

## 사각홀에서 막냉각 효율 및 열전달계수의 측정

이 윤 석, 이 동 호, 조 형 회<sup>†</sup>

연세대학교 대학원 기계공학과, \*연세대학교 기계공학과

### Measurement of Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer of Rectangular-Shaped Film Cooling Holes

Youn Seok Lee, Dong Ho Rhee, Hyung Hee Cho<sup>†</sup>

Graduate School of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received March 8, 2002; revision received March 27, 2002)

**ABSTRACT:** An experimental study has been conducted to measure the local film-cooling effectiveness and the heat transfer coefficient for a single row of rectangular-shaped holes. Four different cooling hole shapes such as a straight rectangular hole, a rectangular hole with laterally expanded exit, a circular hole and a two-dimensional slot are tested. A technique using thermochromic liquid crystals is applied to determine adiabatic film cooling effectiveness values and heat transfer coefficients on the test surface. Both film cooling effectiveness and heat transfer coefficient are measured for various blowing rates and compared with the results of the cylindrical holes and the two-dimensional slot. The flow patterns downstream of holes are calculated numerically using a commercial package. The results show that the rectangular holes provide better performance than the cylindrical holes. For the rectangular holes with expanded exit, the penetration of jet is reduced significantly, and the higher and more uniform cooling performance is obtained even at relatively high blowing rates.

**Key words:** Film cooling(막냉각), Rectangular-shaped hole(사각홀), Heat transfer(열전달), TLC technique(감온성 열액경법)

#### 기 호 설 명

$AR$	: 막냉각홀의 입구에 대한 출구의 면적비	$H$	: 형상계수
$d$	: 막냉각홀 입구 (수력)직경	$I$	: 주유동과 이차유동의 운동량의 비
$DR$	: 이차유동과 주유동의 밀도비	$l$	: 막냉각홀 길이
$h$	: 열전달계수	$M$	: 분사율
$\bar{h}$	: 횡방향 평균 열전달계수	$M_{exit}$	: 확장 직사각홀 출구에서의 분사율
		$Re_d$	: Reynolds 수
		$t$	: 분사판의 두께
		$Tu$	: 주유동의 난류강도
		$U_\infty$	: 주유동의 평균 속도
		$x, y, z$	: 주유동방향, 수직방향, 폭방향 좌표

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-2123-2828; fax: +82-2-312-2159

E-mail address: hhcho@yonsei.ac.kr

## 그리스 문자

- $\alpha$  : 주유동에 대한 분사각  
 $\delta$  : 경계층 두께(0.99  $U_\infty$  기준)  
 $\delta^*$  : 배제 두께  
 $\theta$  : 운동량 두께  
 $\eta$  : 단열막냉각 효율(  $= \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_2 - T_\infty}$  )  
 $\bar{\eta}$  : 횡방향 평균 단열막냉각 효율

## 1. 서 론

가스터빈 엔진의 효율 및 성능은 터빈 입구 온도에 크게 좌우되므로, 높은 열효율을 얻기 위하여 최근 가스터빈 엔진은 높은 입구온도(약 1,400~1,500°C)에서 작동되도록 설계되고 있다. 이는 요소재질의 열한계점을 훨씬 상회하며, 이와 같은 입구온도의 고온화 경향은 터빈요소에 대한 열부하를 증가시키고 있다. 따라서 극한의 작동 조건 하에서의 허용수명 및 안정성의 유지를 위해서 내부대류냉각, 충돌제트냉각과 더불어 막냉각기법이 많이 응용되고 있다.

여러 연구를 통해 최적의 막냉각홀 형태는 2차원 슬롯이라고 알려져 있다. 하지만 고온의 주유동이 홀로 유입되는 문제나 구조적 취약성으로 인하여 일반적으로는 일렬 이상의 이산된 원형의 막냉각홀을 통하여 블레이드나 연소실 냉각에 사용되어 오고 있다. 그러나 이러한 홀 배열 및 형상으로 인하여 분사율이 큰 경우 냉각유체가 주유동을 뚫고 들어가게 되어 고온의 표면을 제대로 보호하지 못할 뿐만 아니라, 횡방향으로 불균일성한 냉각성능을 갖게 된다.

이러한 원형홀에서의 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 냉각유체의 분사방향을 주유동과 어긋나게 하는 복합각도분사(compound angle injection) 방법이 있으며, 이에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1-4)</sup> 이러한 복합각도분사 방식은 냉각유체의 축방향 운동량을 감소시키고, 횡방향 운동량을 증가시켜 기존의 방식보다 높은 막냉각 효율을 갖지만, 이것 또한 높은 분사율에 대해서는 냉각유체가 주유동을 관통하게 되어 막냉각 성능이 감소하게 된다.

또 다른 방법 중에 하나는 홀 출구를 확장하는

방식으로, 이것은 출구에서 나오는 이차유동의 운동량을 감소시키고, 횡방향으로 유동을 퍼지게 하기 때문에 보다 나은 막냉각 성능을 나타낸다. 그러므로 최근에는 일렬 이상의 확장된 출구를 갖는 원형홀이나 사각홀이 사용되고 있으며, 확장된 출구형상을 갖는 원형홀에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.<sup>(5-11)</sup>

사각홀 형상에 대한 연구는 최근 들어서 비로소 진행되기 시작하였다. Muldoon and Acharya,<sup>(12)</sup> Licu et al.<sup>(13)</sup>은 각각 수치적인 방법과 실험적인 방법으로 사각홀에 대해서 유동특성과 막냉각 성능에 대한 연구를 수행했으며, Watanabe et al.<sup>(14)</sup>과 Takahashi et al.<sup>(15)</sup>은 정사각, 직사각홀을 포함한 다양한 홀형상에 대하여 온도장 및 막냉각 성능을 측정하였다. 그 결과 직사각홀과 타원형홀이 일반 원형홀보다 더 나은 막냉각 성능을 나타내었다. Sargison et al.<sup>(16)</sup>은 슬롯, 확장홀, 원형홀에 대하여 Console(Conversing-Slot-Hole) 형태의 홀의 막냉각 성능을 서로 비교하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는, 다양한 분사율에 대해 슬롯 형상과 유사한 직사각홀 형상에 대한 막냉각 성능을 고찰하였다. 2차원 슬롯, 원형홀, 직사각홀, 확장된 직사각홀의 총 네 가지 홀형태에 대하여 분사율을 0.5에서 2.0까지 변화시켜 가며 막냉각 성능과 열전달계수를 구해 비교하였다. 실험방법으로는 감온성 액정법(thermochromic liquid crystal method)을 이용하였으며, 상용코드(FLUENT)를 이용 막냉각홀 하류의 유동장을 구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

## 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 풍동은 개방흡입형으로 시험 단면의 크기는 300×400 mm이고 길이는 1,200 mm이며 수축부의 면적 축소비는 9:1이다. 시험부의 시작점에 3 mm의 트립 와이어(trip wire)를 설치하여 완전발달된 난류 경계층 유동을 얻을 수 있었다. 본 실험에 사용한 유속은 15 m/s이고 경계층 두께는 주유동 속도의 99%를 기준으로 홀출구에서 24.8 mm( $l/d=2.48$ )이었다. 이에 배제 두께는 3.5 mm( $\delta^*/d=0.35$ )이며, 운동량 두께는

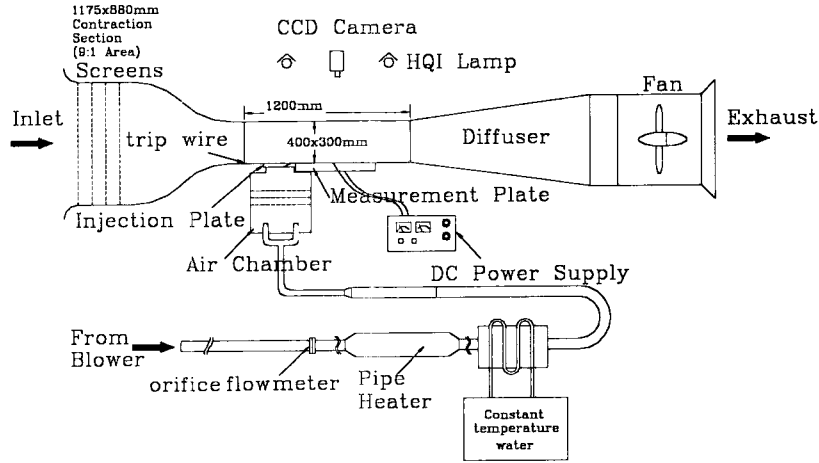


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus.

2.4 mm ( $\theta/d=0.24$ )이다. 주유동의 온도는 막냉각 홀로부터 10  $d$  상류에서 3개의 J-type 열전대로 측정하였다.

2차분사장치는 송풍기(3.75 kW), 오리피스 유량계(orifice flow meter), 관히터(pipe heater), 열교환기, 플레넘(plenum)으로 이루어졌다. 열교환기는 항온조에 연결되어 있어 관히터와 함께 2차유동의 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 플레넘의 공기는 주유동에 수직된 방향으로 막냉각 홀입구에 공급된다. 균일한 2차유동을 얻기 위하여 3개의 망(mesh)과 1개의 허니콤(honeycomb)이 이용되었고, 플레넘 주변에는 스티로폼으로 단열벽을 설치하여 막냉각 효율을 구하는 동안 2차유동의 열손실을 방지하였다.

분사율은 0.5, 1.0, 1.5, 2.0로 변화시켜 가며 실험

을 수행하였다. 원하는 분사율을 얻기 위해서 오리피스 유량계로 얻은 2차유동의 유량을 바탕으로 2차유동의 송풍량을 조절하였다. 홀 입구로 들어가는 2차유동의 온도는 J-Type 열전대를 사용하여 측정하였다.

Fig. 2는 분사판과 측정판에 대한 개략도이다. 분사판에는 일렬의 막냉각홀이 3.0  $d$ 의 간격으로 11개 설치되어 있다. 분사판은 플레넘에서 분사판과 측정판으로의 열전도를 막기 위해서 전도율이 낮은 베이클라이트( $k=0.35$  W/mK)로 제작하였다.

측정판은 Fig. 2에서 알 수 있듯이 TLC(thermochromic liquid crystal : 감온성 액정), 금도금 히터(Auare-12, Courtaulds, 178  $\mu$ m), 양면접착 테이프, 투명 아크릴판, 스티로폼으로 된 5개의 층으로 구성되어 있다. 넓은 온도범위를 측정할

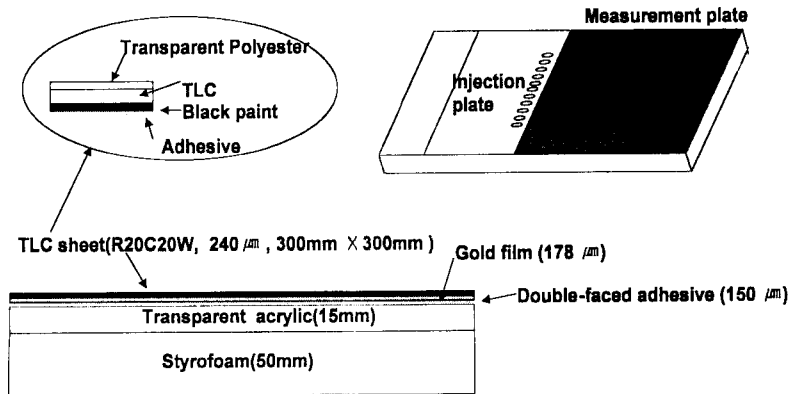


Fig. 2 Schematic view of injection plate and measurement plate.

수 있는 TLC(R20C20W HALLCREST Ltd.)을 이용하여 벽면온도를 측정하였으며, 이것은 분사홀 중심으로부터 주유동방향으로  $x/d=1.1$ 에서  $x/d=31.1$ 까지, 횡방향으로  $z/d=-15.0$ 에서  $z/d=15.0$ 까지 측정할 수 있도록 설치하였고, 제시된 결과는 주유동방향으로  $x/d=2.0$ 에서  $x/d=25.0$ 까지, 횡방향으로  $z/d=-4.5$ 에서  $z/d=4.5$ 까지(홀 간격의 3배)의 데이터를 처리한 것이다. 금도금 히터를 사용하여 등열유속조건을 형성하고 이를 이용해서 국소적 열전달계수 측정에 적용하였다. 또한 측정판 밑부분에 아크릴판과 스티로폼을 설치하여 단열벽 역할을 하도록 하였다.

본 연구에서는 정상상태에서 TLC 이미지를 얻어 그 이미지로부터 홀 하류의 온도분포를 획득하였다. 막냉각 효율 측정시에는 열교환기, 항온조, 관히터를 이용하여 이차유동의 온도를 주유동 온도(상온)보다 20℃ 더 높여 데이터를 획득하였으며, 이때 밀도비는 0.93이었다. 열전달계수 측정시에는 항온조를 이용하여 주유동과 이차유동의 온도차를 0.2℃ 이하가 되도록 유지하고 홀 하류 TLC 밑에 미리 설치된 금도금 히터를 가열하여 등열유속조건을 형성하여 값을 구하였다.

두 경우 모두 정상상태에서 CCD 카메라로부터 TLC 이미지를 획득하였으며, 이 이미지로부터 미리 구해 둔 색상과 온도의 관계식을 통해 온도로 환산하였다. J-type 열전대를 측정판 표면에 설치하여 촬영시 동시에 온도를 획득하였다.

Fig. 3은 측정판과 조명/카메라 간의 위치를 개략적으로 도시한 것이다. 조명은 두 개의 150 W HQI 램프(WDL type, OSRAM)를 사용하여 카메라 양 옆에 설치하였고, CCD 카메라(SCC-341, SAMSUNG)는 측정판 표면에서 1.2m 떨어진 곳에 설치하였다.

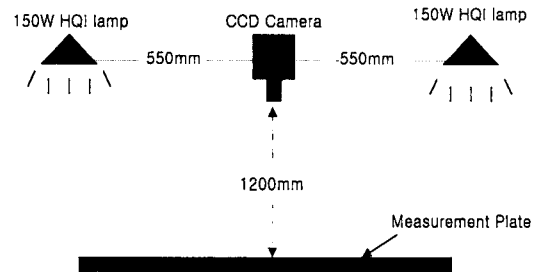


Fig. 3 Arrangements of CCD camera and lamps.

TLC의 교정은 실제실험과 같은 카메라/조명 위치에서 실시하여 색상-온도 간의 관계를 획득하고, 이에 6차 다항식을 통해 교정곡선을 획득하였다. 교정장치는 폭 50mm, 길이 260mm, 두께 18mm의 구리막대를 사용했으며, 15개의 J-Type 열전대를 구리막대에 삽입하여 온도를 측정하였다. 교정은 구리막대 한쪽에는 전기저항히터를 설치하고, 반대편에는 항온수조를 두어 구리막대에 온도구배가 발생되도록 하고, 이를 조절하여 다양한 온도범위에서 실시하였다.

2.2 막냉각홀 형상

본 실험에서는 Fig. 4에서와 같이 원형, 직사각, 확장 직사각 형상에 대한 막냉각홀과 함께 2차원 슬롯에 대하여 고찰하였다. 2차원 슬롯과 원형홀에 대한 측정은 직사각홀과 확장 직사각홀 성능을 비교하기 위한 기준 데이터로 사용하기 위해서 수행되었다.

2차원 슬롯을 제외한 나머지 홀들의 입구 수력 직경은 모두 10mm이고, 주유동에 대한 분사각은 35°이다. 직사각홀의 크기는 15mm×7.5mm이며, 확장 직사각홀의 경우 입구크기는 직사각홀의 경우와 같으나, 홀 입구에서 출구방향으로

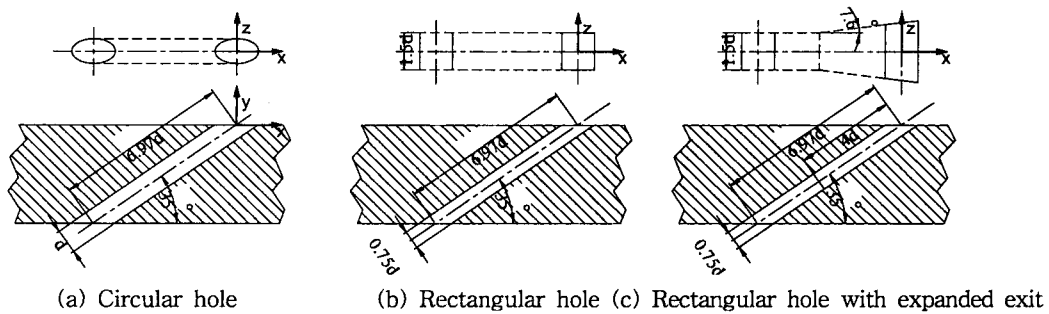


Fig. 4 Geometries of film cooling holes.

2.47  $d$  떨어진 위치에서부터 횡방향으로 확장각 7.6°로 확장되기 시작하여, 입구와 출구의 면적비가 1.8이 되도록 하였다. 분사판의 두께는 40 mm ( $t/d=4.0$ )이고, 막냉각홀 길이는 69.7 mm ( $l/d=6.97$ )이다. 2차원 슬롯의 경우, 단면은 직사각홀의 경우와 같으며, 40  $d$  만큼 횡방향으로 설치되어 있다.

2.3 열전달계수와 막냉각 효율의 산출

일반적으로 막냉각되는 열전달계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{q} = h(T_w - T_{aw}) \tag{1}$$

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

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \tag{2}$$

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

이차유동의 온도를 주유동의 온도와 동일하게 하면 열전달계수는 식(3)을 통하여 구한다.

$$h = \frac{\dot{q}_w}{(T_w - T_{aw})} = \frac{\dot{q}_w}{(T_w - T_\infty)} \tag{3}$$

막냉각 효율의 경우와 마찬가지로 벽온도 ( $T_w$ )는 TLC를 이용하여 구하였다.

불확실성 평가는 Kline and McClintock<sup>(17)</sup>이 제시한 방법을 통해 계산되었다. 95%의 신뢰도 범위에서 막냉각 효율의 불확실성은  $\eta=0.33$ 인 경우 5.6%였으며, 열전달계수의 불확실성은 5.3%로 계산되었다.

2.4 수치해석

국소적인 막냉각 효율과 열전달 측정결과와의 이해를 돕기 위하여 상용코드(FLUENT)를 통해 다양한 홀형상에 대한  $M=1.0$ 에 대해 홀 하류 유동장을 계산하였다. 계산영역은 실제실험과 같은 형상에 대해서, 홀과 홀 사이에 대칭경계조건을 주어 계산을 수행하였다. 격자는 GAMBIT solid modeling을 사용하여 만들었으며 격자수가 계산 결과에 영향을 주지 않는 약 400,000개의 격자로 구성하였다. 정상상태 난류유동장을 계산하기 위해 RNG  $k-\epsilon$  난류모델을 적용했으며, 벽면 부근에서의 유동계산을 위해 standard wall function을 적용하였다.

3. 결과 및 토의

본 논문에서는 유동 및 막냉각 성능에 대하여 홀형상이 미치는 효과에 대해 다양한 분사물에서 알아보았다. 자세한 실험조건들은 Table 1과 Table 2에 정리해 놓았다.

3.1 유동장

Fig. 5와 Fig. 6은  $M=1.0$ 에 대해  $x/d=5.0$ 와  $x/d=10.0$ 에서 수치해석을 통하여 얻은 각 형상

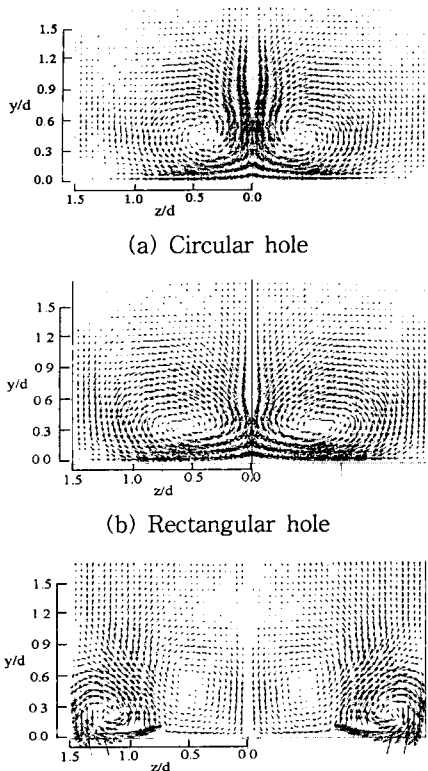
Table 1 Operating conditions

$U_\infty$	$Tu$ (%)	$\delta/d$	$\delta^*/d$	$\theta/d$	$H$	$Re_d$
15 m/s	~0.5	2.48	0.35	0.24	1.46	$2.4 \times 10^3$

Table 2 Test parameters

Hole geometry	$d$	$AR$	$L/d$	$\alpha$	$M$	$I$	$M_{exit}$	$DR$
Circular hole	10 mm	1.0	6.97	35°	0.5	0.27	0.28	0.93 ( $\eta$ ) 1.0 ( $h$ )
Rectangular hole		1.0			1.0	0.56		
Rectangular with expanded exit		1.8			2.0	0.83		

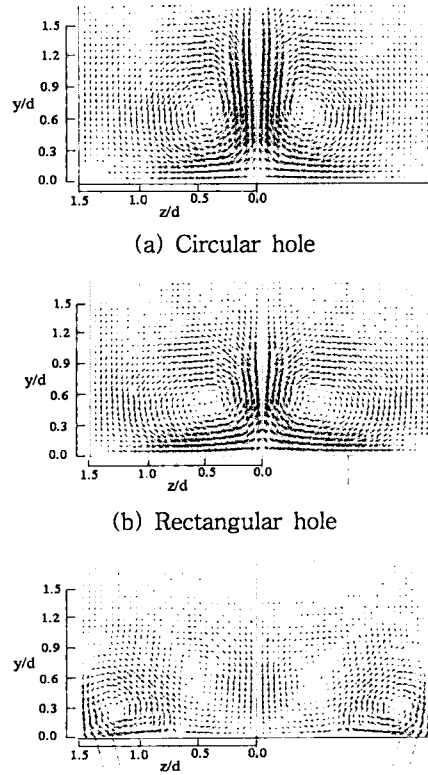
(M, I: based on film cooling effectiveness measurements)



(a) Circular hole  
(b) Rectangular hole  
(c) Rectangular hole with expanded exit  
(This vector scale is three times of scales of other results.)  
Fig. 5 Velocity vectors at the plane of  $x/d=5.0$  for  $M=1.0$ .

에 따른 2차유동의 속도벡터를 나타내고 있다. 확장된 직사각홀에서의 속도벡터는 다른 형상의 경우보다 3배 더 크게 하여 제시되었다. 원형홀의 경우, 많은 다른 연구에서 보고되었듯이 주유동과 2차유동의 상호작용에 의해 발생한 한쌍의 콩팥와류(kidney-type vortex)를 쉽게 관찰할 수 있다.<sup>(18, 20)</sup>  $x/d=5.0$  위치에서 와류의 중심은  $y/d=0.4$ ,  $z/d=\pm 0.4$ 에 위치하고 있으나 하류로 갈수록 중심이 위로 향하고 와류의 강도가 약해지기 때문에  $x/d=10.0$ 에서는 중심의 위치가  $y/d=0.7$ 로 올라간 것을 관찰할 수 있다. 따라서, 원형홀의 경우 횡방향으로 고르게 퍼지기보다는 주유동을 관통하고 주유동 표면으로 유입되기 때문에 막냉각 성능이 감소하는 것을 알 수 있다.

직사각홀의 경우 서로 반대방향으로 회전하는 와류가 원형홀의 경우와 유사하게 형성되나, 그



(a) Circular hole  
(b) Rectangular hole  
(c) Rectangular hole with expanded exit  
(This vector scale is three times of scales of other results.)  
Fig. 6 Velocity vectors at the plane of  $x/d=10.0$  for  $M=1.0$ .

중심이  $x/d=0.5$ 에서  $y/d=0.3$ ,  $x/d=10.0$ 에서는  $y/d=0.45$ 에 위치하는 것으로 보아 원형홀의 경우와는 다르게 냉각유체가 벽면에 더 잘 부착하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 직사각홀 출구가 횡방향으로 크게 뻗어 있어서 생긴 Coanda 효과로 때문인 것으로 생각된다.

확장 직사각홀에 대해서는 확장된 출구로 인하여 2차유동의 운동량이 감소하여 미약한 와류가 홀과 홀 사이( $z/d=\pm 1.5$ )에 생성된 것을 관찰할 수 있다. 2차원 슬롯과 유사한 출구형상을 가지고 있지만, 이러한 와류의 영향으로 주유동이 표면으로 유입되어 홀과 홀 사이가 상대적으로 낮은 막냉각 성능을 가질 것으로 예상된다. 홀 중앙부분( $z/d=0.0$  근방)에서는 홀과 홀 사이에 발생한 와류의 영향으로 매우 약한 한쌍의 와류가 생성되어 있으며, 이것은 앞의 원형홀이나 직사

각형홀의 경우와 많은 차이를 보이고 있다. 횡방향으로 넓게 분사된 2차유동은 다른 형상에 비해 막냉각 성능을 더 많이 향상시킬 것으로 예상되어진다.

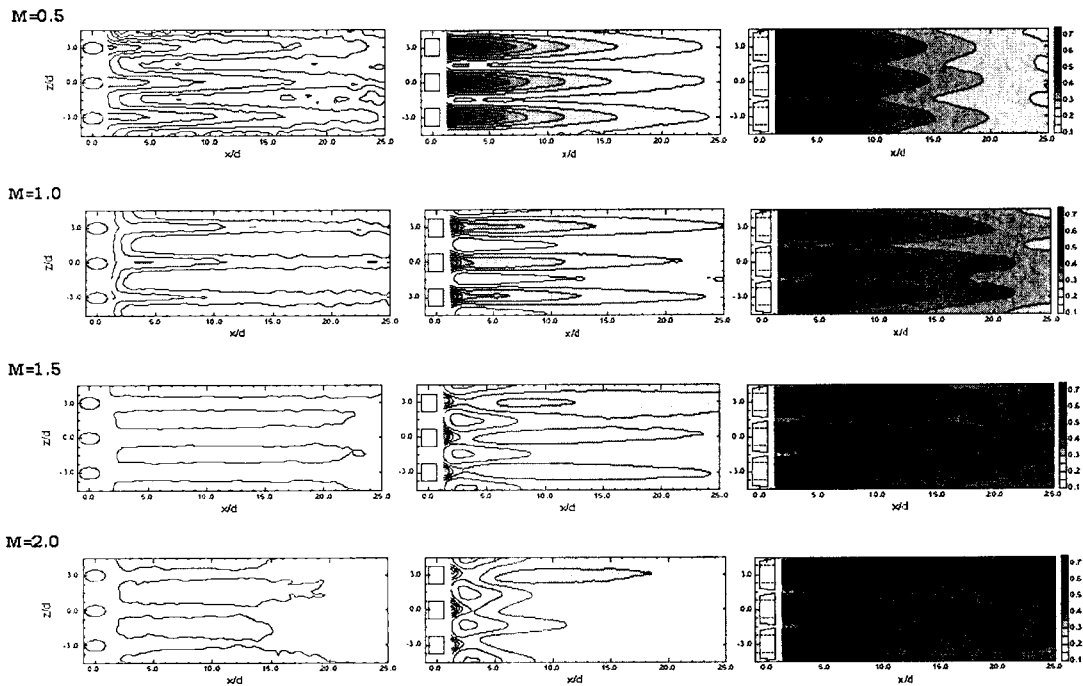
3.2 막냉각 효율

Fig. 7은 다양한 홀형상에 대하여 분사유속에 따른 등막냉각 효율선도를 나타내고 있다.

원형홀의 경우 분사유속이 증가할수록 전체효율은 감소하는데, 이는 2차유동이 표면에 고르게 퍼지기보다 주유동을 관통하기 때문이다. 더욱이 홀과 홀 사이에서는 효율이 매우 낮은 것을 알 수 있다. 홀 인접 하류근방( $x/d < 2.0$ )에서는 분사유속에 관계없이 높은 효율분포가 관찰되는데, 이것은 분사판으로부터 측정판으로 열전도가 발생하여 생긴 현상이라고 생각된다. 이러한 전도분제는 다른 홀형상과는 달리 원형홀 출구와 측정판 사이의 거리가 짧기 때문에 발생하는 현상이며, 다른 형상의 경우에서도 이보다 영향이 적긴 하지만 전도의 영향이 홀출구 근방에서 나타난다. 하지만, 이러한 전도의 영향이 홀 근방으로

제한되어 있으므로 홀 하류의 분포에 대해서는 무시할 만하다. 높은 분사율( $M=1.5$ )에서, 먼 하류( $x/d \geq 20.0$ )에서의 막냉각 효율분포는 분사유동간의 공팔와류의 상호작용으로 상당히 고른 것<sup>(3)</sup>을 알 수 있으나,  $2.0 \leq x/d \leq 20.0$  구간을 보면 홀과 홀 사이에서 막냉각 효과가 거의 없어 횡방향으로 매우 불균일한 분포를 나타내는 것을 볼 수 있다.

직사각홀의 경우, 막냉각 효율은 모든 분사율에 대해서 원형홀에 비해 더 높고 고른 것을 볼 수 있는데, 앞의 수치해석부분에서 언급한 것처럼 Coanda 효과로 인하여 분사유동이 주유동을 관통하기보다는 표면에 잘 부착하며, 횡방향으로 고르게 퍼지기 때문에 일어나는 현상으로 생각된다. 그러므로, 홀과 홀 사이에서의 막냉각 효율은 원형홀의 경우보다 높으며, 하류에서는 분사유동이 상당히 고르게 퍼져 있음을 볼 수 있다. 높은 분사율( $M \geq 1.5$ )에서는 홀 출구 근방에서 분사유동이 표면으로부터 분리되어 비교적 낮은 효율분포가 나타나지만, 하류로 내려갈수록 Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 원형홀보다 직사각홀에



(a) Circular hole (b) Rectangular hole (c) Rectangular hole with expanded exit

Fig. 7 Contour plots of film cooling effectiveness for various hole shapes.

서 나오는 2차유동은 횡방향으로 더 퍼지고 표면에 가깝기 때문에 인접 하류에서 재부착이 발생하게 되며 분사유동 간의 혼합으로 인하여 홀 근방을 제외한 전체표면에서 높고 고른 막냉각 효율분포를 볼 수 있다.

확장 직사각홀에서는 입구 대 출구 면적비가 1.8이므로 2차유동은 홀 내부에서 점차 횡방향으로 퍼지게 되고, 운동량은 감소하게 되어  $M=1.0$ 에 대해서 출구에서의 분사율은  $M_{exit}=0.56$ 이다. 따라서, 분사유동은 쉽게 표면에 퍼지며, 막냉각 효율도 매우 높아지게 된다. 그렇지만 2차원 슬롯의 경우와 유사한 출구형태를 갖지만 홀 인접 하류에서 효율분포는 균일하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수치해석결과에서 나타났듯이 홀과 홀 사이에 발생한 와류로 인하여 주유동이 표면에 유입되었기 때문이다. 분사율이 높아질수록, 유량이 많아져서 막냉각 효율이 높아졌는데, 이것은 높은 분사율에도 확장된 출구 때문에 2차유동의 운동량이 줄어들어 표면에 고르게 퍼지기 때문이다.

Fig. 8은  $M=1.0$ 에서 형상에 따른 막냉각 효율을 상용코드를 통해 구한 등막냉각 효율선도이다. 실험에 의한 결과와 정성적으로 유사함을 알 수 있다. 하지만, 이전의 연구에서 보고된 바와 같이,<sup>(21,22)</sup> 계산된 막냉각 효율값은 실험치보다 홀 근방에서는 매우 높고, 홀과 홀 사이는 매우 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 측정판에서의 전도

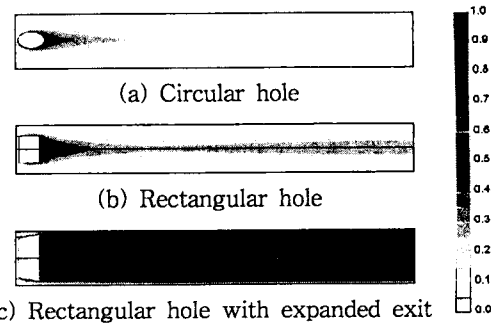


Fig. 8 Contour plots of calculated film cooling effectiveness for various hole shapes at  $M=1.0$ .

효과와 난류모델이나 와류의 상관관계 같은 유동 조건 및 벽경계조건의 차이에 기인된 것으로 보인다.

확장 직사각홀의 결과를 보면 횡방향으로 두 개의 극대점이 보이고 홀 중앙부분( $z/d=0.0$ )에서는 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이는 Figs. 5와 6에서 알 수 있듯이 홀 출구에서 발생되는 약한 와류의 영향 때문일 것으로 추측된다. 그렇지만 Fig. 7에서와 같이 실제실험에서는 이러한 와류의 영향은 보이지 않는데, 수치해석의 경계조건과 유동조건이 실제실험의 것과 차이가 있어 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 9는 다양한 분사율에 대하여 횡방향 막냉각 효율분포를 나타낸 것이다. 이번 연구에 적용

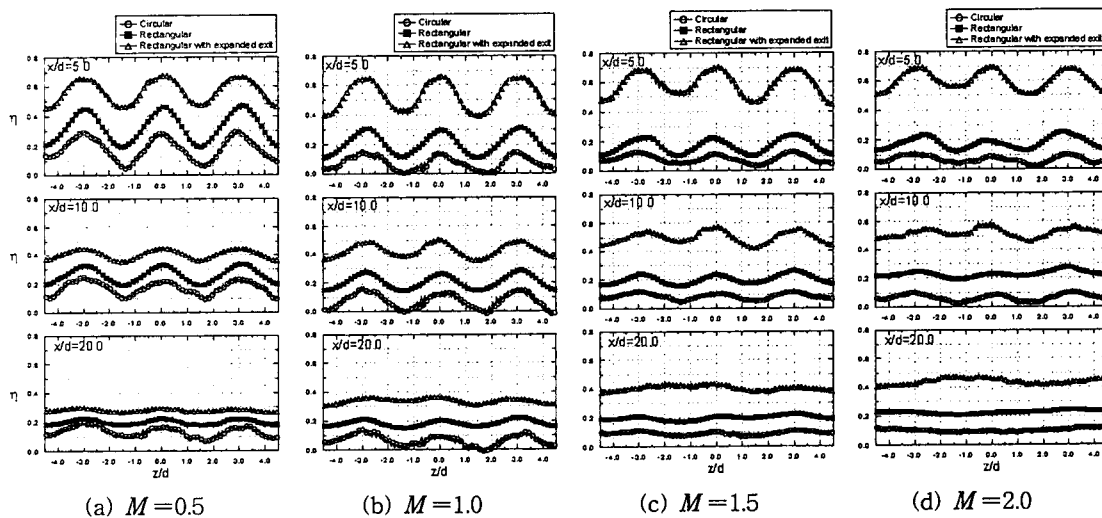


Fig. 9 Local distributions of film cooling effectiveness for various hole shapes.



된 모든 분사율에 대해서, 2차원 슬롯 출구와 유사한 확장 직사각형홀이 다른 형상의 경우보다 더 좋은 막냉각 성능을 나타내었다.

원형홀에서는 홀과 홀 사이에 효율이 분사율에 상관없이 매우 낮게 나타났다. 하지만 직사각홀의 경우는 앞에서 언급한 Coanda 효과로 인해 분사유동이 표면에 잘 부착되고 잘 퍼지기 때문에 효율이 비교적 높게 나왔다. 비교적 낮은 분사율 ( $M=0.5, 1.0$ )에서는 모든 홀형상의 경우에 횡방향으로 불균일한 효율분포를 나타냈지만, 직사각홀이나 확장 직사각홀의 경우가 원형홀보다 높은 효율분포를 보이고 있다. 높은 분사율인  $M=1.5$  나  $2.0$ 인 경우에는(Fig. 9의 (c)와 (d)) 모든 형상에 대해서 하류부분에서는 상당히 고른 효율분포를 나타내고 있으며, 직사각홀의 경우 원형홀의 경우보다 2배 더 높은 막냉각 효율분포를 보이고 있고, 확장 직사각홀의 경우는 원형홀보다 4~5 배 더 높은 값을 나타내고 있다.

Fig. 10은 막냉각 효율에 대하여 횡방향으로 평균한 값을 주유동 방향을 따라 나타낸 그림이다. 모든 경우에 있어서 원형홀이 가장 낮은 효율분

포를 보이며, 확장 직사각홀이 가장 높은 효율분포를 보이고 있다.

직사각홀의 경우, 높은 분사율( $M \geq 1.0$ )에서 전 영역에서 평균 효율값이 원형홀의 경우보다 2배 이상 높게 나타났다.  $M=0.5, M=1.0$ 인 경우에는 평균값이 유동이 하류로 감에 따라 점차 감소하고 있다. 하지만,  $M=1.5, M=2.0$ 에서는 평균값이  $x/d=3.0$ 에서 최소값을 나타내다가 분사유동이 재부착하는 지점에서 약간 증가하고 더 하류로 내려가면서 거의 일정한 값을 유지한다.

확장 직사각홀의 경우,  $M=0.5$ 에서는 슬롯의 경우와 거의 유사하다. 그러나 분사율이 높아질수록 홀 출구에서 와류의 강도가 증가하여 점차 차이가 커지게 된다. 평균 분사율은 분사율에 상관없이  $x/d$ 가 커짐에 따라 점차 감소하며, 분사율이 증가함에 따라 그 값이 전반적으로 상승한다.

Fig. 11은  $x/d=5.0, 10.0, 20.0$ 에서의 횡방향 막냉각 효율 평균값을 분사율에 따라 나타낸 그림이다. 2차원 슬롯과 확장 직사각홀의 경우 분사

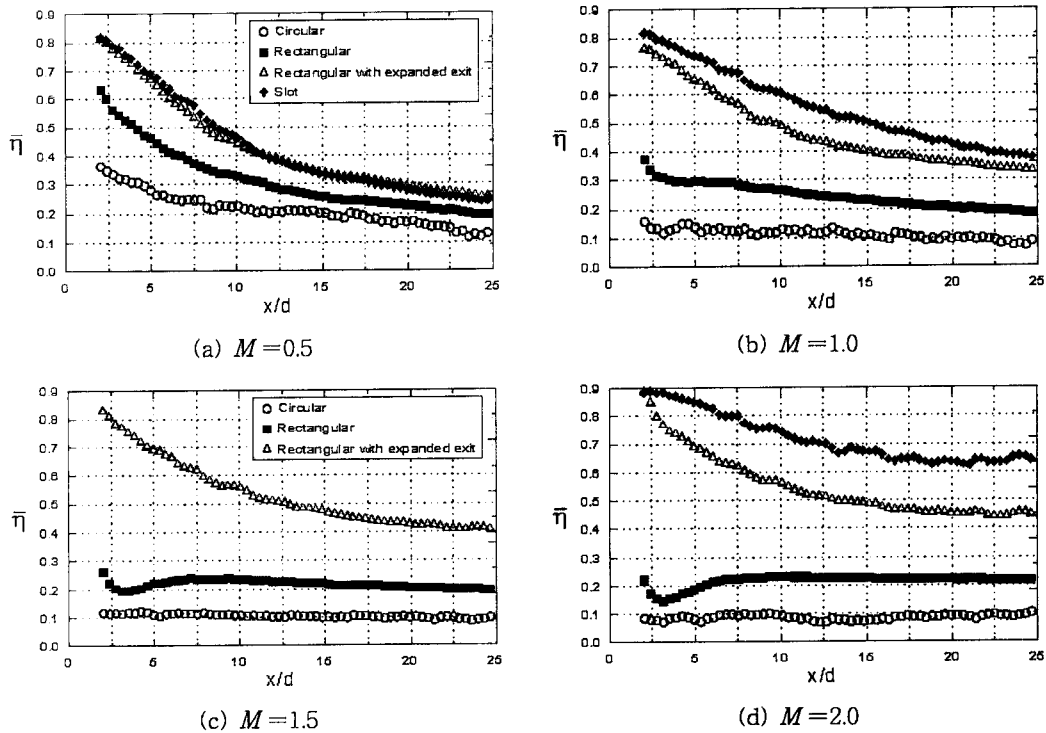


Fig. 10 Spanwise averaged film cooling effectiveness for various hole shapes and blowing rates.

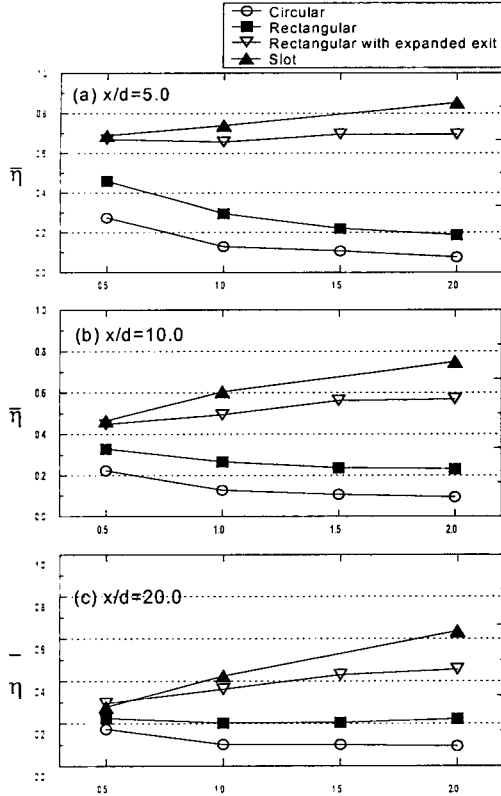


Fig. 11 Spanwise averaged film cooling effectiveness for various blowing rates at the selected locations.

율이 증가할수록 막냉각 효율이 증가하였으나, 원형홀이나 직사각홀의 경우 분사유량이 증가함에도 불구하고 평균 효율이 감소하는 추세를 보이고 있다.

확장 직사각홀의 경우에 가장 좋은 막냉각 성능을 보이고 있으며, 직사각홀은 실험에서 수행한 모든 분사율에 대해 원형홀보다 정량적으로 1.5~2배 높은 값을 나타내고 있다. 또한, 확장 직사각홀은 낮은 분사율에서 슬롯의 경우와 유사한 막냉각 효율을 보이고 있으나 분사율이 상승할수록 홀 출구에서 발생하는 와류가 강해짐에 따라 주유동과 이차유동의 혼합이 활발하게 되어, 점차 슬롯의 경우보다 낮아지는 경향을 나타냈다.

3.3 열전달계수

Fig. 12는 두 개의 다른 분사율( $M=0.5, 2.0$ )에 대해서 국소적인 열전달계수 분포를 나타낸 그래프이다. 분포는 홀 근방( $x/d=5.0$ )에서 분사유동의 영향으로 홀의 하류에서 열전달계수가 약간 큰 것으로 나타났지만 하류로 진행하면서 상당히 고르게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 막냉각홀 하류에서의 열전달계수는 홀로부터 어느 정도 거리가 떨어지면 홀형상에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

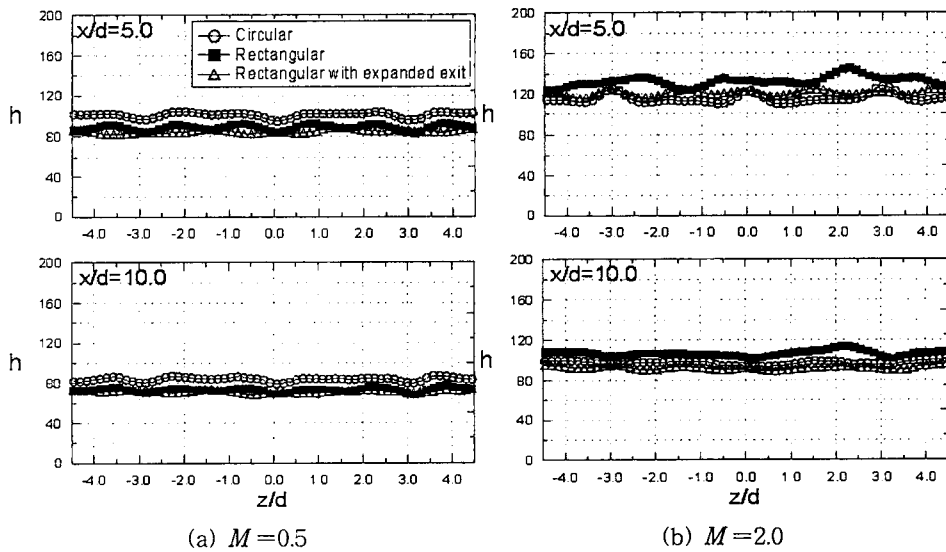


Fig. 12 Local distributions of heat transfer coefficient for various hole shapes.

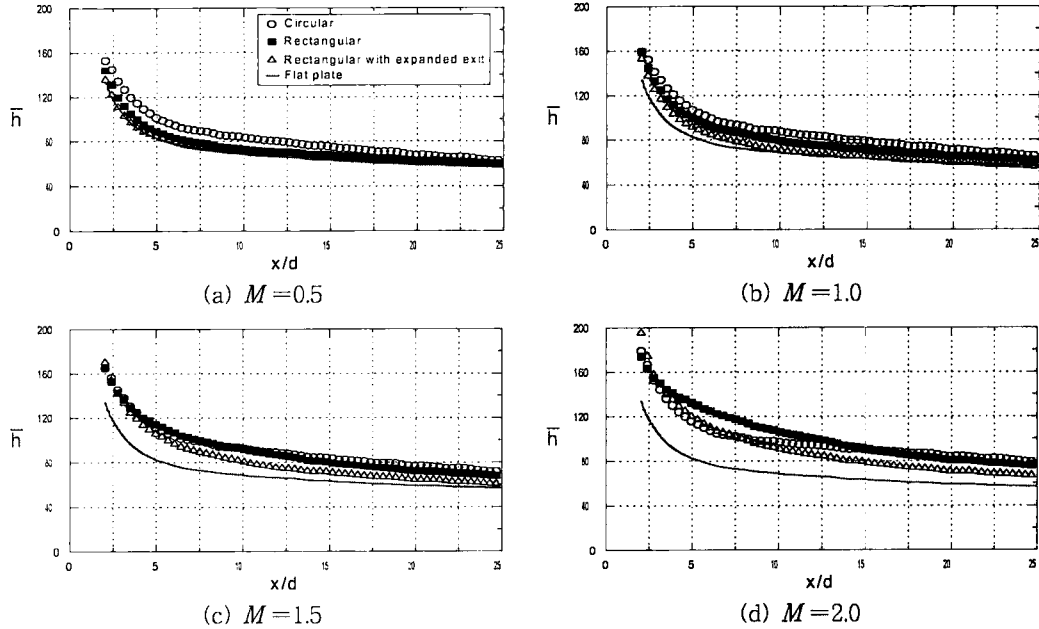


Fig. 13 Spanwise averaged heat transfer coefficients for various hole shapes and blowing rates.

Fig. 13은 열전달계수에 대하여 횡방향으로 평균된 값을 주유동방향을 따라 나타낸 그래프이다. 낮은 분사율인  $M=0.5$ 에서 직사각홀과 확장 직사각홀의 경우 2차유동이 비교적 주유동에 영향을 적게 주어 평판의 경우와 유사한 분포를 나타내고 있다. 그러나 원형홀의 경우는 전 영역에 대하여 10% 정도 높은 열전달계수 분포를 보이고 있다.  $M=1.0$ 에서는 모든 형상에 대해서 열전달계수 분포가 평판의 경우보다 높으나, 분포양상은  $M=0.5$ 인 경우와 유사하다. 원형홀의 경우 열전달계수 분포가 가장 높게 나타났으며, 확장 직사각홀의 경우 가장 낮은 분포를 나타내었다.

높은 분사율인  $M=2.0$ 에서는 낮은 분사율에서의 분포와 다른 양상을 보인다. 직사각홀의 경우 홀 근방( $4.0 \leq x/d \leq 12.0$ )에서 원형홀보다 높은 열전달계수 분포는 보이는데 Figs. 5와 6에서 볼 수 있듯이, 직사각홀 출구에서 서로 반대방향으로 회전하는 와류의 중심은 원형홀의 경우보다 표면에 더 가깝게 생성되므로, 직사각홀에서 높은 분사율인 경우 표면은 더 많은 와류의 영향을 받게 되고, 국소적으로 높은 열전달계수를 나타내게 된다.

하류에서는( $x/d > 15.0$ ), 콩밭 와류와 주유동의 혼합으로 인하여 원형홀, 직사각홀 두 경우 모두

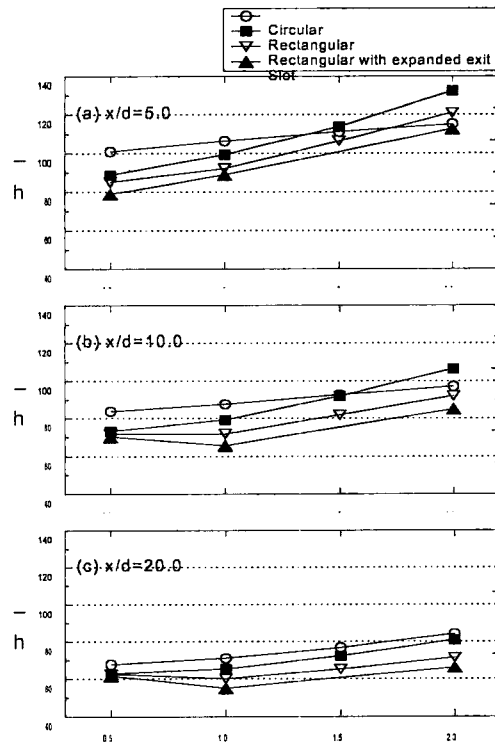


Fig. 14 Spanwise averaged heat transfer coefficients for various blowing rates at the selected locations.

유사한 경향을 나타낸다. 확장 직사각홀의 경우 높은 분사율에서 높은 열전달계수 분포를 보이거나, 다른 경우와는 다르게  $x/d$ 가 증가할수록 빠른 감소세를 보인다.

Fig. 14는  $x/d=5.0, 10.0, 20.0$ 에서의 횡방향 열전달계수 평균값을 분사율 따라 정리한 그래프이다. 모든 경우에 있어 분사율이 증가할수록 열전달계수는 증가하였다. 앞에서 언급한 것처럼 직사각홀의 경우가 다른 홀의 경우보다 열전달계수 증가율이 더 컸다.  $M=2.0$ 에서 직사각형 홀의 경우에는 원형홀의 경우보다  $x/d=5.0$ 에서 약 8% 이상 높게 나왔다. 하류부분( $x/d=20.0$ )에서는 홀형상에 의한 평균 열전달계수의 차이는 크지 않았으며, 분사율이 커질수록 평균값이 조금씩 상승하였다. 그러므로, 막냉각 하류에서는 형상에 관계없이 평판에서의 열전달계수를 그대로 적용하는 것이 가능하다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직사각홀과 확장 직사각홀에서의 국소적인 막냉각 효율과 열전달계수를 구하고 원형홀과 2차원 슬롯의 결과와 비교하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 원형홀에서 막냉각 성능은 표면에 고르게 퍼지기보다는 주유동을 관통하는 경향이 더 크기 때문에 효율이 매우 낮고 횡방향으로 불규칙한 분포를 보이고 있다. 그렇지만, 직사각홀의 경우 Coanda 효과로 인해 분사유동이 표면이 비교적 고르게 퍼져 원형홀의 경우보다 모든 분사율에 대해서 효율이 높았다.

확장 직사각의 경우에는 2차유동은 홀 내부에서 유동이 확산되어 그만큼 운동량이 감소하기 때문에 분사유동이 표면에 고르게 퍼질 수가 있어 높은 분사율에서도 2차원 슬롯과 유사한 냉각 성능을 나타내었다. 하지만 효율분포가 횡방향으로 고르지 않은 것으로 나타났는데, 이는 홀 출구 양끝에 발생하는 와류의 영향으로 주유동이 표면으로 유입되기 때문에 나타난 현상이다.

(2) 홀 근방( $4.0 \leq x/d \leq 12.0$ )에서 열전달계수는 홀형상과 분사율에 영향을 받았다. 낮은 분사율( $M \leq 1.0$ )에서 원형홀의 열전달계수는 다른 형상에 비해 10% 정도 높은 분포를 나타냈고 직사각

홀과 확장 직사각홀의 경우는 분사유동이 주유동에 영향을 비교적 적게 주어 유사한 값을 나타내었다. 그렇지만, 높은 분사율( $M \geq 1.5$ )에서는 직사각홀의 경우 홀 부근 벽 근처에서 쿨팔와류에 의한 교란으로 원형홀의 경우보다 높은 열전달계수를 나타내었다. 하류 부근( $x/d > 12.0$ )에서는 홀형상 차이에 의한 열전달계수의 차이는 거의 없었으며, 분사율 증가에 따라서는 열전달계수도 증가하는 경향을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Honami, S., Shizawa, T. and Uchiyama, A., 1994, Behavior of The Laterally Injected Jet in Film Cooling: Measurements of Surface Temperature and Velocity/Temperature Field within The Jet, J. of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 106-112.
- Jung, I.S. and Lee, J.S., 2000, Effects of Orientation Angles on Film Cooling Over a Flat Plate: Boundary Layer Temperature Distributions and Adiabatic Film Cooling Effectiveness, J. of Turbomachinery, Vol. 122, pp. 153-160.
- Goldstein, R. J. and Jin, P., 2001, Film Cooling Downstream of a Row of Discrete Holes with Compound Angle, J. of Turbomachinery, Vol. 123, pp. 222-230.
- Kim, B. G., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 1997, Heat (Mass) Transfer for Flows around a Film Cooling Jet and a Circular Cylinder with Compound Angle Orientations, Transport Phenomena in Thermal Science and Process Engineering, Vol. 1, pp. 203-208.
- Goldstein, R. J., Eckert, E. R. G. and Burggraf, F., 1974, Effect of Hole Geometry and Density on Three-Dimensional Film Cooling, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 17, pp. 595-607.