

# Evaluation of Operational Efficiency for Electric Vehicle Charging Stations Using Data Envelopment Analysis

Dong-Hoon Son\* · Yeong-Su Gang\*\* · Hwa-Joong Kim\*\*†

\*Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology

\*\*Asia Pacific School of Logistics, Inha University

## 자료포락분석을 이용한 전기차 충전소 운영효율성 평가

손동훈\* · 강영수\*\* · 김화중\*\*†

\*홍콩과학기술대학교 토목환경공학과

\*\*인하대학교 아태물류학부

Evaluating the operational efficiency of electric vehicle charging stations (EVCSs) is important to understand charging network evolution and the charging behavior of electric vehicle users. However, aggregation of efficiency performance metrics poses a significant challenge to practitioners and researchers. In general, the operational efficiency of EVCSs can be measured as a complicated function of various factors with multiple criteria. Such a complex aspect of managing EVCSs becomes one of the challenging issues to measure their operational efficiency. Considering the difficulty in the efficiency measurement, this paper suggests a way to measure the operational efficiency of EVCSs based on data envelopment analysis (DEA). The DEA model is formulated as constant returns of output-oriented model with five types of inputs, four of them are the numbers of floating population and nearby charging stations, distance of nearby charging stations and traffic volume as desirable inputs and the other is the traffic speed in congestion as undesirable one. Meanwhile, the output is given by the charging frequency of EVCSs in a day. Using real-world data obtained from reliable sources, we suggest operational efficiencies of EVCSs in Seoul and discuss implications on the development of electric vehicle charging network. The result of efficiency measurement shows that most of EVCSs in Seoul are inefficient, while some districts (Nowon-gu, Dongdaemun-gu, Dongjak-gu, Songpa-gu, Guro-gu) have relatively more efficient EVCSs than the others.

**Keywords :** Electric Vehicle Charging Station, Operational Efficiency, Data Envelopment Analysis

### 1. 서론

전기 자동차가 기존의 내연 기관 차량을 대체할 친환경 차량으로 기대되면서 세계적으로 관심을 받고있으며 지속적으로 시장이 확대되고 있다. 이에 따라 국내에서도 정부가 전기차산업 육성과 전기차의 상용화를 위해 충전인프라

환경수준을 끌어올리려는 노력을 하고 있다[11, 18]. 전기차 충전소(Electric vehicle charging station: EVCS) 인프라 개발은 전기차 사용자의 충전소 선택에 대한 이해를 수반한다[6, 19]. 이러한 이해를 도모하기 위해서 모수적 접근법(Parametric approach)과 비모수적 접근법(Nonparametric approach)이 고려될 수 있다. 전자의 경우 전기차

Received 22 July 2020; Finally Revised 21 August 2020;

Accepted 26 August 2020

† Corresponding Author : hwa-joong.kim@inha.ac.kr

사용자의 충전소 선택 문제를 일련의 통계적 추론을 통해 구체화한다. 이를 위해 연구자는 전기차 사용자의 충전소 선택 의사결정의 과정을 모형으로 정의하고, 해당 모형의 모수를 추정하는 과정을 거친다. 이때 모수를 도출한다는 것은 전기차 사용자의 충전소 선택이 예측 가능한 대상으로 전환함을 의미한다. 따라서 이와 같은 연구방법은 정책 개발자 또는 충전소 운영사업자로 하여금 충전소 인프라 개발안에 대한 신뢰도가 높은 타당성 평가결과를 도출하는 근거가 된다.

하지만 불행히도 전기차 충전소 인프라 개발 초기단계에서 전기차 사용자의 주행패턴과 충전행태에 관한 유의미한 정보가 부족하기 때문에 전기차 사용자의 충전소 선택문제를 모형화 하는 것은 상당히 어렵다. 더 나아가 이러한 난점은 연구자로 하여금 전기차 사용자의 충전소 선택과 이에 영향을 미치는 다양한 요인들 간의 인과관계 구조를 파악하는 것을 제약한다. 이러한 상황에서, 비모수적 접근법 중 하나인 자료포락분석(Data envelopment analysis: DEA)은 전기차 사용자의 충전소 선택을 간접적으로 파악함으로써 충전소 인프라 개발에 필요한 정책시사점을 제안하는 데에 유용한 대안으로 고려될 수 있다.

DEA는 분석대상들인 의사결정단위(Decision making unit: DMU)들의 상대적 효율성을 측정하는 분석법이다. 이를 위해 DEA는 가장 효율적인 DMU의 효율성을 기준으로 비효율적인 DMU의 성과를 상대적으로 규명한다. 이때 DEA는 각 DMU의 효율성을 투입과 산출이 이루어지는 생산활동의 결과로 간주하며, 투입요소 규모 대비 산출요소 규모는 해당 DMU가 얼마나 효율적으로 성과를 내고 있는지 보여주는 척도가 된다. 따라서 DMU의 효율성은 특정 요소에 대한 효율성이 아니라 투입요소와 산출요소를 모두 고려한 상대적인 효율성이다. 이와 같은 분석방법은 전기차 사용자의 충전소 선택문제를 일련의 생산활동으로 이해할 수 있는 근거를 제공한다. 즉, 본 연구는 충전소 선택이 다수의 외부요인들(투입요소)로부터 영향을 받으며, 각 충전소의 충전실적(산출요소)은 상기 선택문제의 결과로 이해할 수 있기 때문이다. 이에 따라 본 연구는 충전소 선택과 관련된 외부요인들 고려하여 각 충전소의 운영효율성을 계산하고, 이 계산결과를 토대로 전기차 사용자의 충전소 선택의 특성을 간접적으로 이해하고자 한다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장은 DEA 모형과 전기차 충전소의 운영효율성 및 이에 영향을 미치는 요인들을 분석한 문헌을 소개한다. 제 3장은 전기차 충전소의 운영효율성을 계산하기 위한 DEA모형과 분석요소를 정의한다. 제 4장은 전기차 충전소의 운영효율성 분석결과에 대해서 논한다. 마지막 제 5장은 본 연구결과의 시사점을 간략히 요약한다.

## 2. 문헌연구

본 절에서는 전기차 사용자의 충전소 선택 및 전기차 충전소의 운영효율성 평가에 관한 문헌들을 분석한다. 아울러 문헌 분석결과를 토대로 본 연구의 기여점을 제시하고자 한다. DEA는 이미 다양한 학술분야에서 광범위하게 활용된 분석방법이다. 아울러 해당 분석방법에 대한 심도 깊은 논의도 학계에서 충분히 이뤄지고 있다 [2, 3, 4, 13, 19]. 따라서 본 연구는 DEA 연구현황에 대한 언급은 생략하고자 한다.

연구방법론적 측면에서 볼 때, 전기차 충전소 인프라 개발 및 충전소 선택을 분석하기 위한 분석도구로써 DEA를 활용한 논문은 찾아볼 수 없었다. 그 대신, 대부분의 문헌들은 DEA를 다목적 입지선정 문제에서의 최적의 입지안을 도출하기 위한 부속적인 분석도구로 활용하였다. Wang et al.[17]는 전기차 충전소에 대한 다목적 입지선정 문제를 연구하는 과정에서 DEA를 파레토 최적해(Pareto optimal solution)를 만족하는 입지안을 도출하는데에 활용하였다. 이때 DEA의 산출요소는 다목적 입지선정 문제에서 목적함수 중 하나인 충전소가 설치된 도로의 전기차 교통량의 총합으로 주어졌으며, 투입요소로써 발전소에서 각 충전소까지 도달하는 데에 손실된 전류 손실의 총합과 전압의 편차가 고려되었다. Khalkhali et al.[10]도 전기차 충전소의 입지안을 선택하기 위한 방법으로 DEA를 활용하였다. 여기서 투입요소는 충전소 설치에 소요된 자본비용과 총순이익이 고려되었으며, 산출요소는 전압 개선지수, 전류 손실, 전류 손실 감소에 따른 비용절약 규모 그리고 이산화탄소 배출량으로 주어졌다. Wang et al.[17]은 현재 전기차 충전소 인프라에서 발생하는 고정비 및 변동비를 가장 효과적으로 개선하는 충전소 입지안을 선택하기 위하여 DEA를 사용하였다. 여기서 고정비는 충전소 설치에 소요된 제비용을 의미하며, 변동비는 전기에너지 사용비용으로 고려하였다.

이와는 별개로, 전기차 사용자의 충전소 선택과 충전소 운영효율성에 영향을 미치는 요인들을 분석한 연구도 다수 있었다. 석인[15]는 회귀분석을 이용하여 전기차 사용자의 충전소 선택에 영향을 미치는 지리환경적 및 사회경제적 요인을 규명하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 해당 연구는 종속변수로써 각 2017년도 전국 충전소의 충전량, 독립변수로써 지역별 전기차 및 자동차 등록대수, 도로보급률, 인구밀도, 평균연령, 개인 연소득, 그리고 충전소와 최인접 문화·산업시설 간의 거리 등을 고려하였다. 이를 통해 본 연구는 도로보급률과 평균 소득이 높을수록, 충전소와 휴게소 간의 거리, 평균 연령, 인구밀도가 낮을수록 충전소의 충전량이 증가하는 경향이 있음을 밝혔다. 하지만 장홍석[7]은 다차원 데이터를 이용

하여 대구지역의 충전소의 충전수요를 추정한 결과, 인구 밀도가 높은 지역에 속한 충전소의 충전량이 많은 경향성을 발견하여 앞선 석인의 연구와는 다른 결과를 제시하였다.<sup>1)</sup> 이와 같은 연구 결과는 강철구와 전소영[9]의 경기도 전기차 충전소 설치기준에 대한 적정기준을 수립하는 연구에서도 찾아볼 수 있다. 해당 연구는 교통의 요충지, 유동인구와 교통량이 많은 지역, 근린생활시설 및 휴게소가 있는 지역에 충전소가 설치되는 것이 이용자의 편의성과 충전소의 효율적인 운영을 위해 바람직하다는 점을 밝혔다. Chakraborty et al.[1]는 전기차 사용자의 충전소 선택문제를 분석하기 위한 이산선택모형을 구성하기 위해 주행자의 운전패턴, 전기차 성능, 충전소 인프라 현황, 주행자의 거주시설 현황, 주거시설에서의 충전소 현황 그리고 도로 혼잡도 등을 고려하였다.

앞선 선행연구들을 분석한 결과를 토대로 본 연구의 차별점을 제시하면 다음과 같다. 첫째, 본 연구는 DEA를 활용하여 각 충전소의 운영효율성을 분석하여 전기차 충전소 인프라 개발과 충전소 선택에 대한 이해를 확장한다. 기존 선행연구들은 DEA를 다목적 입지선정 문제에서의 적절한 입지안을 선택하기 위한 도구로 활용하였다. 이런 연구방법은 각 충전소 운영효율성에 영향을 미치는 투입요소 및 산출요소를 고려하지 않기 때문에 충전소 인프라 개발에 필요한 유의미한 시사점을 제시하기에는 한계가 있다. 이런 점을 고려할 때, 본 연구는 충전소 인프라 개발 과정에서 유의미하게 고려할 만한 요인을 토대로 각 충전소의 상대적인 운영효율성 분석하고 전기차 사용자의 선택을 간접적으로 이해할 수 있는 대안을 제시한다는 점에

서 의의가 있다. 둘째, 본 연구는 서울시의 전기차 충전소의 운영현황을 근거로 각 충전소의 운영효율성 분석할 뿐만 아니라 제한된 정보를 바탕으로 DEA를 활용한 충전소 인프라 현황 분석 대안을 제시한다는 점에서 연구결과 및 연구방법론의 현실성을 갖췄다고 사료된다.

### 3. 연구방법

본 절은 DEA 모형을 수립하기 위해 전기차 충전소의 운영효율성을 계산하는 데에 필요한 투입요소와 산출요소를 정의한다. 아울러 앞서 제기한 요소들의 특성과 충전소 운영효율성과의 영향관계를 고려하여 본 연구에서 활용될 DEA 모형을 제시한다.

#### 3.1 분석모형

<Table 1>은 본 연구가 DEA를 활용하여 전기차 충전소의 운영효율성을 평가하는 데에 활용한 투입요소와 산출요소를 요약하고 있다. 해당 표에서 볼 수 있듯이, 본 연구는 5개의 투입요소와 1개의 산출요소를 활용하여 충전소의 운영효율성을 평가하였다. 각각의 투입요소와 산출요소의 분석 요소로 선정한 이유와 특징에 대해서 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

투입요소로서 선정된 유동인구는 각각 지역별 일평균 유동인구를 의미한다. 이때의 유동인구는 7시부터 20시까지의 지역별 인구를 계수기를 사용하여 측정한 수치를

<Table 1> Summary of Input and Output Factors used in DEA

Category	Factors	Characteristics of corresponding factors
Input factors	Floating population	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Average daily floating population by region</li> <li>• Observation of the floating population from 7am to 8pm by using counters</li> <li>• Unit: Person</li> </ul>
	Traffic volume	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Average daily traffic volume by region</li> <li>• Estimation of traffic volume for unobservable roads by using realized traffic volumes of nearby roads and up-to-date navigation data</li> <li>• Unit: Vehicle</li> </ul>
	No. of nearby EVCSs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Number of EVCSs within 500m from a EVCS</li> <li>• Unit: Station</li> </ul>
	Avg. distance of nearby EVCSs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Average distance of EVCSs within 500m from a EVCS</li> <li>• Unit: Meter</li> </ul>
	Traffic congestion cost	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Money value of travel time and losses caused by traffic congestion</li> <li>• Unit: 100 billion won</li> </ul>
Output factors	Charging frequency	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yearly charging frequency by EVCS</li> <li>• Unit: Frequency</li> </ul>

1) 석인[15]은 인구 밀도가 낮은 지역에서 전기차 충전소의 충전량이 많은 결과가 도출된 이유로서 제주도의 전기차 보급량이 타지역보다 상대적으로 높기 때문이라고 언급하였다. 이는 해당 연구가 전기차 충전소 인프라의 지역별 편차가 두드러졌던 개발 초기단계에 이루어졌기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

인용하였다. 해당 데이터는 서울시 열린데이터 광장(data.seoul.go.kr)의 일반행정 항목에서의 2019년 유동인구 조사결과로부터 획득하였다. 현재까지 선행연구의 분석결과에 따르면 유동인구가 전기차 충전소에 미치는 영향에 대해서 면밀하게 구체화되지는 않았다. 하지만 전기차를 수요하는 대부분의 차량대여업소가 유동인구 및 인구밀도가 높은 지역에 위치하고 있고, 전기차 충전소의 충전량 또한 이와 같은 지역에서 높아지는 경향이 있기에 본 연구는 유동인구를 투입요소로 고려하게 되었다[7, 9]. 또 다른 투입요소로 선정된 교통량은 한국교통연구원으로부터 제공된 2018년 도로별 추정교통량을 의미한다. 일반적으로 교통량은 전기차 충전소 설치에 있어서 중요한 고려 요소로 간주된다. 다만, 아직까지 전기차 사용자의 주행패턴에 대한 정보가 불분명하므로 특정 도로의 교통량과 전기차의 통행량의 상관관계가 명확하게 밝혀지지 않았지만, 대다수의 전기차 충전소 입지결정 문제[7, 9, 16] 또는 전기차 충전소 수요 추정문제[1, 7]에서 충전소 주변의 교통량이 중요한 요소로 고려되고 있기 때문에 본 연구에서도 교통량을 투입변수로 선정하게 되었다. 또한 특정 충전소로부터 인근에 위치한 충전소의 개수와 거리는 전기차 사용자가 충전소 선택 시 주변의 충전인프라를 고려한다는 점에 착안하여 투입요소로 고려하였다. 일반적으로 급속충전소의 경우 전기차 1대당 20~60분 정도 충전을 하고[7], 충전시설 용량이 제한적이다. 이러한 이유로 혼잡한 충전소에서의 일부 전기차 사용자의 경우 충전소 방문에 맞춰 곧바로 충전을 할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 전기차 사용자는 충전소 선택 시 충전을 위한 대기시간 또는 다른 유휴 충전소로 이동하는 데에 필요한 시간과 비용 최소화를 위하여 충전소 인프라가 고도화된 곳을 선호하는 경향이 있다[14]. 따라서 본 연구는 특정 충전소로부터의 인근 충전소의 개수 및 거리를 투입요소로 고려하였다. 마지막 투입 요소인 교통혼잡비용은 어떤 지점의 교통용량보다 교통량이 많거나 사고 등의 이유로, 후속 차량의 속도가 지체될 때 정상 속도와 비교하여 추정된 비용으로, 교

통량과는 다른 개념이다[8]. 교통혼잡비용을 투입요소로 고려한 이유는 전기차 사용자가 충전을 위해 대안 충전소를 탐색하는 과정에서 도로혼잡도, 교통량, 통행속도 등 다른 충전소까지 이동하는 데에 소요되는 비용과 시간을 고려하기 때문이다. 따라서 본 연구는 교통혼잡비용과 인근 충전소의 거리를 전기차 사용자의 충전소 선택에 부정적인 영향을 미치는 요소로 간주하였다. 산출요소로서 선정된 충전소별 연간 충전빈도는 2018년 서울시 충전소의 연간 충전빈도를 의미하며, 해당 데이터는 환경부로부터 획득하였다. 이때 본 연구는 충전소의 고장 및 파손에 따라 운영가능한 기간 또는 충전가능 여부를 고려하지 않았다. <Table 2>는 투입요소 및 산출요소의 기술통계량을 요약하여 보여주고 있다.

엄밀하게 따지자면, 본 연구에서 선정된 투입요소는 비재량변수로서 충전소의 운영효율성을 증진하기 위해 충전소 운영사업자가 직접 통제하거나 조절할 수 없는 요소이다. 하지만 본 연구에서는 다음과 같은 이유로 상기 투입요소를 통제가 가능한 재량변수처럼 간주하고자 한다. 첫째, 본 연구는 충전소 운영사업자가 충전소를 설치할 당시 해당 지역의 인구현황, 접근성, 상업성 등을 충분히 고려하여 입지하였을 것이라고 가정하였다. 이러한 가정은 매우 현실적인 것으로써, 이는 충전소 운영사업자가 충전소 설치 당시 면밀하게 고려할 수 있었던 요인이기에 본 연구는 상기 비재량 특성을 지닌 투입요소를 충전소 운영효율성 측정의 고려 대상으로 보는 것이 타당하다고 판단하였다. 둘째, 앞선 선행연구들에서 확인할 수 있듯이, 상기 투입요소들이 전기차 사용자의 충전소 수요에 매우 큰 영향을 미치고 있음이 밝혀졌다. 마지막으로, 전기차 충전소 인프라 개발 초기단계에서 정부 정책개발자와 충전소 운영사업자가 활용할 수 있는 자료는 극히 제한적이다. 본 연구에서 충전소 운영효율성 평가 요인으로 고려한 투입요소는 충전소 인프라가 충분히 개발되지 않은 상황에서 자유롭게 활용할 수 있는 자료이다. 따라서 본 연구는 상기 투입요소들을 충전소 운영효율성 평가 요인으로 고려하는 것이 타당하다고 판단하였다.

<Table 2> Descriptive Statistics of the Inputs and Output Factors

Factors	Average	Median	Maximum	Minimum	Stdv.
Floating population	25504.71	25951.49	48816.58	4691.18	3109.89
Traffic volume	795.99	659.60	4252.91	1.00	609.14
No. of nearby EVCSs <sup>a</sup>	1.54	1.00	10.00	0.00	1.83
Avg. distance of nearby EVCSs <sup>a</sup>	301.81	317.08	496.18	0.09	119.29
Traffic congestion cost	0.0518	0.04	0.19	0.00	0.031
Charging frequency	274.32	72.50	8862.00	1.00	622.19

<sup>a</sup> Note that some EVCSs have no neighbor EVCS within 500m. For the EVCSs, we assign an arbitrary small value  $\varepsilon$  for the factors of the number and average distance of nearby EVCS.

### 3.2 분석방법

DEA에서 각 충전소의 운영효율성은 다른 충전소의 운영 효율성과 비교하여 상대적으로 평가된다. 즉, 효율적으로 운영되는 충전소의 성과를 기준으로 비효율적인 충전소의 성과를 상대적으로 측정한다. 이와 같은 상대적 운영 효율성은 Farrell[5]의 연구를 통해서 확립되었다. Farrell은 운영효율성을 파레토 최적성 관점에서 이해하려고 했던 Koopmans[12]의 연구를 토대로, 효율적인 DMU들이 구성하는 생산변경(Production frontier)을 비효율적인 DMU (본 연구에서는 각 전기차 충전소를 의미)들의 운영효율성 수준을 결정하는 기준으로 삼았다. Farrell의 효율성 계산 방법을 이용하여 산출기준 규모수익불변 조건의 DEA 모형(Input-oriented constant return to scale DEA model)을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{[P1] Maximize } \eta \\
 & \text{subject to} \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j x_{ij} \leq x_{i0} \quad \text{for } i=1, 2, \dots, H \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j y_{rj} \geq \eta \cdot y_{r0} \quad \text{for } r=1, 2, \dots, S \\
 & \lambda_j, \eta \geq 0 \quad \text{for } j=1, 2, \dots, N
 \end{aligned}$$

모형[P1]에서  $\eta$ 는 효율성을 의미하며  $x_{ij}$ 는 DMU  $j$ 의 투입요소  $i$ 의 규모를,  $y_{rj}$ 는 DMU  $j$ 의 산출요소  $r$ 의 규모를 의미한다. 이때  $\lambda_j$ 는 효율성 평가대상 DMU의 효율성이 최대화를 유도하는 서로 다른 DMU의  $x_{ij}$ 와  $y_{rj}$  조합을 결정한다. 즉, 해당 DEA 모형은 각 DMU가 발휘할 수 있는 최대의 운영효율성을 평가함을 의미한다. 모형[P1]은 주어진 투입요소 규모와 산출요소 규모의 선형 조합들 가운데 해당 DMU의 효율성을 극대화하는 조합을 기준으로 상대적 효율성을 측정한다. 만약 해당 DMU가 비효율적이라면 가장 효율적인 DMU와의 거리를  $\eta$ 가 측정함으로써 상대적인 효율성 값을 부여한다. 따라서 DEA 분석 시, 투입요소  $x_{ij}$ 는 DMU 효율성 증진에 긍정적인 기여를 하는 요소로 선정되어야 한다.

앞서 언급하였듯이, 본 연구는 전기차 충전소 운영효율성에 부정적인 영향을 미치는 투입요소를 고려한다. 따라서 본 연구는 Seiford and Zhu[14]가 제안한 DEA 모형을 이용하여 충전소의 상대적 운영효율성을 평가하였다. Seiford and Zhu[14]의 모형은 앞서 제시한 모형[P1]과 크게 다르지 않다. 다만, 부정적인 투입요소들의 규모가 증가할수록 해당 DMU의 운영효율성을 증진시키는 데에 기여할 수 있도록 변환하는 과정을 거친다.  $x_{sj}^D$ 를 DMU 효율성에 긍정적인 영향을 미치는 투입요소의 규모,  $x_{sj}^U$

를 이에 부정적인 영향을 미치는 투입요소의 규모라고 하자. 아울러 긍정적인 투입요소 및 부정적인 투입요소의 수를 각각  $M$ 과  $K$ 라고 하자( $H = M + K$ ). 이와 같은 정의를 바탕으로 Seiford and Zhu[14]가 제안한 모형을 소개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{[P2] Maximize } \eta \\
 & \text{subject to} \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j x_{sj}^D \leq x_{s0}^D \quad \text{for } s=1, 2, \dots, M \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j x_{tj}^U \leq x_{t0}^U \quad \text{for } t=1, 2, \dots, K \\
 & \sum_{j=1}^N \lambda_j y_{rj} \geq \eta \cdot y_{r0} \quad \text{for } r=1, 2, \dots, S \\
 & \lambda_j, \eta \geq 0 \quad \text{for } j=1, 2, \dots, N
 \end{aligned}$$

여기서  $x_{tj}^U = -x_{tj} + \max[x_{tj} | t=1, \dots, K] + \epsilon$ 이며,  $\epsilon$ 는 임의의 작은 실수이다. 따라서 DEA 모형 효율성 평가방법의 관점에서 볼 때 모형[P1]와 모형[P2]은 차이가 없다. 하지만 이와 같은 분석법은 연구자로 하여금 부정적인 투입요소가 충전소 운영효율성에 미치는 영향을 보다 직관적이고 간명하게 이해할 수 있도록 한다. 본 연구는 이와 같은 변환과정을 부정적인 투입요소로서 고려된 인근 충전소들의 평균거리와 교통혼잡비용에 적용하였다.

### 4. 효율성 분석결과

본 장은 앞서 제시한 DEA모형들을 바탕으로 효율성 분석결과를 제시한 후, 그에 대한 시사점을 논한다. 본 연구는 2018년 서울시 전기차 충전소 625곳에 대한 운영효율성을 분석하였다. <Table 3>은 본 연구에서 고려한 전기차 충전소의 운영효율성 평가결과를 보여주고 있다. 해당 표는 각 충전소의 운영효율성을 행정구역단위(구)를 기준으로 합계하여 제시하고 있다. 이때 각 충전소의 운영효율성은 4가지의 서로 다른 배타적인 효율성 범위(0~25%, 25~50%, 50~75%, 75~100%)로 구분하였으며, 괄호 안에 표기된 백분율은 해당 구역의 전체 충전소의 수 대비 서로 다른 효율성 범위에 속한 충전소 수의 비율을 뜻한다. 여기서 운영효율성이 낮은 경우, 주어진 투입요소 규모 대비 충전빈도가 낮다는 점을 의미한다. 즉, 전기차 사용자의 충전소 선택 의사결정 과정에서 주변의 다른 충전소들보다 충전수요가 낮다는 것을 뜻하며, 이는 충전소 주변의 생활시설 및 산업시설의 현황과 무관하지 않을 수 있다. <Table 3>에서 확인할 수 있듯이, 서울시에 위치한

충전소 운영효율성은 0~25% 범위에 77.69%가 속하는 것으로 드러났다. 그 외에 약 7.59%, 2.925, 11.79%의 충전소가 각각 25~50%, 50~75%, 75~100% 효율성 범위에 속하는 것으로 밝혀졌다. 개별 지역구 관점에서 보다 자세히 살펴보면, 용산구, 금천구 마포구, 영등포구, 서초구, 강서구, 동대문구, 동작구, 강남구, 구로구, 광진구, 송파구에서 75%~100% 효율성 범위에 속하는 충전소의 비율이 10%를 넘는 것으로 드러났다. 특히 노원구, 동대문구, 동작구, 송파구, 구로구에서는 해당 범위에 속하는 충전소의 비율이 20%를 넘는 것으로 드러났다. 그에 반면에 다른 지역의 충전소들은 대부분 0~50%의 운영효율성을 드러내는 것으로 나타났다.

이와 같은 실험결과로부터 우리는 다음의 몇 가지 시사점을 제언하고자 한다. 첫째, <Table 3>에서 드러난 바와 같이, 서울시 전기차 충전소의 운영효율성은 일반적으로 양극화된 모습을 볼 수 있다. 본 연구는 이와 같은

효율성 측정결과를 다음의 이유에서 기인한다고 보았다. 첫째, 대부분의 충전소들은 전기차 사용자들의 충전소 선택에서 매력적이지 않은 곳에 위치하고 있기 때문에 상기 결과가 도출될 가능성이 있다. 본 연구에서 언급한 선행연구는 휴게소 및 근린생활시설에 위치한 충전소의 충전 실적이 우수한 반면, 다른 지역에서는 충전 실적이 저조하다는 점을 발견하였다. 이는 전기차 사용자의 주행패턴뿐만 아니라 전기차 충전소요시간 등을 고려할 때 충전시간 동안 기타 업무를 볼 수 있는 지역에 위치한 충전소를 선호한다는 점을 의미한다. 따라서 이러한 선행연구 결과를 참고하여 볼 때, 서울시 대부분의 충전소들이 전기차 사용자들의 선택을 받기 어려운 곳에 위치하고 있을 가능성을 배제할 수 없다. 즉, 충전소 인프라 개발과정에서 보다 효율적이고 효과적인 충전소 입지안 도출에 대한 노력이 더 필요한 상황이라고 진단할 수 있다.

<Table 3> Efficiency Measurement Result for the EVCSs

District(gu)	No. of EVCSs	No. of EVCSs by different levels of operational efficiency <sup>a</sup>			
		0~25%	25~50%	50~75%	75~100%
Jungnang	28	25 (89.29%)	1 (3.57%)	0 (0.00%)	2 (7.14%)
Seongbuk	10	8 (80.00%)	2 (20.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)
Eunpyeong	17	13 (76.47%)	3 (17.65%)	0 (0.00%)	1 (5.88%)
Yongsan	28	23 (82.14%)	2 (7.14%)	0 (0.00%)	3 (10.71%)
Gwanak	21	17 (80.95%)	2 (9.52%)	0 (0.00%)	2 (9.52%)
Dobong	18	15 (83.33%)	2 (11.11%)	1 (5.56%)	0 (0.00%)
Geumcheon	27	20 (74.07%)	3 (11.11%)	1 (3.70%)	3 (11.11%)
Nowon	24	15 (62.50%)	2 (8.33%)	0 (0.00%)	7 (29.17%)
Mapo	33	24 (72.72%)	2 (6.07%)	1 (3.03%)	6 (18.18%)
Seodaemun	13	10 (76.92%)	1 (7.69%)	2 (15.38%)	0 (0.00%)
Yeongdeungpo	30	18 (60.00%)	6 (20.00%)	1 (3.33%)	5 (16.67%)
Seocho	43	35 (81.39%)	1 (2.33%)	1 (2.33%)	6 (13.95%)
Gangseo	33	24 (72.72%)	3 (9.09%)	1 (3.03%)	5 (15.15%)
Dongdaemun	13	8 (61.53%)	0 (0.00%)	1 (7.69%)	4 (30.76%)
Dongjak	19	14 (73.68%)	1 (5.26%)	0 (0.00%)	4 (21.05%)
Gangnam	38	27 (71.05%)	3 (7.89%)	2 (5.26%)	6 (15.78%)
Jung	30	24 (80.00%)	4 (13.33%)	0 (0.00%)	2 (6.67%)
Gangbuk	18	17 (94.44%)	1 (5.56%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)
Songpa	35	28 (80.00%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	7 (20.00%)
Gangdong	26	23 (88.46%)	2 (7.69%)	0 (0.00%)	1 (3.84%)
Guro	28	17 (60.71%)	1 (3.57%)	3 (10.71%)	7 (25.01%)
Gwangjin	23	17 (73.91%)	1 (4.34%)	2 (8.69%)	3 (13.04%)
Yangcheon	21	20 (95.31%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	1 (4.76%)
Jongno	23	18 (78.26%)	2 (8.69%)	1 (4.34%)	2 (8.69%)
Seongdong	26	24 (92.31%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	2 (7.69%)
Total	625	484 (77.69%)	45 (7.59%)	17 (2.92%)	79 (11.79%)

<sup>a</sup>Note that each percentage in parenthesis represents the ratio of the number of EVCSs belonging to a certain efficiency level to the total number of EVCSs in the same district.

둘째, 전기차 사용자들의 충전소 선택에 영향을 미치는 서울시 지역별 고유한 특성이 반영된 결과일 수도 있다. 가령, 상기 효율성 분석결과에서 볼 수 있듯이 75~100% 효율성 범위에 속한 충전소들이 주로 소수의 구역에 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 해당 구역들이 다른 구역들과 차별화되는 상업적, 경제적, 교통환경의 고유한 특징이 있기 때문으로 사료된다. 이와 같은 결과는 충전소 인프라 개발 초기단계에 전기차의 제한적인 주행거리를 보완하기 위한 광범위한 충전소 인프라를 구축하기 보다 전기차 사용자의 충전소 선택의 동인 및 생활복지시설 현황을 파악하여 선택적이고 집중적인 충전소 인프라 개발의 필요성을 보여준다. 즉, 충전소 인프라 개발은 생활복지시설, 주거시설, 상업시설 개발과 같은 도시개발계획과 함께 고려되어 추진되어야 한다는 점을 간접적으로 역설하고 있는 것이다. 또한 이러한 효율성 분석결과는 민간 충전소 운영사업자로 하여금 경제성이 있는 충전소 입지안을 도출, 충전소 인프라 및 전기차 확산에 기여할 수 있을 것으로 본다.

물론, 본 연구에서 고려한 투입요소 및 산출요소 외에 추가적으로 다른 요소들을 고려하게 된다면 상기 충전소 운영효율성 측정결과로부터 얻어진 시사점이 달라질 개연성도 있다. 이와 같은 DEA 모형수립의 오류는 향후 추가적인 연구를 통해서 개선되어야 할 필요가 있다. 또한 본 연구에서 제안하는 시사점은 서울시 충전소, 구역별 생활복지시설 및 산업시설의 현황에 기반한다. 따라서 서울시 이외 지역에 위치한 충전소 인프라 현황의 경우, 본 연구가 제안하는 시사점이 제한적일 수 있다. 하지만 앞서 제기한 바와 같이 본 연구에서 고려한 투입요소 및 산출요소는 충전소 인프라 개발과정에서 범용적으로 활용하고 있으며, 상기 효율성분석 결과 또한 지역별, 효율성 수준별 경향성을 드러내고 있다는 점에서 참고할 만한 분석결과라고 사료된다.

## 5. 결론

본 연구는 DEA를 활용하여 전기차 충전소의 운영효율성을 평가함으로써 전기차 사용자의 충전소 선택 및 충전소 인프라 개발에 대한 시사점을 제안하였다. 이를 위해 본 연구에서 고려된 DEA모형은 투입기준 규모수익불변 조건 하에 2018년 기준 서울시의 지역별 유동인구, 추정교통량, 인근 충전소의 개수와 평균거리를 투입요소로서, 충전소의 충전빈도를 산출요소로서 고려하였다. 본 연구는 상기 분석방법을 채택하기 위해 충전소의 충전빈도가 전기차 사용자의 충전소 선택의 결과이며 다양한 외부요인들이 이러한 선택문제에 영향을 미친다는

점을 가정하였다.

본 연구에서 수행된 충전소의 운영효율성 평가결과와 이로부터 얻어진 시사점을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 운영효율성 평가결과를 토대로 볼 때, 대부분의 서울시 전기차 충전소 비효율적으로 운영되는 것으로 드러났다. 본 연구에서는 이러한 결과에 대해 직접적인 원인을 단정하지는 못한다. 하지만 선행연구의 연구결과를 참조한다면, 이와 같은 결과는 대부분의 충전소가 전기차 사용자의 주행패턴 또는 충전패턴과 동떨어진 위치에 입지했기 때문에 드러난 결과라고 사료된다. 둘째, 상기 운영효율성 평가결과와 특정 구역(노원구, 동대문구, 동작구, 송파구, 구로구)에서 효율적인 충전소를 다수 보유하고 있는 것으로 드러났다. 이는 구역별 생활복지시설 및 산업시설의 현황 차이가 전기차 사용자의 충전소 선택에 영향을 미친 것으로 보인다. 이와 같은 효율성 분석결과는 정부의 충전소 인프라 개발정책 수립 또는 충전소 운영사업자로 하여금 효율적이고 효과적인 충전소 입지 의사결정을 직간접적으로 지원할 수 있다고 사료된다.

본 연구는 다음의 사항을 고려하여 추가적인 연구의 필요성을 제안하고자 한다. 우선, 본 연구는 시간의 흐름에 따라 지역별 충전소의 충전실적이 동적으로 변화하는 점을 고려함으로써 연구결과와 가치를 더욱 제고할 수 있을 것으로 사료된다. 장홍석[7]에 따르면 하루 동안 지역별 충전소의 충전실적은 시시각각 변화하는 특성이 있다. 이러한 점에 착안하여 다기간(Multi-period) 또는 동적(Dynamic) DEA 모형을 활용하여 각 충전소의 시간별 운영효율성을 측정한다면 본 연구의 시사점을 더욱 심화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 본 연구의 운영효율성 평가결과에서도 확인할 수 있듯이, 비교적 유동인구, 교통량이 낮은 지역에서의 충전소의 운영효율성을 과대평가하는 문제를 개선하는 연구도 의의가 있을 것으로 본다. 아울러 본 연구에서 도출된 효율성 분석결과는 충전소 오부 변수와의 관계규명을 통해 심층연구가 추가적으로 더 가능할 것으로 보인다. 따라서 향후 연구에서는 요인분석(Principal factor analysis) 및 공간분석(Spatial analysis) 등을 결합하여 본 연구의 시사점을 강화하는 연구를 수행할 필요가 있다고 사료된다. 마지막으로, 구역별 생활복지시설과 산업시설의 현황 또는 충전소가 위치한 시설별 특징을 고려하여 더 정교한 DEA 모형을 수립하는 것 또한 의의가 있으리라 판단한다.

## Acknowledgement

This work was supported by Inha University Research Grant.

## References

- [1] Chakraborty, D., Bunch, D.S., Lee, J.H., and Tal, G., Demand drivers for charging infrastructure-charging behavior of plug-in electric vehicle commuters, *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 2019, Vol. 76, pp. 255-272.
- [2] Charnes, A., Cooper, W.W., and Rhodes, E., Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 1978, Vol. 2, No. 6, pp. 429-444.
- [3] Cook, W.D. and Zhu, J., Modeling performance measurement : Applications and implementation issues in DEA, Springer Science & Business Media, 2006.
- [4] Cooper, W.W., Seiford, L.M., and Tone, K., Introduction to data envelopment analysis and its uses : With DEA-solver software and references, Springer Science and Business Media, 2006.
- [5] Farrell, M.J., The measurement of productive efficiency, *Journal of the Royal Statistical Society : Series A (General)*, 1957, Vol. 120, No. 3, pp. 253-281.
- [6] Hagman, J., Ritzen, S., Stier, J.J., and Susilo, Y., Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion, *Research in Transportation Business and Management*, 2016, Vol. 18, pp. 11-17.
- [7] Jang, H.S., Optimal placement of electric vehicle charging stations using big data analytics, *Proceedings of Conference of the Korean Institute of Industrial Engineer*, Gwangju, Korea, 2019, pp. 1301-1329.
- [8] Joo, J.Y., Lee, H.S., Mo, C.H., and Son, U.Y., A Study on the Prediction of Traffic Congestion Cost, *The Korea Transport Institute*, 1992.
- [9] Kang, C.G. and Jeon, S.Y., A study on establishment of proper installation criteria of electric vehicle charging station in Gyeonggi-do, *Policy Research*, 2017, pp. 1-161.
- [10] Khalkhali, K., Abapour, S., Moghaddas-Tafreshi, S.M., and Abapour, M., Application of data envelopment analysis theorem in plug-in hybrid electric vehicle charging station planning, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2015, Vol. 9, No. 7, pp. 666-676.
- [11] Kim, H.J., Kwon, O.S., Son, D.H., and Yang, W.S., A Problem of Locating Electric Vehicle Charging Stations for Load Balancing, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2018, Vol. 41, No. 4, pp. 9-21.
- [12] Koopmans, T.C., An analysis of production as an efficient combination of activities, *Activity analysis of production and allocation*, Wiley, 1951.
- [13] Lee, J.D. and Oh, D.H., Theory of efficiency analysis : Data envelopment analysis, Jiphill Media, 2012.
- [14] Seiford, L.M. and Zhu, J., Modeling undesirable factors in efficiency evaluation, *European Journal of Operational Research*, 2002, Vol. 142, No. 1, pp. 16-20.
- [15] Suk, I., A study on geoenvironmental and socioeconomic factors for the use of EV charging stations, *Proceedings of Conference of the Korea Society of Automotive Engineers*, 2019, Jeju, Korea, pp. 1197-1206.
- [16] Wang, G., Xu, Z., Wen, F., and Wong, K.P., Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, Vol. 28, No. 4, pp. 2363-2372.
- [17] Wang, G., Zhang, X., Wang, H., Peng, J.C., Jiang, H., Liu, Y., Wu, C., Xu, Z., and Liu, W., Robust planning of electric vehicle charging facilities with an advanced evaluation method, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 866-876.
- [18] Yang, W.S., A location problem of fast charging stations considering congestion, *Journal of International Logistics and Trade*, 2017, Vol. 15, No. 3, pp. 91-101.
- [19] Yoon, S.-C. and Kim, H.-K., Analysis of investment in Nanotechnology using DEA, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2018, Vol. 41, No. 4, pp. 101-110.
- [20] Yu, Z., Li, S., and Tong, L., Market dynamics and indirect network effects in electric vehicle diffusion, *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 2016, Vol. 47, pp. 336-356.

## ORCID

Hwa-Joong Kim | <http://orcid.org/0000-0003-4976-4813>Dong-Hoon Son | <http://orcid.org/0000-0003-1313-3315>Yeong-Su Gang | <http://orcid.org/0000-0002-9365-0648>