

소형 SI 엔진의 암모니아 연소 특성과 PTJI 기반 다단점화 전략을 통한

희박 연소 안정성에 관한 수치해석적 연구

주 강 민¹⁾·박 정 수^{*2)}

조선대학교 기계공학과 대학원¹⁾·조선대학교 기계공학과²⁾

A numerical study on ammonia combustion characteristics and lean-burn stability through PTJI-based multi-stage ignition strategy in a small SI engine

Kangmin Ju¹⁾ · Jungsoo Park^{*2)}

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

Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Republic of Korea^{*2)}

Key words : Ammonia(암모니아), Lean combustion(희박연소), Multi-stage ignition(다단점화), Pre-chamber(예연소실), Stratified combustion(성층연소), Turbulent jet ignition(난류제트점화)

교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

탄소중립 사회 전환과 내연기관의 탄소 배출 저감 필요성이 증가함에 따라, 암모니아는 탄소를 배출하지 않는 청정 연료로 주목받고 있다. 그러나 낮은 화학 반응성과 높은 점화 에너지 요구로 인해 연소 안정성이 낮고, 특히 희박 연소 조건에서는 난연(Flame retardancy) 문제가 발생한다. 최근 엔진 업계에서는 초고효율·초저배기를 달성하기 위해 엔진의 소형화가 활발히 진행되고 있으며, 소형 엔진은 혼합기 형상, 점화 위치, 난류 생성 등 연소 변수의 영향을 명확하게 확인할 수 있어, 암모니아 연료 적용 시 연소 특성을 규명하고 안정화 전략을 개발하기에 적합하다. 본 연구의 목표는 소형 PFI(Port fuel injection) SI(Spark ignition) 엔진(800cc, 2기통)에서 암모니아 단일 연료의 연소 특성과 난연성을 체계적으로 분석하고, 희박 연소 조건에서도 연소 안정성을 확보하기 위한 TJI(Turbulent jet ignition) 기반 다단 점화 전략을 제시하는 것이다. 이를 위해 해석 기반 접근을 적용했으며, 연구는 크게 세 단계로 진행되었다. 첫째, 다양한 당량비 조건에서 암모니아 연소 특성을 분석하여 연소 활성 구간과 난연 한계를 규명했다. 둘째, PTJI(Passive TJI) 시스템을 소형 엔진 특성에 맞춰 설계하고, pre-chamber 체적을 실린더 간극 체적 대비 약 5%로 설정하며, 6개의 오리피스(직경 1.5mm)를 통해 실린더 내 난류를 강화하여 공기-암모니아 혼합기의 균일 예혼합 연소를 유도했다. 셋째, 다단 점화를 적용하여 첫번째 점화가 암모니아 크래킹(Cracking)을 촉진하는 역할을 수행하며, 생성된 반응성 혼합물(수소 포함)이 두번째 점화에서 안정적인 연소를 달성하도록 했다. 또한 연비 개선과 배출가스 저감을 위해 희박 조건인 당량비 0.9에서도 PTJI와 다단 점화를 적용했다.

해석 결과, 암모니아 단일 연료는 농후한 조건인 당량비 1.1에서 가장 활발한 연소를 나타냈으나, 안정적인 연소를 확보하기 위해서는 점화시기를 -90° CAD 이상으로 초진각해야 했으며, 이는 실제 엔진 적용 관점에서는 비현실적인 점화시기임을 제시한다. PTJI를 적용한 경우, pre-chamber에서 점화된 혼합물은 오리피스를 통해 실린더로 제트 화염을 형성하면서 난류 에너지가 강화되고, 암모니아 혼합물의 균일성을 향상시켜 점화시기 -30° CAD 내외에서도 안정적인 연소가 가능함을 확인했다. 그러나 PTJI를 적용하여 연소 안정성을 확보했음에도 불구하고, 농후 조건에서는 연비 개선 및 배출가스 저감이 추가적으로 요구되는 한계가 나타났다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 희박 조건인 당량비 0.9에서 PTJI와 다단점화를 적용했다. 점화시기를 분석하는 과정에서 첫번째 점화에서는 암모니아 크래킹을 유도하여 수소를 확보하는 경향성을 확보했으며, 두번째 점화에서는 생성된 반응성 혼합물이 잔여 암모니아의 예혼합 화염을 촉진하여 강화된 연소를 달성할 수 있었다. 이로 인해 연비는 약 15~20% 개선되고, 질소산화물의 배출량은 약 30% 감소했으며, 출력 성능은 참조 엔진인 가솔린과 동등한 수준을 유지할 수 있는 것을 확인했다. 또한 첫번째 점화를 통한 크래킹 과정과 두번째 점화를 통한 강화된 화염 전파는 희박 조건에서 부분적으로 성층 연소(Stratified combustion) 특성을 나타내어, 점화 에너지와 난류 조합을 통해 안정적인 연소를 확보할

수 있음을 확인했다.

본 연구는 해석 기반 접근을 통해 소형 내연기관에서 암모니아 연소 특성을 정량적으로 평가하고, PTJI 및 다단 점화 전략이 희박 연소 조건에서 연소 안정성, 성능 유지, 배출가스 저감 측면에서 효과적임을 수치해석적으로 제시했다. 이 연구 결과는 향후 엔진의 retrofit 및 탄소중립 연료 적용 전략 개발에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

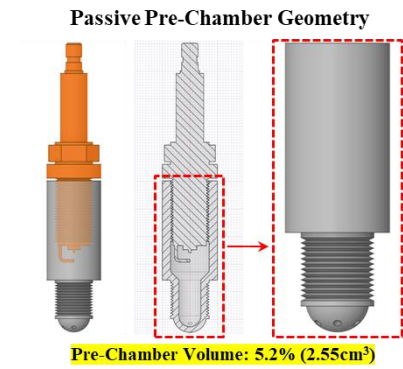


Fig. 1 PTJI 형상 선정

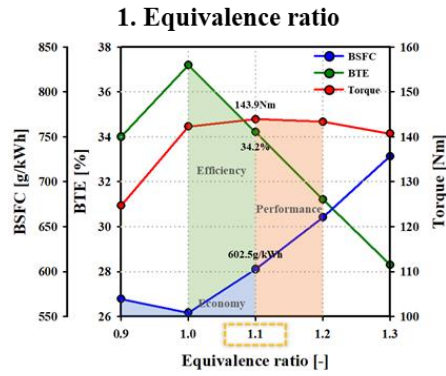


Fig. 2 당량비별 암모니아 연소특성 분석 결과

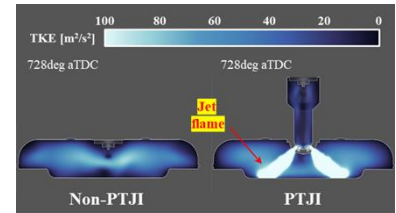


Fig. 3 PTJI 적용에 따른 난류운동 에너지 특성 비교 결과

본 연구는 교육부 산하 한국연구재단 지원의 기초

과학사업의 지원을 받아 수행되었음 (과제번호

RS-2024-00410821).