LCA를 통한 수소차, 하이브리드차, 전기차의 환경성 비교 연구

Comparison of Environmental Performance of Hydrogen, Hybrid, and Electric Vehicles Through LCA

김준영(연세대학교 융합의학과 석사과정), 장선호(인하대학교 기계공학과 박사수료)

Ⅰ. 서론

현대 사회는 심화되는 기후위기와 에너지 고갈 문제에 직면하고 있으며, 탄소중립 사회로의 전환은 전 세계적인 주요 과제로 부상하고 있다. 특히 교통 부문은 전 세계 온실가스 배출의 주요 원인 중 하나로 지목됨에 따라, 친환경 자동차 기술에 대한 관심이 급증하고 있다. 전통적인 내연기관차(ICE)를 대체하기 위한 기술로 수소연료전지차, 하이브리드차, 전기차 등이 개발되었으며, 이들 차량은 각기 다른 에너지 변환 방식과 구동 구조를 지니고 있다. 그러나 이러한 차량이 '진정한 친환경'인지에 대한 논쟁은 여전히 존재한다. **차량의 생산, 사용, 폐기 전 과정에서 발생하는 환경영향을 종합적으로 평가**하기 위해 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 기법이 널리 활용되고 있으며, 이는 기술의 환경적 적정성을 과학적으로 검증하는 중요한 도구이다. 본 연구는 LCA 방법론(ISO 14040/14044 기준)을 활용하여 **수소연료전지차, 하이브리드차, 전기차의 전과정 환경성과를 비교·분석**하고, 특히 한국의 전력 생산 구조와 배터리 재활용 가능성 등 핵심 변수에 따른 환경영향의 차이를 정량적으로 분석하고자 한다. 이를 통해 탄소중립 실현을 위한 미래 교통수단의 방향성을 제시하고, 지속가능한 모빌리티 정책 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

Ⅱ. 본론 - 친환경 자동차의 유형 및 구동 원리

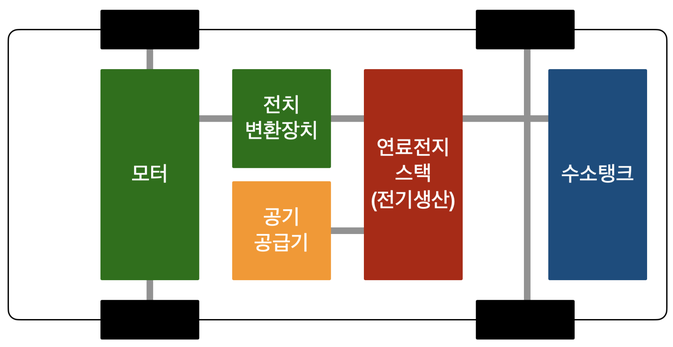


Fig. 01. 수소연료전지차

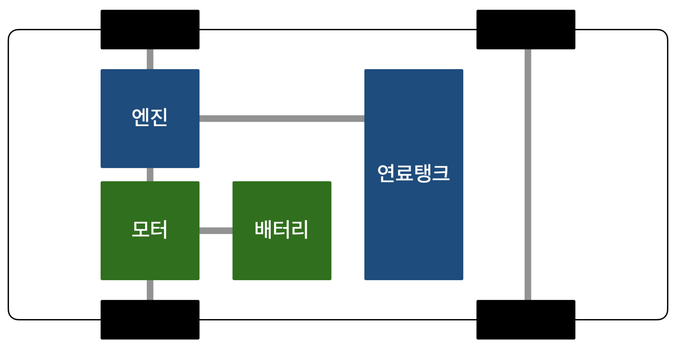


Fig. 02. 하이브리드차

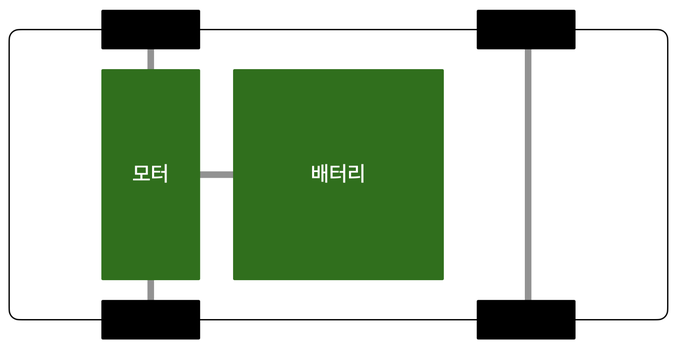


Fig. 03. 전기차

① **수소연료전지차:** 연료전지 시스템을 기반으로 수소와 산소의 전기화학 반응을 통해 전기를 생산하여 모터 구동. 주행 중 물만 배출하는 이상적인 무공해 차량으로 여겨지지만, **수소 생산 방식에 따라 전과정 환경성에 큰 차이가 있음**. 천연가스를 개질하는 방식은 온실가스 배출이 높고, 반면 재생에너지를 이용한 전기분해 수소는 탄소 배출이 적음.

② **하이브리드차:** 내연기관과 전기모터를 함께 사용하는 이중 동력 시스템으로, 주행 효율 극대화. PHEV는 외부 충전을 통해 무배출 주행이 가능하나, **배터리 생산 과정에서의 환경부담과 재활용 문제가 중요한 변수**. 차량 운행 중에는 배터리의 효율과 전환 전략에 따라 온실가스 배출량이 변화하며, 전기차와 비교할 때 부분적인 환경성 보장.

③ **전기차:** 배터리에 저장된 전기로 모터를 구동하며, 주행 중 오염물질을 배출하지 않음. 하지만 전력 생산 방식, 특히 **석탄 기반 전력 비중이 높은 지역에서는 환경성이 저하**될 수 있으며, **배터리 제조 및 폐기 과정에서의 환경영향**도 고려해야 함. 특히 배터리의 재활용 기술 수준과 정책이 환경 성과에 큰 영향.

Ⅱ. 본론 - LCA 기반 환경성 비교 분석

Table 01. 온실가스 배출량에 따른 차량 유형별 환경성 비교 분석

순위	차량 유형	GWP(kg CO_2-eq/km)	주요 요건	비고
1	그린 수소차	0.05	재생에너지 기반 전기분해 수소 사용	전력 유래 배출 거의 0, 가장 친환경적
2	전기차(EV)	0.21	한국 전력 재생에너지 10% 기준	수소연료전지차 대비 5~10% 낮은 배출
3	수소연료전지차	0.23	천연가스 개질 수소 사용	전력 믹스 영향 큼
4	하이브리드차	0.25	내연기관 효율 향상형	ICE 대비 20% 감소
5	내연기관차	0.32	휘발유/디젤 사용	기준 대비 약 100% 배출

본 연구는 ISO 14040/14044 기준에 따라 LCA 분석을 수행하고, 각 차량의 전과정 온실가스 배출량(GWP)을 중심으로 정량 비교했다. 기본 분석에는 한국의 전력 생산 구조(2025년 기준, 재생에너지 비율 약 10%)를 반영했다. 이 조건에서 전기차는 1 km당 약 0.21 kg CO_2-eq을 배출하며, 이는 천연가스 개질 수소를 사용하는 수소연료전지차 대비 약 5~10% 낮은 수치이다. 반면, **태양광 또는 풍력 기반의 전기분해 방식으로 수소를 생산하는 '그린 수소'가 상용화될 경우, 수소연료전지차의 환경성이 전기차보다 우수해질 수 있으며, 이는 수소연료전지차의 전력 유래 배출이 거의 0에 가까운 조건에서 가능**해진다. 하이브리드차는 내연기관 효율 향상을 통해 기존 ICE 대비 평균 20% 가량 온실가스 배출이 감소했으나, 배터리의 생산 및 수명주기 내 영향으로 인해 여전히 전기차 및 수소연료전지차보다 높은 배출량을 기록할 것으로 보인다. 또한, 본 연구는 배터리 재활용 시나리오에 따른 환경성 개선 효과를 분석했다. 기존 연구에 따르면 **재활용률이 50%를 초과할 경우 전기차의 전체 GWP는 약 15% 감소하며, 특히 ECU(전자제어장치) 회수 시 14.7%, 플라스틱 회수 시 2.7%의 환경적 이득이 추가적으로 발생**한다는 분석이 존재한다.

Ⅲ. 결론

본 연구는 전과정평가를 기반으로 수소연료전지차, 하이브리드차, 전기차의 전과정 환경영향을 비교·분석함으로써, 각 기술의 장단점을 객관적으로 도출하고 탄소중립 사회 실현을 위한 시사점을 제안했다. 분석 결과, **단순히 주행 중 온실가스 배출량만으로 친환경성을 판단하는 것은 제한적**이며, 에너지 생산 방식의 차이, 배터리 및 연료 생산에서의 환경 부담, 재활용 체계의 성숙도 등 수명주기 전반의 요인들을 통합적으로 고려해야 신뢰성 있는 기술 평가가 가능하다는 점이 확인되었다.

이러한 분석을 바탕으로, 본 연구는 다음과 같은 정책적 시사점을 도출했다. ① **첫째,** 전기차의 친환경성은 전력 생산 구조의 탄소 배출 수준과 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 전기차 보급 정책은 재생에너지 확대 전략과 반드시 병행되어야 하며, 이를 위한 구체적인 에너지 전환 로드맵이 국가적 차원에서 수립되어야 한다. ② **둘째,** 수소차의 경우 수소 생산 방식에 따라 전과정 배출량이 극명하게 달라지므로, 그린 수소 생산 인프라 구축과 수소 유통 시스템의 효율화가 환경성과를 결정짓는 핵심 변수가 된다. ③ **셋째,** 배터리 생산에 따른 환경부하를 줄이고 자원 효율성을 제고하기 위해 배터리 회수 및 재활용 기술 투자와 제도적 기반 마련이 시급하다.

향후 연구에서는 배터리 기술의 진보, 수소 생산의 탈탄소화, 전력망의 재생에너지 전환율 변화 등 기술적·정책적 변수들을 반영한 통합 시나리오 기반 평가가 이루어져야 한다. 본 연구는 친환경 차량 기술의 환경성과를 객관적이고 종합적으로 비교함으로써, 지속가능한 교통수단의 선택과 국가 차원의 탄소중립 전략 수립에 유의미한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.