

# 재순환 영역이 존재하는 램제트 연소실 슬롯 막냉각 연구

오민근\* · 박광훈\* · 변해원\* · 유만선\* · 조형희\*\*  
함희철\*\*\* · 배주찬\*\*\*

## Study of the Slot Film Cooling under Ramjet Combustor with Recirculation Zone

Min Geun Oh\* · Kwang Hoon Park\* · Hae Won Byun\* · Man Sun Yu\* · Hyung Hee Cho\*\* ·  
Hee-Cheol Ham\*\*\* · Joo Chan Bae\*\*\*

### ABSTRACT

The experimental study has been conducted to investigate the effect of the recirculation zone on the multi-slot film cooling in the ramjet combustor. The recirculation zone which is generated by the protrusion tip on the entrance of the coolant flow path affects on the first slot. Velocity fields, dimensionless temperature fields and 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 the share layer and high turbulence intensity between separated flows and coolant flows.

### 초 록

본 연구는 재순환 유동이 램제트 연소실 슬롯 막냉각에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였다. 경사진 확장면에 설치된 돌출부를 가진 냉각유로에 의해 발생된 재순환 유동이 다단 슬롯 중 첫 번째 슬롯에 영향을 미치도록 실험 장치를 구성하여, 슬롯 출구 하류에서 속도장, 온도장 및 단열 막냉각 효율을 측정하였다. 슬롯을 통해 분사된 냉각유체는 재순환 유동간의 높은 전단력과 난류강도로 인해 분사 직후 급격히 혼합되어, 냉각 성능이 감소함을 결과를 통해 확인하였다.

Key Words: Slot Film cooling(슬롯 막냉각), Recirculation Zone(재순환영역)

### 1. 서 론

추진기관의 연소실 내벽은 고온의 연소가스로

부터 큰 열부하를 받고 있다. 이와 같은 높은 연소가스 온도로부터 연소실 내벽을 보호하기 위해서는 적절한 냉각방법의 사용이 요구된다.

벽면의 슬롯(slot)을 통해 분사되는 냉각유체가 요소 표면에 단열막을 형성하여 표면을 보호하는 막냉각(film cooling)은 램제트 연소실과 같이 고온 조건에서 요소를 보호하기 위하여 사

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계공학부

\*\*\* 국방과학연구소

연락처, E-mail: mgoh@yonsei.ac.kr

용되는 대표적인 냉각방법이다.[1]

1950~60년대 슬롯 막냉각에 대한 초기 연구는 평판에서 고온의 연소가스와 냉각유체가 평행하게 분사될 때 슬롯 출구 하류에서의 슬롯 막냉각 성능에 대한 해석해를 구하는데 집중되었으며, 주유동과 냉각유체 사이에 발생하는 막(film)에 대한 특성과 두 유체간의 혼합구간의 정의에 따라 많은 연구가 이루어졌다. [2~5]

또한, 슬롯 형상 변화가 연소실 벽면의 냉각 성능에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 수행되었다. Kacker와 Whitelaw[6]는 슬롯 높이 대 립 두께비의 변화와 슬롯의 분사 각도가 벽면 막냉각 성능에 지배적인 영향을 미침을 밝혔다. Seban[7]은 립의 유무와 형상 변화에 대한 연구를 진행하였다. Ham[8]은 슬롯 내벽에 홀을 삽입하고, 냉각유로의 방향과 분사방식의 변화에 따른 립 내벽에서의 물질전달계수와 슬롯 출구에서의 속도장을 측정하였다. 하지만, 동축형 램제트와 같이 급확장단에 따른 재순환 영역에서 슬롯 막냉각의 성능에 대한 연구는 부족한 실정이다.

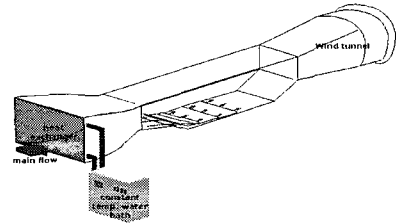
본 연구의 목적은 재순환 영역이 벽면의 막냉각 성능에 미치는 영향에 대한 정보를 실험을 통해 측정하는 것이다. 경사진 램제트 연소실을 모사하여, 램제트 연소실 내부 유동장을 측정하였으며, 슬롯 출구 하류 벽면에서의 단일 막냉각 효율분포를 감온성 액정(Thermochromic Liquid Crystal)을 이용하여 구하였다. 또한 냉각유체와 주유동의 혼합현상을 파악하기 위하여 재순환 영역에서 무차원 온도 분포를 구하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

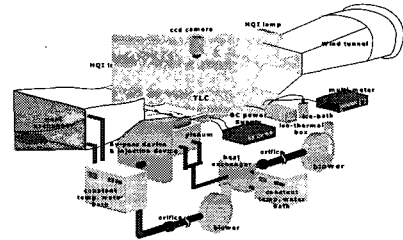
### 2.1 실험 장치

본 연구에서는 연소실 내부의 속도장 및 난류강도를 측정하기 위한 유동 실험 장치와 슬롯 하류에서의 열전달 특성 파악을 위한 열전달 실험 장치를 각각 구성하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험 장치와 측정영역의 개략도를 보이고 있다.

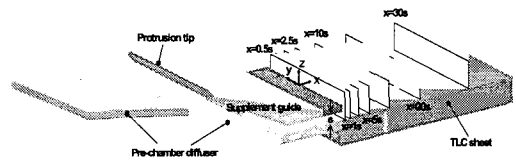
Figure 1(a)는 각 슬롯 출구에서 열선 유속계



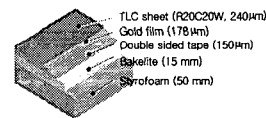
(a) flow experimental setup



(b) heat transfer experimental setup



(c) test section



(d) Layers of measurement plate

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus

(Hot Wire Anemometer)를 이용하여 속도장과 난류강도를 측정하기 위한 유동 실험 장치이며, 공기 흡입부의 단면 크기는 150×400 mm, 길이는 1500 mm이며, 주유동의 속도는 15 m/s이다.

온도장 및 막냉각 효율 데이터를 얻기 위해서는 주유동과 냉각유체의 온도를 다르게 조절해 주어야 한다. Fig. 1(b)와 같이 냉각 유로중앙에서 외부로 배출하고, 열교환기를 통해 온도가 적절히 조절된 유동을 별도의 유로를 구성하여 슬롯으로 공급하였다. 이차유동의 온도는 주유동의 온도(상온)보다 20℃ 높게 유지시켰으며 이때의 밀도비는 0.93이다.

온도장 측정을 위하여 3개의 J-type 열전대로

구성된 열전대 갈퀴를 사용하였으며, 열전대 갈퀴를 삼차원 이송장치에 부착하여 Fig. 1(c)에 나타난 것과 같이  $x/s=0.5, 1, 2.5, 5, 10, 20, 30$ 의 7개 지점에서의 온도장을 측정하였다. Fig. 1(d)와 같이 막냉각홀 하류부분의 측정판에는 TLC(감온성액정)를 설치하여 막냉각 효율 값을 구하였다. 측정판은 대역폭이  $20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 인 TLC(R20C20W, Hallcrest Ltd,  $240\ \mu\text{m}$ ), 금도금 히터(Aquare-12, Courtaulds,  $178\ \mu\text{m}$ ), 양면접착 테이프(5 mm), 베이클라이트(Bakelite, 15 mm), 스티로폼(50 mm)으로 된 층으로 구성되어 있으며, 측정판에 수직인 위쪽 방향으로 CCD 카메라와 조명을 설치하여 측정판을 촬영하였다.

본 연구에서 모사된 연소실은 두 개의 경사면을 이용한 pre-diffuser type의 연소실이다. 본 실험에서 사용된 슬롯은 가장 높은 막냉각 효율을 나타내는 2차원 슬롯을 사용하였다. 슬롯 높이는 2 mm, 슬롯 높이 대 립 두께비는 1이며 슬롯 분사각은 주유동과 평행하게 하였다.

## 2.2 무차원 온도 및 막냉각 효율

막냉각홀 하류의 온도장에 대한 결과는 무차원 온도로 표시하였으며 다음과 같이 정의된다.

$$\Theta = (T_{air} - T_{\infty}) / (T_2 - T_{\infty}) \quad (1)$$

막냉각 효율은 단열벽면온도를 무차원화한 값으로 정의되며, 유동의 물성치가 일정한 저속 유동의 경우 다음과 같이 표현된다.

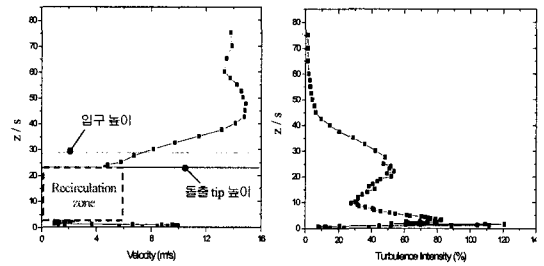
$$\eta = \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_2 - T_{\infty}} \quad (2)$$

여기서, 단열벽면온도( $T_{aw}$ )는 TLC를 이용하여 구하였다.

## 3. 실험 결과 및 토의

### 3.1 속도 및 난류강도 분포

Figure 2는 슬롯 출구 직후 바닥면에서 수직방향으로 속도분포와 난류강도 분포를 측정한 결과이다. Fig. 2(b)를 살펴보면 슬롯 립 바로 윗 영역과  $z/s =$



(a) velocity profile (b) Turbulence intensity  
Fig. 2 Vertical distributions of velocity at the first slot exit

25인 영역에서 난류강도가 높아지는 영역을 확인할 수 있다. 슬롯 립 바로 윗 영역에서의 높은 난류강도는 냉각유체와 순환유동 사이에 발생하는 전단면에 의해 형성되며, 이 영역에서 두 유동간의 높은 섞임 현상을 예상할 수 있다.  $z/s=25$ 인 영역에서 발생하는 높은 난류강도는 냉각 유로 입구의 돌출부에 의해 박리된 유동이 연소실 벽면으로 순환되면서 주유동과 분리되어 나타나는 현상이다.

이 때, 슬롯을 통해 분사된 냉각유량은 전체 유량의 2.12%이다. 유동 실험을 통해 얻은 유동장 결과는 열전달 실험의 기초 정보로 사용되었다.

### 3.2 온도장 결과

Figure 3은 슬롯 출구에서부터 하류로의 진행방향에 따른 유동의 무차원 온도 분포값을 분사비 ( $M=\rho_2 U_2 / \rho_{\infty} U_{\infty}$ )가 높고( $M=2.0$ ), 낮은( $M=0.5$ )경우에 대하여 비교한 그림이다. 무차원 온도 분포를 통하여 하류로 진행함에 따라 냉각유체가 주유동과 혼합되는 정도를 확인할 수 있었다.

분사비와 무관하게 슬롯 초기 영역에서는 2차 유동에 의한 높은 무차원 온도값을 갖지만, 두 유동간의 높은 전단력과 난류강도로 인해  $x/s=2.5$  이후 영역에서 주유동과 냉각유체간의 섞임 현상이 증가하여 온도값이 급격히 감소하는 경향을 보였다.

Figure 3(a)와 같이 분사비가 낮은 경우  $x/s=20$  이후 영역에서는 냉각유체의 영향이 거의 존재하지 않는 것을 확인하였다. 이것은 냉각유량이 작아 계순환 영역의 영향을 직접적으로 받는 초기 영역 이후 냉각 유체가 완전히 주유동과 섞이게 됨을 증명한다. 하지만, 분사비가 증가함에 따라 냉각 유체의 절대

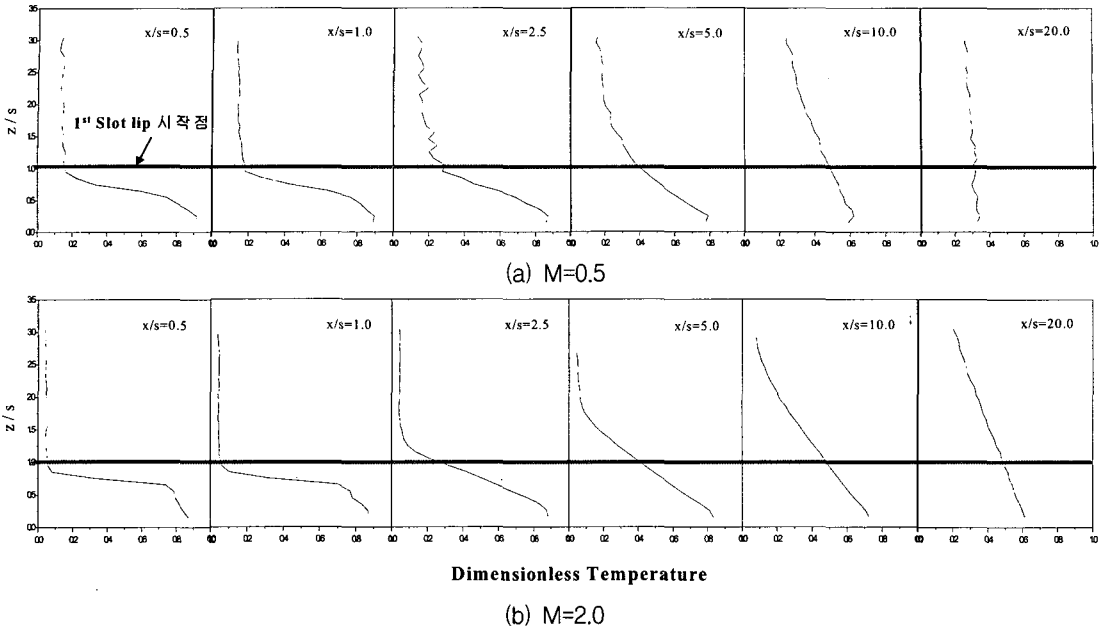


Fig. 3 Vertical distribution of dimensionless temperature on the downstream of the 1st slot

유량도 증가하여 냉각 유체가 영향을 미치는 영역이 더 먼 하류에까지 이르게 된다. Fig. 3(b)는 분사비가 2.0인 경우로 하류로 진행함에 따라 무차원 온도값의 기울기가 더 완만히 감소하는 것을 보였으며,  $x/s=30$ 인 영역에서도 바닥면과 가까운 영역에서는 냉각 유체의 영향력이 존재함을 확인하였다. 이를 통해 분사비가 증가함에 따라 냉각 성능도 함께 증가함을 예상할 수 있었다.

### 3.3 막냉각 효율 및 열전달 계수 분포

막냉각 효율( $\eta$ )은 단일 벽면온도( $T_{aw}$ )를 무차원화한 형태이다. 막냉각 성능을 평가하기 위해서는 단일 벽면온도값의 분포 형태를 확인하여야 한다. Fig. 4는 슬롯 하류에서의 분사비에 따른 막냉각 효율값의 횡방향 평균값을 나타낸 그림이다. 재순환 영역이 존재하는 경우 전체적으로 막냉각 효율값이 급격히 감소하게 된다. 이것은 박리된 유동이 슬롯 하류 벽면에 충돌하고 슬롯 방향으로 순환하면서 높은 난류강도를 가지게 되며, 주유동과 이차유동간의 전단력이 급격히 증가하고 이 영역에서 분사된 냉각유체와 급격히 섞이기 때문이다.

분사비가 증가함에 따라 막냉각 효율은 증가하며, 이는 냉각유체의 절대 유량의 증가에 기인한다. 이것은 온도장 결과에서도 확인하였듯이 분사비의 증가에 따라 주유동과 냉각유체간의 전단응력은 높아지지만 벽체와 같이 슬롯을 통해 분사된 냉각 유체의 절대유량이 증가하면서 하류방향으로 진행하고자 하는 운동량도 함께 증가하는 것으로 설명할 수 있다. 냉각유체의 운동량의 증가에 따라 더 먼 하류에까지 냉각유체가 영향을 미치게 되어 벽면에서의 막

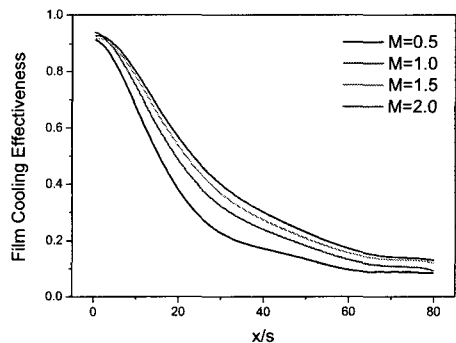


Fig. 4 Distribution of adiabatic film cooling effectiveness of film injectant downstream for various blowing ratios

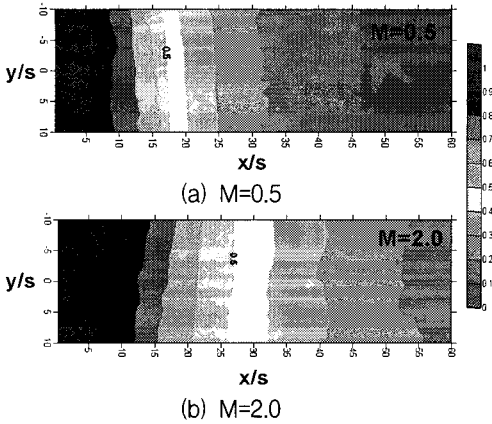


Fig. 5 Schematic diagrams of experimental apparatus

냉각 효율값의 증가에 기인한다.

Figure 5는 슬롯 출구 하류에서 분사비 증가에 따른 막냉각 효율값의 분포를 나타낸 그림이다. 슬롯을 통해 분사된 유동이므로, 횡방향으로 매우 균일한 분포를 보였다. 횡방향 평균값과 마찬가지로 슬롯 출구 직후 영역에서 급격하게 막냉각 성능이 감소함을 보였으며 분사비의 증가에 따라 먼 하류에까지 상대적으로 높은 막냉각 효율값을 유지하는 경향을 보였다.

#### 4. 결 론

재순환 영역이 슬롯 막냉각 성능에 미치는 영향에 대한 정보를 구하기 위하여 경사진 연소실을 모사한 실험 장치에서 슬롯 출구에서의 속도 및 온도장 분포와 슬롯 출구 하류에서의 막냉각 효율값을 측정하였다. 재순환 영역과 슬롯을 통해 분사된 냉각유체 사이의 높은 전단력과 난류 강도는 두 유동간 혼합을 증가시키고 재순환 영역의 재부착점 이전 영역에서 막냉각 효율값을 급격히 감소시킨다. 또한, 분사비가 증가함에 따라 냉각유체의 절대유량과 운동량이 증가하여 슬롯에서 먼 하류에까지 냉각유체가 영향을 미침을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Goldstein, R. J., "Film Cooling", Advances Heat Transfer, Academic Press, Vol. 7, 1974, pp. 321~379
2. Hatch and Papell, "Use of theoretical flow 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
3. J. Klein and M. Tribus, "Forced convection from non-isothermal surfaces." Heat transfer symposium, University of Michigan Press, Michigan, 1953
4. R. A. Seban and I. H. Back, "Velocity and temperature profiles in turbulent boundary layers with tangential injection." J. Heat Transfer, Trans. A.S.M.E. Series C, 84, 1962, pp.45~54
5. 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
6. 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
7. 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
8. 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