

Analysis on the Efficiency Change in Electric Vehicle Charging Stations Using Multi-Period 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

다기간 자료포락분석을 이용한 전기차 충전소 효율성 변화 분석

손동훈* · 강영수** · 김화중**†

*홍콩과학기술대학교 토목환경공학과

**인하대학교 아태물류학부

It is highly challenging to measure the efficiency of electric vehicle charging stations (EVCSs) because factors affecting operational characteristics of EVCSs are time-varying in practice. For the efficiency measurement, environmental factors around the EVCSs can be considered because such factors affect charging behaviors of electric vehicle drivers, resulting in variations of accessibility and attractiveness for the EVCSs. Considering dynamics of the factors, this paper examines the technical efficiency of 622 electric vehicle charging stations in Seoul using data envelopment analysis (DEA). The DEA is formulated as a multi-period output-oriented constant return to scale model. Five inputs including floating population, number of nearby EVCSs, average distance of nearby EVCSs, traffic volume and traffic congestion are considered and the charging frequency of EVCSs is used as the output. The result of efficiency measurement shows that not many EVCSs has most of charging demand at certain periods of time, while the others are facing with anemic charging demand. Tobit regression analyses show that the traffic congestion negatively affects the efficiency of EVCSs, while the traffic volume and the number of nearby EVCSs are positive factors improving the efficiency around EVCSs. We draw some notable characteristics of efficient EVCSs by comparing means of the inputs related to the groups classified by K-means clustering algorithm. This analysis presents that efficient EVCSs can be generally characterized with the high number of nearby EVCSs and low level of the traffic congestion.

Keywords : Electric Vehicle, Charging Station, Efficiency, Multi-Period Data Envelopment Analysis

1. 서론

효율적인 충전소들을 발굴하고 충전소 효율성에 영향을 미치는 요인들을 파악하는 것은 비용 효율적이고 효과적인 충전소 인프라를 개발하는 데에 중요하다. 그러나

전기차 충전소 효율성에 영향을 미치는 요인들은 다양하며, 각 요인이 해당 효율성에 미치는 영향력은 시간의 흐름에 따라 변화하기 때문에 효율적인 전기차 충전소의 특징을 일반화하는 것은 상당히 어렵다. 위와 같은 상황에서 본 연구는 자료포락분석(Data envelopment analysis : DEA)을 활용하여 전기차 충전소의 효율성 측정방안을 제안하고 측정된 효율성으로부터 효율적인 충전소의 특징을 논하고자 한다.

DEA는 의사결정단위(Decision making unit : DMU)의

Received 7 January 2021; Finally Revised 25 April 2021;

Accepted 27 April 2021

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

성과를 투입요인의 투입량 대비 산출요인의 산출량의 비로 정의하며, 이들의 효율성은 가장 효율적인 DMU의 효율성 수준으로부터 상대적인 값으로 표현된다. 이러한 효율성 정의는 연구자로 하여금 다수의 투입요인과 산출요인의 관계를 명시적으로 정의하지 않고도 DMU의 효율성 수준을 포착하여 유의미한 시사점을 도출할 수 있는 근거를 제공한다. 즉, 이와 같은 DEA의 방법론적 특징은 전기차 사용자의 충전시설 선택문제와 이에 영향을 미치는 복잡하고 다양한 외부요인과의 관계를 투입요인의 규모 대비 산출요인의 규모의 비율로 정의하고 DMU들의 효율성 수준을 상대적인 관점에서 평가한다.

본 연구는 상기 DEA의 특징을 이용하여 하루 동안 시시각각 변화하는 전기차 충전소 효율성을 측정하고, 효율성 측정 결과로부터 다양한 시사점을 도출하고자 한다. 이를 위해 본 연구는 전기차 사용자의 충전패턴에 대한 관측가능성 및 실험결과 해석의 인과성을 고려하여 하루를 이산적 시간단위로 구분한 후, 각 시간단위별 전기차 충전소의 효율성을 계산한다. 본 연구에서의 효율성 계산을 위해 산출기준 규모수익불변 조건을 고려한 다기간(Multi-period) DEA모형을 활용한다. 다시 말해, 상기 모형은 시간단위별로 측정된 효율성과 전체 시간단위를 아우르는 하루동안 충전소의 총효율성을 동시에 드러낸다. 이후 본 연구는 상기 분석모형을 이용하여 전기차 충전소들의 총효율성을 토대로 전기차 충전소의 외부환경과 전기차 충전소의 효율성 수준과의 관계를 논하고자 한다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장은 전기차 충전소의 효율성 측정의 필요성과 연구방법을 모색하기 위해 고려되었던 문헌들을 요약하고 본 연구의 의의를 언급한다. 제 3장은 본 연구에서 전기차 충전소의 효율성 측정을 위한 DEA모형을 소개한다. 제 4장은 DEA모형을 활용하여 산정한 충전소의 상대적 효율성 결과를 요약하고, 일련의 통계분석을 통해 효율성 결과에 대한 시사점을 논한다. 마지막 제 5장은 본 연구의 연구결과를 요약하고 향후 연구방향을 제시한다.

2. 문헌연구

문헌연구 결과에 따르면 일반적으로 전기차 충전소의 효율성은 일정 기간 동안의 충전실적 수준에 따라 평가되어 왔다[9, 11, 12, 13, 20, 22, 23]. 이때 충전소의 충전실적은 전기차 사용자의 충전시설 선택의 패턴에 따라 직간접적으로 영향을 받는다고 알려져 있으며, 이는 전기차 충전소의 운영실적이 전기차 사용자의 충전시설 선택에 영향을 미치는 다양한 요인으로부터 영향을 받을 수 있음을 시사한다. 이러한 점은 충전소의 설치 및 운영에

대한 전략적 의사결정을 연구한 다수의 선행연구[1, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27]에서 주목을 받아왔다. 즉, 전기차 사용자의 충전시설 선택에 영향을 미치는 요인들은 전기차 충전소의 설치 및 운영 과정에서 중요하게 고려되어야 한다. 따라서 본 연구는 문헌연구를 통해 DEA를 활용한 충전소의 효율성 측정방법의 타당성을 검토하고 연구결과의 의의를 지지하기 위한 근거를 제시하고자 한다.

대다수의 선행연구들은 전기차 충전소의 입지조건 및 비용 효율적이고 효과적인 충전소 인프라 구축을 위한 정책제언에 초점을 두고 있다. 하지만 이들은 전기차 충전소의 충전실적에 영향을 미치는 요인들의 역할을 정량적으로 분석하는 데에는 다소 미진한 측면이 있었다. Zhang et al.[27]은 충전소 인프라 구축 의사결정에 필요한 직간접적 요인들을 해외 충전소 네트워크 개발사례를 통해 분석하였다. 이들은 각 요인이 전기차 사용자의 심리학적 특성과 연관이 있음을 파악하고 해당 요인이 전기차 사용자들의 충전시설 선택에 미치는 영향을 정성적인 방법으로 분석하였다. Csonka and Csiszar[5]는 전기차 충전소 네트워크 수립에 미치는 영향요인을 구분한 후, 이들이 충전소 입지 결정에 미치는 영향을 분석하였다. 하지만 이들은 앞서 도출한 영향요인이 실제 전기차 충전소의 입지 결정에 미치는 영향을 분석하기보다 일련의 목적함수와 요인의 특성을 가정한 모형으로부터 적절한 충전소의 입지를 제안하는 데에 그쳤다. Morrissey et al.[19]은 급속 및 완속 충전소의 충전실적과 사회, 경제, 지리적 요인들의 관계를 심층적으로 분석하였다. 해당 연구에서는 충전시간, 전기차 사용자의 급속 및 완속 충전패턴에 따라 충전소의 충전실적에 미치는 요인들의 관계를 정립하고자 하였으며, 이를 위해 ANOVA 통계분석을 이용하였다. Kim et al.[16]은 충전소 인프라 구축 시 충전소 주변의 다중이용시설 및 공공주택이 밀집된 지역, 주거시설 주차장, 휴게소, 주유소, 주요간선도로망 등이 전기차 충전소의 충전실적에 지대한 영향을 미친다고 보았다. 이때 충전소는 4-10km 간격으로 설치가 되는 것이 적절하다고 보았으며, 일련의 실험을 통해 완속 충전기와 급속 충전기에 대한 차별적인 보급전략을 제안하였다. Park et al.[20]은 제주도 지역에서 전기차 사용자의 충전패턴 분석을 토대로 충전소 입지안을 제시하였다. 해당 연구는 충전빈도에 대한 분석 결과를 토대로 제주도 지역에서의 전기차 주행패턴이 관광지를 경유하는 관광통행과 밀접한 관계가 있음을 발견하였다. 이후 이들은 제주도에 통행하는 전기차의 대부분은 자동차 대여서비스와 관련이 있으며, 전기차 충전소의 충전실적 역시 이와 연관함을 실증하였다. Han[10]은 전기차 사용자의 표본 유형에 따라 급속 및 완속 충전의 선호도를 분석하였다.

해당 연구는 전기차 사용자들의 주행패턴 및 충전시설 선호도에 따라 업무지구에서의 집중적인 충전소 네트워크 구축의 필요성을 제안하였다. Kang and Jeon[13]은 경기도 전기차 충전소 설치기준에 대해 논하며 교통의 요충지, 유동인구, 교통량, 유동인구, 근린생활시설, 휴게 입지 수가 높은 지역에 충전소를 설치한다고 주장하였다.

이에 반해 아래 제시된 선행연구들은 전기차 충전소의 충전실적에 미치는 요인에 대해서 보다 과학적인 분석방법으로 구체화하고자 하였다. Suk[23]은 전기차 사용자의 충전시설 선택에 미치는 영향요인을 구체화하기 위하여 전국의 전기차 충전소와 이들과 연관된 지리경제적 요인을 활용한 회귀분석을 실시하였다. 해당 연구는 도로보급률, 평균소득이 높을수록, 휴게소와의 거리, 평균 연령, 인구 밀도가 낮은 지역에서의 전기차 충전량이 증가하는 경향이 있음을 보였다. Jang[12]은 대구지역 충전소 충전 수요에 미치는 영향요인을 분석하였다. 그 결과 인구 밀도가 높은 지역에 속한 충전소의 충전량이 다른 지역에 위치한 충전소들보다 대체적으로 높은 것을 확인하였다. Chakraborty et al.[1]은 이산선택모형을 이용하여 전기차 사용자의 주행패턴, 차량성능, 충전소 입지 현황, 사용자 생활정보, 교통정보 등을 고려하여 전기차 사용자의 충전시설 선택 문제를 분석하였다. Son et al.[22]은 전기차 충전소의 충전실적을 상대적 효율성 관점에서 해석하고자 DEA를 활용하여 분석하였다. 해당 분석에서는 투입변수로서 유동인구, 교통량, 주변 충전소의 개수와 평균거리, 교통혼잡비용이 고려되었으며, 효율성 척도의 기준이 되는 산출요인으로는 충전소의 충전횟수가 고려되었다. 하지만 해당 연구는 효율성 수준을 토대로 투입요인과 산출요인 간의 관계를 명확하게 규명하지는 못하였다.

앞선 문헌연구 결과를 토대로 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다. 첫째, 많은 선행연구들이 전기차 충전소 주변의 외부환경 및 기타 시설현황이 전기차 충전소의 충전실적과 유의미한 상관관계가 존재함을 전제하고 있었다. 특히 전기차 충전소 주변의 도로보급률, 교통량, 유동인구, 휴게소를 포함한 문화시설 입지 현황 등이 충전소의 충전실적에 중요한 영향을 미치는 것으로 고려되었다. 또한 전기차 충전소 입지결정 과정에서 주변 충전소의 입지 현황이 전기차 충전소의 충전실적과의 관계가 있는 것으로 보았다. 이는 충전소에서의 충전 대기 시간 및 충전소 혼잡 시 대안 충전소 탐색시간 소요를 회피하기 위한 전기차 사용자의 전략적 충전시설 선택의 결과로 사료된다. 그 외에도 전기차 사용자의 주행패턴과 주행목적, 인구통계적 측면에서의 충전패턴 분석이 집중적으로 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

앞서 언급한 문헌들은 분석과정에서 고려된 요인들이 전기차 충전소에 미치는 영향관계를 탐색하거나 영향력

의 정도를 구체화하는 데에 주력하였다. 특히 이들 대부분은 충전소의 절대적인 충전실적에 주목하며 연구를 수행하였다. 하지만 이와 같은 연구 방법은 다음과 같은 문제점을 지닌다. 첫째, 충전소의 절대적인 충전실적에만 근거한 충전소의 효율성 평가는 충전소 네트워크의 연결성을 고려하여 설치된 충전소의 효율성을 평가하는 데에 부적절하다. 현실적으로 전기차 사용자들은 충전소의 부족으로 인해 주행거리와 잔여에너지에 대한 부담감(Range anxiety)이 큰 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 실제 일부 충전소들은 충전소들 간의 인접성 등을 고려하여 충전 수요가 비교적 낮은 곳에 입지하기도 한다. 따라서 위와 같은 절대적인 평가기준으로 이들의 효율성을 측정하는 데에는 평가방법의 타당성 측면에서 문제가 있다. 즉, 충전소의 연결성을 대표하는 지표를 추가적으로 고려하여 다각적인 측면에서 충전소의 효율성을 정량적으로 계산할 수 있는 방법이 필요하다. 이러한 이유로 Son et al.[22]은 다목적 평가요인을 고려할 수 있는 DEA를 활용하여 충전소의 효율성을 평가하고자 시도하였으나 해당 연구에서는 효율성과 투입변수 간의 관계에 대해 명확하게 분석하지 못했다. 또한 해당 연구에서 활용된 DEA모형은 충전소의 효율성 측정의 변별력이 뒤떨어져 효율적인 충전소를 대표하는 특징을 논하는 데에 제약이 될 수 있다. 또한 Jang[12]의 경우 시간별로 달라지는 충전소의 충전량을 토대로 충전소 충전실적에 미치는 영향요인을 간접적으로 추정하였지만, 각 요인이 충전소의 상대적 효율성 증진에 미치는 정도를 분석하지는 않았다.

이러한 점을 고려하여 본 연구는 DEA를 통해 도출된 효율성 측정 결과를 토대로 충전소 주변의 외부환경이 충전소 효율성에 미치는 영향에 대해 논하고자 한다. 이를 위해 본 연구는 Son et al.[22]의 연구를 확장하여 다기간 DEA모형으로부터 충전소 효율성 분석의 변별력을 제고하고, 해당 연구에서 수행하지 않았던 보다 심층적인 분석을 수행함으로써 유의미한 연구결과를 도출하고자 한다.

3. 연구방법

본 장은 전기차 충전소의 효율성을 측정하기 위한 투입요인과 산출요인을 정의하고 효율성 분석에 활용된 DEA모형을 구체적으로 기술한다.

3.1 투입요인 및 산출요인

앞서 언급한 바와 같이, DEA 모형이 산정하는 효율성은 투입요인의 투입량과 산출요인의 산출량의 비율로 정의

하며, 각 DMU의 효율성은 가장 효율적인 충전소의 효율성 수준과 비교한 상대적인 값으로 표현한다. 따라서 투입요인 및 산출요인에 대한 선정과 효율적인 충전소의 효율성 수준에 따라 효율성에 대한 해석도 달라질 수밖에 없다. 또한 본 연구는 시간의 흐름에 따라 변화하는 전기차 충전소의 효율성 수준을 평가하기 위하여 다기간 DEA 모형을 활용한다. 이를 위해 본 연구는 하루 중 투입요인과 산출요인의 관계를 일련의 이산적 시간단위로 구분하여 분석한다. 각 시간단위는 충전소의 효율성 측정의 기준이 되며, 이로부터 얻어진 복수의 효율성은 하루 전체를 대표하는 총효율성을 산정하는 데에 활용된다.

3.1.1 투입요인 및 산출요인 정의

<Table 1>에 제시된 본 연구에서 고려된 투입요인은 크게 충전소 네트워크 구조 측면(Topological aspect)의 요인과 시공간적 전이 측면(Spatial-temporal aspect)의 요인으로 구분된다. 이러한 구분방식은 충전소 운영사업자가 전기차 충전소를 설치하는 데에 고려해야 하는 요인들의 특성에 기인한 것으로써, 충전소의 안정적인 충전수요 확보와 전기차 사용자의 방전 위험부담을 완화를 위한 밀접 충전소 네트워크 구축이라는 목적을 함께 달성하기 위한 구분 방식이다. 예를 들어 Kang and Jeon[13]의 연구에서는 전기차 충전소의 적정 입지 선정 시 인접 충전기까지의 주행거리, 반경 5km 이내의 대안 충전소의 수, 행정동내의 급속충전기의 수 등이 고려된 사례를 볼 때 충전기 설치 시 충전수요 뿐만 아니라 충전소 네트워크와 관련된 요인들이 고려되기도 하였다. 이때의 네트워크 구조 측면의 요인은 시간의 흐름에 따라 변하지 않는 요인이며, 반면에 시공간적 전이 측면에서의 요인은 본 연구의 DEA 모형에서 시간의 변화에 따라 규모가 변할 수 있는 가변적 요인이다.

본 연구에서의 충전소 네트워크 구조 측면의 요인으로서 효율성 측정의 대상이 되는 충전소로부터의 0.5km 이내의 주변 충전소의 개수와 그들과의 평균거리가 고려

되었다. 상기 두 요인은 선행연구에서 전기차 충전소 네트워크 개발을 위해 고려되어온 대표적인 요인들이다. 예를 들어, Suk[23]은 최인접 충전소 간의 거리가 가까울수록 충전소 이용 실적이 증가하는 경향이 있다는 것을 회귀분석을 통해 밝혀낸 바 있다. Csonka and Ciszar[6]는 실증적 연구를 수행한 문헌으로부터 충전소 설치 후 보지로부터 주변의 충전소의 개수 및 거리가 후보지의 충전수요에 부정적인 영향을 미친다는 가정하에 충전소 입지안을 도출하였다. Kim et al.[16] 또한 충전소 설치 후보지를 고려함에 있어 주변 충전소의 입지 현황을 중요한 요인으로 고려하였다. 이들 선행연구들이 주변 충전소의 개수 및 거리를 요인으로 고려했다는 사실은 충전소 네트워크 측면의 요인들이 충전소의 충전실적에 영향을 미치는 요인이라는 것을 의미한다. 하지만 Csonka and Ciszar[6]와 Kim et al.[16]는 충전소 입지의 밀도 혹은 인접성이 충전소의 충전실적에 미치는 영향관계에 대해서 분명하게 언급하지 않았다. 즉, 이들 두 선행연구는 서로 다른 충전소들이 서로 보완적인 관계인지 경쟁적인 관계인지에 대해서는 명확하게 밝히지 않았다. 다만 본 연구는 Suk[23]의 통계분석에 의해서 확인된 충전소들이 인접할수록 충전소의 충전실적에 긍정적인 영향을 미친다는 연구결과를 토대로, 충전소간의 거리가 줄어들수록 충전소의 충전횟수가 늘어날 것임을 가정하였다. 또한 Kang and Jeon[13]에서 충전소의 개수가 우수한 지역일수록 충전수요가 양호할 것이라는 연구결과를 토대로 본 연구는 충전소의 개수가 충전소 운영효율성에 긍정적인 영향을 미치는 요인으로 보았다.

본 연구는 DEA 모형에서 고려한 시공간적 전이 측면에서의 투입요인으로써 충전소 주변의 유동인구, 교통량, 교통혼잡비용을 고려하였다. 각 변수의 선정이유를 기술하면 다음과 같다. 우선, 충전소 주변의 유동인구의 경우, Kang and Jeon[13]은 전기차 사용자의 충전패턴, 국내외 설치기준 사례를 분석하여 전기차 충전기를 설치하는 데에 유동인구를 고려하는 것을 제안하였다. Jang[12]은

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

Category		Factors	Definition
Input factors	Topological factors	No. of nearby EVCSs	Number of EVCSs within 2km from a EVCS
		Avg. distance of nearby EVCSs	Average distance of EVCSs within 0.5km from a EVCS
	Spatial-temporal factors	Floating population ^a	Average daily floating population by region; Observation of the floating population from 7am to 8pm using counters
		Traffic volume ^a	Daily traffic volume by region; Estimation of traffic volume for unobservable roads using realized traffic volumes of nearby roads and up-to-date navigation data
	Traffic congestion cost ^a	Money value of travel time and losses caused by traffic congestion	
Output factor	Charging frequency ^a		Average daily charging frequency by EVCS

^a they are time-variant factors

기존의 전기차 충전소의 충전실적과 충전소 주변의 외부 요인과의 관계를 분석하는 과정에서 비보행 유동인구가 유의미한 요인임을 발견하였고, 이를 토대로 충전수요를 극대화할 수 있는 입지안을 제안하였다. 상기 두 선행연구가 유동인구를 고려한 데에는 전기차 사용자가 충전을 하는 시간 동안 주변 상권을 배회하거나 유동인구가 높은 지역은 일반적으로 전기차 사용자들이 방문할 가능성이 높은 지역이라는 점을 전제한다. 물론 비보행 유동인구와 보행을 포함한 유동인구는 질적으로 차이가 있지만, 공통적으로 인구 유입과 유출이 활발하게 이루어지는 지역에서의 충전수요가 높을 것임을 이들 두 선행연구에서 가정하고 있다. 따라서 상기 선행연구의 사례를 고려할 때, 전기차 충전소 수요에 유동인구가 주요한 변수일 뿐만 아니라 충전소 설치 의사결정에서 고려될 수 있는 변수임을 확인할 수 있다.

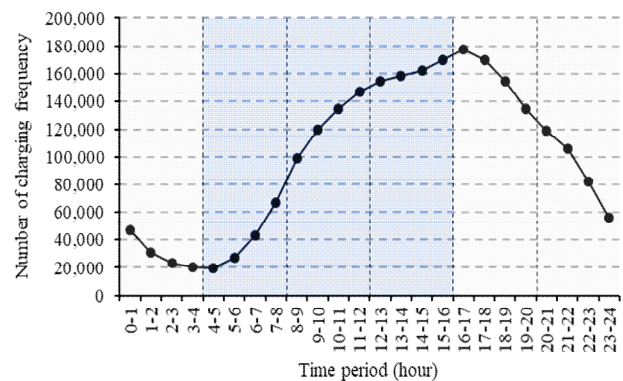
충전소 주변의 교통량의 경우, 전기차 충전소 입지 및 사용자의 충전패턴에 관한 대다수의 연구에서 범용적으로 고려된 요인이다. 이는 교통량과 전기차 충전소의 접근성 간의 강한 상관관계가 있음을 전제한다. 하지만 본 연구에서 고려한 교통량은 특정 도로에서의 특정 기간 동안의 전체 교통량을 의미한다. 이는 전기차 충전소의 수요와 무관하다는 비판에 직면할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구는 교통량이 주행자의 출발지에서 목적지까지의 이동선상에 포함된 도로를 이용하는 수요라고 간주하였으며, 화석연료 차량의 출발지 및 도착지 간의 주행패턴은 전기차의 주행패턴과 크게 다르지 않을 것이라고 보기 때문에 일반적으로 통용되는 교통량을 투입변수로 고려하였다.

마지막으로 본 연구는 교통혼잡비용을 전기차 충전소의 효율성 평가요인으로 고려하였다. 교통혼잡비용은 통계청의 통계지침에 준거한 요인으로서 도로상을 주행하는 차량들의 교통혼잡으로 인하여 정상속도 이하로 운행하게 됨으로 발생하는 시간가치의 손실, 차량운행비의 증가와 같이 추가적으로 발생하는 총체적인 비용을 의미한다. 따라서 해당 지표는 전기차 사용자가 충전소에 이르는 데에 소요되는 시간가치 손실 비용이라고 볼 수 있으며 충전소의 접근성을 약화시키는 요인이라고 볼 수 있다. 하지만 이러한 요인을 충전소 효율성 측정의 근거로 삼기 위해 본 논문은 다음의 가정을 토대로 분석을 하였다. 실제로 전기차 사용자가 충전소에 이르거나 방문한 충전소의 혼잡으로 인해 대안 충전소를 탐색하고 다시 이동하는 데에 부담하는 시간가치의 손실을 정확하게 추정하기 위해서는 사용자의 주행경로 또는 전기차 사용자의 충전소 선택에 대한 의사결정 구조를 정확히 파악해야 한다. 하지만 이는 현실적으로 불가능하므로 본 연구는 충전소 주변 도로의 혼잡상황과 충전소에 이르는 데에 소요된 시간가치가 심각하게 이질적이지 않다고 가정하였다. 이는 현실에서 특정 도로의 혼잡상황이 인접한 다른 도로의 혼잡상황과 독

립적이지 않으며, 전기차 사용자는 도로상황에 대한 정보를 미리 파악하고 이로부터 야기될 수 있는 시간가치의 손실을 줄이는 선택을 할 수 있다고 보기 때문이다. 또한 Huang and Kockelman[11]은 도로에서의 혼잡이 충전수요에 영향을 미칠 수 있다는 점을 제시하며 이에 대한 확장 연구를 수행 중이다. 따라서 본 연구는 교통혼잡비용을 충전소가 당면한 부정적 요인으로서 충전소의 효율성에 영향을 미친다고 가정하여 분석하고자 한다.

3.1.2 다기간 DEA 시간단위 정의

본 논문은 시간의 흐름에 따라 변화하는 충전소의 효율성을 포착하기 위해 다기간 DEA를 이용하여 분석한다. 이를 위해 본 절에서는 본 연구가 구분한 시간단위의 선정 기준에 대해서 설명한다. 하지만 본 연구에서 제안하는 시간단위 구분은 근거가 미약하다는 문제점을 지니고 있다. 이는 전기차 사용자들의 충전 및 주행패턴에 대한 완전하고 세밀한 정보가 부존하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 연구방법론의 타당성을 최대한 제시하기 위하여 다음의 접근방법을 통해 일중(24시간)을 4시간 단위(0~4시, 4~8시, 8~12시, 12~16시, 16~20시, 20~24시)로 구분하여 총 6개의 시간구간으로 분절하였다.



<Figure 1> Total Number of Charging Frequencies of EVCSs in Seoul Per Hour During a Day

첫째, 본 연구는 전기차 사용자의 주행패턴의 의미를 부여할 수 있는 수준에서의 시간구간을 정의하였다. 이를 보다 구체적으로 설명하자면 다음과 같다. <Figure 1>은 2018년도 서울시에 입지한 전체 전기차 충전소에서의 충전빈도를 1시간 단위로 구분하여 보여주고 있다. 해당 그림에서 확인할 수 있듯이 일중 전기차 충전빈도는 5시에 최저치를 형성한 이후로 지속적으로 상승하여 17시에는 최고치에 도달한다. 그 이후 충전수요는 익일 5시까지 다시 축소한다. 이는 서울시의 전기차 수요가 일중 특정 두 시간구간을 기준으로 충전수요의 팽창과 축소의 과정을 보여줌을 의미한다.

본 연구는 상기 두 시간구간을 기준으로 충전수요의 팽창과 축소 구간을 각각 4시간마다 추가적으로 세분화하여 총 6개의 시간단위로 효율성을 분석하였다. 이때 본 연구에서 세부적인 시간단위를 4시간으로 구분한 데에는 두 가지 이유가 고려되었다. 첫째, 교통분석에서 일반적으로 통용되는 시간구간의 의미를 고려하였다. 예를 들어 오전 4시부터 8시까지는 출근 교통수요가 가시적으로 팽창하는 구간으로 볼 수 있다. 또한 오후 12시부터 16시까지는 교통량이 정점을 이루는 구간으로 간주되며, 이후 일시적인 퇴근 교통량의 증가 이후 도로교통이 해소되는 시간구간으로 통용된다. 이는 본 연구가 상기 시간구간을 세분화하면서 일반적인 교통수요의 특성을 이용하여 논의를 확장할 수 있음을 의미한다.

둘째, 본 연구는 다기간 DEA 효율성 결과의 강건성 및 결과해석의 가능성을 고려하여 세부적인 시간구간을 결정하였다. 일반적으로 교통분석 및 충전수요 분석 시 1~2 시간 단위의 정보를 토대로 분석한다. 하지만 본 연구는 다기간 DEA를 활용하여 일련의 선행분석을 실시한 결과 충전수요가 현저하게 낮은 충전소의 경우 충전횟수 변동에 따라 효율성의 수준이 극적으로 변하는 문제점을 발견하였다. 이는 효율성 분석결과의 유익성을 약화하여 유의미한 시사점을 도출하는 데에 제약 요인이 될 수 있다. 반대로 시간단위를 과도하게 길게 설정할 경우 시간구간별 효율성의 변화가 극적으로 줄어드는 점 또한 결과해석의 문제점을 야기할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 본 연구는 상기 복합적인 근거를 토대로 다기간 DEA에서 4시간 단위로 효율성을 분석하는 것이 적절하다는 판단을 하게 되었다.

3.2 분석방법

DEA의 상대적 효율성 개념은 Farrell[8]와 Koopmans[17]의 연구를 파레토 최적성 관점에서 이해하려고 했던 데에서 기인한다. 이때 효율적인 DMU들이 구성하는 생산변경(Production frontier)은 비효율적인 DMU들의 효율성 수준을 일련의 거리함수로 평가할 수 있는 기준을 제공한다. 따라서, 생산변경을 결정하고 비효율적인 DMU가 생산변경에 이르는 거리를 측정하는 방법에 따라 각 DMU의 효율성 측정 결과는 달라진다. 이때의 거리함수란 투입변수와 산출변수의 중요도와 생산변경에 최단거리로 이르기 위한 방향으로 정의된 벡터함수이다. 이를 기준으로, 본 연구에서의 DMU는 충전소라고 할 수 있으며 생산변경은 효율적인 충전소들의 투입요인과 산출요인의 최대 비율이라고 할 수 있다. 이는 연구자의 분석 목표 및 충전소의 효율성을 대표하는 척도에 따라 다양한 방식으로 효율성이 측정될 수 있음을 의미한다.

본 연구에서의 각 충전소의 효율성은 하루동안 다른 충전소에 비해 비교적 높은 수준의 충전실적이 일관적으로 유지되는 곳이라고 정의하였다. 즉, 시간단위별로 주어진 외부환경에서 다른 충전소에 비해 비교적 충전횟수가 높은 충전소일수록 충효율성의 수준이 증가한다고 가정한 것이다. 서로 다른 시간단위에서 충전소의 효율성을 평가할 경우, 연구자는 시간의 흐름에 따라 변화하는 충전소를 둘러싼 외부환경이 충전소 운영에 미치는 영향에 대해서 파악해야 한다. 만약, 연구자가 서로 다른 시간단위에서 충전소의 운영 및 전기차 사용자의 충전시설 선택의 특성이 차이가 있다고 간주한다면, 시간단위별 충전소의 효율성 측정은 독립적으로 이루어져야 한다. 이외는 달리, 시간의 흐름에 따라 충전소의 운영 및 전기차 사용자의 충전시설 선택의 질적인 차이가 뚜렷하지 않거나, 충전소가 발휘할 수 있는 충전실적의 수준이 시간의 흐름과 무관하다고 판단할 경우, 모든 시간단위에서 동일한 효율성 측정척도를 활용해야 한다. 이는 각 전기차 충전소에 대해 외부환경 요인과 충전실적의 관계가 시간의 흐름에 따라 변화하지 않는다는 것을 의미하며, 투입변수와 산출변수의 가치가 시간의 흐름에 따라 변하지 않음을 의미한다. 이 경우, 전체 시간단위에서의 전기차 충전소의 최대 효율성을 도출할 수 있는 생산변경을 토대로 서로 다른 시간단위에 속한 충전소의 효율성을 평가함으로써, 효율성 측정결과의 변별력을 제고함과 동시에 시간단위별로 변화하는 효율성의 수준을 보다 극적으로 평가할 수 있다. 이를 위해 본 연구는 Kao[14]가 제안한 다기간 DEA 모형을 제시한 후, 본 연구에서 활용된 효율성 측정 모형을 추가로 제시한다. 이러한 논의를 위해 사용된 일련의 주요 기호들을 요약하면 다음과 같다.

기호

m	투입요소의 총 개수
n	DMU의 총 개수
q	시간구간의 총 개수
s	산출요소의 총 개수
θ_k	DMU k 의 효율성
x_{ij}	DMU j 의 i 번째 투입요소에 대한 전체 기간 동안의 투입량
$x_{ij}^{D,p}$	DMU j 의 i 번째 긍정적 투입요소에 대한 기간 p 동안의 투입량
$x_{ij}^{U,p}$	DMU j 의 i 번째 부정적 투입요소에 대한 기간 p 동안의 투입량
y_{rj}	DMU j 의 r 번째 산출요소에 대한 전체 기간 동안의 산출량
y_{rj}^p	DMU j 에 대한 r 번째 산출요소에 대한 기간 p 동안의 산출량

상기 기호를 토대로 Kao[14]의 다기간 DEA 모형을 가
상가격 기준 산출지향 규모수익불변 조건을 고려한 모형
으로 정의하면 다음과 같다.

$$[P1] \theta_k = \text{Max} \sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$$

subject to

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{ik} = 1$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0 \quad \text{for } j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}^p - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij}^p \leq 0 \quad \text{for } p = 1, \dots, q, j = 1, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq 0 \quad \text{for } r = 1, \dots, s, i = 1, \dots, m$$

상기 모형은 k 번째 DMU가 발휘할 수 있는 최대 효율
성 θ_k 를 가상가격 u_r 과 v_i 의 조합을 찾는다. 여기서 앞서
언급한 두 변수는 해당 DMU가 최대 효율성을 발휘할 수
있는 산출요인과 투입요인의 조합을 결정하는 변수로서,
본 연구에서는 충전소가 당면한 외부환경과 현재 이뤄낸
충전실적을 토대로 최고 수준의 효율성을 도출하기 위한
관계를 결정한다. 즉, 상기 가상가격은 DMU가 최대의 효
율성을 발휘할 수 있는 투입요인과 산출요인의 생산조합
이라고 볼 수 있다. 이때 효율성 θ_k 는 m 개의 투입요인에
대한 가치의 합 $\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}$ 대비 s 개의 산출요인 가치의 합
 $\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}$ 의 비로 정의되며, 해당 비율은 첫 번째 제약식
으로부터 0~1의 값을 갖도록 되어있다. 상기 모형은 단일
기간 동안에 이뤄지는 투입요인과 산출요인의 관계를 정
의한다. 따라서 이를 다기간 DEA 모형으로 확장하기 위
해서는 투입요인과 산출요인이 본 연구에서 정의된 시간
단위에 따라 분절된 모형으로 정의해야 한다. 이를 위해
 x_{ij}^p 와 y_{rj}^p 를 각각 시간단위 p 동안의 DMU j 의 투입요인 i
와 산출요인 r 이라고 정의하자. 전체 투입요인의 투입량
과 산출요인의 산출량은 각 시간단위에서 드러난 투입량
과 산출량의 합으로 표현이 가능하다고 가정할 경우 모형
[P1]에서 정의된 x_{ij} 와 y_{rj} 는 각각 $x_{ik} = \sum_{p=1}^q x_{ik}^p$ 와 $y_{rk} =$
 $\sum_{p=1}^q y_{rk}^p$ 로 재정의 할 수 있다. 이를 토대로 우리는 최대
효율성을 유도하는 투입요인 및 산출요인의 관계 또는 중
요도를 결정하는 가상변수 u_r 과 v_i 는 전체 시간구간에 걸
쳐 드러난 투입요인과 산출요인의 관계로부터 결정되며,
이는 투입요인과 산출요인 간의 생산관계가 시간구간별
로 동일하게 적용됨을 알 수 있다. 즉, 이는 각 시간단위별
전기차 충전소가 마주하는 환경 또는 충전실적의 특이성
을 고려하지 않음을 의미한다. 두 번째 제약식은 전체 기
간 동안의 산출요인 가치의 합은 투입요인 가치의 합보다

작다는 것을 의미하며, 세 번째 제약식은 각 시간단위별
산출요인의 가치와 투입요인의 가치의 관계를 정의하고
있다. 이러한 정의는 투입요인의 투입량과 산출요인의 산
출량의 관계를 정규화 하는 역할을 한다.

지금까지의 정의를 토대로 모형[P1]에서의 총효율성
 θ_k 과 각 시간구간별 효율성 θ_k^p 의 극대값을 정의하면 다음
과 같다. 이때 부호(*)는 모형[P1]으로부터 도출된 DMU
의 총효율성을 극대화하는 투입요인과 산출요인 가상변
수 u_r 와 v_i 의 조합을 의미한다.

$$\theta_k = \frac{\sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik}}{\sum_{r=1}^s u_r^* y_{rk}}$$

$$\theta_k^p = \frac{\sum_{r=1}^s u_r^* y_{rk}^p}{\sum_{i=1}^m v_i^* x_{ik}^p} \quad \text{for } p = 1, \dots, q$$

그러나 상기 모형은 본 연구에서 전기차 충전소의 효
율성을 측정하기 위해 다음의 두 가지 측면에서 개선되어
야 할 점이 있다. 첫째, 본 연구에서는 충전소 효율성에
부정적인 영향을 미치는 교통혼잡비용과 충전소 간의 평
균거리가 고려된다. 따라서 DEA 모형에서의 거리함수를
이용하여 상기 두 투입변수로부터 충전소의 효율성을 측
정하려면 투입량의 증가가 산출량의 증가라는 관계를 만
족해야 한다. 따라서 본 연구는 상기 부정적인 투입요인
이 효율성에 영향을 미치는 것을 보다 명시적으로 드러내
기 위하여 x_{ij}^p 를 긍정적인 투입요인 x_{sj}^{Dp} 와 부정적인 투입
요인 x_{ij}^U 로 구분하고자 한다. 이때 앞서 언급한 바와 같이
부정적인 투입요인 t 의 투입량은 $x_{ij}^{Up} = -x_{ij}^p + \max[x_{ij}^p | t$
 $= 1, \dots, n] + \gamma$ 의 수치 변환 절차를 통해 재정의 되며, γ
는 임의의 작은 실수를 의미한다. 따라서 부정적인 요인
이 줄어들수록 충전소의 충전실적이 좋아지는 전제를 만
족하며, 이는 DEA 모형이 도출한 생산변경으로부터 충전
소의 효율성이 측정될 수 있는 근거를 만족한다.

둘째, 모형[P1]은 시간구간별 충전소의 효율성을 평가
함에 있어 투입변수가 과다함에도 불구하고 생산변경을
구성하는 충전소로 분류되어 효율적으로 측정될 가능성
이 있다. 이러한 특성은 효율적인 DMU의 여분(Slack)을
의미하는 것으로서, 해당 충전소는 더 많은 투입요인을
줄이고도 동일하게 효율적인 충전소로 분류될 가능성이
있다. 따라서 본 연구는 투입변수의 투입량에 대해 여분
을 지닌 효율적인 충전소에 대하여 일련의 제약을 가함으
로써 효율적인 충전소를 도출하는 데에 변별력을 제고하
고자 한다. 이를 위해 본 연구는 여분 s_i^- 과 s_r^+ 를 각각 투
입변수의 투입량과 산출변수의 산출량에서의 여분량으로
정의한다. 이로써 앞서 언급한 두 가지의 개선점을 토대
로 모형[P1]을 수정한 모형은 다음과 같다.

$$[P2] \theta_k = \max \eta - \xi \left(\sum_{i=1}^w s_i^{D-} + \sum_{j=1}^h s_j^{U-} + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right)$$

subject to

$$\sum_{p=1}^q \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^{D,p} + s_i^{D-} = x_{ij}^D \quad \text{for } i = 1, \dots, w$$

$$\sum_{p=1}^q \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}^{U,p} + s_i^{U-} = x_{ij}^U \quad \text{for } i = 1, \dots, h$$

$$\sum_{p=1}^q \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}^p - s_r^+ = \eta \cdot y_{r0} \quad \text{for } r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \text{for } j = 1, \dots, n$$

$$s_i^{D-} \geq 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, w$$

$$s_i^{U-} \geq 0 \quad \text{for } i = 1, \dots, h$$

$$s_r^+ \geq 0 \quad \text{for } r = 1, \dots, s$$

모형[P2]에서 ξ 는 효율성 계산 시 여분의 크기를 측정하기 위해 임의로 부여된 매우 작은 실수이며 λ_j 는 투입변수의 투입으로부터 산출변수의 산출량을 극대화하는 조합을 탐색하기 위해 도입된 변수로써 최대가능 생산수준에서의 투입변수와 산출변수의 관계를 정의한다. 투입변수의 관계를 정의하는 모형[P1]에서 두 번째 제약식은 모형[P2]에서 처음 두 개의 제약식에서 드러난 것과 같이 w 개의 긍정적인 투입변수에 대한 제약식과 h 개의 부정적인 투입변수에 대한 제약식으로 분리되었다. 이를 통해 모형[P2]는 총효율성 η 를 측정한다. 즉, 효율적인 충전소는 주어진 외부환경으로부터 비교적 높은 수준의 충전실적을 드러낸 것과 더불어 투입요인에서의 불필요한 투입이 존재하지 않아 여분이 존재하지 않는 충전소이다. 따라서 모형[P2]는 앞서 소개한 모형[P1] 보다 효율성 측정의 변별력이 우수하며 부정적인 투입변수의 역할을 긍정적인 투입변수의 경우와 동일하게 치환함으로써 분석 결과의 직관성을 개선한다.

DMU의 효율성이 복수기간으로부터 측정되는 모형은 다기간 DEA 뿐만 아니라 동적(Dynamic) DEA[7] 및 메타(Meta) DEA 등이 있다. 하지만 본 연구에서 다기간 DEA를 선정하여 분석한 데에는 다음의 두 가지 이유가 고려되었다. 첫째, 동적 DEA의 경우 서로 다른 기간이 구성한 생산변경이 이후의 기간에서 도출된 생산변경 구성에 영향을 미친다. 이는 서로 다른 기간이 서로 종속적이라는 것을 의미한다. 하지만 본 연구에서는 서로 다른 기간에서의 충전실적 및 투입변수의 투입규모들이 이전 기간으로부터 영향을 받지 않음을 가정한다. 예를 들어 전기차 사용자가 이전 기간의 충전소의 상황을 현재의 충전시설 선택 과정에서 고려하지 않음을 의미한다. 즉, 본 연구는 특정 시간구간에서의 충전소의 충전실적과 투입변수의 투입량을 이

전기관으로부터 독립이라는 점을 가정한다. 둘째, 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서 고려한 모형[P2]는 시간구간에 따라 투입변수와 산출변수의 가치가 일정하게 고정되는 모형이다. 즉, 효율성 측정 시 투입변수와 산출변수의 중요도는 일정하게 유지된다. 하지만 메타 DEA의 경우 이러한 특성을 반영하여 효율성을 측정할 수 있지만, 실제로 생산변경을 구성하지 않는 영역을 기준으로 효율성 측정 가능성을 배제할 수 없으므로 정확한 효율성을 도출하고 이를 해석하는 데에 제약이 있다. 따라서 본 연구에서는 상기와 같은 이유들을 고려하여 다기간 DEA를 분석 모형으로 삼았다. 다기간 DEA에 대한 그 밖의 이론적 논의는 Kao[14]에서 자세히 다루지고 있으므로 본 연구에서는 이에 대한 설명을 생략하고자 한다.

4. 효율성 분석결과

본 장에서는 전기차 충전소의 효율성 측정결과를 요약하고 이에 대한 시사점을 논하고자 한다. 이를 위해 본 절은 우선 서울시 전체 충전소의 시간구간별 효율성 및 총효율성을 도출하고 이로부터 토빗 회귀분석(Tobit regression)을 이용하여 효율성과 투입변수 간의 유의미한 관계를 직간접적으로 분석한다. 또한 상기 효율성 계산결과로부터 K-평균 군집화 알고리즘(K-means clustering algorithm)을 이용하여 총효율성 수준에 근거한 수준차별화된 전기차 충전소들을 결정한다. 이로부터 본 연구는 효율성 수준 차이가 드러난 집단들 간의 투입변수 규모의 차이 여부를 검토하고 이로부터 유의미한 결과를 도출한다.

본 연구는 효율성 분석을 위해 서울시 전기차 충전소 622개소의 효율성을 측정하였다. 3절에서 기술한 바와 같이 각 충전소에 대해서 하루 동안의 총 6개의 서로 다른 시간구간별로 각 충전소의 효율성이 측정하였다. 이때 효율성 측정을 위해 3.2절에서 제안된 모형[P2]를 활용하였다. 본 연구의 DEA 모형내 변수들 가운데 교통량과 교통혼잡비용은 한국교통연구원으로부터 제공받은 2018년 서울시의 교통정보시스템으로부터 구하였다. 또한 충전소의 충전횟수, 인근 충전소의 개수와 이들 간의 평균거리는 환경부로부터 구한 전기차 충전소 자료에서 구하였다. 마지막으로 유동인구 정보는 서울시 열린 데이터 광장(data.seoul.go.kr)의 일반행정 항목에서의 2018년 유동인구 실측조사 결과로부터 구하였다. <Table 2>는 투입변수 및 산출변수의 데이터로부터 정리된 기술통계량을 요약하고 있다. 본 연구의 모형 [P2]에서 정의된 임의의 작은 실수 ξ 과 γ 는 10^{-6} 으로 설정하였다.

<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 ^a	1.54	1.00	10.00	0.00	1.83
Avg. distance of nearby EVCSs ^a	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

^a Note that some EVCSs have no neighbor EVCS within 500m. For the EVCSs, we assign an arbitrary small value for the factors of the number and average distance of nearby EVCS.

<Table 3> Efficiency Results of the EVCSs Per 4-Hour Period

Quartiles	Time interval(%)					
	0~4	4~8	8~12	12~16	16~20	20~24
Quartile 1	0.00 ^a (0.00) ^b	0.27 (0.64)	0.21 (0.51)	0.00 (0.08)	0.00 (0.00)	0.26 (0.64)
Quartile 2	0.02 (0.14)	1.24 (1.95)	1.07 (1.93)	0.32 (0.75)	0.08 (0.22)	1.20 (1.95)
Quartile 3	0.59 (1.53)	4.09 (7.81)	3.88 (7.20)	2.35 (5.19)	0.59 (1.27)	3.62 (5.99)
Quartile 4	10.79 (100.00)	24.29 (100.00)	24.19 (90.83)	20.63 (100.00)	8.89 (95.72)	18.92 (96.68)
Average	4.19 ^c	9.26	9.39	8.68	3.51	6.64

^a Average efficiency of EVCSs for each corresponding quartile and time interval.

^b Maximum efficiency among EVCSs for each corresponding quartile and time interval

^c Average efficiency of EVCSs for each time interval

<Table 3>은 전체 충전소를 효율성 측면에서 오름정렬 후 4등분했을 때의 분위별 시간구간별 효율성의 평균과 전체 충전소의 효율성 평균을 요약하여 보여주고 있다. 이때 괄호 안에 표기된 효율성은 각 분위의 속한 충전소들 가운데 최고 효율성을 의미한다. 해당 표에서 볼 수 있듯이 서울시 전체 충전소의 운영효율성이 평균적으로 10% 미만의 효율성을 드러내고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 4분위별 충전소의 효율성 측정 결과를 살펴보자면, 하위 75%의 충전소들의 효율성 평균이 대체적으로 0~4%로 드러난 것과는 달리, 상위 25%의 충전소의 평균 효율성은 충전수요가 확장되는 시기에 약 20%를 웃돌고, 충전수요가 축소되는 시간구간에서도 8~19% 정도의 평균 효율성을 유지하는 것으로 드러났다. 이는 서울시의 전기차 충전소의 효율성이 극적으로 양극화되어 있을 가능성이 높음을 의미한다. 즉, DEA 모형이 도출한 충전소의 효율성은 절대적인 수준을 드러내는 효율성이 아니라 다른 효율적인 충전소의 효율성 수준과 투입요인과 산출요인의 관계를 토대로 결정되는 상대적인 효율성이기 때문이다. 따라서 본 연구는 대다수의 서울시 충전소는 효율적인 충전소와 비교하여 볼 때 매우 저조한 수준의 효율성을 드러낸다고 볼 수 있다. 이와 같은 결과로 나타난 데에는 몇 가지 원인이 고려될 수 있다. 첫째, 전기차 충전소의 충전수요가 일부 충전소에 집중되는 경향으로 인한 원인으로 볼

수가 있다. 이로 인해 대다수의 충전소의 충전수요가 미약한 상태로 남아 효율성 측정 결과에서의 양극화된 결과로 나타난 것을 의심해볼 수 있다. 둘째, 본 연구에서의 대기 DEA 모형이 전기차 사용자의 충전시설 선택문제를 설명하는 데에 필요한 요인을 누락했을 가능성이 있다. 예를 들어, 건물 내에 속해 있는 충전소의 경우 외부에 있는 충전소보다 접근성이 떨어질 경우 이들 충전소 간의 입지 특성을 구분하여 효율성을 분석할 경우 본 연구에서의 효율성 측정과는 다른 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 유사한 시설에 입지한 서로 다른 충전소라도 입지한 지역의 주차공간의 여유 및 사용자의 주행목적 등에 따라서 이들 충전소의 충전실적이 극적으로 달라질 가능성도 배제할 수 없다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 수행한 효율성 분석 결과의 타당성은 하기 이유로부터 찾아볼 수 있다. 본 연구에서 고려한 충전소는 일반 전기차 사용자가 충분히 접근할 수 있는 공공전기차 충전기로서 입지 계획부터 전기차 사용자의 범용적인 사용을 유도하는 것을 목표로 설치된 것이다. 그럼에도 불구하고 전기차 충전소 간의 효율성 차이가 극심하고, 대다수의 충전소의 운영효율성이 저조한 것은 전기차 충전소 입지 계획안이 전기차 사용자의 충전시설 선택과 상당한 괴리가 있을 수 있다는 비판을 할 수도 있을 것이다. 이러한 결과 해석의 경우 본 연구에서의 효율성 측정 결과는 중요한 의의를 지닐 수 있다.

해당 결과에서 발견되는 흥미로운 점은 0~4시와 20~24시에서의 시간구간의 평균적인 충전소 효율성이 16~20시보다 효율성이 높게 측정되었다는 점이다. 이러한 결과는 다음의 몇 가지 원인으로부터 논해될 수 있다. 첫째, 앞서 언급한 0~4시와 20~24시의 시간구간은 일반적으로 하루 동안 교통량 및 유동인구 수준이 매우 낮다. 또한 상당수의 전기차 사용자들이 직장에서 귀가 후 20~24시 및 익일 0~4시에 충전을 하는 경우가 많다[3]. 따라서 충전소의 효율성을 상대적으로 평가하는 본 연구의 다기간 DEA모형에서 16~20시에서의 충전소의 효율성 수준이 20~24시와 0~4시보다 낮게 측정된 것으로 사료된다.

본 연구는 상기 효율성 결과를 바탕으로 해당 DEA 모형에서의 투입요인들이 충전소의 효율성에 어떠한 영향을 미치고 있는지 파악하고자 토빗 회귀분석을 실시하였다. 토빗 회귀분석은 종속변수(충전소의 효율성)가 독립변수(해당 다기간 DEA모형에서의 투입변수)로부터 받는 영향의 범위를 특정 범위로 제한할 때 주로 활용된다. 본 연구에서의 다기간 DEA모형에서의 효율성은 최저 수준인 0에서 최고 수준 1까지의 제한된 범위 내에서 값을 가지므로 토빗 회귀모형으로 효율성 수준에 대한 투입변수의 영향을 분석할 수 있다. 본 연구에서 토빗 회귀모형은 각 충전소의 총효율성을 종속변수로 지정하고 전체 시간구간별 투입요인 규모의 평균치를 독립변수로 정의하였다. 이와 같은 정의를 바탕으로 각 독립변수가 효율성에 미치는 영향을 <Table 4>에 정리하였다.

<Table 4> Result of Tobit Regression Analysis

Factors	Coefficient	t-value	p-value
Traffic congestion cost	-2.353	-6.624	0.000
No. of nearby EVCSs	0.002	1.346	0.178
Traffic volume	0.667	5.637	0.000
Floating population	-0.000	-2.489	0.013
Avg. distance of nearby EVCSs	0.000	0.167	0.867
Intercept	0.067	5.637	0.000

해당 테이블은 각 투입변수가 충전소의 효율성에 미치는 영향과 설명력의 정도를 보여준다. 분석결과와 이의 시사점을 정리하면 다음과 같다. 첫째, 교통량과 인근 충전소의 개수는 충전소의 효율성을 개선시키는 중요한 요인임을 발견하였다. 교통량의 경우 개별 시간구간 동안 평균 교통량이 1대 증가할 경우 효율성의 규모가 약 0.667% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 교통량이 많은 도로는 전기차 사용자들이 자주 이용하는 이동경로 상에 포함되는 도로일 가능성이 높으므로 충전소 이용확률을 또한 높아진다고 볼 수 있다. 또한 충전소 주변의 대안 충전소의 개수가 1개 증가할 경우 유의수준 15% 수준에서 충전소의 효율성이 0.002%가 증가할 수 있음을

드러내고 있다. 이와 같은 결과는 일부 문헌과는 다소 상반되는 내용이다. Suk[23]의 경우 주변 충전소의 개수가 증가할수록 충전소의 충전실적이 증가할 수 있음을 분석하였지만, Csonka and Ciszar[6]의 경우 이들 간의 경쟁관계로 간주하여 부정적인 요인으로서 보았기 때문이다. 또한 본 연구는 충전소 주변의 교통혼잡도 증가가 충전소 효율성과 양의 상관관계를 형성하고 있을 가능성에 대해 본 실험결과는 보여주고 있다. 왜냐하면 해당 실험결과는 개별 시간구간 동안 충전소 주변의 교통혼잡비용이 1천억 원 증가하면 충전소의 효율성이 2.353% 증가하는 것으로 나타났기 때문이다. 특히 이와 같은 실험결과는 Huang and Kockelman[11]의 연구에서 충전수요에 부정적인 영향을 미치는 요인으로 간주되었던 것과는 다소 차이가 있다. 본 연구의 실험결과는 이와 같은 결과에 대해 명확한 근거를 제시하지 못하지만 다음의 두 가지 가능성을 제기하고자 한다. 첫째, 도로혼잡비용이 높은 지역의 경우 도심지역 혹은 상권이 발달한 지역인 경우가 많으므로 애초에 전기차 충전수요가 높은 지역일 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 본 연구의 상대적인 효율성 평가에서 이러한 지역에 입지한 충전소의 효율성이 높게 평가되었을 가능성이 있다. 둘째, 앞서 2절에 언급한 바와 같이 도로혼잡비용은 전기차 사용자의 시간가치 손실비용으로 볼 수 있다. 또한 특정 도로의 혼잡도가 인근 도로의 혼잡도와 크게 다르지 않을 경우, 전기차 사용자는 혼잡도가 완화되는 시간 동안 인근 지역에서 충전을 하며 대기하거나 대안 충전소를 찾으러 가는 비용을 회피하기 위해 혼잡도가 높은 지역에서 충전을 할 수 있다. 따라서 보다 효율적인 충전소 네트워크 구축을 위해서는 향후 전기차 사용자의 충전시설 선택에 대한 추가 연구가 필요하다고 볼 수 있다. 나머지 요인으로서 유동인구와 주변 충전소 간의 거리는 충전소의 효율성에 가시적인 영향을 미치지 못함을 본 실험결과는 보여주고 있다.

하지만 상기 토빗 회귀분석은 투입요소와 산출요소 간의 선형관계를 구분하지만 서로 다른 효율성 수준을 지닌 충전소들의 일반적인 특징을 구분 짓는 데에는 한계가 있다. 따라서 본 연구는 더 나아가 효율성 수준이 차별화된 충전소 간의 투입변수의 규모 차이가 통계적으로 유의미 여부를 확인하고자 추가 분석을 실시하였다. 이와 같은 분석은 향후 전기차 충전소의 입지 결정을 수립하는 데에 효율적인 충전소 네트워크를 구축하기 위해 고려해야 할 중요한 요인을 특정하는 데에 기여할 수 있다. 실제로 전기차 충전소 네트워크 개발은 전기차 사용자의 주행패턴과 충전시설 선택과 관련된 일련의 정보가 부족한 상황에서 이루어진다. 따라서 이러한 분석은 다목적 요건이 고려되는 전기차 충전소 입지 선택에 대해 DEA 관점에서의 효율적인 충전소의 특징을 요약하는 데에 기여할 수 있다.

우선, 본 연구는 효율성 수준의 차이가 유의미한 충전소의 집단을 구분하기 위하여 충전소의 총효율성에 대해 K -평균 군집화 알고리즘을 활용하여 구분하였다. 이때 구분할 군집의 수 K 는 군집 내에서의 총효율성에 대한 오차제 곱합을 최소화하고, K 가 변화함에 따라 전체 군집들의 오차제 곱합의 변화율이 급격하게 줄어든 수준에서 결정되었다. 이러한 선행분석으로 본 연구는 해당 대기간 DEA모형으로부터 도출된 충전소들의 효율성 수준이 크게 세 집단 ($K = 3$)으로 구분될 수 있음을 확인하였다¹⁾. 본 논문은 해당 집단의 명칭의 편의를 위해 평균 효율성 수준이 높은 집단순으로 G_H , G_M , G_L 라고 정의한다. 이때 각 집단에 속한 충전소들은 각각 57, 59, 508개소이며, 이들 집단의 평균 효율성은 95.588%, 34.297%, 3.859%로 나타났다.

이를 토대로 본 연구는 투입요인 대소비교 관점에서 효율적인 충전소의 특성을 파악하기 위하여 충전소 집단 간의 투입요인에 대해 t -test를 실시하여 투입변수들 규모의 평균 차이가 유의한지 여부를 밝히기 위해 이분산을 가정한 단측 검정을 실시하였다. 해당 검정결과는 <Table 5>에 요약하였다. 해당 검정을 위해, 부정적인 투입요소로 고려되었던 교통혼잡도와 인근 충전소간의 평균거리는 3.2절에서 긍정적인 투입요소의 성질을 지닌 자료로 변환하여 분석하였다. 본 연구에서 집단 G_H , G_M , G_L 에 대한 검정을 수행한 결과 몇 가지 유의미한 시사점을 도출할 수 있었다. 우선, 고효율성 충전소 집단 G_H 에 대해 나머지 두 충전소 집단 과 t -test 결과, G_H 와 G_M 간에는 t -value가 -4.307과 G_H 와 G_L 간에는 -3.008로 측정되었으며, p -value는 각각 0.000과 0.002로 나타나 유의수준 1% 내에서 효율적인 충전소의 G_H 에 속한 충전소 주변의 교통혼잡도 수준이 다른 충전소들보다 높은 것으로 드러났다. 하지만 충전소 집단 G_M 과 G_L 의 경우를 볼 때 t -value가 1.649이며 두 충전소 집단의 평균 교통혼잡도 차이가 유의수준 5% 내로 설명이 되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 충전소의 효율성 수준이 매우 낮은 집단 G_L 의 경우 주변의 교통혼잡도가 G_M 에 속한 충전소들보다 높다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 교통혼잡도가 높은 지역에 효율적인 충전소들이 입지할 가능성이 높지만, 이러한 시사점이 일반적으로 적용되는 데에는 한계가 있다고 볼 수 있다. 왜냐하면 <Table 3>에서 볼 수 있듯이 대다수의 충전소들이 비효율적인 것으로 측정되었으며, <Table 5>의 실험결과는 이들 가운데 상당수가 교통혼잡도가 높은 지역에 입지하고 있을 가능성을 보여주기 때문이다. 이는 교통혼잡도가 효율적인 충전소의 특징을 구분 짓는 중요한 요인으로 고려될 수 있지만, 한편으로는 교통혼잡도 이외에 다른 요인이 충전소 효율성에 중대한 영향을 미쳤을 가능성을 배제하는 데에는 한계가 있다고 할 수 있다.

또한 본 검정결과는 효율적인 충전소는 인근 대안 충

<Table 5> Results of t -tests for G_H , G_M and G_L

Factors	t -value(p -value)		
	$(G_H, G_M)^a$	(G_H, G_L)	(G_M, G_L)
Traffic congestion cost	-4.307 (0.000)	-3.008 (0.002)	1.649 (0.051)
No. of nearby EVCSs	1.504 (0.068)	0.396 (0.346)	-1.527 (0.065)
Traffic volume	0.166 (0.434)	0.556 (0.289)	0.823 (0.206)
Floating population	-0.954 (0.172)	-0.488 (0.313)	0.981 (0.164)
Avg. distance of nearby EVCSs	0.201 (0.420)	-1.075 (0.142)	-1.787 (0.039)

^a (A, B) denotes a hypothesis that the mean of the corresponding input of A is greater than that of B .

전소의 개수가 상대적으로 많음을 확인할 수 있다. 효율적인 충전소 집단 G_H 와 효율성 중위 수준의 G_M 과의 t -test 결과를 토대로 볼 때 t -value가 1.504이며 이들의 충전소 개수의 평균 차이는 유의수준 5% 정도에서 설명되기 때문이다. 이는 네트워크 효과의 일환으로써, 전기차 충전자들이 충전소 주변의 혼잡도 및 잔여연료 용량의 수준 등을 고려할 때 대안 충전소가 풍부한 지역에 입지한 충전소를 선호하는 것을 의미한다. 하지만 G_H 과 G_L 간에는 t -value가 0.396 이지만 이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 드러났다. 또한 G_M 과 G_L 간의 충전소 개수에 대한 비교결과를 살펴보자면 오히려 t -value가 -1.527로 계산되었으며 이들의 효율성 평균 차이 또한 유의수준 5%에서 설명될 수 있음을 볼 수 있다. 이러한 실험 결과는 비효율적인 충전소들이 주변에 상당히 많은 대안 충전소를 확보하고 있음에도 불구하고 전기차 사용자의 충전시설 선택으로부터 외면을 받고 있는 것으로 사료된다. 즉, 다소 비약적인 해석이 될 수 있지만, 상당수의 전기차 충전소들은 표면적으로 서로 상당히 긴밀한 충전 네트워크 구조를 갖추고 있지만, 이들 대부분은 전기차 사용자의 충전패턴과 상당한 괴리가 있을 수 있다는 점을 배제할 수 없다.

교통량 관점에서 살펴볼 경우, 본 연구는 어떠한 충전소 집단간의 비교로부터 주변 교통량의 차이가 유의수준 15% 이내로 설명되는 검정결과를 얻지 못하였다. 이는 회귀분석 결과의 시사점과 다소 차이가 있는 부분으로써, 충전소 효율성 수준에 따라 교통량의 대소비교를 통해 효율적인 충전소를 구분하는 것이 어렵다는 것이다. 이는 충전소 마다 당면한 교통량의 편차가 매우 심하여 집단간의 교통량 평균 차이가 희박해진 결과로 사료된다. 이와 같은 결과는 유동인구에 대한 검정에서도 발견할 수 있다. 즉, 본 실험결과와 교통량과 유동인구는 충전소의 효율성 수준을 구분 짓는 데에 명확한 기준을 제시하지 못한다는 것을 의미한다.

본 연구는 G_M 와 G_L 과의 충전소 간의 거리평균에 대한 비교로부터 t -value가 -1.787이고 이러한 결과는 유의수준 5%, G_H 와 G_L 과의 비교로부터 t -value가 -1.075, 이 결과는 유의수준 15% 정도에서 설명이 되는 것을 볼 수 있었다. 즉, 비효율적인 충전소는 인근 충전소 간의 평균 거리가 상대적으로 짧은 것을 의미하며, 이는 비효율적인 충전소가 입지한 곳에 다른 충전소들이 비교적 조밀하게 입지하고 있다는 것을 의미한다. 하지만 충전소 집단 G_L 과 G_H 간의 비교를 통해 볼 때 이들 집단의 인근 충전소 간의 평균 거리가 유의미할 정도로 차이가 나지 않는 점을 볼 수 있다. 이는 효율적인 충전소의 특징을 일반화함에 있어 인근 충전소 간의 평균 거리가 설명력이 약하다는 것을 의미한다.

5. 결 론

본 연구는 다기간 DEA를 활용하여 서울시 전기차 충전소의 효율성을 평가하였다. 이를 위해 본 연구는 하루 동안의 효율성 수준 변화를 포착하기 위하여 4시간 단위로 구분된 총 6개의 시간구간에서의 충전소 효율성을 측정하였고, 이를 대표하는 총효율성을 추가로 계산하였다. 효율성 측정 시 투입요인으로써 2018년 기준 서울시의 지역별 유동인구, 추정교통량, 인근 충전소의 개수와 평균거리를 투입요인으로서 고려하였으며, 충전소의 충전 빈도는 산출요인으로 보았다. 이후 토빗 회귀분석과 K -평균 군집화 알고리즘을 이용하여 도출한 서로 다른 수준의 충전소 집단에 대해 투입변수별로 t -test를 실시하여 효율적인 충전소와 비효율적인 충전소의 특징을 보다 구체화하였다.

본 연구에서 도출된 효율성 측정결과를 토대로 구한 주요 결과와 시사점을 정리하면 다음과 같다. 첫째, 현재 서울시에 입지한 대부분의 충전소의 효율성은 저조하게 평가되었다. 이는 충전소의 충전횟수의 편차가 소수의 충전소에 집중되어 있으며, 상당수의 충전소가 전기차 사용자의 이용 가능성이 낮은 지역에 입지하여 낮은 효율성을 나타낸 것으로 사료된다. 따라서 향후 신규 충전소 입지 시 전기차 사용자들의 충전시설 선택을 보다 면밀하게 고려할 필요가 있으며, 이는 효율적이고 충전소 간의 연결성을 제고할 수 있는 입지안을 도출하는 데에 기여할 것으로 사료된다. 또한 토빗 회귀분석으로부터 본 연구는 충전소 주변의 교통량 및 인근 충전소의 개수가 충전소 효율성의 증대를 유도하는 데에 기여할 것으로 기대되며, 교통혼잡도 수준이 충전소 효율성의 수준과 양의 상관관계가 있다는 것으로 드러났다. 하지만 본 연구의 t -test 결과를 토대로 볼 때 이러한 결과는 비효율적

인 충전소를 설명하는 데에 한계가 있으므로 일반화하기 어려운 면이 있다. 이외의 유동인구 및 인근 충전소 간의 평균거리는 충전소의 효율성 증대에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 드러났다. K -평균 군집화 알고리즘을 통해 도출된 효율성 상위, 중위, 그리고 하위 충전소 집단의 투입변수에 대해 실시한 t -test는 효율적인 충전소의 특징과 더불어 비효율적인 충전소의 특이성을 동시에 드러냈다. 이러한 감정으로부터 본 연구는 효율적인 충전소의 경우 주변 교통혼잡비용의 수준이 높으며, 인근 대안 충전소의 개수가 많다는 특징을 발견하였다. 하지만 가장 비효율적인 충전소들은 교통혼잡도가 높고 인근 충전소들 또한 조밀하게 밀집해 있어 충전 네트워크가 풍부함에도 불구하고 효율성이 낮게 측정된 것을 미루어 볼 때, 이들 충전소는 전기차 사용자의 접근 가능성이 낮은 지역에 위치하고 있는 것으로 보인다.

본 연구의 연구방법론은 몇 가지의 한계점을 가지고 있으므로 이를 개선하기 위한 차기 연구가 수행될 여지가 있다. 첫째, 토빗 회귀분석 및 t -test로부터 효율성 수준에 따라 분류된 충전소들에 대해 서로 다른 평가 기준이 적용되어야 할 필요성이 있다. 본 연구에서의 효율성 측정 모형은 비효율적인 충전소를 발견하는 데에 효과적이지만 이들 중 일부는 충전소의 연결성을 제고하기 위하여 설치된 곳들도 있다. 따라서 이러한 평가요인을 보다 적극적으로 반영한 효율성 측정 척도의 개발이 요구된다. 둘째, 투입변수 및 산출변수 선정의 엄밀성이 보다 요구된다. 가령, 유동인구의 경우 선행연구에서 충전소 충전실적과 밀접한 연관이 있을 것으로 기대되었지만 본 연구에서의 효율성 측정 결과는 유동인구 수준과 무관함을 보이고 있기 때문이다. 또한 충전소의 입지적 특성을 보다 심도 있게 고려할 필요가 있다. 예를 들어 일부 충전소의 경우 건물 내에 입지하거나 보안시설에 입지하여 일반 전기차 사용자가 이용하기 어려운 곳도 존재한다. 이 경우 이들을 함께 고려하여 효율성 측정하는 것은 왜곡된 측정결과를 야기하는 원인이 될 수 있다. 이러한 효율성 측정의 오류는 본 연구에서 시간단위 분별에서의 합리성이 보다 요구되는 이유이기도 하다. 마지막으로 전기차 사용자들의 충전시설 선택 패턴을 다각적으로 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 서로 다른 시간구간들 간의 투입변수 및 산출변수의 관계가 독립이라고 가정하였지만, 실제 전기차 사용자들은 이전 기간의 충전소 혼잡도 및 도로교통 상황을 토대로 현재에서의 충전시설 선택 시 고려할 가능성이 있다. 따라서 이 경우 다기간 DEA를 이용하여 분석하는 것은 충전소의 효율성 측정 결과의 신뢰성을 저하시키는 요인이 될 수 있으므로 이에 대한 심도 깊은 추가 연구가 요구된다. 마지막으로, 본 연구의 효율성 측정 결과의 시사점은 서울시 전기차

충전소의 운영현황으로부터 도출된 것이다. 따라서 이와 같은 연구 방법은 타 지역에서의 전기차 충전소 운영효율성을 평가하기 위한 범용적인 접근 방법이 아닐 수 있으므로 이에 대한 엄밀한 연구가 필요하다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology(No. NRF-2020R1F1A1075866).

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] Choi, S.I., Son, H.G., and Kim, S.Y., A Study on Electricity Demand Forecasting for Electric Vehicles in Korea, *Journal of the Korean Data and Information Science Society*, 2018, Vol. 29, No. 5, pp. 1137-1153.
- [4] Cook, W.D. and Zhu, J., *Modeling Performance Measurement : Applications and Implementation Issues in DEA*, Berlin : Springer Science & Business Media, 2006.
- [5] Cooper, W.W., Seiford, L.M., and Tone, K., *Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses : With DEA-solver Software and References*, Berlin : Springer Science & Business Media, 2006.
- [6] Csonka, B. and Csiszar, C., Determination of Charging Infrastructure Location for Electric Vehicles, *Transportation Research Procedia*, 2017, Vol. 27, pp. 768-775.
- [7] Fare, R. and Grosskopf, S., Intertemporal Production Frontiers : with Dynamic DEA, *Journal of the Operational Research Society*, 1997, Vol. 48, No. 6, pp. 656-656.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Han, J.S., A Study on the Installation of Electric Vehicle Charging Infrastructure in Seoul : Focused on Public Charging Infrastructure at Work, *Seoul Studies*, 2018, Vol. 19, No. 3, pp. 131-147.
- [11] Huang, Y. and Kockelman, K.M., Electric Vehicle Charging Station Locations : Elastic Demand, Station Congestion, and Network Equilibrium, *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 2020, Vol. 78, 102179.
- [12] 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.
- [13] Kang, C.G. and Jeon, S.Y., A Study on Establishment of Proper Installation Criteria of Electric Vehicle Charging Station in Gyeonggi-do, Suwon : Gyeonggi Research Institutions, 2017.
- [14] Kao, C., Efficiency Measurement for Parallel Production Systems, *European Journal of Operational Research*, 2009, Vol. 196, pp. 1107-1112.
- [15] 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 & Distribution*, 2015, Vol. 9, No. 7, pp. 666-676.
- [16] Kim, G.D., An, J.W., Kim, I.S., Kim, M.S., Ha, S.W., Hwang, T.G., and Oh, K.H., *A Research of Charging Infrastructure for Electric Vehicle*, Seoul : Ministry of Knowledge Economy, 2010.
- [17] Koopmans, T.C., *An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities*, New Jersey : Wiley, 1951.
- [18] Lee, J.D. and Oh, D.H., *Theory of Efficiency Analysis : Data Envelopment Analysis*, Seoul : Jiphil Media, 2012.
- [19] Morrissey, P., Weldon, P., and O'Mahony, M., Future Standard and Fast Charging Infrastructure Planning : An Analysis of Electric Vehicle Charging Behaviour, *Energy Policy*, 2016, Vol. 89, pp. 257-270.
- [20] Park, K.H., Jeon, H.M., Jung, K.C., and Son, B.S., Charging Behavior Analysis of Electric Vehicle, *Journal of Korean Society of Transportation*, 2017, Vol. 35, No. 3, pp. 210-219.

- [21] Seiford, L.M. and Zhu, J., Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation, *European Journal of Operational Research*, 2012, Vol. 142, pp. 16-20.
- [22] Son, D.H., Gang, Y.S., and Kim, H.J., Evaluation of Operational Efficiency for Electric Vehicle Charging Stations Using Data Envelopment Analysis, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2020, Vol. 43, No. 3, pp. 53-60.
- [23] 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*, Jeju, Korea, 2019, pp. 1197-1206.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Zhang, Q., Li, H., Zhu, L., Campana, P.E., Lu, H., Wallin, F., and Sun, Q., Factors Influencing the Economics of Public Charging Infrastructures for EV-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 94, pp. 500-509.

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