

# 전기자동차 충전소 구축을 위한 입지와 용량 최적화 모형의 적용

김정훈

승실대학교 대학원 경영학과

박종우

승실대학교 경영학부 교수

## Abstract

서비스시설의 입지를 결정한 후에는 각 입지의 특성에 따라 서비스제공능력 즉, 용량(capacity)을 결정해야 한다. 입지의 최적화와 용량의 최적화는 모두 지역 수요를 고려해야 하므로 한 번의 데이터 구축을 통해 이를 순차적으로 연결시키는 것이 현실적이면서도 효율적이라고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 거의 모든 연구들이 각각 다른 학문분야에서 주로 다루어졌거나, 어느 한 가지의 최적화에만 집중되어 왔다.

따라서 본 연구에서는 서비스시설의 입지와 용량 결정 프로세스가 수요 데이터를 공유함으로써 순차적으로 연결되는 개념의 모형을 제시하였다. 사회·환경적 요구와 국가 정책적 필요에 따라 인프라 구축이 시급한 전기자동차 충전소의 입지와 용량 결정에 적용하여 모형의 검증과 전기자동차 보급 활성화를 위한 실질적인 충전소 구축 방안을 도출하였다.

이에 본 연구는 입지와 용량 최적화의 절차적 통합 모형을 제시함으로써 학문적 융합의 의미를 지니며, 전기자동차 보급 활성화를 위한 인프라 구축 노력의 일환으로 실제 전기충전소의 최적 입지와 용량을 도출함으로써 실무적 기여를 제공하는 것으로 사료된다.

## I. 서 론

자동차 배기가스에 의한 지구 온난화와 환경오염, 그리고 고유가 문제를 해결하기 위해 국제적인 노력이 계속되고 있고, 우리나라에서도 '녹색성장 국가전략 및 5개년 계획'의 10대 정책 방향 중 저탄소 녹색성장 추진을 위한 온실가스 감축 수단으로 차세대 그린카 보급 활성화 방안을 마련하여, 전기자동차의 상용화를 위한 급속충전 기술개발 등의 과제를 추진하고 있다.

전기자동차는 배기가스에 포함된 각종 대기오염 물질을 전혀 배출하지 않으며, 온실가스를 증가시키는 이산화탄소도 배출하지 않고, 석유자원을 통한 에너지원으로부터 완전히 벗어날 수 있는 이점이 있다(테이크산업연구소, 2010). 하지만 1회 충전에 의한 주행거리가 짧은 점, 그리고 무엇보다 충전 인프라가 거의

구축되지 못한 점은 전기자동차 보급을 방해하는 요인이 될 수 있다(전기자동차핸드북편집위원회, 2003).

따라서 전기자동차 충전인프라의 구축이 시급한 상황이며, 특히 충전소는 인프라 구축의 기반이 되기 때문에 충전소를 설치하는 것이 가장 중요하다. 하지만 충전기의 설치비용을 고려하더라도 무조건 많은 곳에 설치하는 것은 효율적이지 못하고, 설치 장소가 너무 적으면 사용자의 심리적 불안감이 높아지거나 실질적 편의성이 감소될 우려가 있으므로 효과성이 결여될 수 있다. 따라서 최소의 투자비용으로 최대의 사용자 만족을 얻을 수 있는 입지의 최적화는 반드시 고려되어야 할 문제이다.

최적 입지의 선정뿐만 아니라 각 입지의 특성에 따른 용량을 최적화하는 것 또한 중요하다. 전기충전소는 주유소나 가스충전소와 유사한 자동차 연료공급 서비스시설로서, 사용자의 수

요와 서비스제공 능력의 균형을 도모해야 한다. 입지가 결정되면 각 입지 특성에 따라 수요의 크기가 다르기 때문에, 수요를 충족시킬 수 있는 서비스제공능력(capacity)의 최적화가 반드시 이루어져야 한다.

하지만 현재까지 입지의 최적화와 용량(capacity)의 최적화에 대한 연구는 각각 진행되어 왔으며, 이를 연동시키는 것에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 시설의 위치적 특성 즉, 수요가 입지와 용량 결정에 모두 영향을 미침에도 불구하고 각각 연구가 이루어지고 있다는 것은 실무적인 효율성의 측면에서도 부정적이라고 할 수 있다. 따라서 입지와 용량 최적화의 연결 및 절차적 통합은 학문적으로나 실무적으로 중요하고 의미 있는 기여를 할 것으로 기대된다.

## II. 이론적 배경

### 2.1 서비스시설 입지선정 모형

현재는 전기자동차가 도입 시기에 있기 때문에 전기충전소 입지는 ‘고객을 유인’하는 것이 아니라 ‘지리적인 수요를 효과적으로 커버’하는 것에 목적이 있다. 따라서 현재의 전기자동차 충전소는 지리적 범위를 커버하면서 수요충족을 최대화하는 문제를 해결하기 위한 Covering 문제가 가장 적합하며, 이는 Set Covering Location Model과 Maximal Covering Location Model 등으로 구분될 수 있다.

최초로 SCLM을 적용한 사례는 응급의료 서비스시설 입지에서 찾아볼 수 있다(Toregas, et al., 1971). 서비스시설의 특성 상 시설 이용자의 도달거리 혹은 서비스제공자의 수요처 도달거리는 매우 중요하다. 그렇기 때문에 이와 같이 물리적 거리를 기준으로 커버할 수 있는 범위에 따라 최소의 시설 수를 구하는 SCLM은 여러 연구자들에 의해 변형되고 대상에 따라 다르게 적용되어 왔다. 최적해의 값이 0과 1로 이루어진 정수선형계획모형이 구체화된 후(Toregas & Reville, 1973), SCLM이 최소의 시설 수만 제공하고, 각 입지의 수요를

반영하지는 못한다는 단점을 보완하기 위해 MCLM(Maximal Covering Location Model)이 제시되었는데(Church & Reville, 1974), 이는 시설 수의 제약 하에 최대서비스거리와 수요를 고려하여 시설이용가능 수요를 최대화하는 모형이다(Fitzsimmons & Fitzsimmons, 2008). 이후 MCLM은 제약조건의 변형으로 모든 수요지를 최소한 하나의 시설이 커버하면서 수요를 최대화하도록 하는 수정모형이 제시되는 등(Daskin & Stern, 1981), 다양한 확장과 분화가 이루어졌다.

전기자동차 충전소와 유사한 자동차연료 보급 서비스 시설에 관련된 연구로서는 천연가스 충전소의 최적입지 사례가 있는데(유정훈 외, 2008), 이 연구에서는 천연가스충전소의 최적입지를 선정하기 위해 커버리지(coverage)모형을 활용하여 이동거리 제약조건을 만족시키는 입지 대안들을 도출하였으며, 각 입지별 수요를 고려한 용량증대의 필요성을 제안하였다. 하지만 전기자동차 충전소의 입지 최적화는 거의 다루어지지 않고 있기 때문에 연구의 필요성이 크다고 할 수 있다.

### 2.2 서비스시설 용량결정 모형

서비스시설의 용량 즉, 서버의 수를 결정하기 위해서는 대기행렬 모형을 이용해야 한다. 대기행렬 이론은 A. K. Erlang[1878-1929]이 전화 교환기의 대기 현상을 분석하기 위해 최초로 연구가 시작되어, 여러 학자들에 의해 지속적으로 다루어져 왔다.

전기자동차 충전소의 경우, M/M/s/s와 M/M/s/k 두 가지의 모형으로 적정 용량 산정을 시도한 연구는 있었으나(홍준희 외, 2009), M/M/s/s는 통신네트워크의 트래픽을 관리하는 데 주로 적용되기 때문에 대기열의 존재 자체를 부정하게 되고, M/M/s/k는 주로 콜센터의 대기통화를 관리하는 데 적용되며 대기열의 길이를 제한시키기 때문에 가용 대기열이 없는 경우 충전소를 떠나는 것으로 가정한다. 이 연구는 전기자동차 충전소의 용량을 결정하기 위한 유일한 시도라는 점에서는 고무적이라고 할 수

있지만, 급속충전기를 통해 충전하려는 고객의 수요를 구체적으로 고려하지 않고 임의의 도착률을 가정하였으며, 대기행렬이 가득 차 있을 경우 충전소를 떠날 것이라는 가정을 내림으로써 급속충전 수요의 특성을 반영하지 못하였다고 할 수 있다.

따라서 전기자동차 충전소에 필요한 충전기의 수를 결정하기 위해서는, 시스템이나 대기행렬에 있는 고객 수와 상관없이 독립적으로 도착하며, 서비스시간은 일정하고, 대기행렬의 길이를 제한하지 않을 때, 필요한 서버의 수를 구할 수 있는 M/M/s모형이 가장 적합하다고 할 수 있다.

## 2.3 입지선정과 용량결정의 연계

서비스시설의 입지를 결정한 후에는 해당 입지의 특성을 고려하여 시설의 용량을 결정해야 한다. 하지만 입지선정과 용량결정의 연결이라는 개념을 바탕으로 한 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 대부분 입지를 선정하는 것과 용량을 결정하는 것 중 어느 한 가지에만 초점이 맞추어져 있다. 물론 고속도로 휴게소 입지의 예상수요에 따라 시설의 물리적 규모를 산정하는 것과 유사한(최윤희·백승걸, 2009)연구는 있었지만, 서비스시설의 수용능력(capacity) 즉, 용량의 최적화로 연결되는 연구와는 거리가 멀었다.

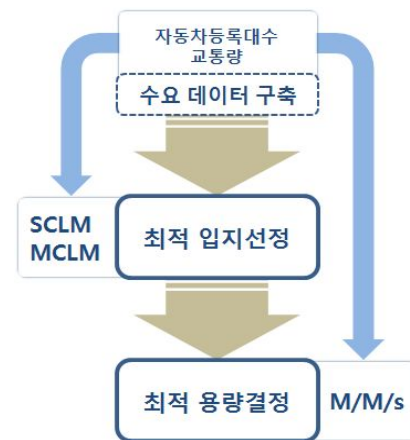
따라서 수요 데이터를 구축한 후 서비스시설의 입지를 선정하고 각 입지 특성에 따라 용량 결정까지 연계되는 현실적인 프로세스를 절차적 모형으로 가시화하여 실증분석을 통해 검증하는 것은 매우 의미가 있을 것으로 판단된다.

## III. 입지-용량 최적화 모형의 적용

### 3.1 분석 모형

본 연구는 전기자동차 충전소의 입지와 용량을 최적화하는 데에 그 목적이 있다. 이를 위해 서비스시설의 입지선정과 용량결정에 있어서 데이터의 공유, 절차적 연결에 대한 관점으로부터 이를 통합한 절차적 모형은 다음 [그림

1]과 같다.



[그림 1] 입지·용량의 절차적 통합 모형

전기자동차 충전소의 입지를 선정하기 위한 모형으로서 SCLM과 MCLM을 적용하였고, 선정된 각 충전소별 용량을 결정하기 위한 모형으로서 M/M/s를 적용하였으며, 각 모형은 다음과 같은 수리적 형태로 표현될 수 있다.

#### 1) Set Covering Location Model (SCLM)

▶ Minimize  $\sum_{i=1}^n X_i$

▶ St.

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} X_i \geq 1 \quad (X_i = 0 \text{ or } 1)$$

$a_{ij}=1$ : 지점 i와 j사이의 이동 거리가  $\lambda$  이하

$0$ : 지점 i와 j사이의 이동 거리가  $\lambda$  초과

$X_i=1$ : j에 설치된 시설이 i점에 서비스를 제공

$0$ : j에 설치된 시설이 i점에 서비스를 제공 않음

#### 2) Maximal Covering Location Model (MCLM)

▶ Maximize  $\sum_{j=1}^n h_j Z_j$

▶ St.

$$\sum_{i \in N_j} X_i \geq Z_j$$

$$\sum_{i \in N_j} X_i = P \quad (X_i = 0 \text{ or } 1, Z_j = 0 \text{ or } 1)$$

$h_i$ : 지점 j의 수요량

$N_j$ : 지점 i와 j사이의 이동 거리가  $\lambda$  이하인 시설 i의 집합

$X_i=1$ : 시설이 i지점에 입지하는 경우

0:시설이 i지점에 입지하지 않는 경우  
 $Z_j=1$ :수요지점 j가 어떤 시설로부터 커버됨  
 0:수요지점 j가 어떤 시설로부터 커버되지 않음

### 3) M/M/s

▶ 시스템 이용도

$$\rho = \frac{\lambda}{su}$$

▶ 시스템 내 고객이 없을 확률

$$P(0) = \frac{1}{\left[ \sum_{n=0}^{s-1} \frac{1}{n!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right] + \frac{1}{s!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^s \left( \frac{1}{1-\rho} \right)}$$

▶ 시스템 내 고객이 n명 있을 확률

$$P(n) = \begin{cases} \frac{1}{n!} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0, & (0 \leq n \leq s) \\ \frac{1}{s! s^{n-s}} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0, & (n \geq s) \end{cases}$$

▶ 대기행렬 내 평균 고객 수

$$L_q = \frac{P_0 (\lambda/\mu)^s \rho}{s! (1-\rho)^2}$$

▶ 시스템 내 평균 고객 수

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu}$$

▶ 대기행렬 내 평균 소비시간

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}$$

▶ 시스템 내 평균 소비시간

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}$$

위와 같은 입지선정과 용량결정 모형을 적용하기 위해 MS EXCEL 2007 프로그램을 사용하였으며, 특히 입지선정 모형의 적용을 위해 해찾기 기능을 사용하였다.

## 3.2 데이터 구축

본 연구의 지리적 범위는 서울특별시의 25개 자치구 중 자가용-승용자동차등록대수가 190,205대로 가장 많은 강남구(국토해양부 도로교통량 통계연보, 2011년1월 기준)로 설정하였다. 분석에 활용된 데이터는 2차 자료를 수집하여 분석에 적합하도록 가공하였으며, 각 자료의 원천과 가공 방법, 그리고 실제 분석에의

활용을 살펴보면 다음과 같다.

#### 1) 수요지

수요지점은 각 지역의 수요를 대표할 수 있는 점으로 설정하기 위해, 이진학(2010)의 연구를 참조하여 각 행정동의 수요를 대표하는 지점으로서 동주민센터를 수요지로 설정하였다.

#### 2) 후보지

후보지점은 모든 주유소로 설정하였으며, 주유소의 현황과 각 주소는 한국석유공사 유가정보서비스(www.opinet.co.kr)에서 획득하였다.

#### 3) 수요지와 후보지 간 거리

실제 도로네트워크상황(U턴, 좌회전, 우회전)을 반영한 거리로 하였으며, 인터넷 포털사이트 네이버(www.naver.com)에서 운영하는 지도서비스의 ‘빠른 길 찾기’ 기능을 통해 실측거리를 획득하였다.

#### 4) 최대커버가능거리

한국스마트그리드사업단에서 2011년 1월 19일에 지식경제부로 제출한 ‘전기차 충전인프라 구축 방안’ 연구보고서에 따라 충전소의 최대커버가능거리를 4km로 설정하였다.

#### 5) 충전소 기설치 장소 반영

실증사업을 위해 충전기가 설치된(환경부 보도자료, 2010) 강남구의 해당 주유소가 무조건 선택되도록 제약조건으로 고정하여 입지분석을 실시하였다.

#### 6) 행정동별 자동차등록대수

각 행정동의 용도별 자동차등록대수는 서울특별시 도시교통본부-자료실-주요교통통계-기타 게시판에서 ‘2010년 6월 행정동/법정동별 자동차 등록현황’을 통해 획득하였다.

#### 7) 교통량

도로별 교통량은 서울지방경찰청에서 교통량 조사지점으로 운영하는 112곳의 수집데이터를 획득하였고, 해당 도로의 유입, 유출 방향을 고려한 동별 교통량을 선별하였다.

#### 8) 수요

자동차등록대수와 교통량을 전기자동차의 2013년 점유율 전망치로 환산했으며(Kawahara, 2010), 지역 간 유류가격이 같을 경우, 확률적으로 통행량의 80%가 지역 내, 20%가 지역

외에서 주유할 것이라는 연구결과에 따라(김승남·안건혁, 2009), 자동차등록대수와 교통량에 각각 0.8과 0.2의 가중치를 부여하였다.

#### 9) 시간당 도착대수

실증사업을 위해 이미 충전기가 설치되어 있는 시설이 무조건 선택되도록 함에 따라 커버하는 수요지가 겹치면서 수요가 중복 계상될 수 있으므로, 각 시설이 동일한 비율로 분담하도록 하여 도착률  $\lambda$ 를 구하는 공식은 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda = \left\{ \sum [(자동차등록대수 \times 0.8) + (교통량 \times 0.2)] \times \text{분담률} \right\} \times \frac{\text{일평균주행거리}}{1\text{회충전주행거리} \div 24\text{시간}}$$

위 식에서 ‘일평균주행거리’는 교통안전공단의 2008년도 자동차 주행거리 실태조사에서 나타난 서울특별시 자가용 승용차의 1대당 1일평균 주행거리(33.72km)를 활용하였으며, ‘1회충전주행거리’는 현재 상용화가 가능하도록 개발되어 실증사업에 활용되고 있는 고속전기자동차의 평균값(153.33km)을 활용하였다.

#### 10) 서비스 시간

기존 문헌을 참고하여(이현기, 2010) 서비스 시간을 20분으로 함에 따라 평균서비스율  $\mu$ 는 3으로 설정되었다.

## IV. 분석 결과

### 4.1 최적 충전소 입지

#### 4.1.1 SCLM 적용

지리적인 범위를 모두 커버하는 최소의 시설 수를 구하기 위해, 거리 매트릭스에서 최대커버가능거리 4km 이내인 경우 1, 4km를 초과하는 경우 0이 되도록 변형하면 다음 [표 1]과 같이 이진수로 이루어진 매트릭스가 된다.

이를 이용하여 SCLM을 적용한 결과, 최소 3곳의 후보지에 입지해야 하는 것으로 나타났다.

[표 1] 이진수로 변형된 거리 매트릭스의 예

후보지→ 수요지↓	C1	C2	C3	C4	C5	...
D1	1	1	0	0	0	...
D2	1	1	0	0	0	...
D3	1	1	0	0	0	...
D4	0	0	1	1	1	...
D5	0	0	1	1	1	...
D6	1	1	0	0	0	...
D7	0	1	0	0	0	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

#### 4.1.2 MCLM 적용

SCLM을 통해 도출된 최소 시설 수를 토대로 제약조건  $\sum_{i \in N_j} X_i = 3$ 을 추가로 설정하고 MC

LM을 적용한 결과, 커버되는 수요는 3,180대인 것으로 나타났다. 하지만 가능한 해집합이 유일한 해로 수렴되지 않았기 때문에, 전기자동차의 충전대기행렬을 감안하여, 실증사업을 위해 설치된 해당 주유소의 부지면적이 강남구는  $1,506.1m^2$ , 동작구는  $807.0m^2$ 인 것을 토대로, 부지면적이  $800.0m^2$ 이상이 되도록 제약조건을 추가하였다. 이렇게 선정된 입지의 평균 면적이 가장 큰 해집합을 선택하여 3곳의 후보지가 최종 선정되었다.

### 4.2 최적 충전소 용량

#### 4.2.1 M/M/s 적용

안정상태가 될 수 있는 서버의 수로부터 대기 시간 5분 이내가 되는 서버의 수를 계산하여 다음 [표 2]와 같은 결과가 나타났다.

삼성동119-18에 위치한 주유소에는 급속충전기 5대가 필요한 것으로 나타났으며, 이때의 시스템 내 차량 수는 4.2대, 시스템 내 소비시간은 0.4시간(약 25분), 대기행렬 내 차량 수는 0.8대, 대기행렬 내 소비시간은 0.1시간 즉, 4.8분인 것으로 나타났다.

역삼동654에 위치한 주유소에는 급속충전기 8대가 필요한 것으로 나타났으며, 이때의 시스템 내 차량 수는 5.7대, 시스템 내 소비시간은 0.4시간(약 25분), 대기행렬 내 차량 수는 0.7대, 대기행렬 내 소비시간은 0.04시간 즉, 2.6

분인 것으로 나타났다.

자곡동210에 위치한 주유소에는 급속충전기 3대가 필요한 것으로 나타났으며, 이때의 시스템 내 차량 수는 1.3대, 시스템 내 소비시간은 0.4시간(약 22분), 대기행렬 내 차량 수는 0.1대, 대기행렬 내 소비시간은 0.03시간 즉, 1.7분인 것으로 나타났다.

[표 2] 최적 충전소 용량

	삼성동 119-18		역삼동 654			자곡동 210	
$\lambda$	10	10	15	15	15	4	4
$\mu$	3	3	3	3	3	3	3
s	4	5	6	7	8	2	3
$\rho$	0.9	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6	0.4
Po	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3
L	7.3	4.2	10.3	6.7	5.7	2.0	1.3
Lq	3.9	0.8	5.2	1.7	0.7	0.8	0.1
W	0.4	0.1	0.3	0.1	0.04	0.2	0.03
Wq	0.7	0.4	0.7	0.4	0.4	0.5	0.4
Wq (분)	23.1	4.8	20.6	6.6	2.6	12.5	1.7

## V. 결론

본 연구는 서울특별시의 주요 자치구인 강남구를 중심으로 전기자동차 충전소 시설의 입지와 용량을 결정함에 있어서, 데이터를 공유하고 절차적으로 연계되는 것이 현실적으로 타당하다는 것을 실증분석을 통해 검증하였다. 급속충전기가 설치될 전기자동차 충전소의 실질적인 입지와 용량 결정 방안을 도출했다는 점에서 실무적인 의미가 있으며, 주로 각기 이루어져 온 입지와 용량 최적화를 절차적으로 통합하는 모형을 제시했다는 점에서 학문적 의미가 있는 것으로 사료된다.

## 참고문헌

김승남·안건혁. "주유지역선택확률을 고려한 교통에너지 소비량 추정 및 도시공간구조의 차별적 영향분석". 국토연구, 61. 121-140. 2009.

테이코산업연구소. 「국내외 전기차 충전인프라 개발동향 및 시장전망」. 2010.

유정훈·이무영·오세창. "공간적 접근성 및 통행 비용을 고려한 천연가스 충전소 최적 입지 선정 모형". 대한교통학회지, 26/3. 145-153. 2008.

이건학. "동통폐합에 따른 동주민센터의 입지 변화 분석과 최적 입지 모델링 -공간적 효율성 및 형평성 접근". 대한지리학회지, 45/4. 521-539. 2010.

이현기. "전기자동차 충전인프라 개발현황과 전망". 전력전자학회지, 15/6. 73-76. 2010.

전기자동차핸드북편집위원회 역. 「전기자동차 핸드북」. 서울 : 대광서림. 2003.

최윤혁·백승걸. "고속도로 휴게소의 적정 규모 산정계수에 관한 연구". 대한교통학회지, 27/6. 7-18. 2009.

홍준희·최중인·이종현·남영우. "전기자동차 충전소의 적정 용량 결정". 전기학회논문지, 58/10. 1911-1915. 2009.

Church, R. & Reville, C. "The maximal covering location problem". *Papers of the Regional Science Association*, 32. 101-118. 1974.

Daskin, M.S., E.H. Stern. "A hierarchical objective set covering model for emergency medical service vehicle deployment". *Transportation Science*, 15. 137-152. 1981.

Fitzsimmons J. A. & M. J. Fitzsimmons. *Service Management 6/E: Operation, Strategy, Information Technology*. New York : McGraw-Hill. 2008.

Kawahara E. 원저. AT커니 코리아 역. 「전기자동차와 에코경제학」. 서울 : 전자신문사. 2010.

Toregas C. & C. Reville. "Binary logic solutions to a class of location problem". *Geographic Analysis*, 5. 145-155. 1973.

Toregas C., R. Swain, C. Reville, & L. Bergman. "The location of emergency service facilities". *Operations Research*, 19. 1363-1373. 1971.