

# 주행거리 기반 충전 수요를 고려한 전기자동차 완속 충전기 최적 공급량 산출

## Optimal Supply Calculation of Electric Vehicle Slow Chargers Considering Charging Demand Based on Driving Distance

노 기 민\* · 김 수 재\*\* · 추 상 호\*\*\*

\* 주저자 : 홍익대학교 도시공학과 학사과정

\*\* 교신저자 : 홍익대학교 도시공학과 연구교수

\*\*\* 공저자 : 홍익대학교 도시공학과 정교수

Gimin Roh\* · Sujae Kim\* · Sangho Choo\*

\* Dept. of Urban Design and Planning, Hongik University

† Corresponding author : Sujae Kim, rtw1119@gmail.com

Vol. 23 No.2(2024)

April, 2024

pp.142~156

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2024.23.2.142>

2024.23.2.142

Received 9 April 2024

Revised 19 April 2024

Accepted 22 April 2024

© 2024. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

### 요 약

교통부문 탄소중립을 위한 전기자동차로의 전환에 있어 충분한 충전 인프라의 구축은 중요한 선행요소이다. 특히, 거주지의 충전 인프라 구축은 필수적이다. 우리나라의 주거형태는 주로 공동주택이며, 다수의 거주민을 위한 공공 충전기가 공급되어야 한다. 정부는 충전시설과 전기자동차 전용주차구역의 확보를 법적으로 규정하고 있으나, 주차면수만을 산출근거로 한다. 완속 충전기는 3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기가 주를 이룬다. 전자가 충전기 설치 및 이용에 유리하지만, 충전속도가 느려 두 가지 형태의 충전기는 양립이 필요하다. 본 연구에서는 일일 주행거리를 기반으로 산정한 전기자동차의 충전 수요에 대응할 수 있는 충전기를 할당하는 최적화 모형을 제시하였다. 또한, 메타 휴리스틱 알고리즘인 Tabu Search를 사용하여 최적화 모형을 만족하는 것과 동시에 충전기 공급 및 충전 비용을 최소화할 수 있는 완속 충전기 공급량을 산정하였다. 사례 분석을 위해 개인통행실태조사자료를 사용해 주행거리를 산정하였으며, 가상의 충전 시나리오 및 환경을 설정하여 100대의 전기자동차 충전 수요에 대응하는 22대의 3.5kW 과금형 콘센트를 최적 공급량으로 산정하였다.

핵심어 : 전기자동차, 완속 충전기, 과금형 콘센트, 최적화, Tabu Search

### ABSTRACT

The transition to electric vehicles is a crucial step toward achieving carbon neutrality in the transportation sector. Adequate charging infrastructure at residential locations is essential. In South Korea, the predominant form of housing is multifamily dwellings, necessitating the provision of public charging stations for numerous residents. Although the government mandates the availability of charging facilities and designated parking areas for electric vehicles, it bases the supply of charging stations solely on the number of parking spaces. Slow chargers, mainly 3.5kW charging outlets and 7kW slow chargers, are commonly used. While the former is advantageous for installation and use, its slower charging speed necessitates the coexistence of both types of chargers. This study presents an optimization model that allocates chargers capable of meeting charging demands based

on daily driving distances. Furthermore, using the metaheuristic algorithm Tabu Search, this model satisfies the optimization requirements and minimizes the costs associated with charger supply and usage. To conduct a case study, data from personal travel surveys were used to estimate the driving distances, and a hypothetical charging scenario and environment were set up to determine the optimal supply of 22 units of 3.5kW charging outlets for the charging demands of 100 BEVs.

Key words : BEV, Slow Charger, EV Charging Outlet, Optimization, Tabu Search

## I. 서 론

전 세계는 온실가스 배출 감축을 위한 노력을 지속하고 있으며, 내연기관차에서 전기자동차로의 전환이 빠르게 이루어지고 있다. 국제에너지기구에 따르면, 전 세계 전기자동차 차량수는 2030년 최대 2.5억대, 연평균 성장률 35%를 전망하고 있다(IEA, 2023). 전기자동차는 PHEV(plug-in hybrid electric vehicle), HEV(hybrid electric vehicle), BEV(battery electric vehicle) 등 다양한 형태가 있으며, 전기만을 이용하는 배터리식 전기자동차인 BEV로의 전환에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다(Bjerkan et al., 2016; Andwari et al., 2017).

전기자동차의 확산을 위해서는 충전의 심리적 압박을 해소하고, 충전이 필요할 때 언제든지 충전할 수 있는 충전환경이 중요하다(Neubauer and Wood, 2014; Bonges III and Lusk, 2016; Yoo et al., 2023). 전기자동차 충전은 주로 거주지에서 완속충전을 통해 이루어진다(Figenbaum and Kolbenstvedt, 2016; Baresch and Moser, 2019; Cui et al., 2022). 특히, 귀가 후 저녁부터 아침시간대까지의 충전행태가 다수에 해당한다(Gerossier et al., 2019; Quiros-Tortos et al., 2015). 따라서, 완속충전기를 중심으로 한 충전기 인프라 구축의 중요성이 강조되고 있다(Park and Kim, 2022; Yoo et al., 2023).

국내 2020년 단독주택 거주자는 전체 인구의 30.4%로 다세대주택, 연립주택, 아파트가 거주 형태의 다수를 이룬다(Statistics Korea, 2023). 한 세대만 거주하는 단독주택을 제외하면, 완속충전기를 가구별로 설치할 수 없어 충분한 양의 충전기가 다수의 거주자를 위해 제공되어야 한다. 정부는 환경친화적 자동차의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률 시행령에 의거하여 건축물의 주차대수 중 5%(기축시설의 경우 2%)에 환경친화적 자동차 전용주차구역과 충전시설을 설치하도록 제시하고 있다. 하지만 비율의 근거가 명확하지 않으며, 통행특성을 전혀 반영하지 않고 단순하게 전체 주차대수에 일정 비율을 적용하고 있다. 이에 본 연구에서는 전기자동차 등록대수, 충전수요 등을 반영한 전기자동차 충전기 공급대수를 산정하고자 한다.

전기자동차 충전기는 최대 출력 40kW를 기준으로 급속 충전기와 완속 충전기로 구분한다. 2024년 전기자동차 완속충전시설 보조사업에 따르면 보조금 지급 기준은 3.5kW의 과금형 콘센트와 7kW, 11kW, 30kW를 기준으로 완속 충전기로 구분하고 있다. 그 중, 실질적으로는 3.5kW 과금형 콘센트와 더불어 7kW 완속 충전기를 중심으로 유통되고 있음을 무공해차 누리집을 통해 확인할 수 있다. 3.5kW 과금형 콘센트는 기존 220V 콘센트에 설치하여 콘센트 연결 후, 사용자가 충전한 만큼 과금하는 방식의 충전시설이다. 3.5kW 과금형 콘센트는 경제성, 설치용이성, 도전방지, 전용주차구역지정 불필요, 충전 편리성 등의 장점을 가지고 있다. 소비자 입장에서 3.5kW 과금형 콘센트는 7kW 완속 충전기에 비해 충전요금이 저렴하며, 공급자 입장에서도 충전시설 설치비용이 7kW 완속 충전기에 비해 저렴하다. 이미 존재하는 220V 콘센트를 사용할 수 있으며, 콘센트를 증설한다고 해도 7kW 충전기 신설을 위한 배선 작업보다 간단하다. 3.5kW 과금형 콘센트를 설치하면, 건물 주차장 콘센트를 통해 전기자동차를 임의로 충전한 뒤, 충전요금을 건물주에게 부과하는 도전(盜電)행위를 방지할 수 있다. 3.5kW 과금형 콘센트는 충전기 바로 앞의 제한된 공간이 아닌, 충전기와 충전선

을 통해 연결할 수 있는 모든 주차면에서 충전이 가능하기 때문에 전기자동차 전용 충전공간이 필요없다. 또한, 충전이 종료된 후 충전공간에서 차량을 빼지 않고 콘센트에 다른 충전선을 끼우면 다른 차량이 바로 이용할 수 있다. 주로 야간에 진행되는 거주지 충전에서 새벽에 충전이 끝난 뒤, 차량을 옮겨야 하는 불편함을 감수하지 않아도 된다.

하지만 3.5kW 과금형 콘센트는 7kW 완속 충전기에 비해 충전속도가 현저히 느리기 때문에 3.5kW 과금형 콘센트만으로는 모든 충전 수요를 감당할 수 없다. 2024년 기준 전기자동차(승용차)의 배터리 용량은 50kWh~100kWh 수준이다. 최대 충전 속도가 일정하게 유지된다고 가정할 때, 3.5kW 과금형 콘센트를 이용하여 배터리 용량이 70kWh인 전기자동차를 충전한다면 약 20시간이 소요된다. 따라서 충전량이 크고, 시간의 제약이 있는 경우에는 비교적 충전속도가 빠른 7kW 완속 충전기의 존재가 필수적이다.

<Table 1> Comparison Between 3.5kW Charging Outlet and 7kW Slow Charger

	3.5kW charging outlet	7kW slow charger
Advantages	Low installation cost, Economical charging cost, Anti-electricity tampering, No dedicated parking space required	Fast charging speed, Beneficial for long-distance drivers
Disadvantages	Slow charging speed	Electrical wiring required, Relatively high charging cost

본 연구에서는 거주지에서의 충전 수요를 감당할 수 있는 최적의 충전기 공급량을 산정하고자 한다. 이를 HSCS(Household Slow Charger Supply) 최적화 시스템으로 정의하였다. 최적의 충전기 공급량을 산정하기 위해 HSCS 최적화 시스템은 충전기 설치 비용과 유지관리 비용을 종합한 충전기 공급 비용을 최소화한다. 또한, 동일한 공급 비용이 필요하다면, 전기자동차 충전 비용의 총합을 최소화한다.

전기자동차 충전에 관한 연구(Liu et al., 2017; Jin et al., 2013a; Jin et al., 2013b; Saber and Venayagamoorthy, 2009)에서는 대체로 스마트 그리드, 에너지 저장소, V2G(Vehicle to Grid)를 고려하여 장기적으로 충전에 대응하는 것이 아닌 주어진 환경에서의 일일 충전 스케줄링을 최적화한다. 주행거리를 충전수요를 반영한 연구(Liu et al., 2017)도 있었으나, 주요한 연구목적은 전력시장의 유동적인 충전 요금을 고려해 소비자와 그리드 운영자의 충전 관련 비용을 최소화하는 일일 전기자동차 충전을 최적 스케줄링하는 것에 있다.

국내 논문 중 주택공급유형에 따른 공동주택전기차 충전기 적정설치기준을 연구한 논문(Gu, 2023)은 적정 충전기 공급량에 초점을 맞추었으나, 주택공급유형에 따른 전기차 등록대수 비율만을 충전 수요로 산정하였다.

본 연구에서는 전기자동차 대수, 전기자동차 전비 등의 변수와 충전시설의 충전속도를 고려하며, 매일 변화하는 주행거리를 충전 수요로 반영하였다는 점에서 기존 연구와 차별성을 갖는다. 또한, 앞서 언급한 3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기를 구분하여 공급량을 산출함으로써 현실적이고, 경제적인 최적해를 도출하였다. 이를 통해, 본 연구는 전기자동차의 증가에 따른 안전한 충전망 구축을 위해 거주지 내 완속 충전기 공급의 중요성을 강조하고, 최적의 충전기 공급량을 산정하는 프레임워크를 제시한다.

## II. 문제 정의

### 1. 충전 개요

HSCS 문제는 모든 전기자동차가 거주지 내의 완속 충전기만을 이용하여 충전하는 것을 가정하였으며, 전기자동차 주행에 따른 충전 수요를 반영하였다. 전기자동차 충전시설은 차량의 주행거리에 따른 충전 수요를 매일 또는 즉각적으로 반영하여 유동적으로 대처할 수 없는 고정적인 인프라에 해당한다. 따라서 공급량에 대응하는 수요를 산출하는 기준이 필요하며, 본 연구에서는 일반적으로 차량의 주행패턴이 일주일 단위로 반복된다는 한국교통연구원의 연구결과에 따라 일주일 단위의 주행행태를 기반으로 충전 수요를 산정하고(The Korea Transport Institute, 2013), 완속 충전기의 최적 공급량을 산출하였다.

완속 충전기의 최적 공급량을 산출한다는 점에서 충전 수요 산출에 있어 보수적인 접근이 필요하다. 충전 수요를 저평가하지 않도록 낮시간대에는 모든 차량이 사용되며, 귀가 후 저녁시간대에 주차와 동시에 충전을 시작한다고 가정하였다. 저녁시간대에 완속 충전기로 충전을 시작한 뒤 익일 아침에 차량을 이용한다는 것을 고려하였을 때 다른 차량은 해당 충전기를 이용할 수 없다. 즉, 한 개의 충전기는 하루에 한 대의 차량만 이용할 수 있음을 의미한다.

전기자동차의 충전상태(the state of charge: SoC)는 특정 범위를 유지하는 것이 충전 및 방전으로 인한 배터리 열화현상을 방지할 수 있으며, 배터리의 수명과 성능의 저하를 억제할 수 있다(Omar et al., 2014; Xu et al., 2016). 또한, 전기자동차 이용자는 전기 배터리 방전에 관한 심리적 저항이 크기 때문에, 전기자동차 이용자는 SoC의 일정한 범위 내에서만 차량을 이용하며, 꼭 필요한 경우에만 해당 범위 이상으로 충전하는 것으로 가정하였다. 전기자동차에 충전기가 연결되어있어도 이용자가 설정한 SoC 기준에 도달하면 충전이 종료되며, 충전요금 또한 충전량에 비례하여 부과된다.

3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기의 경우, 각각 충전기의 종류와 성능이 동일하다고 가정하였다. 또한, 두 종류의 충전기는 충전 연결선의 저항을 고려하지 않고, 3.5kW와 7kW의 전력을 꾸준히 공급한다. 충전시간에 따른 SoC 곡선은 일반적 비선형이지만, 20%-80%와 같은 제한된 범주 안에서는 일정한 양상을 보인다(Mies et al., 2018). 이를 종합적으로 고려하여 충전기의 충전 속도( $V$ )는 각각 3.5kW/h( $V_{3.5}$ )와 7kW/h( $V_7$ )로 일정한 것으로 가정하였다.

전기자동차의 배터리 충전량은 충전속도와 충전시간의 곱으로 결정되며, 소비량은 주행거리를 차량의 전비로 나누어 산출할 수 있다. 전기자동차의 전비는 회생제동의 자동 개입 정도, 교통 상황 및 운전자 운전행태로 인한 브레이크 사용 빈도 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 보수적인 충전 수요 산출을 위해 모든 여정에서 회생제동을 하지 않는 것으로 가정하여 차량의 전비( $E$ )를 설정하였다.

전기자동차의 충전 여부는 귀가 후에 결정하게 되며, 합리적인 판단을 위해 익일 차량의 전력소비량을 고려해야 한다. 전력소비량은 주행거리를 바탕으로 예측할 수 있으므로 모든 차량의 이용자는 익일 주행거리를 알고 있다고 가정하였다.

### 2. 충전 시나리오 설정

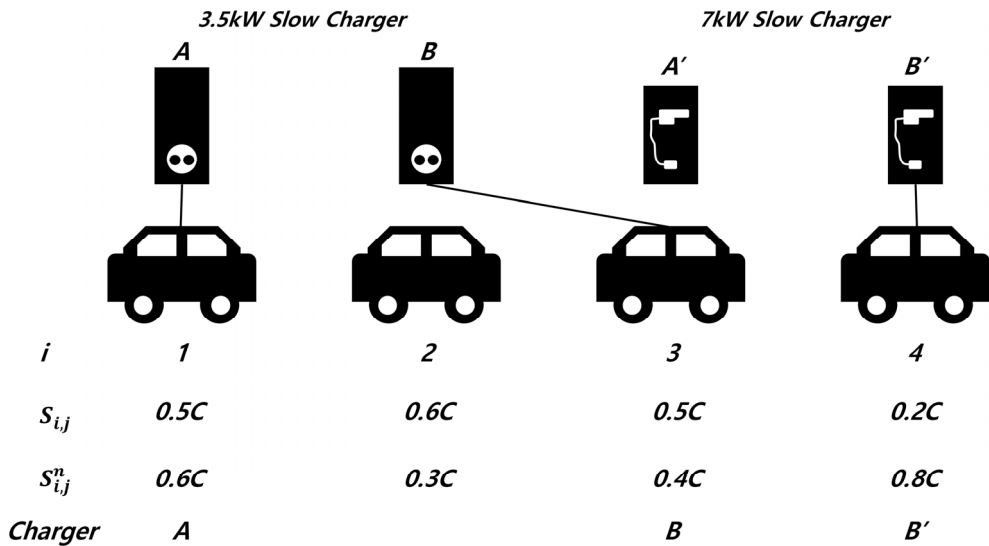
총  $N$ 대의 전기자동차가 존재할 때, 각각의 전기자동차는  $i$  ( $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ )로 나타낸다. 일 단위의 시간은  $j$  ( $j \in \{1, 2, \dots, d\}$ )로 나타낸다. 공급된 충전기를 처음 사용하는 날은  $j=1$ 이며,  $j=0$ 일 때, 모든 차량의 SoC는  $S_{\max}$ (상한 충전 상태)로 가정한다. 모든 시점에서 전기자동차의 SoC는 설정된 하한값( $S_{\min}$ )과 상한값

( $S_{max}$ )의 범위 내에 존재하며, 익일 주행거리가 길어 상한값 이상의 충전이 필요한 경우에만 예외적으로 SoC 기준 범위를 초과할 수 있다.

전기자동차 이용자의 충전 행태는 비용을 효율적으로 감소시키는 것을 목적으로 한다. 이때, 비용이란 충전으로 인해 지출되는 충전 요금을 의미하지만, 이용자의 충전 불안에 대한 심리적 비용과 전기자동차 충전이라는 행동을 실행에 옮기는 육체적 비용을 내포하고 있다. 즉, 충전 요금을 최소화하고자 하는 한편, 동일한 비용이라면 가능한 충전 불안을 해소하고, 충전 횟수를 감소하고자 한다. 이때 모든 이용자의 충전 비용을 최소화하기 위한 충전 여부를 판단하기 위해 필요한 개별 정보는 모두가 인지하고 있다고 가정하며, 전체 충전 비용이 최소가 되도록 충전기를 할당한다.

<Fig. 1>는 4대의 차량에 3.5kW 과금형 콘센트 2개와 7kW 완속 충전기 1개가 할당되는 시나리오를 간단하게 보여준다. 설명의 용이성을 위해 모든 차량의 배터리 용량( $C_i$ )은  $C$ 이고,  $S_{max}$ 는 0.9이며, 3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기를 통한 1일 최대 충전량은 각각 0.4C, 0.8C로 한다. 충전 여부는 귀가 후 SoC ( $S_{i,j}$ )와 익일 주행을 위해 필요한 최소 SoC( $S_{i,j}^n$ )를 고려하여 판단한다.

1번, 4번 차량은  $S_{i,j}^n$ 가  $S_{i,j}$ 보다 높아 충전이 필수적이며, 각각 0.1C, 0.6C 이상 충전되어야 한다. 4번 차량은 3.5kW 과금형 콘센트의 1일 최대충전량 이상의 충전이 필요해 7kW 완속 충전기를 사용해야만 한다. 1번 차량은 0.1C 이상만 충전하면 되며, 충전 비용의 최소화를 위해 7kW 완속 충전기가 아닌 3.5kW 과금형 콘센트를 사용한다. 충전이 필수적인 차량에 충전기를 할당한 뒤, 남아있는 충전기는 충전이 필수적이지 않지만 심리적 충전 불안을 해소하기 위해 할당할 수 있다. 충전 상한인 0.9C까지 2번, 3번 차량은 각각 0.3C, 0.4C 만큼 충전할 수 있다. 충전 비용 절감을 위해 3.5kW 과금형 콘센트만 사용하며, 3번 차량에 충전기를 할당한다. 하루 동안의 충전 비용은 3번 차량이 2번 차량에 비해 높지만 장기적 관점에서 한 번의 충전으로 더 많은 양을 충전할 수 있는 차량에게 충전 우선권을 주는 것이 전체적인 충전 횟수를 줄일 수 있기 때문에 3번 차량에게 할당한다. 따라서, 이 날의 경우 1번, 3번, 4번 차량이 충전한다.



<Fig. 1> Slow Charger Charging Scenario

### Ⅲ. HSCS 최적화 시스템

3장에서는 2장에서 정의한 충전 시나리오를 기반으로 HSCS 최적화 시스템을 구축하였다. 최적화 모형은 목적함수와 제약조건을 수식화하여 표현하였다.

#### 1. 시스템 설명

HSCS 최적화 시스템은 전기자동차 충전 수요에 대응할 수 있는 완속 충전기 공급량을 산출한다. 이를 위해, HSCS 최적화 시스템은 특정 개수의 충전기가 공급되었을 때, 공급된 충전기로 전기자동차 충전 수요에 대응할 수 있는지 판단한다. 충전 수요에 대응할 수 있다면, 공급된 충전기의 공급 비용과 이를 이용한 충전 비용을 기준으로 최적의 완속 충전기 공급량을 산출한다.

##### 1) 완속 충전기 공급량

$$0 \leq x_{3.5}, 0 \leq x_7, x_{3.5} + x_7 \leq N \dots\dots\dots (1)$$

완속 충전기 공급량( $x_{3.5}, x_7$ )은 각각 0 이상의 값으로 그 합이 전체 자동차 대수( $N$ )를 넘을 수 없다.

##### 2) 완속 충전기 공급 비용

$$Charger Cost = a_{3.5} \times x_{3.5} + a_7 \times x_7 \dots\dots\dots (2)$$

완속 충전기 공급 비용은 충전용량별 완속 충전기 설치비용( $a_{3.5}, a_7$ )과 완속 충전기 공급량( $x_{3.5}, x_7$ )의 곱으로 나타낼 수 있다.

##### 3) 완속 충전기 충전 비용

$$Charging Cost = b_{3.5} \times \sum_i \sum_j t_{i,j}^{3.5} + b_7 \times \sum_i \sum_j t_{i,j}^7 \dots\dots\dots (3)$$

완속 충전기 충전 비용은 완속 충전기 충전용량별 kW당 충전 비용( $b_{3.5}, b_7$ )과 총 충전 시간( $\sum_i \sum_j t_{i,j}^{3.5}, \sum_i \sum_j t_{i,j}^7$ )의 곱으로 나타낼 수 있다.

#### 2. 충전 최적화 모형

충전 최적화 모형을 통해, 충전 시나리오(Ⅱ-2)에서 언급한 바와 같이 전기자동차 소유자의 비용을 최소화하도록 전기자동차를 충전했을 때, 주어진 완속충전기 공급대수로 충전 수요에 대응할 수 있는지 판단한다. 충전 최적화 모델에서 최적해를 도출할 수 있다면, 충전 수요에 대응할 수 있다고 판단한다. 이를 위한 적절

한 목적함수와 제약조건의 구성이 필요하다.

1) 목적 함수

$$\max(\sum_j(\sum_i t_{i,j}^{3.5} + \sum_i t_{i,j}^7)) \dots\dots\dots (4)$$

본 연구의 목적은 전기 자동차 충전기의 최적 공급량을 산출하는 것이다. 이를 위해 일일 단위의 충전 시나리오가 반영될 수 있도록 매일 모든 차량의 충전 시간의 합이 최대가 되도록 목적함수를 설정하였다(수식 3). 목적함수가 충전시간의 최대화라는 점에서, 7kW 완속 충전기가 아닌 3.5kW 과금형 콘센트의 사용을 유도할 수 있다. 또한, <Fig. 1>의 2번, 3번 차량 중 충전 시간이 더 긴 3번 차량에게 충전기를 할당하여 시나리오에 입각한 충전기 할당을 가능하게 한다.

2) 제약 조건

$$\begin{cases} z_{i,j}^{3.5}, z_{i,j}^7 = 1 & \text{charger occupied} \\ z_{i,j}^{3.5}, z_{i,j}^7 = 0 & \text{charger unoccupied} \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

$$z_{i,j}^{3.5} + z_{i,j}^7 \leq 1 \dots\dots\dots (6)$$

$$\sum_i z_{i,j}^{3.5} \leq x_{3.5} \dots\dots\dots (7)$$

$$\sum_i z_{i,j}^7 \leq x_7 \dots\dots\dots (8)$$

$$t_{i,j}^{3.5}, t_{i,j}^7 \leq t_{i,j}^{\max} \dots\dots\dots (9)$$

$$z_{i,j}^{3.5} \times y_{i,j}^{3.5} = V_{3.5} \times t_{i,j}^{3.5} \dots\dots\dots (10)$$

$$z_{i,j}^7 \times y_{i,j}^7 = V_7 \times t_{i,j}^7 \dots\dots\dots (11)$$

$$U_{i,j} = D_{i,j} / E_i \dots\dots\dots (12)$$

$$S_{i,j} \times C_i \equiv S_{i,j-1} \times C_i + z_{i,j-1}^{3.5} \times y_{i,j-1}^{3.5} + z_{i,j-1}^7 \times y_{i,j-1}^7 - U_{i,j} \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{cases} 1 \times C_i \geq S_{i,j-1} \times C_i + z_{i,j-1}^{3.5} \times y_{i,j-1}^{3.5} + z_{i,j-1}^7 \times y_{i,j-1}^7 \geq S_{\min} \times C_i + U_{i,j} & U_{i,j} > (S_{\max} - S_{\min}) \times C_i \\ S_{\max} \times C_i \geq S_{i,j-1} \times C_i + z_{i,j-1}^{3.5} \times y_{i,j-1}^{3.5} + z_{i,j-1}^7 \times y_{i,j-1}^7 \geq S_{\min} \times C_i + U_{i,j} & U_{i,j} \leq (S_{\max} - S_{\min}) \times C_i \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

$$z_{i,j}^7 \times S_{i,j} \times C_i / (S_{\min} \times C_i + U_{i,j+1}) < 1 \dots\dots\dots (15)$$

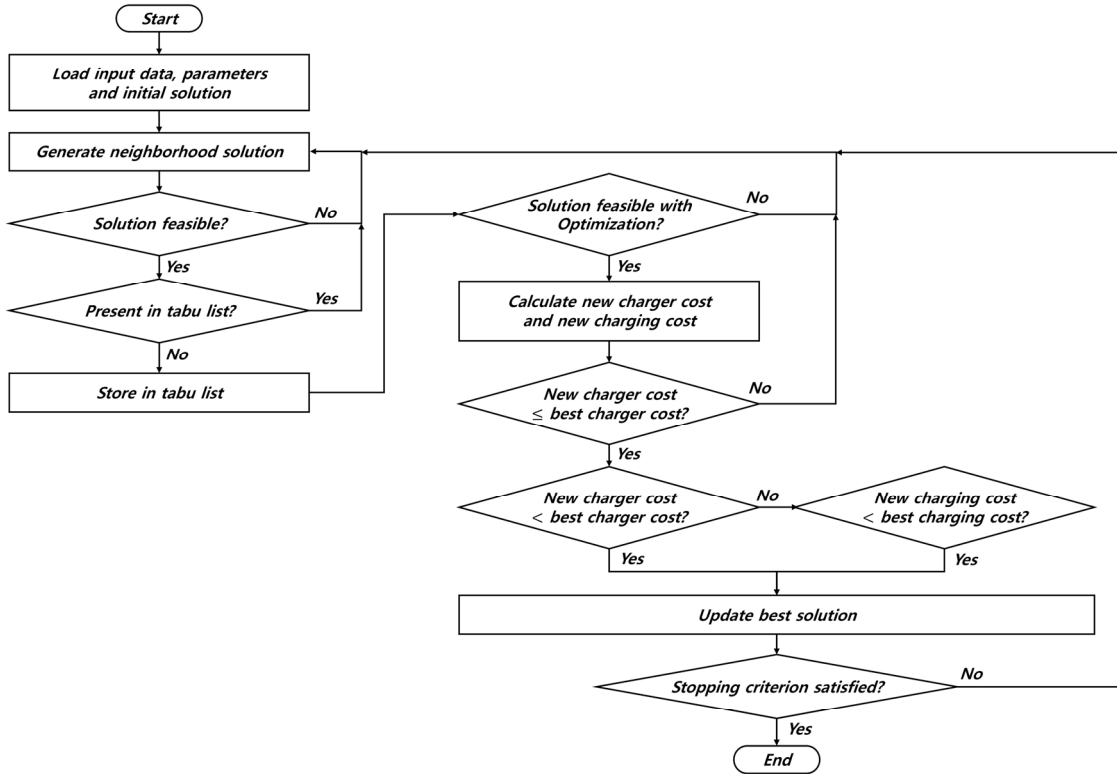
$$S_{i,0} = S_{\max}, z_{i,0}^{3.5} = 0, y_{i,0}^{3.5} = 0, z_{i,0}^7 = 0, y_{i,0}^7 = 0 \dots\dots\dots (16)$$

$z_{i,j}^{3.5}$ 와  $z_{i,j}^7$ 는 각각  $i$ 번의 차량이  $j$ 일에 3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기를 사용하였는지에 대한 여부를 나타내며, (수식 5)는 이들이 이진변수로서 기능하게 한다. (수식 6)은  $i$ 번 차량이  $j$ 일에 저녁 시간을 이용해 충전할 수 있는 기회는 충전기의 종류와 관계없이 최대 1번이 되도록 한다. (수식 7), (수식 8)은  $j$ 일에 사용되는 3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기의 합이 각각 3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기의 공급대수를 넘지 않도록 한다. 7kW 완속 충전기는 3.5kW 과금형 콘센트를 대신할 수 있으나, 그 역은 불가능하기 때문이다.  $i$ 번 차량이  $j$ 일에 완속 충전기를 사용하는 시간은  $j$ 일 주차 후  $j+1$ 일 출차까지의 시간으로 이는  $t_{i,j}^{\max}$ 를 초과하지 못한다(수식 9).  $i$ 번 차량의  $j$ 일 충전량은 충전기의 종류에 따라  $y_{i,j}^{3.5}(kWh)$ 와  $y_{i,j}^7(kWh)$ 로 나타낸다. 충전여부와 충전량의 곱은 충전 속도와 충전 시간의 곱과 같다(수식 10, 11).  $i$ 번 차량의  $j$ 일 주행거리인  $D_{i,j}(km)$ 를 전비로 나누어 소비전력량을 산출할 수 있으며,  $i$ 번 차량의  $j$ 일 소비전력량은 (수식 12)와 같이  $U_{i,j}(kWh)$ 로 표현한다. 연속된 이틀  $j-1$ 일과  $j$ 일을 기준으로  $i$ 번 차량의  $j$ 일의 귀가 시 배터리 수준( $S_{i,j} \times C_i$ )은  $j-1$ 일 귀가 시 배터리 수준에  $j-1$ 일의 충전량을 더하고,  $j$ 일 소비전력량을 빼는 것으로 정의된다(수식 13). 모든 시점에서 모든 차량의 SoC는 가급적 정해진  $S_{\max}$ 와  $S_{\min}$  사이에 위치해야 한다. 즉,  $i$ 번 차량의  $j-1$ 일 충전 후 배터리 수준은 다음날의 소비전력량을 제하여도  $S_{\min} \times C_i$ 보다 커야 한다. 동시에,  $S_{\max} \times C_i$  보다 작아야 하며, 익일 소비전력량을 고려했을 때  $S_{\max}$  이상으로 충전해야 하는 경우에 한하여 SoC를 1 이하가 되도록 충전한다(수식 14). 7kW 완속 충전기는 필수적인 상황에서만 사용한다. 이때 필수적인 상황이란, 요구되는 충전량이 많아 3.5kW 과금형 콘센트 이상의 충전 속도가 필요한 경우, 또는 3.5kW 과금형 콘센트 수요에 비해 3.5kW 과금형 콘센트 공급이 부족하지만 가용한 7kW 충전기가 있는 경우이다. 이를 위해 (수식 15)와 같은 제약을 둔다. 마지막으로 (수식 16)은 처음 충전을 시작하는 날( $j=1$ ) 이전의 초기 조건을 의미한다. 모든 전기자동차의 배터리가  $S_{\max}$  수준인 상태를 가정하였으므로  $j=1$  이전에 충전은 없다.

### 3. 해결방안

HSCS 최적화 시스템은 주어진 완속 충전기 공급대수를 기준으로 충전 최적화 모형을 만족하는지 여부를 확인하고 이를 바탕으로 최적의 공급대수를 산출한다. HSCS 최적화 시스템에서 3.5kW 과금형 콘센트와 7kw 완속 충전기 공급대수의 조합은 (수식 1)을 고려할 때,  $N^2/2$ 가지 조합이 가능하다.  $N$ 이 증가함에 따라 이러한 모든 조합에 대하여, 충전 최적화 모형을 기반으로 충전 수요에 대응할 수 있는 판단하는 것은 대단히 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 메타 휴리스틱 최적화 알고리즘의 Tabu Search를 사용하였다. Tabu Search는 Glover(1986)가 처음 고안한 수학적 최적화 방식으로 메타 휴리스틱 알고리즘에서도 local search를 위해 주로 사용된다. Tabu search는 최적 네트워크 계획(Ziegler et al., 2023), 최적 전력 흐름 구축(Abido, 2002), 최적 입지 선정(Michel and Van Hentenryck, 2004), 최적 규모 산출(Xu et al., 2022) 등 다양한 분야에서 활용된다. 공급 가능한 완속 충전기의 조합을 생성한 뒤, 충전 최적화 모형을 통해 충전 수요 대응 가능 여부를 판단하며, 최적해를 도출하는 Tabu Search를 이용한 HSCS 최적화 시스템 알고리즘은 <Fig. 2>와 같다.





<Fig. 2> HSCS Tabu Search Algorithm Flowchart

## IV. HSCS 사례 분석

### 1. 기본 가정 및 입력 값

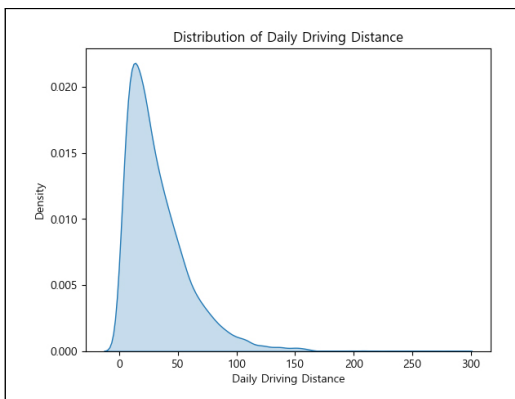
HSCS 최적화 시스템을 적용하기 위해,  $a_{3.5}$ ,  $a_7$ ,  $b_{3.5}$ ,  $b_7$ ,  $N$ ,  $S_{\min}$ ,  $S_{\max}$ ,  $t_{i,j}^{\max}$ ,  $E_i$ ,  $C_i$ ,  $d$ ,  $D_{i,j}$ 의 값이 지정되어야 한다. 본 연구에서는 아래와 같이 현실의 데이터를 반영한 사례 상황 및 변수를 가상으로 설정하였다. 완속 충전기 설치에 충전기의 최대 출력에 따라 차등적인 보조금을 받으며, 충전기 기기 가격 외 배선 작업 및 설치비가 현장에 따라 변동적으로 추가된다. 이를 고려하여  $a_{3.5}$ ,  $a_7$ 은 각각 30(만원), 120(만원)으로 하였다.  $b_{3.5}$ ,  $b_7$ 은 완속 충전기 업체와 충전 시점에 따른 가격 편차가 있으나 평균값을 고려해, 각각 220(원/kW), 260(원/kW)으로 하였다.  $N$ 은 주차면수가 1,000면인 아파트 단지에서 1,000대의 자동차가 등록되어 있을 때, 이 중 10%가 전기자동차라고 가정하여 100으로 설정하였다.  $S_{\min}$ 과  $S_{\max}$ 는 각각 0.2, 0.9(Hoke et al., 2014)로 하였다.  $t_{i,j}^{\max}$ 은 평균적인 출퇴근 시간을 고려해 10시간으로 하였다.  $E_i$ 와  $C_i$ 는 전비와 배터리 용량이 모든 같은 조건의 차량을 가정하여, 각각 4.5km/kWh(Song et al., 2019), 77.4kWh로 하였다.  $d$ 는 1주일간 반복되는 주행거리 패턴을 고려하여, 1달에 해당하는 4주, 28일로 하였다.

1) 주행거리

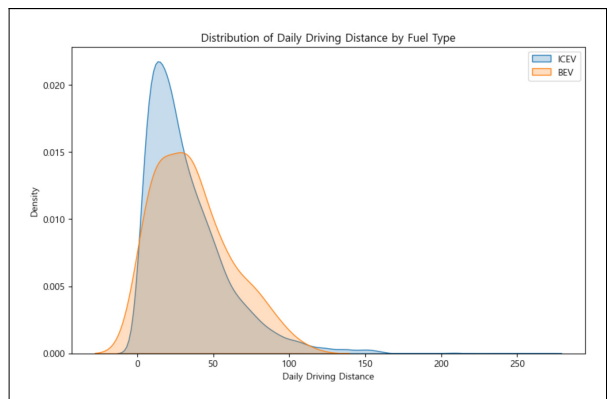
전기자동차 충전 수요 산출에 있어, 가장 주요한 영향요인은 전기자동차 주행거리 분포이다. 한국교통안전공단에서 제공하는 1일 주행거리는 연료, 시도, 차종 등을 구분하여 분포가 아닌 평균값을 제공하며, 전기자동차는 기타연료로 분류되어 사용이 불가하다. 따라서, 표본조사자료인 2021년 개인통행실태조사자료를 사용하였다. 개인통행실태조사는 국토교통부에서 5년 주기로 실시하는 여객통행조사의 일부이다. 2021년 개인통행실태조사는 10월 셋째주 목요일을 기준으로 작성된 자기기입식 통행일지를 기반으로 구축되었다. 개인통행실태조사는 가구 특성, 개인 특성, 통행 특성으로 구성되어있다. 가구특성을 통해 거주 주택종류, 거주 위치 등을 알 수 있으며, 통행특성을 통해 목적 통행별 출발지 및 도착지, 출발시간 및 도착시간, 통행목적, 통행수단 등을 알 수 있다.

본 연구는 서울시 거주자 중 하루 동안 서울시를 출발 또는 도착지로 하는 승용/승합차를 이용한 통행이 1번이라도 있는 사람을 분석 대상으로 하였다. 모든 사람이 자차를 이용했다고 가정하며, 총 7,516명의 수단 통행에 해당하는 18,032통행을 대상으로 자동차의 일일 주행거리를 산출하였다. 출발지 및 도착지는 행정동 단위로만 제시되어 자동차의 주행거리는 통행속도와 통행시간의 곱으로 계산하였다. 분석 단위를 통일하고자 국가교통정보센터에서 제공하는 개인통행실태조사 기준일의 교통소통정보를 바탕으로 1시간 단위의 행정동별 평균 링크속도를 산출하였다. 출발시간, 출발 행정동의 평균 링크속도와 도착시간, 도착 행정동의 평균 링크속도의 평균을 통행시간에 곱하여 이동거리를 산출하였다.

7,516대의 자동차 일일 주행거리 분포는 <Fig. 3>과 같으며, <Table 2>와 같은 기초통계를 보인다. 이 중, 전기자동차는 102대가 포함되어 있다. 전기자동차(BEV)와 내연기관자동차(internal combustion engine vehicle: ICEV)의 일일 주행거리 분포는 <Fig. 4>와 같이 비교할 수 있다. 내연기관자동차는 휘발유, 경유, LPG를 연료로 하는 자동차에 해당한다. BEV와 ICEV의 일일 주행거리 분포를 비교하기 위한 t-test 결과, 90% 신뢰수준에는 미치지 못하지만, 약 84%의 신뢰수준을 보였다( $t=-1.40$ ,  $p\text{-value}=0.16$ ). 따라서, 본 연구에서는 내연기관자동차와 전기자동차의 주행거리 분포가 크게 다르지 않다고 판단하여 모든 자동차의 주행거리 분포를 기반으로  $D_{i,j}$ 를 구축하였다. 사례 분석에 사용되는  $D_{i,j}$ 는 상기 상정한 가상의 아파트 단지에 등록된 전기자동차 100대의 주행거리 분포를 의미하며, 개인통행실태조사자료를 통해 확인한 서울시의 자동차 일일 주행거리 분포를 따른다. 또한,  $D_{i,j}$ 에서  $i$ 차량의 주행거리 분포는 1주일 단위로 반복되며, 1주일 간의 주행거리 분포는 자동차의 일일 주행거리 분포를 반영하여 양수의 주행거리를 부여하였다.



<Fig. 3> Distribution of Daily Driving Distance



<Fig. 4> Distribution of Daily Driving Distance by Fuel

&lt;Table 2&gt; Basic Statistics of Daily Driving Distance

	Count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Daily Driving Distance	7,516	33.03	27.45	0.70	13.52	25.65	44.81	287.26

## 2. HSCS Tabu Search 알고리즘

사례 분석의 HSCS Tabu Search 알고리즘에는 3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기의 초기해를 (0, 0)으로 하여 Tabu search를 진행하였다. 두 가지 충전기의 공급대수는 초기해를 기준으로 -1에서 1까지의 범위에서 무작위로 값을 더하여 이웃해를 생성한다. 생성된 이웃해는 (수식 1)을 기준으로 유효한 해인지 판단된다. 다음으로 tabu list에 존재하지 않음을 확인하고 충전 최적화 모델을 통해 충전 수요에 대응할 수 있는지 평가한다. 충전 수요에 대응할 수 있다면, (수식 2, 3)를 이용하여 완속 충전기 공급 비용과 충전 비용을 산출한다. 알고리즘은 최적의 해를 처음 등록한 후, tabu list에 포함되지 않는 해에 한하여 추가 50회의 최적해 갱신을 시도한 뒤 종료된다. 이를 통해, 완속 충전기 공급 비용과 충전 비용을 최소화하며, 충전 수요에 대응할 수 있는 최적의 완속 충전기 공급량을 산출하였다.

## 3. 결과 분석

주어진 사례분석을 통해 HSCS 최적화 시스템으로 분석한 100대의 전기자동차 충전 수요에 대응하는 최적 완속 충전기 공급량은 3.5kW 과금형 콘센트 22대와 7kW 완속 충전기 0대이다. 이를 기반으로 산출한 완속 충전기 공급 비용은 660만원이다. 최적해를 통해 7kW 완속 충전기가 꼭 필요한 경우가 없었음을 알 수 있다. 7kW 완속 충전기가 필수로 필요하다는 것은  $S_{i,j}$ 와  $U_{i,j+1}$ 의 관계가  $S_{i,j} \times C_i + 3.5 \times t_{i,j}^{\max} < S_{\min} \times C_i + U_{i,j+1}$ 을 만족함을 의미한다. 따라서, 사례 분석에서는 22대의 3.5kW 과금형 콘센트를 공급하여 충전 수요에 대응함과 동시에 모든  $i, j$ 에 대하여  $S_{i,j} \times C_i \geq U_{i,j+1} - 19.52(kW)$ 를 만족함을 의미한다.

개인통행실태조사의 주행거리 분포를 투영한 추정 주행거리가 아닌 실제 주행거리에 관한 정보를 사용하면, 장거리 주行的 증가에 따라 7kW 완속 충전기가 필수적으로 사용되는 환경이 만들어질 수 있다. 하지만, 대부분의 환경에서 3.5kW 과금형 콘센트만으로도 전기자동차 충전 수요에 충분히 대응할 수 있는 충전 인프라를 구축할 수 있다는 것을 알 수 있다.

정부는 공동주택을 신축할 때 전기자동차 충전시설과 전용 주차구역을 5% 이상 확보하도록 규제하고 있으며, 환경부의 발표에 따르면 2025년 이후에는 10%로 상향할 계획을 가지고 있다(Ministry of Environment, 2023). 2023년 기준 서울특별시의 전기자동차 보급률은 2% 수준이며, 정부의 2030년 전기자동차 보급 목표는 420만대로 2023년 대비 약 8배 수준이다. HSCS 사례 분석 결과, 전기자동차 100대(보급률 10%)의 충전 수요에 대응하기 위해 22대(주차면수의 2.2%)의 3.5kW 과금형 콘센트가 필요한 것으로 분석되었다. 즉, 2030년 전기자동차 보급 목표치인 약 16% 수준일 경우 주차면수의 약 3.5% 수준의 충전시설을 공급하면 전기자동차 충전 수요에 대응할 수 있을 것으로 판단되어 과잉공급이 우려된다. 다만, 본 연구의 사례 분석 상황에서는 차량의 주행거리를 가정하여 현실 상황과의 직접적인 비교에는 무리가 있으나, 일률적인 기준으로 충전시설을 공급하고자 하는 정부의 기준이 아닌 전기자동차 이용행태를 반영한 기준의 도입이 필요하다는 것을 알 수 있다. 이러한 측면에서 본 연구는 향후 전기자동차 충전시설 인프라 구축을 위한 정책 입안의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## V. 결 론

본 연구에서는 HSCS 최적화 시스템을 구축하여 Tabu Search와 충전 최적화 모형을 통해 전기자동차 충전 수요에 대응하는 최적의 충전기 공급량을 산출하였다. 완속 충전기의 종류를 반영하여 주거지의 완속 충전기를 대상으로 3.5kW 과금형 콘센트와 7kW 완속 충전기 중 전자에 초점을 맞추어 충전기 인프라 구축을 위한 가이드라인을 제시하였다. 또한, 정확한 충전 수요를 산출하기 위해 차량의 주행거리를 기반으로 충전 수요를 판단하였으며, 전기자동차 보급 대수를 반영하였다.

사례 분석에서는 2021년 개인통행실태조사 자료를 활용하여 서울시 거주자를 대상으로 전기자동차의 주행거리 분포를 산출하였다. 서울시는 승용차 분담률이 낮아 향후 승용차 분담률이 높은 타 지역을 대상으로 한 분석을 종합 고려해 전기자동차 대수와 완속 충전기 공급량의 관계를 분석할 필요성이 있다. 주중 1일 표본조사를 바탕으로 하여 주말의 주행거리 분포를 반영에 어려움이 있다. 개별 차량의 배터리 용량, 회생제동을 고려한 주행에 따른 전비, 개별 이용자의 최대 충전 가능 시간 등 정확한 충전 수요 산출을 위한 개인적이고 세부적인 정보 또한 구득의 어려움이 있다. 하지만, 기술의 발전에 따라 자동차의 주행거리, 전비 등은 실시간으로 구득 가능한 정보로 변화하고 있으며, 멀지 않은 미래에 이러한 정보의 구득으로 향후 연구에서는 정확한 충전 수요를 산출할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 본 연구는 충전수요에 대응할 수 있는 최적의 충전기 공급량을 판단하는 일련의 프레임워크를 제시했다는 점에서 의의가 있다.

본 연구에서는 전기자동차 이용자들이 거주지에서 완속 충전을 하는 것만을 가정하여 HSCS 최적화 시스템을 제시하였다. 실제 생활에서는 거주지를 비롯하여 직장, 공공시설 등 다양한 장소에서 충전하며, 완속 충전만이 아닌 급속 충전을 하는 경우도 존재한다. 또한, 충전 수요의 산출 과정에서 승용/승합차가 아닌 상용차, 택시 등의 충전 수요도 구분하여 고려할 필요가 있다. 이용자들이 충전에 영향을 주는 모든 정보를 공유하여 전체 시스템의 최적을 위한 충전을 하는 것은 현실의 충전행태와 차이가 있다. 현실에서는 차량이 완충되면 자리를 비켜줘야하는 번거로움을 피하고자 충분히 낮은 SoC가 되었을 때, 3.5kW 과금형 콘센트를 활용해 야간에 충전하는 행태 등도 나타날 수 있다. 향후 연구에서는 위와 같이 충전 속도, 충전 장소, 충전 행태, 전기자동차 종류 등 충전 수요에 영향을 미치는 다양한 요인을 고려한 충전 인프라 구축연구를 수행할 필요가 있다. 그럼에도 대부분의 충전은 거주지에서 저녁시간을 이용해 이루어진다는 점에서 충전 인프라 구축의 가장 근간은 주거 충전 인프라이다. 이러한 관점에서 본 연구가 전기자동차의 충전 수요에 대응하는 충전 인프라 구축 및 확장에 초석으로 작용할 것을 기대한다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(RS-2023-00245357)

## REFERENCES

Abido, M. A.(2002), "Optimal power flow using tabu search algorithm", *Electric Power Components and Systems*, vol. 30, no. 5, pp.469-483.

- Andwari, A. M., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R. and Esfahanian, V.(2017), “A review of battery electric vehicle technology and readiness levels”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp.414-430.
- Baresch, M. and Moser, S.(2019), “Allocation of e-car charging: Assessing the utilization of charging infrastructures by location”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 124, pp.388-395.
- Bjerkan, K. Y., Nørbech, T. E. and Nordtømme, M. E.(2016), “Incentives for promoting battery electric vehicle (BEV) adoption in Norway”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 43, pp.169-180.
- Bonges III, H. A. and Lusk, A. C.(2016), “Addressing electric vehicle (EV) sales and range anxiety through parking layout, policy and regulation”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 83, pp.63-73.
- Cui, D., Wang, Z., Liu, P., Wang, S., Zhang, Z., Dorrell, D. G. and Li, X.(2022), “Battery electric vehicle usage pattern analysis driven by massive real-world data”, *Energy*, vol. 250, 123837.
- Figenbaum, E. and Kolbenstvedt, M.(2016), *Learning from Norwegian battery electric and plug-in hybrid vehicle users*, TØI Transportøkonomisk institutt.
- Gerossier, A., Girard, R. and Kariniotakis, G.(2019), “Modeling and forecasting electric vehicle consumption profiles”, *Energies*, vol. 12, no. 7, p.1341.
- Glover, F.(1986), “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”, *Computers & Operations Research*, vol. 13, no. 5, pp.533-549.
- Gu, S.(2023), *A study on installation of optimal number of chargers for electric vehicles apartment buildings based on household supply types*, Hanyang University Dissertation.
- Hoke, A., Brissette, A., Smith, K., Pratt, A. and Maksimovic, D.(2014), “Accounting for lithium-ion battery degradation in electric vehicle charging optimization”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 3, pp.691-700.
- International Energy Agency(2023), *Global EV outlook 2023, Catching up with climate ambitions*, pp.107-113.
- Jin, C., Tang, J. and Ghosh, P.(2013a), “Optimizing electric vehicle charging with energy storage in the electricity market”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp.311-320.
- Jin, C., Tang, J. and Ghosh, P.(2013b), “Optimizing electric vehicle charging: A customer’s perspective”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 7, pp.2919-2927.
- Liu, Z., Wu, Q., Huang, S., Wang, L., Shahidehpour, M. and Xue, Y.(2017), “Optimal day-ahead charging scheduling of electric vehicles through an aggregative game model”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp.5173-5184.
- Michel, L. and Van Hentenryck, P.(2004), “A simple tabu search for warehouse location”, *European Journal of Operational Research*, vol. 157, no. 3, pp.576-591.
- Mies, J. J., Helmus, J. R. and Van den Hoed, R.(2018), “Estimating the charging profile of individual charge sessions of Electric Vehicles in The Netherlands”, *World Electric Vehicle Journal*, vol. 9, no. 2, p.17.
- Ministry of Environment(2023), *Strategy to Expand Electric Vehicle Charging Infrastructure and Enhance Safety*, pp.1-6.

- Ministry of Environment, <https://ev.or.kr/>, 2024.03.01.
- Neubauer, J. and Wood, E.(2014), “The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility”, *Journal of Power Sources*, vol. 257, pp.12–20.
- Omar, N., Monem, M. A., Firouz, Y., Salminen, J., Smekens, J., Hegazy, O., Gaulous, H., Mulder, G., Van den Bossche, P., Coosemans, T. and Van Mierlo, J.(2014), “Lithium iron phosphate based battery - Assessment of the aging parameters and development of cycle life model”, *Applied Energy*, vol. 113, pp.1575–1585.
- Park, J. and Kim, C.(2022), “Charging pattern of electric vehicle user and affecting factors: latent class analysis approach”, *The Transactions of the Korean Institute of Electric Engineers*, vol. 71, no. 11, pp.1639–1645.
- Quirós-Tortós, J., Ochoa, L. F. and Lees, B.(2015), “A statistical analysis of EV charging behavior in the UK”, In *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, pp.445–449.
- Saber, A. Y. and Venayagamoorthy, G. K.(2009), “Optimization of vehicle-to-grid scheduling in constrained parking lots”, In *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp.1–8.
- Song, H., Choi, J., Park, D., Kim, N. and Shin, D.(2019), “Evaluation of charging mileage of electric vehicle using battery module”, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol. 27, no. 8, pp.645–652.
- Statistics Korea(2023), *Changes in Population/Household Structure and Residential Characteristics (1985~2020)*, pp.83–92.
- The Korea Transport Institute(2013), *Automobile Use Survey*, pp.3–5.
- Xu, B., Oudalov, A., Ulbig, A., Andersson, G. and Kirschen, D. S.(2016), “Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp.1131–1140.
- Xu, Y., Huang, S., Wang, Z., Ren, Y., Xie, Z., Guo, J. and Zhu, Z.(2022), “Optimization based on tabu search algorithm for optimal sizing of hybrid PV/energy storage system: Effects of tabu search parameters”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, 102662.
- Yoo, J., Shin, H., Park, K. and Kim C.(2023), “Analysis of Electric Vehicle Use and Charging Behavior and Policy Implications: Powered by Real Time EV User Data”, *Journal of Korean Society of Transportation*, vol. 41, no. 6, pp.704–723.
- Ziegler, D. U., Prettico, G., Mateo, C. and San Román, T. G.(2023), “Methodology for integrating flexibility into realistic large-scale distribution network planning using Tabu search”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 152, 109201.

## APPENDIX

- $i$  = Car index (1,2,3,...,N)  
 $j$  = Date index (0,1,2,3,...,d)  
 $N$  = Car number (대)  
 $d$  = 충전 최적화 모델의 시간적 범위 (일)

### 변수 설정

- $a_{3.5}$  = 3.5kW 과금형 콘센트 설치비용 (만원)  
 $a_7$  = 7kW 완속 충전기 설치비용 (만원)  
 $b_{3.5}$  = 3.5kW 과금형 콘센트 충전 비용 (원/kWh)  
 $b_7$  = 7kW 완속 충전기 충전 비용 (원/kWh)  
 $x_{3.5}$  = 3.5kW 과금형 콘센트 공급량(개)  
 $x_7$  = 7kW 완속 충전기 공급량(개)  
 $V_{3.5}$  = 3.5kW 과금형 콘센트의 충전 속도(kWh/h)  
 $V_7$  = 7kW 완속 충전기의 충전 속도(kWh/h)  
 $S_{i,j}$  =  $i$ 번 차량의  $j$ 일 귀가 시점 SoC  
 $S_{i,j}^n$  =  $i$ 번 차량의  $j+1$ 일 대응을 위한 최소 SoC 필요량  
 $S_{\min}$  = SoC 하한값  
 $S_{\max}$  = SoC 상한값  
 $y_{i,j}^{3.5}$  =  $i$ 번 차량이  $j$ 일에 3.5kW 과금형 콘센트로 충전한 전력량(kWh)  
 $y_{i,j}^7$  =  $i$ 번 차량이  $j$ 일에 7kW 완속 충전기로 충전한 전력량(kWh)  
 $z_{i,j}^{3.5}$  =  $i$ 번 차량의  $j$ 일 3.5kW 과금형 콘센트 사용 여부 (1:사용, 0:비사용)  
 $z_{i,j}^7$  =  $i$ 번 차량의  $j$ 일 7kW 완속 충전기 사용 여부 (1:사용, 0:비사용)  
 $t_{i,j}^{3.5}$  =  $i$ 번 차량이  $j$ 일에 3.5kW 과금형 콘센트로 충전한 시간(h)  
 $t_{i,j}^7$  =  $i$ 번 차량이  $j$ 일에 7kW 완속 충전기로 충전한 시간(h)  
 $t_{i,j}^{\max}$  =  $i$ 번 차량의  $j$ 일 최대 충전 가능 시간(h)  
 $D_{i,j}$  =  $i$ 번 차량이  $j$ 일 하루 동안 주행한 거리(km)  
 $U_{i,j}$  =  $i$ 번 차량이  $j$ 일 하루 동안 소비한 전력량(kWh)  
 $E_i$  =  $i$ 번 차량의 회생제동 미사용 시 주행 전비(km/kWh)  
 $C_i$  =  $i$ 번 차량의 배터리 용량(kWh)