

직접분사식 암모니아 SI 엔진에서 밸브 오버랩 기간이 연소 및 배기 배출 특성에 미치는 영향

김민기^{*1)} · 박찬수¹⁾ · 박철웅¹⁾ · 장일품²⁾ · 박경태²⁾ · 김경훈²⁾ · 이승우³⁾

한국기계연구원 친환경모빌리티연구실¹⁾, 충남대학교 자율운항시스템공학과²⁾, 현대자동차³⁾

Effects of Valve Overlap Period on Combustion and Emissions in an Ammonia Direct Injection Spark-Ignition Engine

Minki Kim^{*1)} · Chansoo Park¹⁾ · Cheolwoong Park¹⁾ · Ilpum Jang²⁾ · Gyeongtae Park²⁾ · Kyunghun Kim²⁾ · Seungwoo Lee³⁾

Department of Eco-friendly Mobility Power, Korea Institute of Machinery & Materials¹⁾, Department of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University²⁾, Hyundai Motor Company³⁾

Key words : Ammonia SI engine(암모니아 스파크점화 엔진), Variable Valve Timing,(가변 밸브 타이밍), Valve Overlap(밸브 오버랩), NH₃ slip(암모니아 슬립), NOx emission(질소산화물)

* 김민기, E-mail: kmk@kimm.re.kr.

CO₂ 배출 저감 요구가 강화됨에 따라 암모니아는 무탄소 연료로서 차세대 내연기관의 유력한 대체 에너지로 각광받고 있다. 그러나 낮은 화염 전파 속도(약 7 cm/s), 높은 발화 온도(약 650°C), 낮은 발열량(18.8 MJ/kg) 등으로 인해 출력 성능 저하, 낮은 연소 효율, 미연 암모니아 배출 증가 문제가 발생한다. 또한 연소 과정에서 Fuel-NOx가 주로 형성되며, 국부 고온 영역에서는 Thermal NOx도 발생할 수 있어 NOx 발생 메커니즘이 복합적으로 작용하며, 이에 따라 배출 제어는 여전히 어려운 과제로 남아 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 다양한 접근이 제시되고 있으나, 암모니아 전소 엔진에서 밸브 오버랩 조건이 연소와 배출 특성에 미치는 영향은 충분히 규명되지 않았다. 특히 기존 연구는 주로 수소 보조 연료 혼소, 연소실 형상 개선, 배기 후처리 장치 적용에 집중되어 왔으며, 밸브 타이밍을 직접 제어하여 연소와 배출 특성을 분석한 연구는 거의 전무하다. 따라서 본 연구는 밸브 오버랩 전략을 이용하여 직접분사식 암모니아 전소 스파크 점화 엔진의 연소 안정성과 배출 특성 개선 가능성을 실험적으로 검토하고자 하였다.

실험은 직렬 4기통 직분식 스파크 점화 엔진을 대상으로 수행되었다. 엔진속도는 1500 rpm과 1900 rpm 두 조건에서 진행하였으며, 엔진의 부하는 제동 평균 유효압력(BMEP)을 기준으로 약 1.5 MPa로 맞추었다. 연소 변동성은 nIMEP 기준 변동계수(CoV)를 5% 이하로 제한하였다. 흡·배기 밸브 타이밍은 가변 밸브 타이밍(VVT) 시스템을 활용하여 제어하였다. 배기 밸브는 기준 위치에서 진각 폐쇄(EETC, -E)하였으며, 흡기 밸브는 지각 개방(LIVC, +)하여 Positive valve Overlap(PVO)에서 Negative Valve Overlap(NVO)까지 조건을 변화시켰다. 이를 통해 밸브 오버랩 범위가 연소 및 배출 특성에 미치는 영향을 규명하였다.

실험 결과, 배기 밸브 진각 조건에서는 내부 배기가스 재순환(iEGR)이 증가하면서 연소실 온도가 상승하였고, 이에 따라 열방출 개시가 빨라지고 최대 열방출률이 증가하였다. 결과적으로 초기 연소 기간은 상대적으로 짧아지는 경향을 보였다. 흡기 밸브 지각 조건에서는 점화시기가 지각되어 열방출은 기준조건과 동일하거나 늦게 나타났으나, 1500 rpm에서는 NH₃ slip 감소와 체류시간 확보 효과로 인해 연소 효율과 제동 열효율(Brake thermal efficiency, BTE)이 개선되었다. NH₃ slip은 전반적으로 감소하여 더 많은 연료가 연소에 참여함으로써 연소 효율은 향상되었으나, NVO 조건에서는 NOx 증가가 억제되는 특성이 확인되었다.

엔진 속도 변화에 따른 영향을 비교한 결과, 1900 rpm에서는 기준이 이미 NVO 상태였고 추가적인 진각 시 NH₃ slip이 더 줄어들고 연소 효율이 향상되었으나 NOx는 유지되거나 감소하는 경향을 보였다.

배기 밸브 진각(-E) 조건에서 연소 효율 개선 효과가 두드러지게 나타났다. 이러한 경향은 엔진 속도 변화에도 일관되게 유지되어, 밸브 타이밍 제어가 저속 및 고속 운전 영역 모두에서 적용이 가능한 전략임을 확인하였다.

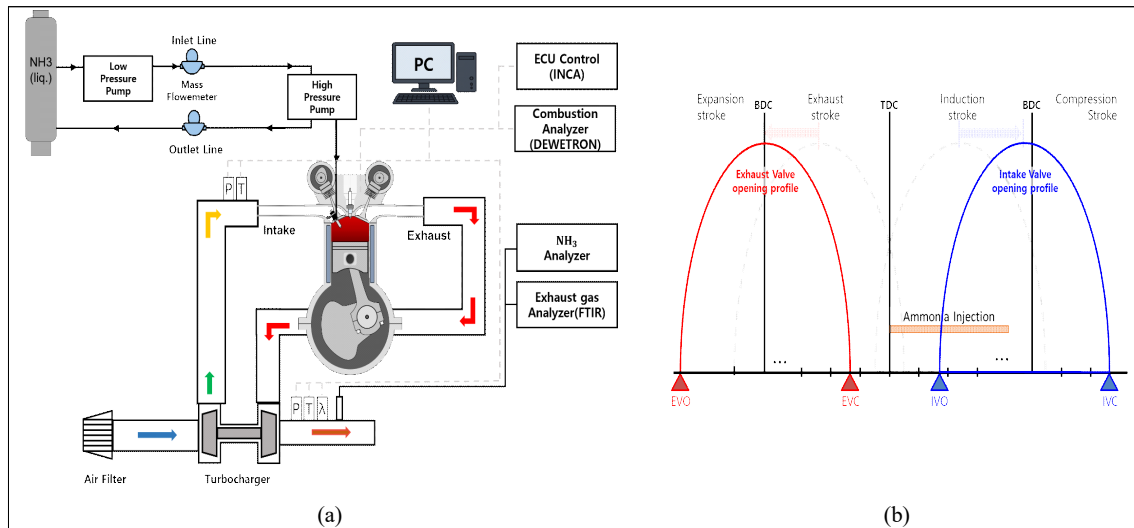


Figure 1. Schematic of the experimental setup: (a) Engine test system, (b) Variable valve timing

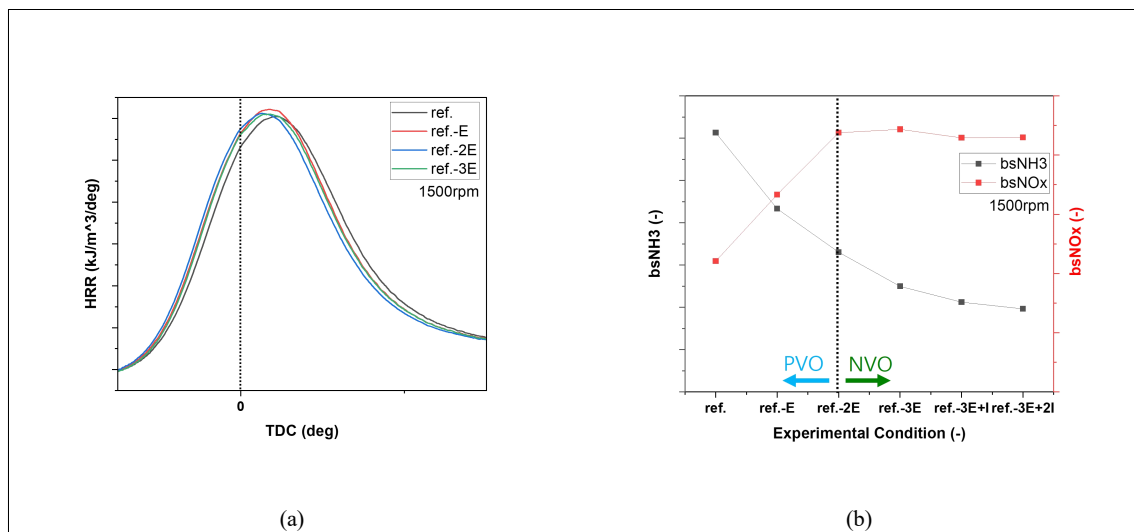


Figure 2. Combustion and emission characteristics: (a) HRR, (b) NOx and NH₃ slip