

전기차 카셰어링 시스템 최적화를 위한 모델링 및 시뮬레이션

서용원[†]

Modeling and Simulation of Electric Vehicle Sharing System for Optimized Operation

Yong Won Seo[†]

ABSTRACT

Electric vehicle car sharing (EV-sharing) system is noted as an eco-friendly system of transportation in global warming crisis and has been practically implemented in some cities around the world. However, methodologies to find the efficient operation conditions of EV-sharing systems reflecting a typical characteristic 'charging' have not been fully investigated yet. In the paper a generalized model has been developed to identify optimal level of infrastructure for EV-sharing system which provides the optimum operation efficiency under service level constraints. From the simulation analysis based on the developed model the relationships between the operational variables to describe EV-sharing system have been identified and optimal capacity to maximize the operational efficiency have been found. From the analysis of simulation results it has been found that increases in the number of vehicles and chargers improve the service level until certain value beyond which increasing rate and the efficiency have been reduced. From the cost-revenue analysis the optimal numbers of vehicles and chargers have been identified which maximizes the annual operational profit.

Keywords : Electric Vehicle, Car-Sharing, EV Sharing, Infrastructure optimization

요약

전기차 카셰어링은 친환경차량인 전기차를 여러 사용자들이 함께 이용함으로써 교통부문의 온실가스 발생량을 감소시키고, 동시에 자가용 증가로 인한 공간 및 환경문제를 해결할 수 있는 방안으로 주목받고 있다. 그러나 아직 도입단계에 불과하기 때문에 전기차 카셰어링 시스템의 효율성이나 사업가능성에 대한 연구나 분석이 필요한 실정이다. 이러한 배경하에 본 연구에서는 전기차 카셰어링 시스템의 운영상태와 결과를 분석이 가능한 모형을 개발하였으며, 현재 실시되고 있는 시범사업 내용을 반영하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과 전기차 카셰어링 시스템 운영과 관련된 변수들 사이의 관계와 운영효율을 최대화 할 수 있는 최적용량 등을 분석하였다. 시뮬레이션 분석에서는 차량대수와 충전기수가 증가할수록 서비스 제공율은 계속 증가하다가 일정수준에 도달하면 증가폭과 그 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 카셰어링 시스템 운영에 따른 수익과 비용을 분석하여 연간 운영 이익을 최대화 할 수 있는 최적 차량대수 및 최적 충전기 수를 도출하였다.

주요어 : 전기차, 차량 공동이용, 전기차 공동이용, 인프라 최적화

1. 서론

1.1 연구의 배경

카셰어링 시스템은 개인차량을 소유하지 않고도 필요한 경우 개별 차량을 빌려쓸 수 있도록 다수의 사용자들에게 공유차량을 제공하는 서비스이다. 사용자들에게는 승용차 보유비용을 절감할 수 있다는 장점이 있으며 사

Received: 27 October 2016, **Revised:** 7 November 2016,
Accepted: 7 November 2016

† Corresponding Author: Yongwon Seo
E-mail: seoyw@cau.ac.kr
College of Business and Economics,
Chung-Ang University, Seoul, Korea

회적으로는 차량증가로 인한 환경 문제, 주차공간 문제 등을 해결할 수 있는 대안이 될 수 있다. 또한 교통복지 차원에서는 개인차량 소유가 어려운 사람들에게 시공간상의 제약이 적은 개인이동수단을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

특히 최근 등장하고 있는 전기차를 이용한 카셰어링 시스템은 일반적인 내연기관차량 기반 카셰어링과 비교하여 환경적 편익이 더 높고 연료비 절감을 통한 운영 효율화 가능성도 높을 것으로 기대되고 있다. 또한 전기차 카셰어링 도입을 통해 전기차 시장의 초기수요를 형성하고 소비자들의 전기차에 대한 체험과 인지를 확산할 수 있다. 해외에서는 이미 프랑스의 Autolib, 독일의 Car2go와 같은 전기차 카셰어링 서비스가 실시중이며 국내에서도 2012년 말부터 서울시, 수원시 등 수도권을 중심으로 전기차 공동이용 시범사업을 실시하고 있다(Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, 2011)

그러나 전기차 카셰어링은 기존 내연기관차 기반 카셰어링과 비교할 때 차량구매비용과 충전기 포함 관련 인프라 구축비용 등으로 초기 구축비용이 크다. 또한 차량 운영시에도 충전방식이나 충전에 소요되는 시간을 어떻게 확보할지에 대한 전략이 서비스의 질과 수익에 큰 영향을 미친다. 따라서 양질의 서비스를 제공하는 동시에 운영수익을 최대화하기 위해서는 최적 인프라 구축과 운영 전략 수립을 위한 분석이 필요하다. 이를 위해서는 전기차 카셰어링 시스템을 분석할 수 있는 분석모형(Analytical model)을 개발하고 제반조건하에 최적전략을 도출하기 위한 연구가 필요하다.

2. 연구의 목적 및 구성

본 연구의 목적은 전기차 특성을 감안한 전기차 카셰어링 시스템 분석모형을 개발하고 모형을 활용한 시물레이션 분석을 통해 최적 인프라조건을 산출하는 것이다.

시물레이션 분석은 현재 실시되고 있는 서울시 전기차 카셰어링 서비스를 기반으로 실시되었으며 해당 결과는 시스템 초기 기반구축에 기준값으로 활용될 수 있도록 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기존문헌을 고찰하여 기존연구와 본 연구의 차별성을 도출하고, 3장에서는 전기차 카셰어링 시스템의 분석모형을 제시하였다. 4장에서는 개발된 모형을 통한 시물레이션 분석을 실시하고 그 결과를 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 결론을 도출하고 향후 연구 과제를 제시하였다.

2. 기존문헌 고찰

전기차 카셰어링 서비스는 최근 전기차 개발과 함께 보급되고 있는 시장 도입단계로서 관련한 기존 연구가 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 관련연구 고찰로서 일반 차량을 이용한 카셰어링 최적 운영전략 관련연구와 전기차 배터리 충전과 관련된 연구들을 검토하였다.

2.1 카셰어링 최적 운영전략 관련 연구

카셰어링 서비스의 최적 운영전략과 관련된 기존 연구는 최적 차량대수 및 차량대여소 위치를 결정하는 시스템최적화와 차량재배치전략 및 충전방식을 결정하는 운영최적화로 구분될 수 있다.

시스템 최적화와 관련하여 Fedorcakova et. al.(2012)는 슬로바키아 Kosice지역의 카셰어링 서비스를 위하여 실제 필요한 차량대수를 산출하였다. 이 연구는 실제 운영 중인 카셰어링 시스템의 주차면수와 지점별 출차횟수 및 반납횟수를 입력자료로 이용하는 재고모형을 구축하여 최적차량대수를 산출하였다. Correia and Antunes (2012)는 카셰어링 수요를 추정하여 운영자 이익을 최대로 하는 최적 지점을 선정하는 방법을 제시하였다. 여기에서 카셰어링 수요는 승용차 통행수요로부터 추정되었으며, 이를 바탕으로 차량대여수입, 유지관리비용, 재배치 비용 등을 고려하여 운영자 이익을 추정하였다.

운영전략 최적화와 관련된 연구들은 Cepolina and Farina(2012)와 Nair and Miller-Hooks(2011)가 수행한 차량재배치에 대한 연구이다. 이 연구에서는 연구 대상 지역에서 카셰어링 수요가 주어지고, 차량대수 및 주차면수 등 시스템 용량이 결정되었을 경우, 시스템의 운영비용을 최소화하고 이용자의 대기비용 및 서비스 실패율을 최소화하는 차량 재배치 전략을 도출하였다. 하지만 이들은 차량대수 및 주차면수가 고정된 상태에서 차량의 재배치전략만을 도출하였을 뿐, 시스템의 용량을 최적화할 수 있는 시설물의 설계 방안을 제시하지는 못하였다.

2.2 전기차 충전 전략 관련 연구

Yudai and Osamu(2009)는 배터리 교체방식에서 차량도착률과 충전시간이 지점의 배터리 안전재고에 미치는 영향을 마코브체인을 이용한 대기행렬모형으로 분석했다. 이 연구는 배터리 교체방식만을 대상으로 한 것으로 전기 자동차의 가장 일반적인 운영 형태인 충전 방식

을 고려하지 못하였다.

Farkas and Prikler(2012)는 배터리 충전방식에서 충전기수, 충전소요시간, 주차면수 등이 시스템효율에 미치는 영향을 M/M/c/N 대기행렬모형을 이용하여 분석하였다. 이 연구는 각 요소 간 상관관계에 대하여 자세하게 분석하였지만 총비용 관점에서의 시스템의 최적화 방안을 제시하지 못하였다.

Lu and Yeh(2012)은 시뮬레이션 모델을 기반으로 전기차 택시의 충전대기시간을 최소화하는 충전설비 배정 전략을 수립하였다. 시뮬레이션을 이용한 방법론은 본 연구와 유사하지만, 이미 설치된 충전설비 기반 내에서 최적화하여 충전설비 기반의 최적 설계를 위한 방법은 제시되지 않았다.

2.3 본 연구의 차별성

앞서 검토한 기존 연구들은 카셰어링 최적운영과 관련하여서는 시스템 구축이후 최적 운영 전략 도출을 위한 시뮬레이션 분석이나 특정 사례지역에 대한 방법론으로 제한되어 있다. 전기차 충전관련 연구들도 또한 기존 인프라를 기반으로 한 시뮬레이션 분석에 초점을 맞추고 있으며 일반적인 시스템 모형화에 대한 연구는 부족하다.

따라서 본 연구는 전기차 카셰어링 시스템 운영과 관련하여 일반적인 분석방법론을 제시하고 이에 따라 운영 효율을 극대화할 수 있는 최적 인프라 조건을 도출하는 것을 목표로 한다는 점에서 기존 연구들과 차별화된다고 할 수 있다.

3. 전기차 카셰어링 시스템 분석모형

3.1 구성요소

전기차 카셰어링 시스템을 구성하는 요소들은 크게 수요 측면과 공급 측면의 두 가지 관점에서 분석할 수 있다 (Table 1).

1) 수요 측면 구성요소

첫 번째 주요 구성요소인 카셰어링 서비스 이용 수요는 공간적으로는 각 서비스 지점별로 추정할 수 있으며 시간적으로는 각각 일일 수요 분포와 시간대별 수요분포로 표현할 수 있다. 실제 서비스 이용수요가 존재하지 않는 상황에서 수요 추정을 위해 카셰어링 서비스를 이용할 가능성이 높은 잠재 고객을 가정하고 그 수요분포를

Table 1. Main components of EV Car-sharing System

Demand	Individual demand	Spatial distribution	
		Daily distribution	
		Time-of-day distribution	
Usage pattern		Duration of usage (Start-time, End-time)	
		Mileage	
Supply	Capacity	Number of fleets	
		Number of parking spaces	
	Service operations strategy	One way/Round trip	
		Reservation policy	
		Minimum buffer time between reservations	
	Recharging strategy		Number of chargers
			Type of recharging(Slow, Quick and Battery swapping)
Minimum required SOC(State of Charge) for safe driving			

추정하였다.

두 번째 구성요소인 카셰어링 서비스 이용 행태는 이용자의 서비스 이용 시간과 주행거리 등 이용 특성을 나타낸다. 이는 잠재고객의 이용 목적이나 택시 등 유사 교통수단의 이용 행태 등을 이용하여 추정할 수 있다.

2) 공급 측면 구성요소

첫 번째 주요 구성요소인 카셰어링 서비스 인프라는 서비스 지점의 위치 선정과 지점별 차량대수 및 주차면수 등 인프라의 용량 설정에 관련된 파라미터로 표현할 수 있다. 이러한 물리적 설계는 수요에 따라 시스템 효율을 극대화할 수 있도록 결정된다.

두 번째 구성요소인 서비스 운영 전략은 시스템의 논리적 설계라고 할 수 있다. 여기에는 서비스 운영 및 예약방침이나 전기차와 관련해서는 충전에 소요되는 시간 확보를 위한 버퍼시간 부여 등이 포함된다. 서비스의 운영방식은 크게 왕복(Round Trip)방식과 편도(One-way Trip)방식으로 나뉜다. 왕복방식은 차량의 대여지점과 반납지점이 같은 운영방식으로, 지점에 배치하는 초기차량대수가 운영전략의 핵심요소이다. 반면 편도방식은 차량의 대여지점과 관계없이 반납지점을 선택할 수 있다. 이 경우 차량반납의 쓸림에 의한 차량재고 불균형이 발생할 수 있기 때문에 차량 재배치 전략과 지점별 주차면수에 대한 고려가 필요하다.

세 번째 주요 구성요소인 전기차 충전전략은 전기차 기반의 카셰어링 서비스에서 고유하게 고려되는 새로운 쟁점이다. 적정한 충전방식 선정과 충전기수 또는 배터리 재고를 결정함으로써 차량 가용성을 증가시켜 시스템 효율을 극대화하는 것이 목표가 된다.

먼저 충전방식은 플러그인 방식과 배터리 교체방식이 있다. 플러그인 방식에서 충전효율을 결정하는 핵심요소는 충전기의 수와 충전기의 종류이다. 충전기는 충전 속도에 따라 급속과 완속충전으로 구분된다. 반면 배터리 교체방식은 미리 충전한 배터리 재고를 반납된 차량의 배터리와 교체하는 방식으로 교체배터리 재고에 대한 추가적인 고려가 필요하다(서용원, 2012).

한편, 충전전략과 관련해서는 서비스 이용시 주행에 필요한 최소한의 충전상태(SOC, State of charge)를 유지하는 것이 관건이며 이는 충전전략을 수립하는데 중요한 요소이다.

3.2 시스템 운영

1) 시스템 상태

전기차 카셰어링의 운영 모형은 차량 대여(Vehicle Retal), 차량 반납(Vehicle Return), 차량 충전 및 준비(Charging and preparation)의 3가지 단계로 구성할 수 있다. Figure 1은 운영 단계별로 시스템 상태를 도식화하여 나타내고 있다.

상자 안의 (n, c) 에서 n 은 현재 충전 등 대여 준비가 완료된 대여 가능 차량대수를 의미하고, c 는 충전대기 또는 충전 중에 있는 대여 준비 중인 차량대수를 의미한다. 각 대여 단계별로 n 과 c 는 실시간으로 변화하는 시스템 상태변수로 표현된다.

차량 대여 단계는 1)고객 도착, 2)가용차량 검색, 3)대상차량제공(서비스제공)으로 세분화할 수 있다. 고객 도착은 카셰어링 수요분포로 표현할 수 있다. 만약 수요가 있는 시점에 대여가 가능한 완충차량이 있는 경우에는 즉시 차량이 대여된다. 만약 대여가능한 차량이 없는 경우에는 서비스는 실패로 간주한다. 대여 완료 후 전체 시스템의 대여가능한 차량대수는 1대 감소한 $(n \rightarrow n-1)$ 상태가 된다.

차량 반납 단계는 1)반납차량 도착, 2)가용주차면 검색, 3)차량반납(서비스종료)으로 세분화할 수 있다. 반납차량 도착은 카셰어링 수요분포와 서비스 이용 및 종료 시간으로 나타낸다. 차량이 반납지점에 도착하면 가능한

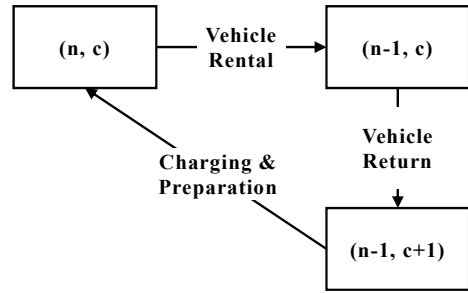


Figure 1. State Model of EV Car-sharing System by Rental Procedure

주차공간이 있는지 탐색하고, 가용한 경우 반납 성공으로 미가용한 경우 반납실패로 기록된다. 그러나 본 연구에서는 주차면수가 초기 차량대수를 지원하기 충분하도록 가정했으므로 반납실패는 고려하지 않았다. 차량반납 후 전체 시스템의 준비중인 차량은 1대 증가하여 $(c \rightarrow c+1)$ 상태가 된다.

반납된 차량은 다음 서비스를 위한 차량 충전 및 준비 과정에 들어간다. 차량충전은 먼저 충전가능상태에 따라 충전대기와 충전중의 두가지 상태로 나뉜다. 차량 충전 순서는 FCFS(First-Come First-Serve)에 따라 먼저 대기 중인 차량부터 충전이 시작된다. 충전소요시간은 반납된 차량의 SOC에 따라 달라지며 일반적으로 배터리소모량에 비례한다. 배터리 소모량은 서비스중 주행거리와 단위 주행거리당 배터리소모 원단위를 적용하여 산정한다. 충전과 함께 다음 서비스 준비를 위해 차량 문제사항 정비, 차량점검 등이 함께 이루어진다. 이의 충전에 소요되는 시간을 확보하기 위해 서비스간 이용시간 사이에 최소 버퍼시간을 설정하는 것으로 가정하였다. 따라서 충전 및 서비스 준비후 전체 시스템 상태는 준비차량이 감소하고 $(c \rightarrow c-1)$, 대여가능차량은 증가한다 $(n \rightarrow n+1)$.

2) 성과측정

전체 시스템 운영성과를 측정할 수 있는 지표로는 수요자 측면에서는 서비스 제공율과 공급자 측면에서는 운영효율을 들 수 있다.

서비스 제공율은 얼마나 많은 수요자들이 원하는 사공간에서 대여가능한 차량을 배치받을 수 있는지를 나타내는 지표이다. 만약 서비스 제공율이 낮을 경우 사용자들은 시스템에 대한 신뢰도가 낮아지고 수요는 감소하게 될 것이다. 따라서 카셰어링 서비스의 지속적인 운영을 위해서는 일정 수준 이상의 서비스 제공율이 보장되어야 한다. 따라서 서비스 제공율은 최적 시스템 산출시 일정

수준 이상을 만족하도록 하는 제약조건이 될 수 있다.

다음으로 운영자 측면에서 시스템 운영효율을 평가할 수 있는 주요 지표는 운영이익이다. 운영이익은 분석기간 동안 총 시스템 운영 수익과 시스템 운영 비용간의 차이로 계산된다. 주요 운영수익 항목은 사용자가 지불하는 이용요금이며, 운영비용은 차량 구매비용, 충전기 등 인프라설비 비용 등의 합으로 표현할 수 있다.

일반적으로 서비스 제공율은 대여가능한 차량대수와 충전기수가 많을수록 높아진다. 서비스제공율이 높아질수록 운영수익도 늘어나지만 이와 함께 운영비용도 증가하게 된다. 따라서 총 운영이익을 최대화하면서 사용자에게 높은 서비스제공율을 보장할 수 있는 최적시스템 용량 및 서비스 운영전략 등이 연구되어야 한다.

3.3 모형화

여기에서는 앞서 설명한 시스템상태 및 성과측정 지표들을 기반으로 시스템 운영효율을 최대화할 수 있는 서비스 인프라 규모와 운영전략 등을 도출할 수 있는 최적화 모형을 도출하였다. 그 과정은 Figure 2와 같은 수리적 의사결정 모형으로 표현될 수 있다.

1) 목적함수

운영 최적화를 위한 의사결정 문제를 수리적 모형으로 개념화하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Max } \pi(N, C) \\ & \text{subject to} \\ & \quad SL(N, C) \geq SL_{target} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,

- $\pi(N, C)$: 차량 N 대, 충전기 수 C 일 때 운영이익,
- $SL(N, C)$: 차량 N 대, 충전기 수 C 일 때 서비스 제공율,
- SL_{target} : 최소 서비스 제공율 목표치.

시스템 운영이익은 연간 운영수익과 연간 총 비용의 차로 표현된다. 운영수익은 회원 등록비와 차량 대여서비스 요금으로 산정하며, 운영비용은 차량 구입비, 충전설비 구매 및 설치 등의 자본적 비용과, 주차면 임대료, 전기요금 등의 운영적 비용으로 구성된다. 따라서, 시스템의 연간 운영이익은 다음과 같다.

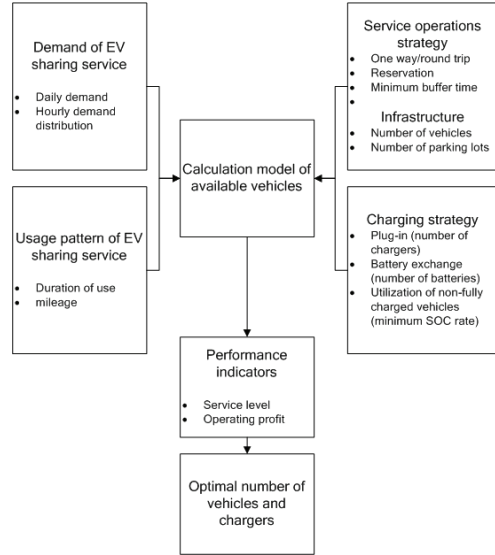


Figure 2. Proposed Structure of EV car-sharing system model

$$\pi = \text{연간운영수익} - \text{연간총비용} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} & = \left\{ R_M M + \sum_{i \in D_s} R_T T_i \right\} \\ & - \left\{ \frac{1}{L} (K_V N + K_C C) + R_S N + R_E \sum_{i \in D_s} E_M Z_i \right\} \end{aligned}$$

여기서,

- R_M : 연간 고객 회원 등록비,
- M : 전체 고객 회원 수,
- D_s : 연간 서비스 제공 성공 수요,
- R_T : 차량의 시간당 대여요금,
- T_i : i 번째 발생 수요의 서비스 이용시간,
- L : 차량 및 충전설비의 내용연수,
- K_V : 차량의 대당 구입비용,
- K_C : 충전기의 대당 설치비용,
- R_S : 주차면의 대당 임대비용,
- R_E : kWh당 전기요금,
- E_M : 1km 주행당 소비전력(kWh),
- Z_i : i 번째 발생 수요의 서비스 주행거리.

시스템 서비스 제공율은 고객의 서비스 요구에 부응하는 정도를 나타내는 지표로서, 총 수요 중에서 서비스를 성공적으로 제공받은 횟수의 비율로 나타난다. 따라서,

서비스 제공율은 다음의 식에 의해 산정된다.

$$SL(t) = \frac{D_s(0,t)}{D(0,t)} \quad (3)$$

여기서,

$SL(t)$: t 시점까지 서비스 제공율,

$D(0,t)$: t 시점까지의 총 수요량,

$D_s(0,t)$: t 시점까지의 총 서비스 성공횟수.

2) 입력변수

모형의 주요 입력변수로서는 시간대별 수요, 운영 및 충전전략 등이 있다.

먼저 수요자료는 관련된 자료들을 통해 추정된 각 지점별 평균 일일서비스수요발생량과 시간대별 수요발생비율을 이용하여 시간대별 평균 수요발생량을 구하고, 각 시점별 실수요 발생량은 이를 모수로 한 포와송 분포를 따르는 것으로 가정하였다.

먼저 각 지점별 시간대별 수요발생 확률 $\rho_i(j)$ 는 실제 관측자료들을 이용하여 다음과 같이 추정하였다.

$$\rho_i(j) = \frac{\delta_i(j)}{\delta_i} \quad (4)$$

여기서,

$\rho_i(j)$: 서비스지점 i 에서 j 시간대에 수요발생확률,

δ_i : 서비스지점 i 의 일일 발생통행수,

$\delta_i(j)$: 서비스지점 i 의 j 시간대의 총 발생통행수.

따라서 각 지점의 시간대별 평균 수요발생량은 시간대별 수요발생확률에 일일 총 수요 발생량을 곱한 결과로 다음 식 (5)와 같다.

$$\lambda_i(j) = D_i^{Day} \times \rho_i(j) \quad (5)$$

여기서,

$\lambda_i(j)$: 서비스지점 i 에서 j 시간대 수요 평균값,

D_i^{Day} : 서비스지점 i 의 일일 총 수요발생량.

여기에서 일일 총 수요 발생량은 지점별 회원수와 월 평균 이용횟수 등을 통해 추정할 수 있다. 실제 시간대별 수요발생량은 $\lambda_i(j)$ 를 모수로 갖는 포아송 분포를 따르

는 것으로 가정하였다.

서비스 이용행태는 일회 서비스 이용시간과 일회 주행거리의 입력값으로 표현된다. 서비스 이용시간은 관련 자료를 통해 추정된 최대 이용시간과 최소 이용시간 사이의 균등분포로 가정하였다. 따라서 서비스이용시간 T 는 다음 식 6과 같다.

$$T = T_{\min} + U \times (T_{\max} - T_{\min}) \quad (6)$$

여기서,

T_{\min} : 서비스 이용시 최소 이용시간,

T_{\max} : 서비스 이용시 최대 이용시간,

U : T_{\min} 와 T_{\max} 사이 균등분포 확률변수.

일회 주행거리는 일회 이용시간에 비례하되, 최소 주행거리와 최대 주행거리 사이의 값으로 제한하였다. 최대 주행거리는 완충시 최대 주행가능거리로 제한하였다.

$$Z = \max(\min(T \times \bar{V}, Z_{\max}), Z_{\min}) \quad (7)$$

여기서,

\bar{V} : 네트워크내 평균 주행속도,

Z_{\min} : 최소 주행거리,

Z_{\max} : 최대 주행거리.

운영자는 차량의 이용시간과 주행거리를 수요 발생시점에 알 수 있으며, 주행에 필요한 SOC 수준을 추정할 수 있다고 가정했다.

카셰어링 운영방식은 현재 사업에 적용되고 있는 왕복 운영방식을 가정하고, 차량 주차면수는 총 차량 보유 대수를 지원하기에 충분한 것으로 가정하였다. 서비스와 서비스 사이에는 충전 및 준비를 위해 필요한 최소 버퍼시간을 두었다. 서비스 예약전략은 초기 모형의 단순화를 위해 고려하지 않았으며, 차량 공급은 기본적으로 FIFO (First In First Out) 원칙을 따르도록 가정하였다.

충전전략은 일반적인 플러그인 방식 충전설비를 이용하는 것으로 가정하며, 충전방식은 급속 충전과 완속 충전을 이용하는 것으로 가정하고 각각의 평균 충전소요시간을 적용했다. 차량 배치와 관련하여 완충차량만을 서비스하는 방안과 미완충 차량의 경우에도 예상 이용시간과 주행거리가 현재 SOC 수준 내에서 서비스가 가능하다면 배치하는 방안을 각각 고려하였다.

해당 입력자료와 가정 하에서 연간 시스템 운영상황을

시뮬레이션하고 그 결과로서 서비스 제공율과 시스템 운영수익을 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 토대로 최적 인프라 규모(최적 차량대수, 충전기수 등)를 도출하였다. 시뮬레이션과 관련된 자세한 내용은 다음 사례연구에서 자세히 설명하였다.

4. 시뮬레이션 분석

4.1 개요

1) 시공간 범위

앞서 설명한 전기차 카셰어링 분석모형을 실제 네트워크에 적용하여 시뮬레이션 분석을 실시하였다. 대상 지역은 현재 사업이 실시되고 있는 지점들을 대상으로 하였으며 분석기간은 1년으로 설정하였다. 대상 지역은 전기차 카셰어링 시범사업이 실시되고 있는 수도권 12개 지점으로 상세 지점 설명은 Figure 3과 같다.

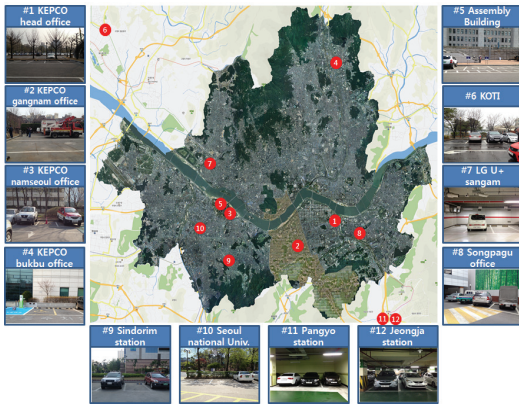


Figure 3. Simulation area for EV sharing system model

2) 주요 입력자료

시뮬레이션 입력자료 중 각 지점별 수요는 2010년도 가구통행실태조사 자료를 기반으로 추정하였다. 카셰어링 서비스는 초기단계로 수요추정을 위한 충분한 자료가 없기 때문에 해당 서비스 이용가능성이 높은 통행들을 통해 수요분포를 추정하였다. 해당 통행은 각 서비스 지점 반경 500m이내에서 발생한 통행으로, 도보나 자전거 등 근거리 통행을 제외하였다.

그 결과 총 21,948 가구내 28,914명의 33,563 통행이 추출되었으며 이를 기반으로 각 지점별 시간대별 수요발생 확률을 추정하였다. 일일 총 수요 발생량은 각 지점별 회원수와 월평균 이용횟수를 기반으로 산정하였으며, 이

는 관련 설문조사 및 초기 사업실시 결과를 토대로 추정하였다.

서비스 이용시간 분포는 기존 연구 및 시범사업 결과를 통해 도출하였으며, 주행거리 분포 추정시 사용되는 네트워크 평균 통행속도는 최신년도 서울시 평균통행속도 자료를 활용하여 30km/h로 가정하였다.

그 외 주요 입력값으로서 차량대여시 다음 대여까지의 최소버퍼시간은 실제 사업에 적용된 것과 같이 2시간으로 가정하였다. 미완충차량 서비스정책은 시나리오별로 이용불가와 이용가능으로 나뉘며, 미완충차량을 이용할 경우 남아있는 SOC비율은 이용거리의 1.3배 이상 확보되어 있는 상태에만 대여가 가능하도록 가정하였다.

3) 분석 시나리오

시뮬레이션 분석시나리오는 충전방식과 미완충 차량 배치방식에 따라 다음 Table 2와 같이 네 가지 시나리오로 분류하였다.

Table 2. Simulation Scenarios

	Recharging strategy	Low SOC vehicle usage
Scenario I	Slow charging only	Disallowed
Scenario II	Slow charging only	Allowed
Scenario III	Fast charging	Disallowed
Scenario IV	Fast charging	Allowed

시나리오 I은 완속충전기를 사용하며 미완충 차량은 서비스 제공하지 않는 경우이다. 시나리오 II는 완속충전기를 사용하며 미완충 차량도 조건에 따라 서비스 제공할 수 있는 경우이다. 시나리오 III은 급속충전기를 사용하고 미완충 차량은 서비스 제공하지 않는 경우이다. 시나리오 IV는 급속충전기를 사용하며 미완충 차량도 조건에 따라 서비스 제공하는 경우이다.

각 시나리오별로 지점별로 배치된 차량대수와 이용가능한 충전기수를 변수로 1년간 시뮬레이션을 통해 서비스제공율과 연간 운영이익을 분석하였다.

4.2. 시나리오별 주요 결과

1) 서비스 제공율

각 시나리오별로 시뮬레이션을 실시하여 그 운영성과로서 먼저 서비스 제공율을 분석하였다. 차량대수와 충전기수 변화에 따른 서비스 제공율의 변화를 보다 자세히

살펴보기 위해 전체 시스템 중 4번 지점을 대상으로 시나리오별 차이를 비교 분석하였다.

먼저 시나리오 I에 기반한 시뮬레이션 결과는 Figure 4와 같다. 그림에서 보듯이 차량대수 증가에 따라 서비스 제공율은 높아지지만 차량대수가 약 10대인 경우 80 이상 서비스 제공률을 확보한 이후에는 제공을 증가폭은 서서히 감소한다. 충전기 수는 1대에서 2대로 증가하는 경우 서비스 제공율이 크게 변화하지만 2대 이상인 경우 서비스 제공을 변화의 증가폭은 극히 미미한 것으로 나타났다(부록 참조).

시나리오II 로 시뮬레이션 한 결과는 Figure 5와 같이 나타난다. 시나리오 I과 유사하지만 동일 차량대수와 충전기수에서 서비스 제공률이 더 높게 나타났다. 이는 미완충차량을 투입할 수 있도록 했기 때문에 대여가능한 차량이 늘어나고, 서비스 제공율이 높아진 것이다.

시나리오 III과 IV는 급속충전기를 사용하는 경우로 시뮬레이션 결과는 각각 Figure 6과 Figure 7과 같다.

Figure 6에서 보듯이 차량대수 증가에 따라 서비스 제공율은 급격히 증가하며 차량대수가 8대 이상인 경우 80 이상 서비스 제공률이 확보되는 것으로 나타났다. 급속충전기를 사용하는 경우에는 충전기대수 증가에 따른 서비스 제공률의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

Figure 7은 시나리오 IV하에서 시뮬레이션 분석결과이다. 시나리오 III과 비교할 때 서비스 제공률은 동일 차량대수와 충전기수에서 거의 유사하거나 약간 높은 것으로 나타났다. 이는 급속충전기를 사용하는 경우 미완충 차량을 서비스에 확보하는 경우가 현저히 줄어들기 때문인 것으로 보인다.

모든 시나리오 결과를 종합하면 서비스 제공률은 차량대수와 충전기대수가 증가함에 따라 높아지지만 일정 차량대수와 충전기수 확보 이후 증가율은 감소하는 것으로 나타났다.

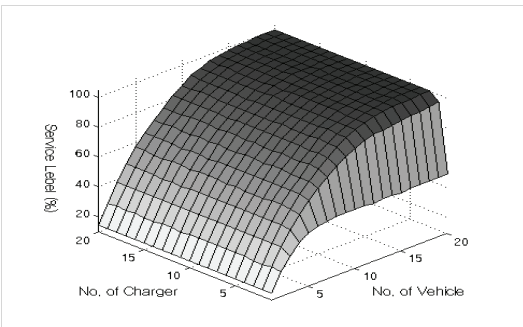


Figure 4. Service Satisfaction rate under Scenario I

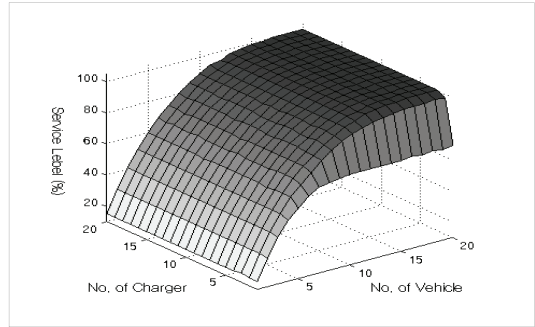


Figure 5. Service Satisfaction rate under Scenario II

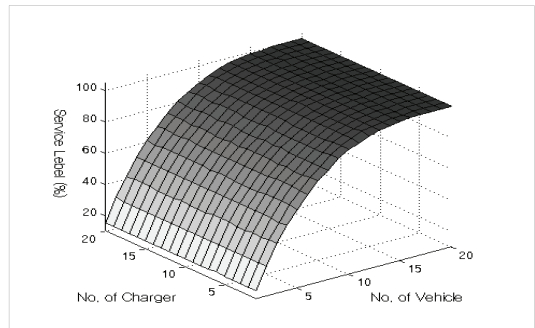


Figure 6. Service Satisfaction rate under Scenario III

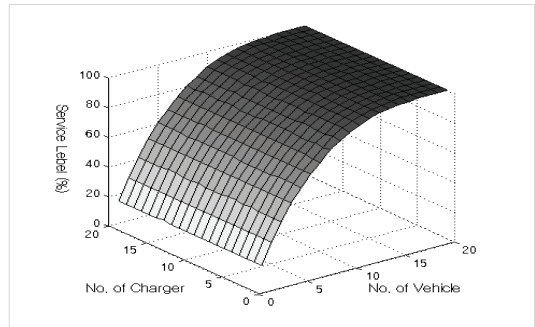


Figure 7. Service Satisfaction rate under Scenario IV

2) 연간 운영이익

시스템 운영의 성과지표로서 각 시나리오별 연간 운영이익을 분석하였다. 일반적으로 운영되는 차량대수가 증가함에 따라 서비스 제공율은 증가하고 운영수익도 증가하게 되지만 차량 구매와 유지보수를 위한 비용도 증가하게 됨으로써 운영이익은 감소할 수 있다. 따라서 운영이익을 최대화하는 최적 서비스용량을 결정하는 것이 필요하다.

먼저 시나리오 I에서 연간 운영이익을 최대화하는 최적 차량대수 및 충전기수를 추정하였다. 시뮬레이션 분석 결과 각 차량대수와 충전기수 하에서 운영이익은 Figure

8과 같다. 이때 각 지점별로 배치된 차량대수가 11대이며 충전기수가 3대 일 때 연간 운영이익이 최대값을 갖는 것으로 나타났다.

시나리오 II의 경우 시나리오 I 과 유사하지만 미완충 차량도 서비스할 수 있기 때문에 동일한 차량대수와 충전기 대수하에서 운영이익은 시나리오 I 보다 높게 나타났다(Figure 9).

그 외 시나리오 III, 시나리오 IV하에서 차량대수와 충전기 수에 따른 운영이익의 변화는 각각 Figure 10과 Figure 11과 같다. 시나리오 IV의 경우 가장 높은 연간 운영이익을 보이는 것으로 나타났다.

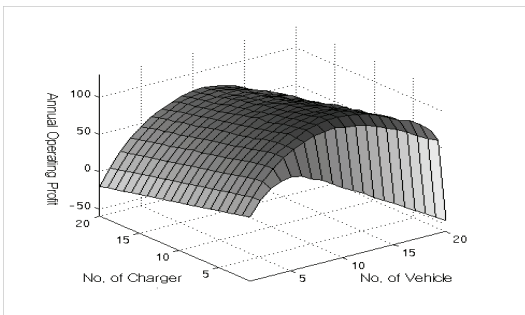


Figure 8. Annual Net Benefit under Scenario I

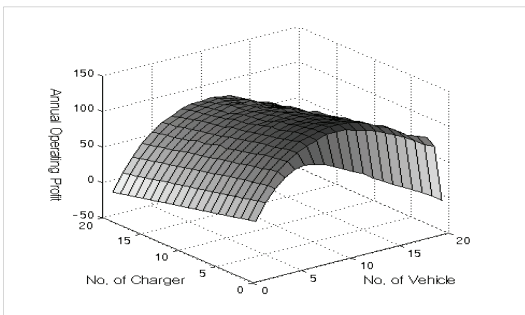


Figure 9. Annual Net Benefit under Scenario II

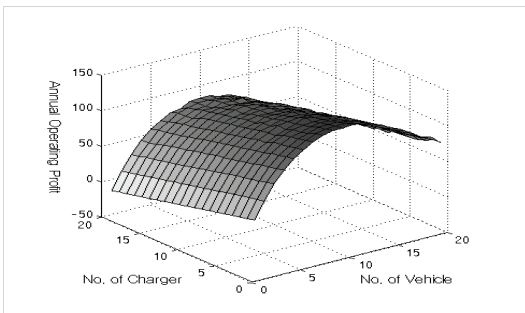


Figure 10. Annual Net Benefit under Scenario III

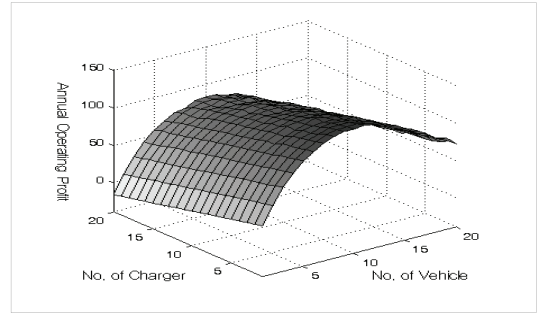


Figure 11. Annual Net Benefit under Scenario IV

결과에서 보듯이 미완충차량을 활용하는 것이 그렇지 않은 경우보다 운영이익을 높일 수 있는 것으로 나타났으며, 미완충차량을 활용하는 상태에서 완속충전기를 설치할 경우 Figure 8, 9와 같이 3대의 충전기를, 급속충전기를 설치할 경우 Figure 10, 11과 같이 1대의 충전기를 설치할 때 연간 운영이익이 최대가 되는 것으로 나타났다.

한편 각 시나리오별로 최대 운영이익이 발생하는 차량의 대수와 충전기 수는 Table 3과 같다.

Table 3. Number of Cars and Charger with the Maximum Net benefit in Each Scenario

	Number of Cars	Number of Chargers	Service Satisfaction Rate
Scenario I	11	3	90.31
Scenario II	10	3	88.21
Scenario III	11	1	92.45
Scenario IV	10	1	89.65

시스템 운영시 서비스 제공률과 연간 운영이익을 동시에 고려할 때 90 이상의 서비스 제공률을 확보하고 연간 운영이익을 최대로 할 수 있는 경우는 시나리오 III의 차량대수는 11대, 충전기수는 1대 인 경우로 나타났다. 이는 충전기수 결정시 서비스 제공률을 일정수준 이상으로 확보할 수 있는 수준에서 최소의 충전기를 설치하는 것이 운영이익을 최대화할 수 있다는 것을 보여준다.

3) 최적 차량대수와 충전기수

서비스 제공률을 높이고 운영수익을 높이기 위해서는 사용가능한 차량대수를 최대한 확보하고 이를 위한 충전기수를 확보해야 한다. 그러나 이 경우 차량 및 충전기 구매비용과 유지 보수비용은 증가함에 따라 총 수익에서 비용을 제외한 총 운영이익을 낮아질 수 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션 분석을 통해 일정 수준 이상의 서비스제공율을 보장하면서 운영이익을 최대화할 수 있는 서비스지점당 차량대수와 충전기수를 도출하였다. 분석 결과 최대 운영 이익은 급속충전기를 이용하고 미완충 차량도 제반 조건에 따라 사용할 수 있는 시나리오 IV에서 발생하며 차량 대수가 10대일 경우 최대인 것으로 나타났다. 이외 시나리오하에서도 운영이익을 최대화하는 차량대수는 10대 또는 11대 인 것으로 나타났다. 한편, 운영이익을 최대화하는 충전기 수는 완속 충전일 경우에는 3대, 급속 충전일 경우에는 1대로 나타났다.

따라서 최대 운영이익을 거둘 수 있는 지점당 차량대수와 충전기수는 급속충전기 사용과 미완충 차량 이용이 가능하다는 전제하에 각각 10대와 1기로 제시할 수 있다. 이 경우 서비스 제공율은 89.65로 나타났다.

다른 경우로 일정 수준 이상의 서비스제공율을 요구할 경우 최대 운영이익을 거둘 수 있는 차량대수와 충전기수를 도출하였다. 만약 95 이상 서비스 제공율을 전제로 할 경우 최대 운영이익은 차량대수가 12대, 충전기수가 1대인 경우 발생한다. 이 결과를 정리하면 다음 Table 4와 같다.

Table 4. The Best Scenarios with Maximum Net Benefit

	Case I	Case II
Description	Max.Net Benefit No service satisfaction restriction	Max. Net Benefit with more than 95 service satisfaction
Operating condition	Scenario IV	Scenario IV
Number of cars	10	12
Number of chargers	1	1
Service satisfaction rate	89.7	95.1

Table 4에서 보듯이 서비스 제공율이 80~90수준일 때, 연간 운영이익이 최대값을 가지는 것으로 나타났다. 하지만 서비스 제공율이 지나치게 낮을 경우 이용자들의 불만이 제기되고 장기적인 이용률 및 수익성 저하로 이어질 수 있기 때문에 단순히 연간 운영이익이 최대가 되는 차량대수 및 충전기수를 결정하기 보다는 적절한 서비스 제공수준 목표를 설정하고 해당 수준 이상의 서비스를 제공하면서 연간 운영이익을 최대로 하는 것이 더욱 합리적인 의사결정 방안으로 생각된다. 따라서 Table

4의 사례 II와 같이 최소 서비스 제공수준을 95로 설정하는 경우가 적정 인프라 규모가 될 수 있으며, 이 때 최대 운영이익만을 고려한 사례 I과의 운영이익 차이는 3.5에 불과한 것으로 나타났다. 따라서 최소 서비스 제공수준을 고려한 사례 II의 선택이 장기적인 운영 수익의 관점에서는 더욱 타당한 것으로 생각된다.

5. 결론

전기차 카셰어링은 친환경차량인 전기차를 여러 사용자가 함께 이용함으로써 교통부문의 온실가스 발생량을 감소시키고, 동시에 자가용 증가로 인한 공간 및 환경문제를 해결할 수 있는 방안으로 주목받고 있다. 그러나 아직 도입단계에 불과하기 때문에 전기차 카셰어링 시스템의 효율성이나 사업가능성에 대한 연구나 분석이 필요한 실정이다.

이러한 배경하에 본 연구에서는 전기차 카셰어링 시스템의 운영상태와 결과를 분석이 가능한 모형을 개발하였으며, 현재 실시되고 있는 시범사업 내용을 반영하여 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 사업지점별 차량대수와 충전기수를 변수로 사용자 측면의 성과지표로는 서비스제공율과 운영자 측면에서는 운영이익을 분석하였다.

먼저 지점별 배치차량대수가 많을수록 서비스 제공율은 증가하였지만 운영이익은 증가하다가 감소하는 결과를 나타냈다. 또한 서비스제공율은 점차 증가하다가 일정 수준에 도달하면 증가폭이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 적정수준의 서비스 제공율을 유지하면서 최대 운영이익을 보장하기 위해서는 최적 차량대수 산정이 필요하며 본 연구 결과는 지점당 약 10대~12대 수준으로 나타났다.

다음으로 지점별 충전기수를 변수로 서비스 제공율과 운영이익 변화를 분석한 결과, 충전기수 증가에 따른 서비스제공율의 개선효과는 크지 않았으나 운영이익의 변화는 크게 나타났다. 최적차량대수로 산정된 10대~12대 수준에서는 급속충전기 1기를 유지하는 것이 최고 운영이익을 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

또한 미완충차량을 서비스에 배치하는지 여부에 대해서는 운영이익과 서비스제공율의 차이가 존재했다. 특히 이러한 전략은 완속 충전기를 이용하는 시나리오하에서 더욱 그 결과의 차이가 두드러졌다. 급속충전기를 이용하는 경우 버퍼시간 동안 대부분 차량들이 완충이 가능하기 때문에 결과의 차이는 미비했다.

이러한 결과에서 보듯이 일정한 수요패턴을 가정했을

때 수익을 극대화할 수 있는 인프라 용량이나 서비스 전략이 존재한다. 따라서 수요자, 운영자 모두에게 성공적인 시스템이 되기 위해서는 최적 인프라 도출을 위한 사전 연구가 필요하다.

본 연구는 최적 인프라 용량 도출을 목표로 이외 제반 조건들은 실제 사업내용이나 일반적인 가정하에 분석을 실시하였다. 그러나 본 연구에서 개발된 모형은 단순히 카셰어링 인프라 최적화뿐만 아니라 적정 수요 결정을 위한 회원수 결정, 예약 및 취소 전략, 서비스 이용요금 결정 등 다양한 운영전략에 대한 최적방안 분석이 가능하다. 또한 전기차와 관련해서는 전기차 카셰어링 시스템으로 발생하는 전력수요의 시공간분포, 적절한 충전전략 등의 분석이 가능하다.

앞으로 실제 사업들을 통해 현장의 자료들이 도출되면 본 연구에서 가정한 수요패턴 등 제반 조건들이 보다 현실화되고 시뮬레이션 결과의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

References

- Cepolina, E. and A. Farina (2012) "A New Shared Vehicle System for Urban Areas", *Transportation Research, Part C*, 21, 230-243.
- Correia, G. and A. Antunes (2012) "Optimization Approach to Depot Location and Trip Selection in One-way Carsharing Systems", *Transportation Research, Part E*, 48, 233-247.
- Farkas, C. and L. Prikler (2012) "Stochastic Modelling of EV Charging at Charging Stations, International Conference on Renewable Energies and Power Quality", *Santiago de Compostela, Spain*.
- Fedorcakova, M., J. Sebo and A. Petrikova (2012) "Innovative Application of Inventory Theory for Determining Optimal Fleet Size for a Car-sharing System", *10th IEEE Jubilee International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, 157-160.
- Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (2011) "Development and Pilot test of EV-sharing business model", *Proposal of Industrial Strategic Technology Development Program(10041071)*, Korean Ministry of Knowledge Economy
- Lu, Jun-Li and Mi-Yen Yeh (2012) "Operating Electric Taxi Fleets: A New Dispatching Strategy with Charging Plans", *Electric Vehicle Conference(IEVC)*, 2012 IEEE International.
- Nair, R. and E. Miller-Hooks (2011) "Fleet Management for Vehicle Sharing Operations", *Transportation Science*, 45(4), 524-540.
- Seo, Y.W. (2012) "Integrated Model of Inventory and Waiting Time in EV Battery Switching Stations", *Journal of Korea Operations Research and Management Science Society*, 37(4), 51-65.
- (서용원 (2012) "배터리 교체식 전기차의 배터리 재고-차량 대기시간 통합모형", *한국경영과학회지*, 37(4), 51-65).
- Shaheen, S. (2012) "Understanding from Shared-Use Mobility Research", *2012 CarSharing Association Annual Conference*.
- Yudai, H. and K. Osamu (2009) "A Safety Stock Problem in Battery Switch Stations for Electric Vehicles", *The Eighth International Symposium on Operations Research and Its Applications*, 332-339.

Table A1. Simulation Results under Scenario I

Unit: %, Million KRW

# of chargers \ # of cars		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Service Satisfaction Rate	14	26	34	41	45	47	48	49	49	49	49	48	49	49	48	49	49	49	49	49
	Annual Net Benefit	26	45	56	63	65	63	55	50	42	33	26	19	10	2	-5	-14	-22	-29	-38	-46
2	Service Satisfaction Rate	14	27	38	47	55	62	68	73	78	82	85	88	90	90	91	92	93	93	94	95
	Annual Net Benefit	23	44	62	75	87	94	100	105	107	109	106	105	102	97	91	86	79	70	63	57
3	Service Satisfaction Rate	14	26	38	48	56	64	70	76	81	86	90	93	95	97	98	99	99	99	100	100
	Annual Net Benefit	21	42	60	75	87	94	101	109	112	115	115	114	112	109	103	97	90	86	77	66
4	Service Satisfaction Rate	14	26	38	48	57	64	70	77	82	86	90	93	95	97	98	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	18	39	58	73	85	94	103	106	110	115	114	115	111	106	101	96	90	80	73	65
5	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	57	64	70	76	81	87	91	93	95	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	16	37	56	71	82	92	99	105	108	111	112	112	109	106	99	92	85	78	71	61
6	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	56	64	71	76	82	86	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	13	35	53	68	79	90	96	103	107	108	108	108	105	104	95	90	83	75	69	59
7	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	56	64	71	77	82	86	90	93	96	97	98	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	11	32	50	65	78	85	94	99	103	107	107	107	104	98	95	86	80	70	66	58
8	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	56	64	70	76	82	86	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	8	30	48	63	74	84	91	96	102	103	106	104	101	100	94	85	81	71	64	55
9	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	57	64	71	76	82	87	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	6	27	46	61	72	81	89	97	99	101	104	103	98	93	90	82	77	69	60	53
10	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	56	64	71	77	82	86	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	4	25	43	58	70	80	86	94	97	100	101	99	97	92	87	79	76	65	58	50
11	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	57	64	70	76	82	86	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	1	22	41	55	68	78	84	91	93	98	98	98	93	91	85	79	68	63	57	49
12	Service Satisfaction Rate	14	26	38	48	57	64	70	77	82	86	90	94	95	97	98	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-1	20	38	54	66	76	82	88	93	94	94	95	92	86	82	77	67	61	54	46
13	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	57	63	71	77	82	86	90	93	96	97	99	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	-3	18	36	51	63	73	80	86	89	93	93	93	90	83	80	73	67	59	51	42
14	Service Satisfaction Rate	14	27	38	47	56	64	70	76	81	86	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	-6	16	34	49	60	69	78	83	88	91	90	90	86	83	80	72	62	58	50	41
15	Service Satisfaction Rate	14	26	38	48	57	64	71	77	82	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	-8	13	31	45	57	68	75	81	84	88	89	89	85	80	75	69	63	52	45	37
16	Service Satisfaction Rate	14	26	38	47	57	63	70	77	82	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	-10	11	29	44	56	66	73	79	81	86	85	86	81	81	74	69	59	51	48	36
17	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	56	64	70	77	82	87	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	-13	9	27	41	53	62	70	76	80	81	83	84	80	77	71	63	57	48	41	35
18	Service Satisfaction Rate	14	26	38	48	56	64	71	76	82	87	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	-15	6	24	39	52	62	68	74	78	80	82	80	77	74	68	60	55	44	41	31
19	Service Satisfaction Rate	14	27	38	48	57	64	70	76	82	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	-18	3	22	36	48	58	65	72	75	78	79	77	75	71	64	59	50	44	36	28
20	Service Satisfaction Rate	14	26	38	48	57	64	70	76	82	86	91	93	96	97	98	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	-21	1	20	34	45	56	62	68	73	76	77	75	73	69	63	55	50	43	35	28

Table A-2. Simulation Results under Scenario II

Unit: %, Million KRW

# of chargers \ # of cars		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Service Satisfaction Rate	15	28	40	49	55	61	65	66	67	68	68	68	68	68	69	68	69	68	69	69
	Annual Net Benefit	28	51	67	79	87	90	88	84	77	70	63	57	47	39	31	24	17	9	1	-9
2	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	66	72	78	83	87	90	92	94	95	96	97	97	97	98	97
	Annual Net Benefit	26	49	67	83	94	103	109	114	118	118	118	113	110	106	99	93	86	78	69	63
3	Service Satisfaction Rate	16	29	41	51	60	68	74	79	84	88	92	94	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	24	46	65	82	92	102	111	114	118	121	121	120	116	112	103	99	90	81	76	71
4	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	68	74	79	85	89	92	95	96	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	21	44	63	78	91	100	107	114	117	119	118	117	114	107	102	95	88	81	70	68
5	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	59	68	74	80	84	89	92	95	97	98	99	99	99	100	100	100
	Annual Net Benefit	19	42	61	77	89	97	105	112	115	117	115	114	112	105	99	92	89	80	70	63
6	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	80	84	88	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	16	39	59	75	86	96	102	108	113	113	114	111	108	106	97	92	84	76	66	60
7	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	80	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	14	37	57	71	83	94	100	105	109	110	110	111	106	101	94	90	80	73	64	58
8	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	79	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	11	34	54	69	81	91	98	105	109	109	109	107	103	99	92	84	78	71	63	58
9	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	79	84	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	9	32	51	67	79	89	95	102	105	106	106	105	101	98	91	85	77	70	61	52
10	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	68	74	80	84	88	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	6	29	49	65	75	86	93	99	100	104	105	103	101	91	89	82	74	66	58	51
11	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	73	80	84	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	4	28	47	62	76	84	91	96	98	101	102	98	95	92	88	79	74	62	55	49
12	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	80	85	88	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	2	25	45	60	72	80	90	93	97	99	99	99	95	89	81	79	69	61	54	44
13	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	59	67	74	79	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	0	23	42	58	69	78	85	93	96	97	95	95	92	86	80	72	69	58	51	44
14	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	80	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-3	20	39	56	69	76	83	88	93	93	95	91	88	83	76	72	64	56	50	38
15	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	68	74	80	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-5	18	37	53	64	74	82	86	88	92	92	90	86	81	75	71	58	55	45	38
16	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	80	84	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-8	15	35	50	62	71	80	84	88	92	90	91	85	79	73	69	60	53	44	36
17	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	80	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-10	13	32	48	59	70	77	82	85	88	87	83	82	76	71	63	58	51	42	33
18	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	68	73	80	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-13	10	30	46	58	66	74	81	83	85	85	82	80	74	68	64	55	47	39	35
19	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	67	74	79	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-15	8	28	43	56	66	72	78	81	82	84	81	76	71	65	62	49	46	37	32
20	Service Satisfaction Rate	15	29	41	51	60	68	74	80	85	89	93	94	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-17	6	25	41	53	63	68	76	79	79	81	78	77	70	64	55	50	40	36	29

Table A3. Simulation Results under Scenario III

Unit: %, Million KRW

# of chargers \ # of cars		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	60	68	74	81	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	29	53	74	89	102	111	119	124	127	127	129	126	121	118	110	101	96	86	83	72
2	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	74	80	86	90	93	95	97	98	99	100	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	26	50	71	86	100	109	116	122	125	126	126	122	120	111	105	98	95	85	77	71
3	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	81	85	90	93	95	97	98	99	100	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	24	48	68	84	97	106	114	118	123	123	123	120	118	112	106	99	93	81	75	66
4	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	80	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	22	46	66	82	96	104	112	114	119	121	120	118	113	110	104	94	89	80	75	62
5	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	68	75	80	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	20	44	64	79	92	103	110	114	116	118	118	114	114	108	101	94	85	78	70	60
6	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	60	68	75	81	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	17	41	62	77	90	97	104	109	114	119	116	114	109	106	98	92	84	75	67	59
7	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	68	75	81	85	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	15	39	59	74	87	97	103	111	112	114	114	112	107	103	95	88	82	75	66	62
8	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	68	75	81	85	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	12	36	57	72	85	95	102	105	110	112	111	108	105	99	93	88	78	70	63	53
9	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	60	68	75	81	85	90	93	95	97	98	99	100	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	10	34	54	70	83	92	99	105	107	108	110	106	102	98	92	84	77	69	59	54
10	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	81	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	8	32	52	69	81	90	97	100	105	105	105	105	99	94	89	81	75	64	59	53
11	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	80	85	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	5	29	49	65	78	87	95	100	103	102	102	101	97	93	85	80	70	66	57	49
12	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	61	68	75	80	85	89	93	95	97	98	99	100	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	3	26	46	63	76	85	93	98	100	102	102	96	94	92	86	76	70	62	53	47
13	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	80	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	0	25	44	61	74	83	90	94	96	99	100	96	93	89	80	75	65	59	51	43
14	Service Satisfaction Rate	16	29	41	52	61	68	75	81	85	90	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-2	22	41	57	71	80	88	93	97	99	97	93	92	83	80	73	62	57	52	43
15	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	61	69	75	81	86	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-5	20	39	56	68	77	86	91	93	96	95	93	87	82	78	70	61	58	47	40
16	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	68	75	80	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-7	17	37	54	65	75	83	88	91	91	90	88	86	79	76	68	59	53	45	35
17	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	81	85	90	93	95	97	98	99	100	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-9	15	34	51	63	74	78	86	86	90	88	90	81	77	71	63	57	53	42	37
18	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	81	85	90	93	95	97	98	99	100	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-12	12	33	48	61	71	77	83	84	88	87	83	79	76	69	63	54	49	39	32
19	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	80	85	90	93	95	97	99	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-14	10	30	45	60	67	77	80	84	84	83	83	77	74	67	59	52	45	37	27
20	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	81	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-16	7	28	44	56	65	73	75	82	83	82	78	77	71	65	58	51	43	34	28

Table A4. Simulation Results under Scenario IV

Unit: %, Million KRW

# of chargers \ # of cars		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	68	75	80	86	90	92	95	97	98	99	100	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	29	54	74	89	101	111	119	123	128	129	128	125	121	117	108	102	95	86	81	72
2	Service Satisfaction Rate	15	29	42	51	61	68	75	80	86	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	27	51	71	87	100	109	117	121	124	126	127	122	119	115	108	100	94	86	79	70
3	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	69	74	80	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	24	48	68	85	98	106	113	117	124	124	124	119	116	110	105	99	91	83	74	68
4	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	61	69	74	80	85	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	22	45	66	83	95	104	112	116	118	121	122	119	113	110	103	96	89	82	75	64
5	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	69	75	80	85	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	20	43	64	80	92	102	109	114	116	117	120	113	111	106	99	92	85	78	70	65
6	Service Satisfaction Rate	16	29	41	52	60	68	74	80	85	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	17	41	61	78	90	99	107	112	115	114	116	114	108	103	99	92	84	74	68	62
7	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	68	75	81	85	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	15	38	60	75	88	97	105	109	111	111	114	111	106	103	99	89	81	72	66	60
8	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	68	75	80	85	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	12	36	56	72	84	95	101	106	110	113	112	109	108	100	92	86	81	70	64	56
9	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	68	75	81	85	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	10	34	54	69	83	91	100	104	108	107	107	106	103	99	90	82	76	68	61	53
10	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	80	86	90	93	96	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	8	32	53	67	80	89	97	101	105	109	106	105	97	94	87	82	77	69	59	48
11	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	74	80	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	5	29	50	65	77	86	96	102	103	106	104	100	98	92	85	81	71	65	56	51
12	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	60	68	75	80	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	3	27	47	63	76	85	91	97	101	103	100	99	94	90	83	79	69	63	52	48
13	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	61	68	74	81	85	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	0	24	45	61	73	81	89	96	98	98	96	96	92	89	80	76	66	57	52	44
14	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	74	81	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-2	22	41	57	70	79	87	93	95	98	96	92	90	87	78	74	66	58	49	40
15	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	68	75	80	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-4	19	40	56	68	77	85	91	93	94	95	92	88	84	76	71	63	53	47	39
16	Service Satisfaction Rate	15	29	41	52	61	69	75	81	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-7	17	38	53	66	76	81	87	91	92	93	90	86	80	72	69	61	52	44	35
17	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	61	68	74	81	85	89	93	95	97	98	99	100	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-9	15	35	51	64	73	81	84	88	89	91	87	82	78	73	63	57	50	42	33
18	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	61	68	75	80	86	89	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-11	13	32	49	62	70	77	83	87	87	85	84	83	77	69	64	56	50	39	32
19	Service Satisfaction Rate	15	29	42	52	60	69	75	80	86	90	93	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-14	9	29	46	58	68	75	80	82	84	83	81	79	74	69	60	53	47	36	28
20	Service Satisfaction Rate	15	30	41	52	61	68	75	81	85	89	92	95	97	98	99	99	100	100	100	100
	Annual Net Benefit	-16	7	27	43	55	66	72	77	81	82	80	81	77	71	64	57	49	43	36	27



서 용 원 (seoyw@cau.ac.kr)

1994 서울대학교 산업공학 공학사
1996 서울대학교 산업공학 경영과학전공 공학석사
2001 서울대학교 산업공학 운영관리전공 공학박사
2001~2002 한국정보화진흥원 국가정보화센터(전자정부기술지원) 책임연구원
2003~2009 단국대학교 경영학부 조교수
2009~ 현재 중앙대학교 경영경제대학 경영학부 부교수

관심분야 : 공급사슬관리, 행동적운영관리, 기업생태계, 공공정보화 등