

Passive turbulent jet ignition 기술을 활용한 소형 엔진의

암모니아 연소 특성 향상에 대한 수치해석적 연구

주 강 민¹⁾·강 현 웅¹⁾·김 정 현¹⁾·박 정 수^{*2)}

조선대학교 기계공학과 대학원¹⁾·조선대학교 기계공학과¹⁾·조선대학교 기계공학과^{*2)}

A numerical study on the improvement of ammonia combustion characteristics in a small engine using passive turbulent jet ignition technology

Kangmin Ju¹⁾ · Hyunung Kang¹⁾ · Jeonghyeon Kim¹⁾ · Jungsoo Park^{*2)}

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Republic of Korea¹⁾,
Undergraduate School, Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Republic of Korea¹⁾,
Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Republic of Korea^{*2)}

Key words : Ammonia(암모니아), Turbulent jet ignition(난류제트점화), Deflagration(폭연), Small engine(소형엔진), Burn duration(연소시기), Pre-chamber(프리챔버)

교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

기후변화 대응을 위한 배출가스 규제가 강화되고 있으며, 온실가스 감축 및 탄소중립 실현을 위한 노력이 전 세계적으로 확대되고 있다. 내연기관 분야에서도 기존 탄화수소 연료를 대체할 무탄소 연료의 도입이 요구되고 있으며, 이에 따라 수소 및 암모니아가 차세대 친환경 연료로 주목받고 있다. 특히, 암모니아는 탄소를 포함하지 않아 CO₂ 배출이 전혀 없으며, 기존 연료 인프라를 활용할 수 있는 장점이 있어 내연기관 연료로서 높은 잠재력을 지니고 있다. 수소 및 암모니아 모두 내연기관에서 활용 가능하지만, 수소는 높은 발활성으로 인해 연료 공급 및 제어에 어려움이 있으며 노킹(knocking)발생 가능성이 높다. 반면, 암모니아는 낮은 연소속도와 높은 점화 에너지를 요구하지만, 저장 및 운송이 용이하고 화재 및 폭발 위험성이 낮아 내연기관 적용에 있어 보다 안전한 대체 연료로 평가된다. 현재 암모니아를 단독 연료로 사용하는 연구가 진행되고 있으며, 연소 특성을 개선하기 위한 다양한 기술적 접근이 요구되고 있다.

그러나 암모니아의 전소를 달성하기 위해서 여러 한계가 존재한다. 암모니아는 낮은 화염 전파(Flame propagation) 속도와 긴 점화 지연 시간을 가지며, 이에 따라 고속/고부하 조건에서는 짧은 체류 시간으로 인해 불완전 연소가 발생하고, 저속/저부하 조건에서는 점화 불안정성과 낮은 연소 온도로 인해 연소 효율이 저하된다. 이러한 난연(flame retardant) 특성은 기존 내연기관에서의 효율적인 적용을 어렵게 하며, 이를 해결하기 위한 연소 기술의 발전이 필수적이다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 Passive turbulent jet ignition (PTJI) 기술을 적용했다. PTJI 기술은 예혼합 가스가 작은 프리챔버에서 점화된 후, 다중 제트 화염을 주 연소실로 분사하여 강한 난류 효과를 유도함으로써 연소 안정성과 화염 전파 속도를 증가시키는 기술이다. 이 기술의 활용은 암모니아 연소에서의 난연 한계를 극복할 수 있으며, 특히 저속 및 고속 영역의 전 범위에서 연소 효율과 안정성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 PTJI 시스템을 적용한 소형엔진에서 암모니아 연소 특성을 수치해석을 통해 분석하고, 기존 점화 방식과의 비교를 통해 PTJI 기술의 적용 가능성을 평가하였다.

Fig. 1은 대상엔진의 1D 파워트레인 모델이며, 800cc급 2기통 가솔린 port fuel injection (PFI) 방식의 터보차저 엔진을 대상으로 암모니아 연료 적용 가능성을 평가했다. 기존의 가솔린 연료 대신 암모니아를 단일 연료로 전환하여 연소 해석을 수행한 결과, 암모니아의 낮은 화학적 반응성과 연소 속도로 인해 연소율 저하 및 출력 성능의 한계가 나타났으며, 동일 운전조건(1600rpm, Equivalence ratio: 1.1)에서 가솔린 대비 약 60% 수준에 해당하는 난류 화염 전파 속도와 50%이상 감소된 brake power 수준을 보였다. 특히 1600rpm의 상대적인 저속 조건에서 약 -45CA aTDC 이상 진각된 점화시기(spark timing)가 요구되어야 안정적인 점화가 가능함을 확인했다. 이는 암모니아의 낮

은 층류 화염 속도(Laminar flame speed)와 연소 지속 간 증가(Burn duration extension)으로 인한 불완전 연소에 기인함을 확인했다. 이러한 연소 성능 저하를 보완하기 위해 본 연구에서는 PTJI의 pre-chamber 체적이 실린더 간극 체적(Clearance volume)의 5%로 선정된 PTJI 시스템을 대상엔진에 적용했으며 Fig. 2는 PTJI 시스템이 구축된 모델을 확인할 수 있다. 이는 최적의 난류 제트 형성을 통해 화염 전파 속도를 증가시키고, 적절한 압력 상승을 유도하여 연소 안정성을 확보할 수 있다. 연구 결과, 동일 운전조건에서 5%의 pre-chamber 체적은 암모니아 연료의 연소 지속 시간을 단축시켰으며, 50% burn crank angle은 약 40CA aTDC 이상 앞당길 수 있음을 확인했다. 또한 연소 지속 시간의 단축으로 엔진의 열효율(Thermal efficiency)는 10% 이상 개선된 경향을 보였다.

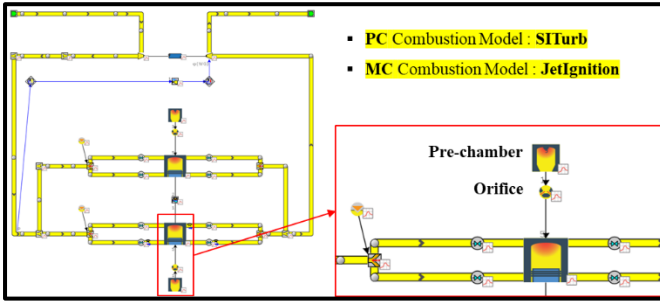


Fig. 1 1D powertrain modeling and PTJI components.

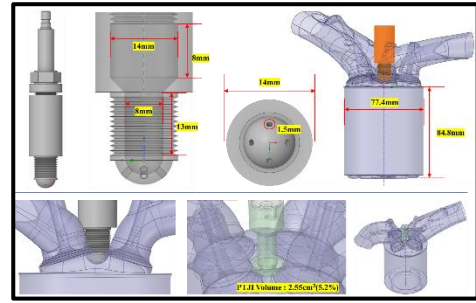


Fig. 2 PTJI geometry and specification.

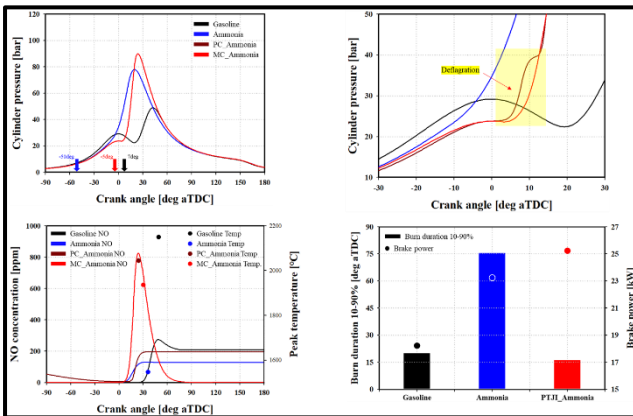


Fig. 3 PTJI based, ammonia combustion performance and emission characteristics.

본 연구는 교육부 산하 한국연구재단 지원의 기초과학사업의 지원을 받아 수행되었음 (과제번호: RS-2024-00410821).