

# 건설·산업기계용 수소 연소 엔진 기술 Hydrogen Combustion Engine Technology for Construction·Industrial Machinery

김준석 · 한성현 · 배정태

Joonsuk Kim · Sunghyun Han · Jeongtae Bae

## 1. 수소 연소 엔진 소개

강화되는 동력원 대상 환경 규제와 일부 건설현장에 적용되는 장비 대상 신규 규제로 인해 건설·산업기계 또한 빠르게 친환경 동력원에 대한 기술 개발이 이루어지고 있다.

동력원 대상 환경 규제의 경우 주로 질소산화물, 일산화탄소, 입자상물질, 미연탄화수소 계열의 배출량에 대해 규제하였고, 신규 규제가 적용될 때 규제치를 낮춰 동력원의 환경성 개선을 유도하였다. 특히 최근에는 향후 시행될 미국 Tier 5 차기 규제의 기존 Tier 4 규제 대비 질소산화물 및 입자상물질의 추가 저감 컨셉 발표를 통해 규제치의 대폭 강화를 예고하였다.

기존에 적용된 미국의 Tier, 유럽의 Stage와 같은 동력원 대상 환경 규제의 경우 일산화탄소와 입자상물질 등 탄소 포함 물질을 규제대상에 포함은 하였

으나 이산화탄소를 필두로 한 탄소배출을 중점적으로 규제하지는 않았다. 그러나 최근 극심한 기후변화의 심각성에 대한 세계적 공감과, 이에 따른 지속가능한 사회의 실현을 위해 대한민국을 포함하여 EU, 중국, 일본 등 주요국들이 탄소중립을 선언했다.

2050년 탄소중립 실현을 위해 본격적인 탄소배출 감축이 각국에서 이행 중이며, 일환으로 탄소배출을 중점 규제대상으로 하는 다양한 규제들이 적용 또는 적용 예정이다. 전 세계 온실가스 배출량의 10% 이상, 에너지 사용 기준 이산화탄소 배출량의 38% 이상이 발생하는 건설 부문<sup>3)</sup> 또한 유럽을 중심으로 Fossil Free Construction site, Zero Emission Construction site를 통해 탄소중립 또는 무공해 동력원 탑재 건설기계 사용 의무현장을 운영 혹은 운영 예정에 있다.

탄화수소계 연료를 사용하는 기존 연소 엔진은 연료에 포함된 탄소에 의해 연소생성물로 반드시 탄소를 포함한 물질을 생성한다. 따라서 탑재형 탄소포집 기능이 있는 후처리장치가 없다면 Tank to Wheel 관점의 탄소중립은 기존 연소 엔진으로 구현이 불가능하다. 이러한 탄소중립 관점에서의 탄화수소계 연료가 지닌 한계를 극복하고, 기존 연소 엔진의 다양한 장점은 다가올 탄소중립시대에도 이어가기 위해 무탄소 연료를 사용하는 연소 엔진 기술개발이 주목받고 있다.

무탄소 연료는 연소생성물로 탄소 포함 물질을 생성하지 않아 연소 엔진에서 Tank to Wheel 관점의 탄소중립 실현이 가능하다. 물론, 현시점에서 탄화수소계 물질을 포함한 엔진 오일의 미량 연소, Urea-SCR

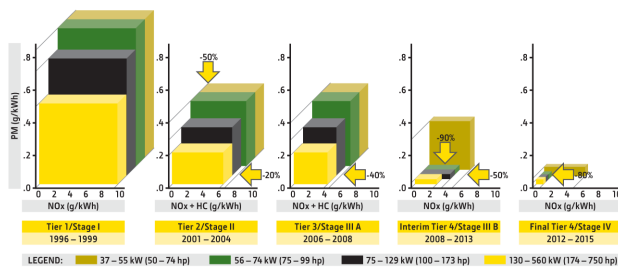


Fig. 1 미국·유럽 비도로 배출가스 규제 동향<sup>1)</sup>

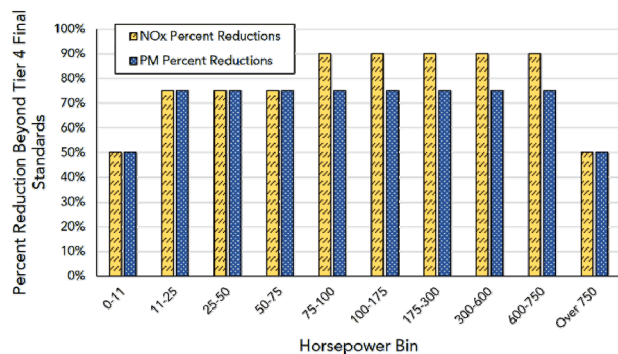


Fig. 2 Tier 5 규제 추가 저감 컨셉<sup>2)</sup>



Fig. 3 Zero Emission Construction Site<sup>4)</sup>

Table 1 수소-가솔린 특성 비교<sup>5)</sup>

성질	수소	가솔린
물 질량	2.015	110
이론 공연비	34.3	14.6
최소 점화에너지 (mJ)	0.02	0.24
점화 온도 (K)	858	530
단열 불꽃 온도 (K)	2384	2270
불꽃 속도 (293K, cm/s)	237	41.5
가연 한계 (공기 중 vol%)	4.1-75	1.5-7.6
소염 거리 (cm)	0.06	0.2
저위 발열량 (MJ/kg)	120	44
확산 계수 (이론 공연비, cm <sup>2</sup> /s)	0.61	0.05

Table 2 KEYOU 수소엔진 유해배출물질 결과<sup>6)</sup>

엔진종류	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	HC	CO
	g/kWh				
H2-PFI	0.08	0.046	0.002	0.01	0.01

을 사용 시 Urea 분해 과정에서 극소량의 탄소포함 물질이 배출되나 이는 탄화수소계 연료 연소 엔진에 비해 매우 미미한 수준이다.

수소는 각광받는 무탄소 연료 중 하나이다. 수소는 연료전지의 연료로 잘 알려져 있으나 연료전지의 전기화학반응뿐만 아니라 연소 엔진, 특히 불꽃점화 엔진의 연소반응을 위한 연료로서도 좋은 특성을 지닌다.

이러한 수소를 연료로서 연소시켜 출력을 내는 수소 연소 엔진은 탄소배출 관점에서 1 g/kWh 미만의 이산화탄소 배출이 가능한 무탄소 동력원이며 유해 배출물질 관점에서 동급 경유엔진 대비 질소산화물, 입자상물질, 미연탄화수소, 일산화탄소 등의 대폭 저감이 가능한 친환경 동력원이다.

수소 연소 엔진은 연료 분사 방식에 따라 PFI(Port Fuel Injection)과 DI(Direct Injection)로 구분된다. PFI는 수소 연료를 흡기 포트에 분사하는 방식으로 분사 압력이 낮고 DI에 비해 시스템 개발·구성 난이도가 비교적 낮으며 원가가 저렴하지만 엔진의 비출력 및 열효율이 높지 않고 연소 제어가 어려운 단점이 있다. DI는 수소 연료를 연소실 내부에 직접 분사하는 방식으로 분사압력이 높고 분사기 및 연료공급계 등의 개발·구성 난이도가 높으나 엔진의 비출력과 열효율이 높으며 연소제어 측면에서 용이한 장점이 있다.



Fig. 4 PFI 방식 (좌), DI 방식 (우)<sup>7)</sup>

수소 연소 엔진은 동력 특성 상 중부하 이상에서 높은 열효율로 운전이 가능하다. 따라서 부하가 낮은 영역에서는 수소 연료전지에 비해 낮은 열효율을 보이나 중부하 이상에서는 유사한 수준의 높은 열효율 달성이 가능하다. 즉, 수소 연소 엔진 적용 측면에 있어 중·고부하 작업이 빈번한 건설·산업기계의 경우 수소 연소 엔진을 통해 타 적용분야 대비 높은 수준의 열효율 달성이 가능할 확률이 높다. 또한 수소 연소 엔진은 현재 기술수준 기준, 다른 차세대 동력원인 배터리 전기식·수소연료전지 전기식에 비해 내구성능 확보에 이점이 있고, 특히 귀금속·희토류 사용량이 적으며 기존 엔진 산업 기반을 활용할 수 있어 대량 생산 시 비교적 낮은 단가로 공급이 가능한 이점이 있다.

## 2. 수소 연소 엔진 개발동향

수소 연소 엔진은 배터리 전기식·수소연료전지 전기식 대비 경쟁력이 높을 것으로 예상되는 고효율 엔진 위주로 평균 부하율 및 고효율 운전 빈도가 높은 환경에 적용을 목표로 기술개발이 진행되고 있다.

국내의 경우 연구 목적의 차량용 소형 수소 엔진 연구는 일부 진행되었으나 상용화 수준의 건설·산업기계용 수소 연소 엔진 시스템 개발 성과는 전무하며 현재 HD현대인프라코어 주관의 산업통상자원부 ‘건설기계용 상용차용 300 kW급 Zero-CO<sub>2</sub> 수소 연소 엔진 시스템 및 저장 공급계 개발’ 사업을 통해 상용화를 목표로 수소 PFI 연소 엔진을 개발 중에 있다.

해외의 경우 수소 PFI 연소 엔진은 여러 업체에서 양산 계획을 발표하며 상용화 단계에 진입했으며 DI 방식 또한 다방면으로 연구개발이 진행 중이다.

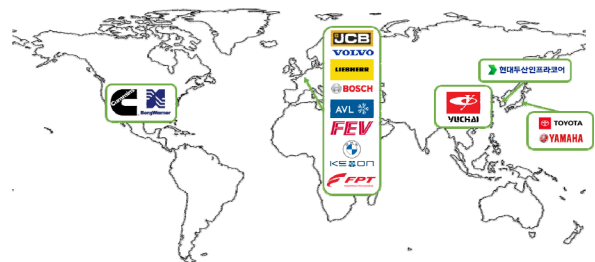


Fig. 5 수소 연소 엔진 주요 개발사 현황

Table 3 주요 수소 연소 엔진 개발 현황

업체명	제원
HD현대인프라코어	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 11 L</li> <li>출력 : 300 kW</li> </ul>
커민스	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 6.7/15 L</li> </ul>
캐터필러	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 13 L</li> </ul>
KEYOU	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 7.8 L</li> <li>출력 : 210 kW</li> <li>'24년 양산계획 발표</li> <li>수소 PFI 엔진 및 수소 DI 엔진 연구개발 중</li> </ul>
AVL	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 12.8 L</li> <li>출력 : 350 kW</li> <li>기존 천연가스엔진 기반</li> <li>수소 전소 PFI, DI 엔진 외 디젤 극미량 혼소 방식 연구 또한 진행</li> </ul>
도요타-야마하	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 5 L</li> <li>출력 : 331 kW / 6,800 RPM</li> </ul>
도요타	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 1.6 L</li> <li>수소 DI 엔진</li> </ul>
Yuchai	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 5.1 L</li> </ul>
JCB	<ul style="list-style-type: none"> <li>배기량 : 4.8 L</li> <li>출력 : 70 kW</li> </ul>

### 3. 수소 연소 엔진 개조 기술개발

수소 연소의 경우 수소 전용으로 설계된 엔진이 아니라도 기존 운행 장비에 탑재된 엔진의 개조를 통해 적용하는 방안도 고려할 수 있다는 장점이 있다. 물론 이러한 경우 수소 전용 엔진 대비 개조 엔진은 성능 측면에서 불리한 면을 가질 확률이 높다. 본 건설기계부품연구원은 기존 탄화수소계 연소 엔진을 활용하여 연료 공급계와 ECU 캘리브레이션을 통해 수소 연소 엔진 개조 기술의 가능성을 확인하였으며 현재 성능 개선을 위한 연구를 진행 중에 있다.

#### 3.1 시험 구성

소형 LPG SPI 엔진과 가솔린 PFI 엔진을 대상으로 개조 기술의 가능성을 확인하였다. 수소 연소 운전을 위해 기존 엔진 시스템에서 LPG SPI 엔진의 경우 공급 연료만 수소로 변경하였으며 가솔린 PFI 엔진의 경우 인젝터를 수소 전용 PFI 인젝터로 교체 및 기존 ECU로 교체 인젝터 구동을 위해 인젝터 드라이버를

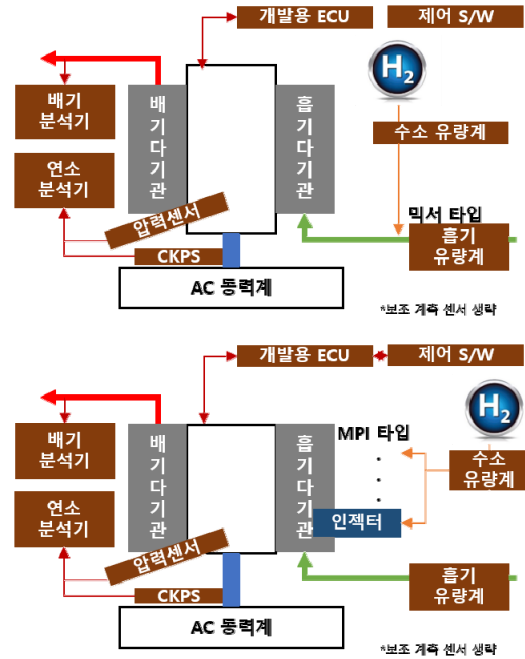


Fig. 6 시험 구성 도해

추가하였다. 그 외 하드웨어 상 기존 부품을 일부 조정된 부분은 있으나 신규 부품의 추가 혹은 적용은 없으며 수소 연료 운전을 위해 ECU는 수소 연소 특성에 맞게 새로 캘리브레이션을 진행하였다.

#### 3.2 시험 결과

소형 LPG SPI 엔진과 가솔린 PFI 엔진 모두 안정적인 수소 연소 운전은 구현할 수 있었다. 다만 수소의 낮은 부피기준 저위발열량과 LPG SPI 엔진의 경우 역화 회피를 위한 연료-공기 혼합기의 희박 운전으로 인해 최고출력은 기존 LPG 연료대비 51 %, 가솔린 PFI 엔진의 경우 기존 가솔린 연료대비 75 % 수준으로 감소하였다.

연소 안정성 측면에서 수소 연료의 연소 특성으로 인해 IMEP COV(%) 기준으로 최고출력 조건 기준 LPG SPI 개조 엔진과 가솔린 PFI 개조 엔진 모두 2

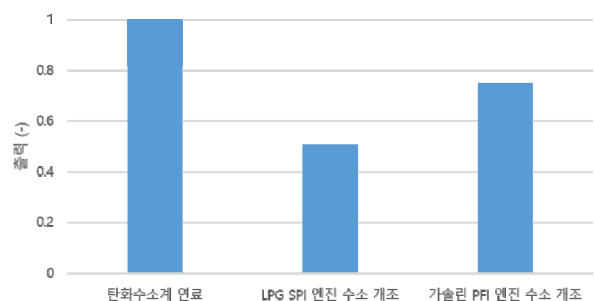


Fig. 7 수소 개조 시 최고출력 비교

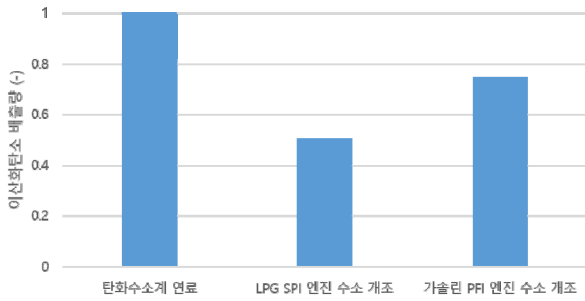


Fig. 8 수소 개조 시 이산화탄소 배출량 비교

% 미만의 높은 연소 안정성을 보였다. 배출가스의 경우 이산화탄소 배출량은 기존 탄화수소계 연료 운전 대비 99 % 이상 저감되었으며 모두 1 g/kWh 미만의 배출량을 나타내어 무탄소 운전 가능성을 확인하였다. 다만 질소산화물의 경우 최고출력 조건에서는 후처리가 필요한 수준의 배출량을 나타냈다.

#### 4. 정리

수소 연소 엔진은 기존 엔진식 건설·산업기계에 바로 적용 가능한 탄소중립 친환경 동력원이다. 배터리 전기식과 수소연료전지 전기식 동력원 대비 Tank to Wheel 관점의 환경성에 있어 다소 부족한 부분은 있으나 저렴한 가격과 높은 내구성능을 기반으로 탄소중립 동력원 확산에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 전망된다. 또한 기존 운행 장비에 탑재된 엔진의 개조 가능성도 높은 만큼 건설·산업기계의 탄소배출 저감에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 참고 문헌

- 1) “John Deere/Engines and Drivetrain/Diesel Engine Technology”, John Deere.
- 2) “CARB developing Tier 5 emissions standards for off-road engines”, 2021.11.5., Dieselnet.
- 3) “The Scandinavian way to zero-carbon construction/Cities like Oslo, Helsinki and Copenhagen are working to clean up one of the world's most high-emission industries”, 2021.6.23., BBC Future Planet

- 4) “Quiet, clean and green: discover Oslo’s zero-emissions construction site”, 2020.11.25., EUROCITIES
- 5) KIM, Joonsuk, et al. The effects of hydrogen on the combustion, performance and emissions of a turbo gasoline direct-injection engine with exhaust gas recirculation. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42.39: 25074-25087.
- 6) “The New Generation of Hydrogen Internal Combustion Engines”, 2020.9., KEYOU.
- 7) “Bosch Mobility Solution/Solutions/Powertrain/Gasoline/Gasoline Direct Injection”, Bosch Mobility Solution.

#### [저자 소개]



김준석

E-mail : jskim@koceti.re.kr

Tel : 063-447-2542

2020년 연세대학교 기계공학과 박사과정 졸업. 2019년 AVL KTC 산학파견연구원.

2020년~2021년 AVL KTC. 2021년 ~ 2022년 건설기계부품연구원 선임연구원.

2022년~현재 건설기계부품연구원 친환경동력연구실 그린연료동력연구그룹 그룹장. 엔진/차량 EMS calibration 및 수소 에너지 동력원 연구개발 분야 종사. 한국자동차공학회 대외협력이사/에너지 및 배기부문 부문이사, 공학박사



한성현

E-mail : hans34@koceti.re.kr

Tel : 063-447-2553

2016년 순천대학교 우주항공공학과 석사 졸업. 2016년 ~ 2022 한국자동차연구원

프리미엄자동차연구센터 연구원. 2022~현재 건설기계부품연구원 친환경동력연구실

전임연구원. 탈탄소엔진 성능 분석, 연료전지 열유동 분석, 전기차 일충전주행거리 및 연비 KOLAS 시험 평가 연구에 종사. 한국자동차공학회의 회원, 공학석사



배정태

E-mail : jtbae@koceti.re.kr

Tel : 063-447-2589

2022년 조선대학교 석사

2022년~현재 건설기계부품연구원 연구원