

## 재순환 영역이 램제트 연소실에서의 열전달 특성에 미치는 영향

이건우\* · 오민근\* · 조형희\*\* · 함희철\*\*\* · 황기영\*\*\*

### Heat Transfer Characteristics under Recirculation zone of Ramjet Combustor

Keon Woo Lee\* · Min Keun Oh\* · Hyung Hee Cho\*\*  
Hee Chul Ham\*\*\* · Ki Young Hwang\*\*\*

#### ABSTRACT

This 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 shear layer and high turbulence intensity between separated flows and coolant flows.

#### 초 록

본 연구에서는 램제트 연소실에서의 재순환 유동이 슬롯 막냉각에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행하였다. 램제트 연소실 입구의 경사진 확장면 돌출부에 의해 발생된 재순환 유동이 다단 슬롯 중 첫 번째 슬롯에 영향을 미치도록 실험 장치를 구성하여, 슬롯 출구 하류에서의 속도장, 온도장 및 단열 막냉각 효율을 측정하였다. 재순환 유동의 영향에 들어가는 슬롯에서 분사된 냉각유체는 재순환 유동의 높은 전단력과 난류강도로 인해 분사 직후 급격히 주유동과 혼합되어, 재순환 영역에 포함되지 않은 슬롯보다 냉각 성능이 감소함을 결과를 통해 확인하였다.

Key Words : Ramjet Combustor(램제트 연소실), Recirculation zone(재순환 영역), Slot Film Cooling(슬롯 막냉각), Film Cooling Effectiveness(막냉각 효율)

† 2007년 10월 8일 접수 ~ 2007년 12월 9일 심사완료

\* 학생회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 연세대학교 기계공학과

\*\*\* 정회원, 국방과학연구소 제1기술연구본부  
연락처, E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

#### 1. 서 론

램제트 엔진의 연소실은 고온의 연소가스로부

터 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 IRR미사일과 짧은 연소 시간용 램제트 엔진에는 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 미

침을 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.

하지만, 동축형 램제트와 같이 급확장단에 따른 재순환 영역이 존재하고 다단의 슬롯이 설치된 형태에서의 각 슬롯별 막냉각의 성능에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 급확장단에 의한 재순환 영역의 존재가 슬롯 막냉각 효율에 어떠한 영향을 미치는지 각각의 슬롯별 열전달 특성을 실험적으로 측정, 비교하는 것이다. 다단 슬롯이 적용된 동축형 램제트 연소실을 모사하여, 급확장단이 존재하는 램제트 연소실 내부 유동장을 측정하였으며, 각 슬롯별 출구 하류 벽면에서의 단열 막냉각효율 분포를 감온성 액정(Thermochromic Liquid Crystal)을 이용하여 구하였다. 또한 재순환 영역의 존재가 냉각유체와 주유동의 혼합현상에 어떠한 영향을 주는지 파악하기 위하여 무차원 온도장을 구하였다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

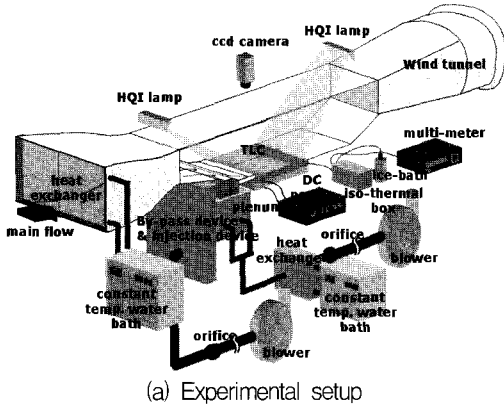
### 2.1 실험장치

본 연구에서는 연소실 내부의 속도장 및 난류강도를 측정하기 위한 유동 실험과 슬롯 하류에서의 열전달 특성 파악을 위한 열전달 실험을 수행하였다.

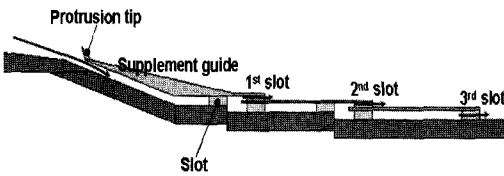
Figure 1(a)는 각 슬롯 출구에서 속도장과 난류강도 및 막냉각 효율값을 측정하기 위한 실험 장치의 개략도이다. 공기 흡입부의 단면 크기는

Table 1. Slot geometry

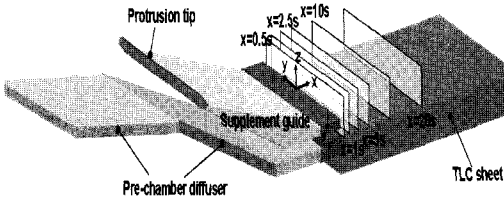
Slot	립두께(t)	슬롯높이(s)	립두께비(t/s)	Slot길이( $l_x$ )	Slot폭( $l_y$ )
1st	2mm	2mm	1	120mm	400mm
2nd		3mm	0.67		
3rd		8mm	0.25		



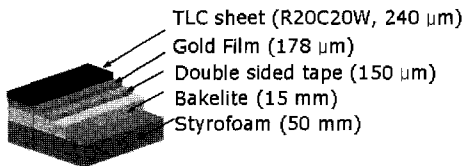
(a) Experimental setup



(b) Multi slot system



(c) Test section



(d) Layers of measurement plate

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus

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

온도장 및 막냉각 효율 데이터를 얻기 위해서는 주유동과 냉각유체의 온도를 다르게 조절해 주어야 한다. 이차유동의 온도는 주유동의 온도(상온)보다 20℃ 높게 유지시켰으며 이때 주유동과 냉각 유체의 밀도비는 0.93이다. 온도장을 위하여 3개의 J-type 열전대로 구성된 열전대 갈퀴를 삼차원 이송장치에 부착하여 Fig. 1(c)에 나타난 것과 같이  $x/s=0.5, 1, 2.5, 5, 10, 20$ 의 6개 지점에서의 온도장을 측정하였다. Fig. 1(d)와 같이 막냉각 하류부분의 측정판에는 TLC(감온성 액정)를 설치하여 슬롯별 막냉각 효율값을 구하였다.

측정판은 대역폭이 20~40℃인 TLC(R20C20W, Hallcrest 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 방향으로 CCD 카메라와 조명을 설치하여 측정판을 촬영하였다.

본 연구에서 사용한 연소실 형상은 두 개의 경사면을 이용하여 모사한 pre-diffuser type의 연소실이다. 본 실험에서는 높은 막냉각 성능을 가진다고 알려진 2차원 슬롯을 사용하였으며 냉각 유체는 주유동과 평행하게 분사시켰다.

### 2.3 무차원 온도 및 막냉각 효율

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

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

각각의 온도값은 열전대를 이용하여 측정하였다. 여기서  $T_{air}$ 는 주유동의 영향으로 인해 변화된 냉각 유동의 실제 온도이며,  $T_{\infty}$ 는 주유동의 온도이고  $T_2$ 는 냉각 유동의 초기 온도이다.

막냉각 효율은 단열벽면 온도를 무차원화한 값으로 정의되며, 유동의 물성치가 일정한 저속 유동의 경우 다음과 같이 표현된다. 여기서 단열 벽면온도( $T_{aw}$ )는 TLC를 이용하여

구하였으며,  $T_{\infty}$ 와  $T_2$ 의 정의는 무차원 온도의 경우와 같고 열전대를 이용하여 측정하였다.

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

분사비는 주유동에 대한 이차유동의 질량 유속의 비로서 식 (3)과 같이 정의한다. 본 연구에서는 0.5~2.0범위의 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.

$$M = \frac{\rho_2 U_2}{\rho_{\infty} U_{\infty}} \quad (3)$$

### 3. 실험 결과 및 토의

#### 3.1 속도 및 난류강도 분포

Figure 3은 첫 번째 슬롯출구직후에서 수직방향( $z$ 방향)으로 속도분포와 난류강도를 측정한 결과이다. 첫 번째 슬롯 립 바로 윗 영역과  $z/s=25$ 인 영역 두 군데에서 난류강도가 높아짐을 확인할 수 있다. 슬롯 립 바로 윗 영역에서는 슬롯에서 분사된 냉각유체와 연소실의 주유동간의 활발한 섞임으로 인해 난류강도가 높아진다고 판단할 수 있다.  $z/s=25$ 인 영역에서의 높은 난류강도 분포는 경사진 확장면 냉각유로 입구에 설치된 돌출부에 의해 박리된 유동이 연소실 벽면으로 재순환되면서 주유동과 활발히 섞이면서 나타나는 현상이라 할 수 있다. 위의 결과로 유동장을 예상하여 보면, Fig. 2와 같이 냉각유로 입구에 설치된 돌출부로 인해 주유동이 박리되며, 급확장단을 통과하면서 재순환 유동이 발생한다는 것을 알 수 있다.

Figure 3(a)를 살펴보면 재순환 영역의 범위에 들어가는 첫 번째 슬롯에서의 수직방향 속도가 돌출부 높이 근방에서 감소하고 있음을 확인할

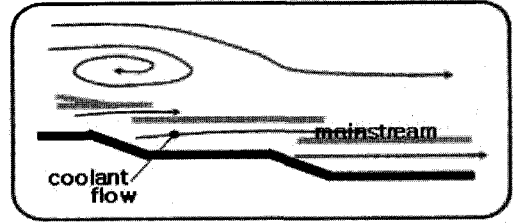


Fig. 2 Schematic view of estimated flow

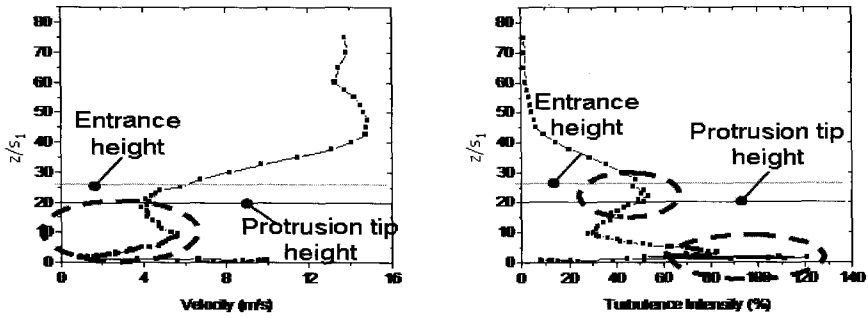
수 있다. 이는 앞서 언급한 첫 번째 슬롯의 난류강도 분포의 형태와 더불어 재순환 영역의 존재로 인해 주유동의 난류강도가 높아져 섞임이 활발히 일어나기 때문이라 설명할 수 있다.

Figure 4(a)와 Fig. 5(a)를 살펴보면 상대적으로 재순환영역에 포함되지 않는 두 번째, 세 번째 슬롯에서는 수직방향 속도의 감소현상이 관찰되지 않는다. Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 두 번째, 세 번째 슬롯에서의 난류강도형태 역시 첫 번째 슬롯에서의 형태와 달리 슬롯 립 바로 윗 영역에서의 난류강도 증가만이 관찰됨을 확인할 수 있다. 이것은 첫 번째 슬롯에서는 두 번째, 세 번째 슬롯과는 달리 재순환 유동에 의해 발생된 난류와 섞임 효과에 의해, 연소실의 주유동과 분사된 냉각 유체의 섞임이 활발하다는 것을 알려준다.

#### 3.2 온도장 결과

재순환 영역의 존재가 주유동과 냉각 유체사이에 어떠한 영향을 끼치는지를 알아보기 위하여 열전대로 유동의 온도를 측정한 결과를 바탕으로 무차원 온도장을 구하였다.

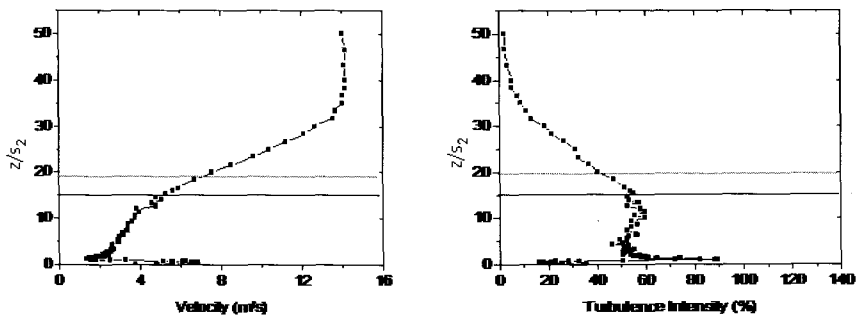
Figure 6은 슬롯 출구에서부터 하류로의 진행방향에 따른 유동의 무차원 온도 분포값을 분사비  $M=0.5$ 인 경우에 대하여 첫 번째와, 세 번째 슬롯을 비교한 결과이다. 이를 통하여 하류로 진행함에 따라 냉각유체가 주유동과 혼합되는 정도를 확인할 수 있었다. 슬롯 초기 영역에서는 분사되는 냉각유체의 영향으로 높은 무차원 온도값을 갖지만, 두 유동간의 높은 전단력과 난류강도로 인해  $x/s=2.5$ 인 지점 이후부터 주유동과



(a) Velocity profile

(b) Turbulence intensity

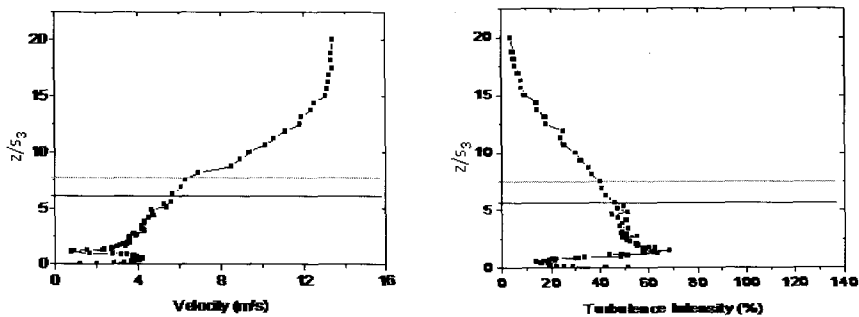
Fig. 3 Vertical distributions of velocity at the first slot exit



(a) Velocity profile

(b) Turbulence intensity

Fig. 4 Vertical distributions of velocity at the second slot exit



(a) Velocity profile

(b) Turbulence intensity

Fig. 5 Vertical distributions of velocity at the third slot exit

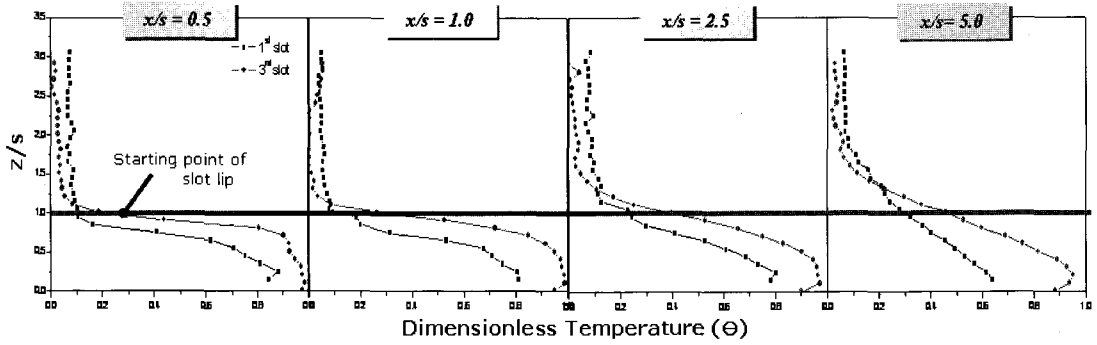
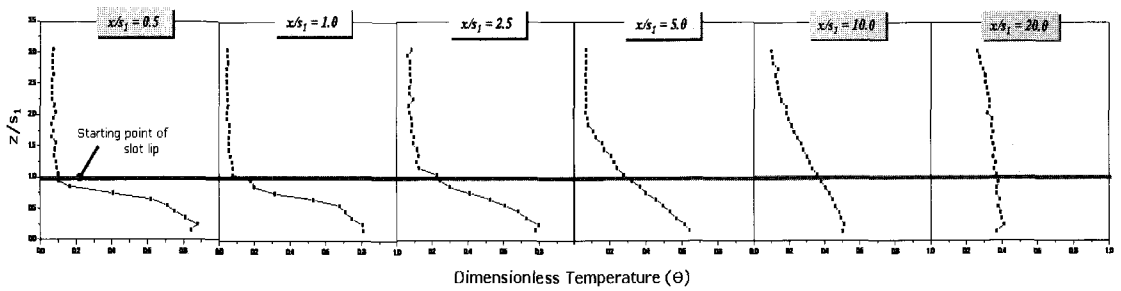
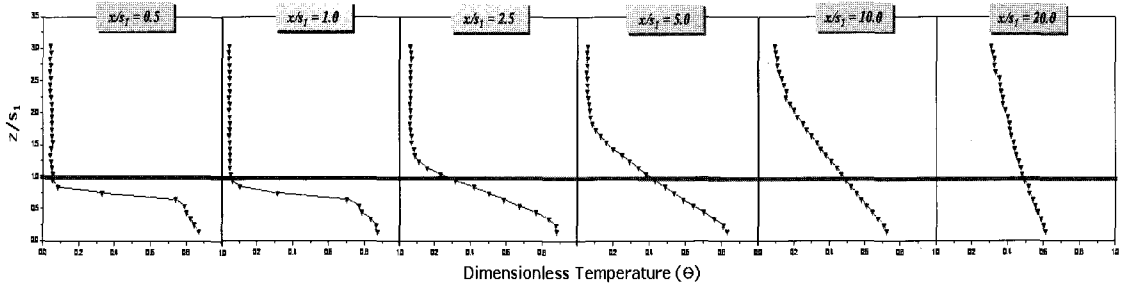


Fig. 6 Vertical distribution of dimensionless temperature on the downstream of the 1st and 3rd slot ( $M=0.5$ )



(a)  $M=0.5$



(b)  $M=2.0$

Fig. 7 Vertical distribution of dimensionless temperature on the downstream of the 1st slot

냉각유체간의 섞임이 활발해져 무차원 온도값이 급격히 감소하는 경향을 보였다.

첫 번째 슬롯의 온도장과 세 번째 슬롯의 온도장을 비교해 보면, 상대적으로 재순환 영역의 영향을 받는 첫 번째 슬롯의 무차원 온도값이 급격하게 감소함을 확인할 수 있다. 이는 첫 번째 슬롯 부분에 존재하는 재순환 유동이 주유동과 냉각유체를 활발하게 섞어 막냉각 성능을 감소시키기 때문이다.

Figure 7(a)와 같이 분사비가 낮은 경우  $x/s=20$  이후 영역에서는 냉각유체의 영향이 거의 존재하지 않는 것을 확인하였다. 이것은 냉각유량이 작아 재순환 영역의 영향을 직접적으로 받는 초기 영역 이후 냉각 유체가 완전히 주유동과 섞이게 되기 때문이다. 하지만, 분사비가 증가함에 따라 냉각 유체의 절대 유량도 증가하여 냉각 유체가 먼 하류에까지 영향을 미치게 됨을 확인하였다. Fig. 7(b)은 분사비가 2.0인 경우로 분사비가 0.5인 경우보다 하류로 진행하면서 무차원 온도값의 기울기가 완만히 감소하는 경향을 보였으며,  $x/s=20$ 인 영역에서도 바닥면과 가까운 영역에서는 냉각 유체의 영향력이 존재함을 확인하였다. 이를 통해 분사비를 증가시켜주면 하류 방향으로의 막냉각 성능도 함께 증가함을 예상할 수 있었다.

### 3.3 막냉각 효율

막냉각 효율( $\eta$ )은 단일 벽면온도( $T_{aw}$ )를 무차원화한 형태이다. 막냉각 성능을 평가하기 위해서는 단일 벽면 온도값의 분포 형태를 확인하여야 하며 본 실험에서는 TLC(감온성 액정)을 이용하여 단일 벽면 온도값을 구하였다. [10~12] 본 연구에 사용한 TLC는 Hallcrest사의 R20C20W Sheet 타입으로 20°C~40°C에서 색의 변화를 나타내는 성질을 지니고 있다. 실제 실험조건과 똑같은 상황에서 교정 장치를 설치하고 다양한 온도범위에 대해서 반복 실험을 하였다.

TLC 이미지의 획득은 해당 온도범위에서 구리막대의 온도분포가 정상상태를 유지할 때 CCD 카메라를 통하여 획득하였으며, 그와 동시에 각

위치에서의 열전대 값도 멀티미터(34970A, Agilent)를 통하여 기록하였다. 또한 조명은 복사열에 의한 오차를 최소화하기 위하여 촬영 동안에만 작동시켰다.

정상상태의 판단은 각 열전대의 온도 변화가 모두 0.1°C 이내 일 경우를 기준으로 하였으며 정상상태로 도달하는데 통상 2시간정도 소요되었다. 이렇게 획득한 TLC 이미지는 640 pixel×480 pixel 크기의 200프레임으로 된 동영상 파일로 저장하였으며 하나의 동영상을 획득하는데 걸린 시간은 58초이다. 촬영동안 각 열전대는 50번 측정하여 정상상태를 유지하고 있는지 판단하였다. 이와 같이 획득한 TLC 동영상을 다시 200장의 Bitmap 파일로 분리하였고 이 200장의 이미지로부터 각 pixel 대한 RGB 평균값을 산출하여 자체 제작된 프로그램을 통해 각 지점의 온도값으로 환산하였다.

반복성여부를 검증하기 위하여 TLC판과 같은 크기의 녹색 색상지를 TLC판 위에 부착한 뒤 실험조건과 같은 상황에서 촬영을 하여 색상값을 획득하였다. 그 결과 전체적으로 고른 분포를 나타내었으며 TLC 교정 후 색상지로부터 얻은 색상 값을 온도로 환산한 결과 평균 37.909°C, 표준편차 0.156°C로 나타났으며 막냉각 효율 값으로 환산하였을 경우 평균 0.895, 표준편차 0.0078로 균일하게 나타나는 것을 확인하였다.

유동실험을 통해 파악된 유동특성과 무차원 온도장을 측정된 결과를 종합하여 첫 번째 슬롯이 재순환 유동의 영향을 받음을 확인하였으며, 재순환 유동이 슬롯 막냉각 효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 먼저 분사비를 0.5로 고정시킨 상태에서 첫 번째 슬롯과 세 번째 슬롯의 단일 막냉각 효율을 비교하였다.

Figure 8은 첫 번째와 세 번째 슬롯에서 측정된 막냉각 효율값의 횡방향 평균값을 나타낸 그림이다. 재순환 영역이 존재하는 첫 번째 슬롯의 경우 전체적으로 막냉각 효율값이 급격히 감소하게 된다. 이것은 박리된 유동이 슬롯 하류 벽면에 충돌하고 슬롯 방향으로 순환하면서 높은 난류강도를 가지게 되고, 이를 통해 주유동과 이

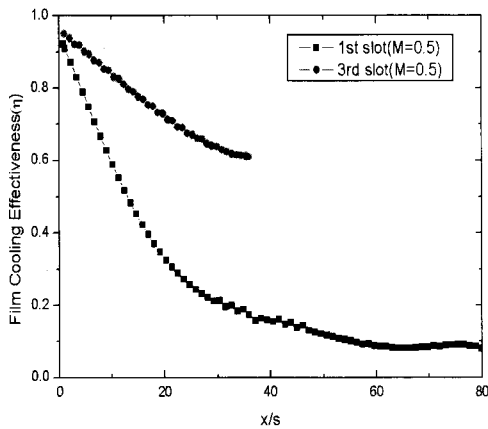


Fig. 8 Distribution of adiabatic film cooling effectiveness of 1st & 3rd slot

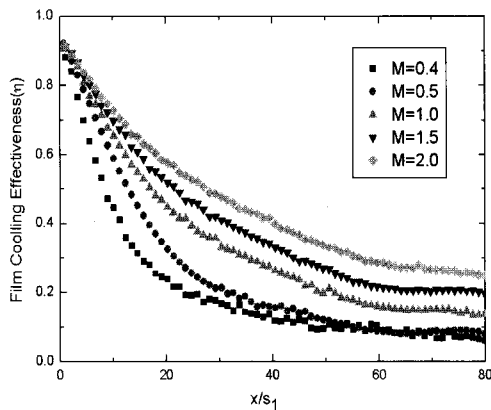


Fig. 9 Distribution of adiabatic film cooling effectiveness of 1st slot with various blowing ratio

차 유동간의 전단력이 급격히 증가하여 분사된 냉각 유체와 주유동간 혼합을 촉진시키기 때문이다. 재순환 영역의 영향을 받지 않는 세 번째 슬롯은 첫 번째 슬롯에 비해 상대적으로 막냉각 효율이 완만하게 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 9는 슬롯 하류에서의 분사비에 따른 막냉각 효율값의 횡방향 평균값을 나타낸 그림이다. 재순환 영역이 존재하는 경우 전체적으로 막냉각 효율값이 급격히 감소하게 되나, 분사비가

증가함에 따라 냉각유체의 절대 유량이 증가하면서 막냉각 효율이 증가한다. 이는 분사비의 증가에 따라 주유동과 냉각유체간의 전단응력은 높아지지만 슬롯을 통해 분사된 냉각 유체의 절대유량이 증가하면서 하류방향으로 진행하고자 하는 운동량이 함께 증가하여 주유동과 냉각유체 사이의 섞임을 완화하기 때문으로 설명할 수 있다. 더불어 절대 유량의 증가는 냉각 유체의 운동량을 증가시켜 더 먼 하류에까지 냉각유체가 영향을 미치게 되므로 벽면에서의 막냉각 효율값이 증가하게 된다.

#### 4. 결 론

재순환 영역이 슬롯 막냉각 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 경사진 연소실에 다단 슬롯이 모사된 실험 장치에서 슬롯 출구에서의 속도장 및 온도장 분포와 슬롯 출구 하류방향으로의 막냉각 효율값을 측정하였다. 난류강도의 분포와 속도분포를 통해 재순환 영역의 존재를 확인하였으며 이를 바탕으로 재순환 영역에 의한 막냉각 효율의 변화를 측정하기 위해 열전달 실험을 수행하였다. 무차원 온도장의 분포를 통해 재순환 영역이 슬롯을 통해 분사된 냉각유체와 주유동 사이의 높은 전단력을 발생시키며 난류강도를 증가시켜 두 유동의 혼합을 촉진시킬 수 있었다. 또한, 분사비에 따른 막냉각 효율값을 관찰하여 재순환 영역에 있는 슬롯에서 분사비를 증가시키면 좀 더 양호한 막냉각 효율값을 기대할 수 있음을 확인하였다.

#### 후 기

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



## 참고 문헌

1. Goldstein, R. J., "Film Cooling", *Advances Heat Transfer*, Academic Press, Vol. 7, 1974, pp.321-379
2. 성홍계, 윤현걸, "램제트/스크램제트의 기술동향과 소요기술 분석 I. 램제트 엔진(액체램제트, 덕티드로켓)", *한국추진공학회논문집 제10권 제1호*, 2006, pp.72-86
3. 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
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. A.S.M.E. Series C, 84, 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. K. H. Platzer, C. Hirsch, D. E. Metzger and S. Wittig, 1992, "Computer-based areal surface temperature and local heat transfer measurements with thermochromic liquid crystals(TLC)" *Experiments in Fluids*, vol. 13, pp.26-32
11. Z. Wang, P. T. Ireland and T. V. Jones, 1996, "A Color image processing system for transient liquid crystal heat transfer experiments" *J. of Turbomachinery*, vol. 118, pp.421-427
12. D. H. Lee, J. H. Chung and S. Y. Won, 2000, "A new liquid crystal color calibration technique using neural networks and median filtering." *KSME International Journal*, vol. 14, pp.113-120