057	126.675168	1	1
Survival rate			4.23%	4.3%

<Table 1>을 통해 청학동의 기존 설비 지점을 설비 후보 지점으로 선정하여 재배치를 하였을 때, 현재 배치와의 차이를 확인할 수 있다. 현재 AED가 설치되어 있는 위치에, 재배치 시 AED가 설치되지 않는 경우는 해당 AED가 발생하는 수요에 적절하게 대응하지 못하는 것을 의미한다. 또 재배치를 통해 AED가 중복 설치되는 지점이 증가함을 파악할 수 있다. 이를 통해 하나의 지점에서 동시다발의 심정지 환자가 발생하는 ‘국지적 재난상황’에 더욱 효과적으로 대응할 수 있음을 시사

한다. 재배치를 통해 앞서 제시한 모델의 목적 식인 생존율이 1.02배 소폭 상승하였음을 파악하였다. 앞의 재배치 결과는 설비 후보 지점을 기존 설치 지점으로 한정하였으나 더욱 효과적인 재배치로 인한 생존율 향상을 확인하기 위해 추가적인 설비 후보 지점을 고려할 필요가 있다. 이에 따라 청학동 내에서 위치가 균등하게 분포되어 있는 경향이 있으며, 심정지 발생 시 접근성이 우수하며 설치 또한 용이하다고 판단되는 청학동의 버스정류장을 설비 후보 지점으로 추가하여 분석해보았다. 설비 후보 지점에 버스정류장을 추가하면 설비후보지점 ( $|A|$ )이 50군데로 늘어나게 된다. 이때의 계산 시간은 3분 42초이며 optimality gap은 0.00%이다.

설비 후보 지점에 버스정류장을 추가하여 재배치한 결과와 현재 배치를 비교해보았다. <Figure 2>의 (a), (b)를 비교해 봤을 때 기존 AED의 위치에는 13대 중 오직 1대만 설치됨을 파악하였으며 나머지 12대는 새로 추가한 버스정류장에 설치됨을 통해 기존과 상이한 배치를 함을 파악하였다. 버스정류장을 설비 후보 지점에 추가하여 재배치하였을 때의 생존율은 17.1%로 기존 설치 대비 생존율이 3.97배 향상되어 보다 효과적인 배치가 이루어짐을 파악하였다. 이를 통해 현재 청학동의 AED의 설치 위치가 심정지 수요 대응에 있어 다소 적절하지 않음을 파악할 수 있다. 또한 해당 모델을 사용하여 기존 설치 지점을 설비 후보 지점으로 재배치한 결과와 버스정류장을 추가한 설비 후보 지점을 대상으로 재배치한 결과 모두 기존 설치 현황 대비 더 많은 수요 지점을 커버할 수 있음을 파악하였다. 전체 수요 지점 대비 커버되는 수요 지점의 비율과 재배치를 통한 각 수요 지점의 향상된 생존율을 <Appendix>에 첨부하였다.

추가적으로 본 연구에서 제시한 모델의 강건성을 검증하기 위해 연수구 내 인구대비 노인비율이 15.5%로 두 번째로 높은 선학동을 분석하였다. 2021년 9월 기준 선학동의 한 지점에 설치된 최대 AED 대수는 2대로, 총 18대의 AED가 설치되어 있



(a) Current AED location



(b) Relocation

**Figure 2.** AED Location

다. 선학동의 수요 지점과 설비 후보 지점, 설비 대수는  $M = 305$ ,  $|M| = 14$ ,  $p = 18$ 로 나타난다. 이때의 계산 시간은 6초이며 optimality gap은 0.00%이다. 선학동의 기존 설비 지점을 설비 후보 지점으로 선정하여 재배치를 하였을 때 목적식인 생존율은 3.33%로 기존 설치 현황의 생존율인 3.32%와 비교 시 소폭 상승함을 알 수 있다. 재배치를 통해 AED가 중복 설치되는 지점은 7곳으로, 기존 대비 3곳이 증가하여 ‘국지적 재난상황’에 더욱 효과적으로 대응할 수 있음을 파악하였다. 청학동의 경우와 마찬가지로, 더욱 효과적인 재배치로 인한 생존율 향상을 확인하기 위해 버스정류장을 추가한 설비 후보 지점을 대상으로 재배치한 결과를 도출하였다. 버스정류장을 추가하면 설비 후보 지점( $M$ )이 36군데로 늘어나게 된다. 이때의 계산 시간은 1분 42초이며 optimality gap은 0.00% 정도로 나타났다. 버스정류장을 설비 후보 지점에 추가하여 재배치하였을 때의 생존율은 33.2%로 기존 설치 대비 생존율이 10배 향상되어 보다 효과적인 배치가 이루어짐을 알 수 있었다.

설비 후보 지점에 버스정류장이 추가된 재배치 상황에서 중복 설치지점을 살펴보면, 청학동의 경우 50개의 후보 중 0곳, 선학동의 경우 36개의 후보 중 3곳임을 파악하였다. 이는 하나의 지점에서 동시다발의 심정지 환자가 발생하는 경우 효과적으로 대비하지 못할 수 있다는 것을 의미하므로, 동시다발적 심정지 수요에 더욱 효과적으로 대응하기 위하여 AED 대수의 민감도 분석을 통해 생존율 향상 정도와 중복 설치지점을 파악하고자 한다.

**5.2 방법론 비교 및 민감도 분석**

앞서 언급한 대표적인 입지선정 방법인 LSCP와 MCLP에 추가로 설비 후보 지점의 거리 표준내에 존재하는 커버되는 수요를 최대화하고 중복설치를 허용하는 GREEDY 알고리즘을 본 연구에서 제시한 모델과 비교·분석함으로써 본 연구의 효용성을 입증하고자 한다. LSCP는 모든 수요를 커버하는 최소의 설비 수도 도출하는 방법론이다. 본 연구에서 사용한 동일한 데이터를 LSCP에 적용해 보았다. 4.3절에서 언급한 본 연구의 1<sup>st</sup> 커버의 거리 표준( $S_1$ )인 160m를 적용하였을 때, LSCP에서 현재 설비 후보 지점에 커버되지 않는 수요 지점들이 존재하여 LSCP의 목적을 달성하지 못함을 확인하였다. 모든 수요를 적어도 한번 커버해야 하는 LSCP의 제약을 만족하기 위한 새로운 거리 표준을 구할 필요가 있었다. 모든 수요를 한번씩 커버할 수 있는 하나의 설비 지점의 새로운 거리 표준은 536m다. 이는 본 연구에서 사용한 1<sup>st</sup> 커버의 거리 표준의 약 3.4배 수준으로 거리에 반비례하는 생존 확률을 계산하는 감소 커버리지 함수를 고려하였을 때 실질적으로 수요를 효과적으로 커버하지 못함을 알 수 있다. 해당 거리 표준을 사용하여 도출된 최소의 AED 대수는 3대이며, 해당 배치 결과를 본 연구의 목적식에 맞게 계산하면 생존율은 0.8% 수준이다. 이는 생존율 향상을 위해서는 LSCP를 통해 도출된 최소 AED 대수의 배치 결과를 사용하는 것이 타당하지 않음을 파악하였다.

MCLP는 제한된 자원 내에서 정해진 거리 내의 포함되는 수요를 최대화하는 설비 배치를 찾는 방법론이다. 거리에 따라 상이해지는 생존율을 고려하여 설비 배치를 하는 본 연구와 달리 MCLP는 하나의 설비로부터 커버될 수 있는 수요를 최대화하고 하나의 설비 후보 지점에 중복설치를 허용하지 않아 한 지점에서 동시다발의 다수 환자가 발생하는 상황에 대응하기 어려운 특징을 가진다.

**Table 2.** Improvement in Survival Rate Through Overlapping Installation

	Number of overlapping installation points	Improved survival rate compared to MCLP
p=13	0	0%
p=18	1	3.17%
p=23	2	6.76%
p=28	3	8.81%
p=33	5	11.32%
p=38	9	14.95%

<Table 2>를 통해 해당 연구에서 제시한 방법론을 사용하면 설치할 수 있는 AED 대수가 증가함에 따라, 한 지점에 AED가 중복 설치되는 지점수가 증가함을 알 수 있다. 마찬가지로 임의의 한 수요 지점에서 동시다발적으로 심정지가 두건 발생한 상황에서 중복설치에 의한 생존율 향상 또한 확인할 수 있다. 이를 통해 MCLP 방법론에서는 고려하지 않는 동시다발적인 심정지가 발생하는 ‘국지적 재난상황’에 본 연구의 방법론의 중복 설치를 통해 대비할 수 있음을 파악할 수 있다.

아울러, 생존율 향상에 대한 GREEDY 알고리즘과의 추가적인 비교를 진행하였다. 해당 연구에서 사용한 알고리즘은 설비를 설치할 때, 각 설비 지점으로부터 가장 가까운 수요 지점의 생존율 향상을 계산하여 모델의 목적식인  $\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i \in I} P[i \text{ 에서 심정지 } k \text{ 건 발생}] \times Z_{ik}$ 을 최대화하고자 하며, 한 지점에서의 중복 설치를 허용하는 특징이 있다. 이러한 알고리즘은 직전에 추가 설치된 AED를 고려한 생존율 향상 수준을 새로 계산하여 특정 수요 지점( $i$ )에서의  $k_{ith}$  cover까지 고려할 수 있다. 자세한 알고리즘은 다음과 같다.

**GREEDY Algorithm**

- <단계 1> : 각 설비 후보 지점( $j$ )에 AED를 설치했을 때, 설치 지점별로 가장 가까운 수요 지점( $i$ )의 향상되는 생존율 계산
- <단계 2> : <단계 1>에서 계산된 설치 지점별로 가장 가까운 수요 지점( $i$ )의 향상되는 생존율 중, 향상 정도가 가장 높은 설비 후보 지점( $j$ )에 AED 설치
- <단계 3> : <단계 1>, <단계 2>를 AED 설치 가능 대수( $p$ )만큼 반복



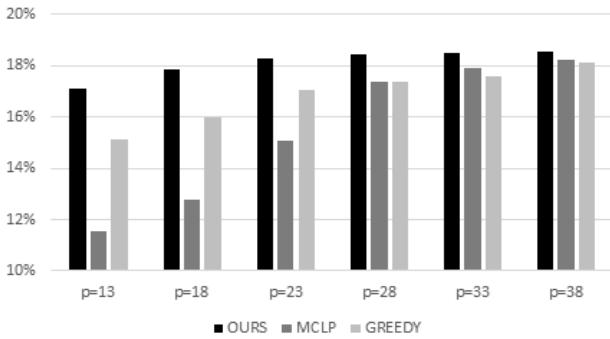


Figure 3. Survival Rate of OURS, MCLP, GREEDY

방법론의 비교를 위해 정해진 AED의 대수를 조정해가며 배치 결과에 따른 생존율과 중복 설치 여부를 정확동의 경우로 분석하였다. 분석결과는 다음과 같다.

<Figure 3>에서 볼 수 있듯, MCLP, GREEDY 알고리즘보다 본 연구에서 제시한 방법론을 통한 배치 결과가 더 높은 생존율을 보장함을 확인할 수 있다. AED 설치 가능 대수(p)가 13대 일 때는 모든 방법론에서 중복 설치가 이루어지지 않는데, 이는 중복 설치보다 새로운 지점에 AED를 배치하는 것이 생존율 향상에 도움이 되기 때문이다. 이러한 경우 하나의 설치 후보 지점에 한 대의 AED를 배치하게 되어 MCLP, GREEDY 알고리즘과 동일한 방식으로 배치하는 것처럼 보이지만, 실질적으로 생존율 면에서는 더 효과적인 AED 배치 결과가 나타난다.

AED 설치 가능 대수를 늘리는 경우를 살펴보면, 중복 설치를 허용하지 않는 MCLP, 중복설치는 허용하나 설치 시점의 생존율 향상만 고려하는 GREEDY 알고리즘과 비교 시 제안한 모델에서는 전체적인 생존율 향상을 고려하면서 중복 설치를 허용하기 때문에 가능해(Feasible solution)의 영역에서 차이가 나게 되며, 이는 상대적으로 MCLP, GREEDY 알고리즘 하에서 최대로 늘릴 수 있는 생존율보다 본 연구에서 제안한 모델 하에서의 최대 생존율을 높게 만드는 결과로 나타난다.

따라서 본 연구에서 제시한 방법론을 통해 실질적인 거리를 고려하여 생존율을 앞선 두 방법론보다 향상시킬 수 있는 AED 배치를 도출할 수 있다.

### 6. 결론

해당 연구에서는 수요 지점과 설비와의 거리가 사전에 정해진 표준 내에 있더라도 설비 지점과 수요 지점 간 거리에 따라 바뀌는 응답 시간을 고려하고자, 거리에 따라 연속적으로 변동하는 부분적 커버리지를 도입하여 실질적인 생존율을 향상시키는 AED 배치 모델을 제시하였다. 추가로 생존율에 대한 확률적인 접근을 바탕으로 해석하기 용이한 목적함수를 도입하였다. 또한 하나의 지점에 AED의 중복 설치를 허용하여 상대적으로 수요가 많은 지역에서의 국지적 재난상황에 대비한 수

요 커버를 통해 생존율 최대화를 달성하고자 하였다.

해당 연구에서는 대한민국의 인천광역시 연수구의 경우를 대상으로 진행하였다. 노인 비율이 높은 행정동인 청학동과 선학동을 대상으로 현재 배치의 생존율을 평가하였으며 재배치를 수행하였으나 개선정도는 미미했다. 이 결과에 따라 기존의 설비 후보 지점이 생존율 향상에 적절하지 않다고 판단하여 버스정류장을 설비 후보 지점에 추가하여 분석하였다. 버스정류장을 추가한 AED 재배치를 통해 기존 대비 생존율 향상을 확인하였다. 또한 중복설치를 함으로써 하나의 수요 지점에서 심정지가 동시다발적으로 발생하는 ‘국지적 재난상황’에 대비할 수 있음을 파악하였다.

본 연구의 한계점으로는 컴퓨팅 자원의 한계로 인해 하나의 수요 지점에서 동시에 심정지가 두 건 발생하는 경우까지만 고려하였다는 점과, 위치별 심정지 발생 확률 데이터의 부재로 인해 심정지가 유동인구에 비례하여 발생한다고 가정하였다는 점을 들 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 더 많은 변수와 제약식을 고려할 수 있는 형태의 모델로의 개선이 필요하다. 아울러, 특정 수요 지점에서의 과거 심정지 발생 이력 등을 활용하여 정확한 심정지 발생률을 파악할 수 있는 연구가 진행된다면, 보다 현실성 있는 최적 AED 배치를 수행할 수 있을 것으로 보인다.

### 참고문헌

Chan, T. C., Demirtas, D., and Kwon, R. H. (2016). Optimizing the deployment of public access defibrillators, *Management Science*, **62**(12), 3617-3635.

Church, R. and ReVelle, C. (1974), The maximal covering location problem, In *Papers of the Regional Science Association*, **32**(1), 101-118.

Dahan, B., Jabre, P., Karam, N., Misslin, R., Bories, M. C., Tafflet, M., Bougouin, W., Jost, D., Beganton, F., Beal, G., Pelloux, P., Marijon, E., and Jouven, X. (2016), Optimization of automated external defibrillator deployment outdoors: An evidence-based approach, *Resuscitation*, **108**, 68-74.

Daskin, M. S. (1983), A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution, *Transportation Science*, **17**(1), 48-70.

De Maio, V. J., Stiell, I. G., Wells, G. A., Spaite, D. W., and Ontario Prehospital Advanced Life Support Study Group. (2003). Optimal defibrillation response intervals for maximum out-of-hospital cardiac arrest survival rates, *Annals of Emergency Medicine*, **42**(2), 242-250.

Emedia (2021), Urgent Need for Replacement of Subway Automated External Defibrillators. <https://m.ecomedia.co.kr/news/amp.html?ncode=1065578087942414>.

Folke, F., Lippert, F. K., Nielsen, S. L., Gislason, G. H., Hansen, M. L., Schramm, T. K., Sørensen, R., Fosbøl, E. L., Andersen, S. S., Rasmussen, S., Køber, L., and Torp-Pedersen, C. (2009), Location of cardiac arrest in a city center: strategic placement of automated external defibrillators in public locations, *Circulation*, **120**(6), 510-517.

Grot, M., Becker, T., Steenweg, P. M., and Werners, B. (2021). Enhanced

- coverage by integrating site interdependencies in capacitated EMS location models, *Health Care Management Science*, 1-21.
- Hogan, K. and ReVelle, C. (1986), Concepts and applications of backup coverage, *Management Science*, **32**(11), 1434-1444.
- Huang, C. Y., and Wen, T. H. (2014), Optimal installation locations for automated external defibrillators in Taipei 7-Eleven stores: using GIS and a genetic algorithm with a new stirring operator, *Computational and mathematical methods in medicine*, 1-12
- Kim, C. H. (2021), Epidemiological characteristics of disasters in past Korea based on the concept of mass casualty incidents, *Journal of The Korean Society of Emergency Medicine*, **32**(1), 49-60.
- Korea Consumer Agency (2018), Survey on the Safety and Education of Automated External Defibrillators.
- Korea Disease Control and Prevention Agency (2022), Statistics on Acute cardiac arrest survey.
- Marianov, V., and ReVelle, C. (1996). The queueing maximal availability location problem: A model for the siting of emergency vehicles, *European Journal of Operational Research*, **93**(1), 110-120.
- Metrot, C., Darazi, R., Benslimane, A., and Doumith, E. A. (2019), Dynamic AED Allocation and Reallocation for SCA Rescue Using Modified MCLP, In *2019 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 310-316.
- Park, S. J., Lee, J. S., Kang, D. H., Jeong, E. H., Jeong, H. J., and Park, S. B. (2007), A Study on the walking speed and stride of the Age, *Proceedings of Symposium of the Ergonomics Society of Korea*, 430-434.
- Rajagopalan, H. K. and Saydam, C. (2009), A minimum expected response model: Formulation, heuristic solution, and application, *Socio-Economic Planning Sciences*, **43**(4), 253-262.
- ReVelle, C. and Hogan, K. (1989), The maximum availability location problem, *Transportation Science*, **23**(3), 192-200.
- Schilling, D. A. (1980), Dynamic location modeling for public-sector facilities: A multicriteria approach, *Decision Sciences*, **11**(4), 714-724.
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., and Bergman, L. (1971), The location of emergency service facilities, *Operations Research*, **19**(6), 1363-1373.
- Van den Berg, P. L., Kommer, G. J., and Zuzáková, B. (2016), Linear formulation for the maximum expected coverage location model with fractional coverage, *Operations Research for Health Care*, **8**, 33-41.
- Waalewijn, R. A., de Vos, R., Tijssen, J. G., and Koster, R. W. (2001), Survival models for out-of-hospital cardiopulmonary resuscitation from the perspectives of the bystander, the first responder, and the paramedic, *Resuscitation*, **51**(2), 113-122.

<Appendix>

<A1> Proportion of demand points covered

	Current deployment	Relocation of current location	Relocation with added bus stops
Cheong-hak	35.21%	46.01%	61.50%
Seon-hak	38.69%	38.69%	73.11%

<A2> Top 10 survival improvements at demand points in cheonghak-dong

Index of demand point	Survival rate of current AED deployment	Survival rate of relocation	Improved survival rate compared to current deployment
95	0.06%	0.61%	0.55%
58	0.00%	0.37%	0.37%
122	0.00%	0.19%	0.19%
96	0.03%	0.20%	0.18%
160	0.00%	0.15%	0.15%
28	0.12%	0.26%	0.13%
17	0.02%	0.14%	0.13%
190	0.00%	0.11%	0.11%
191	0.00%	0.10%	0.10%
93	0.00%	0.10%	0.10%

<A3> Top 10 survival improvements at demand points in cheonghak-dong

Index of demand point	Survival rate of current AED deployment	Survival rate of relocation with added bus stops	Improved survival rate compared to current deployment
58	0.00%	1.00%	1.00%
122	0.00%	0.88%	0.88%
48	0.00%	0.80%	0.80%
112	0.16%	0.84%	0.68%
95	0.06%	0.60%	0.54%
17	0.02%	0.49%	0.48%
209	0.31%	0.69%	0.38%
199	0.00%	0.32%	0.32%
113	0.00%	0.29%	0.29%
202	0.05%	0.28%	0.24%

<A4> Improvement in survival rate through three overlapping installation

	Number of points with three AEDs installed	Survival rate in the event of three cardiac arrests	Computation time	Optimality gap(%)
p=6	1	7.62%	00:03	0.00
p=9	1	7.99%	00:03	0.00
p=12	2	8.29%	00:03	0.00
p=15	5	15.91%	00:05	0.00

기존 청학동의 데이터에서 문제 사이즈가  $|K| = 6$ ,  $|K| = 15$ 가 되도록 일부 추출하였음. 심장지 발생률은 앞서 제시한 바와 동일하게 계산함.  $S_3 = 100m$ .

저자소개

**손정민:** 부산대학교 산업공학과 학사과정 재학생이다. 연구분야는 최적화, 스케줄링이다.

**임정호:** 부산대학교 산업공학과 학사과정 재학 중이다. 연구분야는 최적화, 스케줄링이다.

**김도원:** 부산대학교 산업공학과에서 2012년 학사학위를 취득하였으며 KAIST에서 2014년 석사학위, 2019년 박사학위를 취득하였다. 메리츠화재 데이터사이언스파트, 에너지경제연구원 전력정책연구팀을 거쳐 2022년부터 부산대학교 산업공학과 조교수로 재직하고 있다. 연구분야는 추계적모델, 최적화, 시뮬레이션이다.