

E-mobility 시대의 에너지저장매체 선택 기준

Bae, Dowon

DOI

[10.22800/kisti.kosenexpert.2020.364](https://doi.org/10.22800/kisti.kosenexpert.2020.364)

Publication date

2020

Document Version

Final published version

Citation (APA)

Bae, D. (2020). *E-mobility 시대의 에너지저장매체 선택 기준*. Korea Institute of Science and Technology Information. <https://doi.org/10.22800/kisti.kosenexpert.2020.364>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mobility 시대의 에너지저장매체 선택 기준

배도원, d.bae@tudelft.nl

델프트공대, 화학공학과

Dr. Dowon Bae
Department of Chemical Engineering
Delft University of Technology

Key words

Fuel-cell, Battery, EV, E-mobility, Energy storage

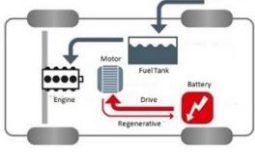
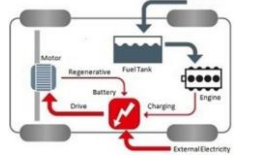
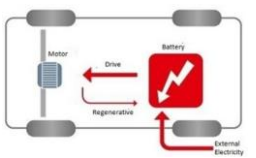
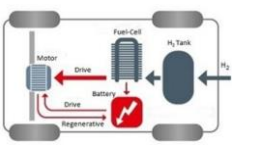
연료전지, 배터리, 전기차, 에너지 저장

1. 개요

EU 환경청(EU Environment Agency)의 보고에 따르면, EU 전체 CO₂ 배출량의 30% 가까이가 교통 수단에서 내뿜는 CO₂에 기인하며, 그중 72%가량이 차량(즉, 항공기 및 철도차량 제외)에서 배출되고 있다^[1]. EU는 2050년까지 CO₂를 비롯한 온실가스를 80~95%까지 줄인다는 계획을 가지고 있으며^[2], 이를 달성하기 위하여 상당수 가입국들이 내연기관 차량의 신규 등록을 제한하거나^[3] 전기 및 연료전지 차량에 대한 보조금 및 세금 감면 정책 등을 시행하고 있다^[4, 5]. 노르웨이의 경우 당장 2025년부터 내연기관 차량의 신규등록이 금지되며 네덜란드는 2030년부터, 영국 및 덴마크 등 주요 국가들에서는 2040년부터 내연기관 차량의 판매 자체가 중단된다. EU 보고에 따르면, 2017년 한해 EU 국가들에서 80만 대가 넘는 전기차량(하이브리드 차량 포함)이 판매가 되었으며, 노르웨이에서는 신규 판매 차량의 40%가량이 전기차량이다^[6].

전기차량은 에너지저장매체에 따라서 크게 EV(Electric vehicle) 및 FCEV(Fuel-cell electric vehicle)로 나눌 수 있지만, 주.보조 매체 구분에 따라서 HEV(Hybrid electric vehicle)과 PHEV(Plug-in hybrid electric vehicle) 역시 추가할 수 있다. 주요 특징과 구동원의 구조에 따른 유형 구분은 표 1을 참고하기 바란다. 리튬전지의 기술적 성숙도와 제조.공급원 다양화에 힘입어 현재 비내연기관 차량 시장의 대부분을 HEV를 포함한 EV가 대부분을 차지하고 있다. 반면 FCEV(연료전지차)의 경우 오랜 개발 역사에도 불구하고 더딘 성능 개선과 충전 인프라 부족으로 널리 이용되고 있지 못하는 실정이다. 이에 본 보고서는 EV와 FCEV의 개발 역사와 주요 특성 비교를 통하여 올바른 에너지저장매체의 선택을 위한 가이드라인을 제공하는 것을 목적으로 하고 있다.

표 1. 전기차량 종류에 따른 주요 구성 및 특징

	HEV	PHEV	EV	FCEV
구조				
구동원	내연기관/모터	내연기관/모터(충방전식)	모터	모터
에너지원	연료	연료/전기	전기	수소
주요 특징	<ul style="list-style-type: none"> 엔진을 통한 모터 충전 저속 모터/고속 엔진 별도 인프라 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> 외부 충전식 모터 일정 거리 모터 구동 장거리 엔진 구동 	<ul style="list-style-type: none"> 비내연기관 300~500km 주행 전용 충전소 필요 높은 에너지 효율 	<ul style="list-style-type: none"> 비내연기관 400~600km 주행 전용 충전소 필요 비교적 높은 효율

2. 배터리 vs. 연료전지

2.1. Li-ion 전지 역사와 원리

리튬이온전지(혹은 Li-ion계 배터리)는 현존 이차전지 중 가장 성숙한 기술이며, 동시에 가장 우수하다는 데 이견이 없다. 상대적으로 높은 작동전압과 뛰어난 에너지 용량이 장점인 Li-ion 배터리는 개발 초기 200 Wh/L(대략 80 Wh/kg) 수준에서 시작하여 현재 3배가량 증가한 상황이다. 여러 형태의 전지 중 소형 원형 배터리가 가장 성숙한 기술로, 원가절감에 우선순위를 두고 발전해왔으며, 보수적인 소재 선택으로 인한 운영 안정성과 가격 측면에서의 강점으로 저가 노트북 및 전기차 같은 범용 E-mobility에 주로 적용되고 있다.

재충전이 가능한 첫 리튬이온전지 개념은 Binghamton 대학의 마이클 스탠리 휘팅엄(M.S. Whittingham) 교수가 Exxon사 연구원 시절인 1970년대에 처음 제안하였다. 휘팅엄 교수는 이황화티탄(TiS₂)을 양극으로, 금속 리튬(Li)을 음극으로 사용하였다. 그 후 존 구디너프(J.B. Goodenough)가 이끄는 연구팀이 층상구조의 LiCoO₂를 이용한 새로운 양극을 개발하여 Li의 불안정성을 크게 개선하였고, 1985년에 도시바의 미즈시마 고이치(水島公一)는 최초로 리튬이온전지의 전극 재료를 개발하였다. 이 성과를 살려, 같은 해 아사히 카세이의 요시노 아키(A. Yoshino)가 현재 쓰이는 리튬이온전지에 가까운 원형을 만들어내었으며, 비로소 1991년 소니에 의해 최초의 상업적 리튬이온전지가 출시되었다. 주요 인물들의 성과와 기본적인 동작 원리는 그림 1에 도식화되어 있다.

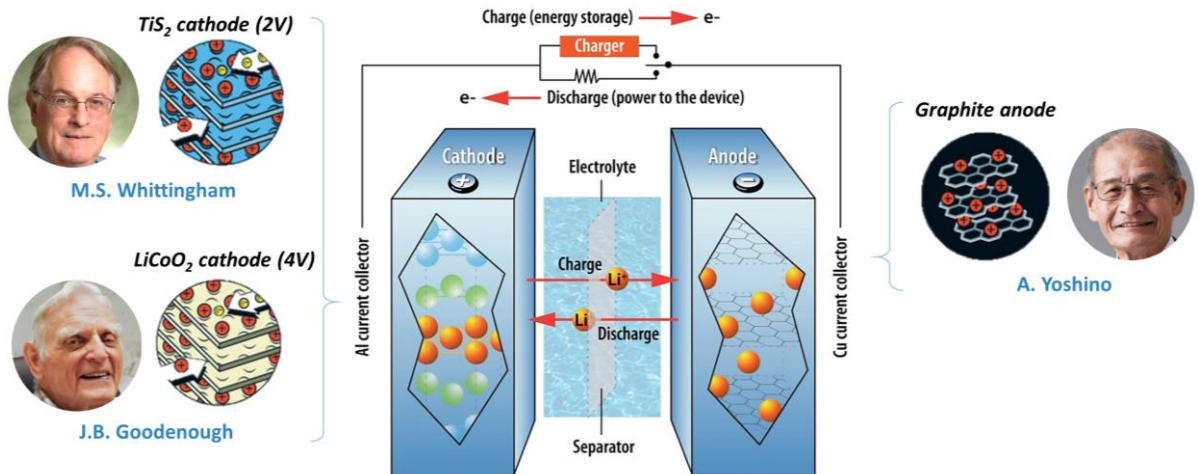


그림 1. Li-ion 배터리 구조 및 충방전 원리를 도식화한 그림과 주요 인물들의 연구 성과

(Courtesy of Argonne National Laboratory, <https://www.anl.gov/topic/lithiumion-batteries>)

리튬이온전지가 충전이 될 시에는 리튬이온(Li⁺)이 양극(Cathode)에서 빠져나와 전해액을 통하여 음극(Anode)으로 흐른다. 이때 전자의 이동은 양극에서 음극 방향으로 이루어지며, 방전이 될 때는 음극의 리튬 양이온(Li⁺)이 탈출하여서 양극으로 간다. 음극에는 역으로 전자가 축적되고 자연히 전류가 양극에서 음극 방향으로 흐른다. 양극은 리튬이온의 제조 비용 중 가장 큰 비중(35%)을 차지하는 소재로서 상기에 언급된 리튬코발트산화물이 가장 많이 사용되지만, 최근에는 가격경쟁력이 높은 저렴한 인산철리튬(lithium iron phosphate; LiFePO₄) 역시 많이 사용되고 있다. 음극 소재로는 탄소, 실리콘, 흑연 등이 주로 사용되고, 분리막(혹은 멤브레인)에는 다공성 폴리에틸렌(PE) 및 폴리프로필렌(PP) 필름이 쓰인다. 전해질(electrolyte)은 리튬 소금(lithium salt) 계열인 육불화인산리튬(LiPF₆, lithium hexafluorophosphate)이 가장 많이 쓰인다.

2.2. 연료전지 역사와 원리

전지는 닫힌계에 화학적 반응을 통하여 전기에너지를 저장하는 반면, 연료전지는 연료의 촉매 반응에 의한 산화/환원 반응으로 전력을 생산하므로 전극 자체의 상태 변화를 동반하지 않아 상대적으로 안정하다고 볼 수 있다. 최초의 연료전지는 웨일스의 윌리엄 그로브(William Grove)에 의하여 1839년에 선보였으며, 1889년 찰스 랭거(Charles Langer)와 루드비히 몬트(Ludwig Mond)에 의하여 석탄 가스를 원료로 하는 전지 개발을 시작으로 ‘연료전지’라는 용어가 처음 사용되기 시작하였다.

하지만 상용화 연구는 수십 년이 흐른 1950년대에 와서야 미국의 제너럴 일렉트릭(GE; General Electric)사의 고분자전해질 막을 이용한 PEM 연료전지(Proton-exchange membrane fuel cell; PEM Fuel-cell)의 개발로 시작되었다. 1960년대에 와서는 미국항공우주국(NASA)에 의해 우주선에 이용될 전지로서

선택되어 전기와 물을 공급하는 장치로 처음 이용되었다(1964년 Gemini 1호; 그림 2 참조). 그러나 기존의 에너지 기술 대비 높은 제조 비용과 더딘 상용화로 대부분의 연구가 미국과 소련의 군사 무기 및 우주·항공 분야 등에 집중되어왔다. 하지만 1990년대 이후 환경 및 CO₂ 배출 절감에 대한 관심이 높아지면서 최근에는 기술적 검증의 단계를 넘어 경제적 검증의 마지막 단계에 진입해 있는 실정이다.

연료전지는 그림 2에 도식화된 것처럼 촉매에 의한 수소분해반응(Hydrogen reduction reaction; HRR)을 통해 생성된 전자의 흐름으로 인한 전력 생산이 주된 반응이다. 생성된 전자는 양극에서 산소와의 촉매반응(Oxygen reduction reaction; ORR)으로 연료전지 중심에 위치한 고분자 멤브레인을 통해 전달되어 수소이온(H⁺; 프로톤)과 결합하여 물 분자가 생성된다. 앞선 리튬이온배터리와 다른 점은 재충전이 필요하지 않고 기존 내연기관처럼 수소가 공급되는 한 지속적으로 전기를 생산할 수 있다는 것이다. 가장 대중화된 수소연료전지는 수소를 연료로, 산소를 산화제로 이용하며, 그 외에 탄화수소, 에탄올 등을 연료로, 공기, 염소, 이산화염소 등을 산화제로 이용할 수 있다.

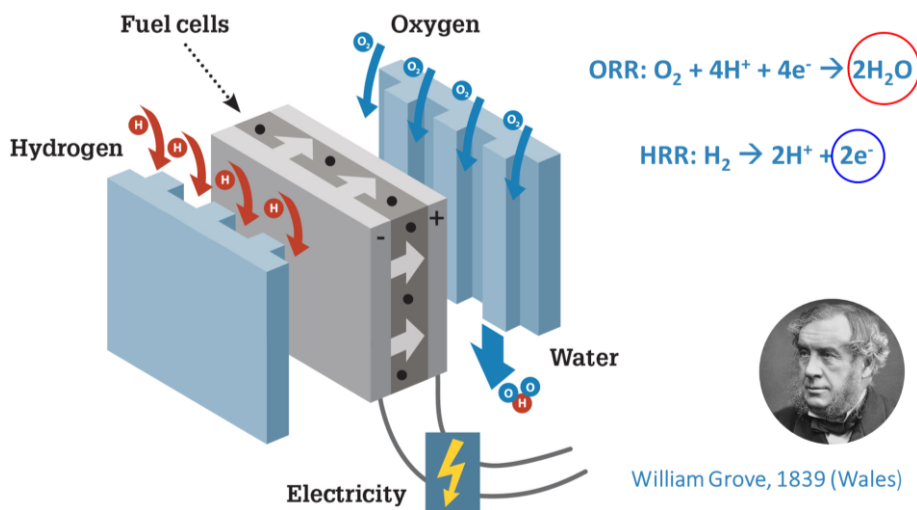


그림 2. 수소연료전지 구조 및 작동 원리를 도식화한 그림과 윌리엄 그로브(우측 하단)

3. 전기차 vs. 연료전지차

3.1. Li-ion 배터리 기반 차량의 장단점

기존 이차전지 대비 Li-ion 배터리의 가장 큰 장점은 무엇보다도 높은 에너지밀도와 낮은 자가 방전율에 있다. 휴대용 미디어 장비에 주로 쓰이던 기존 Ni-Cd의 에너지밀도가 45~80 Wh/kg이고 자가 방전율이 월 25%에 육박하는 데 비하여 Li-ion 배터리의 경우 100~160 Wh/kg가량으로, 2배 이상의 에너지밀도에 월 5% 미만의 자가 방전율을 보여주고 있다. 이러한 높은 에너지밀도는 경량화와

고에너지가 동시에 필요한 차량 설계에 매우 중요한 요소로서, Li-ion 배터리가 EV 차량용 전지로 가장 많이 사용되는 데에 큰 기여를 하고 있다. 더군다나 충/방전 효율 유지를 위한 정기적인 방전이 필요 없다는 점 역시 큰 매력이다.

유럽에는 대략 17만 개가 넘는 EV 충전소가 개설되어 운영 중인데, 이러한 많은 수의 충전소는 아직까지는 300~500km 정도에 머물러 있는 EV 차량의 주행거리의 단점을 극복하는 데 주요한 역할을 하고 있다. 더군다나 기존의 주유소들과는 달리 기존의 전력망과의 연결을 통한 전력 공급으로 별도의 지하 연료 매립시설이 필요 없다는 점 역시 장점이다.

반면 기존 이차전지 대비 에너지 단가가 높다. Ni-Cd 이차전지 대비 40%가량 높은 200\$/kW이며, 이는 매우 높은 장거리 EV 차량 생산단가의 주범이다. 3년이라는 짧은 수명도 단점이다. 평균 차량 운영 기간이 10년을 넘어가는 EU 국가들의 현황을 볼 때 이는 중고 EV 차량의 급격한 가격 하락의 주요 원인이다. 완충시간이 5시간이 넘는 점도 개선되어야 할 부분이다. 급속충전 모드를 이용하더라도 1시간 내외의 충전 시간이 소요된다. 기존 내연기관 차량들의 가득 주유 시 소요시간이 2~3분가량인 것을 감안할 때, EV의 대중화에 가장 큰 걸림돌 중 하나라고 볼 수 있다.

더군다나 최근 논란이 되고 있는 리튬이온배터리의 열폭주(Thermal runaway^[7])로 인한 화재는 구조적인 발화 및 폭발 위험성은 대부분의 Li-ion계 배터리들이 가지고 있는 문제로서, 주로 다음의 3단계 결함에 의하여 열폭주가 일어나게 된다(그림 3 참고)^[5]: 1) Li-dendrite(리튬 수지상) 생성, 분리막 결함 및 셀 충격으로 인한 큰 전류 흐름(Shunting); 2) 분리막 용해 및 음극(본 보고서에서는 anode 혹은 음극 활물질로 표기) 노출; 3) 산소와 반응한 액체 전해질의 고온 발화. 이를 방지하기 위하여 60°C 이하에서 운용될 수 있도록 냉각시스템을 이용한 제어도 가능하지만, 멤브레인(분리막)의 기계적 강성 및 화학적 내구성을 증대시키는 방향이 더 근본적인 방안이라고 볼 수 있다.

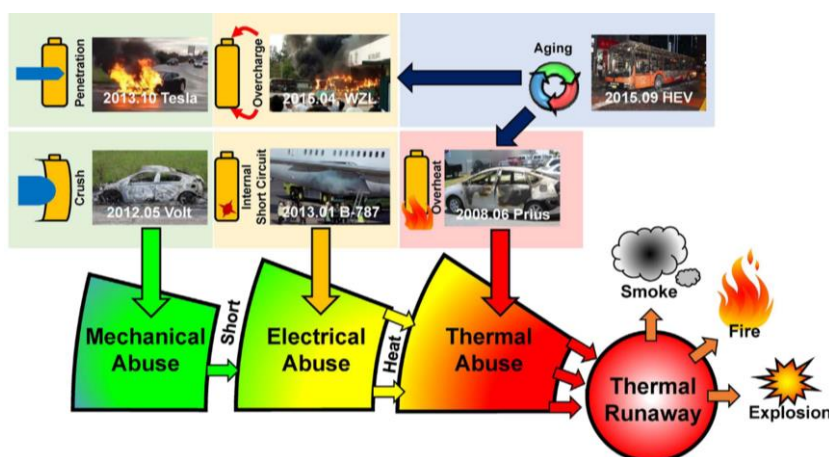


그림 3. Li-ion 배터리의 열폭주 메커니즘을 단계적으로 설명한 도식

(The figure is reprinted from ref.^[5] with permission from Elsevier, Copyright 2018.)

3.2. 연료전지 기반 차량의 장단점

Li-ion 전지와 직접 비교는 어렵지만, 수소를 기반으로 하는 연료전지 역시 매우 낮은 수준의 수소 손실률을 보이고 있다. 앞선 Li-ion 전지의 경우 월 손실률 5% 정도인 데 반하여 현 고압탱크 기술 수준으로는 700atm 압력 수준까지 무시할 만한 가스 누출을 보여주고 있다. 고압을 이용하는 수소 특유의 저장 방식으로 인하여 충전 시간이 수소 5kg 기준 2~3분으로 획기적으로 짧으며, 이는 Li-ion 전지 대비 가장 두드러지는 특징 중 하나이다.

수소 저장탱크 안정성의 비약적 발전은 최근 700기압까지의 안정적인 수소 저장을 가능케 하였으며, 이는 양산형 FCEV의 주행거리를 600km대까지 연장하는 기반이 되었다. 수소 5분 충전에 공인 주행거리가 600km대인 현대 넥소의 경우 최근 주행거리 778km라는 신기록을 수립하였다^[8]. 5년에 달하는 상대적으로 긴 사용 연한 역시 장점으로 볼 수 있다.

이러한 주행거리의 장점에도 불구하고 현재까지는 낮은 수준의 에너지 변환효율은 많은 개선을 필요로 한다. 산소환원반응(ORR; 그림 2 참조)의 촉매에 필요한 높은 과전압 때문에 연료전지의 에너지 변환효율이 대략 40~60%에 머무르고 있으며, 전기분해를 통한 수소 생산 단계부터 계산을 한다면 전체 생산-충전-발전 효율이 20~30%로 크게 떨어진다. Li-ion의 50%대 효율과 비교하면 매우 낮은 수준임이 분명하다고 할 수 있다^[9].

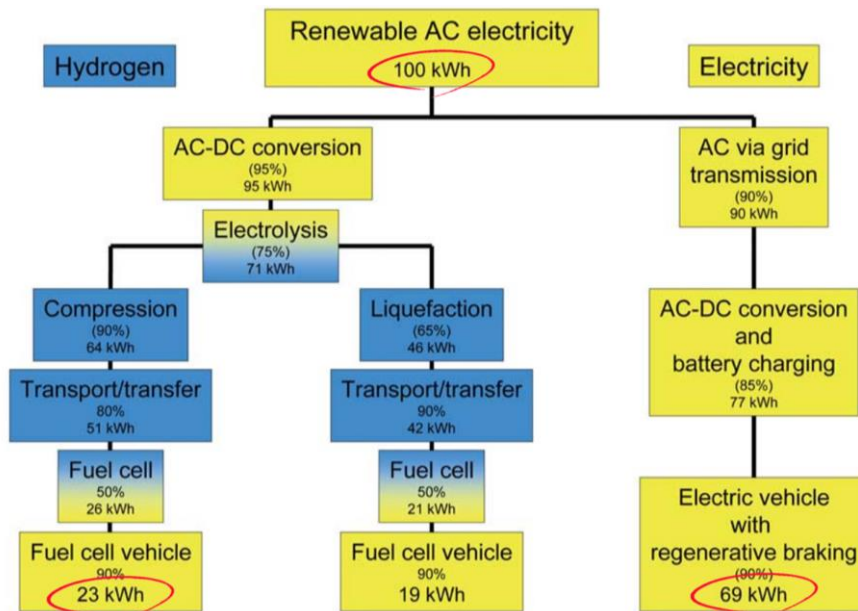


그림 4. FCEV와 EV의 전력망 에너지 변환효율 비교^[9]

전기와는 달리 전력망 같은 기본 인프라를 이용할 수 없다는 점도 큰 걸림돌이다. 현재 수소 고압 저장탱크의 저장 압력 한계는 700atm대로 저장탱크당 운송비가 2,500\$에 달한다. 수소 1kg당 <http://www.kosen21.org/>

생산·공급 비용은 3.7~5.0\$대로 매우 높은 수준으로, 단위부피당 에너지밀도가 높은 액화수소 역시 많이 거론되지만, 영하 230°C 분위기를 유지해야 하는 특성상 설비 유지비가 매우 높은 단점이 있다. 특히 이러한 높은 공급 비용은 수소 충전소 설립에 큰 어려움을 주고 있으며, 실제로 유럽 전체에 단 170개의 수소 충전소만이 운영되고 있는 실정이다.

3.3. 종합 비교 분석

앞선 두 장을 종합하여 단순화하자면, EV의 경우 충전소의 접근성과 높은 에너지 효율에 장점이 있으며, FCEV는 높은 충전효율로 인한 뛰어난 주행거리와 긴 수명, 그리고 고압을 이용한 빠른 충전 속도가 큰 장점이라고 할 수 있다. 앞서 열거하였던 장단점을 요약하여 표 2와 같이 비교하여 보았다.

표 2. EV 및 FCEV 주요 특징 요약

구분	EV	FCEV
주행거리	300~500km	400~600km
시스템 비용	200 \$/kW	45 \$/kW
내구수명	~3년	~5년
충전 시간	1~10시간	2~3분
충전 용이성*	높음(> 170,000 충전소)	낮음(~170 충전소)
에너지 효율	80~90%	40~60%

* 유럽 국가 등록 기준

4. 용도에 따른 특화

앞선 표에서도 잘 요약되어 있듯이, 리튬배터리 기반의 EV는 단거리에서, FCEV는 장거리, 장주기 운용에 장점이 있음을 알 수 있다. 동시에 FCEV의 경우 수소 배송의 고비용 문제로 전력망을 이용하는 EV 충전소와 같이 다수의 충전소로 접근성을 높이는 것이 쉽지 않다. EV의 경우 긴 충전 시간과 높은 시스템 비용으로 대용량화가 어렵다는 점이 자명하다. 이러한 장단점을 종합적으로 분석해볼 때, EV는 개인차량 및 단거리 배송용 상업차량에, FCEV는 중장거리의 대형 상업차량에 더욱 적합하다고 볼 수 있다. 특히 특정 장소에서 집하하는 대형 상업차량의 특성상 수소 충전소의 접근성에 대한 의존성을 크게 낮출 수 있어 연료전지를 사용하는 것이 더욱 적합하다고 볼 수 있다. 이와 같은 분석은 토요타사의 전망(그림 5)과 일치하며, 이는 캐나다 연료전지수소·연료전지조합(Canadian Hydrogen and Fuel-cell Association)의 분석과도 잘 부합하는 내용이다.



그림 5. 용도에 따른 전기차량 종류별 적합성

FCEV 입장에서는 초기비용을 최대한 낮추는 것이 매우 중요하다. 독일 Jülich 연구소의 분석에 따르면, 수소 충전소 등 기본 인프라에 대한 높은 장벽으로 인해서 누적 기준 1,000만 대에 도달할 때까지 EV 대비 높은 총 투자비 및 거리당 비용이 들어갈 수밖에 없다(그림 6)^[10]. 하지만 일정 수준에 도달한 후 EV보다 낮은 비용이 소모되는 것으로 전망하고 있다.

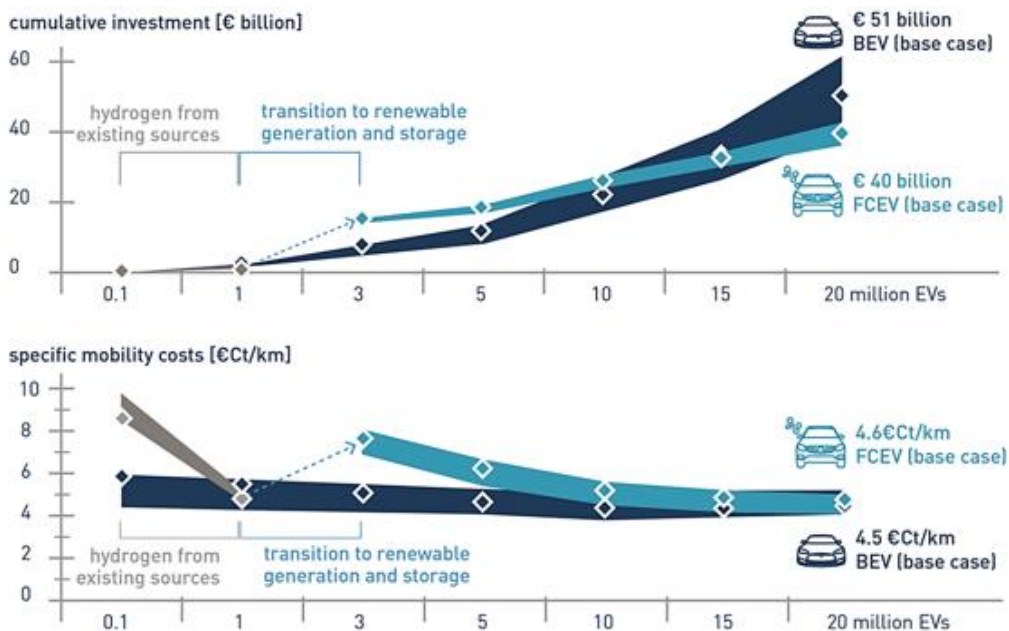


그림 6. 차량 수에 따른 누적 투자비(위)와 거리당 유지비(아래) 비교^[10]

5. 결론

최근 들어 연료전지차량과 전기차량의 폭발적 증가로 미래에 어떠한 차량을 선택하는 것이 올바른 답인지에 대한 의견이 분분하다. 앞에서 설명한 것처럼 연료전지와 배터리의 장단점을 종합적

으로 고려할 때 사용처에 따른 선택적 사용이 효율성을 높이는 데 유리하다고 볼 수 있다. 기술의 발전 역시 고려해봐야 할 점이다. EV의 경우 초고에너지밀도의 Li-air 배터리의 상용화, FCEV의 경우 메탄올 및 암모니아 기반의 연료전지 상용화 시 주행거리가 폭발적으로 늘어날 수 있기에 본 분석은 현 상황만을 감안한 자료로 사용되어야 할 것이다.

References

1. EU. *CO₂ emissions from cars: facts and figures (infographics) | News | European Parliament.* <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissions-from-cars-facts-and-figures-infographics>, 2019.
2. *Energy roadmap 2050.* <http://europa.eu>, 2012 doi:10.2833/10759.
3. Szymkowsky, S. Denmark to EU: Ban sale of internal-combustion engine cars come 2040 - Roadshow. *Road Show by CNET* <https://www.cnet.com/roadshow/news/denmark-eu-ban-gas-diesel-cars/>, 2019.
4. *Interactive map: Electric vehicle purchase incentives per country in Europe (2019 update) | ACEA - European Automobile Manufacturers' Association.* <https://www.acea.be/statistics/article/interactive-map-electric-vehicle-incentives-per-country-in-europe-2018>, 2019.
5. *ELECTRIC VEHICLES: TAX BENEFITS & INCENTIVES IN THE EU.* www.umweltfoerderung.at, 2019.
6. Augère-Granier, M.-L. *Briefing European Parliamentary Research Service.* 2016.
7. Liu, X. *et al.* Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries without Internal Short Circuit. *Joule* **2**, 2047–2064, 2018.
8. 김미영. 현대차 수소차 '넥쏘' 주행거리 778km 세계 신기록 달성 - 지피코리아. 지피코리아 <http://www.gpkorea.com/news/articleView.html?idxno=59393>.
9. Bossel, U. Does a hydrogen economy make sense? *Proc. IEEE* **94**, 1826–1836, 2006.
10. Robinius, M. *et al.* *Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. Schriften des Forschungszentrums Jülich; Reihe Energie & Umwelt vol. 408*, 2018.

Acknowledgments

본 연구는 EU의 Horizon 2020 프로그램인 Marie Skłodowska-Curie Action(grant no. 707404)의 일환으로 추진된 것이다. 저자는 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 재정지원에 감사드린다.