

친환경 버스 도입에 따른 경제성 분석에 관한 연구 (대구광역시 중심으로)

A Study on the Economic Analysis of Introducing Battery-Based Eco Bus: Case Study of Daegu City, South Korea

박 재 석* · 김 성 열** · 김 동 민†
 (Jae Seok Bak · Sung-Yul Kim · Dong-Min Kim)

Abstract - Renewable energy sources has drawn considerable attention as clean energy sources because of changing public attitudes regarding greenhouse gas and fine dust. Recently, in this respect, the government provides the drivers of electric vehicles with various benefits such as tax reduction, financial incentives and free parking from the public to the private sector. Plug-in electric vehicles are the most common in the private sector. Otherwise, different types of battery-based buses in the public sector are being developed, and there are three main types of charging: plug-in, battery swapping and wireless. Therefore, economic assessment of charging types in each bus route is required in order to facilitate the use of battery-based buses instead of the existing CNG buses. In this paper, net present value(NPV) and B/C ratio of charging types are evaluated in consideration of the bus schedule, the cost of charging station, and the life cycle of battery, etc. per each bus route. In case study, main bus routes in Daegu City are simulated with the proposed evaluation method to validate the eco-bus project.

Key Words : CNG bus, Electric vehicle, Plug-in, Battery swapping, Wireless charging, NPV, B/C ratio

1. 명명법

$B_{i,Y}$: 연간버스 운임요금에 따른 이익[원]
 BC_i^{CNG} : CNG버스 비용 편익비[%]
 BC_i^{EV} : EV버스 비용 편익비[%]
 C_y^{CNG} : CNG버스 초기비용[원]
 C_y^{EV} : 전기버스 초기비용[원]
 C_{vh}^{CNG} : CNG버스차량 비용[원]
 C_{vh}^{EV} : 전기버스차량 비용[원]
 C_I^{EV} : 전기버스 인프라 구축비용[원]
 $C_{i,Y}^{CNG}$: CNG버스 연간 운영비용[원]
 $C_{i,Y}^{EV}$: EV버스 연간 운영비용[원]
 $C_{F,Y}^{CNG}$: CNG버스 연료 단가[원/km]
 $C_{F,Y}^{EV}$: EV버스 연료 단가[원/km]

$C_{OM,Y}^{CNG}$: CNG버스 연간 유지비용[원]
 $C_{OM,Y}^{EV}$: EV버스 연간 유지비용[원]
 $C_{i,Y}^{CNG}$: CNG 연간 지출비용[원]
 $C_{i,Y}^{EV}$: EV 연간 지출비용[원]
 EV : Plug-In 충전방식 차량, Battery 교환방식 차량,
 Wireless 충전방식 차량
 e : 전기버스연비[km/kWh]
 i : 버스 노선
 NPV_i^{CNG} : CNG버스 순 현재가치[원]
 NPV_i^{EV} : EV버스 순 현재가치[원]
 $n_i^{P,W}$: 노선 플러그인과 무선 전기버스 수[대]
 n_i^{CNG} : 노선 CNG버스 수[대]
 n_i^{EV} : 노선 전기버스 수[대]
 n_i^{add} : 추가 차량[대]
 OBI_i : 최적의 운행노선
 P,W : 플러그인 충전 전기버스, 무선 충전 전기버스
 $P_{i,Y}$: 승객[수]
 Q^{EV} : 배터리용량[kWh]
 r : 할인율[%]
 S_i^{day} : 버스 1대 당 1일 운행거리[km]
 S_i^w : 버스노선의 편도거리[km]
 SOC : 배터리 충전 상태[%]

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
 Dongshin University, Korea.
 E-mail: dmkim@dsu.ac.kr
 * Dept. of Electrical and Electronic Convergence System
 Engineering, Keimyung University, Korea.
 ** Dept. of Electrical Energy Engineering, Keimyung University,
 Korea.
 Received : January 3, 2018; Accepted : January 29, 2018

- T_i^s : 버스노선의 정차시간[hr]
- $T_i^{h, EV}$: 전기버스 편도주행 시 충전시간[hr]
- T_i^d : 버스노선의 배차시간[hr]
- T_i^{day} : 1일 버스 운행시간[hr]
- T_i^w : 버스 노선의 편도 운행시간[hr]
- T_i^f : 전기버스 충전으로 인해 지연시간[hr]
- V_i : 버스노선의 평균운행속도[km/hr]
- W_{cycle} : 배터리 수명 사이클[수]
- Y_{Bat}^{Life} : 배터리 수명 기간[년]
- Y : 기준년도부터 최종년도까지의 연차[년]
- y : 기준년도를 0으로 시작하는 년도[년]
- μ^{EV} : 충전시스템[kW]
- ρ_i^{EV} : 배터리용량에 따른 운행거리[km]
- γ^{CNG} : CNG버스 보조금[원]
- γ^{EV} : 전기버스 보조금[원]
- $\lambda_{i, Y}$: 버스 운임 요금[원]

2. 서 론

21세기 온실가스 증가로 지구 온난화 현상이 가속화되고 있다. 주요 선진 국가들은 2015년 11월 30일부터 프랑스 파리에서 열린 새 기후변화 체제 수립을 위한 최종 합의문인 파리협정을 최종 채택했다. 파리협정은 선진국만 온실가스 감축 의무가 있었던 1997년 교토의정서와 달리 195개 당사국 모두에게 구속력 있는 보편적인 첫 기후합의라는 점에 의미를 가진다. 파리협정은 산업화 이전과 대비하여 지구평균기온 상승을 1.5°C 이내로 제한을 목표로 하고 있으며 우리나라 수송 분야에서는 기존 운행 중인 CNG버스를 전기버스로 대체하여 온실가스의 주 원소인 탄소배출을 줄이는 방안을 제시하고 있다[1,2].

전기버스는 세계적으로는 중국이 7만 대 이상의 전기버스를 보급하여 가장 많은 전기버스를 보유하고 있고 미국은 캘리포니아 주를 중심으로 소량의 전기버스를 보유하고 있지만 점차 차량 수가 증가할 계획이다. 일본은 공공교통 그린화 촉진사업으로 인해 정부에서 전기버스 도입을 적극 지원하고 있다. 이에 우리나라도 국책사업을 통한 수도권 지역 및 제주도를 비롯하여 여러 지방자치단체에서 전기버스 보급 확대를 추진하고 있다.

현재 전기버스의 보급 활성화를 위해 연구개발이 지속적으로 이루어지고 있으며 기존 연구 개발은 가상의 노선을 선택하여 거리에 따라 플러그인 충전방식과 배터리교환방식을 CNG버스와 비교하여 경제성 평가를 진행하였다. 하지만 본 논문에서는 실제 대구사례를 중심으로 노선을 선정하여 거리와 배차시간 및 배터리 수명을 고려하여 현재 개발 된 전기버스 3가지 충전방식(플러그인 충전방식, 배터리 교환방식, 무선 충전방식)을 CNG버스와 비교하여 경제성 평가를 시행할 것이다. 또한, 경제성 평가를 통해 전기버스 도입 시 노선에 따라 최적의 충전방식을 택하는 것이 본 논문에서 중요 과제이다.

경제적 평가 방법에서는 NPV(순 현재가치)와 B/C(비용편익비)방법이 있다. 현재 운영되고 있는 버스노선에 경제적 이익이 보장되는지 확인 절차를 시행한다.

따라서 본 논문에서는 거리에 따라 배차시간 및 배터리 수명을 고려하여 기존 CNG버스에 비해 전기버스가 경제적 타당성을 입증하고 대구광역시 사례를 기준으로 노선에서의 최적 충전방식을 채택하고자 한다.

3. 전기버스 충전방식별 특성

3.1 플러그인 충전방식의 전기버스

플러그인 충전방식의 전기버스는 현재 전기자동차 분야에 광범위하게 사용하는 방식으로 수도권 및 소수 지역에 전기버스 보급이 되어 운행 중이다. 전기버스 운행방법에는 각 인프라 충전기에 플러그를 연결하여 전력을 공급한다.

현재 우리나라 충전전압에서는 220V전압을 기준으로 충전하고 있다. 이에 충전하는 배터리사양과 충전시스템 용량에 따라 충전시간이 결정된다. 예를 들면 왕복 80km거리에서 100kWh 배터리를 200kW 충전시스템으로 완전충전을 한다면 충전시간은 대략 35분정도 소요가 된다. 따라서 버스운행에서 지연시간이 발생하여 배차시간에 영향을 받게 된다. 이에 CNG버스와 비교하여 배차시간에서는 추가차량의 필요성을 제시한다. 또한 전기버스는 배터리 수명이 차량의 본체 수명보다 짧아 배터리에서 수명을 고려한 교체가 일어난다.

플러그인 충전방식의 충전시설은 기점, 종점 등 버스 노선의 일부 노선에 구축이 된다.

3.2 배터리 교환방식의 전기버스

배터리 교환방식의 전기버스는 BSS(Battery Swapping Station)에서 220V 전압으로 경 부하시간대에 배터리를 충전하고 전기버스 운영시간에 배터리를 사용하므로 전력수급에 안정화를 도모할 수 있다. 이에 전기버스 도입 시 전력계통의 안정성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 현재 포항 시와 제주도에 전기버스가 보급되어 운행 중이며 차츰 보급이 확산될 전망이다. 전기버스 운행방법에는 차량상부에 배터리를 장착하고 이후 BSS(Battery Swapping Station)에서 자동화 기계를 사용하여 배터리 교체하는 방식이다. 배터리에 저장된 용량을 활용하여 모터를 가동시키므로 전기버스 운행 시 배기가스가 발생되지 않는다. 따라서 온실가스에 영향을 받지 않는다.

BSS에서 50kWh 배터리 2개를 기준으로 급속충전을 하면 시간상에는 35분정도 소요되고 완속충전에는 480분정도 소요가 된다. 하지만 BSS 내부에 배터리가 보통 12개 이상 존재하므로 BSS에서 배터리 교환에 따른 시간만 고려하면 된다. 배터리 교환에 따른 시간은 평균 40초정도 소요된다. 이에 CNG버스와 같이 충전에 따른 지연시간이 발생하지 않으므로 현재 운영되고 있는 노선에 바로 적용하여 운행할 수 있다.

배터리 교환방식의 충전 시설은 기점, 종점, 교차로 등 버스 노선의 일부 노선에 구축이 된다.

3.3 무선 충전방식의 전기버스

무선 충전방식의 전기버스는 도로하부에 매설된 전선에서 발생하는 자기장을 차량하부에 장착된 집전장치를 통해 전기에너지로 변화하여 이를 동력으로 배터리 충전 및 차량을 구동하는 전기버스이다. 핵심기술은 자기공진 및 형상화기술(Shaped Magnetic Field in Resonance: SMFIR)이 있다. 자기공진 및 형상화기술은 코일 간 자기공진현상을 이용해 충전하는 방식으로 충전시설 약 1m 이내에서도 충전이 가능하고, 코일 간 정렬 자유도가 높기 때문에 한 번에 여러 차량 충전하는데 용이하다[4]. 현재에는 구미와 세종에서 무선 충전방식의 전기버스가 운행되고 있으며 충전시설 및 버스차량에서 기술적인 문제로 잦은 고장이 발생하고 있다. 따라서 상용화 작업에서는 다소 어려움을 겪고 있다.

무선 충전방식의 전기버스에서 위 플러그인 버스와 같은 조건일 경우에 급속충전을 한다면 충전시간은 대략 35분정도 소요가 된다. 따라서 버스운행에서 지연시간이 발생하여 배차시간에 영향을 받게 된다. 이에 CNG버스와 비교하여 배차시간에서는 추가 차량의 필요성을 제시한다.

무선 충전방식의 충전시설은 기점, 종점, 교차로 등 버스노선의 일부 노선에 구축이 된다.

4. 친환경 전기버스의 경제성 분석

친환경 전기버스 도입에 대한 타당성을 입증하기 위해 현재 운행되고 있는 CNG버스와 전기버스간의 연관편익과 초기투자비용 및 연간지출비용을 비교하여 버스 간에 경제성 분석을 실시한다. 따라서 전기버스에서 편익지점이 발생하는 시점을 보고 전기버스 도입에 따른 경제적 타당성을 제시한다.

4.1 버스 배차간격을 고려한 정차시간

현재 운행 중인 CNG 버스에서 전기버스 도입 시 배차시간(T_i^d)과 정차시간(T_i^s)을 동일한 시간으로 간주하고 차량 대수와 운행거리 및 평균속도는 변수로 작용한다. 정차시간은 기점과 종점에서의 머무르는 시간을 의미하고, 배차시간은 노선마다 버스 사이의 간격시간을 의미한다. 통상적으로 승객들에 의한 배차지연과 버스 정류장에서 휴식으로 인한 정차지연시간으로 동일한 시간이 아닐 수 있다. 하지만 비교적 차이가 미세하여 본 논문에서는 동일한 시간으로 간주하고 연구를 진행하였다.

위의 조건을 이용하여 정차시간에 관한 식을 연구하였고, 식 (1), (2)은 다음과 같이 나타낸다.

$$T_i^s = (n_i^{CNG} T_i^d - \frac{2S_i^w}{V_i}) / 2 \quad (1)$$

$$T_i^s = (n_i^{EV} T_i^d - \frac{2S_i^w}{V_i} - 2T_i^d) / 2 \quad (2)$$

위의 식은 전기버스와 CNG버스에 대한 정차시간을 구하는 식으로써 두 버스의 동일한 정차시간을 유지하기 위해 전기버스의 정차시간은 전기버스 충전으로 인한 지연시간을 차감한다. 따라서 정차시간은 전기버스에서 충전으로 인한 지연시간에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4.2 배차시간에 따른 전기버스 추가차량

전기버스의 경우에는 충전으로 인한 지연시간이 발생하는 경우가 있다. 이로 인해 배차시간이 증가하여 운영에 차질이 발생하게 된다. 이에 전기버스 추가차량이 요구된다. 아래 식은 배차시간에 따른 전기버스 추가차량에 관한 식을 나타낸다.

$$T_i^{b,EV} = \frac{S_i^w}{e \cdot \mu^{EV}} \quad (3)$$

$$T_i^d = T_i^{b,EV} - T_i^s \quad (4)$$

$$n_i^{P,W} = [(\frac{2S_i^w}{V_i} + 2T_i^s + 2T_i^d) / T_i^d] \quad (5)$$

$$n_i^{add} = n_i^{ev} - n_i^{CNG} \quad (6)$$

$$\text{제약조건: } n_i^{CNG} \geq [(\frac{2S_i^w}{V_i} + 2T_i^s) / T_i^d].$$

위와 같은 식 (3)은 전기버스 편도에 따른 에너지 소모량에서 측정하여 충전시스템의 전력량에 의해 시간에 따른 편도주행 시 충전시간을 나타내었고, 편도주행 충전시간을 버스 정차시간의 차를 구하면 전기버스 충전으로 인한 지연시간을 구할 수 있어 이는 식 (4)로 구할 수 있다. 또한 충전으로 인한 지연시간을 통해 전기버스 차량 식 (5)로 나타내고 CNG버스에 비해 전기버스의 추가 차량 식 (6)으로 구할 수 있다.

4.3 버스 1대당 일일 운행거리

버스 노선에 따라 일일 운행거리는 운행 빈도수에 따라 다르다. 이에 버스 1대당 일일 운행거리를 구하면 연간 운행거리를 알 수 있어 차량 당 운영되는 비용 산출을 구할 수 있다. 그러므로 버스 1대당 일일 운행거리에 관한 식 (7)은 다음과 같이 나타낸다.

$$S_i^{day} = (\frac{T_i^{day}}{T_i^w + T_i^s}) * S_i^w \quad (7)$$

노선에 따라 1대 당 버스의 운행거리는 일일 버스 운행시간을 편도 운행시간과 버스 정차시간의 합을 나눈 후 버스노선의 편도거리와 곱하여 계산하였다.

4.4 배터리 수명기간

배터리 수명기간은 온도와 SOC(state of charge)에 따라서 수명기간은 달라진다. SOC는 배터리의 사용가능한 용량을 의미하고 본 논문은 온도는 일정온도라고 가정하면, SOC Swing Range ($0 \leq SOC_{max} \leq 0.8$)에 따른 배터리 수명기간을 산출하는 방법은 아래 식 (8),(9)으로 나타낸다.

$$\rho_i^{EV} = (Q^{EV} \cdot SOC) \cdot e \quad (8)$$

$$Y_{Bat}^{Life} = \frac{\rho_i^{EV} \cdot W_{cycle}}{S_i^{day} \cdot 365} \quad (9)$$

제약조건: $0 \leq SOC_{max} \leq 0.8$

먼저, 배터리용량에 따른 운행거리는 배터리 용량에서 제약조건으로 세운 SOC Swing Range의 값에 전기버스 연비를 곱한다. 이와 같이 산출하는 식 (8)으로 나타내고, 이 때, SOC Swing Range에 따라 배터리 수명 사이클 수는 달라진다. 배터리 수명기간은 배터리 용량에 따른 운행거리에 배터리 수명 사이클 수를 곱하면 배터리 용량에서의 거리를 구할 수 있다. 이를 연간 운행거리로 나누면 총 배터리 수명기간을 알 수 있는 식 (9)로 나타낸다.

4.5 연간버스 운임 요금에 따른 이익

버스 운임 요금에 따른 이익은 운행 빈도수가 높을수록 승객 수가 많아 버스 운임 요금이 증가하여 운임 요금에 따른 이익이 발생한다.

$$B_{i,Y} = 365 \cdot P_{i,Y} \cdot \lambda_{i,Y} \quad (10)$$

위와 같은 식 (10)은 승객 수에 따라 버스 운임 요금을 곱하여 산출하고 연간 물가상승 및 승객 수에 따라 매년 운임 요금에 따른 수익이 달라진다.

4.6 연간버스 운영비용

연간버스 운영비용은 초기사업에서 인프라구축 및 차량비용이 발생하게 된다. 이 후 CNG버스와 전기버스는 연간버스 운영에 따른 차량 운영비, 인프라구축 운영비, 인건비 등 매년 간 물가상승을 고려하여 비용이 산정된다.

초기비용은 차량비용에 인프라구축비용을 합한 총 비용을 의미하고 CNG버스와 전기버스의 각 보조금 산정에 따라 초기버스 비용가격이 측정된다. 인프라 구축비용은 기존 CNG버스의 경우 초기시설이 구축되어 있어 비용이 발생하지 않는다. 하지만 전기버스의 경우에는 초기 인프라 구축을 설치해야 함으로 비용부분이 발생한다. 이와 같은 식 (11)와 (12)은 아래와 같이 나타낸다.

전기버스의 초기인프라 구축시설은 충전방식에 따라 비용적인 부분은 차이가 난다. 그러므로 전기버스 충전방식에 따라 비용 부분은 차이가 발생된다.

$$C_y^{CNG} = n_i^{CNG} (C_{vh}^{CNG} - \gamma^{CNG}) \quad (11)$$

$$C_y^{EV} = n_i^{EV} (C_{vh}^{EV} - \gamma^{EV}) + C_I^{EV} \quad (12)$$

$$C_{i,Y}^{CNG} = 365 \cdot S_i^{day} \cdot C_{F,Y}^{CNG} + C_{OM,Y}^{CNG} \quad (13)$$

$$C_{i,Y}^{EV} = 365 \cdot S_i^{day} \cdot C_{F,Y}^{EV} + C_{OM,Y}^{EV} \quad (14)$$

운영비용은 연간 운행거리에 각 차량의 운행원가를 곱하여 연간 운행비용을 구하고, 연간운영에서 필요한 차량에 대한 유지비용을 더하여 연간 운영비용을 산출한다. 이는 식 (13), (14)로 나타낸다.

4.7 최적의 전기버스 충전방식 결정에 따른 경제성 분석

경제성 분석에서는 NPV 토대로 연구를 진행하였으며 경제성이 발생하는 시점이 몇 년부터인지 확인하고 후후 사업에서 경제적 이점을 확인할 수 있다.

NPV(순 현재가)란 일정기간의 수입과 지출의 현금흐름의 차이를 할인율을 적용하여 현재시점으로 할인한 금액의 총 합계를 의미하며, NPV가 0보다 크거나 같으면 투자의 경제적 이익을 가진다. 식 (15), (16)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$NPV_i^{CNG} = \sum_{y=0}^Y \left(\frac{B_{i,Y}}{(1+r)^Y} - \frac{C_{i,Y}^{CNG}}{(1+r)^Y} \right) \quad (15)$$

$$NPV_i^{EV} = \sum_{y=0}^Y \left(\frac{B_{i,Y}}{(1+r)^Y} - \frac{C_{i,Y}^{EV}}{(1+r)^Y} \right) \quad (16)$$

연간버스 운임요금에 따른 이익은 동일노선에서 버스관계 없이 같고 지출부분에서 전기버스는 충전방식에 따라 비용적인 부분은 차이가 난다. 그러므로 3가지 충전방식을 나눠서 비용부분을 산정한다.

경제성 분석에서 0년도부터 Y년간 편익을 산출하면 0년도에는 초기비용만 발생한다는 것을 알 수 있다. 이 후 각 버스의 수명과 인프라 시설에 대한 유지비용을 운임요금에 따른 편익을 구하여 경제적 타당성을 입증할 수 있다.

지정된 노선에서 경제성 분석을 통해 기존 CNG버스보다 경제성이 입증되면 노선에서 전기버스 충전방식 중에서 가장 경제성이 나타나는 방식을 선정하여 최적의 전기버스 충전방식 도입 시스템을 구축하는 방법이다. 이와 같이 아래 식 (19)은 경제성 분석을 통해 노선에서 최적의 전기버스 충전방식을 선정한다.

$$NPV_i^{CNG} \leq NPV_i^{EV} \\ OBJ_i = (EV | \max(NPV_i^{EV}))_{VEV} \quad (19)$$

위와 같은 방식을 통해 노선 환경에 따라 경제적 이점이 달라진다. 전기버스 충전방식에 대한 경제성 평가가 노선마다 다를 수 있다. 예를 들면 노선에서 플러그인 충전방식이 배터리 교환방식보다 초기 인프라 설치비용이 저렴해서 경제성을 가질 수 있지만,

배차간격이 짧은 노선일 경우에는 플러그인 충전방식이 배차간격을 유지하기 위해 추가차량이 요구된다. 따라서 추가차량으로 인한 비용부담이 발생하여 배터리 교환방식이 상황에 따라 노선에서 더 좋은 경제성을 지닐 수도 있다. 또한, 중복된 여러 노선에서 배터리 교환방식의 인프라 구축 시 초기 인프라 구축에 대한 비용 부담이 줄어들어 경제성이 좋은 결과가 나타나게 된다. 그러므로 본 논문은 우리나라 지역에 전기버스 도입 시 각 노선마다 충전방식에 맞는 환경을 구축하기 위한 방법을 제시한다.

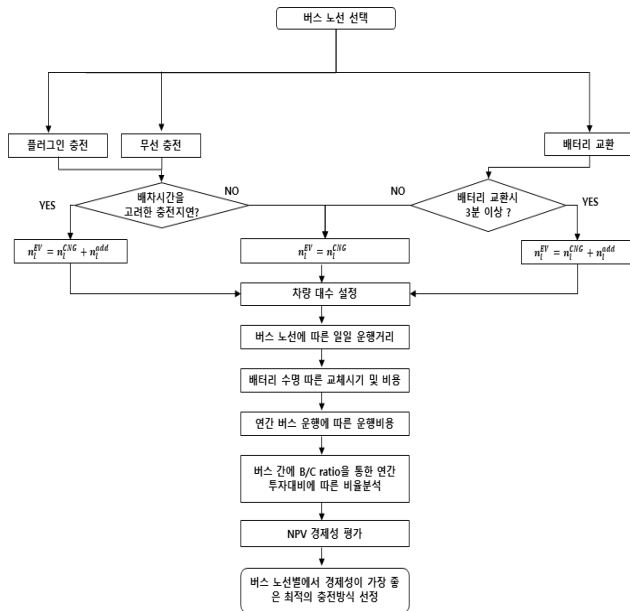


그림 1 버스노선별 충전방식 선정 알고리즘

Fig. 1 Algorithm for selecting an charging type of each bus route

5. 사례 연구

본 사례연구는 현재 대구광역시에서 운행되고 있는 노선을 지정하여 연구를 진행하였으며, 연구진행에 앞서 대구광역시 물가 상승률을 연 평균 5% 상승률과 인프라 유지관리 시 구축비용에서 연 평균 3%로 가정하고 한국개발연구원(KDI)에서 제시하는 할인율 5.5%를 토대로 경제성 분석 시 순 현재가치(NPV)에 대해 연구를 진행하였다.

그림 2는 노선 518번 노선 경로이고, 운행시간은 5:30~23:30 분이며, 기점(신흥버스)과 종점(하양종점) 양방향에서 버스가 출발한다고 가정한다. 노선 편도거리 40 km, 배차차량 대수 22대, 편도평균운행시간 108분, 정차시간 12분, 차량 1대 당 월 평균 승객 수 380,000명, 1명 당 평균운임 비용 1200원, 일일 운행거리 360 km, 평균운행 속도 20 km/hr을 기준으로 운행하고 있다. 전기버스 도입 시, 기점과 종점에 인프라 건설, 200 kW 충전시스템, 100 kWh 배터리기준으로 한다.



그림 2 대구 시내버스 노선518번 노선 경로

Fig. 2 Bus route 518 in Daegu city

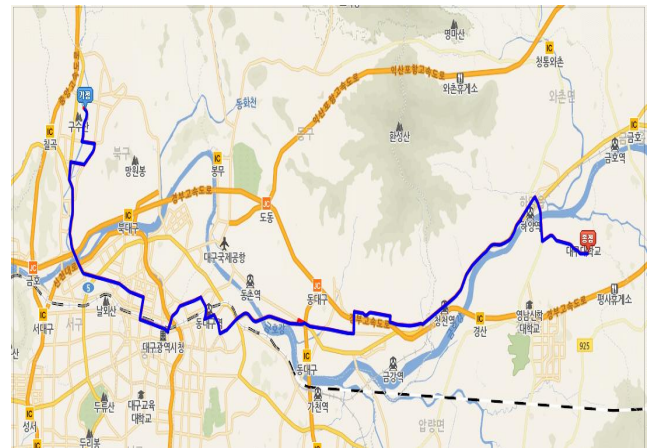


그림 3 대구 시내버스 노선708번 노선 경로

Fig. 3 Bus route 708 in Daegu city

그림 3은 노선 708번 노선 경로이고, 운행시간은 5:30~23:30 분이며, 기점(한양 산호아파트)과 종점(대구대학교) 양방향에서 버스가 출발한다고 가정한다. 노선 편도거리 42km, 배차차량 대수 13대, 편도평균운행시간 113분, 정차시간 23분, 차량 1대 당 월 평균 승객 수 200,000명, 1명 당 평균운임 비용 1200원, 일일 운행거리 335km, 평균운행 속도 20km/hr을 기준으로 운행하고 있다. 전기버스 도입 시, 기점과 종점에 인프라 건설, 200kW 충전시스템, 100kWh 배터리기준으로 한다.

5.1 연간버스 운임요금

연간버스 운임요금은 연간 평균 승객 수에서 1명 당 평균 운임 비용을 곱하여 연간버스의 운임요금을 산출한다. 이 때 대구광역시 물가 상승률에서 연 평균 5%를 고려하여 대구광역시의 운임 요금을 산출한다. 518노선에서 1년차 운임요금은 5,472백만

원이고 708노선에서 1년차 운임 요금은 2,880백만원으로 산정된다. 이 후 연도에서는 매년 연 평균 5% 상승률을 반영하여 대구광역시의 운임요금을 산정한다.

5.2 초기비용

초기비용에서는 차량비용에 대한 초기 인프라 구축비용의 합을 의미하고 차량비용에서는 정부 보조금을 지원 받아 구입하기 때문에 경제적 측면에서는 이점을 가진다. 특히, 전기버스의 차량비용은 가격대가 높아 차량 구입 시 보조금 없이 구입하기에는 쉽지 않다.

CNG버스의 인프라 구축에서는 설치된 상태이기에 차량비용만 고려하면 된다. 하지만 전기버스의 인프라 구축은 기존에 설치되어 있지 않아 인프라 구축설비와 차량비용의 합을 고려하여야 한다.

5.2.1 차량 구입비용

현재 전기버스 구입 시 차량비용과 보조금을 산정한 것으로 플러그인과 배터리 충전 전기버스는 H사에서 제공하는 자료를 이용하여 나타내었고, 무선 충전 전기버스는 O사에서 제공하는 자료를 이용하여 아래 표 1과 같이 나타내었다.

표 1 CNG버스와 전기버스 대당 차량비용 선정

Table 1 Cost selection of vehicles per CNG bus and electric bus base

(단위: 백만원)

구분	차량비용	보조금	차량 실 구입가
CNG버스	220	120	120
플러그인 전기버스	450	200	250
배터리교환 전기버스	450	200	250
무선충전 전기버스	480	200	280

표 1은 CNG버스와 전기버스 대당 차량비용을 선정한 것으로 버스 차량비용은 버스 차량의 원 가격을 의미하고 보조금은 국토부와 환경부에서 지원하는 금액을 산정하였다. 차량 실 구입가는 차량 원 가격을 산정된 보조금에 차감된 금액을 나타내고 있다. 이에 소비자 측면에서 실 구입가를 제공하고 있다[3,4].

표 2는 노선별 전체 차량비용을 나타내고 있으며 차량 실 구입가는 노선에서의 전체 버스 차량에 대한 금액에서 보조금이 포함된 금액을 의미한다.

지연시간에 따른 추가차량 비용은 버스 특성상 충전되는 시간이 다르다. 이에 정차시간에 영향을 받는 충전방식은 추가차량이 요구되는 것을 확인할 수 있다.

518노선에서 플러그인 충전방식과 무선 충전방식은 충전시간으로 인해 지연시간이 발생하여 추가차량 2대가 필요로 한다. 하지만, 배터리 교환방식은 지연시간이 발생하지 않아 추가차량이 필요 없다.

708노선에서는 충전시간에 따른 지연시간이 발생하지 않아 추

가차량이 필요 없다. 그러므로 CNG버스와 전기버스의 차량 수는 동일하다.

표 2 노선별 전체 차량비용

Table 2 Cost of all vehicles by route

(단위: 억원)

구분	구분	CNG	플러그인	배터리	무선
		충전방식	충전방식	교환방식	충전방식
518 노선	차량 실 구입가	26.4	55	55	61.6
	지연시간에 따른 추가차량 비용	-	5	-	5.6
	합 계	26.4	57.5	55	64.4
708 노선	차량 실 구입가	15.6	32.5	32.5	36.4
	충전으로 지연된 시간의 추가차량 비용	-	-	-	-
	합 계	15.6	32.5	32.5	36.4

5.2.2 인프라 구축비용

인프라 구축비용은 버스 충전방식에 따라 충전시설이 다르고 비용부분도 다르다. CNG버스의 경우에는 인프라 구축이 완료된 시점에서 인프라 유지관리 비용만 고려하는 반면에 전기버스의 경우에는 초기 인프라 구축비용과 인프라 유지관리 비용을 고려하여야 한다. 아래 표 3에서는 20년간 운영 시 각 버스 충전방식에 따라 충전시설 비용을 나타낸다.

표 3 노선별 전체 인프라 구축비용

Table 3 All infrastructure construction cost by route

구분	구분	CNG	플러그인	배터리	무선
		충전방식	충전방식	교환방식	충전방식
518 노선	충전시설	충전소	충전기	배터리 교환시설	무선 시스템
	충전시설 [수]	1	4	1	2
	배터리 구매[수량]	-	120	110	120
	교체주기(년)	-	3.4	3.4	3.4
	비용[억 원]	7	64.4	87	68
708 노선	충전시설 [수]	1	4	1	2
	배터리 구매[수량]	-	52	52	52
	교체주기(년)	-	4.1	4.1	4.1
	비용[억 원]	7	30.4	58	34

표 3은 각 노선에서의 인프라 구축비용을 의미한다. CNG버스의 충전소는 초기시설에서 구축되어 있지만, 15년 주기로 교체를 하여야 하므로 20년간 운영기준에서 1회 교체를 한다. 비용은 1개소 시설 교체 시 7억원(고정식 충전소)의 비용이 들어간다. 또

한 전기버스의 충전소에는 인프라 시설이 구축되지 않아 초기비용에 충전시설을 고려한다. 이에 플러그인 충전방식은 급속충전기로 사용을 권장하고 1개소 설치 시 1.1억원의 비용이 소요된다. 배터리 교환방식은 초기 인프라 구축을 하면 국토교통부에서 제공하는 자료를 통해 QCM2식(18.4억원), Smart e-Bus 배터리 6식(6억원), 버스 및 QCM관리시스템 1식(7.6억원) 등 총 32억원의 비용이 소요된다. 마지막으로 무선 충전방식은 0사에서 제공된 자료를 통해 5대 동시 충전시설 1개소 설치 시 4억원의 비용이 드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 배터리는 SOC에 따라 충·방전 사이클 횟수가 있다. SOC Swing Range에서는 $0 \leq SOC_{max} \leq 0.8$ 로 설정하면 사이클 횟수 8000이다. 따라서 배터리 수명에 대한 식을 이용하여 배터리에 대한 수명을 구하였으며 20년간 버스 운영 시 배터리 수명에 따른 교체 주기마다 비용이 발생하였다. 그러므로 배터리 구매수량과 충전시설에 따른 비용의 합계가 전체 인프라 구축에 대한 비용을 의미한다[4-6].

5.3 운영비용

운영비용은 연료비용, 엔진 오일비용, 타이어마모비용, 유지관리비용, 인건비용이 있다. 아래 표 4는 원단위로 환산한 금액을 나타내었으며 이를 바탕으로 연간 운영비용을 산출하였다.

표 4 운행거리에 따른 비용

Table 4 Cost due to travel distance

(단위: 원/km)

구 분	CNG 충전방식	플러그인 충전방식	배터리 교환방식	무선 충전방식
연료비용	497	143	143	143
엔진 오일비용	5.78	-	-	-
타이어 마모비용	3.64	3.64	3.64	3.64
유지 관리비용	20.25	7.64	7.64	7.64

표 4에서 차량운행비용 항목별 원단위는 산출결과 교통시설 투자평가지침 제6차 개정과 친환경 대중교통 도입에 따른 경제성 평가 (유형별 버스노선을 중심으로)에 자료를 기준으로 나타내었다[7,8]. 버스 간 노선에서 연간 운영을 실시하였을 때 버스 운행거리에 따라 금액이 산정되어 운영비용을 나타낼 수 있다. 위 표4에서 CNG버스는 엔진오일비용이 발생하지만 전기버스의 경우 엔진오일비용이 발생하지 않는다. 따라서 CNG버스와 전기버스의 연료비용과 유지관리비용에서 비교하면 대략 3배정도 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 위의 표 4를 기반으로 20년 동안에 경제성 분석을 실시하면 전기버스는 CNG버스에 비해 운영거리에 따른 경제적 순 이익이 발생한다.

표 5에서는 버스운영에 따른 인건비용을 나타낸다. 버스기사 인건비용은 대구광역시 시내버스 기준으로 평균 연봉을 의미하고 차량 1대당 2명의 버스기사가 배치되어 운영되고 있으며 충전시

설 인건비용은 안전 관리자 1명과 일반 관리자 1명이 배치되어 운영되고 있다. 따라서 버스노선에서의 운영되는 차량 수에 따라 버스기사 인건비용 부분이 증가하는 것을 알 수 있다.

표 5 인건비용

Table 5 Labor cost

(단위: 백만원)

구 분	CNG 충전방식	플러그인 충전방식	배터리 교환방식	무선 충전방식
노선 518				
버스기사 인건비용	1672	1824	1672	1824
충전시설 인건비용	65	65	65	65
노선 708				
구 분	CNG 충전방식	플러그인 충전방식	배터리 교환방식	무선 충전방식
버스기사 인건비용	988	988	988	988
충전시설 인건비용	65	65	65	65

표 5에서는 20년간 경제성 분석에 따른 인건비용을 나타내고 있다.

518노선에서 버스기사 인건비용은 CNG버스와 전기버스의 차량에 따라 금액이 산정된다. 대구광역시 버스기사 1명 평균인건비용은 3800만원이며 버스 1대에 2명씩 배치가 되어 산정된다. 이 때 518노선에서 플러그인과 무선 충전방식의 경우에는 충전으로 인한 지연시간이 발생하여 추가차량이 요구된다. 추가차량에 따라 버스기사에서도 추가인원이 필요하다. 이에 버스기사 인건비용이 추가적으로 발생하게 된다.

충전시설 인건비용에서는 안전관리자 1명은 4000만원, 일반관리자 1명은 2500만원으로 산정된다. 따라서 인건비용은 산정된 금액에 합계를 나타낸다.

708노선에서 버스기사 인건비용은 CNG버스와 전기버스의 차량에 따라 금액이 산정된다. 이 때 708노선에서는 충전시간으로 인해 지연시간이 발생하지 않아 버스기사 인건비용도 추가인원이 필요없다.

충전시설 인건비용에서는 안전관리자 1명은 4000만원, 일반관리자 1명은 2500만원으로 산정된다. 따라서 인건비용은 산정된 금액에 합계를 나타낸다.

5.4 경제성 분석

20년간 경제성 분석에 따른 NPV 결과는 표 6을 통해 알 수 있다.

표 6에서 NPV 분석결과 전기버스 충전방식은 CNG 충전방식에 비해 경제성이 높은 것으로 확인할 수 있었다. 그 중에서 플러그인 충전방식이 가장 NPV가 높은 걸로 확인이 되었으며 518노선에서는 추가차량으로 인해 배터리 교환방식이 무선 충전방식보다 NPV가 높은 것을 확인할 수 있었다. 하지만 708노선과 같

표 6 NPV(순 현재) 경제성 분석

Table 6 NPV (Net Present Value) Economic Analysis

(단위: 백만원)

구분	CNG 충전방식	플러그인 충전방식	배터리 교환방식	무선 충전방식
518노선 NPV	35,466	46,025	45,318	44,750
708노선 NPV	14,379	23,066	18,805	22,121

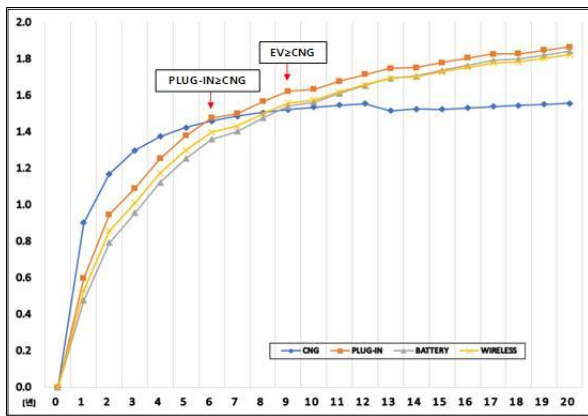


그림 4 노선 518 B/C비율 분석

Fig. 4 Bus route 518 B/C ratio analysis

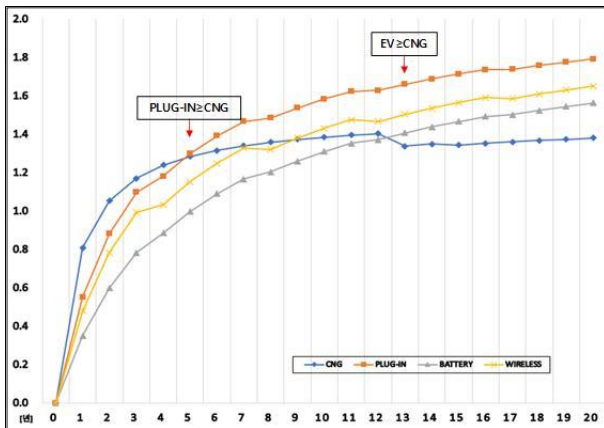


그림 5 노선 708 B/C비율 분석

Fig. 5 Bus route 708 B/C ratio analysis

이 추가차량이 요구되지 않은 노선에서는 배터리 교환방식은 다른 전기버스 충전방식에 비해 현재까지 경제성이 좋지 않은 것을 확인할 수 있었다.

이에 다음 그림 4와 그림 5에서 노선에서의 B/C비율을 통해 사업자 관점에서 투자대비에 따른 비율을 보고 이익이 발생하는 시점을 확인할 수 있었다.

그림 4에서 노선 518은 20년간 B/C ratio를 하면 CNG 충전 방식은 초기 인프라 구축비용이 발생하지 않아 차량비용만 고려하여 5년까지는 가장 좋은 B/C ratio를 나타내었다. 하지만 5년차부터 플러그인 충전방식이 CNG 충전방식보다 먼저 경제성을 나타내었고 9년차부터는 모든 전기버스 충전방식이 경제성을 나타낸다. 이에 전기버스에서 충전으로 인한 지연시간을 고려하여 차량이 추가되고 차량비용 및 인건비용이 증가하였음에도 불구하고 플러그인 충전방식이 가장 높은 경제성이 있다. 또한 CNG 충전방식은 버스 수명을 고려하여 13년차에 차량교체를 실시하고 15년차에서는 충전소가 15년 주기로 교체되어 비용이 발생하였다. 전기버스 충전방식은 3.4년의 주기로 배터리를 교체하여야 하므로 비용이 발생한다.

그림 5에서 노선 708은 20년간 B/C비율 분석을 CNG 충전 방식은 초기 인프라 구축비용이 발생하지 않아 차량비용만 고려하여 4년까지는 가장 좋은 B/C ratio를 나타내었다. 하지만 5년차부터 플러그인 충전방식이 CNG 충전방식보다 먼저 경제성을 나타내었고 13년차부터는 모든 전기버스 충전방식이 경제성을 나타낸다. 또한 정차시간이 다소 길어 충전으로 인한 지연시간이 발생되지 않았다. 이에 플러그인 충전방식에서 가장 높은 경제성을 나타내었다. 또한 CNG 충전방식은 버스 수명을 고려하여 13년차에 차량교체를 실시하고 15년차에서는 충전소가 15년 주기로 교체되어 비용이 발생하였다. 전기버스 충전방식은 4.1년의 주기로 배터리를 교체하여야 하므로 비용이 발생한다.

6. 결 론

지구 온난화로 인해 기온 상승을 대비하여 기존 운행되고 있는 CNG버스에서 전기버스로 대체하는 방안을 제시하였다. 현재 개발 된 전기버스는 3가지 충전방식 (플러그인 충전방식, 배터리 교환방식, 무선 충전방식)이 있으며, 지역 노선에서의 전기버스 도입에 따른 최적의 충전방식을 택하는 것이 본 논문에서의 핵심 과제이다. 이에 국내 대구광역시에서 운행되고 있는 노선을 선정하여 전기버스 도입 시 기존 CNG버스와 3가지 충전방식의 전기 버스를 20년간 운영에 따른 경제성 분석을 실시하였다. 이 때 경제성 분석에서 NPV와 B/C ratio를 통해 수익 발생시점을 확인하고 경제적 타당성을 입증하고자 연구를 진행하였다.

이에 본 논문에서는 대구광역시 버스노선 2곳을 선정하여 동일한 거리에서 배차간격을 달리 주어 경제성 평가를 진행하였다. 그 결과 CNG버스 충전방식에 비해 전기버스 충전방식이 경제적 타당성을 입증하였다. 이에 버스노선별에서 전기버스 충전방식 중에 추가차량이 요구되는 노선과 추가차량이 요구되지 않는 노선에서의 차별성을 확인하고 경제성이 높은 충전방식을 채택하는 것이 본 연구의 최종목표이다.

518노선에서는 전기버스 중 플러그인 충전방식이 가장 높은 경제성을 지니는 것이 확인되었다. 또한 초기비용은 높지만 배차 간격으로 인해 추가차량이 요구되어 배터리 교환 방식이 무선 충전방식보다 경제성이 높은 것을 확인하였고 518노선에서는 대체로 전기버스 충전방식들이 비슷한 경향의 경제적 이익이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

708노선에서도 전기버스 중 플러그인 충전방식이 가장 높은 경제성을 지니는 것이 확인되었다. 또한 708노선에서는 배차시간이 충전시간에 비해 다소 길어서 전기버스 충전에서는 지연시간이 발생되지 않아 추가차량이 요구되지 않는다. 따라서 무선 충전방식이 초기비용이 높은 배터리 교환방식보다 더 높은 경제성을 나타내었다. 이에 추가차량이 요구되지 않는 노선일 경우 배터리 교환방식은 다른 전기버스 충전방식들에 비해 경제성이 낮아 채택하지 않는 것이 바람직하다. 하지만 배차시간이 짧고 동일 정류장에 여러 노선의 대상으로 평가를 진행하면 배터리 교환방식은 다른 전기버스 충전방식들에 비해 인프라 구축비용이 상당히 절감되고 추가차량에 대한 부담이 없기 때문에 경제적으로 가장 좋은 평가를 얻을 수 있을 것이다.

저 자 소 개

박 재 석 (Jae Seok Bak)



2017년 계명대학교 전자공학과 졸업. 현재 계명대학교 전기전자융합시스템공학과 석사과정

Tel : 053-580-6486

E-mail : gogo4835@naver.com

김 성 열 (Sung-Yul Kim)



2007년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업, 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2012년~2013년 미국 Georgia Institute of Technology, PSCAL 연구원. 현재 계명대학교 전기에너지공학과 조교수.

Tel : 053-580-5251

E-mail : energy@kmu.ac.kr

김 동 민 (Dong-Min Kim)



2004년 한양대학교 전자전기공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2011년~2012년 한양대학교 BK21 사업단 박사 후 연구원. 2012년~현재 동신대학교 에너지융합대학 전기공학전공 조교수.

Tel : 061-330-3205

E-mail : dmkim@dsu.ac.kr

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R17XA05-47).

References

- [1] Se Hoon Park, "Climate change convention and terminology", Global Climate Change Situation Room 2016.
- [2] Se Hoon Park, "New Climate Change Framework Paris Agreement", 2016.
- [3] Young ang Kim, "2015 electric bus comes into real life.", November. 2014.
- [4] Jong Han Park, "Online electric car OLEV", March. 2016.
- [5] Korea Natural Gas Recharging Association, "Eco energy happy place", January. 2010.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Battery exchange electric bus", December. 2016.
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "The Sixth Amendment Guideline for Investment Evaluation of Transport Facilities", June. 2017.
- [8] Dong Geun Yuk And three others, "Economic evaluation based on the introduction of eco-friendly public transportation system (Focusing on bus route by types), pp. 377~389, April. 2017.