

암모니아 SI엔진에서 흡기밸브 타이밍과 점화시기가

성능 · 배출 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

조 민 수¹⁾ · 박 정 수^{*2)}

조선대학교 기계공학과¹⁾ · 조선대학교 기계공학과²⁾

Numerical Study on the Effects of Intake Valve Timing and Spark Timing on the Performance and Emission Characteristics in Ammonia-fueled SI Engine

Minsu Cho¹⁾ · Jungsoo Park^{*2)}

Undergraduate School, Department of Mechanical Engineering, Chosun University Republic of Korea¹⁾

Department of Mechanical Engineering, Chosun University Republic of Korea²⁾

Key words: Ammonia(암모니아), Continuously variable valve duration(연속 가변 밸브 듀레이션), Late intake valve closing(늦은 흡기밸브 닫힘), Minimum advance of best torque(최소 진각시점), Spark ignition(스파크 점화), Spark timing(점화 시기)

교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

지구온난화와 기후변화에 대응하기 위해 수송 부문의 탈탄소화가 요구되면서 무탄소 연료의 후보로 수소와 암모니아가 주목받고 있다. 수소는 높은 에너지 밀도와 빠른 연소 속도라는 장점을 가지지만, -253°C 에 달하는 극저온 액화 저장의 어려움과 역화와 같은 연소 불안정성 문제를 해결해야 하는 과제가 존재한다. 반면, 암모니아는 수소에 비해 상온, 저압에서 쉽게 액화가 가능하고 이미 비료 산업을 통해 전 세계적인 생산 및 운송 인프라가 구축되어 있어 수소보다 현실적인 대안으로 부상하고 있다. 또한, 암모니아는 액화 시 수소보다 높은 체적 에너지 밀도를 가져 저장 및 운송이 용이하기에 '수소 운반체(Hydrogen carrier)'로서의 잠재력이 있다.

하지만 암모니아를 내연기관의 단일 연료로 사용하기 위해서는 해결해야 할 기술적 난제들이 존재한다. 암모니아는 가솔린에 비해 현저히 느린 화염 전파 속도와 높은 최소 점화 에너지를 가져 연소 안정성이 낮고, 낮은 부하 조건에서는 실화가 발생하기 쉽다. 또한, 연료 자체에 질소(N) 원자를 포함하고 있어 연소 과정에서 다량의 질소산화물(NOx)이 생성될 수 있다는 근본적인 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해 선행 연구에서는 가솔린이나 디젤과 같은 화석연료와 암모니아를 혼합 연소하는 접근이 주로 이루어졌다. 이 과정에서 암모니아 혼소율이 증가할수록 연소 안정성 확보를 위해 점화시기를 진각(Advance)시켜야 하는 것으로 보고되었는데, 이는 암모니아의 느린 연소 특성을 보완하기 위한 제어의 필요성을 시사한다. 그러나 과도한 점화시기 진각은 실용 운전 영역에서 적용이 어렵다는 한계가 있다. 따라서 암모니아를 단일 연료로 사용하는 경우에는 조건별 최적 점화시기를 확보하여 연소 안정성과 성능을 동시에 만족시킬 필요가 있다. 또한, 혼소는 CO₂ 배출량을 부분적으로만 저감할 수 있으므로 탄소중립 달성을 위해서는 암모니아를 '단일 연료'로 사용하여 CO₂ 배출을 원천적으로 차단하는 기술 개발이 필수적이다. 암모니아 단일 연료 엔진의 실현을 위해서는 느린 연소, 불완전 연소, NOx 생성이라는 세 가지 핵심 과제를 극복해야 하며, 이를 위해서는 엔진의 핵심 설계 및 운전 인자를 최적화하는 연구가 요구된다.

흡기밸브 타이밍(LIVC/EIVC)은 유효 압축비(CR) 및 가스 교환 특성을 변화시켜 연소 안정성과 NOx 생성에 영향을 미치며, 점화 시기는 최종적으로 연소 위상과 엔진 출력을 결정하는 핵심 제어 인자이다. 따라서 본 연구는 흡기밸브 타이밍과 점화 시기를 주요 운전 인자로 설정하고, 1차원 엔진 모델을 통해 체계적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 상용 해석 프로그램인 GT-SUITE를 이용하여 800cc 2기통 엔진 모델을 구축하고, Base 조건(CR=9.2, 1,600 rpm, $\Phi=1.1$)에서 모델의 신뢰성을 검증하였다. 이후 흡기밸브 개폐시기를 변화시키며 조건별 MBT 점화시기, 성능과 배출 특성을 분석하였다. 해석결과 고압축비 조건은 열효율과 출력을 향상시키지만, NOx 배출이 증가하는 trade-off 관계를 보였으며, LIVC 전략은 연소 온도를 낮추어 NOx 저감 효과를 보였고, EIVC 전략은 부분 부하 조건에서 연소 안정성을 개선하는 것으로 확인되었다. 본 연구의 결과는 암모니아 엔진의 기초 설계

데이터를 제공하고, 탄소중립 수송 시스템 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

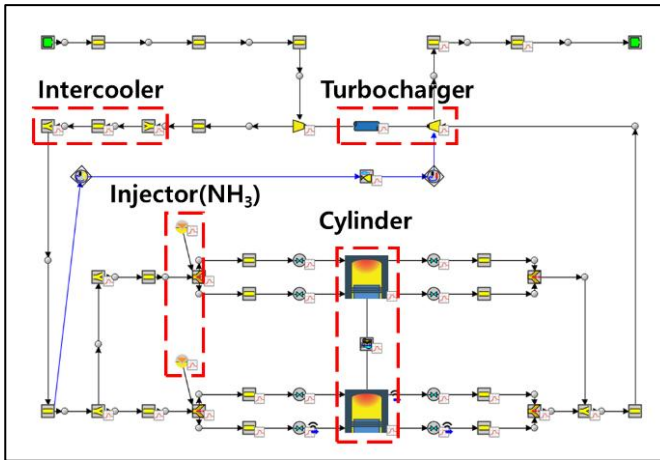


Fig. 1 1D engine map

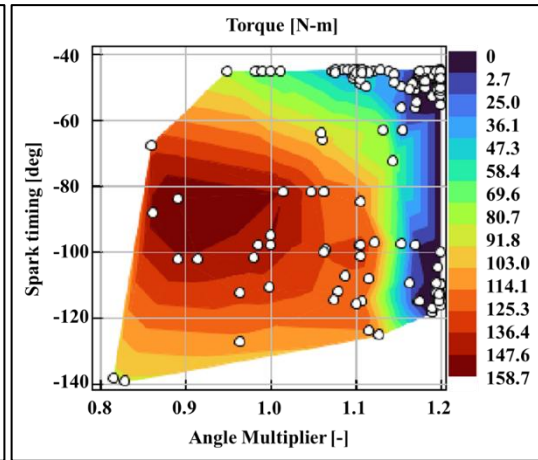


Fig. 2 Brake torque vs. Angle multiplier and Spark timing