

# 무탄소 연료를 사용하는 엔진 개발에 대한 연구

원 현 우\*

대전대학교 IT 융합대학 IT 기계공학과

## Engineering Design Using Carbon Free Fuels on Internal Combustion Engines

Hyun-Woo Won\*

Department of IT Mechanical Engineering, Daejin University, Gyeonggi 11159, Korea

(Received 17 January 2024 / Revised 12 June 2024 / Accepted 15 June 2024)

**Abstract** : The energy transition driven by climate change inspires industries and scientists to develop zero CO<sub>2</sub> emission solutions for the transport sector collaboratively. Beyond the electrification of powertrains, H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>-derived fuels, also known as electro fuels or e-fuels, are gaining significant interest. Ammonia, one of the simplest electro fuels from the combination of H<sub>2</sub> with N<sub>2</sub> from the air, is considered a promising candidate and is expected to play a key role in the future H<sub>2</sub> economy as a direct fuel and as an H<sub>2</sub> energy carrier. Previous studies have indicated the potential and challenges of burning pure premixed hydrogen or ammonia in a spark ignition engine using 1D simulation and experimental activities on a single-cylinder engine. Accordingly, this study focused on engineering phases that aim to develop carbon-free fuel engines with prospects and possibilities.

**Key words** : Alternative fuels(대체연료), Carbon-free fuels(무탄소연료), Compression ratio(압축비), H<sub>2</sub>(수소), NH<sub>3</sub>(암모니아)

### Subscripts

AFR	: air fuel ratio
CA	: crank angle
CI	: compression ignition
GHG	: greenhouse gases
GWP	: global warming potential
IMEP	: indicated mean effective pressure
LBV	: laminar burning velocity
MBT	: maximum brake torque
RON	: research octane number
SI	: spark ignition
SIT	: spark ignition
TC	: turbo charger

### 1. 서론

현재 지구 온난화 현상을 저감하기 위한 노력은 과거 어느 때보다도 중요시되고 있다. 전체 GHG(Greenhouse gas) 배출의 25 %가 운송과 수송 수단에 의한 결과이고

이 중 상당 부분(70 %)이 지상 수송 수단에 의한 것이다. 이런 관점에서 무탄소 연료를 사용하는 엔진의 개발은 공기 중 이산화탄소량을 줄이는 획기적인 방법이라 하겠다.<sup>1,2)</sup> 기존 내연기관에 무탄소 연료 즉, 수소와 암모니아와 같은 연료를 사용하는 엔진 개발이 현재 활발히 진행되어지고 있다.<sup>3-7)</sup>

역사적으로, 수소와 암모니아는 차량의 연료로 사용하기 위해서 많은 연구가 시도되었다. 가장 오래된 제안은 Sir Goldsworthy Gurney가 제안한 소형 Locomotive 차량이고, 최초로 암모니아와 수소를 사용한 트럭이 Norsk Hydro사를 통해 1933년에 생산되었다.<sup>8)</sup> 이후에도 암모니아 차량의 생산이 많은 자동차 생산업체를 통해 이루어졌지만, 암모니아 연료의 낮은 착화성으로 인해 첨가 연료를 혼합하여 사용하는 경우가 대부분이었다.<sup>9,10)</sup> 암모니아 연료의 가능성에 대한 연구에서 암모니아만을 연료로 사용할 경우, 압축착화 방식에서는 높은 압축비

\*Corresponding author, E-mail: [energy@daejin.ac.kr](mailto:energy@daejin.ac.kr)

<sup>†</sup>This 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.

(35:1 이상)가 필요하다는 결론을,<sup>11)</sup> 불꽃점화방식(SI engine)을 기존의 CI 엔진의 압축비(CR 14:1-19:1)에 장 착함으로써 순수 암모니아 연료만을 사용하는 엔진 개발이 다소 낮은 압축비 엔진에도 가능하다는 연구를 발표하였다. 수소 연료의 경우, 연료 착화성은 암모니아에 비해 뛰어나지만, 연료의 자연착화의 위험성으로 인해 비교적 낮은 압축비(13:1 이하)를 갖는 SI 엔진에 적합하고 연료의 저장과 운반에 있어 고강도, 고압축 연료 탱크의 필요성이 과거 수소 엔진 상용화에 걸림돌이었다고 하겠다.

현재에도 수소와 암모니아같은 무탄소 연료를 사용하는 엔진에 대한 많은 연구<sup>12-18)</sup>가 진행되고 있으며 본 연구에서는 과거 수소 엔진과 암모니아의 단기통 엔진 실험 결과를 바탕으로 한 1D 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 무탄소 엔진의 특성, 고려할 사항들과 전망을 소개하고자 한다.

## 2. 엔진 연료로의 무탄소 연료

### 2.1 무탄소 연료의 특성

무탄소 연료를 차량용 연료로 사용하기 위해서는 우선적으로 연료가 갖는 특성을 이해할 필요가 있다. Table 1은 무탄소 연료들과 기존 연료들의 특성치들을 일반적인 연료 탱크의 형태를 기준으로 비교하였다. 같은 무탄소 연료인 수소 연료와 암모니아 연료를 비교하면 암모니아의 경우, 상온에서 비교적 낮은 압력하에 액상 연료로의 보관이 용이하고 부피당 에너지 밀도가 높아서 차량 연료로써 사용과 운송이 용이하다. 또한 연료의 높은 안티 노크성, 낮은 연소 온도와 기화 잠열로 인해 연소 중에 자연 발화(노킹)에 대한 위험이 적어 높은 압축비 엔진(압축비 25:1 이하)에서의 사용이 용이하다. 하지만 암모니아 연료가 악취와 독극성을 갖는 것과 낮은 연소 속도(LBV: Laminar Burning Velocity)와 낮은 착화성(Flammability)은 암모니아 엔진 개발에 있어서 풀어야 할 중요한 과제이다. 수소 연료의 경우, 무취성 연료이지만 고압축 연료탱크의 필요성과 안전성 확보가 필요하다는 점이 풀어야 할 과제이다. 연료의 연소적인 특성에서는 수소연료의 경우, 암모니아나 다른 연료에 비해 높은 연소 속도와 넓은 공연비 영역에서의 높은 착화성이 엔진 개발에 있어 장점이라 하겠다. 연료의 차량 적체 측면에 있어 무탄소 연료의 에너지 밀도가 기존 연료와 비교해 적은 부분은 연료 탱크 시스템 개발 과정에서 풀어야 할 추가 과제이다.

Table 1 Test fuel properties compared to diesel and gasoline

Fuel	Gasoline	Diesel	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>
Stoichiometric AFR	14.6	14.5	34.2	6.06
LHV [MJ/kg]	42.5	42.6	120.1	18.8
RON [-]	95	-	120	120
Storage temp.[°C]	25	25	25	25
Storage pressure [bar]	1	1	700	10
Fuel density [kg/m <sup>3</sup> ]	698.3	834	17.5	602.8
Energy density (storage) [MJ/l]	29.7	38.6	4.76	11.3
Flammability limits (equivalence ratio)	0.62-3.89	-	0.09-6.81	0.63-1.53
Heat of vaporization [kJ/kg]	180-350	450	461	1370
Laminar burning velocity [cm/s at ]	40	-	210	7
Auto-ignition temp. [°C]	275	210	537	651
Adiabatic flame temp [°C]	2392	-	2519	2107
Ab. Minimum ignition energy [MJ]	0.25	-	0.019	8

### 2.2 무탄소 연료 생산

무탄소 연료의 사용에 따른 엔진으로부터 배출되는 이산화탄소의 감소 뿐 아니라 연료 생산 과정에서 야기되는 에너지를 고려한 이산화탄소 생성량 감소 또한 환경적 측면에서 고려해야 할 중요한 사항이다. 최근 전파적 환경적 영향에 대한 평가를 통해 연료들의 생산과 사용에 따른 환경에 미치는 영향들이 비교되었다.<sup>19-22)</sup>

Fig. 1은 1 kg의 암모니아를 생산하는데 필요한 물질과 에너지 사용량을 정리하였다. 수소의 경우, 천연가스를 이용한 생성(그레이 수소)과 수전해를 이용한 생성(그린 수소)을 비교하였고 이에 필요한 재료량과 재생 에너지량을 보여준다. 또한 생성된 수소를 이용해 암모니아를 생성하기 위해 추가되어지는 질소와 에너지량을 보여준다. 수전해를 이용한 친환경 그린 수소 생성 과정에서 33 MJ(0.178 kg of H<sub>2</sub>)의 친환경 에너지가 요구되어지고 이를 이용하여 암모니아를 생산(1 kg of NH<sub>3</sub>) 하기 위해 추가적으로 5 MJ 이상의 에너지가 추가적으로 요구된다. 이를 기본으로 연료의 생산 방식에 따라 예상되는 이산화탄소의 생성량을 측정할 수 있는데 암모니아 연료의 경우 Fig. 2와 같이 정리된다. Fig. 2는 여러 경로로 생산되어진 암모니아의 생성과정에서의 GHG 배출에 대한 보고를 비교한 것이다. 이 결과는 지구 온난화 지수(GWP: Global Warming Potential)를 기본으로 측정한다

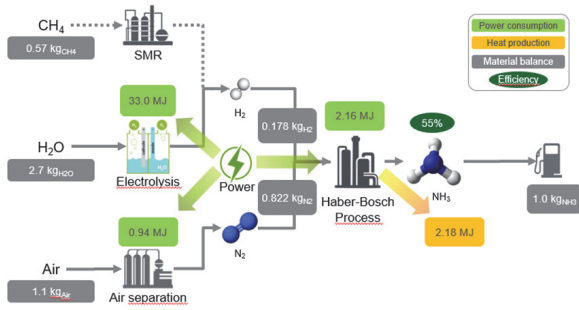


Fig. 1 H<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> production process(Material and energy balances)

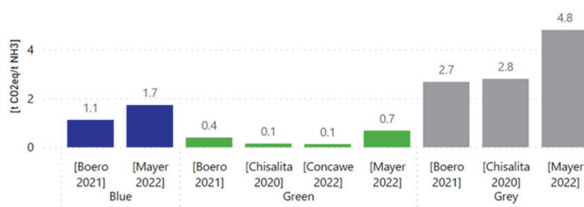


Fig. 2 Comparison of carbon intensity values of ammonia (measured as GWP100)

것인데, 이 치수는 다양한 가스의 지구 온난화 영향을 비교할 수 있도록 개발된 수치이다. 이는 1톤의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량에 비해 주어진 기간 동안 가스 1톤의 배출량이 얼마나 많은 에너지를 흡수하는지를 측정하는 것이다. 예를 들어 천연가스의 수증기 개질로 생성되는 그레이 수소를 사용하는 암모니아의 경우, GWP100 지수는 2.7-4.8 tCO<sub>2</sub>-eq/tNH<sub>3</sub> (50.5-89.8 gCO<sub>2</sub>-eq/MJNH<sub>3</sub>, LHV를 18.7 MJ/kgNH<sub>3</sub>로 가정할 때) 범위로 나타난다. 이 수치는 공정에 사용되는 기술 유형 및 전기 공급원, 그레이 수소의 탄소 포집 및 격리 시설과 연관되는 블루 수소를 사용하면, 암모니아 배출량 지수가 1.1~1.7 tCO<sub>2</sub>-eq/tNH<sub>3</sub>(20.6 ~ 31.8 gCO<sub>2</sub>-eq/MJNH<sub>3</sub>)로 감소된다. 마지막으로 그린 수소를 사용하는 암모니아의 경우가 가장 낮은 지수를 갖는데, 사용되는 전기 유형에 따라 녹색 암모니아의 탄소 지수는 0.1 ~ 0.7 tCO<sub>2</sub>-eq/tNH<sub>3</sub> (1.9 ~ 13.1 gCO<sub>2</sub>-eq/MJNH<sub>3</sub>)이다.

이 결과를 통해 무탄소 연료 생산과정에서의 이산화탄소의 배출량은 수소 생산 방식에 의해서 90% 이상이 결정되어지고<sup>20)</sup> 그린 수소는 수전해를 통한 방식이 현재로써는 일반적이다. 블루 암모니아의 경우 그레이 암모니아와 비교해서 60~65%의 이산화탄소 배출량 저감의 효과가 있고 그린 암모니아의 경우는 최대 85~95%의 저감 효과를 보인다. 추가적으로 기존의 화석연료인 디젤과 가솔린 연료와 비교하여(Carbon intensity for fossil

fuels of 94 gCO<sub>2</sub>-eq/MJ) 블루 암모니아와 그린 암모니아의 경우 최대 98%까지의 이산화탄소 저감의 효과를 기대할 수 있다.<sup>23)</sup>

### 3. 무탄소 연료 사용 엔진 개발

현재 수소와 암모니아 같은 무탄소 연료를 사용하는 엔진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 이런 엔진 기술의 상용화를 위해서는 기술 개발적인 측면에서 고려해야 할 사항들이 있다. 본 연구는 기존의 수소 엔진과 암모니아 단기통 엔진 실험 결과를 바탕으로<sup>24)</sup> 1D 차량 시뮬레이션(GT power) 기술을 이용하여 무탄소 엔진의 특성, 고려할 사항들과 전망을 소개하고자 한다. Table 2는 암모니아 단기통 엔진의 사양을 보인다.

Table 2 Specification of CI engine

Engine	Single cylinder engine
Displacement Volume [L]	499.4
Bore [mm] × Stroke [mm]	85.0 × 88.3
Compression ratio [-]	16.5 : 1
Swirl number [-]	2.0
Bowl type [-]	Re-entrant

#### 3.1 무탄소 연료 분사 시스템

무탄소 연료를 엔진에 사용하는 측면에서 연료 특성을 고려한 특성화된 연료 분사시스템의 개발이 필요하다. 일상적으로 가스상태에서 분사되는 수소 연료의 경우, 이를 위한 가스 연료 분사시스템의 적용이 필요하고, 암모니아 연료의 경우는 상온에서 분사압력 조절을 통해 액상 또는 가스 상태로의 분사가 가능하다 하겠다. Fig. 3은 주어진 온도와 압력에서의 암모니아 연료의 상태를 보여준다. 일반적으로 암모니아 연료는 높은 기화

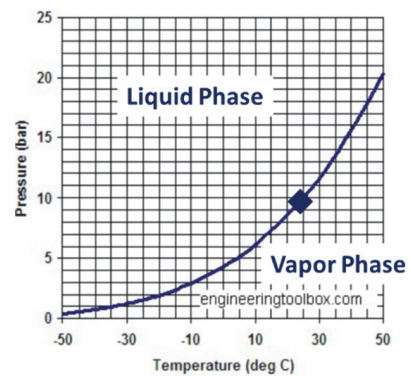


Fig. 3 NH<sub>3</sub> fuel thermodynamic properties



Fig. 4 Picture of direct-injection compressed hydrogen gas (DI-CHG by BorgWarner)<sup>25)</sup>

열로 인해 가스상태로 분사되는 경우가 일반적이다. 이 경우 연료는 최대 10 bar 이하의 분사압력으로 제약되기 때문에 고부하 운영에 있어 비교적 낮은 공연비값(암모니아 이론공연비 6.06:1)와 함께 높은 연료 분사량이 요구된다. 이를 위해 낮은 압력하에 높은 분사량이 가능한 분사노즐이 요구된다.

1D 시뮬레이션을 이용하여 무탄소 연료 엔진 모델을 설계하고 상용 엔진의 최대출력을 얻기 위해 필요한 에너지 공급량 즉, 분사량을 측정하였다. 또한 가스 분사 시스템을 현재 상용되는 가스 분사 장치를 사용하여 실용화 가능성을 평가하였다. Fig. 4는 무탄소 연료(수소와 암모니아)의 분사 인젝터의 예를 보여준다(DI-CHG injector, by BorgWarner). 이는 1.6리터급 상용 엔진의 최대 출력인 3500 rpm에서 80 kW의 엔진 출력에 도달하는데 필요한 인젝터 유량을 식별하기 위한 암모니아 엔진 성능을 시뮬레이션을 통해 계산한 결과이다. 단기통 엔진 실험에서의 연소 모델을 가정할때, 결과적으로 180 CA에 주입된 암모니아의 분사량이 최대 14 g/s까지 요구되어진다. 수소의 경우는, 연료 특성에 따른 분사 압력의 제약이 적고 높은 이론 공연비로 인해 분사량이 비교적 적어 분사 시스템 개발이 비교적 수월하다고 하겠다. B사의 가스 인젝터를 사용할 경우, 수소 연료는 41 bar의 분사압력에 10 g/s의 최대 분사량을 보였고 암모니아는 최대 10 bar에서 최대 7 g/s의 분사량이 가능하였다.<sup>25)</sup> 이 경우 수소는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실린더당 하나의 직분사 또는 포트분사 시스템의 적용이 가능하고 암모니아 연료 엔진의 경우는 실린더당 2개의 인젝션 시스템이 고부하 영역 운영을 위해 필요하다 하겠다.

### 3.2 무탄소 연료 연소 특성

무탄소 엔진들의 일반적인 연소 형태를 파악하기 위해 유럽에서 널리 사용되는 1.6 리터 가솔린 GDI 상용 엔진(CR: 10.5)과 2.0리터 디젤 CI 상용 엔진(CR: 16.5)의 실험값을 수소와 암모니아 단기통 엔진(Table 2)과 비교하였다(단기통엔진은 기본엔진을 사양과 같다). 수소엔진은 가솔린 GDI 엔진을 암모니아는 디젤 CI 엔진을 SI 방식으로 사용한 실험값이다. 이는 암모니아는 연료 특성상 높은 압력과 온도에서도 자연착화가 일어나지 않아

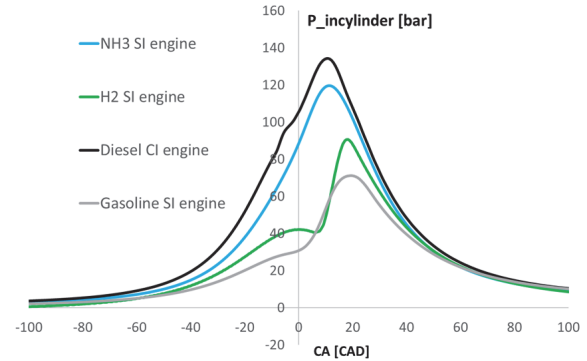


Fig. 5 Average of pressure curves for a SI reference engine, CI reference engine and NH<sub>3</sub> SI engine(2,000 rpm and 15 bar of IMEP)

서 저부하에서의 연소 안정성을 위해 16:1 이상의 높은 압축비가 유리한 반면 수소엔진의 경우, 연료의 자연 착화로 인한 노킹의 위험을 줄이기 위해서 12:1 보다 낮은 압축비 엔진의 사용이 적합하다.

Fig. 5는 무탄소 엔진과 상용 엔진의 중속(2,000 rpm), 고부하(15 bar of IMEP)에서의 평균 실린더 내 압력을 비교하였다. 기존 가솔린, 수소와 디젤기관과의 경우, 흡기 중에 공기만을 흡입한 후 연소실에 연료를 직접 분사하는 방식이며 암모니아 엔진은 연료와 공기가 예혼합을 거쳐 연소실로 흡입되는 차이점이 있다. 이로 인해 무탄소 엔진이 기존 가솔린 엔진보다 높은 흡기 압력을 나타낸다. 연소 시점에 있어서는 이미 설명했듯이, 암모니아 연료의 높은 안티노크성으로 인해 가솔린처럼 MBT limit(Maximum Brake Torque limit) 이후에도 연소 지연이 필요치 않아 높은 효율을 갖는다. 디젤 엔진과 비교하면 고부하시 높은 압력 상승으로 인해 최대 압력(본 엔진의 경우, 180 bar of max. P\_incylinder)의 제한을 받게 되는데, 암모니아 연소의 경우에는 비교적 낮은 연소 온도와 압력으로 인해 연소시기를 상사점 주변에서 진행하여도 비교적 최고 압력에 대한 부담이 적다고 하겠다. 수소 연소의 경우, 자연발화와 높은 연소 온도를 피하기 위해 높은 공연비(Lambda = 2)로 운영되었으며, 이로 인해 2 bar 이상의 높은 흡기 압력이 요구되어진다. 본 실험 데이터를 바탕으로 1D 시뮬레이션 모델의 연소 모델을 정의하였다.

### 3.3 무탄소 연료 흡기 시스템

무탄소 연료의 엔진이 기존 연료를 사용하는 엔진과 같은 출력을 갖기 위해 필요한 흡기 방식(터보 시스템)의 설계가 필요하다. 암모니아 엔진은 기존 연료인 디젤 연료 엔진과 비교하였다. Fig. 6(a)는 디젤 엔진과 암모니



아 엔진의 속도 증가에 따른 최대 부하(Full loads) 터보 시스템의 압력과 흡기량에 따른 효율을 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 보여준다. 우선 디젤 엔진의 1D 모델은 실험과 시뮬레이션 결과(GT: Gamma Technologies 1D simulation tool)가 유사함을 보임으로서 모델의 유효성을 검증하였다. 이를 기반으로 암모니아 연소 시스템과 암모니아 연소 실험의 결과를 기본으로 1D 시뮬레이션을 수행한 결과, 암모니아 엔진이 디젤과 같은 최대 출력을 달성할 수 있음을 보였다. 흡기 시스템의 효율적인 부분에서, 암모니아 연료는 상대적으로 낮은 이론 공연비(6.06:1)를 갖지만, 암모니아 연소의 형태가 디젤 모드에서와 같은 희박 연소가 아닌 점(이론공연비 영역에서의 운영)과 직분사 형태가 아닌 점이 디젤엔진과 비교하여 배기가스량을 줄이고 상대적으로 터보차저의 효율을 낮추는 결과를 갖게 된다. 그림에서와 같은 특히 저속시에 암모니아 엔진의 터보차저 운영 역역이 디젤 터보차저의 서지 라인(검은색 점선) 하단에 존재하게 된다. 이는 실질적으로 운영이 불가능한 영역으로써 암모니아 엔진 작동에는 약간 소형화된 터보차저가 적당하다고 할 수 있다. 1D 시뮬레이션을 통해 여러가지 질량과 속도의 터보차저를 설계해 본 결과, Fig. 6(b)처럼 암모니아 엔진의 경우 터보차저 질량을 80% 비율로 저감하고 운전하는 것이 적합한 것으로 나타났다. 이는 유럽에서 상용되는 차량들의 터보차저의 사양들을 고려할 때, 추가적인 연구없이 보다 소형차량에 사용되는 터보차저 시스템을 적용하여 사용이 가능한 상황이라 하겠다. 이는 1D 시뮬레이션을 통해 검증되어진 결과치이다.

수소엔진의 흡기시스템 개발의 경우, 기존 엔진들(가솔린과 디젤 엔진)과 비슷한 수준의 최대 부하(21 bar of BEMP at 1500 ~ 4500 rpm)를 갖기 위해서는 흡기 시스템의 개선이 필수적이다. 이는 서론에서 언급하였듯이 수소엔진의 자연 착화와 연소 중에 생성되는 질소산화물을 줄이기 위함이다. 본 연구는 1D 프로그램을 이용하여 수소엔진 개발에 요구되어지는 흡기 압력과 공기량을 측정하고 이에 필요한 흡기 시스템을 예측하였다. 암모니아 엔진과 마찬가지로 1D 시뮬레이션의 수소 연소 모델은 단기통 실험 결과를 참조하였다. 터보시스템의 성능 비교를 위해 가솔린보다 더 출력이 좋은 디젤엔진의 흡기시스템에 수소엔진 흡기 요구조건을 비교하였다.

Fig. 7은 수소 엔진에 요구되는 흡기압력과 공기량에 따른 터보시스템의 효율을 기존 디젤 엔진 흡기 시스템과 비교한 결과이다. Fig. 7에 볼 수 있듯이 수소 엔진의 경우, 디젤과 비교해서도 최대부하시 높은 공연비가 요구되므로 높은 압력과 공기량이 요구되어진다. 특히, 저속 운영과 고속 운영시에 흡기압과 공기량의 요구치가

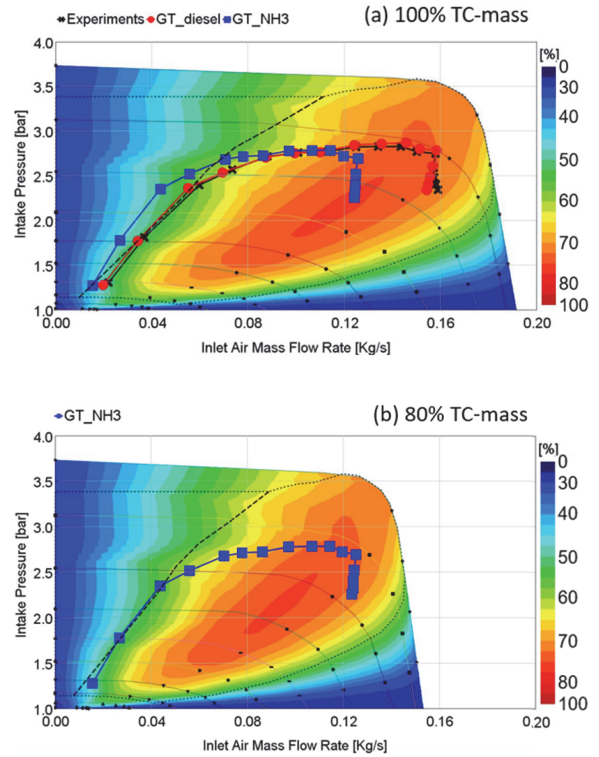


Fig. 6 (a) Full load curve with diesel (experiments and simulations) and ammonia (simulations) with the original diesel turbo charger, (b) Simulation of ammonia full load curve with 80% of TC mass

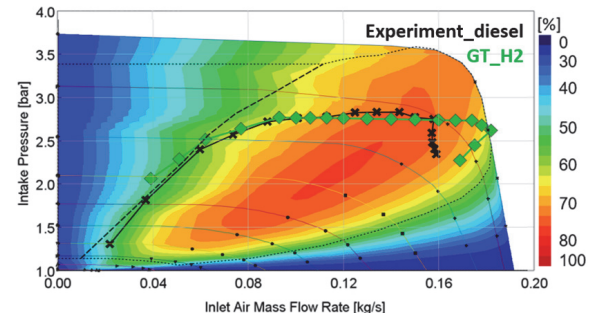


Fig. 7 Full load curve with diesel (experiments) and hydrogen (simulations) with the original diesel turbo charger

서지라인 바깥부분에 위치함을 볼 수 있다. 이는 저속(1000 ~ 1500 rpm)과 고속(4500 rpm 이상)시 최적 공연비를 맞추기 위해서는 기존의 터보시스템(1 stage VGT)으로는 운영이 불가능하고 터보시스템 성능 향상을 위해 추가적인 E-booster(슈퍼차저) 시스템이 요구됨을 알 수 있다. 결과적으로 무탄소 연료를 이용한 엔진의 경우, 암모니아 엔진은 기존 디젤엔진 터보시스템에서 성능을

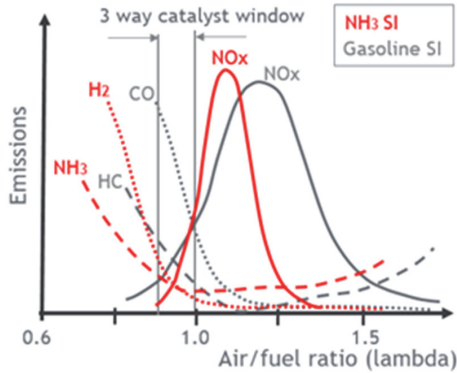


Fig. 8 NH<sub>3</sub> fuel thermodynamic properties

낮춘 다운사이징 터보차저 설계가 요구되어지는 반면, 수소엔진은 출력이 향상된 터보시스템이 요구되어짐을 알 수 있다. 이는 두 엔진의 최적의 공연비 결정에 따른 결과라고 하겠다.

### 3.4 무탄소 연료 엔진 후처리 장치

무탄소 연료를 사용하는 엔진은 이산화탄소를 거의 배출하지 않는 장점이 있는 반면, 연소중 높은 온도에 생성되는 질소산화물들과 연료의 불완전 연소에 의한 미연 가스는 환경적으로 유해함으로 해결해야 하는 과제이다. 이를 위해 엔진 개발에 있어 후처리 장치의 연구도 병행되어야 한다.

수소 엔진은 높은 연소 온도에 따른 질소산화물에 대한 대책이 주요과제이다. 연소과정에서의 희박 연소와 연소 지연을 통해 연소 온도를 줄이는 방법으로 질소산화물을 저감할 수 있다. 하지만 최대 출력을 위해선 많은 공기량 확보가 필요함으로 흡기시스템의 성능 향상(희박 연소를 위한 공기량 확보)과 후처리장치의 고려가 필요하다. 일반적인 후처리 장치는 기존 디젤기관과 같은, SCR을 통해 질소산화물을 줄이는 방안이 주요 방식이라 하겠다.<sup>26)</sup>

암모니아 엔진은 연료의 특성상 희박연소가 아닌 이론공연비 영역에서 연소가 진행되어진다. 이로 인해 연소 중에 높은 질소산화물이 형성되어진다. 또한 연소 중에 미연 암모니아 가스가 발생하는데 이에 대한 대책 마련이 필요하다. 특히 암모니아 가스는 독성 물질이므로 암모니아 스토리지 시스템에 대한 고려가 필요하다. Fig. 8에서 보는 것처럼, 암모니아 엔진의 배출가스 성향은 가솔린 엔진과 비슷하다. 가솔린 엔진에 미연가스인 탄화수소(가솔린 엔진)와 미연 암모니아(암모니아 엔진)의 경우, 이론공연비( $\lambda=1$ ) 주변에서 낮은 값을 갖지만 공연비가 확실히 변화함에 따라 희박 또는 리치한 공연

비 상황에서 연소의 불안전성과 함께 증가함을 알 수 있다. 반면, 일산화탄소(가솔린 엔진)와 수소가스(암모니아 엔진)의 경우는 리치 연소(낮은 공연비) 즉, 산소의 부족 현상으로 인해 증가됨을 볼 수 있다. 암모니아 연료에서 수소는 연소 중에 발생하는 해리를 통한 암모니아 연료가 수소로 변환(Decomposition)된 것으로써 산소의 잔류 여부에 따라 연소 과정에서 연소되거나 미연상태로 배출된다.

암모니아 엔진의 후처리장치에 대한 연구<sup>27)</sup>는 일반적으로 기존 엔진들에 사용중인 SCR과 3way catalyst에 대한 비교 평가가 진행 중이다. 희박 연소 엔진에 사용되는 SCR 사용의 가능성과 산화 환원반응의 밸런스가 필요한 3way catalyst에 성능을 고려하여 암모니아 엔진에 적합한 후처리 시스템의 선택이 필요하다. 특히, 암모니아 엔진 배출가스인 수소와 지구온난화에 막대한 영향을 주는 N<sub>2</sub>O의 고려가 필요한데, 이는 후처리 장치의 성능에도 영향을 주기 때문이다. 단기통 실험 결과를 참조할 때, 이 배출가스들은 연소가 안정적인 이론 공연비 조건에서 아주 낮은 배출량의 결과를 갖는다. 차량용 암모니아 엔진 개발에 있어서 풀어야 할 중요한 과제는 미연 암모니아 가스 배출에 대한 부분이다. 특히, 저부하에서의 연소 속도 개선을 통한 연소의 안정성이 미연 암모니아 가스 저감을 위해 우선되어야 하고, 이외에도 전부하 영역에서 배출되는 미연 암모니아는 연소실 구조에 의한 연소 전파와 확산에 취약한 부분의 존재를 의미한다 (Squish zone, fuel trap in crevices area). 이는 차후 연소실 디자인과 더불어 스파크 에너지 향상을 통해 개선되어야 하고 후처리 장치에 대한 추가적인 연구가 필요하다 하겠다.

## 4. 결론

본 논문은 무탄소 연료를 엔진에 사용하기 위하여 개선되어야 할 부분들을 기존의 단기통 실험 결과를 이용한 1D 시뮬레이션 결과를 통하여 평가하였다. 무탄소 연료 특성상 운영 조건과 공연비의 변화에 따른 시스템 요구 사항 및 배출가스 성향을 정리함으로써 무탄소연료 엔진 개발에 있어 필요한 사항들을 정의하였다.

1) 무탄소 연료 엔진이 기존 엔진과의 최대 출력을 갖기 위해 연료분사 시스템의 개발이 필요하며, 현재 사용되는 가스 분사 시스템을 이용할 경우, 수소엔진은 실린더당 하나의 직분사 또는 포트분사 시스템의 적용이 가능하고 암모니아 연료 엔진의 경우, 실린더당 2개 이상의 인젝션 시스템이 고부하 영역 운영을 위해 필요할 것으로 판단된다.

- 2) 엔진 연소실 개발에 있어서 수소 엔진의 경우 고부하에서의 자연발화를 감소화하는 방안에 대한 연구가 필요하고 암모니아 엔진의 경우 저부하에서는 연소 속도 개선을 통한 연소의 안정성과 전부하 영역에서 배출되는 미연 암모니아에 대한 대책이 필요한 실정이다.
- 3) 흡기 시스템 개발에 있어, 암모니아 엔진은 기존 디젤 엔진 터보시스템에서 성능을 낮춘 다운사이징 터보차저 설계가 요구되어지는 반면, 수소엔진은 출력역향상된 터보시스템이 요구되어짐을 알 수 있다.
- 4) 후처리 장치는 기존 디젤기관과 같은, SCR을 통해 질소산화물을 줄이는 방안이 수소 엔진의 주요 방식이라 하겠고 암모니아 엔진의 경우는, 대기통 엔진 실험을 통한 SCR 또는 3way catalyst의 사용 가능성에 대한 추가적인 연구 평가가 필요한 실정이다.

본 연구를 통해 무탄소 연료 엔진의 개발에 필요한 방향에 대해서 정의하고 시뮬레이션 결과를 바탕으로 엔진이 상용되기 위한 연료 분사 시스템, 흡기 시스템, 연소실 개선과 후처리장치 개발 방향에 대한 제안을 정리하였다.

### References

- 1) European Commission, "The European Green Deal," COM (2019) 640 final, 2019.
- 2) ICCT report- The European Commission regulatory proposal for post-2020 CO2 targets for cars and vans: A summary and evaluation, January 2018, www.theicct.org.
- 3) K. P. Werrell, "The Strategic Bombing of Germany in World War II: Costs and Accomplishments," The Journal of American History, Vol.73, No.3, pp.702-713 1986.
- 4) P. G. Grimes, "Energy Depot Fuel Production and Utilization," SAE 650051, 1965.
- 5) A. B. Rosenthal, "Energy Depot - A Concept for Reducing the Military Supply Burden," SAE 650050, 1965.
- 6) W. Cornelius, L. W. Huellmantel and H. R. Mitchell, "Ammonia as an Engine Fuel," SAE Trans. Papers, 650001-650225, 1966.
- 7) C. Zamfirescu and I. Dincer, "Ammonia as a Green Fuel and Hydrogen Source for Vehicular Applications," Fuel Processing Technology, Vol.90, No.5, pp.729-737, 2009.
- 8) R. Stevens, "Carbon Free Ammonia: Food or Fuel?," Japan-Norway Hydrogen Seminar, Tokyo, 2017, <http://injapan.no/wp-content/uploads/2017/02/12-YARA-Carbon-free-ammonia.pdf>
- 9) M. Zavka, "Device for Operating Internal Combustion Engines with Mixtures of Ammonia, Hydrogen, and Nitrogen Prepared from Ammonia," United States Patent, US13979637, 1937.
- 10) E. Kroch, "Ammonia as a Fuel for Motor Buses," Journal of the Institute of Petroleum, Vol.31, pp.213-223, 1945.
- 11) J. T. Gray, E. Dimitroff, N. T. Merkel and R. D. Quillian, "Ammonia Fuel - Engine Compatibility and Combustion," SAE 660156, 1966.
- 12) C. Mounaïm-Rousselle, P. Bréquigny, A. Valera-Medina, E. Boulet, D. Emberson and T. Løvås, Ammonia as Fuel for Transportation to Mitigate Zero Carbon Impact, Engines and Fuels for Future Transport, Springer, pp.257-279, 2022.
- 13) K. Rouwenhorst, O. Elishav, B. Mosevitzky Lis, G. S. Grader, C. Mounaïm-Rousselle, A. Roldan and A. Valera-Medina, "Future Trends," Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector, pp.303-319, 2021.
- 14) C. Tornatore, L. Marchitto, P. Sabia and M. De Joannon, "Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives," Frontiers in Mechanical Engineering, Vol.8, 2022, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2022.944201>.
- 15) C. Mounaïm-Rousselle, A. Mercier, P. Bréquigny, C. Dumand and J. Bouriot, "Performance of Ammonia Fuel in a Spark-Assisted Compression Ignition Engine," International Journal of Engine Research, Vol.23, No.5, pp.781-792, 2022.
- 16) E. Swift, S. Kane and W. F. Northrop, "Operating Range and Emissions From Ammonia-Hydrogen Mixtures in Spark-Ignited Engines," Proceedings of the ASME 2022 Internal Combustion Engine Forward Conference, V001T02A013, 2022.
- 17) C. Dumand, C. Mounaïm-Rousselle, P. Gaillard, E. Gérard, J. Dedeurwaerder and J. Op de Beeck, "Ammonia Powertrain for a Carbon Free Mobility," SIA Powertrain & Energy - Rouen 2022, Jun 2022, Rouen, France.
- 18) A. Dupuy, R. de Castro, P. Bréquigny and C. Mounaïm-Rousselle, "Comparison of Combustion Process of Ammonia Internal Combustion Engine: Premixed and RCCI Combustion," 11th European Combustion Meeting, April 2023.
- 19) P. Mayer, S. Schlösser, R. Petz and B. van der Hoek, "Blue vs. Green Ammonia Production: A Techno-Economic and Life Cycle Assessment

- Perspective,” *Joule*, 2022.
- 20) A. J. Boero, K. Kardux, M. Kovaleva, D. A. Salas, J. Mooijer, S. Mashruk, M. Townsend, K. Rouwenhorst, A. Valera-Medina and A. D. Ramirez, “Environmental Life Cycle Assessment of Ammonia-Based Electricity,” *Energies*, Vol.14, No.20, Paper No.6721, 2021.
  - 21) D. A. Chisalita, L. Petrescu and C. C. Cormos, “Environmental Evaluation of European Ammonia Production Considering Various Hydrogen Supply Chains,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.130, Paper No.109964, 2020.
  - 22) ConcaWE Report 17/22 “E-Fuels: A techno-economic assessment of European domestic production and imports towards 2050”, November 2022. Available at <https://www.concawe.eu/publication/e-fuels-a-techno-economic-assessment-of-european-domestic-production-and-imports-towards-2050/>.
  - 23) M. Prussi et al., “JEC Well-To-Wheels Report v5,” 2020, <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/publications/reports-version-5-2020>.
  - 24) H. W. Won, D. Kumar, V. Morel, A. Mercier, C. Mounaïm-Rousselle, J. Bouriot, S. Houille and C. Dumand, “Effect of Compression Ratio and Ignition Energy on Ammonia Premixed Combustion Process in a Single Cylinder Engine,” *Conference on Thermo- and Fluid Dynamics of Clean Propulsion Powerplants, THIESEL 2022*.
  - 25) <https://www.autotecnica.org/h2ice-componenti-borgwarner-per-motori-a-idrogeno/hydrogen-fuel-injector-di-chg/> or <https://ehfcv.com/borgwarner-hydrogen-injection-systems/>
  - 26) P. Jakubec and S. Roiser, “Challenges of Measuring Low Levels of CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> on H<sub>2</sub>-ICE,” *SAE 2024-01-2998*, 2024.
  - 27) Y. Liu, K. Cai, Q. Chen, Y. Qin and Z. Wang, “A Study on Combustion and Emission Characteristics of an Ammonia-Biodiesel Dual-Fuel Engine,” *SAE 2024-01-2369*, 2024.