

정적연소기 기반 pre-chamber 설계 변수 분석을 통한

암모니아 소형 SI 엔진의 연소 안정성에 관한 수치해석적 연구

김 정 현¹⁾ · 주 강 민¹⁾ · 이 민 석²⁾ · 박 정 수^{*3)}

조선대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 조선대학교 기계공학과²⁾ · 조선대학교 기계공학과^{*3)}

Numerical Study on Combustion Stability of a Small Ammonia SI Engine through Pre-Chamber Design Variable Analysis Based on a CVCC

Jeonghyeon Kim¹⁾ · Kangmin Ju¹⁾ · Minseok Lee²⁾ · Jungsoo Park^{*3)}

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

Undergraduate School, Department of Mechanical Engineering Chosun University²⁾

Department of Mechanical Engineering Chosun University^{*3)}

Key words : Ammonia(암모니아), Combustion stability(연소안정성), Consatnt Volume Combustion Chamber(정적연소기), Pre-chamber(예비연소실), Turbulent Jet Ignition(난류 제트 점화), Turbulent Kinetic Energy(난류 운동 에너지)

교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

2050 탄소중립 목표 달성을 위해 기존 동력 시스템의 무탄소 연료로의 전환이 요구되고 있다. 암모니아(NH_3)는 연소 과정에서 CO_2 를 직접 배출하지 않으며, 액체 상태에서 수소 대비 높은 에너지 밀도를 가지고, 특히 재생에너지 기반 그린 암모니아로 생산할 경우 전주기적 관점에서 실질적인 탄소중립 달성이 가능하다는 점에서 주목받고 있다. 그러나 암모니아-공기 예혼합 화염의 종류 화염 전파속도는 상온·이론공연비 조건에서 약 6~7cm/s 수준으로, 희박 혼합기 또는 고속 운전 조건에서 점화 지연 및 misfire 발생 가능성으로 기존 SI(Spark Ignition) 엔진으로는 안정적인 연소 구현에 한계가 존재한다. PTJI(Passive Turbulent Jet Ignition) 방식은 예비연소실(Pre-chamber) 내 점화 후 오리피스스를 통해 고반응성의 난류 제트를 주연소실로 분사함으로써 화염 전파를 촉진하고 연소 안정성을 향상시킬 수 있다. 다만 PTJI를 통한 연소 성능은 Pre-chamber의 설계 변수(체적, 오리피스 직경 및 개수)에 민감하게 반응하며 실 엔진 환경에서의 직접적인 분석은 높은 비용과 복잡한 경계 조건으로 인해 체계적인 변수 제어가 어렵다. CVCC(Constant Volume Combustion Chamber)는 압력, 온도 및 혼합기 조성을 독립적으로 제어할 수 있는 환경을 제공하여 엔진 조건과 분리된 상태에서 설계 변수의 영향을 정밀하게 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 CVCC에서 Pre-chamber의 설계 변수를 체계적으로 분석하고 800cc, 2기통 PFI(Port Fuel Injection) 소형 SI 엔진의 PTJI 적용을 통한 암모니아 연료의 연소 안정성 개선을 목표로 하였다. 두 단계의 수치해석적 접근법을 적용하였으며, 먼저 400cc CVCC에서 Pre-chamber 체적, 오리피스 직경 및 개수를 설계 변수로 설정하고 Full factorial 실험계획법을 적용한 CFD해석을 통해 TKE(Turbulent Kinetic Energy) 및 연소 특성에 대한 경향성을 도출하였다. 이어서 GT-suite 기반 1D 엔진 시뮬레이션을 통해 당량비 및 RPM별 성능과 연소 위상을 분석하고, CVCC에서 확인된 설계 변수 경향이 엔진 거동에 반영되는 양상을 검토하였다. CVCC 해석 결과, pre-chamber 체적 증가 및 오리피스 직경이 감소할수록 주연소실 내 TKE가 증가하며, 이는 연소 지속시간에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 반면 오리피스 직경이 크며 개수가 많아질수록 TKE가 감소하여 초기 점화 지연에 민감한 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이러한 설계 변수별 경향성은 3000RPM WOT 운전조건에서 주요 성능지표 및 연소 위상각을 중심으로 유사하게 관찰되었다. 본 연구의 결과는 소형 암모니아 SI 엔진에서 연소 지속시간과 점화 지연 간의 Trade-off를 고려한 pre-chamber 설계 최적화 방향 및 기초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

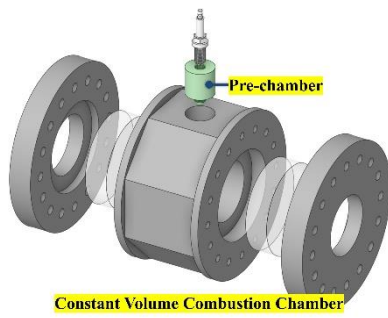


Fig. 1 정적연소기 및 예연소실 형상

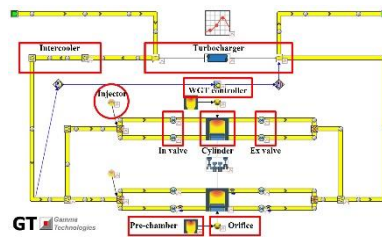


Fig. 2 PTJI 기반 1D map

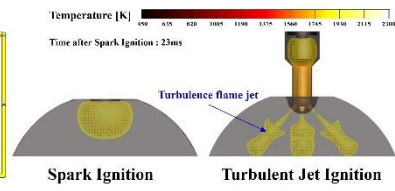


Figure. 3 PTJI 연소 특성 분석

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (과제 번호: RS-2026-25494185)