

## 도로운송부문용 에너지 공급 시스템 설계 및 경제성평가

한슬기 · 김지용<sup>†</sup>

인천대학교 에너지화학공학과  
406-772 인천광역시 연수구 아카데미로 119  
(2014년 7월 18일 접수, 2014년 12월 23일 수정본 접수, 2014년 12월 26일 채택)

### Scenario-based Design and Life Cycle Cost Analysis of Energy Supply System for Transportation Sector

Seulki Han and Jiyong Kim<sup>†</sup>

Department of Energy & Chemical Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Korea  
(Received 18 July 2014; Received in revised form 23 December 2014; accepted 26 December 2014)

#### 요 약

본 연구에서는 다양한 도로운송부문용 에너지 공급 시스템을 구축하고 각 시나리오의 최적 비용을 비교분석하였다. 에너지 공급 시스템의 구성요소로써 기존의 정유공정, 부생수소 시스템, 신재생 에너지 자원 기반의 전력 생산공정, 전력운송을 위한 전력망을 설정하였으며, 내연기관자동차, 전기자동차, 연료전지자동차 등 세 가지의 도로운송부문용 자동차를 포함하였다. 이러한 구성요소를 포함한 다양한 에너지 공급 시스템 시나리오를 기반으로 최적 생애주기비용을 규명할 수 있는 에너지 시스템 평가모델을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 최적화 모델을 제주도 지역에 적용함으로써 모델의 성능을 검증하였고 또한 제주도 지역의 에너지 시스템 구축에 관한 다양한 시나리오의 경제성을 분석하였다. 제주도 도로운송부문용 에너지 공급 시스템의 생애주기비용 분석 결과, 전력망을 이용하여 전기를 공급하는 전기자동차 시나리오가 상대적으로 가장 높은 경제성을 보였으며, 신재생 에너지를 이용하여 수소를 공급하는 연료전지자동차 시나리오가 가장 낮은 경제성을 보였다. 또한 연료비용, 차량비용, 인프라비용, 유지비용 등 주요 비용 관련 변수들에 관한 민감도분석을 수행함으로써 생애주기비용의 변화에 주요한 구성요소들을 규명하였다.

**Abstract** – This study aims to design energy supply systems from various energy sources for transportation sectors and comparatively analyze the life cycle cost of different scenario-based systems. For components of the proposed energy supply system, we consider a typical oil refinery, byproduct hydrogen system, renewable energy source (RES)-based electric generation system and existing electricity grid. We also include three types of vehicles in transportation sector such as internal combustion engine vehicle (ICEV), electric vehicle (EV), fuel cell vehicle (FCV). We then develop various energy supply scenarios which consist of such components and evaluate the economic performance of different systems from the viewpoint of life cycle cost. Finally we illustrate the applicability of the proposed framework by conducting the design problem of energy supply systems of Jeju, Korea. As the results of life cycle cost analysis, EV fueled by electricity from grid is the most economically feasible. In addition, we identify key parameters to contribute the total life cycle cost such as fuel cost, vehicle cost, infra cost and maintenance cost using sensitivity analysis.

Key words: Economic Evaluation, Life Cycle Cost, Renewable Energy, Hydrogen Production, Optimization

#### 1. 서 론

최근 화석연료 자원 고갈 및 이산화탄소(CO<sub>2</sub>; Carbon dioxide) 배출로 인한 지구 온난화 등의 에너지 관련 문제가 전세계적으로 크게

대두되고 있다. 세계 각국에서는 이러한 대책으로 신재생 에너지와 환경친화적 기술개발에 관심을 보이고 있으며, 실제로 많은 연구들이 수행 되어오고 있다. 특히 화석연료 기반의 자동차 배기가스로 인한 대기오염 및 온실가스 배출은 반드시 해결해야 될 과제 중 하나이다. 다양한 해결방안 중 친환경 자동차 개발에 주목하고 있으며, 특히 전기자동차(EV; Electric vehicle), 연료전지자동차(FCV; Fuel cell vehicle), 하이브리드 자동차(HEV; Hybrid electric vehicle), 플러그인 하이브리드 전기자동차(PHEV; Plug-in hybrid electric vehicle) 등 현재 화석연료 기반의 자동차를 대체할 다양한 자동차

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jykim77@incheon.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

관련 기술이 급격히 발전하고 있다[1,2].

미국 정부는 2012년 배터리와 친환경 자동차 기술 개발에 3억 3,000만 달러를 지원하는 등 EV를 비롯한 친환경 자동차를 개발하도록 지원을 강화하고 있다[3]. 즉, 2030년까지 화석원료기반 도로 운송부문용 자동차 연료량을 50%로 축소하고 2050년까지 80% 감축할 계획이다[4]. EU도 2012년에 EV 공해배출 억제, 연구예산지원, 도로안전, 전기이동성 등을 포함한 육성 계획 ‘CARS 2020 Action Plan’을 수립했다[3,5]. 중국은 2009년에 2012년까지 EV의 판매 점유율을 전체 자동차의 10%로 올린다는 ‘십성천량 프로젝트’를 세운 바 있다. 최근에는 2020년까지 500만대로 확대한다는 목표를 발표하였다[6]. 국내에서도 신기술 개발에 관한 연구 활성화, 시장 개척 및 확장을 위한 산업계의 투자 증대 및 지속 가능한 에너지 시스템 구축을 위한 정부의 정책 강화 등 다방면에서 적극적 노력을 하고 있다. 예를 들어 2012년부터 시행된 신재생 에너지 공급의무화 제도 등의 적극적인 유도 정책은 비단 기업의 설비투자뿐만 아니라 관련 기술 연구개발에 기여할 것으로 예상된다[3].

기술적 관점에서 EV는 에너지 저장장치와 자동차 동력장치로 각각 전기 배터리, 전기 모터를 사용하는 자동차를 일컫는다. EV는 저소음, 무 배연, 친환경성 그리고 높은 에너지 효율 등의 장점이 있다[7]. 연료전지의 수소변환 특성을 이용한 FCV 역시 가장 큰 장점은 친환경적인 특성과 높은 효율이다[8,9].

이러한 고효율 및 친환경성 미래형 자동차의 상용화를 위해 주요 선결 과제가 있다.

- 미래의 지속 가능한 에너지 시스템 구축 및 진보된 자동차의 장점(친환경성)의 극대화를 위해서는 에너지사용 단계에서의 친환경성뿐만 아니라 그 원료(전기, 수소) 등도 친환경적으로 생산 및 공급되어야 한다.

- 상기의 자동차의 보급과 활성화를 위해서는 관련 인프라(수소 스테이션, 전기충전소 등)가 필수적이며, 이러한 미래지향적 도로 운송부문 에너지 시스템 구축에 관련된 큰 사회적 비용이 요구된다[10].

따라서 새로운 에너지 공급 시스템의 효용성은 비단 종말 기술인 자동차 기술뿐만 아니라 자동차에 주입되는 연료의 생산 보급 등 에너지 관점에서의 생애주기에 큰 영향을 받는다. 예를 들어 도로운송 부문 에너지에서의 생애주기비용은 비단 자동차 가격뿐만 아니라 각 시스템에 필요한 연료(화석원료 기반 액체연료, 전기, 수소) 생산에 소요되는 자원 채취부터 연료 생산 및 공급 등에서 발생하는 모든 소요 비용을 포함한다[11].

도로운송부문 에너지의 생애주기비용 연구는 국내외에서 활발히 수행되고 있다. Karabasoglu와 Michalek는 HEV, PHEV, EV의 온실가스방출에 대한 생애주기분석을 다양한 운전조건과 다양한 시나리오를 가지고 연구하였다[12]. ICEV와 EV의 온실가스방출에 대한 생애주기 연구도 Ma 등에 의해서 이루어졌다[13]. Zhou, Ou와 Zhang은 EV의 온실가스방출과 에너지 소비에 관한 생애주기분석을 중국 에너지 시스템에 적용하였다[14]. 이 외에도 온실가스방출에 관한 유럽 등 많은 국가에서 환경적 측면에서의 생애주기분석을 시행하고 있다[15,16]. 온실가스방출 이외에도 일본의 EV에 대한 충전 인프라의 생애주기분석이 Nansai 등에 의해 연구되었다[17]. 이 연구는 충전장치의 생산, 운송, 설치를 고려하였다. Lucas, Silva와 Neto는 포르투갈의 EV와 ICEV의 에너지 공급 인프라의 생애주기 분석에 관한 연구를 하였다[18]. FCV의 생애주기 연구도 많이 이루

어졌다. Ekdunge와 Råberg는 FCV의 CO<sub>2</sub> 방출과 에너지 소비에 관해서 ICEV와 비교해서 생애주기분석을 하였다[19]. Zamel와 Li는 FCV와 ICEV의 에너지 리얼리티와 경제성 측면의 생애주기분석을 캐나다 지역에 관하여 수행하였다[20]. 여기서는 원료 생산, 자동차 제조 및 연료분배 등을 고려하였다. 또한 Zamel와 Li는 캐나다와 미국의 경우를 FCV의 생애 비용을 비교하는 연구를 시행하였다[21]. FCV의 연료인 수소 생산방법에 대한 생애주기분석으로 환경적 예산을 평가하는 연구가 Patterson 등에 의해 시행되었다[22]. 또한 FCV 전 생애주기에 걸쳐 발생하는 온실가스 배출량 분석을 통하여 기존 운송수단과 FCV 간의 환경적 측면에서의 효과를 비교 분석하는 연구도 수행되어 왔다[23,24].

앞선 문헌조사에서 보듯이, 기존의 연구는 각 국가 또는 지역별로 신재생 에너지 자원의 잠재량이 높은 특정 자원, 또는 전기 및 수소 등 국가 에너지 관련 정책에 부합하는 최종 에너지에 관한 분석에 중점을 두고 있다. 예를 들어 덴마크 등 북유럽의 경우, 풍력에너지 자원의 높은 잠재량을 기반으로 한 “풍력에너지-풍력터빈(Wind turbine)-전기-EV”의 에너지 경로에 따른 생애주기 분석, 중국의 경우 내륙 지방의 높은 태양광 에너지의 잠재량을 이용한 “태양광 모듈(PV; Photovoltaic)-전기-EV”의 경로 분석 등 독립적인 에너지 시스템에 관하여 분석을 수행하고 있다. 하지만 국가 또는 지역에 적합한 에너지 시스템은 다양한 자원 및 에너지 경로를 동시에 고려하여 비교 분석함으로써 규명되어야 한다. 즉, 주어진 지역에서 이용 가능한 다른 특징의 다양한 에너지 자원 및 에너지 경로에 동일한 평가 기준을 적용함으로써 그 지역에 적합한 최적 에너지 시스템을 규명하고 다른 대안들의 장애 요소 등을 비교 분석할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다른 종류의 에너지 자원 및 다른 타입의 미래자동차 등 다양한 에너지 공급 전략을 포함한 시나리오를 개발하고 각 시나리오에서의 최적 공급 전략을 규명하고자 한다. 또한 각 시나리오에 따른 최적 시스템을 비교 분석함에 따라 에너지 자원 및 기술 등의 장애요소 등을 규명한다. 즉 본 연구의 목표는 연료비용, 차량비용, 유지비용, 인프라비용 등 도로운송부문용 에너지 공급 시스템 구축에 소요 되는 생애 주기 비용의 최소화를 목적함수로 갖는 최적화 모델 개발 및 시나리오 비교 분석이다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 본 연구에서 고려한 에너지 공급 시스템을 소개하며, 3절에서는 구체적인 시나리오와 모델 및 요구되는 다양한 데이터를 설명하고, 4절에서는 적용 사례로써 제주도 에너지 시스템 최적화에 관한 문제의 해결방안을 모색한다. 5절에서는 4절의 적용 사례에 도출된 다양한 주요 변수에 관한 민감도 분석을 수행한다.

## 2. 시스템 개요

본 연구에서 고려한 에너지 공급 시스템의 개발도가 Fig. 1에 나타나있다. 본 시스템은 크게 에너지 자원과 에너지 생산 시스템, 에너지 저장 시스템 그리고 에너지 운전 시스템 등 세 가지 에너지 기술 시스템으로 구성된다. 에너지 자원으로써 기존의 원유를 포함하여 신재생 에너지, 전력망 등 세 가지의 자원을 포함한다. 각 에너지 자원은 각각 적합한 에너지 생산 시스템을 거쳐서 가솔린, 전기 및 수소 등으로 전환되며 이는 저장 시스템을 거쳐 최종 에너지 운전시스템으로 공급된다. Fig. 1은 또한 본 연구에서 고려하는 에너지 공급시스템의 전체 생애주기를 나타내고 있다. 즉 에너지 자원으로써

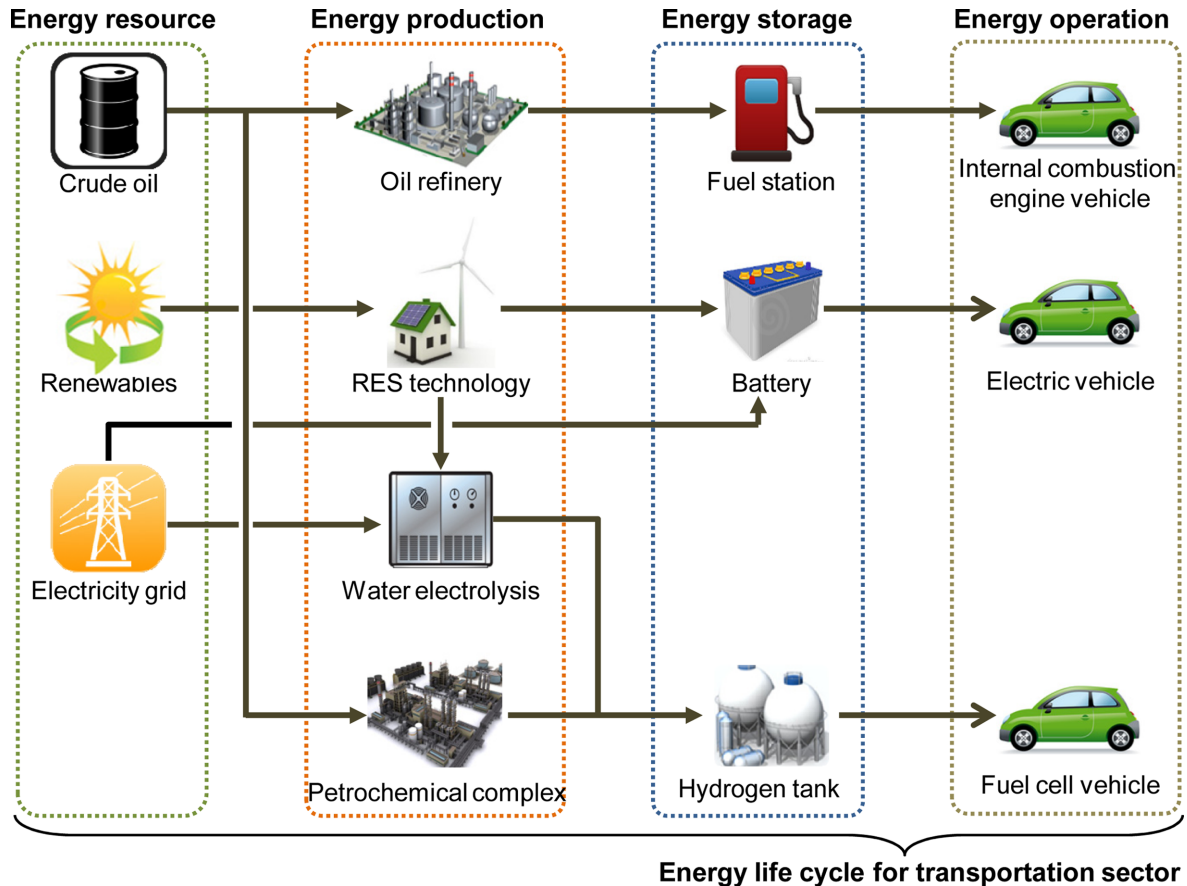


Fig. 1. Graphical representation of life cycle of energy supply system for transportation sector.

터 최종 에너지 소비까지 도로운송부문에 필요한 에너지의 전체 생애를 개괄적으로 묘사하고 있다.

Fig. 1에 포함되어 있는 주요 에너지 기술(생산 및 저장)은 현재 상용되고 있는 기술 또는 가까운 미래에 상용화 가능성이 높은 기술들로 선택되었다. 예를 들어 전기의 저장 시스템은 대용량 리튬-이온 배터리를 가정하였으며, 수소탱크 시스템은 압축수소탱크(Compressed hydrogen tank)를 가정하였다. 본 연구에서 가정된 각 기술들의 구체적인 기술적/경제적 사양은 3절에 자세히 설명하였다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 내연기관, 전기 및 연료전지 자동차 등 세 가지의 에너지 운전 시스템을 포함하였다. 특히 전기 및 연료전지 자동차의 경우, 기존의 화석연료 기반 시스템과 달리 신재생 에너지 자원만을 이용하여 구동될 수 있는 새로운 “신재생 에너지 기반 에너지 경로(Renewable energy source-based energy pathway)”를 포함하고 있다. 첫 번째, “신재생 에너지 기반 전기 에너지 경로”의 경우를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 전기자동차 구동에 필요한 전력 에너지는 PV 및 풍력터빈을 이용하여 생산되며 이는 직류/교류 컨버터(AC/DC Converter)를 거쳐 배터리에 저장된다. 이러한 전기 에너지 경로는 계절적, 시간적 및 지역적으로 자원 공급의 유동성이 높은 태양 복사열과 풍력 등의 에너지 자원의 높은 유연성 유지를 위한 에너지 공급 전략이다. 반면 “신재생 에너지 기반 수소 에너지 경로”를 Fig. 2(b)에 묘사하였다. 수소 에너지 경로는 PV, 풍력터빈, 전기분해공정, 수소탱크 등으로 구성된다. PV와

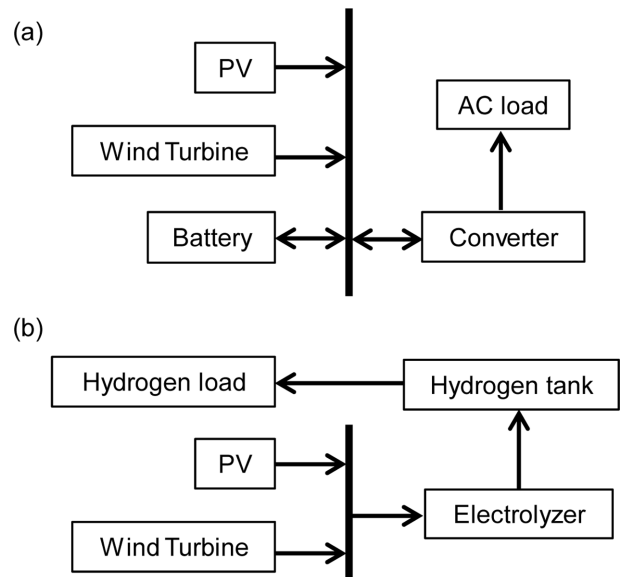


Fig. 2. Block diagram of RES-based energy supply pathway: (a) electricity pathway for fueling electric vehicle and (b) hydrogen pathway for fueling fuel cell vehicle.

풍력터빈을 통해서 만들어진 전력은 전기분해공정을 통해 수소를 생산하게 되며, 생산된 수소는 유연한 에너지 공급을 위하여 수소탱크에 저장되어 FCV에 공급된다.

### 3. 연구 방법

본 연구는 1) 에너지 공급 시스템 구축에 관한 다양한 시나리오 개발, 2) 에너지 자원 정보 및 관련기술의 기술적/경제적 데이터 수집, 3) 에너지 공급 시스템 모델링 및 최적화 등의 세부연구를 포함한다. 본 연구에서 제안한 분석 시스템은 한국 제주도의 실제 자원 데이터 및 에너지 요구량을 기반으로 수행된다. 제주도는 한국에서 신재생 에너지 자원의 잠재량(Potential)이 가장 높은 지역 중 하나로 태양고도가 연중 높아 태양의 순 복사량이 에너지 수지상 과잉이 시작되는 위도 대 이다. 또한 사면이 바다이므로 온난 습윤한 해양성이 강하여 일교차가 작고, 강한 바람이 자주 부는 특징이 있다[25]. 본 연구에서 제안한 모델은 비록 제주도라는 한정적 예제에 적용되었지만 이는 다양한 지역은 물론 한국 국가 단위의 에너지 시스템 구축에도 적용할 수 있음을 밝힌다.

#### 3-1. 에너지 시스템 구축 시나리오 개발

본 연구에서는 다양한 에너지 생산 시스템, 저장 시스템, 운전 시스템을 조합하여 여섯 가지의 에너지 공급 시나리오를 구성하였다(Table 1). 기본시스템으로써 ICEV에 필요한 에너지 공급을 위해 정유공정을 통한 가솔린 생산을 고려한다(Scenario #1 of Table 1). EV의 경우 전력 공급 시스템에 따라 두 가지의 시나리오로 나누어지며, 신재생 에너지 자원 기반의 자가발전 시스템(Scenario #2 of Table 1)과 전력망 시스템(Scenario #3 of Table 1)으로 구성된다. FCV의 경우, 신재생 에너지 자원 기반의 자가발전 시스템(Scenario #4 of Table 1), 전력망 시스템을 통해 생산되는 전력을 이용한 전기분해 시스템(Scenario #5 of Table 1) 및 부생수소를 이용하는 시스템(Scenario #6 of Table 1) 등 세 가지 시나리오를 구성하였다. 여섯 가지 시나리오의 특징과 차이점은 Table 1에 나타내었다.

#### 3-2. 최적화 모델 개발

본 연구에서 구성한 다양한 에너지 시스템을 설계하기 위하여 상용 S/W인 HOMER(Hybrid Optimization Model for Electronic Renewables)를 이용하여 모델링 및 최적화를 수행하였다[26]. HOMER는 에너지 시스템 최적화 S/W으로써 다양한 국가 및 지역 기반의 에너지 공급 시스템 설계 및 분석에 활용되고 있다[27-29]. 또한 각 시스템의 경제성을 평가하기 위하여 순 현재가치 분석(NPC; Net present cost) 기법을 이용하여 총 투자비용을 산출하였으며, 각 시나리오의 비교 분석을 위해 단위연료비용(COE; Cost of energy)을 이용하였다.

##### 3-2-1. 목적함수

각 시나리오의 생애주기 비용을 고려하기 위하여 목적함수(연간 생애주기 비용, LCC)는 각 시나리오의 연간 연료비용( $FC_i$ ), 연간 차

량비용( $VC_i$ ), 연간 시스템 인프라비용( $IC_i$ )과 연간 유지비용( $MC_i$ )의 합으로 표현된다.

$$LCC = FC_i + VC_i + IC_i + MC_i \quad (1)$$

##### 3-2-1-1. 연간 연료비용

각 시나리오의 연간 연료 비용( $FC_i$ )은 차량 연비(FE; Fuel efficiency)를 각 시나리오의 단위연료비용( $COE_i$ )에 곱한 값으로 표현된다. 각 시나리오의 단위연료비용( $COE_i$ )은 각 시나리오의 총 에너지 생산량( $TE_i$ )을 각 시나리오의 인프라비용( $IC_i$ )으로 나눈 값으로 아래와 같이 표현된다.

$$FC_i = FE_i \cdot COE_i \quad (2)$$

$$COE_i = \frac{TE_i}{IC_i} \quad (3)$$

##### 3-2-1-2. 연간 시스템 인프라 비용

연간 시스템 인프라 비용( $IC_i$ )은 각 시스템의 연간 투자 비용( $TCC_i$ )과 연간운전 비용( $TOC_i$ )의 합으로 표현된다. 연간 투자 비용( $TCC_i$ )은 초기 투자 비용( $CC_i$ )에 자본 회수 계수(CCF: Capital charge factor)를 곱해 연간 분할 상환 값으로 표현된다.

$$IC_i = TCC_i + TOC_i \quad (4)$$

$$TCC_i = CC_i \cdot CCF \quad (5)$$

$$CCF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (6)$$

여기서 Capital charge factor(CCF)는 돈의 시간적 가치를 고려하여 미래가치를 현재가치로 환산하는 식이며,  $r$ 은 이자율(interest rate),  $n$ 은 각 기술의 생애연수(lifetime)이다. 본 연구에서는 이자율을 15%으로 가정하였다.

##### 3-2-2. 제약조건

###### 3-2-2-1. 수요 만족(Demand satisfaction)

각 시나리오의 총 에너지 생산량( $TE_i$ )은 각 시나리오의 에너지 수요량( $D_i$ ) 보다 커야 한다.

$$TE_i \geq D_i \quad (7)$$

###### 3-2-2-2. 에너지 수지(Energy balance)

앞서 언급한 각 시나리오의 총 에너지 생산량은 풍력발전기에서 생산되는 전력량( $WTE_i$ )과 수소량( $WTH_i$ ), 태양광 모듈에서 생산되는 전력량( $PE_i$ )과 수소량( $PH_i$ ), 전력망에서 생산되는 전력량( $EGE_i$ )과 수소량( $EGH_i$ ) 그리고 부생수소량( $BPH_i$ )의 합으로 표현된다.

$$TE_i = WTE_i + PE_i + EGE_i + WTH_i + PH_i + EGH_i + BPH_i \quad (8)$$

Table 1. Summaries of scenarios for energy supply system\*

| Scenario | Vehicle | Fuel type          | Fuel production system | Resource         |
|----------|---------|--------------------|------------------------|------------------|
| 1        | ICEV    | Gasoline           | Refinery plant         | Petroleum        |
| 2        | EV      | Electricity        | PV, Wind turbine       | RES              |
| 3        |         | Electricity        | Grids                  |                  |
| 4        | FCV     | Hydrogen           | Water electrolyzer     | Power from RES   |
| 5        |         | Hydrogen           | Water electrolyzer     | Power from grids |
| 6        |         | Byproduct hydrogen | Petrochemical complex  | Petroleum        |

\*Abbreviation. ICEV: Internal combustion engine vehicle; EV: Electric vehicle; FCV: Fuel cell vehicle; RES: Renewable energy source

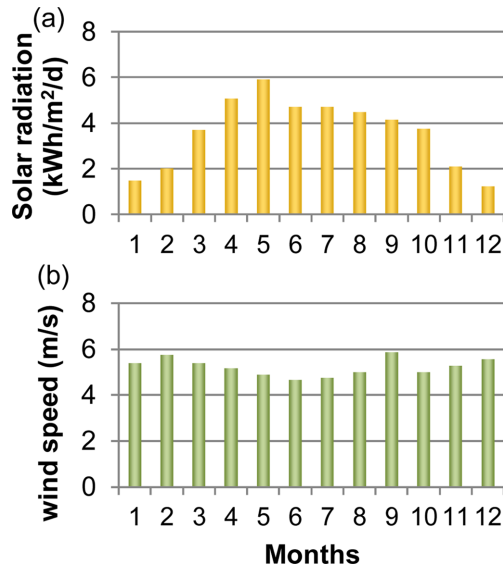


Fig. 3. Resource potential of Jeju: (a) monthly average of solar radiation and (b) monthly average of wind speed.

### 3-3. 에너지 자원 및 관련기술 분석

본 절에서는 에너지 공급 시스템 구축에 필요한 자원, 에너지 요구량 데이터 및 관련 기술들의 기술적, 경제적 데이터를 설명한다.

Fig. 3은 한국 기상청에서 제공하는 제주도의 월별 기상데이터를 보여준다[25]. (a)는 제주도의 월 평균 태양 복사열을 나타내며, (b)는 월 평균 풍속을 나타낸다. 태양 복사열의 경우 여름(4~7월)에 높게 나타나며 겨울(12~2월)에는 상대적으로 매우 낮다. 그에 반해 풍속은 여름(5~7월)에 낮으며 겨울(12~2월)에 상대적으로 높다. 연 평균 태양 복사열은 3.55 kWh/m²으로 측정되었으며, 연 평균 풍속은 5.22 m/s로 측정되었다.

각 운전 시스템(내연기관 자동차, 전기자동차 및 연료전지 자동차)의 연료인 가솔린, 전기, 수소의 도로운송부문 에너지 요구량은 각 자동

Table 2. Parameters used in demand calculation\*

|      | Fuel economy (km/kWh)** | Vehicle cost (\$) | Vehicle lifetime (year) | Maintenance cost (\$) |
|------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|
| ICEV | 1.15                    | 22,000            | 15                      | -                     |
| EV   | 0.17                    | 26,100            | 15                      | 6,250                 |
| FCV  | 2.41                    | 47,400            | 15                      | 7,465                 |

\*Abbreviation. ICEV: Internal combustion engine vehicle; EV: Electric vehicle; FCV: Fuel cell vehicle

\*\*The original unit of fuel economy of ICEV and FCV is 11.5 km/l and 80.5 km/kg respectively.

Table 4. Technical and economic data of components\*

| Component     | Size (kW) | Capital cost (\$) | Replacement cost (\$) | O&M cost (\$/year) | Lifetime (year) |
|---------------|-----------|-------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|
| PV            | 1         | 4,200             | 1,700                 | 20                 | 25              |
| Wind turbine  | 1         | 5,000             | 2,500                 | 100                | 20              |
| Battery       | 800       | 1,900             | 1,900                 | 38                 | 10              |
| Converter     | 1         | 500               | 450                   | 50                 | 10              |
| Electrolyzer  | 1         | 740               | 222                   | 37                 | 15              |
| Hydrogen tank | 1         | 900               | 600                   | 10                 | 25              |

\*Unit of battery size: Ah, Unit of hydrogen tank size: kg

Table 3. Statistics for demand estimation in transportation sector of Jeju

| Parameter            | Value         |
|----------------------|---------------|
| Number of vehicle    | 260,632 unit  |
| Number of households | 232,141 house |
| Average mileage      | 40.7 km/day   |

차의 연비와 하루 평균 주행거리를 이용하여 계산되며, 이에 사용된 파라미터는 Table 2에 보여진다[20,30-34]. ICEV, EV 및 FCV의 차량 연비 단위는 각각 가솔린 1리터 당 주행거리(km/l), 전력 1 kWh 당 주행거리(km/kWh) 및 수소 1 kg 당 주행거리(km/kg)이다. 세 가지 자동차에 관한 차량 연비의 원활한 비교를 위하여 연비의 단위를 전력 1 kWh 당 주행거리(km/kWh)로 통일시켰다. 이를 위해 가솔린 1리터를 전력 9.99 kWh와 같다고 가정하였으며, 수소 1 kg을 전력 33.3 kWh와 같다고 가정하였다. 뿐만 아니라 자동차의 평균수명을 15년이라 가정하였다. 이는 자동차 수명기간 동안의 평균 주행거리를 제주도 평균 주행거리로 나누어 계산한 값이다[35]. 유지비의 경우 타이어 교체비, 정기 점검비, 세차비 등 공통적으로 들어가는 비용을 제외한 EV의 배터리 교체비, FCV의 연료전지 교체비 등 특정 비용만을 고려하였다.

또한 제주도의 개인용 차량 등록 수와 제주도 세대 수 등의 데이터(Table 3)를 이용하여 제주도 지역의 한 가정 당 자동차수를 계산하였으며[36], 이러한 데이터를 기반으로 본 연구에서는 한 가정 당 EV 및 FCV한 대에 필요한 에너지 요구량은 각각 6.9 kWh/day, 0.51 kg/day로 가정하였다.

태양광 발전 PV 기술의 경우, 1 kW 당 초기비용은 \$4,200로 가정하였다. 대체비용은 60%까지 감소한다고 가정하였으며, 초기비용의 0.5%의 유지비용을 가정하였다[27-29,37]. 또한 전류 생산 시 발생하는 손실 보정 계수인 정격 저감계수(Derating factor)는 80%로 가정하였다. 정격 저감계수는 PV의 이론 출력 값에 대한 실제 출력 값의 비율로써 모듈의 표면에 쌓이는 눈이나 먼지, 온도 등의 영향을 포함한다[28].

1 kW 풍력터빈의 초기투자비용은 \$5,000로 가정하였다. 대체비와 유지비용은 각각 초기투자비용의 50%, 2%로 가정하였다[28]. 풍력터빈의 허브높이와 수명은 각각 25 m, 20년으로 가정하였다. 배터리의 초기투자비용과 대체비는 \$1,900로 동일하게 가정하였으며, 유지비용은 초기투자비용의 2%라고 가정하였다[28,29,38]. 또 컨버터의 초기투자비용과 대체비는 각각 \$500, \$450로 유지비용은 \$50/year로 가정하였다. 전기분해공정의 초기투자비용과 대체비는 각각 \$740, \$222로 가정하였으며, 유지비용은 \$37/year로 가정하였다[37]. 수소탱크는 초기투자비용, 대체비, 유지비용을 각각 \$900, \$600, \$10/year로 가정하였다[39]. 각 기술 별 비용관련 변수를 Table 4에 간략히 나열하였다.

#### 4. 최적화 결과

본 연구에서 개발한 시나리오와 다양한 에너지 자원 데이터, 관련 기술들의 기술적/경제적 데이터들을 HOMER를 이용하여 실제 제주도 모델에 적용하였다. 4.1절에서는 각 자동차에 사용되는 COE를 시스템 별로 분석하였다. 이는 앞서 가정한 도로운송부문 에너지 요구량과의 계산을 통해 각 시나리오 별 도로운송부문 연료비용을 분석하기 위함이다. 4.2절에서는 4.1절의 결과를 이용하여 계산한 연료비용을 포함한 전체 생애주기비용을 분석하였다.

##### 4.1. 에너지 연료비용 분석

도로운송부문 연료비용 계산을 위한 각 시나리오 별 NPC와 COE 분석결과를 Table 5에 나타내었다. 이는 HOMER를 이용하여 얻은 각 시나리오 별 최적화 결과이다. 가솔린과 수소의 경우 단위연료비용은 각각 가솔린 1리터 당 달러(\$/l)와 수소 1 kg 당 달러(\$/kg)이다. 그러나 가솔린, 전력 및 수소의 단위연료비용을 원활하게 비교하기 위하여 이들의 단위를 전력 1 kWh 당 달러(\$/kWh)로 통일시켰다.

COE가 가장 낮은 경우는 \$0.102/kWh를 갖는 시나리오 #6(부생 수소, FCV)이며, COE가 가장 높은 경우는 \$1.147/kWh를 갖는 시나리오 #2(신재생 에너지 자원, EV)이다. 기존의 ICEV(시나리오 #1)의 가솔린 비용 \$0.18/kWh에 비하면 시나리오 #6은 43.32% 낮으며, 시나리오 #2는 6.4배 높은 비용이 발생됨을 알 수 있다.

시나리오 #3(전력망, EV)은 \$0.14/kWh의 단위 생산비용을 보이며, 이는 시나리오 #2의 COE보다 87.8% 낮고 시나리오 #1 보다 22.2% 낮은 비용을 보인다. 시나리오 #3에 비해 시나리오 #2의 높은 COE의 이유는 신재생 에너지 자원 기반 시스템의 높은 초기투자비용 때문이다. 전력망 시스템은 발전소에서 생산된 전기를 소비지까지 수송하는 현재의 인프라로 더 이상의 인프라 구축이 필요치 않으므로 인프라 초기 투자비가 고려되지 않는다. 즉, Table 6에 나타나

있듯이 시나리오 #2는 태양광-풍력-배터리 하이브리드 시스템으로 1kW PV, 1kW 풍력터빈 2개, 배터리 7개 및 직류/교류 컨버터 0.4kW로 구성된다. 따라서 \$27,700의 높은 초기투자비용이 요구되며 이는 초기투자비용이 발생하지 않는 시나리오 #3에 비해 낮은 경제성을 보이는 이유이다. 반면, 시나리오 #2의 운영비용과 NPC는 각각 \$713/year, \$36,812로 계산되었으며 이는 시나리오 #3 (\$352/year, \$4,494)에 비해 각각 200%, 820% 높은 수준이다.

Table 5에서 보인 바와 같이 시나리오 #4(신재생 에너지 자원, FCV)와 시나리오 #5(전력망, FCV)의 COE는 각각 \$0.389/kWh, \$0.211/kWh이다. 이는 기존의 화석연료 기반의 ICEV(시나리오 #1) 비용보다 각각 220%, 120% 높은 수준이며, 시나리오 #6(부생수소, FCV)에 비해서는 각각 380%, 210% 높다. 시나리오 #4의 COE가 가장 높은 이유 역시 높은 초기투자비용 때문이다. Table 7에 나타나 있듯이 시나리오 #4는 태양광-풍력 하이브리드 시스템으로 1 kW의 PV, 1 kW 풍력터빈 3개, 전기분해공정 3 kW 그리고 수소 탱크 3 kg으로 구성된다. 이에 따른 초기투자비용, 운영비용 및 NPC는 각각 \$24,120, \$559/year, \$31,267이다. 반면 시나리오 #5의 초기투자비용, 운영비 및 NPC는 각각 \$740, \$1,252/year, \$16,747이다. 전력망을 통해 전력을 공급하는 시나리오 #3의 경우, 초기투자비용이 고려되지 않는다. 반면, 전력망을 통해 수소를 공급하는 시나리오 #5 경우 초기투자비용이 고려되는데 이는 수소를 공급하는데 필요한 전기분해공정과 수소탱크 설치에 기인한다. 시나리오 #6의 경우, 초기투자비용, 운영비용 및 NPC가 모두 존재하지 않고, 운송비를 고려한 COE만이 \$0.102/kWh로 존재하며 FCV 시나리오(#4, #5 및 #6) 중 가장 낮은 비용을 보인다[40]. 이는 시나리오 #4와 #5는 전력을 생산한 뒤 생산된 전력으로 수소를 생산하는 두 과정을 거치는 반면, 시나리오 #6은 운반해 온 수소를 추가적인 과정 없이 바로 사용하기 때문이다.

결과적으로 기존의 ICEV, EV 및 FCV 시스템 등 6가지 시나리오를

Table 5. Optimization results of six scenarios\*

| Sc. | Fuel and supply system                               | NPC (\$) | COE (\$/kWh) |
|-----|--|----------|--------------|
| 1   | Gasoline from oil refinery                           |          | 0.18**       |
| 2   | Electricity from RES                                 | 36,812   | 1.147        |
| 3   | Electricity from grids                               | 4,494    | 0.14         |
| 4   | Hydrogen from electrolysis of water powered by RES   | 31,267   | 0.389***     |
| 5   | Hydrogen from electrolysis of water powered by grids | 16,747   | 0.211***     |
| 6   | Hydrogen from NG reforming in central power plant    |          | 0.102***     |

\*Abbreviation. RES: Renewable energy source, NG: Natural gas.

\*\*The original cost of scenario 1 is \$1.8/l.

\*\*\*The original cost of scenario 4, 5 and 6 is \$12.969/kg, \$7.039/kg and \$3.39/kg respectively.

Table 6. Optimal configuration and economics of EV system (Scenarios 2 and 3)\*

| Sc. | Options | PV (kW) | WT | Battery | Converter (kW) | IC (\$) | OC (\$/y) | NPC (\$) | COE (\$/kWh) |
|-----|---------|---------|----|---------|----------------|---------|-----------|----------|--------------|
| 2   | WPB     | 1       | 2  | 7       | 0.4            | 27,700  | 713       | 36,812   | 1.147        |
| 3   | Grid    |         |    |         |                |         | 352       | 4,494    | 0.140        |

\*Abbreviation. WT: Wind turbine; WPB: wind/PV/battery; IC: Initial cost; OC: Operating cost; NPC: Net present cost; COE: Cost of energy

Table 7. Optimal configuration and economics of FCV system (Scenarios 4, 5 and 6)\*

| Sc. | Options   | PV (kW) | WT | Electrolyzer (kW) | Hydrogen tank (kg) | IC (\$) | OC (\$/y) | NPC (\$) | COE (\$/kg) |
|-----|-----------|---------|----|-------------------|--------------------|---------|-----------|----------|-------------|
| 4   | WP        | 1       | 3  | 3                 | 3                  | 24,120  | 559       | 31,267   | 12.969      |
| 5   | Grid      |         |    | 1                 |                    | 740     | 1,252     | 16,747   | 7.039       |
| 6   | Byproduct |         |    |                   |                    |         |           |          | 3.39        |

\*Abbreviation. WT: Wind turbine; WP: wind/PV; IC: Initial cost; OC: Operating cost; NPC: Net present cost; COE: Cost of hydrogen, NG: Natural gas



비교할 경우 인프라 초기 투자비가 고려되는 시나리오 #2, #4 및 #5의 COE가 초기 투자비가 고려되지 않는 시나리오 #1, #3 및 #6의 COE보다 높은 것을 확인할 수 있다. 즉, 각 시스템의 인프라 초기 투자비용이 경제성에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 특히, 신재생 에너지 자원 기반 시스템은 상대적으로 높은 초기투자비용 때문에 가장 낮은 경제성을 보임을 알 수 있다. 뿐만 아니라 기존의 ICEV(시나리오 #1)에 비해 시나리오 #3과 시나리오 #6이 연료비용 측면에서 높은 경제성을 보인다.

#### 4.2. 생애주기비용 분석

이 절에서는 앞 절의 연료비용에 관한 COE 분석 결과를 바탕으로 연료비용 및 차량비용, 인프라비용, 유지비용 등을 포함한 생애주기비용을 분석한다. 본 연구에서는 생애주기비용 단위로 \$/P.km를 사용한다. 이는 한 사람이 1 km를 운전할 때 드는 비용을 의미하며, 본 연구에서는 차량 1대 당 2명이 탑승한다고 가정하였다. Fig. 4는 여섯 가지 시나리오의 생애주기비용과 각 시나리오의 비용 구성을 보여주고 있다.

여섯 가지 시나리오 중 생애주기비용이 가장 낮은 것은 \$0.098/P.km의 비용을 갖는 시나리오 #3(전력망, EV)이다. 시나리오 #3의 생애주기비용의 경우 차량비용이 61%로 가장 높은 구성요소이며 나머지 비용은 거의 비슷하게 소요됨을 알 수 있다. 이는 전력망 시스템에서 생산되는 전력의 가격은 상대적으로 낮기 때문에 다른 시나리오들과 달리 적은 연료비용이 소요되며 또한 상대적으로 저렴한 배터리 교체비용으로 인하여 유지비용 역시 다른 시나리오에 비하여 낮은 결과를 보이고 있다.

시나리오 #4(신재생 에너지 자원, FCV)의 전체 생애주기비용은 \$0.303/P.km로 시나리오 중 가장 높다. Fig. 4에 보인 바와 같이 모든 비용 요소(연료비용, 차량비용, 인프라비용)에 걸쳐 다른 시나리오에 비해 높은 값을 보인다. 상대적으로 높은 연료 비용의 이유는 수소를 생산하기 위한 신재생 에너지 자원 기반 시스템의 높은 초기투

자비용 때문이며, 비슷하게 상대적으로 비싼 연료전지 교체비용으로 인하여 높은 인프라비용이 소요된다.

시나리오 #1(가솔린, ICEV)의 생애주기비용은 \$0.128/P.km이며, 이는 61%의 연료비용과 39%의 차량비용으로 구성된다. 이 경우 이미 인프라가 구축되어 있으므로 추가적인 인프라비용은 들어가지 않는다. 본 연구에서는 자동차 유지비용으로 공통적으로 들어가는 비용은 고려하지 않았으며 EV의 배터리 교체비, FCV의 연료전지 교체비와 같은 특정 비용만을 고려했기 때문에 시나리오 #1에서의 유지비용은 존재하지 않는다.

시나리오 #2(신재생 에너지 자원, EV)는 \$0.268/P.km의 비용을 가지며 연료비용과 인프라비용이 가장 높은 세부 비용임을 알 수 있다. 이는 신재생 에너지 자원 기반 시스템의 전반적인 특징인 높은 초기 설치 비용과 높은 단위 연료 생산 비용에서 기인한다.

시나리오 #5(전력망, FCV)는 \$0.228/P.km의 비용을 가지며 차량비용(47%)이 가장 높은 비율을 차지하고 연료비용(19%)과 인프라비용(19%), 유지비용(15%) 순으로 높은 비율을 차지한다.

마지막으로 시나리오 #6(부생수소, FCV)은 \$0.161/P.km의 비용을 가지며 차량비용이 가장 높은 세부 비용(66%)임을 보여주고 있다. 시나리오 #4에 비해 낮은 연료 비용은 중앙 발전소의 부생수소 사용으로 인해 추가적인 인프라 구축 비용이 소요되지 않기 때문이다.

결과적으로 신재생 에너지 자원 기반인 시나리오 #2와 시나리오 #4는 예상대로 가장 높은 비용이 소요됨을 분석하였다. FCV의 경우 세 가지 시나리오(#4, #5 및 #6) 모두 대체적으로 비용이 높은 편이며, 반면 EV의 경우 시나리오 #3은 기존의 ICEV(시나리오 #1)에 비해서 낮은 가격으로 계산되었다. 이는 한 가정에서의 지출비용을 고려한 것으로, 시나리오 #3의 차량 비용이 시나리오 #1보다 높기는 하나 유지비용이나 연료비용이 시나리오 #1보다 낮기 때문이다. 그러나 EV 시나리오(#2와 #3)의 경우 사회적으로 실제 운전시 필요한 인프라가 아직 구축되어 있지 않다는 점을 감안할 때, 실제 운전시 추가적인 큰 사회적 비용을 필요로 할 것이다[11]. FCV 시나리오(#4, #5 및 #6) 역시 수소 스테이션 등 사회적 인프라비용까지 고려한다면 생애주기비용은 훨씬 더 증가할 것이다.

#### 5. 민감도 분석

4절의 최적화 수행 결과 분석한 바와 같이 연료비용, 차량비용, 인프라비용, 유지비용 등이 각 시나리오 별로 다양하게 전체 비용에 영향을 미친다. 따라서 본 절에서는 총 생애주기 비용의 4가지 주요 비용 변화에 따른 민감도 분석을 수행한다. 각 시나리오 별 결과는 Fig. 5에 보여진다.

Fig. 5(a)는 시나리오 #1(가솔린, ICEV)의 민감도 분석결과이다. 이 경우 인프라비용과 유지비용은 존재하지 않고 연료(가솔린) 비용과 차량비용만 존재하며, 차량비용보다 연료(가솔린) 비용이 더 민감한 변수임을 보이고 있다.

Fig. 5(b)는 시나리오 #2(신재생 에너지 자원, EV)의 결과이다. 인프라비용과 연료(전기) 비용에 따른 생애주기비용 변화가 가장 큰 반면 유지비용에 따른 생애주기비용의 변화는 상대적으로 미비하다. 따라서 시나리오 #2가 가격 경쟁력을 갖기 위해선 인프라비용과 연료비용을 감소시켜야 하며, 이를 위해서 신재생 에너지 자원 기술의 초기투자비용을 감소시켜야 한다.

Fig. 5(c)는 시나리오 #3(전력망, EV)의 결과로 생애주기비용은

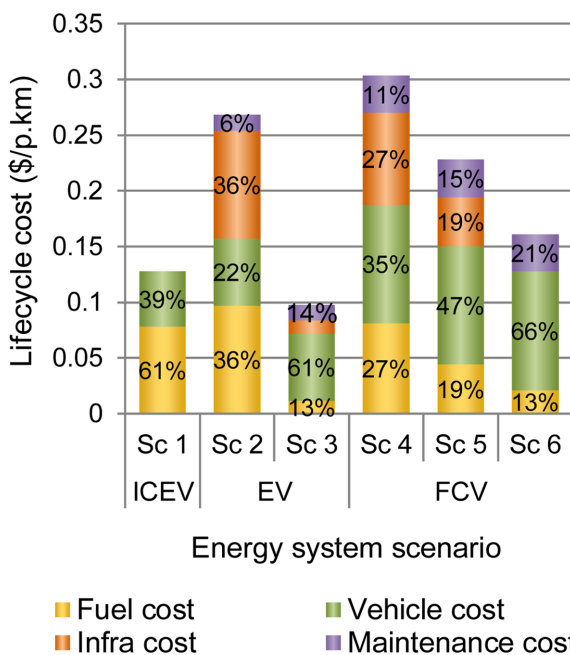
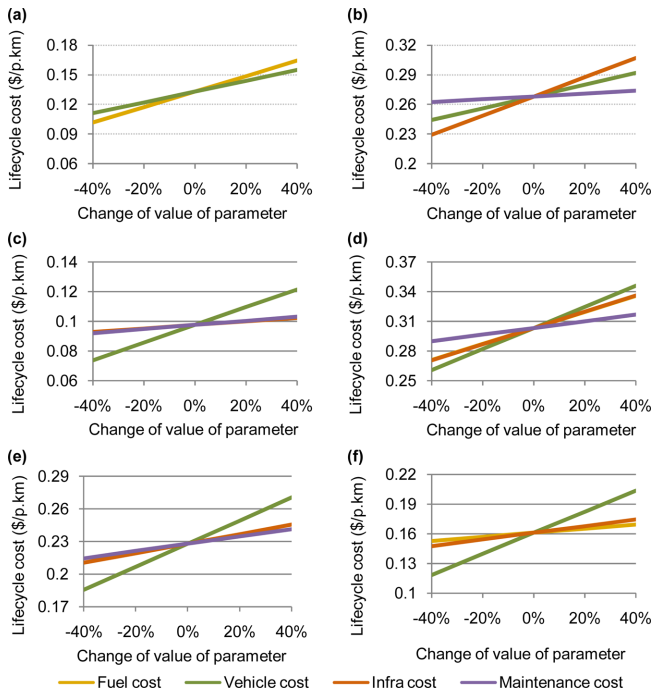


Fig. 4. Total life cycle cost and cost contribution of energy system scenario.



**Fig. 5. Sensitivity analysis of the total life cycle cost on change (±40%) of cost components for (a) ICEV system, (b) EV-RES system, (c) EV-grid system, (d) FCV-RES system, (e) FCV-grid system and (f) FCV-byproduct system.**

차량비용의 변화에 가장 민감하다. 그에 반해 연료(전기)비용, 인프라비용, 유지비용에 따른 생애주기비용의 민감도는 상대적으로 작다. 따라서 시나리오 #3과 같이 기존의 전력망을 이용하는 경우 값싼 전기 자동차 생산 및 공급이 가장 절실한 개선 요소이다.

시나리오 #4(신재생 에너지 자원, FCV)의 결과는 Fig. 5(d)에 보여진다. 네 가지의 주요 비용 관련 변수 중 차량비용의 영향이 가장 크며 다음으로는 인프라비용과 연료(수소)비용의 영향이 큼을 확인할 수 있다. 시나리오 #4는 연료전지자동차의 내구성 및 효율 향상 등 차량관련 비용을 감소시키기 위한 연구개발과 수소 스테이션 등 인프라 구축에 관한 비용 절감에 관한 전략이 요구된다.

시나리오 #5(전력망, FCV)의 경우(Fig. 5(e)), 연료(수소)비용, 인프라비용, 유지비용보다 차량비용이 생애주기비용에 상대적으로 큰 영향을 보인다. 비슷하게 시나리오 #6(부생수소, FCV)의 경우(Fig. 5(f)) 역시 연료전지 자동차의 차량비용이 가장 큰 장애요소임을 알 수 있다.

결과적으로 모든 시나리오에 걸쳐 생애주기비용을 감소시키기 위해서는 공통적으로 전기 자동차, 연료전지 자동차 등 새로운 연료운전 시스템의 비용 감소가 가장 중요하다. 또한 신재생 에너지 자원 기반으로 연료(전기, 수소)를 생산할 경우 이와 관련된 인프라 비용과 초기 투자 비용 절감에 관한 대책이 중요하다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 다양한 도로운송부문용 에너지 공급 시스템을 구축하고 각 시나리오의 최적 비용을 비교분석하였다. 또한 다양한 구성요소를 포함한 에너지 공급 시스템 시나리오를 기반으로 최적 생애주기비용을 규명할 수 있는 에너지 시스템 평가모델을 개발하였

으며 이를 제주도 지역에 적용하였다. 경제성 평가 결과, 전력망을 통하여 전기자동차에 전력을 공급하는 시나리오의 비용이 가장 낮게 나타났으며, 신재생 에너지 자원 기반으로 연료전지자동차에 수소를 공급하는 시나리오의 비용이 가장 높게 나타났다. 또한 4가지 주요 비용 관련 변수(연료비용, 차량비용, 인프라비용, 유지비용)들의 민감도 분석 결과 차량비용이 생애주기비용에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

본 연구의 생애주기비용 평가에서 기존의 ICEV에 비해 EV와 FCV는 가격 경쟁력이 상대적으로 떨어진다. 그 이유는 높은 연구개발 투자비와 규모의 경제 즉, 대량생산이 이루어지지 않고 있다는 점, 그리고 관련 인프라 구축에 소요되는 비용 때문이다. 따라서 이들이 현재 시스템의 ICEV에 비해 가격 경쟁력을 가지기 위해서는 차량비용과 인프라비용을 줄여야 한다. 뿐만 아니라 신재생 에너지 자원 기반 시스템을 이용하는 경우, 연료비용 감소도 중요하다. 이를 위해서는 고효율의 배터리 및 연료전지 개발, 국가적 차원에서 다양한 지원, 신재생 에너지 자원 기반 시스템의 초기투자비용 감소를 위한 기술개발 등이 반드시 필요하다.

본 연구에서 제안한 모델을 제주도라는 지역 기반 에너지 시스템 구축 문제에 적용함으로써 모델의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서는 제주도라는 제한적 상황에서의 문제를 설정 및 분석한 반면, 본 연구에서 제안한 분석 모델은 다른 지역 및 국가 단위의 에너지 시스템 구축에도 적용될 수 있음을 밝힌다. 또한 더욱 정량적인 문제 해결안을 찾기 위해서는 정확한 연료비용 및 차량비용, 정밀한 에너지자원의 잠재량 분석, 세밀한 시간적·지역적 에너지 요구량 등 실제적인 데이터를 확보할 필요가 있다.

향후 연구로써 본 연구는 지역간의 에너지 이동을 포함한 국가단위의 에너지 공급 시스템 구축 및 분석에 관한 연구로 확장될 필요가 있다. 각 지역별 최적 시스템의 조합이 국가 관점에서의 최적 공급 전략과 항상 일치하지 않기 때문이다. 즉, 지역적 자원 잠재량 및 에너지 수요량의 차이를 고려한 최적 기술 선별, 최적 위치 결정 등 국가 단위의 의사결정에 필요한 해결안을 도출할 수 있는 연구가 필요하다. 더 나아가 생애주기 비용 및 COE 분석뿐만 아니라 신재생 에너지 자원 기반 시스템 본연의 특징인 CO<sub>2</sub>절감 효과 등 환경적 분석에 관한 연구를 수행함으로써 새로운 에너지 시스템으로의 전환 시 장에 요소 및 전환 후의 경제적·환경적 효과 분석에 관한 다양한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

## Nomenclature

### Sets

$i$  : scenarios

### Parameters

$VC_i$  : vehicle cost in scenario  $i$  (\$/p.km)

$MC_i$  : maintenance cost in scenario  $i$  (\$/p.km)

$FE_i$  : fuel economy of a vehicle in scenario  $i$  (km/kWh)

$D_i$  : annual energy demand in scenario  $i$  (kWh/year)

CCF : capital charge factor

### Continuous variables

LCC : annual life cycle cost (\$/p.km)

$FC_i$  : cost for fuel consumption in scenario  $i$  (\$/p.km)



$IC_i$  : cost for infrastructure installation in scenario  $i$  (\$/p.km)  
 $TCC_i$  : total annual capital cost in scenario  $i$  (\$/year)  
 $TOC_i$  : total operating cost in scenario  $i$  (\$/year)  
 $CC_i$  : total capital cost in scenario  $i$  (\$)  
 $COE_i$  : unit fuel cost in scenario  $i$  (\$/kWh)  
 $TE_i$  : total energy produced in scenario  $i$  (kWh)  
 $WTE_i$  : electricity generated by wind turbine in scenario  $i$  (kWh)  
 $PE_i$  : electricity generated by PV in scenario  $i$  (kWh)  
 $EGE_i$  : electricity supplied from electricity grid in scenario  $i$  (kWh)  
 $WTH_i$  : hydrogen produced by wind turbine in scenario  $i$  (kWh)  
 $PH_i$  : hydrogen produced by PV in scenario  $i$  (kWh)  
 $EGH_i$  : hydrogen produced by electricity supplied from grid in scenario  $i$  (kWh)  
 $BPH_i$  : byproduct hydrogen supplied in scenario  $i$  (kWh)

### Acknowledgement

이 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

### Reference

1. Son, H. K., "Smart Grid and Charge Station Infrastructure for Electric Vehicle," *Korea Electrotechnology Research Institute Report*, **59**(4), 47-53(2010).
2. Lee, K. Y., Kim, D. O., Kim, H. K. and Moon, H. W., "A Study on the Insulation Resistance Measurement Technique for Electrical Safety of Green Car," *Trans. KIEE*, **4**, 597-601(2009).
3. Kim, N. I., "A Strategy for Energy Technology Export," Korea Energy Economics Institute, Basic Research Report: No.13-35(2013).
4. U.S. Department of energy, "Transportation Energy Futures: Project Overview and Findings," NREL Report: PR-6A20-56270(2013).
5. European Union, "EC rolls out CARS 2020 action plan for European auto Industry," Proceeding 158th WP: WP.29-158-30(2012).
6. Kim, J. W., "World Energy Market Insight," Korea Energy Economics Institute, Basic Research Report: No.13-10(2013).
7. Kim, J. and Moon, I., "The Role of Hydrogen in the Road Transportation Sector for a Sustainable Energy System: a Case Study of Korea," *Int. J. Hydrog. Energy*, **33**, 7326-7337(2008).
8. Joo, O. S., "Hydrogen Production Technology," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(6), 688-696(2011).
9. Jung, I. H., Park, C. S., Park, S. H., Na, J. G., and Han, C. H., "A Comparative Study of Various Fuel for Newly Optimized Onboard Fuel Processor System under the Simple Heat Exchanger Network," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(6), 720-726(2014).
10. Kim, H., Tenreiro, C. and Ahn, T. K., "2D Representation of Life Cycle Greenhouse Gas Emission and Life Cycle Cost of Energy Conversion for Various Energy Resources," *Korean J. Chem. Eng.*, **30**(10), 1882-1888(2013).
11. Chung, J. W., Chae, H. S. and Kim, J. D., "Life-cycle Cost Analysis of EV," *Journal of Business Research*, No. 26, 133-151(2011).
12. Karabasoglu, O. and Michalek, J., "Influence of Driving Patterns on Life Cycle Cost and Emissions of Hybrid and Plug-in Electric Vehicle Powertrains," *Energy Policy*, **60**, 445-461(2013).
13. Ma, H., Balthasar, F., Tait, N., Riera-Palou, X. and Harrison, A., "A New Comparison Between the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Battery Electric Vehicles and Internal Combustion Vehicles," *Energy Policy*, **44**, 160-173(2012).
14. Zhou, G., Ou, X. and Zhang, X., "Development of Electric Vehicles Use in China: A Study From the Perspective of Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions," *Energy Policy*, **59**, 875-884(2013).
15. Doucette, R. T. and McCulloch, M. D., "Modeling the CO<sub>2</sub> Emissions from Battery Electric Vehicles Given the Power Generation Mixes of Different Countries," *Energy Policy*, **39**, 803-811(2011).
16. Huo, H., Zhang, Q., Wang, M. Q., Streets, D. G. and He, K., "Environmental Implication of Electric Vehicles in China," *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 4856-4861(2010).
17. Nansai, K., Tohno, S., Kono, M., Kasahara, M. and Moriguchi, Y., "Life Cycle Analysis of Charging Infrastructure for Electric Vehicles," *Appl. Energy*, **70**, 251-265(2001).
18. Lucas, A., Silva, C. A. and Neto, R. C., "Life Cycle Analysis of Energy Supply Infrastructure for Conventional and Electric Vehicles," *Energy Policy*, **41**, 537-547(2012).
19. Ekdunge, P. and Råberg, M., "The Fuel Cell Vehicle Analysis of Energy Use, Emissions and Cost," *Int. J. Hydrog. Energy*, **23**, 381-385(1998).
20. Zamel, N. and Li, X., "Life Cycle Analysis of Vehicles Powered by a Fuel Cell and by Internal Combustion Engine for Canada," *J. Power Sources*, **155**, 297-310(2006).
21. Zamel, N. and Li, X., "Life Cycle Comparison of Fuel Cell Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles for Canada and United States," *J. Power Sources*, **162**, 1241-1253(2006).
22. Patterson, T., Esteves, S., Carr, S., Zhang, F., Reed, J., Maddy, J. and Guwy, A., "Life Cycle Assessment of the Electrolytic Production and Utilization of Low Carbon Hydrogen Vehicle Fuel," *Int. J. Hydrog. Energy*, **39**, 7190-7201(2014).
23. Ou, X., Yan, X., Zhang, X. and Liu, Z., "Life Cycle Analysis on Energy Consumption and GHG Emission Intensities of Alternative Vehicle Fuels in China," *Appl. Energy*, **90**, 218-224(2012).
24. Granovskii, M., Dincer, I. and Rosen, M. A., "Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Cell and Gasoline Vehicles," *Int. J. Hydrog. Energy*, **31**, 337-352(2006).
25. [http://www.kma.go.kr/weather/climate/past\\_tendays.jsp](http://www.kma.go.kr/weather/climate/past_tendays.jsp).
26. <http://www.homerenergy.com/software.html>.
27. <http://www.jeju.go.kr/contents/index.php?mid=010905>.
28. Hiendro, A., Kurnianto, R., Rajagukguk, M., Simanjuntak, Y. M. and Junaidi, "Techno-economic Analysis of Photovoltaic/wind Hybrid System for Onshore/remote Area in Indonesia," *Energy*, **59**, 652-657(2013).
29. Alphen, K., Sark, W. G. J. H. M. and Hekkert, M. P., "Renewable Energy Technologies in the Maldives-determining the Potential," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **11**, 1650-1674(2007).
30. Gonder, A. and Simpson, A., "Measuring and Reporting Fuel Economy of Plug-in Hybrid Electric Vehicles," NREL Report: NREL/CP-540-40377(2008).
31. Kim, J., Lee, Y. and Moon, I., "Optimization of a Hydrogen Supply Chain Under Demand Uncertainty," *Int. J. Hydrog. Energy*, **33**, 4715-4729(2008).
32. <http://www.ktdb.go.kr/web/guest/125>.
33. Offer, G. J., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R. and Brandon, N. P., "Comparative Analysis of Battery Electric, Hydrogen Fuel

- Cell and Hybrid Vehicles in a Future Sustainable Road Transport System,” *Energy Policy*, **38**, 24-29(2010).
34. <https://www.iea.org/techno/essentials.htm>.
35. Davis, S. C., Diegel, S. W. and Boundy, R. G., “Transportation Energy Data Book,” U.S. Department of Energy, ORNL-6987 (2012).
36. <http://www.jeju.go.kr/contents/index.php?mid=010905>.
37. Türkay, B. E. and Telli, A. Y., “Economic Analysis of Standalone and Grid Connected Hybrid Energy Systems,” *Renew. Energy*, **36**, 1931-1943(2011).
38. Li, C., Ge, X., Zheng, Y., Xu, C., Ren, Y., Song, C. and Yang, C., “Techno-economic Feasibility Study of Autonomous Hybrid Wind/PV/battery Power System for a Household in Urumqi, China,” *Energy*, **55**, 263-272(2013).
39. Feng, Z., Wang, J. and Zhang, W., “ORNL Researchers Design Low-cost Hydrogen Storage Systems for Stationary Applications,” Oak Ridge National Laboratory Fact Sheet (2011).
40. Simbeck, D. R. and Chang, E., “Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways-Scoping Analysis,” NREL Report: SR-540-32525(2002).