

암모니아 연료의 GA-SI 점화 특성에 대한 정적연소기 기반 수치해석적 연구

조 민 수¹⁾ · 주 강 민²⁾ · 강 현 웅²⁾ · 박 정 수³⁾

조선대학교 기계공학과¹⁾ · 조선대학교 기계공학과 대학원²⁾ · 조선대학교 기계공학과³⁾

Numerical Study of GA-SI Characteristics of Ammonia Fuel in a Constant Volume Combustion Chamber

Minsu Cho¹⁾ · Kangmin Ju²⁾ · Hyunung Kang²⁾ · Jungsoo Park³⁾

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 Korea³⁾

Key words : Ammonia(암모니아), CFD Simulation(전산수치해석), Constant Volume Combustion Chamber(정적 연소기), Glow plug Assisted-Spark Ignition(예열플러그 보조 스파크 점화), Ignition Characteristics(점화 특성)

교신저자, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

전 세계적인 탄소중립 실현을 위한 에너지 전환 흐름 속에서, 무탄소 연료에 대한 관심이 증가하고 있다. 수소 에너지로의 전환이 논의되고 있으나, 저장 및 운송 측면의 한계로 인해 이를 보완할 대안 에너지원으로서 암모니아가 주목받고 있다. 암모니아는 수소 캐리어이자 상온, 상압 조건에서 대규모 저장 및 운송이 가능하다는 실용적 장점을 지니며, 특히 한국과 일본 등 에너지 수입 의존도가 높은 지리적 특성을 가진 국가에서는 무탄소 연료 확보의 제약으로 인해 암모니아 활용에 대한 논의가 활발히 이루어지고 있다. 그러나, 암모니아는 높은 자발화 온도와 낮은 연소 반응성으로 인해 안정적인 점화 및 연소 특성 확보를 위한 보조적인 점화 전략을 요구하며, 이를 위해 암모니아의 열화학적 반응 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다.

암모니아의 열분해 반응($2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$)은 흡열 반응으로, 고온 조건에서 정반응이 지배적이다. 하지만, 실제 시스템 조건에서는 O_2 에 의한 산화 반응이 경쟁적으로 개입하며, 열분해 반응과 산화 반응이 복합적으로 작용하여 반응 경로(Reaction-pathway)가 복잡해진다. 이때 당량비, 온도, 압력 조건에 따라 지배적인 반응 경로가 달라지므로, 제어 가능한 범위 내에서 흡열 반응을 촉진할 수 있는 최적의 조건을 도출하는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 외부 열원을 통해 열에너지를 공급함으로써 암모니아 혼합기의 반응성을 향상시키고, 점화 성능을 개선하는 접근이 효과적인 전략으로 제시될 수 있다.

본 연구에서는 CVCC(Constant Volume Combustion Chamber)를 대상으로 예열플러그를 보조 열원으로 활용하는 GA-SI(Glow plug Assisted-Spark Ignition) 점화 방식을 적용하여 수치해석적 연구를 수행하였다. 예열플러그의 고온 표면을 통해 암모니아 혼합기에 국부적 열에너지를 공급함으로써 암모니아의 반응성 개선을 유도하고, 이후 스파크 점화(Spark Ignition)와의 복합 점화가 연소 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 기존의 스파크 점화 방식 대비 연소 특성 변화를 비교하였다.

수치해석에는 3D CFD 소프트웨어인 CONVERGE를 활용하여 연소실 내부의 온도장 및 화학종 분포를 분석하였으며, 0D 소프트웨어인 Ansys CHEMKIN-Pro를 통해 균일 조건에서의 암모니아 열분해 및 주요 반응 경로를 분석하였다. 해석 조건으로는 초기 챔버 온도 450 K, 챔버 내 압력 5 bar, 체적 400 cc의 CVCC를 기준으로 당량비 0.8~1.2 범위를 적용하였다. 예열플러그의 최대 온도는 1,473 K로 설정하였으며, 스파크 점화 이전 0.3 s 동안 작동시켜 해석을 수행하였다.

해석 결과, 예열플러그에 의해 형성된 고온 영역에서 암모니아의 초기 반응이 촉진되는 경향이 확인되었다. 이에 따라 반응 개시 시점이 앞당겨지고, 점화 지연이 감소하는 특성을 보였다. 특히, 스파크 점화 개시 0.02초 이후 시점에서 예열플러그 인근에서도 화염 핵(Flame kernel)이 생성되는 현상이 확인되었다. 예열플러그의 고온 표면이 주변 암모니아 혼합기의 반응성을 향상시킴으로써 즉각적인 연소 반응이 개시될 수 있는 열화학적 환경을 사전에 형성하였고, 이는 예열플러그가 열원 역할과 암모니아 혼합기의 반응을 촉진하는 보조 점화 인자로서

기능함을 확인하였다. 추가적으로, 예열플러그 구동에 따른 소모 전력 대비 연소 성능 향상폭의 비를 정량화한 Energy Ratio를 정의하여 GA-SI 점화전략 적용 타당성을 평가하였다. 본 연구 결과는 암모니아 연료 기반 고온 보조 점화 시스템의 설계 방향성 및 최적화에 기여할 것으로 기대된다.

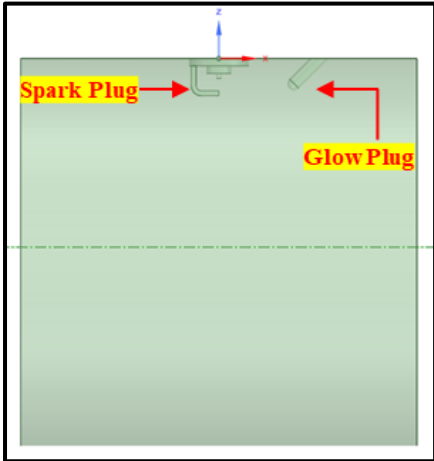


Fig. 1 GA-SI 형상

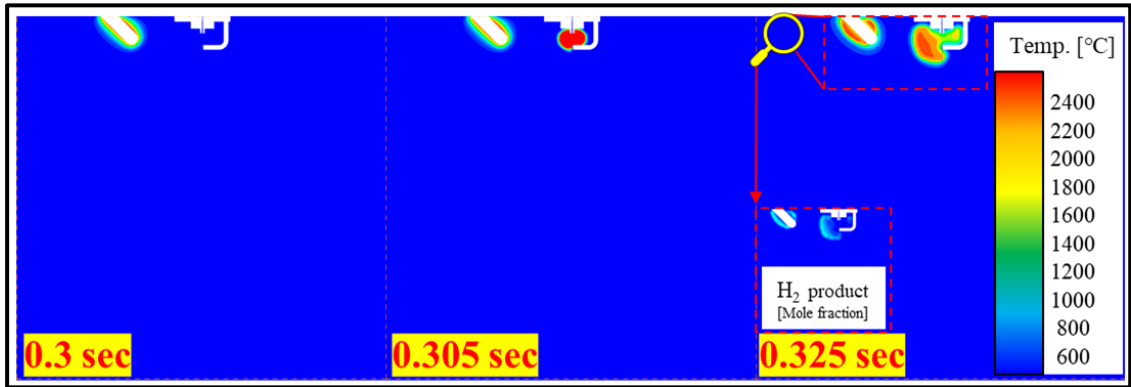


Fig. 2 GA-SI 점화에 따른 온도 분포

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