

< 응용 논문 >

전과정 환경 영향적인 측면에서의 소형 자동차 기술과 대안들에 대한 평가

원 현 우*

아람코 프랑스 연구소

Evaluation of Light Duty Vehicle Alternatives from Life Cycle Assessment Standpoint

Hyun-Woo Won *

Fuel Research Center, Aramco Overseas Company B. V., 232 Av. Napoleon Bonaparte, Rueil-Malmaison 92500, France
(Received 5 August 2021 / Revised 19 August 2021 / Accepted 20 August 2021)

Abstract : Several technological options are being considered as solutions to reduce the greenhouse gas(GHG) emission in the transport sector. As a consequence, alternative technologies are expected to grow faster to take a share of the transport energy by 2030. Several proven approaches that improve engine efficiency include using alternative fuels or through electric hybridization(HEV). In the electrification of the vehicles, battery electric vehicles(BEVs) and hydrogen fuel cell electric vehicles(FCEVs) are the main candidates in the future. However, the real climate-mitigation potential of these technologies can only be properly understood through a comprehensive life-cycle assessment(LCA) technique, taking into account the emission well to tank(WtT) and tank to wheel(TtW). In this study, the alternative fuel engine vehicles(HEVs, BEVs, and FCEVs) were evaluated through the LCA approach to account for GHG emissions.

Key words : Electricity intensity(전기의 탄소 배출량), Greenhouse gas(지구 온난화 가스), Life-cycle assessment(전과정 환경 영향 평가), Tank to Wheel(TtW), Well to Tank(WtT)

Subscripts

- BEV : battery electric vehicle
- EI : electricity carbon intensity
- FCEV : fuel cell electric vehicle
- GHG : greenhouse gas
- HEV : hybrid electric vehicle
- ICEV : internal combustion engine vehicle
- LCA : life cycle assessment
- PHEV : plug-in hybrid electric vehicle
- TtW : CO₂ exhaust in tank to wheel
- WtT : CO₂ footprint in well to tank

역할을 하며 산업을 발전시켰고, 인류의 삶의 질을 향상 시키는데 큰 공헌을 했다. 하지만, 이런 수송과 운송에는 에너지원의 사용이 불가피하고 이로 인한 지구 온난화와 환경오염이라는 댓가를 치루어야 함을 명심해야 한다. 운송과 수송은 지구 온난화에 25%의 환경적 영향 지분을 갖고 있고 그 중에 70%는 지상 운송 수단에 있다.^{1,2)} Paris 환경 조약³⁾과 EU Green Deal⁴⁾은 주요한 협약과 노력의 일환이다. 이런 환경 문제 해결을 위한 노력적인 측면에서 미래 자동차의 기술적 환경 대안 기술들을 연구하고 발전시키는 노력들과 기술의 정확한 평가가 무엇보다 중요하다 하겠다.

전기차량(BEV)과 수소연료 전지차량(FCEV)은 환경 문제 해결을 위한 대표적인 대안책으로 대두되고 있다. 중국은 2035년까지 신차량의 50% 이상을 BEV로 목표로 하고 있고 나머지 50% 또한 하이브리드 차량(HEV) 또

1. 서론

현대 산업의 발전은 자동차 산업의 발전과 함께 이루어졌다. 자동차는 인류의 이동과 수송에 있어서 주요한

*Corresponding author, E-mail: hyunwoo.won@aramcooverseas.com

¹This 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.

는 고연비 내연기관차량(ICEV)의 판매를 계획하고 있다.⁵⁾ 유럽 또한 2030년까지 3천만대의 BEV의 보급을 목표로 하고 있다.⁶⁾ 하지만 진정한 탈이산화탄소는 이런 전동화 차량들의 보급만으로 해결되는 것은 아니다. 신차량 보급을 통해 기존 차량을 대체하기까지는 상당한 시간이 필요하고 특히 전동화 차량의 경우, 보급뿐만 아니라, 이들의 충전을 위한 충분한 충전 시스템과 인프라의 구축이 따라야 한다. 이보다 더 시급한 문제는 전기화 차량 충전에 사용되는 에너지가 친환경 에너지원에 근간하는지에 대한 부분이다. 현실적으로 많은 나라에서 아직도 전기 생산에 있어 석탄을 주 연료로 사용한다는 점을 감안할 때, 전과정 환경 영향(LCA)적 평가면에서 단순히 전동화 차량의 보급이 친환경적 해결책이라 볼 수 없다. 이런 점에서 환경 규제와 기술 개발에 있어서 전과정 환경 영향적 평가가 중요하다 하겠다.

또한 자동차의 전동화뿐만 아니라 연료 개발 측면에서도 친환경적인 연료 개발을 위한 연구들이 진행되고 있다. 특히, 친환경 에너지를 이용하거나, 이산화탄소를 포집하고 재생산하는 과정을 통해 생산된 연료의 경우, 전과정 환경 영향적 평가에서 긍정적이라 하겠다. 하지만 이들을 위한 기술적 개발이외에서 설비를 위한 고비용의 투자가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 논의되고 있는 많은 자동차 기술과 대안들을 전과정 환경 영향적 평가를 통해 비교하였다.

2. 전과정 환경 영향적 평가의 중요성과 방법

최근 들어 전과정 환경 영향적 평가에 대한 관심과 중요성은 명확한 환경 규제를 위해 대두되고 있다. 가장 주된 이유는 규제의 사각지대에서 배출되는 이산화탄소를 줄이기 위함이다. 현재의 환경규제는 대부분의 나라에서 자동차에서 실제 배출되는 이산화탄소의 양만으로 규정하고 있다. 이로 인해 에너지원(전기, 연료 등)의 생산이나 자동차 부품 생산에서 야기되는 환경에 끼치는 부정적 영향에 대한 규정은 전무한 상황이다. 특히, 전기와 연료 생산에 필요한 에너지 즉, 이산화탄소의 배출은 환경적인 면에서 무시할 수 없는 부분이다. 전과정 환경 영향적 평가 방식은 자동차와 에너지원(연료, 전기 등)의 생산에서 발생하는 이산화탄소와 자동차 사용 과정(200,000 km 사용)에서 필요로 하는 에너지원의 생산을 위한 이산화탄소량 및 자동차 소멸(End-of-life) 과정에 필요한 이산화탄소의 총량을 계산하여 비교한다. 이 방식은 ISO 14040⁷⁾ 과 14044⁸⁾ 기준을 따른다. 기본적으로 자동차와 배터리 및 에너지원 생산에 소요되는 이산화탄소량과 자동차 처리와 리사이클을 위한 이산화탄소량은 Gabi⁹⁾ 프로그램으로 계산하거나 첨부 자료들을 통해

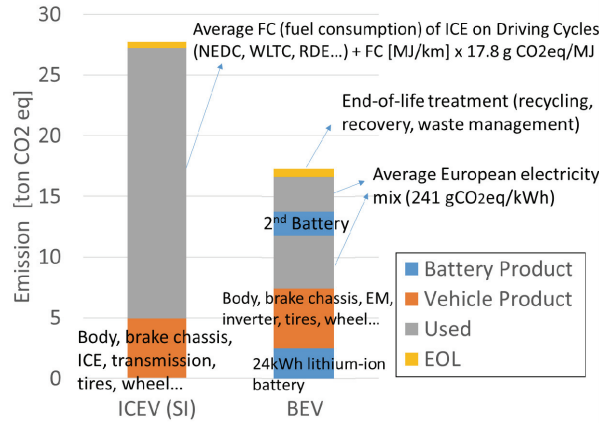


Fig. 1 Example of typical LCA results - ICE(SI) vs. BEV

정보를 얻었다.¹⁰⁻¹²⁾ 또한, 자동차의 사용에 따른 연료 소비 또는 전기 소비량에 의한 이산화탄소량은 직접 개발한 자동차 시뮬레이션 프로그램을 통해서 계산되었다. Fig. 1은 전과정 환경 영향적 방식을 통한 BEV와 소형 가솔린 엔진, ICEV(SI), 차량의 비교를 보여준다. 그림에는 각 과정에서 소요되는 이산화탄소 배출량의 계산 방식을 설명하고 있다. 특히 연료와 전기의 사용량(Used)은 자동차를 운행하는데 사용되는 에너지원의 소비량으로써 실제 사용자의 다양성을 위해 복합적인 실험 환경(NEDC, WLTC, RDE 등)을 시뮬레이션하여 평균치를 이용한 값과 에너지원 생산에 필요한 이산화탄소량을 합한 값이다(4장에서 추가 설명). 전기 사용에 따른 이산화탄소 배출량은 각 나라에서 제공하는 전기 생산을 위해 필요한 평균적 에너지 즉, 이산화탄소 배출량(Average electricity mix) 정보를 통해 계산되어졌다(3장에서 추가 설명). 전과정 환경 영향적 평가 비교는 자동차 산업이 전과정에 있어서 미치는 환경적 영향을 비교하기 위해 차량 생산부터, 에너지원의 생산, 차량 운용, 리사이클까지의 전과정에서 환경에 미치는 영향을 종합적으로 계산하여 비교되었다.

3. 자동차 및 에너지원(전기, 연료) 생산

본 논문에서 사용된 자동차 모델은 유럽에서 가장 많이 생산 보급된 C-segment(폭스바겐 골프, 포드 포커스, 오펜 아스트라, 푸조 308 같은)이다. 차량의 종류로는 BEV, FCEV, 플러그인 하이브리드(PHEV), 전기 충전을 하지 않는 하이브리드(HEV), 내연기관 차량(ICEV)이 선택되었고, ICEV의 경우, 디젤, 가솔린, Straight-run 가솔린과 대체연료(수소, 암모니아)의 사용에 따른 결과가 비교되었다.

3.1 자동차 부품 생산에서의 이산화탄소량

자동차 생산중에 발행하는 이산화탄소와 차량 운용 후 처리 과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량의 계산 값은 Fig. 2와 같다. 이 계산값은 자동차 회사에서 작성된 보고서에 따른 각 자동차에 사용되는 부품들의 리스트 정보를 기본으로 각 재료들의 생산에 필요한 에너지량을 기본으로 계산되었다.⁹⁾ 일반적으로 부품의 종류들은 차량 종류에 따라 대략 140가지 정도의 카테고리로 분류되어지고, 각 부품별 생산 에너지에 대한 정보를 통해 계산되었다. 특히, 엔진의 경우는 폭스바겐 골프(Schweiner and Levin 2000)를 기본으로 하였고 BEV의 배터리는 니산 리프(Nissan 2010b)의 정보를 이용하여 273 kg의 무게, 24 kWh 배터리 용량의 기준으로 계산되었다.

자동차 폐기에 따른 이산화탄소 배출량은 자동차 회사들의 보고 자료를 통해 측정되었고 특히 배터리의 평균 수명의 경우, 많은 보고들이 150,000 km로 예상하고 있는데(Daimler AG 2008a, Volkswagen AG 2008b, Ford Motor Company 2007), 본 논문에서는 실질적 배터리 적정 효율 유지의 한계치를 130,000 km 정도로 보고 배터리 리사이클과 교환을 고려하였다.

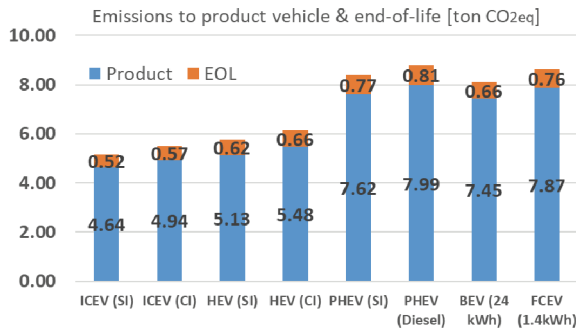


Fig. 2 Calculated emissions associated to vehicle manufacturing and end-of-life

3.2 연료 생산에서의 이산화탄소량

본 논문에서는 미래 자동차의 기술적 대안들을 비교하기 위해 기존의 가솔린과 디젤을 사용한 자동차 이외에 GCI(Gasoline Like Fuel in Compression Ignition), 수소와 암모니아를 대체 연료로 사용했을 경우의 전과정 환경 영향적 평가를 수행하였다. 기존 연료인 가솔린과 디젤 그리고 Straight-run 가솔린 연료의 정유 과정에서 배출되어지는 이산화탄소량은 JEC 리포트를 참조하였다.¹⁰⁾ Table 1은 각 연료들의 생성에 따른 이산화탄소 배출 상황을 보여준다.

Table 1 Summary of fuels and the well-to-tank values

Fuel	Feedstock & conversion	gCO ₂ eq/MJ
Gasoline(SI)	Crude oil refining	17.8
Diesel(CI)		11.6
Naphtha(GCI)		11.6
Grey H ₂	SMR	113
Blue H ₂	SMR + Carbon capture	39.7
Green H ₂	Electrolysis(alkaline)	9.5
Green NH ₃	Haber bosch	12.3

수소와 암모니아 연료의 경우, 생성과정에서 사용되는 에너지원의 출처에 따라 연료 생성에 필요한 이산화탄소의 값이 달라진다. 예를 들어, 화석연료로부터 수소를 추출하는 SMR(Steam Methane Reforming)의 경우 (Grey H₂)는 많은 이산화탄소의 배출이 요구되어지고 친환경 재생 에너지(Green H₂) 또는 탄소 캡처 시스템(Carbon capture system)을 이용하는 경우(Blue H₂)는 이산화탄소의 배출을 줄이는 효과를 볼 수 있다. 물론 수소를 필요로 하는 암모니아 생산의 경우에도 수소의 생산 과정에 따라 이산화탄소 배출량이 결정된다. Fig. 3은 친환경 에너지를 사용하여 추출된 수소가 여러 종류의 연료로 사용되는 과정들을 나타내었다. 그림에서 보듯이, 각 과정을 통해 수소는 여러 운송 수단의 연료로써 사용이 가능하다. 특히, 친환경 재생산 에너지의 사용을 통한 Green 수소의 생산은 환경적 영향면에서 중요한 방식이다. 본 연구에서는 친환경 에너지를 이용한 수소와 암모니아 연료를 기존 SI 엔진에 사용했을 경우, 전과정 환경 영향적인 면에서 이산화탄소 배출량을 계산하여 다른 차량들과 비교하였다.

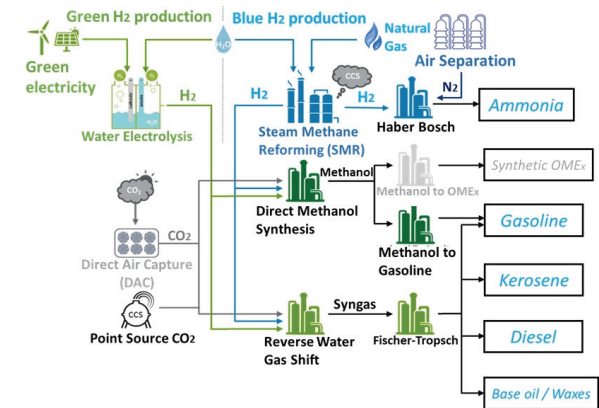


Fig. 3 Sketch of H₂ product process and NH₃

3.3 전기 생산에서의 탄소 발생량(Carbon Intensity of Electricity)

전과정 환경 영향적인 면에서 전동화 차량의 주요 에너지원인 전기 생산에 필요한 에너지, 즉 이산화탄소의 배출을 파악하는 것은 중요하다. 이는 전동화 차량이 어느 나라, 어느 지역에서 사용되어 지는가에 따라 실질적인 이산화탄소의 배출량이 다르기 때문이다. 예를 들어, 유럽의 경우, 친환경 재생 에너지를 주로 이용하는 스웨덴의 경우, 전기 생산을 위해 필요한 탄소 배출량, EI (Electricity Intensity)가 14 gCO₂eq/kWh으로 1 kWh의 전기 생산을 위해 단지 14 그램의 이산화탄소만을 배출한다. 반면에 에스토니아는 스웨덴보다 64배가 많은 874 gCO₂eq/kWh의 EI값을 갖는다. 에스토니아의 경우, 전기 생산을 위해 석탄 연료가 주로 사용되는 실정이라 하겠다. 지역 마다 EI값의 다양성은 중국과 미국의 경우도 마찬가지이다. 중국은 최소 96 gCO₂eq/kWh(연안)에서 최대 749 gCO₂eq/kWh(안휘)까지 미국은 최소 4 gCO₂eq/kWh(버몬트)부터 최대 976 gCO₂eq/kWh(와이오밍)까지 큰 폭의 차이를 보인다.¹³⁻¹⁶⁾ 이는 전동화 차량의 환경적 영향을 평가하기 위해서 전과정 환경 영향적 평가 방식이 중요함을 시사한다. 이런 상황 속에서 전동화 차량의 보급 뿐만 아니라 전기 생산에 있어서 시스템 변화와 보다 많은 친환경 재생 에너지의 사용이 시급한 실정이다.

4. 자동차 사용에 따른 에너지원 소비량 계산

자동차 운용에 따른 이산화탄소 배출량의 계산을 위해서는 사용된 에너지량과 차량에서 직접 배출되는 이산화탄소량의 정보가 필요하다. 본 논문에서는 차량들의 연비와 이산화탄소 배출량을 자체적으로 개발한 차량 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다.¹⁷⁾ 이 차량 시뮬레이션은 MATLAB Simulink을 이용하여 차량과 엔진 실험들을 바탕으로 검증된 모든 종류의 차량 운용에 따른

에너지 소비량을 계산할 수 있는 1D 시뮬레이션 프로그램이다. 이 프로그램은 일반적으로 소형 차량의 환경규제에 사용되는 실험 조건들에 따른 에너지 소비량을 계산함으로써 차량 변화에 따른 평균 에너지 소비량을 규정하였다. Table 2는 본 논문에 사용한 차량들의 조건을 보여준다.

차량 시뮬레이션으로 계산되어진 이산화탄소 배출량과 에너지 소비량을 바탕으로 에너지원 생산에 필요한 이산화탄소 배출량을 추가함으로써 자동차 총운용 중에 (200,000 km) 발생하는 이산화탄소의 총 배출량을 계산하였다. 하이브리드 차량(HEV)의 경우는, 전기 충전이 없는(Non Plug-in) 방식으로써 차량 시뮬레이션의 에너지 사용 최적화 작업을 통한 평균치를 계산한 결과이고, PHEV의 경우는, JEC TTW의 보고¹⁸⁾(20.8 kWh의 PHEV의 경우, WLTC에서 90 %의 전기 에너지 사용) 방식을 기본으로, 80 %의 전기를 이용한 차량 운영과 20 %의 연료를 에너지원으로 구동되는 방식으로 평균치가 계산되었다. BEV는 시뮬레이션을 통해 각 사이클당 요구되어지는 에너지 소비량의 평균치를 통하여 충전에 필요한 충전기량이 계산되었다. Fig. 4는 차량 시뮬레이션을 통해 계산된 차량의 이산화탄소(TtW)의 비교이다. 기존 차량의 하이브리드화(Non PHEV)는 최대 20 %까지의 이산화탄소 저감의 효과가 있으며, PHEV의 경우, 배터리의 최고 SOC(Status of charge) 상태에서 NEDC 실험을 반복함으로써(10번의 NDEC 실험 중 80 %의 순수 전기 사용, 20 %의 연료 사용) 계산되어진 이산화탄소 배출가스로 비교하였다. 이 결과 75 %까지의 이산화탄소 저감이 가능하였다. 수소와 암모니아 차량의 경우는 물론 차량으로부터는 이산화탄소를 배출하지 않는다. 이 결과들은 차량 운영을 위한 에너지원(연료, 전기) 생산에 필요한 이산화탄소량과의 합으로 전과정 환경 영향적 평가 중 자동차 사용에 따른 총 에너지원 소비량 계산에 적용된다.

Table 2 Summary of the vehicle specifications

Vehicle	Fuel	Engine size	Battery capacity	Electric motor
ICEV (SI)	Gasoline, H ₂ , NH ₃	1.2 L (Tubo)	-	-
ICEV (CI)	Diesel, GCI	1.6 L	-	-
HEV (SI)	Gasoline	1.2 L	1.5 kWh	50/50 kW
HEV (CI)	Diesel, GCI	1.6 L	1.5 kWh	50/50 kW
PHEV (SI)	Gasoline	1.2 L	12 kWh	100/80 kW
PHEV (CI)	Diesel, GCI	1.6 L	12 kWh	110/80 kW
BEV	-	-	24 kWh	110/80 kW

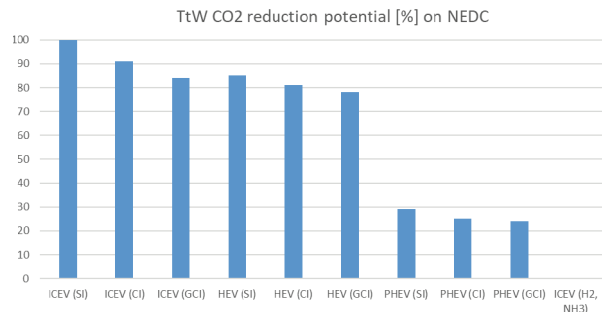


Fig. 4 Calculated average fuel consumption proportion of vehicles(TtW)

5. 전과정 환경 영향적 비교 결과와 논의

현재 상용화되어진 차량과 논의되는 대체 기술들을 전과정 환경 영향적 방법으로 비교함으로써 차량들이 실질적으로 환경에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 5는 기존 내연기관 차량과 대체 연료 차량을 BEV 또는 FCEV¹⁹⁾와 비교하였다. ICEV(GCI)는 디젤 차량²⁰⁾을 바탕으로 본 저자의 실험치²¹⁾를 바탕으로 연료소비량으로 계산하였고, 수소와 암모니아 차량의 경우, 본 저자의 단기통 엔진 실험 결과와 참조 논문^{22,23)}을 바탕으로 연비를 추론하여 에너지 소비량을 계산하였다. 그림에서 회색 바탕 구간은 유럽 나라들의 전기 생산에 따른 이산화탄소 배출량(EI)을 기준으로 BEV의 이산화탄소 배출량을 계산했을 때의 구간을 나타낸다. BEV는 유럽 2019년 평균값(EU EI mix) 인 241 gCO₂eq/kWh를 기본으로 계산된 결과이다. 배터리의 수명은 현재 기술의 발전으로 늘었지만 실질적인 배터리 효율 저감을 감안해서 130,000 km에서 배터리 교체에 의한 이산화탄소의 증가도 추가되었다. 결과에서 보여지듯이, BEV는 사용되어지는 장소에 따라 전과정 환경 영향적 평가가 크게 다를 수 있다. 기존 화석연료를 사용했을 경우, ICEV(GCI)가 이산화탄소 저감을 보이는데, 이는 기존 ICEV(SI)와 비교하여 개선된 연비와 연료 생산 과정에서의 이산화탄소 저감에 의한 효과이다. 수소와 암모니아와 같이 연소 중 탄소를 배출하지 않는 연료를 사용하는 내연기관에 관한 연구도 현재 진행중이다. 이런 차량이 가장 낮은 이산화탄소 배출량을 보이는데, 이는 선행 연구 단계로써 이를 현실화시키기 위해서는 우선 연료 생산에서 친환경 재생 에너지를 사용하는 다소 비싼 정유 시스템을 갖춰야 하고, 엔진 개발에 있어서도 해결할 과제(수소 엔진의 노킹과 효율 개선, 암모니아의 저온 연소성 개선 등)

가 존재한다. FCEV의 경우도 BEV와 비슷한 이산화탄소량을 보이며 이를 유지하기 위해서는 친환경적 수소 생산과 충분한 충전 인프라가 필요한 실정이다.

하이브리드 차량들의 전과정 환경 영향적 비교에 있어서도 내연기관 차량과 마찬가지로 차량 시뮬레이션을 통해 계산된 연비를 기본으로 에너지원 생산에 배출되는 이산화탄소량을 합하여 최종 이산화탄소 배출량을 계산하였다. PHEV도 BEV와 마찬가지로 배터리 수명에 따른 교체를 감안하였으며, 유럽의 평균 전기 생산에 필요한 이산화탄소 배출량(EI)을 기준으로 계산하였다. Fig. 6은 하이브리드 전동화 차량들과 전기차의 전과정 환경적 영향의 비교이다. BEV와 PHEV들은 차량 생산과 배터리 교환에 따른 높은 이산화탄소 배출을 갖지만 전동화로 인해 사용 중에 배출되는 이산화탄소량이 적어 현재 상용화되어진 차량 중에 가장 낮은 총이산화탄소 배출량을 갖는다 하겠다. 이 중 PHEV(CI)와 PHEV(GCI)의 경우가 BEV보다 총 이산화탄소량이 적은 이유는 소형 배터리 사용에 따른 효과이다.

Fig. 7은 본 연구에서 비교한 전체 차량의 전과정 이산화탄소 배출량 비교이다.

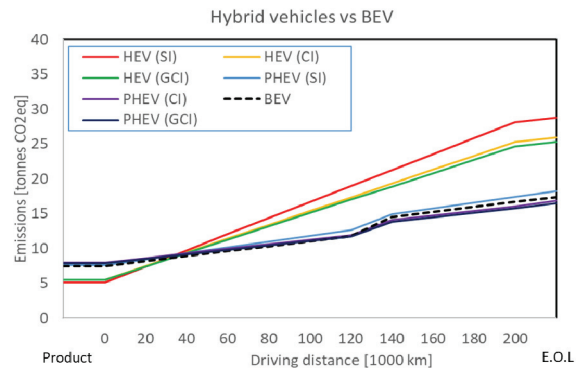


Fig. 6 LCA results hybrid electric vehicles and BEV

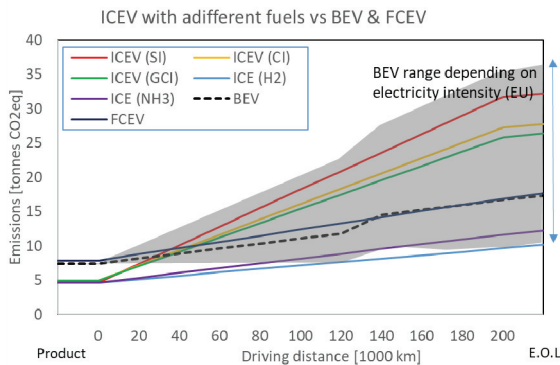


Fig. 5 LCA results ICEVs with alternative fuels, BEV and FCEV

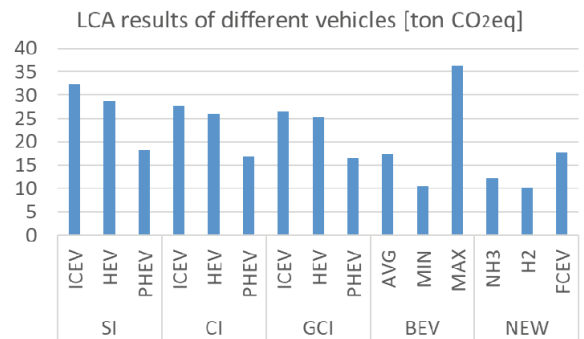


Fig. 7 Summary of LCA results of different vehicles in EU

화탄소 배출 총량을 보여준다. BEV 차량을 기준으로 PHEV차량과 친환경적 수소를 이용한 FCEV의 경우가 비슷한 수준의 이산화탄소 총량을 갖는데, 전동화 차량의 경우, 전기 생산 방식이 이 평가에 큰 영향을 준다 하겠다. 기존 내연기관과 HEV(Non PHEV)들의 경우, BEV와 비교할 때, 7~14톤까지의 이산화탄소를 더 배출하는 실정이다. 이는 수소나 암모니아같은 대체 연료가 사용되거나 전동화가 필요한 이유라 하겠다. 하지만 앞으로 설명했듯이 BEV의 경우, 비교적 낮은 유럽의 평균 EI값으로 계산된 결과이다. 참고로 전 세계 평균(470 gCO₂eq/kWh)과 한국(2012년 기준 540 gCO₂eq/kWh)의 경우는 유럽 평균보다 2배 높은 수치이다. 이는 본 연구와 같은 조건으로 BEV를 한국에서 운용할 경우, 총 이산화탄소 발생량이 대략 26.3톤에 이르며 이는 결국 ICEV(GCI)와 같은 수준이다. 특히, Non-OECD(The Organisation for Economic Co-operation and Development) 국가들, 중국과 인도와 같은 경우는 EI값이 유럽 평균에 비해 현저히 높음을 감안할 때, 전동화 차량의 개발과 함께 전기 생산 시스템에 보다 많은 투자가 필요하리 하겠다. 이 외에도 계속적인 내연기관 차량의 연비 향상과 대체 에너지 사용에 대한 연구가 진행되어야겠다.

6. 결론

전과정 환경 영향적 평가를 통해 현재 상용되는 차량들과 대체 기술로 논의되고 있는 차량들의 환경적 영향을 비교하였다. 차량의 선택, 생산 및 운용 뿐 아니라 에너지원을 생산하는 과정에서의 친환경 에너지 사용의 영향이 크다는 것을 알게 되었다.

- 1) 전과정 환경 영향적 비교의 소개와 예시를 통해 자동차 대체 기술 개발과 더불어 그것들을 평가하는 방식을 소개 하였으며 에너지 생산 방법이 주요함을 알게 되었다.
- 2) 전과정 환경 영향적 평가 비교를 위해, 차량 생산과 운용에 필요한 전체적 에너지원들을 규정하고 이를 생산하고 사용하는데 필요한 이산화탄소량을 계산하는 방식을 소개하였다.
- 3) 대체 연료 차량들을 기존 연료 엔진 차량과의 비교를 통해 전과정 환경적 측면에서 대체 연료의 보급이 필요하다.
- 4) 하이브리드와 전기차량의 전과정 환경 영향적 평가 비교를 통해 차량의 전동화가 총 이산화탄소량을 줄이는데 중요하지만 이를 위해서는 전기 생산 과정에서의 친환경적 신재생에너지를 활용하는 것이 효과적이다.

References

- 1) U. S. Energy Information Administration, International energy outlook 2013, DOE/EIA-0484, 2013 [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf), 2013.
- 2) ExxonMobil, 2014 The Outlook for Energy: A View to 2040, <https://corporate.exxonmobil.com/Energy-and-innovation/outlook-for-energy>, 2014.
- 3) 2015 United Nations Climate Change Conference in Paris, The Paris Agreement is a Legally Binding International Treaty on Climate Change, 2015.
- 4) European Commission: The European Green Deal, COM (2019) 640 Final, 2019.
- 5) ICCT Report: China's New Energy Vehicle Industrial Development Plan for 2021 to 2035, <https://theicct.org/publications/china-new-vehicle-industrial-dev-plan-jun2021>, 2021.
- 6) REUTERS Report by Kate Abnett, <https://www.reuters.com/article/us-climate-change-eu-transport-idUSKBN28E2KM>, 2020.
- 7) International Organization for Standardization (ISO), ISO 14040 Environmental Management – Life Cycle Assessment: Principles and Framework, 2006.
- 8) International Organization for Standardization (ISO), ISO 14044 Environmental Management – Life Cycle Assessment: Requirements and Guidelines, 2006.
- 9) Sphera, GaBi 10.0 LCA Software & LCI databases v2021.1, <http://www.gabi-software.com/international/index/>, 2020.
- 10) JEC, JEC Well-to-Tank Report v5, Publications Office of the EU, Luxembourg, 2020.
- 11) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Contribution to the Fifth Assessment Report of the IPCC, 2013.
- 12) Argonne National Laboratory(ANL), BatPaC: Battery Manufacturing Cost Estimation, <https://www.anl.gov/tcp/batpac-battery-manufacturing-cost-estimation>, 2019.
- 13) World Bank. Electric Power Transmission and Distribution Losses (% of output). TheWorld Bank Group, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS>, 2019.
- 14) WEC. Rate of Electricity T&D Losses. Enerdata. World Energy Council(WEC), <https://wec-indicators.enerdata.net/world-rate-of-electricity-T-D-losses.html>, 2019.
- 15) EIA. Electricity. U.S. Energy Information Administration (EIA), <https://www.eia.gov/electricity/>,

- 2019.
- 16) EEA. Overview of Electricity Production and Use in Europe. European Environment Agency (EEA), <https://www.eea.europa.eu/data-andmaps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment-4>, 2019.
- 17) H. Won, "A Simulation Study for Hybrid Electric Vehicles with Gasoline Compression Ignition Technology," SAE International Journal of Advances & Current Practices in Mobility, Vol.2, No.1, pp.337-345, 2020.
- 18) JEC, JECTank-to-Wheel report v5: Passenger Cars, Publications Office of the EU, Luxembourg, 2020.
- 19) M. Kim, E. Yoo and H. Song, "Well-to-Wheel, Greenhouse Gas Emissions Analysis of Hydrogen Fuel Cell Vehicle – Hydrogen Produced by Naphtha Cracking," Transactions of KSAE, Vol.25, No.2, pp.157-166, 2017.
- 20) D. Kim, K. Kim and C. Bae, "Combustion and Spray Characteristics of Diesel and Gasoline in Heavy-duty Compression Ignition Engine Under Low Load Condition," Transactions of KSAE, Vol.28, No.6, pp.367-373, 2020.
- 21) H. Won, A. Bouet, F. Duffour and De Francqueville, "Potential of Naphtha Fuel on a Light Duty Single Cylinder Compression Ignition Engine," FISITA World Automotive Congress 2016, F2016-ESYC-003, 2016.
- 22) C. Luhillier, P. Brequigny, F. Contino and C. Mounaim-Rousselle, "Combustion Characteristics of Ammonia in a Modern Spark-ignition Engine," SAE 2019-24-0237, 2019.
- 23) C. Mounaim-Rousselle, A. Mercier, P. Brequigny, C. Dumand, J. Bouriot and S. Houillé, "Performance of Ammonia Fuel in a Spark Assisted Compression Ignition Engine," International Journal of Engine Research, <https://doi.org/10.1177/14680874211038726>, 2021.