

## 램제트 연소실에 적용되는 막냉각 시스템 설계

송지운\* · 이건우\* · 조형희\*† · 황기영\*\* · 함희철\*\*

### Film Cooling System for Ramjet Combustion Chamber

Jiwoon Song\* · Keon Woo Lee\* · Hyung Hee Cho\*† · Ki-Young Hwang\*\* · Hee Cheol Ham\*\*

#### ABSTRACT

The thermal protection techniques for ramjet combustor are key technology, which block the heat from hot combustion gas, and maintain the structure temperature safely. Film cooling method is one of them. This research proposes the optimal thermal design method through performing the study of thermal protection design for ramjet combustor.

#### 초 록

램제트 연소실의 내열기술은 고온 연소가스로부터 연소실 벽면으로 유입되는 열을 효과적으로 차단하여 구조물의 온도를 일정수준 이하로 제한시키는 핵심기술로서 막냉각(film cooling)에 의해 벽면을 냉각시키는 기술을 들 수 있다. 본 연구단에서는 램제트 연소실의 내열 시스템 설계 연구의 수행을 통해 최적 열설계 이르는 설계 기법을 제시하였다.

Key Words: Ramjet(램제트), Film cooling(막냉각), Combustor(연소실), Thermal Design(열설계)

램제트 엔진의 성능 및 효율은 연소가스의 온도 및 압력과 밀접하게 관련 있으며, 연소실 구조에 무리를 주지 않는 범위에서 가스온도를 증가시키게 된다. 막냉각(Film Cooling) 기술은 고온 고압의 연소가스에 장시간 노출되는 연소실 벽면을 열적으로 보호하기 위해 사용되는 방법으로서 램제트 흡입구를 통해 유입된 공기를 연소실 내벽 부근에 분사하여 공기 막을 형성함으로써 연소실 벽면을 냉각하게 된다. 이는 삭마성 내열재를 이용하여 열을 차

폐하는 방법보다 구조가 복잡하지만 연소실 작동시간이 긴 경우에는 연소실 내벽을 효과적으로 보호하는 방법으로 이용되고 있다.

본 연구는 장거리용 동축형 램제트 연소실 벽면 냉각에 가장 많이 사용되고 있는 막냉각(film cooling)에 대하여 체계적인 실험을 통하여 연소기 설계에 필요한 인자와 결과를 도출하였다. 동축형 램제트 연소실의 경우 구조적 특성상 연소실 입구 영역에 급확장단을 가지고 있으며, 형상 특성상 확장단 이후 영역에서 재순환 영역(recirculation zone)이 발생한다. 확장단 이후 영역에서 재순환 영역은 flame holder로서의 역할을 하지만, 재순환 영역에 의하여 유동의 정체 영역이 발생하여 재질의 한계온도에 이르는 값까지 벽온도가 급격히 상

\* 연세대학교 기계공학과

연락처, E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr.

\*\* 국방과학연구소

승하게 되고, 재질에 높은 열부하를 가하게 되어 램제트 연소실의 수명을 단축시킨다. 그러므로 급격히 온도가 상승하는 확장면에서의 전체적인 벽면 온도를 낮추어야 하는 것은 물론 열응력을 최소화하기 위해 균일한 벽면온도를 얻도록 램제트 연소실내 내열 시스템을 설계하는 것이 중요하다.

램제트 연소실과 같은 고온부품의 냉각 시스템의 설계는 고온 환경 모사 및 냉각 성능 평가와 같은 실험 평가 및 해석과 같은 유기적 설계 기법을 필요로 한다. 본 연구단에서는 램제트 연소실의 내열 시스템 설계 연구의 수행을 통해 냉각 시스템 분석, 연소장에 따른 연소온도 분포 도출, 막냉각 시스템 설계, 열전달/온도 분포 실험 및 해석, 막냉각 시스템 평가, 온도/열응력 고려한 최적 열설계 이르는 설계 기법을 제시하였다.

그 첫 단계에 해당하는 냉각 시스템 분석의 단계에서 해석하고자 하는 고온 시스템의 특성 및 유사 시스템의 특성을 파악한다. 문헌 조사를 통해 해석 시스템의 열적 취약 특이점 및 선행 적용 기술에 대한 내용을 파악하여 적용 및 실현 가능한 주요 기술에 대한 기반 지식의 파악이 필요하다. 그 한 예로서 램제트 연소실의 경우 대표적인 두 가지 냉각 기술인 삭마 냉각과 막냉각의 적용 가능성을 문헌 조사를 통한 실현 가능성 및 성능 예측을 통해 결정할 수 있다.

해석하고자 하는 시스템의 실제 열 부하에 대한 자료를 얻기 위한 연소온도 분포 도출이 필요하다. 시스템에 가해지는 열 부하는 각 부위에 냉각 시스템에 대한 특성을 결정짓는 요소이다. 본 연구에서는 수치해석을 통한 화염 온도장의 계산을 통해 온도 분포를 도출하였다. 본 연구에 적용된 온도 분포는 단일 화염 온도에 대한 일정 수준의 신뢰도를 갖고 있는 것으로 확인 되었으나, 시스템의 설계 기법을 제시하기 위하여 상용코드인 Fluent를 이용하여 도출 되어, 실제 시스템에 적용하기 위해서는 보다 정확한 측정 결과, 혹은 수치 해석 결과가 필요하다.

도출된 화염 온도 분포를 통해 열적 취약부를 확인하여, 본 연구에서 수행한 바와 같은 단순 슬롯 막냉각, 배열홀이 존재하는 막냉각, 확장각이 존재하는 막냉각, 화염 안정기가 존재하는 막냉각과 같은 막냉각 시스템에 대한 설계가 필요하다. 각 부분에 적용될 막냉각 시스템의 각 슬롯의 형상적 특성과 슬롯 형상 설계시 주요 설계 인자의 상호 작

용을 고려하여 막냉각 시스템을 설계한다.

선정된 막냉각 시스템이 적용된 연소실의 온도 및 열전달 분포와 유동 특성은 상온 실험과 수치해석을 통해 이루어진다. 본 연구에서는 TLC를 이용한 단일 막냉각 효율과 열전달 계수 측정을 수행하였으며, 유동 특성은 Hot wire를 이용한 실험적 접근과 상용코드인 Fluent를 이용한 수치적 접근을 병행하였다.

가스 터빈 연소실의 경우 열과피가 일어나는 부위는 고온 부위뿐만 아니라, 열 구배가 가장 심하게 나타나는, 즉 열응력이 집중되는 부위이다. 램제트 연소실의 경우도 마찬가지로 냉각 특성에 의한 국부적인 열 집중에 의해 열과피의 가능성이 존재하므로 실험 및 해석을 통해 도출된 온도 분포와 더불어 열응력 분포 역시 고려되어야 한다.

온도 분포와 열응력 분포를 종합적으로 분석하여, 최대 온도 분포 지점과, 최대 열응력 분포 지점의 최대값이 내열 한계 및 한계 응력의 초과 여부로 막냉각 시스템의 성능을 평가할 수 있으며, 이는 다단 막냉각 시스템 적용 시 각 슬롯의 최대 허용 길이에 대한 설계치를 제공할 수 있다.

앞서 언급한 과정을 순환 반복 수행하여 최종적으로 가장 효율적인 온도와 열응력을 함께 고려한 램제트 연소실 내열 시스템의 최적 열 설계안을 도출할 수 있다. 램제트 연소실의 최적 냉각 시스템 설계 기법은 Fig. 1에 도식화 하였다.



Fig. 1 Thermal Design Procedure