



직접분사식 암모니아 전소 엔진에서 점화 시기와 공기과잉률의 변경에 따른 연소 및 배기, 효율 특성 비교

장용훈 · 박철웅* · 김용래* · 최 영* · 민찬기** · 이승우** · 백홍길** · †이정우***
전북대학교 기계시스템공학과 석사과정, *한국기계연구원 모빌리티동력연구실,
현대자동차 남양연구소, *충남대학교 자율운항시스템공학과 교수
(2023년 6월 20일 접수, 2023년 9월 18일 수정, 2023년 9월 18일 채택)

Comparison of Combustion, Emissions and Efficiency Characteristics as Varying Spark Timings and Excess air ratios in an Ammonia-fueled Direct Injection Spark Ignition Engine

Yonghun Jang · Cheolwoong Park* · Yongrae Kim* · Young Choi* · Chanki Min**
Seungwoo Lee** · Hongkil Baek** · †Jeongwoo Lee***

*Dept. of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896,
Republic of Korea*

**Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103,
Republic of Korea*

***Hyundai Motor Company, 150, Hyundaiyeonguso-ro, Namyang-eup, Hwaseong-si,
Gyeonggi-do, 18280, Republic of Korea*

****Dept. of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University,
Daejeon 34131, Republic of Korea*

(Received June 20, 2023; Revised September 18, 2023; Accepted September 18, 2023)

요약

산업혁명의 발달로 인해 급격하게 증가된 온실가스 배출량을 저감하기 위해 배기 배출물 규제가 계속해서 강화되고 있다. 이를 만족시키기 위해선 친환경 연료의 사용은 필수적이다. 미래의 친환경 연료로서 수소가 주목받고 있지만, 물질적 특성으로 인해 취급과 보관에 큰 어려움을 겪고 있어, 이에 대안으로 암모니아가 제안되었다. 암모니아는 수소 대비 상온 조건에서 쉽게 액화가 가능하며, 에너지밀도가 높다. 이에 엔진의 연료로서 암모니아의 적용성을 검토하기 위해 직접분사식 암모니아 전소 엔진에서 연소제어인자의 변경에 따른 실험을 진행하였다.

본 실험은 점화시기(Spark Timing)와 공기과잉률(Excess Air Ratio) 두 개의 변수를 변경하여 실험을 진행하였다. 엔진 속도 1,500 RPM 및 중부하 이상(제동 토크 200 Nm)의 조건에서 암모니아 전소를 하였을 때, 연소 안정성과 질소산화물, 미연 암모니아 등의 배기 배출물의 경향을 관찰하였다. 연소제어인자의 최적화를 통해 암모니아만을 연료로 사용한 경우에도 안정적인 연소가 가능한 조건을 찾을 수 있었고, 향후 운전영역 확장을 위한 전략을 적용할 계획이다.

Abstract - Due to the development of the industrial revolution, regulations on exhaust emissions have been continuously strengthened to reduce the rapidly increasing greenhouse gas emissions. The use of environmentally friendly fuels is essential to meet these regulations. Hydrogen has been attracting attention as a future environmentally friendly fuel, but due to its material properties, it faces significant challenges in handling and

†Corresponding author:jwoo@cnu.ac.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

storage. As an alternative, ammonia has been proposed. Ammonia can be easily liquefied at room temperature compared to hydrogen and has a high energy density. In order to examine the applicability of ammonia as an engine fuel, experiments were conducted to investigate the effects of changes in combustion control parameters in a direct injection ammonia combustion engine. The experiments were conducted by varying two variables: spark timing and excessive air ratio. Observations were made on combustion stability and the trends of exhaust emissions such as nitrogen oxides and unburned ammonia under the conditions of an engine speed of 1,500 rpm and medium to high loads (brake torque of 200 Nm). By optimizing the combustion control parameters, conditions for stable combustion even when using ammonia as the sole fuel were identified, and plans are underway to apply strategies for future expansion of the operating range.

Key words : ammonia, direct injection, excess air ratio, nitrogen oxides, spark ignition engine, spark timing

I. 서 론

지난 20세기부터 걸쳐, 산업혁명의 발달로 이산화탄소(CO₂, Carbon dioxides)와 질소산화물(NO_x, Nitrogen Oxides) 등 온실가스(GHG, Green House Gas)의 배출량이 급격하게 증가하였다. 세계자원연구소(World Resources Institute)에 의하면 에너지와 사업 등 모든 분야에서 주로 발생하는 배기 배출물은 이산화탄소로 전체 온실가스의 74 %를 차지한다. [1] 유럽연합위원회(EU Commissions)에서 또한, 도로 교통은 도시에서 대기 오염의 가장 큰 원인이라고 제시하였고 이를 해결하기 위해 2022년 말 이전보다 더욱 강화된 새로운 Euro7 배출 기준을 제시하였다. [2]

수송 부분에서 이산화탄소 배출량을 저감하기 위해 국제 청정 교통 위원회(ICCT, International Council on Transportation)에서 발표한 EU Green deal에 따르면 상용차와 중장비 차량의 이산화탄소 배출량을 2050년까지 90 % 이상 저감 계획을 세웠다. [3] 이에 맞춰, 다양한 국가에서 대부분의 차량을 무공해차로 전환할 계획을 세웠으며, 대표적으로 전기동력차의 사용 혹은 무공해 차량(ZEV, Zero Emission Vehicle)을 언급하였다. 앞서 언급한 Zero Emission Vehicle은 친환경 연료를 사용한 내연기관도 해당되는데 이 때 친환경 연료로 현재 수소가 큰 주목을 받고 있다. 수소는 연소 시 이산화탄소를 배출하지 않는 대표적인 친환경 연료이다.

수소를 연료로서 사용하기 위해 전 세계적으로 수소 경제를 실현시키기 위한 수소 생산 기술과 공급 등의 인프라에 대한 투자가 크게 증가하고 있지만, 청정 수소의 생산 비중은 0.7 % 미만에 불과하다. 현재 수소는 주로 천연가스과 석탄에서 생산되고 있기 때문에, 생산 과정 중에 상당한 양의 이산화탄소가 배출(약 9억톤)된다. [4] 또한, 생산과정 중에 이산화탄소

를 배출하지 않는 그린 수소의 경우 블루 수소와 그레이 수소에 비해 생산비용 2-5배 높으며, 인프라 부족, 저장 및 운송 문제 등으로 수소 경제로의 전환에 큰 어려움을 겪고있다. [5] 더불어, IEA에 의하면 2018년 기준 순수 수소의 생산량은 약 70 Mt 이었지만 정제 산업과 암모니아 산업에 90 % 이상을 사용하고 있어, 연료로서 적용하기에는 부족한 생산량을 나타내고 있다. [6]

이에 또다른 친환경 연료로 암모니아(NH₃, Ammonia)가 제안됐다. 암모니아는 비료로서 전 세계적으로 널리 오랫동안 사용됐으며 2022년 기준 약 1억 6,300 만톤으로 수소보다 월등한 생산량을 나타냈다. [7] 암모니아는 연료 자체에 수소원자를 포함하고 있으며, 높은 수소 저장 밀도(약 17.75 wt%)로 인해 ‘수소 캐리어(Hydrogen Carrier)’ 역할로 미래 수소 경제의 원동력으로 주목받고 있다. [8-11] 이뿐만 아니라, 수소 대비 실온에서 10 bar 수준의 압력을 가하거나 대기압에서 -33 °C로 냉각하면 쉽게 액화가 가능하여 저장과 운반이 용이하다. 또한, 기존에 구축한 저장 및 운송 인프라의 활용이 가능하기 때문에 추가적인 인프라 구축에 필요한 비용이 비교적 적게 든다는 장점이 있다.

하지만 암모니아는 연료 자체에 질소를 포함하고 있어 이에 기인한 Fuel-prompt NO_x 배출량이 타 연료에 비해 많다는 단점이 있다. [12] 더불어, 암모니아는 열악한 착화성능을 지니고 있어, 연소에 큰 어려움이 있다. [13] 수소(0.2 mJ) 대비 높은 최소점화에너지(8 mJ)를 지니고 있어, 인가되는 점화에너지의 양을 증대시켜야만 안정적인 연소를 나타낼 수 있다.

다음으로 느린 층류화염속도(LFV, Laminar Flame Velocity)를 지니고 있다. 수소는 약 2.3 m/s 수준의 층류화염속도를 나타내지만, 암모니아의 경우 0.07 m/s 수준으로 저조한 층류화염속도를 나타낸다. 이는, 화염전파(Flame Propagation) 과정에 문제를 야기할 수

직접분사식 암모니아 전소 엔진에서 점화 시기와 공기과잉률의 변경에 따른 연소 및 배기, 효율 특성 비교

있으며 고속의 조건에서는 불안정한 연소를 나타낸다. 따라서, 암모니아를 연료로서 사용하기 위해서는 엔진 변수의 변경이 필요하다.

본 연구에서는 이와 같은 이유로 연소제어인자 변경을 통한 암모니아의 연소를 개선하여 전소로 실험을 진행하였다. 기관 속도 1,500 RPM 및 제동 토크 기준 (Brake Torque) 200 Nm 조건에서 실험을 진행하였으며, 해당조건에서 연소제어인자 변경에 따른 연소와 배기 그리고 효율의 경향을 확인하였으며, 이에 따른 암모니아 전소의 최적조건을 파악하였다.

II. 실험 장치 구성 및 방법

2.1 연료 특성 비교

실험구성에 대한 설명에 앞서 암모니아의 기본적인 연료적 특성에 대해 수소, LPG와 비교를 통해 알아보고자 한다. 연료별 물성치는 Table 1.로 나타내었다.

2.2 실험 장치 구성 및 방법

본 연구는 2.5 L 직렬형 4기통 직접분사식 전기 점화 엔진을 사용하였다. 암모니아 연료는 부식성을 지니고 있어, 인젝터 부분의 오링을 부식을 견딜 수 있는 재질인 EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer)을 사용하였고, 이외에 추가적인 개조 없이 사용하였다. 실험장비 구성 및 엔진의 상세 제원은 하기 Fig. 1과 Table 2.로 나타내었다.

EMERSON 社の Mass Flowmeter Sensor 를 통해 공급과 재순환되는 유량을 확인하였다. 공기과잉률 (Excess Air Ratio) 측정을 위해 ETAS 社の 광대역 산소 측정기 (LA4 E) 를 사용한다. 공기과잉률을 일정하게

유지해주는 Lambda Meter를 이용하여, Turbo-Charger의 공기량 과급을 통해 연료량을 조절한다. 연료 유량 확보를 위한, 액상 암모니아를 공급하기 위해 저압펌프(EU YEON WESTEC 社)를 사용하여, 공급 압력의 감소에 따른 기화를 방지한다. 이후, 고압펌프에서 Injector를 통해 연소실 내에 고압의 액상 암모니아

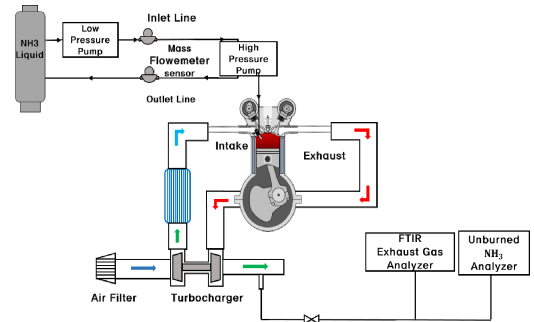


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

Table 2. Engine specifications.

Parameters	Specification
Engine type	Direct-Injection Spark Ignition Engine
Number of cylinder [-]	4
Displacement	2.5
Bore * Stroke [mm]	88 * 101.5
Compression Ratio [-]	10.5

Table 1. NH₃, H₂, LPG properties.

Specifications	NH ₃	H ₂	LPG
Stoichiometric AFR	6	34.2	15.6
Auto-Ignition Temp[K]	930	858	743
RON	130	120	90-100
LHV [MJ/kg]	18.8	119.96	45.5
Volumetric Energy Density [MJ/L] [Liquid]	12.7	8.5	25.3
Laminar Flame Speed @ stoichiometric[m/s]	0.1	2.3	0.4-0.5
Flammability Limits (Equivalence Ratio) [-]	0.6-1.4	0.1-7.1	0.5-2.1
MIE @ stoichiometric [mJ]	8	0.02	0.46
Latent Heat[kJ/kg]	1,371	455	425

연료를 직접 공급한다. ECU 제어를 통해 엔진변수를 변경하였다.

Dewetron 社의 연소해석기(DEWE-211)를 통해 연소 특성을 분석하며, 이 때 연소실 200 cycle 이상의 구간을 평균화한 값을 기준으로 분석한다. 배기 배출물 분석기인 AVL 社의 SESAM-FTIR과 KINSCO Technology 社의 Airwell +7 (NH₃ TDLAS Gas Analyzer)를 통해, NO_x와 배기 중 미연소 암모니아 농도를 측정하였다. 고농도의 미연된 암모니아는 장비의 손상을 일으킬 수 있어, 암모니아의 농도는 1/10으로 희석하여 해당 분석기에 주입을 하여 측정하였다.

제동 열효율(BTE, Brake Thermal Efficiency)는 하기 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$BTE(\%) = \frac{Power(kW) * 3600(s)}{Fuel\ mass(kg/h) * Fuel\ LHV(MJ/kg) * 1000} * 100 \quad (1)$$

2.3 실험조건

본 실험은 암모니아 전소로 진행하였으며, 1,500 RPM의 200 Nm 조건을 기준 조건으로 측정하였다. 상세 운전 기준 조건은 Table 3에 기술하였다. 이외의 토크 조건은 암모니아의 열악한 착화성능으로 인한, 실화 (Mis-fire) 발생으로 CoV of gIMEP 가 높은 불안정한 연소를 일으키는 구간이므로 원활한 비교를 위해 200 Nm 조건을 채택하였다 (CoV가 10% 이상이면 불안정한 것으로 판단한다). 변경한 엔진 변수는 점화시기와 공기과잉률이다. 변경한 변수 범위 값을 제외한 나머지 조건에서는 잦은 실화로 인해 토크가 급격히 감소하거나 맥동이 심해 데이터 획득이 불가능하였다. 변수 1개씩 변경하여 실험을 진행하였으며, 이 때

Table 3. Experimental conditions.

Engine Speed [RPM]	1,500
Torque [Nm]	200
Injection Pressure [bar]	150
Coolant Temperature [K]	363
Intercooler-out temperature [K]	296
Intake Pressure	0.98~0.99
Dwell time [ms]	6
Injection Timing [°BTDC]	360
Excess Air Ratio	1.0~1.2
Spark Timing [°BTDC]	60~30

나머지 변수 조건은 다음과 같이 고정하였다. (Spark Timing = 45 BTDC, Excess Air Ratio = 1.1)

III. 실험 결과 및 논의

3.1 점화시기 변경에 따른 특성

3.1.1 연소 특성

암모니아 연료는 느린 연소 속도와 높은 최소 점화 에너지로 인해, 화염발달에 큰 어려움이 있다. 따라서, 본 실험에서는 이를 보완하기 위해, 점화시기를 진각하여 진행하였다. Fig. 2와 3은 점화시기에 따른 토크와 열 방출량(HRR, Heat Release Rate)을 나타낸 그래프이다. 점화시기가 진각될수록 토크가 증가한 것을 확인할 수 있다. 45 deg보다 더 진각하는 경우, 대부분

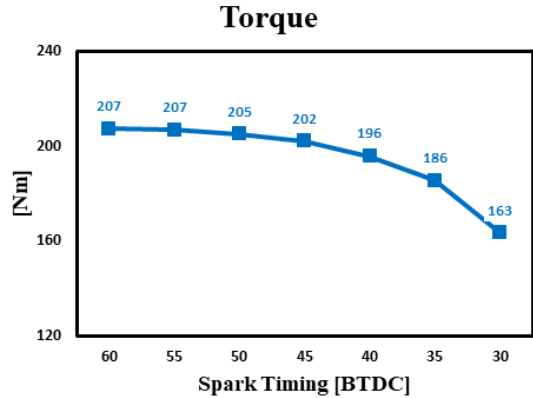


Fig. 2. Brake torque as varying Spark Timing.

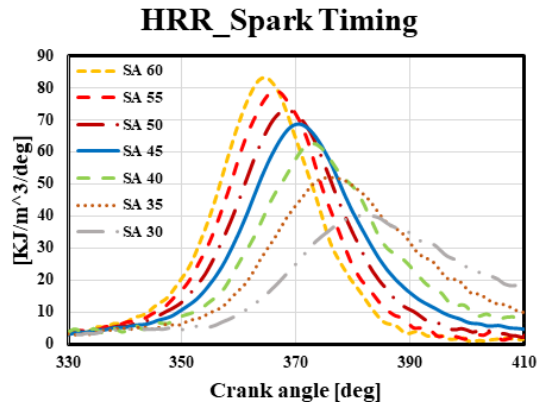


Fig. 3. Heat Release Rate (HRR) results comparison as varying Spark Timing.

직접분사식 암모니아 전소 엔진에서 점화 시기와 공기과잉률의 변경에 따른 연소 및 배기, 효율 특성 비교

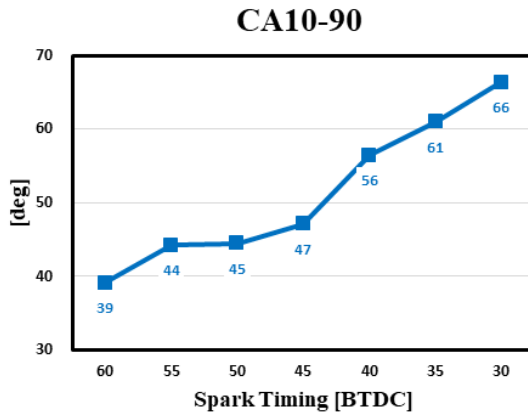


Fig. 4. Main combustion duration as varying Spark Timing.

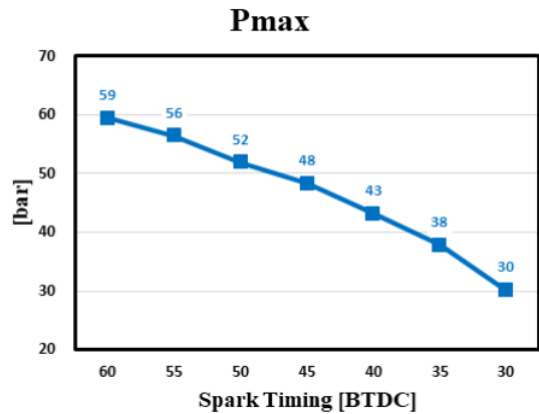


Fig. 5. The maximum in-cylinder pressure (Pmax) as varying Spark Timing.

의 토크 값이 200 Nm 부근에서 상회하지만, 이보다 덜 진각 즉, delay된 경우 토크가 점차 떨어지는 것을 확인할 수 있으며 30 deg의 경우 163 Nm으로 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 그에 따라, 열 방출량 그래프도 감소하였다. 점화시기가 변경됨에 따라 열 방출량 그래프의 값과 시기 또한 변경됐으며, 30 deg의 경우, 약 $40 \text{ KJ/m}^3/\text{deg}$ 정도로 절반 정도의 열 방출량을 나타내고 있다.

Fig. 4에서는 앞선 HRR 그래프를 보다 자세히 분석하여 연소기간에 대해 표현한 그림이며, 주연소 기간 (Main Combustion Duration)인 CA 10부터 CA 90까지의 기간을 의미한다. Fig. 3에서와 같이 점화시기가 지각될수록 주연소 기간이 증가하였다. 45 deg보다 더 진각된 경우의 주연소 기간은 대부분 40 deg 정도로 상회하여, 비교적 짧은 연소기간을 나타내고 있는 반면, 더 지각된 경우 주연소 기간이 점차 증대하여 30 deg의 경우 66 deg 정도로 매우 긴 연소기간이 나타났다. 또한, 다른 연료에 비해 암모니아는 긴 주연소기간을 갖고 있어, 점화시기의 진각이 60 BTDC 까지 가능하였다.

HRR 및 연소기간의 결과는 Fig. 5와 같이 실린더 내 최고압력에 영향을 미친다. 60 deg의 경우 최고 토크 값과 HRR 그리고 가장 짧은 연소기간을 나타냈으며, 이에 따른 영향으로 약 59 bar 정도의 최고압력을 나타냈다. 점화시기가 지각될수록 최고 압력이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 30 deg의 경우 30 bar 정도의 수준으로 다른 조건에 비해 매우 저조한 압력을 나타냈다.

다음은 연소 안전성을 의미하는 CoV of IMEP를 나타내는 그래프이다. 대부분 5% 이내로 비교적 안정

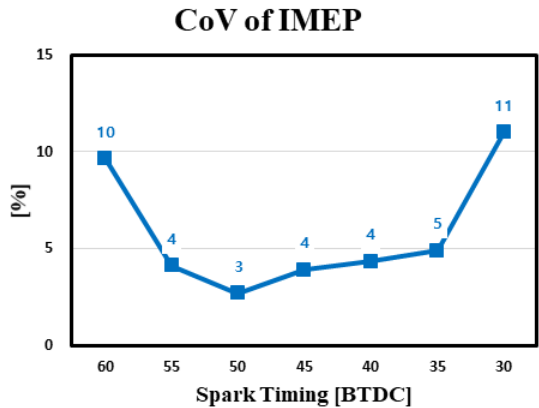


Fig. 6. CoV of IMEP values as varying Spark Timing.

적인 연소를 나타내고 있지만, 최진각과 최지각 조건인 경우, 약 10%로 불안정한 연소를 나타냈다. 최진각 조건인 경우 앞선 그림을 비취보았을 때, 높은 토크 값과 열 방출량 값 그리고 짧은 주연소기간을 나타냈음에도 불구하고, 높은 CoV 값을 나타내어, 불안정한 연소 조건임을 알 수 있다. 45 deg 보다 지각된 경우, CoV가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.1.2 배기 및 효율 특성

다음은 제동출력당 배기 배출물(Brake Specific Exhaust Emissions)을 나타낸 그림이다. 상단의 그래프는 제동 출력당 미연 암모니아를 나타낸 그래프이다. CoV가 가장 낮은 45, 50 deg의 경우, 약 21 g/kwh의

미연 암모니아가 배출됐다. 이는 ppm 단위로 환산했을 때 연료 공급량의 약 1%의 미연 암모니아가 발생하는 것을 의미한다. 30 deg의 경우 약 34 g/kwh의 미연 암모니아가 배출되었는데, 이는 앞서 HRR 과 주연소 기간에서 나와있듯이, 다른 조건에 비해 저조한 열 방출량 값과 긴 연소 기간으로 인해 발생한 것으로 기인할 수 있다. 또한, 최진각 조건의 경우 (60과 55 deg) 실린더 내 피스톤이 TDC에 도달하기 전 즉, 압축 행정 이 완벽히 이루어지기 전에 점화가 시작되어 연료와 공기 간 혼합에 영향을 끼쳐, 많은 양의 미연 암모니아가 배출됐다. NOx의 경우, 점화시기가 지각됨에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 점화시기가 진각됨에 출력이 증가하여 열 방출량이 상승하였으며 이로 인해 연소온도 또한 상승하여 Thermal NOx의 생

성량이 증가한 것으로 기인할 수 있다.

또한, Fig. 6과 7의 결과는 배기 가스 온도에도 영향을 미친다. 점화시기의 지각에 따른 잦은 실화의 발생으로 미연된 암모니아의 배출량이 증가하였다. 그 결과, 배기 온도는 급격하게 증가하였으며 이는 엔진에 부정적인 영향을 끼칠 수 있으므로 적절한 점화시기의 진각이 필수적임을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 9 은 제동 토크에 따른 제동 열효율 (BTE, Brake Thermal Efficiency)을 나타내고 있다. 이는 상기 Fig. 5의 연소실 내 최고압력 경향과 동일한 특성을 나타내고 있다. 대부분의 경우 열효율은 약 36%를 상회하고 있지만, 30 deg의 경우 이보다 현저히 낮은 약 30%의 열효율을 나타내고 있다. 이는 앞서 언급한 Thermal Loss에 의한 것으로 기인할 수 있으며, 이를

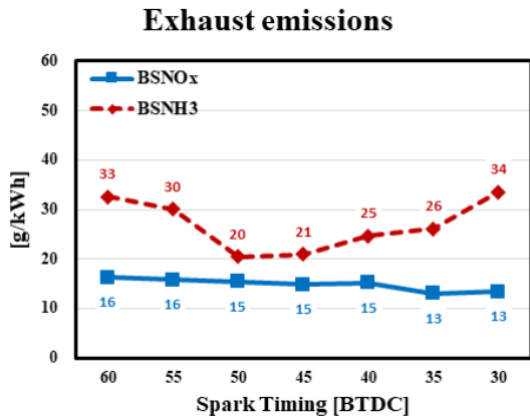


Fig. 7. Brake Specific NOx and unburned NH3 as varying Spark Timing.

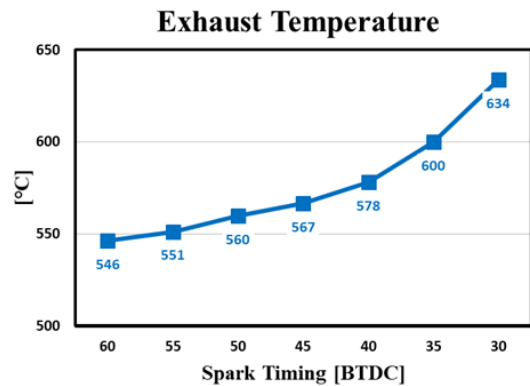


Fig. 8. Exhaust Temperature as varying Spark Timing.

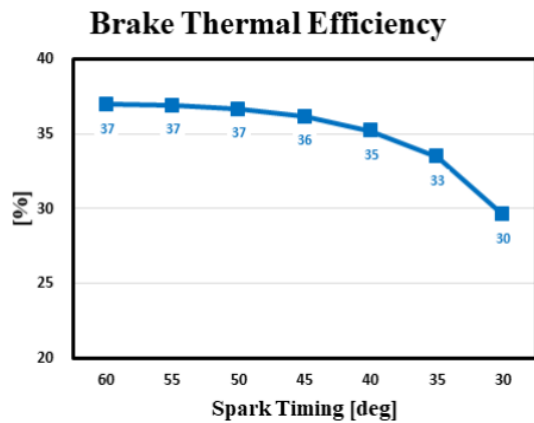


Fig. 9. Brake Thermal Efficiency (BTE) as varying Spark Timing.

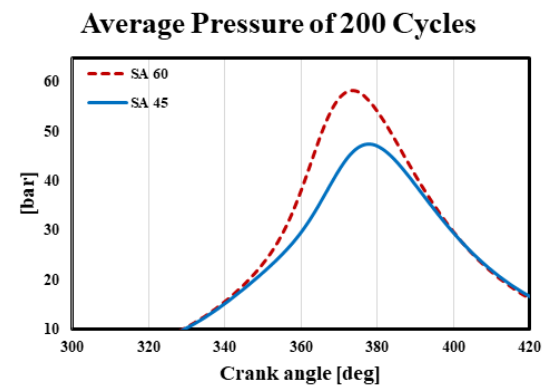


Fig. 10. Average pressure of 200 cycles as varying Spark Timing.

직접분사식 암모니아 전소 엔진에서 점화 시기와 공기과잉률의 변경에 따른 연소 및 배기, 효율 특성 비교

통해 암모니아 연료의 원활한 연소를 위해서는 어느 정도의 점화시기의 진각은 필수적임을 알 수 있다.

제동 열효율의 그래프 양상은 Fig. 6 (CoV of IMEP) 과는 다른 양상을 띄고 있는데, 이유는 다음과 같다.

Fig. 10는 200 Cycles 동안의 평균 압력을 나타내는 그래프이다. 360 deg의 압축행정 이 끝나는 기준으로, 점화시기 60 BTDC 조건의 경우 45 BTDC 조건에 비해 일찍이 압력이 더 높게 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 압축행정에서 이른 연소가 시작됨을 의미한다. 이 때의 기준 조건과의 차이는 압축과정에서 발생하는 열손실(Thermal Loss)를 의미한다. 하지만, 팽창과정의 경우 점화시기의 진각에 따른 연소압력의 상승으로 (Fig. 5) 팽창일의 증대가 나타났으며, 이 때의 면적의 차이는 열손실 면적보다 큰 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 높

은 연소 불안정성에도 불구하고 다소 증가한 제동 열효율이 나타났다.

3.2 공기과잉률 변화에 따른 특성

3.2.1 연소특성

다음은 공기 과잉률(Excess Air Ratio)에 따른 HRR 그래프이다. 대부분의 조건에서 60 KJ 이상의 열 방출 량 값을 나타내고 있지만 공기 과잉률 1.2인 희박 조건에서는 40 KJ로 저조한 열 방출이 나타났다. 이는 Fig. 10에서 알 수 있듯이 출력에도 영향을 미친다. 대부분 약 200 Nm 이상의 토크값을 상회하고 있는 반면, 1.2 조건에서는 155 Nm으로 출력이 현저히 감소한 것을 확인할 수 있다.

실린더 내 최고압력을 나타내는 Fig. 13는 토크와

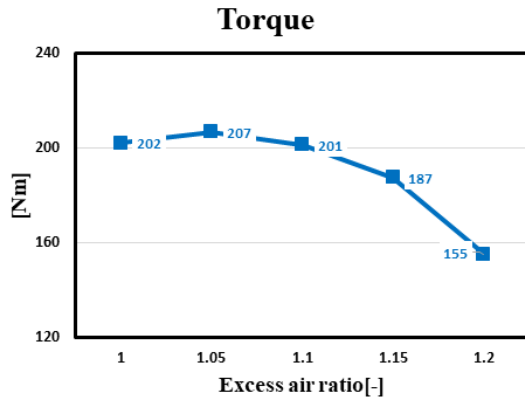


Fig. 11. Brake torque as varying Excess air ratio.

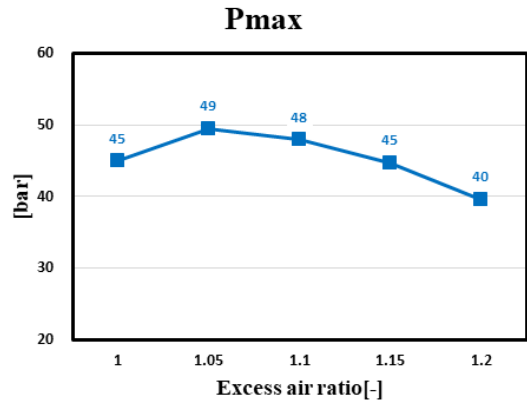


Fig. 13. The maximum in-cylinder pressure (Pmax) as varying Excess Air Ratio.

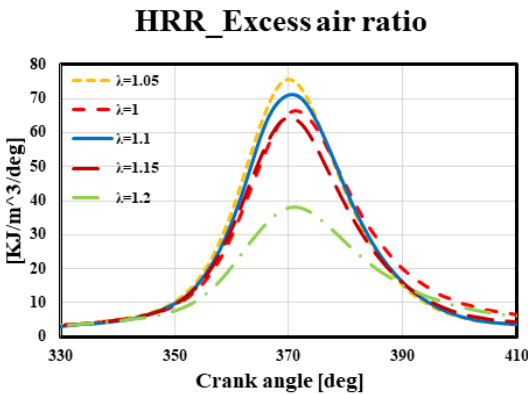


Fig. 12. Heat release rate (HRR) results comparison as varying Excess air ratio.

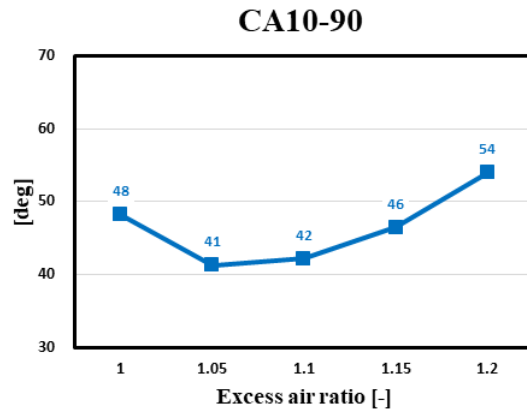


Fig. 14. Main combustion duration as varying Excess Air Ratio.

연소 기간의 양상과 비슷한 양상이 나타났다. 연료가 다소 희박한 조건인 공기과잉률 1.05와 1.1 조건에서 48 bar 이상의 압력을 나타냈지만, 이론 공연비 조건에서는 45 bar 수준으로 다소 감소한 것을 확인하였고, 희박한 조건인 1.2 조건에서는 40 bar 수준으로 최고 압력 대비 10 bar 정도로 감소한 것을 확인할 수 있다.

주연소 기간 그래프의 양상은 Fig. 11의 토크와 비슷한 양상을 나타냈다. 비교적 높은 토크를 나타내는 공기과잉률 1.05와 1.1은 다른 조건에 비해 보다 짧은 주연소기간을 나타냈다. 희박한 조건인 공기과잉률 1.2 조건에서는 주연소기간이 54 deg로 기준 조건인 1.1에 비해 약 12 deg 더 긴 주연소기간을 나타냈다.

암모니아의 경우 약간 희박한 공기 과잉률 1.1일 때 CoV가 약 2.5 %로 제일 안정적인 연소를 나타냈다. 이론공연비 조건에서는 11 %로 비교적 불안정한 연소를 나타냈으며, 더 희박한 공기 과잉률 1.2 조건에서 18 %로 매우 불안정한 연소를 나타냈다. 암모니아의 층류화염속도의 경우 이론공연비 혹은 당량비 0.9 조건에서 가장 빠름에도 불구하고 불안정한 연소가 나타났다. [14]

이는 일반적인 화석연료에 비해 암모니아의 높은 잠열에 의한 것으로 기인할 수 있다. 이론공연비 혹은 더 농후한 경우, 희박 연소 조건에 비해 많은 양의 암모니아가 분사되는데, 희박 조건에 비해 산소량이 부족하여 연소되지 못한 액상의 암모니아가 기화되면서 높은 잠열로 인해 실린더 내 열에너지를 흡수하여 원활한 연소에 부정적인 영향을 끼친다. 이로 인해 다소 희박한 조건 (Excess Air Ratio = 1.1)에 비해 높은 CoV를 나타냈다. 더 희박한 조건의 경우, 앞서 말했듯

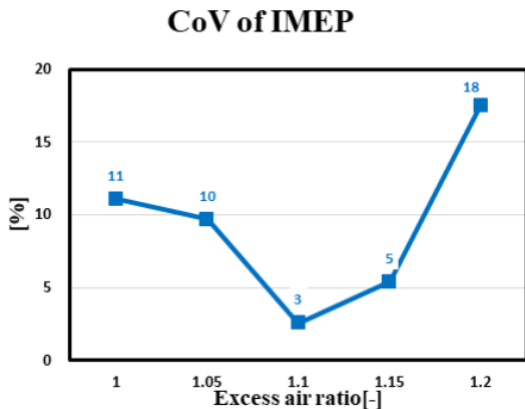


Fig. 15. CoV of IMEP values as varying Excess Air Ratio.

이 암모니아의 느린 층류화염속도로 인해 주연소기간이 증가하며 이는 연소에 불안정성을 일으킨다. 이때, 초기 화염 발달을 위한 화염소의 생성에 부정적인 영향을 미치며, 이로 인해 Fig. 13과 같이 주연소기간이 증대하게 된다. 이외의 공기과잉률 조건에서 실험을 진행하였지만, 토크 40-50 Nm 정도의 매우 불안정한 연소를 나타내었는데, 이는 암모니아 연료의 특성인 좁은 가연성 한계로 인한 것으로 확인할 수 있다.

3.2.2 배기 및 효율 특성

다음 Fig. 16는 배기 배출물을 나타낸 그래프이다. 붉은색의 미연 암모니아 그래프의 양상은 Fig. 15의 CoV와 같은 양상을 나타냈다. 공기과잉률이 1.1인 조건에서 가장 안정한 연소를 나타냈듯이, 가장 적은 양의

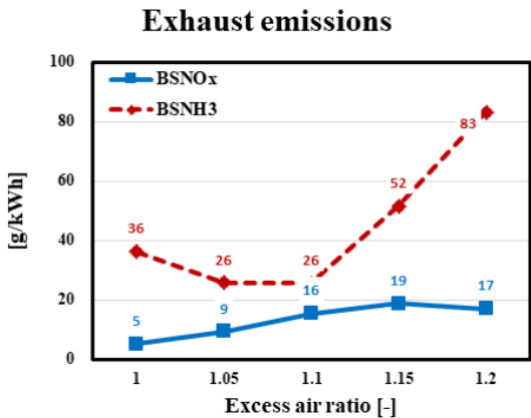


Fig. 16. Brake Specific NOx and unburned NH₃ as varying Excess Air Ratio.

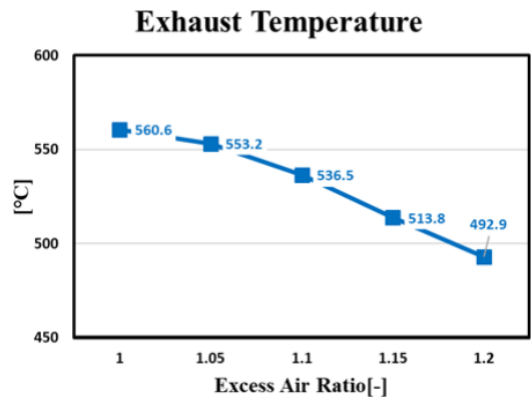


Fig. 17. Exhaust Temperature as varying Excess Air Ratio.

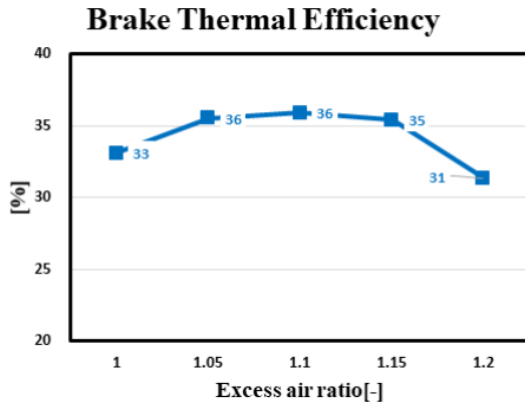


Fig. 17. Brake Thermal Efficiency (BTE) as varying Excess Air Ratio.

미연 암모니아를 배출하였다. 이론공연비 조건에서는 기준 조건과 비슷한 출력을 나타냈지만 주연소기간의 증대와 실린더 내 최고압력의 감소로 인해 Fig. 15와 같이 불안정한 연소를 초래했으며 이는, 미연된 암모니아의 증가에 원인이 됐다. 이론공연비 조건에서는 36 g/kWh 수준으로 약 1.4 배 정도 많은 미연 암모니아가 발생하였다. 이후, 공기과잉률이 증가할수록 미연 암모니아도 증가하였으며 공기과잉률 1.2 조건에서는 약 3 배 이상의 미연 암모니아가 배출된 것을 확인할 수 있다.

다음 Fig. 17은 공기과잉률에 따른 배기 가스 온도이다. Fig. 16을 통해 공기과잉률이 희박해질수록 미연된 암모니아가 증가되는 것을 알 수 있다. 미연된 연료가 증가함에 따라 배기 가스의 온도가 증가하는 것이 일반적이다. 하지만, 공기과잉률의 변화에 따른 배기 가스 온도의 양상은 다르다. 암모니아는 희박 조건에서 잦은 불안정한 연소가 발생하며, 이로 인해 미연된 연료가 배기 가스에 혼합된다. 이 때, 희박 조건에 의한 많은 양의 공기가 배기 가스와 혼합되는데, 이 과정에서 공기가 열을 흡수하게 된다. 따라서, 공기과잉률이 희박해질수록 배기 가스의 온도가 감소됐음을 알 수 있다.

제동 토크에 따른 제동 열효율은 대부분의 조건에서 35 % 이상의 값을 상회한다. 이론공연비 조건에서는 층류화염속도가 빠른 조건임에도 불구하고 잠열에 의한 열손실 발생으로 인하여 미연 암모니아의 증가로 인해 비교적 낮은 열효율을 나타냈음을 알 수 있다. 공기과잉률 1.2 조건은 해당 조건에서 느린 층류화염속도에 의해 다음과 같이 31 %대의 저조한 제동 열효율이 나타났다.

IV. 결론

(1) 암모니아는 타연료에 비해 긴 주연소기간을 갖고 있어, 점화시기 진각이 60 BTDC 까지 가능하며, 넓은 진각 범위를 지니고 있다. 또한, 높은 옥탄가로 인해 노킹저항성이 좋아, 60 BTDC까지 진각하여도 노킹 현상이 발생되지 않았다.

(2) 일정 조건보다 점화시기를 더 진각시킬 경우, 연료와 공기의 혼합에 영향을 끼쳐, 불안정한 연소를 나타냈다. 점화시기를 지각시킬 경우, 느린 층류화염속도로 인한 화염소 생성의 어려움으로 불안정한 연소를 초래하였다.

(3) 이론공연비 조건 혹은 이보다 더 농후한 조건에서 층류화염속도가 빠름에도 불구하고, 불안정한 연소가 발생하였다. 이는 암모니아의 높은 잠열로 기인할 수 있는데, 실린더 내 액상의 암모니아가 기화되면서 열 에너지를 흡수하여 불안정한 연소를 초래하였다.

(4) 공기과잉률이 1.1 보다 더 희박한 경우, 느린 층류화염속도로 인해 잦은 실화의 발생으로 불안정한 연소를 초래하였으며, 암모니아 연료의 특성인 좁은 가연성 한계로 인해 본 실험과 같이 공기과잉률이 1.0-1.2 조건에서만 연소가 가능하였다.

(5) 저자들은 이전의 연구결과 [15]를 통해서 SCR 촉매를 이용하여 엔진에서 배출되는 질소산화물과 미연 암모니아의 반응을 통해 두가지 유해물질들을 동시에 저감할 수 있음을 밝혀낸 바 있다. 이런 결과가 암모니아 엔진 개발에 매우 고무적인 접근 방법으로 이용될 수 있을 것이며, 향후 연구 주제로 제어를 통한 완전한 동시저감을 계획하고 있다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원 (20210606, 2,100마력급 LNG-암모니아 혼소 엔진 개발)과 산업통상자원부 재원으로 한국산업기술평가관리원 (20017612, 무탄소 연료 주추진 엔진의 핵심부품 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

REFERENCES

[1] "World Greenhouse Gas Emissions: 2019", "<https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2019>", 2023년 6월 7일 접속

[2] "Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and im-

- prove air quality”, European Comission, “https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495”, 2023년 6월 7일 접속
- [3] “The role of the European Union’s vehicle CO2 standards in achieving the European Green Deal”, “<https://theicct.org/publication/the-role-of-the-european-unions-vehicle-co2-standards-in-achieving-the-european-green-deal/>”, 2023년 6월 7일 접속
- [4] “Hydrogen Supply”, IEA, “<https://www.iea.org/reports/hydrogen-supply>”, 2023년 6월 7일 접속
- [5] Muhammad Imran Khan, Sami G. Al-Gamdi. “Hydrogen economy for sustainable development in GCC countries: A SWOT analysis considering current situation, challenges, and prospects” *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 10315-10344, (2023)
- [6] “The future Hydrogen ”, IEA, “<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> ”, 2023년 6월 7일 접속
- [7] “World fertilizer trends and outlook to 2022”, Food and Agriculture Organization of the United Nations, “<https://www.fao.org/home/en/>”, 2023년 6월 7일 접속
- [8] Yoshitsugu Kojima, Masakuni Yamaguchi “Ammonia as a hydrogen energy carrier”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 22832-22839, (2022)
- [9] Wai Siong Chani, Yelei Bao, Pengfei Jin, Guang Tang, Lei Zhou “A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 147, 111254, (2021)
- [10] Ayman M. Elbaz, Shixing Wang, Thibault f. Guiberti, William L. Roberts, “Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications”, *Fuel Communications*, 10, 100053, (2022)
- [11] Joao Sousa Cardoso, Valter Silva, Rodolfo C. Rocha, Matthew J. Hall, Mario Costa, Daniela Eusebio, “Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines”, *Journal of Cleaner Production*, 296, 126562, (2021)
- [12] Pragya Berwal, Sudarshan Kumar, Bhupendra Khandelwal, “A comprehensive review on synthesis, chemical kinetics, and practical application of ammonia as future fuel for combustion”, *Journal of the Energy Institute*, 99, 273-298, (2021)
- [13] H. Konayashi, A. Hayakawa, K. Kunkuma, A. Somarathne, E. Okafor, “Science and technology of ammonia combustion”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 109-133, (2019)
- [14] A. Hayakawa, T. Goto, R. Mimoto, Y. Arakawa, T. Kudo, H. Kobayashi, “Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures”, *Fuel*, 159, 98-106, (2015)
- [15] S. Oh, C. Park, M. Ahn, H. Jang, S. Kim, “Experimental approach for reducing nitrogen oxides emissions from ammonia-natural gas dual-fuel spark-ignition engine”, *Fuel*, 332, 126065, (2023)