

탄소배출 제로에 기여할 수 있는 수소내연기관의 잠재력

정기대 수석연구원, 신성장연구실 (kdchung@posri.re.kr)

Summary

- 온실가스 배출 규정은 시간이 지날수록 강화되고 있으며, 주요 배출처인 수송차량에 대한 각국의 규제 역시 전례 없이 강화되고 있다.
- 현재 수송차량의 탄소배출 제로를 가능하게 하는 파워트레인 기술은 네 가지로 배터리, 수소연료전지, 수소내연기관, 바이오/합성연료내연기관이다.
- 수소내연기관자동차가 궁극적인 해결책이 되기는 어렵겠지만 기존 내연기관 기술과 수소공급망을 활용하면 친환경 포트폴리오 내 비중을 확대할 수 있다.
- 수소내연기관자동차의 배터리전기자동차 대비 장점은 작은 공간을 필요로 하며, 상대적으로 에너지 충전 시간이 짧고, 열 및 진동에 대한 내구성이 강하다는 점이다.
- 수소내연기관과 수소연료전지 기술은 상호 경쟁할 수 있는 분야도 있지만, 두 기술 모두 수소활용의 비중을 높이고 서로 도움이 될 가능성이 커 보인다.

1. 수송차량, 온실가스 배출 규제의 주요 Target

- 수송차량에 대한 CO₂ 배출 규정은 시간이 지날수록 강화되고 있음
 - 각국은 트럭에 대한 CO₂ 배출 규정을 강화 중
 - 유럽, '30년부터 새로운 트럭의 CO₂ 배출량을 '19년 대비 30% 저감 요구
 - 미국, '27년까지 CO₂ 배출 목표를 '10년 수준보다 46% 감축
 - 미국, 15개 주(캘리포니아 주(州)가 주도)에서 '30년까지 판매되는 트럭의 30%를 배기가스 제로(zero) 차량으로 생산해야 한다는 의무 규정 설정
 - 중국, '21년부터 '12년 대비 대형 트럭의 배출량 24% 감축 요구. 중국이 최근 발표한 '60년까지 순 배출 제로 목표를 감안하면 추가 감축 목표 설정 가능성 높음
 - 지난 2년간 주요 광산업체들도 수송차량과 작업차량에 대한 Scope 1과 2* 관련 CO₂ 중립 목표를 발표하는 등 탈탄소화 목표를 제시
 - 앵글로 아메리칸과 Fortescue는 '19년과 '20년에 각각 Scope 1, 2 CO₂ 중립 목표를 발표. BHP, 리오틴토, Teck, 그리고 Vale는 '50년까지 도달한다는 목표 수립
 - 광산의 Scope 1, 2 온실가스 배출량의 약 30%는 디젤엔진에 의해 발생. 주로 덤프트럭, 화물차, 도저(dozor), 굴착기와 같은 광산 차량에서 발생. 이러한 차량의 CO₂ 배출량을 0(zero)으로 줄이려면 CO₂ 배출량이 0(zero)인 차량으로의 대대적인 전환 필요
 - * Scope 1: 온실가스 직접 배출량(자원 추출 과정에서 직접 발생하는 배출량)
 - Scope 2: 전기 등 에너지 사용으로 인한 배출량

2. 수송차량의 탄소배출 제로를 가능하게 하는 4가지 기술

- 배기가스 제로 파워트레인 기술 네 가지
 - 대표적 배기가스 배출 제로 기술은 배터리전기자동차(BEVs), 수소연료전지전기자동차(FCEVs), 수소내연기관(H2-ICEs), 바이오/합성연료내연기관임

- 하이브리드 및 가스 엔진은 중기적으로 배기가스 배출을 줄이기 위한 전환 기술이지만 자체로는 배기가스 배출 0(zero)를 달성할 수 없음
- 네 가지의 제로 배기가스 배출 기술은 장점과 단점이 서로 다르기 때문에 차량 종류에 따라 적합성이 다름

[배기가스 제로 파워트레인 기술 비교]

	바이오/합성연료	수소내연기관 (H2-ICE)	수소연료전지	배터리
배출가스				
CO ₂ 배출	사용 바이오매스/ 탄소에 따라 다름	제로/소량 CO ₂ 그린/블루수소 사용 시	제로/소량 CO ₂ 그린/블루수소 사용 시	그리드 믹스에 좌우: 신재생전원 사용하 면 CO ₂ 제로
공기 품질	NO _x 디젤과 유사 한 입자 물질 방출	NO _x 배출 거의 없음 SCR 처리 후	배출 제로	배출 제로
보유비용				
효율 (wheel to wheel)	~20%	~30% 그린수소 생산	~35% 그린수소 생산	75-85%+ 전송/충전 손실 연동
파워트레인 자본지출	현재 내연기관 수준	디젤엔진과 유사한 수준 단 수소탱크 필요	높은 자본지출 배터리전기차보다 확장 용이	대형배터리 필요한 경우 높은 자본지출
제약조건	현재 내연기관과 유사한 크기와 중량	현존 엔진과 유사한 크기 단 수소탱크 필요	내연기관보다 넓은 공간 필요 연료전지/수소탱크	내연기관보다 무거운 중량
시간(충전/주유)	<15분 탱크크기에 좌우	<15-30분 탱크크기에 좌우	<15-30분 탱크크기에 좌우	3+ 시간 고속충전소 사용 시 시간 단축
기반시설 비용	기존 기반시설 이용 가능	수소 배송과 충전기반시설 필요	수소 배송과 충전기반시설 필요	충전 기반시설과 그리드 항상 필요

■ 고성능 ■ 중-고성능 ■ 중-저성능 ■ 저성능

* 출처: McKinsey('21) 수정

주: SCR(Selective catalytic reduction), 선택적 촉매환원

[CO₂ 배출량] 네 가지 기술 모두를 배기가스 제로라고 구분하였지만, 전기, 수소 또는 합성연료를 생산하는 과정에서 발생하는 CO₂ 배출량은 상당히 다를 수 있음. BEV는 재생 전력으로만 충전되는 경우 탄소 중립적이지만, 현재 대부분의 지역에서 그리드 전기를 충전할 때 탄소 배출량이 높음. 수소 또한 생산 방법에 따라 CO₂ 배출량이 매우 다름. 바이오/합성연료의 탄소 배출은 각각 바이오매스와 탄소의 공급원에 따라 달라짐

[대기질] BEV와 FCEV는 배기관이 필요 없지만, H2-ICE는 디젤엔진과 유사한 후처리가 필요한 질소산화물(NOx)을 배출(바이오/합성연료는 NOx와 입자 물질 배출). 일부 H2-ICE 생산자들은 NOx 배출량이 디젤엔진보다 훨씬 적어 친환경적이라고 주장. 이러한 엔진이 도시 상황에 적합한지 아니면 지하 채광에 적합한지는 정확한 배출 수준과 지역 대기 오염 규제에서 허용하는 한계값에 따라 달라짐

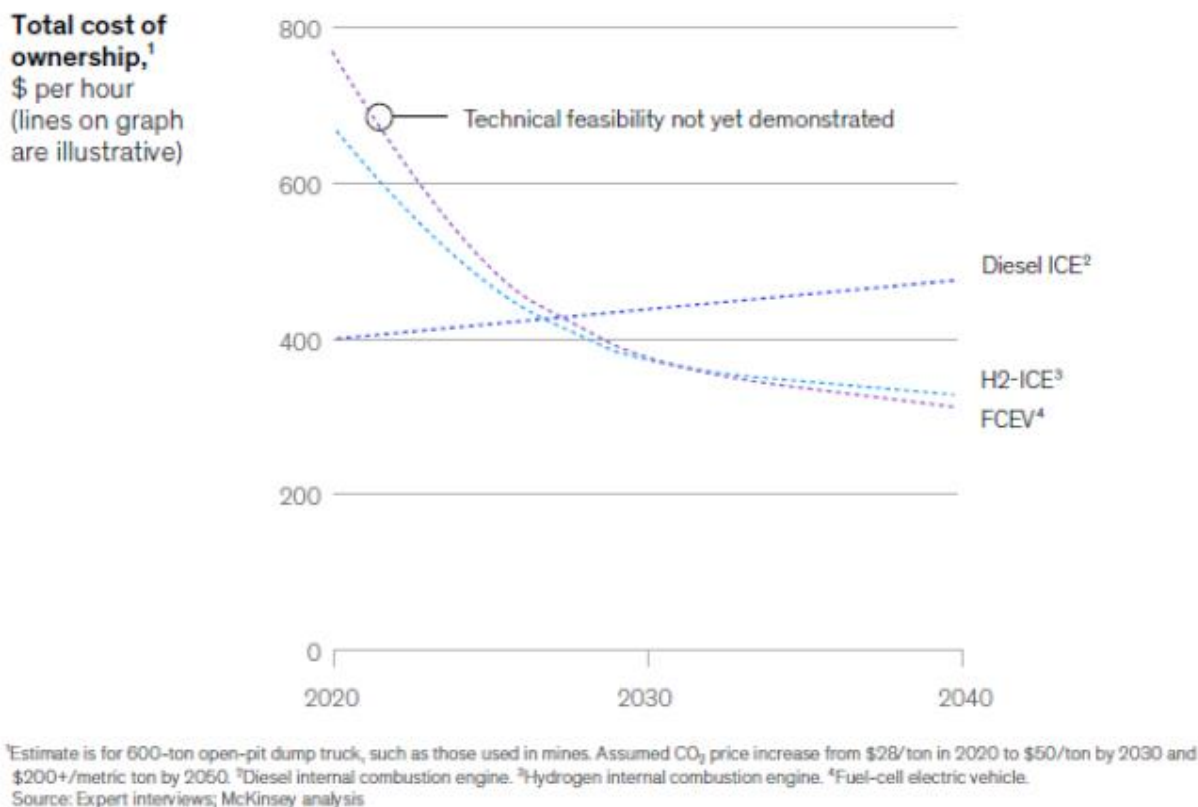
[효율성] 연료탱크-휠(Tank-to-wheel) 효율은 BEV 75~85%, FCEV 약 50%, 내연기관 약 40~45%. 유정-휠(Well-to-wheel) 기준으로 전기에서 수소를 생산하는 것과 수소에서 합성연료를 생산하는 것의 변환 손실을 고려할 때, 효율은 FCEV 약 35%, H2-ICE 약 30%, 합성연료 약 20% 수준임

[파워트레인 자본지출] 고효율의 BEV는 고가의 배터리를 수반하는 반면, 효율이 낮은 수소 및 바이오/합성연료는 오늘날의 디젤엔진과 대체로 동일한 단순 내연기관에서 연소. 따라서 총보유비용(TCO)을 최소화하는 초기 자본 비용과 지속적인 연료 소비 간의 최적 균형은 차량 유형과 사용 환경에 따라 크게 다름. 예를 들어 차량 크기와 중량에 따라 필요한 파워트레인 및 연료 소비량이 결정됨. 전기, 수소 및 바이오 연료의 가용성과 비용, 그리고 해당 충전 또는 급유 인프라를 포함한 지역 시장의 조건이 반영되어야 함

[다른 제약요인들] 효율과 자본지출/비용 외에도, 파워트레인의 TCO를 형성하는 데 추가적인 요인이 작용. 배터리는 충전 시간이 더 많이 필요하고 이로 인해 가동시간이 감소하여 24시간 운영이 필요한 사용 환경에서는 TCO에 영향을 줌. 배터리는 무겁고 수소연료전지와 H2-ICE는 큰 탱크가 필요. 따라서 공간이 협소한 차량에는 에너지 밀도가 높은 바이오/합성연료로 선택이 제한됨

☞ 따라서 H2-ICE는 광산 덤프트럭을 포함한 다양한 환경에서 실행 가능한 파워트레인 옵션이 될 수 있음

[덤프트럭 유형별 총보유비용 비교: 디젤엔진, 수소내연기관, 수소연료전지]



- 덤프트럭의 경우 '30년 이전 수소·경유 내연기관 TCO가 유사해질 것으로 전망

○ 수소내연기관(H2-ICE)이 궁극적 해결책이 되기는 어렵겠지만, 기존 기술과 공급망을 활용하여 중요한 틈새를 메울 수 있음

- 수소내연기관은 수소-산소 혼합물을 사용한 1806년식 드 리바즈(de Rivaz) 엔진까지 거슬러 올라가는 오랜 역사를 가지고 있지만, 네 가지 배기가스 제로 배출 기술 중 수소연소는 여전히 초기 단계. 수소내연기관에 대한 오랜 무관심으로 수소 관련 비용이 높아 파워트레인이 아직 비경제적이기 때문임.
그러나 오늘날 일부 자동차 OEM, 부품 공급업체 및 신생 업체들은 배터리 및 수소연료전지와 함께 미래의 파워트레인 포트폴리오에 추가 구성 요소로서 수소내연기관을 고려 중
- 배터리와 수소연료전지 차량은 놀라운 발전에도 불구하고 아직은 혹독한 환경에 필요한 매우 높은 전력 요구조건을 충족시키지 못하고 있음. 예를 들어 채굴 트럭은 수 많은 전력이 필요하고, 24시간 가동에 공기 중의 먼지뿐 아니라 극심한 진동과 열 발생에 노출됨.
내연기관은 수십 년 동안 이러한 요구 사항을 충족시켜 왔으며, 디젤에서 수소로 전환하는 것은 추가적인 기술혁신으로 엔진에서 발생하는 탄소를 제거하는 간단한

접근방법임

- 배터리와 수소연료전지를 기술적으로 활용 가능한 곳에서도 H2-ICE 적용 가능. 비교적 낮은 자본비용, 수소 가격 하락, 고부하에서의 비교적 높은 효율성으로 H2-ICE는 TCO 측면 경쟁력 있는 솔루션이 될 수 있음. 또한, 수소, 액화천연가스(LNG) 또는 디젤(수소 가스 혼합)로 구동될 수 있기 때문에, 수소 공급과 기반 시설이 아직 미비한 차량 부문을 탈탄소화시키는 데 도움이 될 수 있음
- 이러한 고려 사항 외에도 H2-ICE는 자동차 OEM과 부품 공급업체에게 다른 이점을 제공.
현재 엔지니어링 노하우와 일자리를 활용할 수 있으며, 자동차 업계의 기존 공급망과 생산용량을 활용 가능하고, 회토류 의존도가 낮은 점 역시 H2-ICE를 매력적인 기술로 부각시킴

○ 상호 보완적인 수소내연기관(H2-ICE)과 수소연료전지(FCEV)

- 수소내연기관에 대한 한 가지 우려는 수소연료전지와와의 경쟁. 그러나 두 기술이 경쟁할 수 있는 분야도 있지만, 두 기술 모두 수소의 비중을 높이고 서로 도움이 될 가능성이 높음
- 두 파워트레인의 경우, 수소충전소의 가용성과 수소비용이 핵심요소. 두 파워트레인은 대부분 동일한 인프라를 요구. 따라서 각 H2-ICE 차량은 FCEV의 비용을 낮추는 데 도움. 두 파워트레인이 동일한 수소-탱크 기술을 공유하고 R&D 및 자본비용을 상각할 수 있다면, 수소차량의 비용곡선이 낮아지고 두 솔루션의 경쟁력이 모두 강화될 것임
- 글로벌 운송부문에서 배출량 제로를 달성하는 것은 엄청난 과제이지만, H2-ICE는 FCEV와 BEV에 보완 솔루션을 제공. H2-ICE의 장점은 공간 요구 사항 감소, BEV 트럭에 비해 짧은 급유 시간, 열 및 진동에 대한 강한 내구성 등임
- 적용에 유리한 분야는 견인 트럭과 같은 경량 차량, 소방차와 같은 중형차, 콘크리트 트럭과 같은 중량 차량, 크롤러/도저/굴착기/덤프 트럭 같은 광산 및 건설 차량, 수확 기계 및 트랙터와 같은 농업용 차량 등
- 차량 OEM, 엔진 공급업체, 엔지니어링 서비스 업체 및 H2-ICE 신생업체를 포함한 여러 업체들은 이미 제로 배출 솔루션 오퍼링의 일환으로 H2-ICE를 조사 중. 배터리와 수소연료전지 관련 기술을 개발하는 데 필요한 추가 R&D 자원과 H2-ICE 잠재력을 비교 중. 파워트레인의 미래 포트폴리오는 복잡하겠지만 H2-ICE를 추가할 필요 있음

3. 토요타자동차의 행보에 주목할 필요

☞ 탄소 중립을 달성하기 위한 다양한 아이디어가 창출되는 과정에서 수소 활용 측면에서 자동차 내연기관에 기존에 활용하던 휘발유/디젤/LPG 외에 수소를 사용하자는 생각으로, 수소활용내연기관도 미래 파워트레인 포트폴리오 후보로 간주

☞ 수소를 전기로 전환하지 않고 열에너지로 직접 활용하겠다는 아이디어는 주로 발전분야에서 가스터빈 적용과 관련해 주목해왔음. 현재 천연가스가 주로 활용되는 발전용 가스터빈에 수소를 혼소(혼합연소)하는 방안이나 수소전용터빈에 대한 연구와 실증이 활발하게 진행 중임

☞ 내연기관에 수소를 주입하여 친환경성을 최대한 살리자는 아이디어는 과거 BMW가 적극 채용하여, 1979년 가솔린과 수소 혼합연료 수소자동차를 개발하였고 2000년대 중반에는 7시리즈를 개조한 Hydrogen 7을 발표하였으나 후속 자동차는 개발되지 않고 있었음

☞ 수소내연기관자동차에 대한 진전이 거의 없다가 올해 4월 토요타자동차가 수소내연기관 개발에 착수하였다는 발표를 한 상황. 토요타자동차의 시도가 성공한다면 새로운 대규모 수소 활용처가 생기는 것이기 때문에 토요타자동차의 행보에 대한 모니터링과 관심 필요

이 자료에 나타난 내용은 포스코경영연구원의 공식 견해와는 다를 수 있습니다.

[참고자료]

- McKinsey & Company, '21.6, “How hydrogen combustion engines can contribute to zero emissions”
- 오토저널, '20.7.24., “전기과 수소의 시대, 내연기관을 포기할 것인가?”
- 지앤이타임즈, '21.5.3., “수소로 친환경 내연기관차 부활할 수 있을까?[이영재 박사의 ‘환경 그리고 자동차’②]”
- AutoView, '20.4.28., “BMW, 다시 소수에 관심 내비쳐”
- Motor Magazine, '21.5.3., “수소에 진심인 토요타, 내연기관의 새로운 미래가 그려질까?”