

암모니아 소형 엔진에서 흡기 열 관리 전략이 연소 안정성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구

이 민 석¹⁾ · 주 강 민²⁾ · 김 정 현²⁾ · 박 정 수^{*3)}

조선대학교 기계공학과¹⁾, 조선대학교 기계공학과 대학원²⁾, 조선대학교 기계공학과^{*3)}

Numerical Study on the Effect of Intake Thermal Management Strategy on Combustion Stability in a Small Ammonia-Fueled Engine

Minseok Lee¹⁾ · Kangmin Ju²⁾ · Jeonghyeon Kim²⁾ · Jungsoo Park^{*3)}

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

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chosun University Republic of Korea²⁾

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

Key words : Alternative Fuels (대체 연료), Ammonia (암모니아), Endothermic Reaction(흡열 반응), Internal Combustion Engine (내연기관), Port Fuel Injection (포트 분사)

* 교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

글로벌 탄소중립 (Net-Zero) 달성을 위해 수송 및 발전 분야 내연기관의 탈탄소화가 필수적이며, 이에 따라 친환경 연료로 사용될 수 있는 연료로 수소와 암모니아가 떠오르고 있다. 이중 암모니아는 분자 구조상 탄소를 포함하지 않아 이산화탄소를 배출하지 않는다. 암모니아의 경우 약 12.7MJ/L의 에너지 밀도로 수소 대비 1.5배 가량의 단위 부피당 에너지 밀도를 지녔으며 상온에서 약 10 bar 정도의 비교적 낮은 압력만으로도 쉽게 액화가 가능하다. 이러한 특징 덕분에 암모니아는 기존의 운송 및 저장 인프라를 그대로 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 내연기관의 연료로서 높은 연구 가치를 지니고 있다. 그러나 암모니아는 증발 잠열이 약 1,370kJ/kg으로, 기존 가솔린 (약 350kJ/kg) 대비 4배 가량 높기 때문에 연료가 흡기 포트나 실린더 내부에 분사될 때 공기와 연소실 벽면의 열을 급격히 흡수하여 혼합기의 온도를 하락시키는 흡열 반응 (Endothermic Reaction)이 존재한다. 이러한 흡열 반응은 암모니아의 본래 낮은 층류 연소 속도와 높은 점화에 에너지를 요구하는 연소 특성을 더욱 악화시키는 결과를 초래한다. 본 연구에서는 800cc급 2기통 PFI (Port Fuel Injection) 터보차저 엔진을 대상으로, 암모니아의 열역학적 특성을 활용하여 엔진 시스템의 연소 안정성의 향상을 달성하는 방안을 수치해석적으로 제시한다. 본 연구는 세 가지 단계로 진행되었으며 첫 번째, 실험 데이터를 기반으로 과급압, 점화 시기 (Spark Timing), 흡기 밸브 열림 시기 (Intake Valve Open Timing), 배기 밸브 열림 시기 (Exhaust Valve Open Timing)의 4가지 변수를 선정하여 IMEP (Indicated Mean Effective Pressure), BSFC (Brake Specific Fuel Consumption), Torque, Power의 엔진 성능 지표를 중심으로 전 운전 영역에 걸쳐 실제 실험 데이터와 1D 해석 데이터 간의 오차를 $\pm 5\%$ 이내의 정합성을 확보하였다. 두 번째, 암모니아-공기 혼합기의 당량비 변화에 따른 점화 시기 스위프 (Spark Timing Sweep) 해석을 수행하여 최적의 연소 위상을 탐색하였다. 마지막으로 실린더 내부로 유입되는 혼합기의 온도를 상승시켜 암모니아의 증발 잠열을 효과적으로 보상하고자 하였다. 이때 운전 영역은 암모니아의 화염이 연소실 전체에 충분히 확보되는 저속 구간을 선정하여 1600RPM, 당량비 1.1조건에서 진행되었으며 이후 인터쿨러 후단 온도, 점화 시기, 연료량을 변수로 설정한 DoE (Design of Experiments)를 통해 혼합기 온도 변화에 따른 연소 특성 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터는 MLP (Multi-Layer Perceptron) 메타모델로 학습시켜 Optimization을 수행한 결과, 인터쿨러 후단 온도를 100°C까지 상승시킨 조건에서도 현실적인 점화 시기 범위인 60° bTDC 이내에 MBT조건은 존재하지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 혼합기 예열을 거치지 않은 암모니아의 경우에서 동일 RPM에서 가솔린과 비슷한 성능을 보여주었던 50° bTDC를 기준으로 보았을 때 혼합기의 온도를 50°C 상승시킨 경우, 밀도 저하에 의해 연료량이 6.02% 감소하였음에도 토크는 4.3% 상승하는 결과를 나타냈다. 본 연구 결과는 암모니아 전소 엔진에서 흡기 예열이 연소 위상 및 출력에 미치는 영향을 정량적으로 제시한 것으로, 향후 암모니아 엔진의 연소 전략 수립을 위한 기초 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

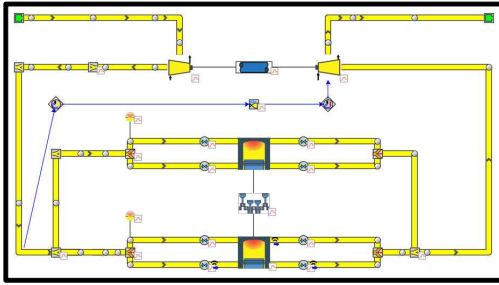


Fig. 1. 1D Powertrain Modeling

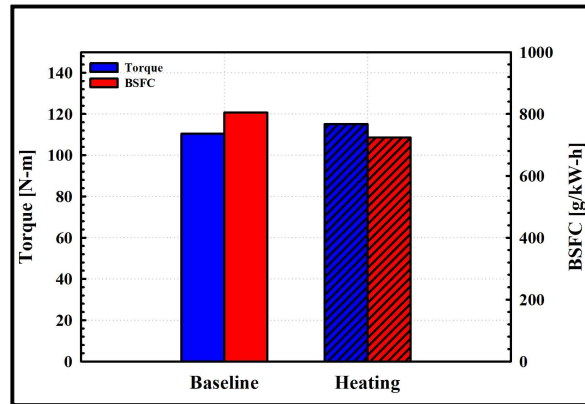


Fig. 2. Effect of Intake Mixture Heating on Torque and BSFC

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