

디젤 분사시기가 HPDI 암모니아-디젤 이중연료 혼소 엔진의 연소 특성에 미치는 영향

박 찬 수^{*1)}, 장 일 품²⁾, 박 철 웅¹⁾, 김 민 기¹⁾, 장 형 준¹⁾, 박 경 태²⁾, 김 경 훈²⁾

한국기계연구원 친환경모빌리티연구실¹⁾, 충남대학교 자율운항시스템공학과²⁾

Effect of Diesel Injection Timing on the Combustion Characteristics of an HPDI Ammonia–Diesel Dual-Fuel Engine

Chansoo Park^{*1)} · Ilpum Jang²⁾ · Cheolwoong Park¹⁾ · Minki Kim¹⁾ · Hyeongjun Jang¹⁾ · Gyungtae Park²⁾ · and

Kyunghun Kim²⁾

Department of Eco-friendly Mobility Power, Korea Institute of Machinery and Materials¹⁾, Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University²⁾

Key words : Ammonia(암모니아), Diesel(디젤), Dual-Fuel combustion(이중연료 혼소), Flame Visualization(화염 가시화), Asymmetric Fuel Injection(비대칭 연료 분사)

박찬수*, E-mail: cspark86@kimm.re.kr

국제해사기구(International Marine Organization, IMO)의 2023년 온실가스(Green House Gas, GHG) 배출 감축 전략에 따라, 2025년 4월에 열린 MEPC 83회의에서는 해운 산업의 온실가스 탄소중립 이행체계(Net-Zero Framework)가 채택되었다. 이 이행체계에 따라, 총톤수(Gross Tonnage, GT) 5,000톤 이상의 국제 항해 선박은 온실가스 연료 집약도(Greenhouse Gas Fuel Intensity, GFI)에 의해 정의되는 저탄소 연료 전환 목표를 의무적으로 준수해야 한다. 또한, 이산화탄소(CO₂) 환산 기준을 초과하는 배출에 대해서는 탄소 부담금이 부과된다. 이러한 해운분야의 탈탄소 연료 전환 압박은 날로 심해지고 있으며, 이로 인해, 무탄소 연료 적용이 주목받고 있다. 특히, 암모니아의 경우, 부피당 에너지 밀도가 높아 차세대 선박 동력기관의 주 연료로 기대되고 있다.

본 연구는 개조된 선박용 단기통 12.5L급 중속 고압직접분사(High Pressure Direct Injection, HPDI) 암모니아-디젤 이중연료 혼소 엔진에서 착화제로 사용된 디젤의 분사시기(Micro-pilot(MP) injection timing)가 암모니아 연소 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 암모니아와 디젤은 독립된 연료 분사기를 통해 실린더 내로 직접 분사되었다. 암모니아의 경우, 실린더 중앙에 설치된 기계식 연료 분사기를 사용하였으며, 디젤은 실린더 측면에 장착된 전자제어식 연료 분사기를 사용하였다. 디젤은 암모니아의 점화원으로 사용하였으며, 암모니아보다 먼저 분사하여 암모니아 연소에 유리한 조건을 형성하도록 하였다.

실험은 엔진 정격 부하의 25%에 해당하는 부분부하 조건에서 수행되었다. 디젤 분사 시기는 암모니아 분사 시기(기준 분사시기, ref.)보다 앞당겨 -31.5°CA부터 -11.5°CA까지 5°CA 간격으로 변화시켰으며, 암모니아 분사 시기는 기계식 분사장치의 제약으로 인해 기준 분사시기로 고정되었다.

주요 성능 분석 지표로 지시 열효율(Indicated Thermal Efficiency, ITE), 암모니아 연소 효율($\eta_{Comb.NH_3}$), 그리고 비출력당 NO_x, N₂O, NH₃ 배출량을 분석하였다. 관찰된 결과의 경향을 이해하기 위해 연소 과정을 열방출률(Heat Release Rate, HRR) 분석을 통해 세 단계로 구분하였다: 디젤 예혼합 연소 단계, 암모니아 착화 지연 단계, 암모니아 주 연소 단계. 각 연소 단계의 에너지 기여도와 발생 시점을 디젤 분사시기 변화에 따라 분석하였다. 연소 현상에 대한 심층 이해를 위해, 실린더 헤드 측면에 내시경 렌즈를 삽입하여 고속 카메라로 암모니아-디젤 혼합 연소 과정을 촬영하였으며, 이를 통해, 화염의 구조, 위치, 색상을 분석하였다.

실험 결과, 지나치게 이른 디젤 분사 시기 또는 지나치게 늦은 디젤 분사 시기 조건의 경우, 전체적인 연소 지표에 있어서 성능 저하를 보였는데, 이는 디젤 연료 분사기의 비대칭 설치로 인한 디젤 예혼합 연소 위치와 암모니아 분무의 불일치, 그리고 두 연료간 분무 간섭이 주요 원인임을 알 수 있었다.

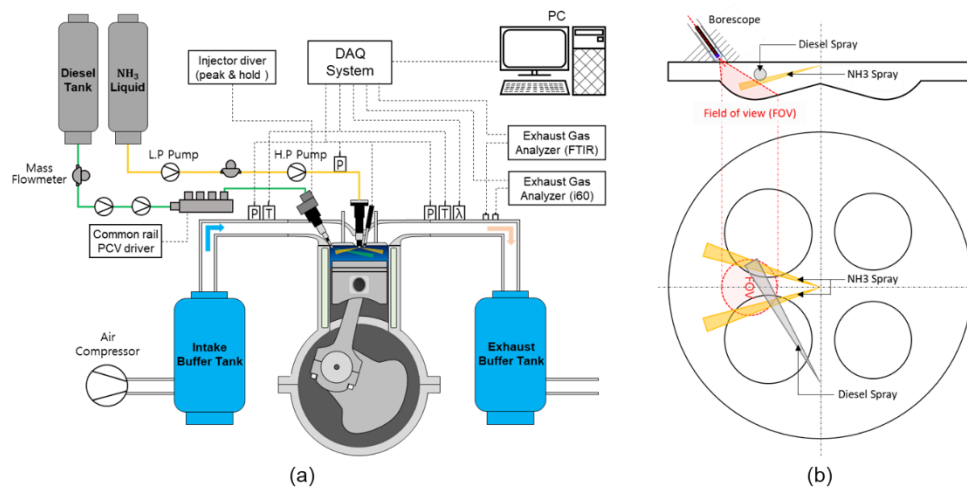


Figure 1. Schematic of the experimental apparatus: (a)Engine test system, (b)Combustion imaging setup

Table 1. Experimental conditions

Item	Value				
Engine speed [rpm]	900				
Engine load [%]	25				
MP diesel injection timing [CAD]	ref.-31.5*	ref.-26.5	ref.-21.5	ref.-16.5	ref.-11.5

*: baseline test condition

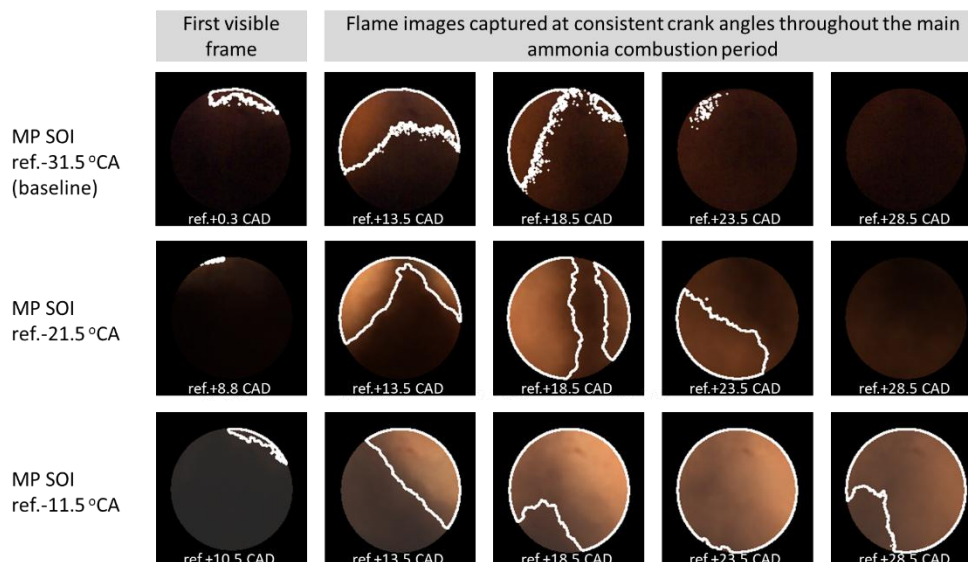


Figure 2. Comparison of flame image under different MP diesel injection timing

사사

본 연구는 “2,100마력급 LNG-암모니아 혼소 엔진 개발” 과제의 일환으로 수행되었으며, 해양수산부의 금전적 지원 하에 수행되었음을 밝힙니다. (과제번호: 1525011796)