

화염안정기 형상이 램제트 연소실에서의 슬롯 막냉각 특성에 미치는 영향

이건우* · 송지운* · 조형희** · 황기영***

Influence of Flame Holder on Film Cooling Effectiveness of Ramjet Combustor

Keon Woo Lee* · J Song* · Hyung Hee Cho** · Ki Young Hwang***

ABSTRACT

This experimental study has been conducted to investigate the effect of the flame holder on the multi-slot film cooling in the ramjet combustor. The turbulent wake which is generated by the flame holder on the entrance of the coolant flow path affects on the slot. Adiabatic film cooling effectiveness on the downstream wall of the slot exit are measured. The results show that the film cooling performance is rapidly decreased after the slot exit by shear layer and high turbulence intensity between separated flows and coolant flows.

초 록

본 연구에서는 화염 안정기 형상이 램제트 연소실에서의 단일 막냉각 효율에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였다. 램제트 연소실 입구의 경사진 확장면의 끝에 화염안정기 형상을 설치하여 화염안정기에 의해 발생된 난류 유동이 다단 슬롯에 영향을 끼치도록 실험 장치를 구성하여, 화염안정기 형상을 탈부착 시키면서, 슬롯 출구 하류에서의 단일 막냉각 효율을 측정하였다. 화염 안정기를 설치하였을 경우 화염안정기에 의해 발생된 유동의 높은 전단력과 난류강도로 급격히 주유동과 혼합되어, 화염안정기가 설치되지 않은 경우에 비해 전체적으로 냉각 성능이 감소함을 결과를 통해 확인하였다.

Key Words : Ramjet Combustor(램제트 연소실), Flame Holder(화염 안정기)
Slot Film Cooling(슬롯 막냉각), Film Cooling Effectiveness(막냉각 효율)

1. 서 론

* 학생회원, 연세대학교 대학원 기계공학과
** 정회원, 연세대학교 기계공학부
*** 정회원, 국방과학연구소 제1기술연구본부 5부
연락처, E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

램제트 엔진의 연소실은 고온의 연소가스로부터 열부하를 받는다. 연소가스에 의한 열부하가 국소적으로 집중될 경우 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 단열막을 형성함으로써 구조체를 보호하는 기술이다. [1]

보통의 Integral Rocket and Ramjet(IRR) 엔진과 짧은 연소 시간용 램제트엔진에는 삭마냉각 내열재를 사용하고 있으나, 삽입형/분리형 부스터 및 장시간 연소를 목표로 한 램제트 엔진에서는 막냉각 방법을 병행하여 사용하고 있다. [2]

분사된 냉각 유량이 얼마나 효과적으로 연소실 벽면을 보호하고 있는지는 막냉각 효율(Film cooling effectiveness)을 측정함으로써 알 수 있다. 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. 1950~60년대 슬롯 막냉각에 대한 초기 연구는 평판에서 고온의 연소가스와 냉각유체가 평행하게 분사될 때 슬롯 출구 하류에서의 슬롯 막냉각 효율에 대한 해석해를 구하는데 집중되었으며, 주유동과 냉각유체 사이에 형성되는 막(Film)의 특성에 대한 연구가 활발히 진행되었다. [3~6]

슬롯의 형상 변화가 연소실 벽면의 막냉각 성능에 미치는 영향에 대해서도 다각도의 연구가 수행되었는데 Kacker와 Whitelaw[7]은 슬롯 높이 대 립 두께비의 영향과 슬롯의 분사 각도의 영향이 슬롯 막냉각 성능에 지배적인 영향을 미침을 밝혔고 Seban[8]은 립의 유무와 슬롯의 형상 변화가 슬롯 막냉각 성능에 미치는 영향에

대한 연구를 진행하였다. Ham[9]은 슬롯 내벽에 홀을 삽입하고, 냉각유로의 방향과 분사방식의 변화에 따른 립 내벽에서의 물질전달계수와 슬롯 출구에서의 속도장을 측정하였다. 오민근 등 [10]은 주유동의 난류강도가 연소기 벽면 막냉각에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였고, 이견우 등[11]은 재순환 영역이 슬롯 막냉각 성능에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다. 박광훈 등 [12]은 재순환 영역이 존재하는 동축형 램제트 연소실에서 슬롯 막냉각 분사방식 변화에 따른 열전달 특성변화를 연구하였다.

하지만, 동축형 램제트의 연소실에 존재하는 화염안정기 형상이 다단의 슬롯이 설치된 형태에서의 각 슬롯별 막냉각 성능에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 화염안정기에 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, 화염 안정기 형상을 탈부착 시키면서 각 슬롯별 출구 하류 벽면에서의 단열 막냉각 효율 분포를 감온성 액정(Thermochromic Liquid Crystal)을 이용하여 구하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 다단의 슬롯 하류에서의 열전달 특성 파악을 위한 열전달 실험을 수행하였다.

Figure 1(a)는 각 슬롯 출구에서의 막냉각 효율 값을 측정하기 위한 실험 장치의 개략도이다.

Table. 1 Slot geometry

Slot	립두께(t)	슬롯높이(s)	립두께비(t/s)	슬롯길이(l _x)	슬롯폭(l _y)
1st	1mm	2.5mm	0.4	78.2mm	400mm
2nd		2.5mm	0.4	160mm	
3rd		2.5mm	0.4	160mm	

공기 흡입부의 단면 크기는 150×400 mm이고 주유동의 속도는 15 m/s를 사용하였다. 슬롯은 Fig. 1(b), (c)와 같이 3단의 다단 슬롯을 사용하였으며 각 슬롯의 제원은 Table. 1에서 자세히 나타내었다.

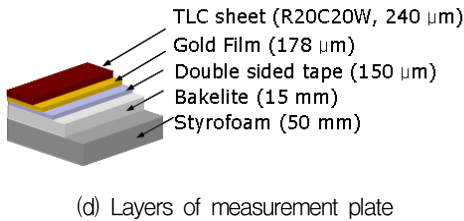
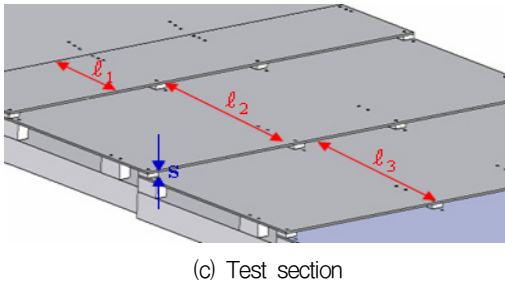
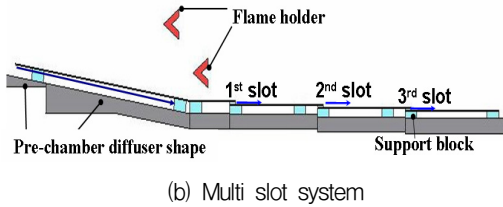
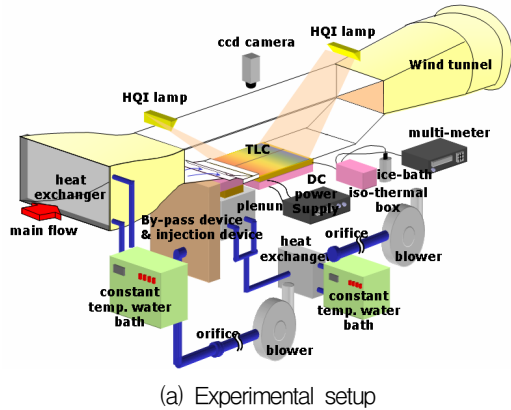


Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus

단열 막냉각 효율값을 얻기 위해서는 주유동과 냉각유동의 온도를 다르게 조절해 주어야 한다. 냉각유동의 온도는 주유동의 온도(상온)보다 높게 유지시켰으며 이때 주유동과 냉각 유동의 밀도비는 0.93이다. Fig. 1(d)와 같이 막냉각 슬롯 하류부분의 측정판에 TLC(감온성액정)를 설치하여 단열 막냉각 효율값을 구하였다. 측정판은 내역폭이 20~40℃인 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 측정판을 촬영하였다.

2.3 무차원 온도 및 막냉각 효율

막냉각 효율은 단열벽면 온도를 무차원화한 값과 같이 정의한다. 여기서 단열 벽면온도(T_{aw})는 TLC를 이용하여 구하였으며, T_{∞} 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_{∞} 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. 실험 결과 및 토의

3.1 막냉각 효율

화염안정기 형상의 유무와 분사비의 변화에

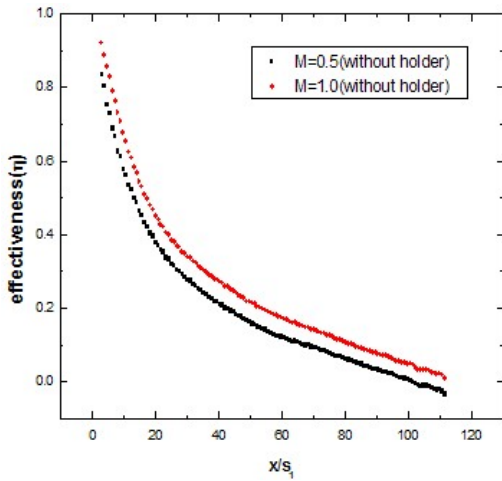


Fig. 2 Distribution of adiabatic film cooling effectiveness of 1st slot (without holder)

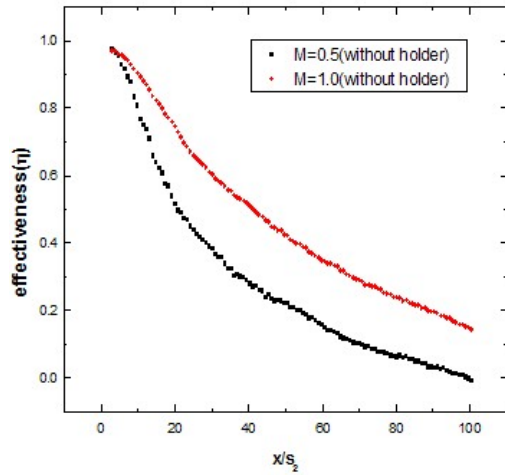


Fig. 4 Distribution of adiabatic film cooling effectiveness of 2nd slot (without holder)

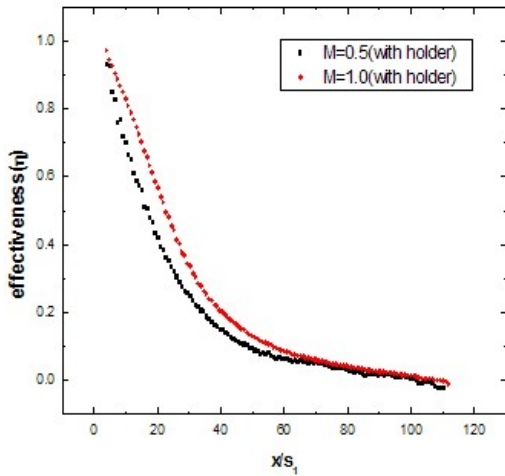


Fig. 3 Distribution of adiabatic film cooling effectiveness of 1st slot (with holder)

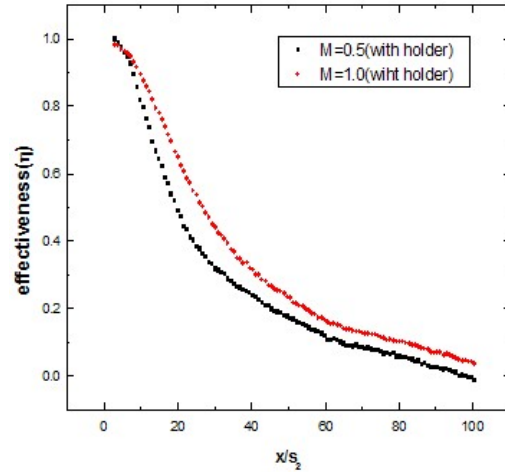


Fig. 5 Distribution of adiabatic film cooling effectiveness of 2nd slot (with holder)

따라 막냉각 효율값에 어떠한 변화가 있는지 살펴해보았다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 첫 번째 슬롯에서 화염안정기 형상이 설치되지 않은 경우와, 설치된 경우의 막냉각 효율값의 변화를 알려준다. 화염 안정기 형상이 설치되는 경우 슬롯 출구 하류방향으로의 막냉각 효율값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 각각의 경우 분사비를 증가시키면 좀 더 양호한 냉각성능을 기대할 수 있음을 결과를 통해 확인하였다.

Figures 4와 5는 두 번째 슬롯에서 화염안정기 유무에 따른 막냉각 효율값의 변화를 알려준다.

첫 번째 슬롯에서와 같이, 두 번째 슬롯의 경우도 화염 안정기 형상이 설치되는 경우 슬롯 출구 하류 방향으로의 막냉각 효율값이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 동일 분사비에서 슬롯별 막냉각 성능을 비교한다면, 연소실에서의 거리가 상대적으로 먼 두 번째 슬롯이 연소실 바로 뒷면에 위치한 첫 번째 슬롯보다 막냉각 성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 각각의 경우 분사비를 증가시키면 좀 더 양호한 냉각성능을 기대할 수 있었다.

Figure 6은 화염안정기를 설치한 경우와 설치

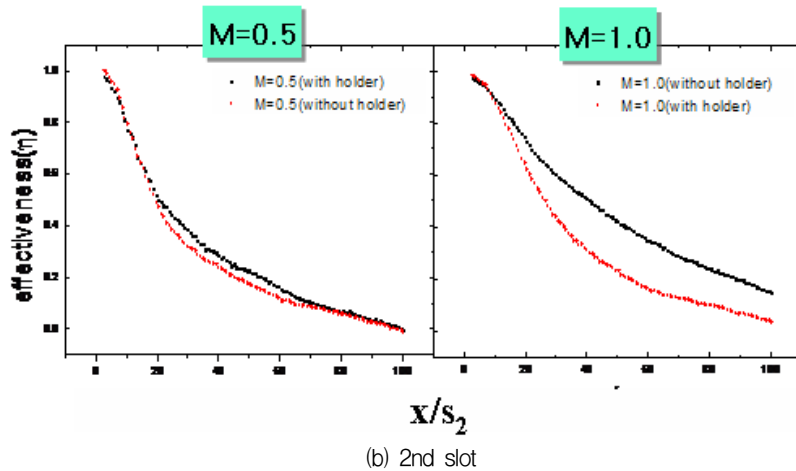
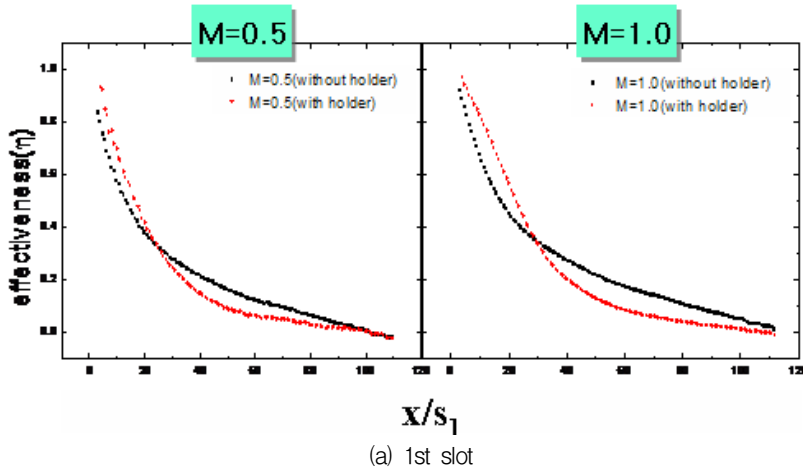


Fig. 6 Comparison of without-holder effectiveness with with-holder effectiveness of the 1st & 2nd slot

하지 않은 경우에 대해 분사비 0.5, 1.0에 따른 첫 번째와 두 번째 슬롯에서 막냉각 효율의 변화를 보여준다. Fig. 6(a), (b)를 살펴보면 상대적으로 화염안정기 형상과 가까운 첫 번째 슬롯의 초기 부분에서 막냉각 효율이 국소적으로 좋아지는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 화염안정기 형상에서 멀리 떨어진 두 번째 슬롯에서는 슬롯 초기 부분부터 막냉각 효율이 뚜렷하게 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 첫 번째 슬롯의 초반부에서는 화염안정기 형상으로 가속된 유동이 냉각 유체를 눌러주어 국소적으로 막냉각 효율이 좋아진 것으로 판단할 수 있다. 이후 하류로 진행하면서

화염안정기 형상에서 발생된 난류유동과 냉각 유체가 섞이면서 막냉각 효율이 급격히 감소하는 것으로 판단된다. 두 번째 슬롯은 첫 번째 슬롯과는 달리 화염안정기 형상으로 인해 가속된 유동의 영향은 미미한 것으로 보이며, 화염안정기 형상에 의해 발생된 난류유동의 영향이 지배적인 것으로 판단된다.

4. 결 론

화염안정기 형상이 슬롯 막냉각 성능에 미치는

영향을 알아보기 위하여 경사진 연소실에 탈부착 가능한 화염안정기를 설치하고, 다단 슬롯이 모사된 실험 장치에서 슬롯 하류방향으로의 단열 막냉각 효율값을 구하여 비교하였다. 첫 번째 슬롯은 두 번째 슬롯과 달리 화염안정기 형상을 설치하였을 때 슬롯 초반부에서만 국부적으로 막냉각 효율이 좋아지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 첫 번째 슬롯의 초반부를 제외한 나머지 부분에서는 화염안정기를 설치하는 경우 전반적으로 막냉각 효율이 감소하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다. (계약번호 UD030027AD)

참고문헌

1. Goldstein, R. J., "Film Cooling", *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, Vol. 7, 1974, pp. 321~379
2. 성홍계, 윤현걸, "램제트/스크램제트의 기술 동향과 소요기술 분석 I. 램제트 엔진(액체 램제트, 덕티드로켓)", *한국추진공학회논문집* 제10권 제1호, 2006, pp 72~86
3. Hatch and Papell, "Use of a theoretical flow model to correlate data for film cooling of heating and adiabatic wall by tangential injection of gases of different fluid properties." *NASA TN D-130*, 1959
4. J. Klein and M. Tribus, "Forced convection from non-isothermal surfaces." *Heat transfer symposium*, University of Michigan Press, Michigan, 1953
5. R. A. Seban and I. H. Back, "Velocity and temperature profiles in turbulent boundary layers with tangential injection." *J. Heat Transfer*, *Trans. ASME. Series C*, 1962, pp.45~54
6. J. L. Stollery and A. A. M. El-Ehwany, "A note on the use of a boundary layer model for correlating film cooling data", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, 1964, pp.55~65
7. 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
8. 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
9. J. K. Ham, H. H. Cho, "Influence of injection type and feed arrangement on flow and heat transfer in an injection slot" *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 124, 2002, pp.132~141
10. 오민근, 김영봉, 이동호, 조형희, 함희철, 배주찬 "연소기 벽면 막냉각에 주유동의 난류 강도가 미치는 영향", *한국추진공학회 추계 학술대회 논문집*, 2004, pp.132~136
11. 이건우, 오민근, 조형희, 함희철, 황기영 "재순환 영역이 램제트 연소실에서의 열전달 특성에 미치는 영향", *한국추진공학회논문집* 제11권 제6호, 2007, pp.9~17
12. 박광훈, 이건우, 조형희, 함희철, 황기영, 배주찬 "램제트 연소실에서 슬롯 막냉각 분사 방식 변화에 따른 열전달 특성 연구," 제14회 유도무기학술대회논문집(국방과학연구소), 2007, pp.373~379