

# 세로축 화염안정기 형상이 램제트 연소실에서의 열전달 특성에 미치는 영향

양강모\* · 이건우\*\* · 송지운\* · 조형희\*\*\* · 황기영\*\*\*\*

## Influence of the Vertical Flame holder on Heat Transfer Characteristics of Ramjet Combustor

Kangmo Yang\* · Keon Woo Lee\*\* · Jiwoon Song\* · Hyung Hee Cho\*\*\* · Ki Young Hwang\*\*\*\*

### ABSTRACT

This experimental study has been conducted to investigate the installation of the vertical flame holder shape in ramjet combustor, which affects on the film cooling effectiveness. All slot position, the film cooling effectiveness decreases because of the shear layer and high turbulence intensity between separated flows and coolant flows. When the flame holder is installed, film cooling effectiveness decreases abruptly on the beginning of the slot exit region due to the mixing effect. As the blowing rate increases, the film cooling effectiveness is increased for all cases due to the augmented momentum of injected coolant from the slot.

### 초 록

본 연구에서는 화염 안정기 형상이 램제트 연소실에서의 단열 막냉각 효율에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였다. 램제트 연소실 입구의 경사진 확장면의 끝에 화염안정기 형상을 설치하여 세로축 화염안정기에 의해 발생된 난류 유동이 다단 슬롯에 영향을 끼치도록 실험 장치를 구성하였다. 화염 안정기를 설치하였을 경우 화염안정기에 의해 발생된 유동의 높은 전단력과 난류강도로 인해 급격히 주유동과 혼합되어 화염안정기가 설치되지 않은 경우에 비해 전체적으로 냉각 성능이 감소함을 결과를 통해 확인하였다. 또한 각각의 경우 분사율을 높여주면 좀 더 양호한 막냉각 효율을 기대할 수 있었다.

Key Words: Ramjet(램제트), Flame Holder(화염안정기), Blowing Rate(분사비), TLC(감온성 액정) Slot Film Cooling(슬롯 막냉각), Film Cooling Effectiveness(막냉각 효율)

\* 연세대학교 기계공학과

\*\* 두산중공업 IGCC팀

\*\*\* 정회원, 연세대학교 기계공학과

연락처, E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

\*\*\*\* 정회원, 국방과학연구소 제1기술연구본부 5부

### 1. 서 론

램제트 엔진은 공기 흡입 추진기관으로 로켓 엔진에 비해 상대적으로 높은 비추력을 가진다.

이로 인해 기존의 로켓 엔진에 비해 고성능을 낼 수 있으며, 초음속 장거리 비행에 매우 적합하다. 그러나 램제트 엔진의 연소실은 고온의 연소가스로부터 열부하를 받아 연소실 구조체가 파괴될 수 있으므로 연소실 내벽을 보호하기 위한 적절한 냉각방법이 필요하게 된다. 램제트 연소실의 벽면 냉각에 가장 많이 사용되고 있는 막냉각(Film cooling)기법은 연소실 내벽에 설치된 슬롯이나 홀을 통해 냉각유체를 분사하여 고온의 연소가스와 연소실 내벽 사이에 막을 형성함으로써 구조체를 보호하는 기술이다. [1]

막냉각 효율에 영향을 주는 인자로는 막냉각 슬롯의 형상, 분사비, 립두께와 슬롯 높이의 비, 분사비, 분사각도, 주유동의 난류강도 등이 있으며, 지금까지 많은 연구자들에 의해 각각의 인자의 영향에 대한 선행연구가 진행되어 왔다.

슬롯의 형상 변화가 연소실 벽면의 막냉각 성능에 미치는 영향에 대해서 각각도의 연구가 수행되었는데 Kacker와 Whitelaw[2]은 슬롯 높이 대 립 두께비의 영향과 슬롯의 분사 각도의 영향이 슬롯 막냉각 성능에 지배적인 영향을 미침을 밝혔고, Seban[3]은 립의 유무와 슬롯의 형상 변화가 슬롯 막냉각 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다. 오민근 등[4]은 주유동의 난류강도가 연소기 벽면 막냉각에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 이진우 등[5]은 가로축에 해당하는 화염안정기 형상이 램제트 연소실에서의 슬롯 막냉각 특성에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다. 하지만, 동축형 램제트의 연소실에 존재하는 세로축 화염안정기 형상이 다단의 슬롯이 설치된 형태에서의 각 슬롯별 막냉각 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 세로축 화염안정기 형상에 의해 발생된 난류유동이 슬롯 막냉각 효율에 어떠한 영향을 미치는지 각각의 슬롯별 막냉각 효율을 실험적으로 측정, 비교하여 보고자 한다. 다단 슬롯이 적용된 동축형 램제트 연소실을 모사하여, 세로축 화염 안정기 형상을 탈부착 시키면서 각 슬롯별 출구 하류 벽면에서의 단열막냉각 효율 분포를 구하였다.

## 2. 실험장치 및 조건

### 2.1 막냉각 실험장치 및 화염 안정기 형상

본 연구에서는 다단의 슬롯 하류에서의 열전달 특성 파악을 위한 열전달 실험을 수행하였다. Figure 1(a)는 각 슬롯 출구에서의 막냉각 효율값을 측정하기 위한 열전달 실험장치의 개략도이다. 열전달 실험장치는 크게 수축부, 시험부, 디퓨저 그리고 2차 유동분사장치 네 부분으로 구성된다. 공기 흡입부의 단면 크기는 150×400 mm 용하여 주유동을 불어내리고, 2차 유동 분사장치를 이용하여 설치된 다단의 슬롯을 통해 냉각유체를 분사 시킨다. 화염 안정기가 설치된 다단슬롯의 형상은 Fig. 1(b)에 제시되어 있으며, 다단슬롯의 제원은 Table.1 과 같다. Figure 1(c)는 가로방향의 화염안정기 형상에 세로축 화염안정기

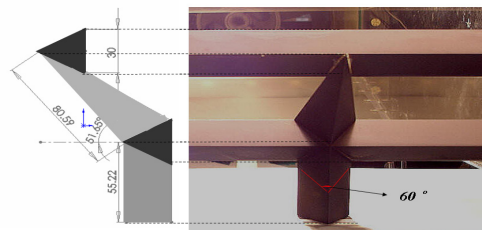
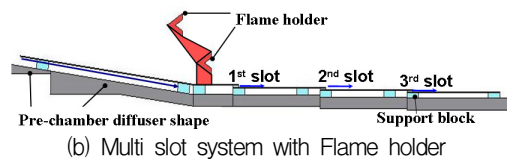
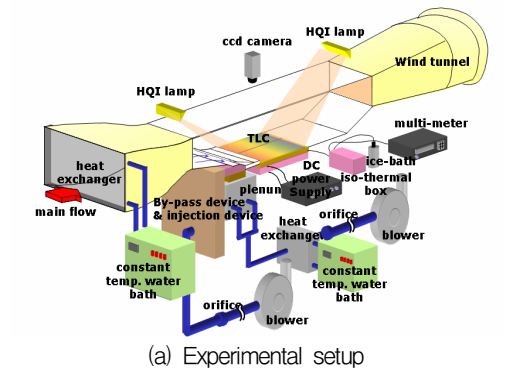


Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus

Table. 1 Slot geometry

Slot	립두께 (t)	슬롯높이 (s)	립두께비 (t/s)	슬롯길이 (x)	슬롯폭 (y)
1 <sup>st</sup>	1	2.5	0.4	300	400
2 <sup>nd</sup>					
3 <sup>rd</sup>					

\* dimension : mm

형상을 추가적으로 설치하였을 때의 모습을 나타내고 있다. 실제 화염안정기 형상에는 가로방향의 화염안정기를 이어주는 세로축 화염안정기 형상이 등 간격으로 배치되어 있다. 각각의 세로축 화염안정기는 가로방향의 화염안정기와 마찬가지로 60°의 경사를 가지는 V자형태의 구조물이다.

단열 막냉각 효율값을 얻기 위해 냉각유동의 온도는 주유동의 온도(상온)보다 높게 유지시켰으며 이때 주유동과 냉각 유동의 밀도비는 0.93이다.

막냉각 슬롯 하류부분의 측정판에 TLC(감온성 액정)을 설치하여 단열 막냉각 효율값을 구하였다. 측정판은 대역폭이 20~40°C인 TLC(R20C20W, B&H Liquid Crystal Resources Ltd, 240 μm), 금도금 히터(Aquare-12, Courtaulds, 178 μm), 양면접착 테이프(150 μm), 베이클라이트(Bakelite, 15 mm), 스티로폼(50 mm)으로 된 층으로 구성되어 있으며, 측정판에 수직인 위쪽 방향에 CCD 카메라와 조명을 설치하여 TLC가 설치된 측정판을 촬영하였다.

## 2.2 막냉각 효율 및 분사비

막냉각 효율은 단열벽면 온도를 무차원화한 값으로 정의한다. 여기서 단열 벽면온도( $T_{aw}$ )는 TLC를 이용하여 구하였으며,  $T_{\infty}$ 는 주유동의 온도,  $T_2$ 는 냉각 유동의 초기 온도로서 열전대(J type)를 이용하여 측정하였다.

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_2 - T_{\infty}} \quad (1)$$

분사비는 주유동에 대한 이차유동의 질량 유속의 비로서 식 (2)와 같이 정의한다. 본 연구에서는 0.5~1.0 범위의 분사비에서 실험을

진행하였다.  $U_{\infty}$ 는 주유동의 속도로서 15 m/s로 고정되고  $U_2$ 는 냉각유동의 속도로서 오리피스를 통해 유량을 계산하여 각각의 분사비에 맞게 제어된 유량을 흘려보내게 된다.

$$M = \frac{\rho_2 U_2}{\rho_{\infty} U_{\infty}} \quad (2)$$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 첫 번째 슬롯에서의 막냉각 효율변화

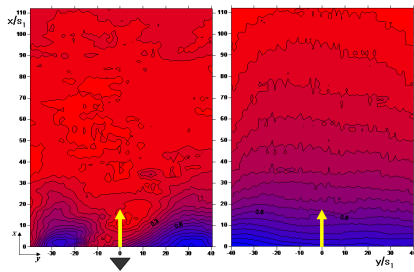
Figure 2(a)는 수직 방향의 화염안정기 형상을 추가적으로 설치하였을 경우에 첫 번째 슬롯 하류에서의 단열 막냉각 효율 변화를 보여준다. 슬롯 길이방향(x)과 슬롯 폭방향(y)은 슬롯 높이(s)로 무차원화 하였다. 각각의 경우에 왼쪽의 contour는 가로방향의 화염안정기 형상에 수직방향의 화염안정기 형상이 추가적으로 설치된 경우이고, 오른쪽의 contour는 가로 방향의 화염안정기 형상만 설치된 경우이다.

수직방향의 화염안정기 형상이 추가적으로 설치되는 경우 3차원 형태의 wake가 화염안정기 후방에 발생하게 되어 수직 화염안정기 직 후방에서의 단열 막냉각 효율이 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 첫 번째 슬롯은 화염안정기 형상의 바로 뒷부분에 위치하므로, 수직방향의 화염안정기 형상에서 발생하는 wake의 영향을 직접적으로 받는 것으로 판단된다. 분사비를 늘려 냉각 유체의 절대량을 증가시켜 주면 좀 더 먼 하류방향에 이르도록 냉각 효과가 지속되는 것을 확인할 수 있었다.

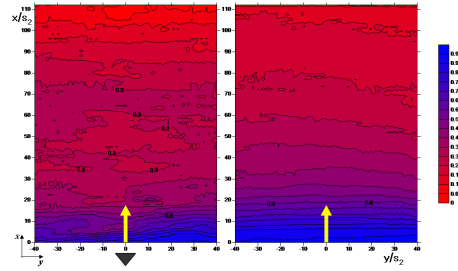
### 3.2 두 번째, 세 번째 슬롯에서의 막냉각 효율변화

Figure 3(a)와 3(b)는 수직 방향의 화염안정기 형상이 추가적으로 설치된 경우 두 번째 슬롯 하류에서의 단열 막냉각 효율 변화를 나타낸 그림이며 그림의 배치는 첫 번째 슬롯에서와 동일하다. 두 번째, 세 번째 슬롯의 경우 수직 방향의 화염안정기 형상이 설치된 경우 단열 막냉각 효율의 감소를 확인할 수 있었다.

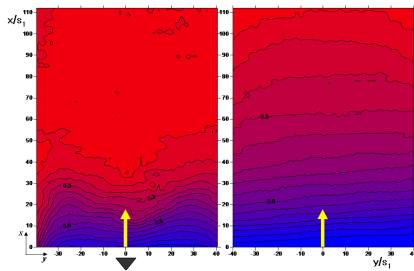
하지만, 화염안정기 형상의 직 후방에 위치한



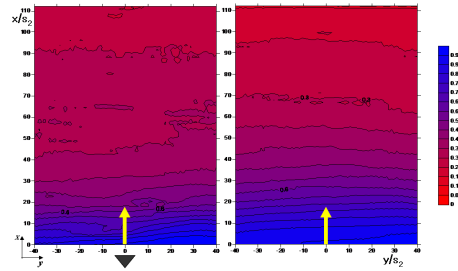
(a)  $M=0.5$ , 1<sup>st</sup> slot



(a)  $M=0.5$ , 2<sup>nd</sup> slot



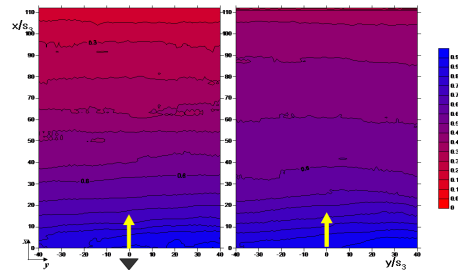
(b)  $M=1.0$ , 1<sup>st</sup> slot



(b)  $M=1.0$ , 2<sup>nd</sup> slot

Fig. 2 Comparison of film cooling effectiveness for the first slot

첫 번째 슬롯에서의 변화 양상과는 달리, 화염안정기에 후방에 발생하는 3차원 wake의 영향이 약해지면서 전체적으로 화염안정기 형상으로부터 멀어질수록 동일한 분사비에서 양호한 막냉각 성능을 기대할 수 있었다.



(c)  $M=1.0$ , 3<sup>rd</sup> slot

Fig. 3 Comparison of film cooling effectiveness for the second and third slot

## 결 론

1. 수직방향 화염안정기 형상을 추가적으로 설치한 경우 수직방향 화염안정기 후방에서의 3차원 wake에 의해 가로방향 화염안정기 형상만을 설치한 경우와 달리 더욱 급격한 단열 막냉각 효율 감소를 확인할 수 있었다.
2. 각각의 슬롯에서 분사비를 늘여주면 냉각 유체의 절대량이 증가하게 되어 막냉각 효율이 향상함을 확인하였다.
3. 동일한 분사비에서는 화염안정기 형상에서 멀어질수록, 즉 후단 슬롯으로 갈수록 더 양호한 막냉각 성능을 기대할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다. (계약번호 UD060016AD)

## 참 고 문 헌

1. Goldstein, R. J., "Film Cooling", Advances in Heat Transfer, Academic Press, Vol. 7,

- 1974, pp. 321~379
2. S. C. Kacker, J. H. Whitelaw, "The effect of slot height and slot turbulence intensity on the effectiveness of the uniform density, two dimensional wall jet", ASME, J. of Heat Transfer, 1968, pp.469~475
  3. Seban, R. A., "Heat transfer and effectiveness for a turbulent boundary layer with tangential fluid injection," ASME J. of Heat Transfer, 1960, pp. 303~312
  4. 오민근, 김영봉, 이동호, 조형희, 함희철, 배주찬 "연소기 벽면 막냉각에 주유동의 난류 강도가 미치는 영향", 한국추진공학회 추계 학술대회 논문집, 2004, pp.132~136
  5. 이진우, 송지운, 조형희, 황기영 "화염안정기 형상이 램제트 연소실에서의 슬롯 막냉각 특성에 미치는 영향", 한국추진공학회 춘계 학술대회 논문집, 2008, pp.315~320