

# 고압축비 SI 엔진의 순수 암모니아 연료 사용 가능성에 관한 연구

원 현 우\*

아람코 프랑스 연구소

## Study on the Possibility of Using Pure NH<sub>3</sub> Fuel on a Spark Ignition Engine with a High Compression Ratio

Hyun-Woo Won \*

Fuel Research Center, Aramco Overseas Company B. V., 232 Av. Napoleon Bonaparte, Rueil-Malmaison 92500, France

(Received 8 October 2021 / Revised 26 October 2021 / Accepted 27 October 2021)

**Abstract** : Environmental concerns and attempts to reduce CO<sub>2</sub> emission due to greenhouse gas(GHG) include increased consumption of carbon-free fuel like hydrogen and its derivate(like ammonia) in the transportation sector. However, ammonia(NH<sub>3</sub>), whose storage and carrier requirements suit the existent infrastructure and has better commercial viability, are less expensive in terms of cost per unit of energy and higher volumetric energy density compared to hydrogen. In this study, the potential of NH<sub>3</sub> as a sustainable fuel for spark ignition engines with a high compression ratio(CR: 16.5), based on a compression ignition engine architecture, is evaluated after considering NH<sub>3</sub> combustion and thermodynamic performance. The experimental results addressed combustion behavior and exhaust gases' emissions as the possibility of using pure NH<sub>3</sub> as fuel on a conventional engine continues to be explored.

**Key words** : Carbon-free fuel(비탄소 연료), NH<sub>3</sub> as fuel(암모니아 연료), NH<sub>3</sub> combustion(암모니아 연소), NH<sub>3</sub> spark ignition engine(암모니아 불꽃 점화 엔진), NH<sub>3</sub> SI engine with high compression ratio(고압축비 암모니아 SI 엔진)

### Subscripts

- CFR : cooperative fuel research
- CI : compression ignition
- COV\_imep : coefficient of variation of IMEP
- GHG : greenhouse gases
- IMEP : indicated mean effective pressure
- LBV : laminar burning velocity
- MBT : maximum brake torque
- RON : research octane number
- SI : spark ignition
- SIT : spark ignition timing

### 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 중에 상당 부분 (70 %)이 지상 수송 수단에 의한 것임을 기억할 때, 차량의 연비 개선을 통한 이산화탄소 저감이 중요하다 하겠다.<sup>1-4)</sup> 이를 위해 고연비 차량 개발과 전동화 차량 또는 연료 전지 차량의 보급을 통한 기존 내연 기관 차량의 대체를 시도하고 있지만, 전동화 차량을 위한 충분한 충전 시스템과 인프라 구축이 따라야 하고 무엇보다도 진정한 탈이산화탄소를 위해서는 전동화 차량에 사용되는 전기 에너지가 친환경 에너지원에 근간하여 생산되도록 전세계 대부분 나라들의 전기 생산 시스템의 개선이 필요로 한 실정이다. 이는 전과정 환경 영향

\*Corresponding author, E-mail: [hyunwoo.won@aramcooverseas.com](mailto:hyunwoo.won@aramcooverseas.com)

<sup>1</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.

적 측면에서 친환경 수송 수단을 구축하는데 생각보다 상당한 시간이 소요될 수 있음을 나타낸다. 이런 이유에서 기존에 내연기관에 비탄소 연료 즉, 수소와 암모니아와 같은 연료를 사용하는 엔진 개발이 현재 활발히 진행되어지고 있다.<sup>5-10)</sup>

역사적으로, 암모니아는 차량의 연료로 사용하기 위해서 많은 연구가 시도되었다. 가장 오래된 제안은 Sir Goldsworthy Gurney이 제안한 소형 Locomotive 차량이고, 최초 암모니아와 수소를 사용한 트럭이 Norsk Hydro사를 통해 1933년에 생산되었다.<sup>11)</sup> 이후에도 계속적인 암모니아 차량의 생산이 많은 자동차 생산업체를 통해 이루어졌지만, 암모니아 연료의 낮은 착화성으로 인해 첨가 연료를 혼합하여 사용하는 경우가 대부분이었다.<sup>12,13)</sup> 1960년대에는 암모니아만을 사용하는 불꽃 점화(SI: Spark ignition) 또는 압축착화(CI: Compression ignition) 엔진에 대한 연구가 진행되었는데, 특히, 2차 세계대전으로 인한 연료 비축량 감소의 영향으로, 대체 연료로써 암모니아 연료에 대한 연구가 활발히 진행되었다.<sup>14)</sup> 특히 미국 국방부는 연료 문제 해결을 위한 막대한 투자와 연구가 진행되었다.<sup>15)</sup> 1963년 Wagner와 Domke는 암모니아 CI 엔진 개발을 수행하였고, CFR(Cooperative fuel research) 엔진 실험을 통해 암모니아 연료가 고압축비(35:1) CI 엔진에서 순수 연료만으로 자연 착화가 가능함을 보였다.<sup>16,17)</sup> 1966년에는 Gray 팀이 CI 차량에서의 암모니아 연료의 가능성에 대한 연구에서 암모니아만을 연료로 사용했을 경우, 높은 압축비(35:1 이상)가 필요하다는 결론을 내렸었다.<sup>18)</sup> 이후 Starkman 팀은 불꽃점화 방식(SI engine)을 기존의 CI 엔진의 압축비(CR 14:1-19:1)에 장착함으로써 순수 암모니아 연료만을 사용하는 엔진 개발이 다소 낮은 압축비 엔진에도 가능하다는 연구를 발표하였다. 하지만 엔진의 내구성과 흡기 시스템의 어려움으로 인해 성공적인 엔진 개발은 이어지지 않았다.<sup>19,20)</sup> 현재까지 많은 연구<sup>21-25)</sup>가 계속 진행되고 있음에도 실질적으로 암모니아 연료만을 사용하는 엔진의 개발이 성공적으로 이루어지지 못하는 실정이다. 연료의 낮은 착화성과 연소속도로 인해 비교적 낮은 압축비 엔진에서 암모니아 연료만으로 전부하 영역을 운영하기에는 제약이 있기 때문이다. 이런 이유에서 본 연구는 기존 디젤 엔진(고압축비 16.5:1)에 불꽃점화 장치를 설치함으로써 순수 암모니아 연료만으로 엔진 전 영역에서의 운영이 가능한지를 그리고 어떤 연소의 특성을 갖는지를 SI 단기통 엔진을 통해 실험하였다.

## 2. 암모니아 엔진 개발

### 2.1 암모니아 연료 특성

Table 1은 본 연구에 사용된 암모니아 연료와 기존 연료들의 특성치들을 비교한다. 암모니아 연료는 같은 비탄소 연료인 수소 연료와 비교하면 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 약취와 독극성을 갖는 것과 낮은 연소 속도(LBV: Laminar burning velocity)와 낮은 착화성(Flammability)은 암모니아 엔진 개발에 있어서 풀어야 할 중요한 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	<b>6.06</b>
LHV [MJ/kg]	42.5	42.6	120.1	<b>18.8</b>
RON [-]	95	-	120	<b>120</b>
Storage temp.[°C]	25	25	25	<b>25</b>
Storage pressure [bar]	1	1	700	<b>10</b>
Fuel density [kg/m <sup>3</sup> ]	698.3	834	17.5	<b>602.8</b>
Energy density (storage) [MJ/l]	29.7	38.6	4.76	<b>11.3</b>
Flammability limits (equivalence ratio)	0.62-3.89	-	0.09-6.81	<b>0.63-1.53</b>
Heat of vaporization [kJ/kg]	180-350	450	461	<b>1370</b>
Laminar burning velocity [cm/s at ]	40	-	210	<b>7</b>
Auto-ignition temp. [°C]	275	210	537	<b>651</b>
Adiabatic flame temp [°C]	2392	-	2519	<b>2107</b>
Ab. Minimum ignition energy [Mj]	0.25	-	0.019	<b>8</b>

### 2.2 암모니아 엔진 실험 장치

암모니아 연료 실험은 기존 디젤 기관(푸조, 2.0리터 엔진)을 개조한 단기통 엔진으로 실행하였다. 기존 엔진, 중앙 연료 분사 장치 자리에 불꽃 점화 장치(NGK IL ZKR8CG)를 장착하여 SI 엔진의 방식을 구현하였다. 단, 흡기(실린더 헤드)와 연소실의 형태(피스톤 보울)를 기존 형태로 유지하였다(Re-entrant type bowl, intake swirl

port). 엔진 사양 정보는 Table 2와 같다. 암모니아 연료는 연료 가스통(10 bar)으로 부터 흡기부(Intake manifold)에 직접 주입되고 연료와 공기의 흡기량은 체적 유량계(Brooks thermal mass flowmeters)를 사용하여 측정하였다. 가스상 연료와 공기를 예혼합시킴으로써 가솔린 포트분사 시스템을 구현하였다. 연료 분사시, 연료의 보온장치를 통해 높은 기화 잠열을 통한 아이징 효과를 방지하였다. 공기의 온도는 온도 저절 시스템을 통해 정해진 온도로 연소실내로 주입된다. 연소내 압력은 압력 센서(Kistler piezo transducer, 6045 A)를 통해 150 cycle의 평균치로 측정하였다. 배출가스의 경우는 FTIR(Gasmet Fourier Transform Infrared Spectrometer) 배출가스 측정장치를 통해 H<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O와 NH<sub>3</sub> 가스를 측정하였고 H<sub>2</sub>(Thermal conductivity analyzer)와 O<sub>2</sub>(Paramagnetic analyzer)는 추가적인 센서를 통해 측정하였다(Without H<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>). 본 실험의 공연비는 측정된 체적 유량계를 통해 직접 계산하거나 배출가스 측정치 즉, 암모니아 연소 밸런스를 통해 계산 보정하였다.

Table 2 Specification of engine and nozzle

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

### 2.3 암모니아 엔진 실험 방식

우선, 암모니아 연료의 연소 특성의 파악과 최적화를 위해 다양한 엔진 속도와 부하를 선택하였다(본 실험의 경우; 1000, 1500, 2000, 3000 rpm의 엔진 속도와 3, 8과 15 bar의 평균유효압력). 이 운영 영역에서 불꽃 점화 시점 변화(SIT sweep: spark ignition timing sweep), 흡기 온도 변화, 공연비 변화(Phi sweep) 등의 실험을 통하여 각 조건에서의 최적의 연소 시점(Combustion phasing)과 연소 환경(Air fuel ratio and intake temperature)등을 최적화할 수 있었다. 이후 선택 운영 조건에서의 실험을 바탕으로 엔진 전부하 영역 실험을 실행함으로써 최종적인 암모니아 엔진의 전체 엔진맵 즉, 전부하 영역에서의 암모니아 연소 특성과 배출가스의 성향을 파악할 수 있었다.

## 3. 암모니아 엔진 실험 결과

### 3.1 선택 운영 구간 실험 결과

우선, 선택 운영 구간들에서 스파크 타이밍 변화 실험

을 통해 이론공연비 상에서의 최적의 연소 시점(CA50: 50 %의 연소 진행 시점)을 정의하였다. 그 결과, 암모니아 연소도 기존의 다른 엔진과 마찬가지로 대부분 7°-12° After TDC(상사점)에서 높은 연비 효율과 연소의 안정성을 보였고, 특히, 고속시(3000 rpm)에는 이른 연소 시점을 유지하는 것이 중요했다. 이 결과를 기본으로, 최적의 연소 시점에서 공연비 변화에 따른 효과를 실험했으며, Fig. 1은 중부하(8 bar of IMEP: indicated mean effective pressure)에서의 공연비 변화에 따른 결과들을 보인다.

그림에서 나타내듯 공연비의 변화는 엔진 성능과 배출가스에 큰 영향을 미치는데, 모든 엔진 속도들(1000, 2000, 3000 rpm)에서 이른 공연비를 기준으로 약간 희박 연소(Lean burn)가 좋은 연비 효율을 보이는 반면 질소산화물의 증가와 연소의 안정성을 위해서는 리치 연소(Rich burn)가 효과적이었다. 이 경향은 중부하 뿐 아니

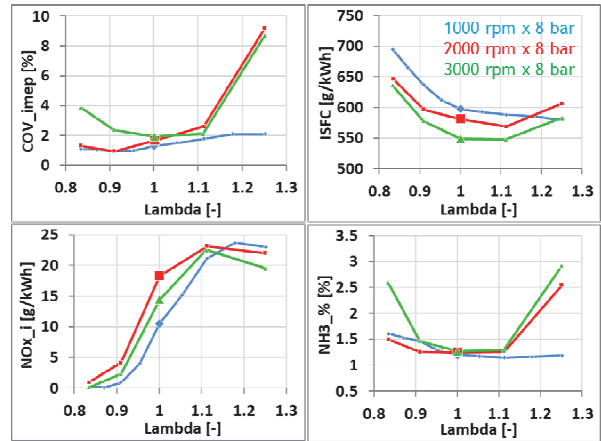


Fig. 1 Lambda sweeps of NH<sub>3</sub> combustion at 8 bar of IMEP with different engine speed (1000, 2000 and 3000 rpm)

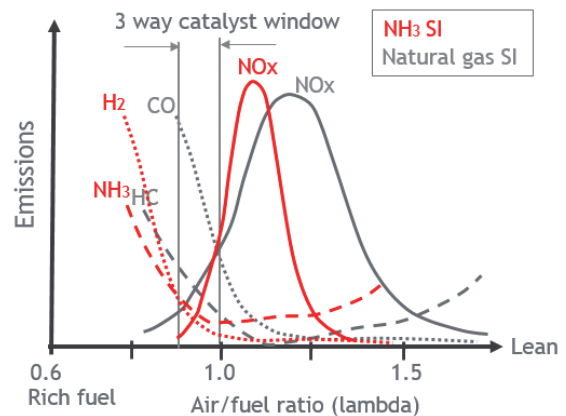


Fig. 2 Comparison of emission trends between NH<sub>3</sub> SI engine and a natural gas SI engine<sup>26)</sup>

라 다른 부하 영역에서 비슷한 성향을 보이며, 연소가 비교적 안정적인 중, 고부하시에는 약간의 희박 연소(About 1.1 of lambda)를 통한 연비 개선 효과를, 저부하시에는 리치 연소(About 0.95 of lambda)를 통해 연소의 안정성을 유지하는 것이 중요하다 하겠다.

공연비 변화에 따른 엔진 성능과 배출가스에 대한 성향은 천연가스(가솔린) 엔진과도 비교가 가능한데, 질소산화물은 엔진 속도와 부하가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. Fig. 2는 기존 천연가스 SI 엔진에서 공연비 변화에 따른 배출가스 특성을 암모니아 SI 엔진과 비교하였다<sup>26)</sup>(암모니아 배출가스 성향은 본 연구의 실험 결과치를 토대로 나타냈다).

그림에서 볼 수 있듯이, 암모니아 엔진의 배출가스 성향은 기존의 가솔린 엔진과 매우 비슷한 성향을 보이는데, 특히 질소산화물의 경우, 암모니아 연소가 천연가스 엔진보다 낮은 공연비(About 1.2 of lambda)에서 가장 높은 배출을 보이고 이는 기존 SI 엔진처럼 높은 희박 또는 리치 연소시 확연히 감소된다. 암모니아 연소의 질소산화물이 배출 공연비 구간이 천연가스 엔진에 비해 좁은데, 이는 암모니아 연료가 천연가스보다 낮은 이론 공연비의 값을 갖는 것을 감안할 때, 공연비 변화에 따른 질소산화물의 확연한 변화폭은 공연비 변화시 보다 많은 연료 증감에 따른 현상이라 하겠다(같은 공연비율 증감을 위해 암모니아는 낮은 공연비로 인해 가솔린과 천연가스보다 2.5배 많은 또는 적은 부피의 연료가 필요하다).

불완전 연소가스들의 경우, 가솔린 엔진에 탄화수소와 일산화탄소의 성향과 암모니아 엔진에 미연 암모니아와 수소가스의 배출 성향이 비슷함을 그림을 통해 알 수 있다. 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 공연비 상황에서 연소의 불안정성과 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 연소에서의 수소는 연소 중에 발생하는 해리를 통한 암모니아 연료가 수소로 변환(Decomposition)된 것으로써 산소의 잔류 여부에 따라 연소 과정에서 연소되거나 미연상태로 배출된다.

3.2 전 구간 실험(엔진맵) 결과

선택 운영 조건 실험을 바탕으로 엔진 전체 운영 구간에서의 성향을 실험하였다. 이 실험은 선택한 엔진 속도(1000, 1500, 2000과 3000 rpm)에서 부하의 변화를 1 또는 2 bar 마다 측정함으로써 엔진 전 영역 성향(엔진맵)을

나타내었다(lambda=1). 고부하와 고속의 한계는 연료 시스템과 연소실 내 최고 압력 제한값(150 bar of max. P\_incylinder limit)으로 규정하였고, 저부하는 연소 안정성 제한값(10% of COV\_imep limit)으로 규정하였다. Fig. 3은 암모니아 엔진 전구간에서의 연소의 안정성 여부(COV\_imep: coefficient of variation of IMEP)를 나타낸다. 일반적으로, SI 엔진의 연소 안정성을 평가하기 위해 COV값을 사용하는 경우가 많은데, 엔진 부하에 따라 3-5%이하의 COV를 가질 경우, 연소가 일반적으로 안정적이라고 평가할 수 있다. 그림에서 보이듯이, 본 실험을 통해 실험 엔진이 암모니아만을 연료로 사용하여 전 부하 영역 운영이 가능함을 보았다(저속의 경우 1 bar of IMEP까지 운영이 가능). 특히 중, 고부하에서 기존 SI 엔진과 비슷한 매우 안정적인 연소 성향(COV, ID: ignition delay, CD: combustion duration)을 보였다. 하지만 암모니아 연료가 갖는 낮은 연소 속도와 낮은 착화성은 저온, 저압 환경인 저부하 영역에서 나타나고, 이로 인해 아주 낮은 부하시 연소가 불안하다는 것을 COV값을 통해 알 수 있다. 이 현상은 고속 운영시에 더 확연하게 나타나고 있으며, 이는 제한된 연소 시간 즉, 전체 연소과정이 피스톤의 팽창 과정전에 이루어지지 못할 결과임을 알 수 있다. 본 실험에서 안정적인 연소의 형태를 갖는 가장 낮은 부하는(3.5%이하의 COV), 3 bar of IMEP at 1000 rpm, 4.5 bar at 1500 rpm, 5 bar at 2000 rpm and 6 bar at 3000 rpm이다. 물론 이 수치들은 수소 연료를 첨가할 경우(5-7 vol.%), 모든 속도 구간에서 1.8 bar of IMEP까지 낮출 수

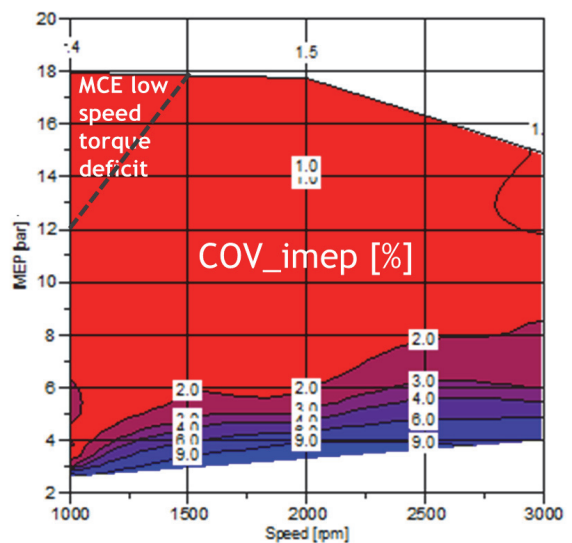


Fig. 3 NH<sub>3</sub> engine map for COV\_imep and operating limits (lambda=1)



있음을 추가 실험을 통해서 확인하였다.

암모니아 엔진 개발에 있어서 중요한 부분은 저부하에서 연소의 안정성을 높이는 것과 함께 빠른 연소 시점 즉, 최대한 상사점 부분에서의 최적 연소를 통해 연비 효율을 높이는 것이다. 암모니아 연료가 높은 안티노크성을 갖는 것을 감안할 때, 노킹에 대한 문제가 가솔린 연료처럼 발생하지 않으므로 고부하에서의 연비 개선에 탁월한 효과를 기대할 수 있다. 이는 연비 개선뿐 아니라 고속 운영시 미연가스를 최대한 줄이는 위한 방안이기도 하다. Fig. 4는 전영역에서의 엔진 효율(ITE: indicated

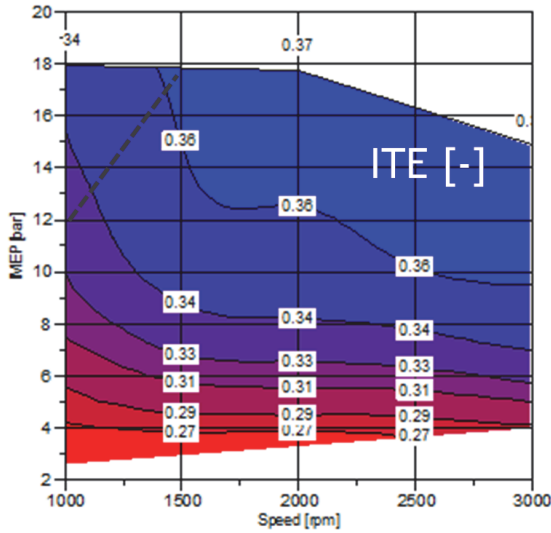


Fig. 4 NH<sub>3</sub> engine map for indicated thermal efficiency (lambda=1)

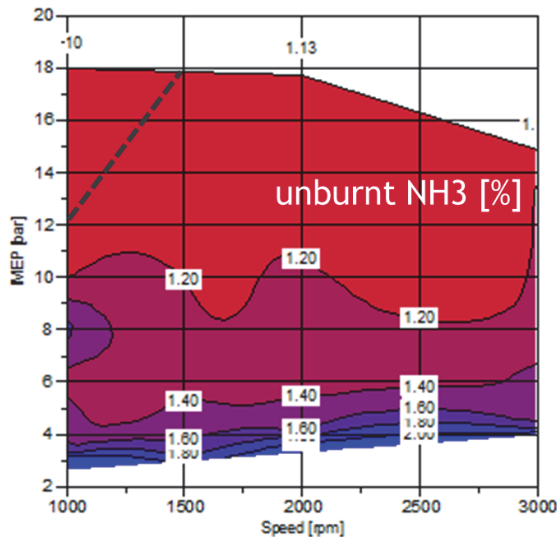


Fig. 5 NH<sub>3</sub> engine map for unburnt NH<sub>3</sub> emission (lambda=1)

thermal efficiency)의 성향을 보여준다. 암모니아 연소는 비교적 낮은 연소 온도와 최적의 연소 시점(CA50)을 전부하 영역에서 갖는다는 점에서 높은 열효율을 갖지만 높은 미연가스로 인해 연소효율(CE; combustion efficiency)이 떨어지는 성향을 보인다. 또한 저부하시에 낮은 흡기 압력으로 인한 손실이(Pumping loss) 기존 가솔린 엔진처럼 발생한다. 그림에서 볼 수 있듯이 엔진 효율은 엔진 속도가 증가할수록 부하가 높을수록 증가하는 성향을 보이는데, 이는 연소 온도 증가에 따른 연소의 안정성에 의한 것이다.

미연 배출가스인 수소와 지구온난화에 막대한 영향을 주는 N<sub>2</sub>O의 경우, 이론 공연비 조건에서 아주 낮은 배출량의 결과를 갖는다(10 ppm미만). 하지만, 미연 암모니아는 전 영역에서 1 vol.% 이상의 높은 배출량을 보였다. Fig. 5는 전 운영구간에서의 미연 암모니아 배출가스 성향을 나타낸다. 미연 암모니아의 경우, 저부하시 연소의 불안정성과 함께 증가되었다. 미연 암모니아 가스는 연소의 안정성과 연소실 구조에 따른 결과로 특히, 저부하에서는 연소 속도 개선을 통한 연소의 안정성이 우선되어야 하고, 이외에도 전부하 영역에서 배출되는 미연 암모니아는 연소실 구조에 의한 연소 전파와 확산에 취약한 부분이 존재하였다(Squish zone, fuel trap in crevices area). 이는 차후 새로운 연소실 디자인과 더불어 스파크 에너지 향상을 통해 개선되어야 하겠고 후처리 장치에 대한 논의도 필요하겠다.

### 3.3 암모니아 엔진과 기존 엔진들의 비교

암모니아 엔진의 성능과 효율을 파악하기 위해 유럽에서 널리 사용되는 1.6 리터 가솔린 GDI 대기통 엔진,

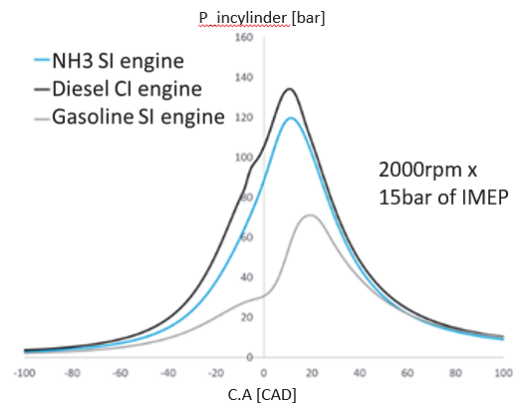


Fig. 6 Average of pressure curves for a SI reference engine, CI reference engine and NH<sub>3</sub> SI engine (2000 rpm and 15 bar of IMEP)

본 실험에 사용한 엔진인 2.0리터 디젤 CI 대기통 엔진의 실험값을 암모니아 대기통 엔진과 비교하였다. Fig. 6은 각 엔진이 중속(2000 rpm), 고부하(15 bar of IMEP)에서의 평균 실린더 내 압력을 비교하였다. 기존 가솔린과 디젤기관의 경우, 흡기 중에 공기만을 흡입한 후 연소실에 연료를 직접 분사하는 방식이며 본 실험에 암모니아 엔진은 연료와 공기가 예혼합을 거쳐 연소실로 흡입되는 차이점을 갖는다. 이로 인해 암모니아 엔진이 기존 가솔린 엔진보다 높은 흡기 압력을 갖는다. 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<sub>incylinder</sub>)의 제한을 받게 되는데, 암모니아 연소의 경우에는 비교적 낮은 연소 온도와 압력으로 인해 연소시기를 상사점 주변에서 진행하여도 비교적 최고 압력에 대한 부담이 적다고 하겠다.

Fig. 7은 엔진 부하의 변화에 따른 암모니아 엔진 효율(ITE: indicated thermal efficiency / CE: combustion efficiency)을 기존 엔진들과 비교하였다. 이 효율값들은 엔진의 연소 효율을 제외한 값이다. 그림에서 볼 수 있듯이 저부하시에 SI 엔진들이 흡, 배기압력의 차로 인한 손실(Pumping loss)로 인해 CI 엔진보다 낮은 효율을 보이지만 중, 고부하시에는 그 차이가 확연히 줄어든다. 가솔린의 경우 MBT 주변에서 가장 높은 효율을 보이는 반면 암모니아 엔진은 고부하, 고속에서 높은 효율을 보였고, 희박 연소의 형태를 갖는 CI 엔진과 근소한 차이를 보이고 있다. 하지만 상기의 값은 연소 효율(CE)로 인한 손실(대략 4-5%)을 무시한 값으로써 암모니아 차량의 연비 개선과 안전성 확보를 위해서는 미연가스 배출의 저감이 중요하다고 할 수 있다.

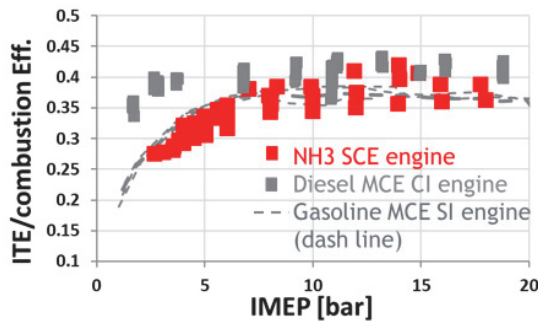


Fig. 7 Average of pressure curves for a SI reference engine, CI reference engine and NH<sub>3</sub> SI engine (2000 rpm and 15 bar of IMEP)

#### 4. 결론

본 논문은 순수 암모니아 연료를 고압축 SI 엔진(기존의 디젤 대기통 엔진에 스파크 플러그를 장착)에 사용함으로써 암모니아 엔진 개발의 가능성 여부를 알아보았다.

- 1) 선택 운영 조건에서의 연소 시점 최적화와 공연비의 변화에 따른 연소 특성 및 배출가스 성향을 정리함으로써 암모니아 연소가 최적 연소시점과 배출가스적인 측면에서 기존 가솔린 엔진과 비슷함을 보았다.
- 2) 엔진맵 실험을 통해 순수 암모니아 연료만으로 전 엔진 영역에서 엔진 운영이 가능하지만 저부하(Below 3 bar of IMEP), 특히 고속 저부하시 연소가 안정적이지 않았다. 이는 수소연료의 첨가 또는 압축비 등을 통해 연소 온도를 높이는 방안들이 논의되어야겠다.
- 3) 본 실험에서의 암모니아 대기통 엔진 결과를 기존 디젤, 가솔린 대기통 엔진과 비교함으로써 암모니아 엔진의 장점과 단점을 정리하였고, 연비 향상과 배출가스 규제적인 측면에서 미연가스 저감이 중요한 과제임을 정리하였다.

본 실험을 통해 암모니아 연료만으로도 엔진이 전체 영역에서 운영이 가능하다는 것을 보임으로써 암모니아가 내연기관의 연료로써 사용 가능함을 증명하였다. 하지만 암모니아 엔진이 상용되기까지 미연 가스 저감을 위한 연소실 개선과 연소의 안정성 확보를 위한 스파크 플러그 성능의 향상뿐만 아니라, 후처리장치 개발 등의 과제가 아직 남아 있는 실정이다.

#### References

- 1) U.S. Energy Information Administration, International energy outlook 2013, DOE/EIA-0484, 2013 [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf), 2013.
- 2) ExxonMobil, 2014 The Outlook for Energy: A View to 2040, <http://corporate.exxonmobil.com/en/energy/energy-outlook/download-the-report/download-the-outlook-forenergy-report> (Accessed 13 Jan 2014) Abi Hill, 2014.
- 3) European Commission: The European Green Deal, COM (2019) 640 final, 2019.
- 4) ICCT Report- The European Commission Regulatory Proposal for Post-2020 CO<sub>2</sub> Targets for Cars and Vans: A Summary and Evaluation, [www.theicct.org](http://www.theicct.org), January 2018.
- 5) H. W. Xiang, "Vapor Ppressures, Critical Parameters, Boiling Points, and Triple Points of Ammonia and Trideuteroammonia," Journal of

- Physical and Chemical Reference Data, Vol.33, No.4, pp.1005-1011, 2004.
- 6) C. Zamfirescu and I. Dincer, "Ammonia as a Green Fuel and Hydrogen Source for Vehicular Applications," Fuel Process Technol, Vol.90, No.5, pp.729-737, 2009.
  - 7) S. Giddey, S. P. S. Badwal and A. Kulkarni, "Review of Electrochemical Ammonia Production Technologies and Materials," International Journal of Hydrogen Energy, Vol.38, No.34, pp.14576-14594, 2013.
  - 8) V. Pattabathula and J. Richardson, "Introduction to Ammonia Production," Chem. Eng. Prog., Vol.112, No.9, pp.69-75, 2016.
  - 9) Q. Wang, J. Guo and P. Chen, "Recent Progress Towards Mild Condition Ammonia Synthesis," Journal of Energy Chemistry, Vol.36, pp.25-36, 2019.
  - 10) International Energy Agency (IEA), "The Future of Hydrogen," pp.39-40, 2019.
  - 11) 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>.
  - 12) M. Zavka, "Device for Operating Internal Combustion Engines with Mixtures of Ammonia, Hydrogen, and Nitrogen Prepared from Ammonia," United States Patent, US13979637A, 1937.
  - 13) E. Kroch, "Ammonia d a Fuel for Motor Buses," J. Inst. Pet, Vol.31, pp.213-223, 1945.
  - 14) 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.
  - 15) P. G. Grimes, "Energy Depot Fuel Production and Utilization," SAE 650051, 1965.
  - 16) A. B. Rosenthal, "Energy Depot - a Concept for Reducing the Military Supply Burden," SAE 650050, 1966.
  - 17) W. Cornelius, L. W. Huellmantel and H. R. Mitchell, "Ammonia as an Engine Fuel," SAE 650052, 1966.
  - 18) J. T. Gray, E. Dimitroff, N. T. Merkel and R. D. Quillian, "Ammonia Fuel - Engine Compatibility and Combustion," SAE Technical, Vol.75, pp.785-807, 1967.
  - 19) T. J. Persall and C. G. Garabedian, "Combustion of Anhydrous Ammonia in Diesel Engine," SAE Technical, Vol.74, pp.3213-3221, 1968.
  - 20) E. S. Starkman, G. E. James and H. K. Newhall, "Ammonia as a Diesel Engine Fuel: Theory and Application," SAE Technical, pp.3193-3212, 1967.
  - 21) D. T. Pratt and E. S. Starkman, "High Temperature Kinetics of NH<sub>3</sub>-air Combustion," 12th Symposium on Combustion, pp.891-899, 1969.
  - 22) M. C. Branch and R. F. Sawyer, "Ammonia Oxidation in an Arc-heated Flow Reactor," Symposium (International) on Combustion, Vol.14, No.1, pp.967-974, 1973.
  - 23) D. I. Maclean and H. G. Wagner, "The Structure of the Reaction Zones of Ammonia-oxygen and Hydrazine- Decomposition Flames," Symposium (International) on Combustion, Vol.11, No.1, pp.871-878, 1967.
  - 24) A. G. White, "Limits for the Propagation of Flame at Various Temperatures in Mixtures of Ammonia with Air and Oxygen," Journal of the Chemical Society, Transactions, Vol.121, pp.1688-1695, 1922.
  - 25) V. N. Krivulin, L. A. Lovachev, E. Z. Kudryavtsev and A. N. Baratov, "Study of Flammability Limits. I. Ammonia-air Mixtures," Fiz. Goreiya Vzryva, Vol.11, No.6, pp.890-897, 1975.
  - 26) H. Ly, "Effects of Natural Gas Composition Variations on the Operation, Performance and Exhaust Emissions of Natural Gas - Powered Vehicles," NGV 2002 Conference Paper-Effects of Gas Composition-Aug, 2002.