

엇갈린 배열의 사각홀이 막냉각에 미치는 영향

김영봉*·이동호*·이윤석**·조형희†
(2003년 7월 28일 접수, 2004년 1월 29일 심사완료)

The Effects of Staggered Rows of Rectangular Shaped Holes on Film Cooling

Young Bong Kim, Dong Ho Rhee, Youn Seok Lee and Hyung Hee Cho

Key Words: Film Cooling(막냉각), Rectangular-Shaped Hole(사각홀), Staggered Array(엇갈린 배열), Heat Transfer(열전달), TLC Technique(감온성 열 액정법)

Abstract

An experimental study has been conducted to measure the temperature fields and the local film cooling effectiveness for two and three staggered rows of the rectangular shaped-holes with various blowing rates. The hydraulic diameter of rectangular-shaped hole is 10 mm. To compare with the film cooling performance of rectangular-shaped hole, two kinds of circular holes are tested. One has the same hydraulic diameter as the rectangular hole and the other has the same cross sectional area. Also, rectangular holes with expanded exit with same inlet area as rectangular ones are tested. Temperature fields are measured using a thermocouple rake attached on three-axis traversing system. Adiabatic film cooling effectiveness on the surface are obtained based on experimental results of thermochromic liquid crystals. The film cooling effectiveness is measured for various blowing rates and compared with the results for the cylindrical holes. In case of 2 rows, the rectangular holes has better performance than circular holes due to its slot-like geometry. In case of 3 rows, the effects of hole shape is not clear.

기호설명

AR : 막냉각홀의 입구에 대한 출구의 면적비
 d : 막냉각홀 입구 (수력)직경(mm)
 DR : 이차유동과 주유동의 밀도비(ρ_2/ρ_∞)
 H : 형상계수
 I : 주유동과 이차유동의 운동량의 비
 l : 막냉각홀 길이(mm)
 M : 분사율 ($= \frac{\rho_2 U_2}{\rho_\infty U_\infty}$)

M_{exit} : 확장 직사각홀 출구에서의 분사율
 p : 홀과 홀 중심 사이의 거리(mm)
 r : 열과 열 사이의 거리(mm)
 Re_d : Reynold수
 t : 분사판의 두께(mm)
 T : 온도(°C)
 Tu : 주유동의 난류강도(%)
 U : 평균속도(m/s)
 x, y, z : 주유동방향, 수직방향, 폭방향 좌표

그리스문자

α : 주유동에 대한 분사각(°)
 δ : 경계층 두께 ($0.99U_\infty$ 기준, mm)
 δ^* : 배제 두께(mm)
 θ : 운동량 두께(mm)
 Θ : 무차원 온도

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, LG전자 DA 연구소

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2120-2828 FAX : (02)312-2159

η : 단열막냉각 효율 ($= \frac{T_{aw} - T_{\infty}}{T_2 - T_{\infty}}$)

$\bar{\eta}$: 횡방향 평균 단열막냉각 효율

하첨자

∞ : 주유동

2 : 2차유동

w : 벽

aw : 단열벽

rake : 열전대 갈퀴

1. 서론

가스터빈 엔진은 높은 효율을 가지기 때문에 발전 산업, 항공기 엔진 등에 다양하게 사용되고 있다. 이러한 가스터빈의 성능 향상을 위하여 터빈 입구 온도를 올리기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 연소기에서 연소되어 터빈부로 들어가는 연소가스의 온도는 매우 고온(약 1400~1500°C)으로 터빈 블레이드 재질이 견딜 수 있는 열한계점을 훨씬 상회하게 된다. 따라서 블레이드의 재질을 보호하기 위한 냉각이 필수적이며, 이러한 방법으로 내부 대류냉각, 충돌제트냉각, 막냉각 기법이 복합적으로 사용되고 있다.

일반적으로 터빈 블레이드나 연소실에 막냉각 기법을 적용할 경우 1열 또는 2열 이상의 원형막냉각홀을 사용한다. 이러한 홀 형상 및 배열은 높은 분사율에서 냉각 유체가 주유동을 뚫고 들어가 고온의 표면을 제대로 보호하지 못 할 뿐만 아니라, 횡방향으로 불균일한 냉각성능을 갖게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 주유동의 방향과 일정 각도를 이루어 냉각유체를 분사시키는 복합각도 분사 방법 및 홀 형상을 변화시키거나 홀의 출구면적을 확장시키는 방법에 관한 연구가 지금까지 많이 수행되었다. 복합각도 분사의 경우 일반 원형홀에 비해 횡방향으로 더욱 고른 냉각성능을 얻게 되지만 높은 분사율의 경우에는 균일성이 감소하게 되며, 또한 큰 와류가 발생하게 되어 압력손실이 발생하게 된다. 홀의 형상을 변형하거나 확장하는 방법은 분사되는 이차유동의 운동량을 감소시키고, 횡방향으로 유동을 퍼지게 하여 일반 원형홀보다 좋은 막냉각 성능을

가지게 된다. 이러한 방법은 가공상의 어려움 때문에 널리 사용되지는 않았지만 최근 가공기술의 발달로 인하여 일렬 이상의 확장된 출구를 갖는 원형홀이나 사각홀이 사용되고 있으며 확장된 출구 형상을 갖는 원형홀에 대한 연구가 많이 이루어져 왔으며, 최근에 들어서 원형이 아닌 형상의 막냉각홀에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁻⁵⁾

Muldoon과 Acharya,⁽⁶⁾ Licu 등⁽⁷⁾은 각각 수치적인 방법과 실험적인 방법으로 사각홀에 대해서 유동 특성과 막냉각 성능에 대한 연구를 수행하였다. Watanabe 등⁽⁸⁾과 Takahashi 등⁽⁹⁾은 정사각, 직사각홀을 포함한 다양한 홀형상에 대하여 온도장 및 막냉각 성능을 측정하였다. 그 결과 직사각홀과 타원형홀이 일반 원형홀보다 막냉각 성능이 더 높은 것으로 나타났다. Sargison 등^(10,11)은 Console(**Conversing-Slot-Hole**) 형태의 홀에 대하여 냉각 성능 및 이차 유동의 분포에 관한 실험 결과를 원형홀, 쉘 형상, 그리고 슬롯의 경우와 비교하여 제시하였다. 또한 Rhee 등⁽¹²⁾은 1열의 사각홀 및 확장 사각홀에 대한 막냉각 효율 및 열전달계수 실험을 수행하였다. 사각홀의 경우 분사유체가 원형홀보다 표면에 가깝고 넓게 퍼지는 경향을 나타내어 더 좋은 막냉각 성능을 나타내며 확장 사각홀의 경우 사각형상의 영향과 함께 확장된 부분에서 분사유체의 운동량 감소로 인하여 슬롯과 유사한 성능을 나타냄을 보였다.

실제 가스터빈에서는 1열의 홀 배열의 한계를 극복하기 위하여 2열 이상의 홀 배열을 사용한다. Kruse⁽¹³⁾는 1열의 홀 배열보다 2열의 홀 배열에서의 막냉각 성능이 더 높은 것을 실험을 통하여 보여주었으며, Le Brocq 등⁽¹⁴⁾은 엇갈린 배열(staggered array)이 정렬배열(inline array)보다 횡방향 막냉각 성능 및 균일도가 더 높은 것을 보여주었다. Ligrani 등⁽¹⁵⁾은 2열의 단순 원형홀 배열(simple angle array) 및 복합 분사각을 가진 원형홀 배열에 대하여 비교 연구를 수행하여 비교적 높은 분사율($M=1.0\sim 2.0$)에서 단순 원형홀 배열보다 막냉각 성능이 향상됨을 보여주었으며, Maitech과 Jubran 등⁽¹⁶⁾은 단순 원형홀로 이루어진 열과 복합 분사각을 가진 원형홀로 이루어진 열의 조합을 이용하여 주유동 압력 분포 및 난류강도 변화에 따른 막냉각 특성에 관한 연구를 수행하였다. 그러나, 슬롯과 유사한 형태를 가진 사각

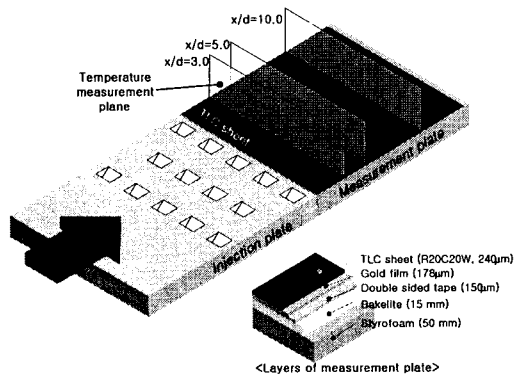


Fig. 1 Schematic view of measurement plate of TLCs

홀에 대한 특성 연구는 매우 드문 상태이며 아울러 이들의 2열 이상의 배열에 대한 정보는 전무한 상황이다.

본 연구는 사각 및 확장 사각홀로 이루어진 2열 및 3열에서의 막냉각 성능에 대하여 수치적인 방법 및 실험적인 방법으로 고찰하였으며 두 종류의 원형홀을 엇갈리게 배열하여 얻은 결과와 비교하였다. 상용 코드인 FLUENT 6.0을 이용하여 유동장에 관하여 계산하였으며 열전대 갈퀴(thermocouple rake)를 3차원 이송장치에 부착하여 온도장을 측정하였고, 감온성 액정법을 사용하여 막냉각 효율을 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치에 대한 자세한 사항은 Rhee 등⁽¹²⁾에 제시되어 있다. Fig. 1은 측정판의 개략도를 보이고 있다. 측정판은 TLC (thermochromic liquid crystals, 감온성 액정), 금도금 히터(Auare-12, Courtaulds, 178 μm), 양면접착 테이프, 5 mm 세라믹 섬유층을 포함한 베이클라이트(15 mm), 스티로폼(50 mm)으로 된 5개의 층으로 구성되어 있으며, 측정판에 수직인 위쪽 방향으로 ccd 카메라와 조명을 설치하여 측정판을 촬영할 수 있도록 하였다. 20~40°C의 대역폭을 가지는 TLC(R20C20W, Hallcrest Ltd.)를 분사홀 중심으로부터 주유동 방향으로 $x/d=1.1\sim 31.1$, 횡방향으로 $y/d=-15.0\sim 15.0$ 영역에 설치하였으며 제시된 결과는 $x/d=2.0\sim 25.0$, $y/d=-4.5\sim 4.5$ 의 데이터

를 처리한 것이다.

열전대 갈퀴는 7개의 J-type 열전대로 구성되어 있으며 각 열전대 사이의 간격이 5 mm가 되도록 하였다. 이 열전대 갈퀴는 삼차원 이송장치에 부착하여 Fig. 1에 나타난 것과 같이 주유동 방향으로 $x/d=3, 5, 10$ 지점에서의 온도장을 측정하는데 사용하였다. 온도장은 $y/d=-6.0\sim 6.0$, $z/d=0.15\sim 2.35$ 영역에서 열전대 갈퀴를 y 방향으로 1 mm, z 방향으로 2 mm씩 이송하며 측정하였다.

실험을 수행하는 동안 주유동의 속도와 난류강도는 각각 10 m/s, 0.5 %로 유지하였다. 주유동 속도의 99 %를 기준으로 한 경계층 두께는 이차유동이 없는 경우 막냉각홀의 중심으로부터 하류 방향으로 5 mm 떨어진 지점에서 14.2 mm ($\delta/d=1.42$)이었으며 배제 두께와 운동량 두께는 각각 1.84 mm($\delta^*/d=0.184$)와 1.46 mm($\theta/d=0.146$)이었다(Table 1). 이차유동의 온도는 열교환기와 항온조, 관히터를 이용하여 주유동의 온도(상온)보다 20°C 높게 유지시켰으며 이때의 밀도비는 0.93이었다. 분사율은 밀도비가 0.93인 상태에서 오리피스 유량계와 송풍기를 이용하여 유량을 조절해 주어 각각 0.5, 1.0, 1.5, 2.0으로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다(Table 2).

2.2 막냉각홀 형상 및 배열

본 연구에서는 사각 형상 및 출구가 확장된 사각 형상의 막냉각홀로 이루어진 2열 및 3열의 엇갈린 배열이 막냉각에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하는 동시에 그 성능을 비교하기 위하여 사각홀과 같은 수력직경($d=10$ mm)을 가진 원형홀 1, 사각홀과 같은 단면적을 가진 원형홀 2($d=12$ mm)로 구성된 배열에 대해서도 실험을 수행하였다(Fig. 2).

사각홀의 단면적은 15 mm \times 7.5 mm이며 확장 사각홀의 경우 입구 쪽 단면적은 사각홀과 같으나 홀 입구로부터 출구 방향으로 2.97 d 떨어진 위치에서부터 횡방향으로 7.6°로 확장되어 입구와 출구의 면적비가 1.8이 되도록 하였다. 주유동에 대한 분사각은 모두 35°이며 분사판의 두께는 40 mm로 원형홀 2를 제외한 나머지 홀에 대하여 막냉각홀의 길이는 69.7 mm($l/d=6.97$)이다.

열 수가 막냉각에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여 2열과 3열의 홀 배열에 대한 연구를 수행하였다. 이때 홀 사이 간격은 30 mm, 열과

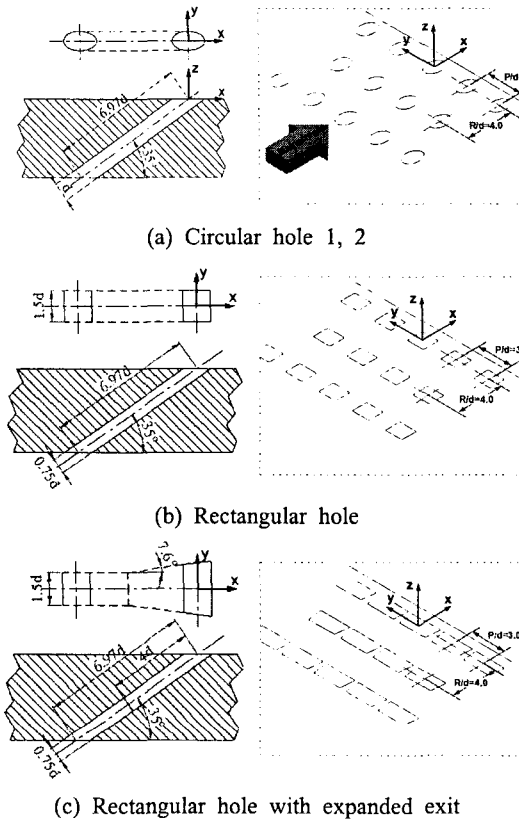


Fig. 2 Schematic diagrams of film cooling holes and arrays

열 사이의 간격은 40 mm이다. 상류열과 하류열의 홀은 서로 15 mm씩 엇갈리게 배치하였다.

2.3 무차원 온도 및 막냉각 효율

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

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

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

Table 1 Operating conditions

U_{∞}	$Tu(\%)$	δ/d	δ^*/d	θ/d	H
10m/s	~0.5	1.42	0.184	0.146	1.26

Table 2 Test parameters

Hole Geometry	d (mm)	AR	l/d	p/d	r/d	M	I	M_{exit}	DR
Circular Hole 1	10	1.0	6.97	3	4.0	0.5	0.27	0.28	0.93
Circular Hole 2	12	1.0	5.81	2.5	3.3				
Rectangular Hole	10	1.0	6.97	3	4.0	1.5	2.42	0.83	(n)
Rectangular with expanded exit	10	1.8	6.97	3	4.0	2.0	4.30	1.11	

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

구하였다.

불확실성 평가는 Kline 과 McClintock⁽¹⁷⁾이 제시한 방법을 통해 계산되었다. 95 %의 신뢰도 범위에서 온도장의 불확실성은 $\Theta=0.25$ 에서 4.6 %이며, 막냉각 효율의 불확실성은 $\eta=0.3$ 인 경우 6.7 % 이다.

2.4 수치해석

막냉각홀 하류에서의 유동장에 대한 정보를 얻기 위해 상용코드인 FLUENT 6.0을 이용하여 계산을 수행하였다. $M=1.0$ 인 경우에 대하여 원형홀 1과 사각홀 1열 및 2열의 하류에서의 유동장에 대한 결과를 얻었다. 실험장치와 동일한 형상 조건에 대하여 GAMBIT으로 약 40만개의 격자를 생성하였다. 정상상태의 난류 유동에 관하여 RNG k- ϵ 모델을 사용하였으며 벽 근처에서는 벽 법칙(standard wall function)을 사용하였다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 2열 이상의 엇갈린 배열에서의 막냉각 성능에 대하여 홀 형상이 미치는 효과에 대해 고찰하였다. 자세한 실험조건들은 Table 1 과 2에 정리되어 있다.

3.1 유동장

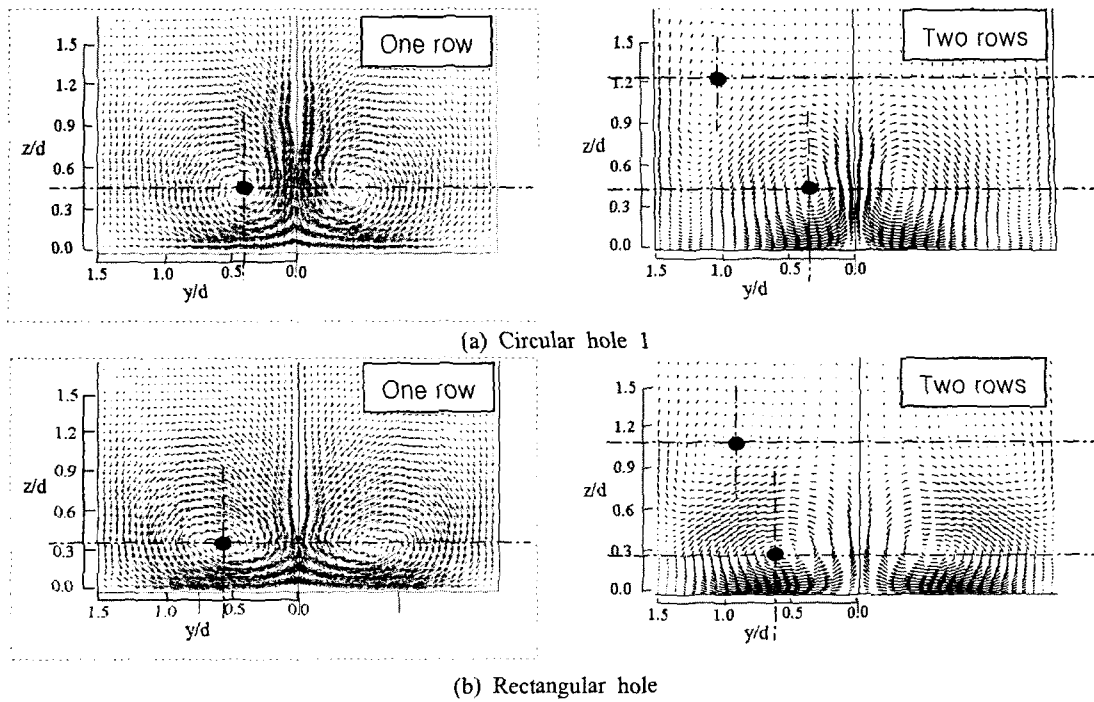


Fig. 3 Calculated secondary flow patterns at $x/d=5.0$ plane of single row and two rows for $M=1.0$

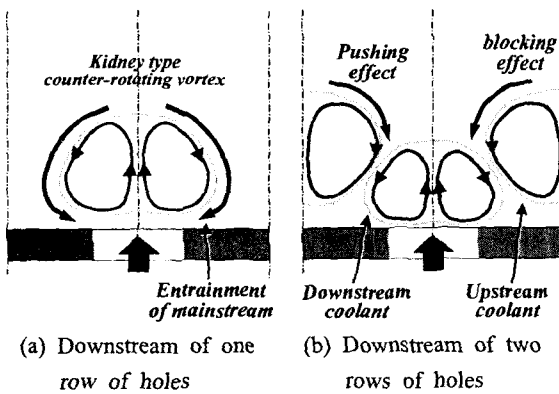


Fig. 4 Schematic diagrams of expected secondary flow patterns downstream of row(s) of holes

Fig. 3은 수치해석 상용코드인 FLUENT를 이용하여 계산한 결과로서 홀 하류 $x/d=5.0$ 지점에서 $M=1.0$ 일 때의 속도 벡터들을 보여주고 있다. 다른 많은 연구에서 밝혀진 바와 같이 주유동과 냉각유체 사이의 상호작용으로 인하여 발생하는 한 쌍의 콩팥와류가 관찰되었다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 사각홀의 콩팥와류 중심이 원형홀의 경우에 비해 바닥 쪽에 더 가깝게 위치하는 것을 관찰할 수 있는데 이는 코안다 효과(Coanda effect)에 의한 것이다.

2열의 경우 상류홀에서 분사된 냉각유체에 의해 생긴 와류가 하류 쪽 홀에서 발생한 와류 윗 부분에 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 와류의 영향으로 하류 쪽 홀에서 분사된 이차 유동에 의한 와류가 1열의 경우에 비해 좀 더 바닥 쪽에 가깝게 위치하게 되며, 1열의 경우보다 고온 막냉각 성능을 기대할 수 있다.

Fig. 4는 1열 및 2열의 막냉각홀 하류에서의 이차유동을 개략적으로 나타낸 그림이다. 1열의 경우 콩팥와류가 홀과 홀 사이의 부분으로 주유동을 유입시켜 균일한 냉각 성능을 가지지 못하는데 비해(Fig. 4(a)) 2열의 경우 상류열에서 분사된 유체가 하류로 이동하면서 하류에서 분사된 유체를 바닥으로 눌러주어 냉각 유체가 벽 근처에 잘 깔리는 효과(누름 효과)가 나타나며, 또한 하류열의 홀과 홀 사이에 상류 분사유체가 존재하게 되어 주유동의 직접적인 침투를 막는 효과(방어 효과)가 나타난다(Fig. 4(b)). 따라서 다열 배열의 경우 1열의 배열 보다 막냉각 성능이 더욱 좋아질 것을 예상할 수 있다.

3.2 온도장

Fig. 5, 6은 $M=1.0$ 에서 각각 2열과 3열의 다양

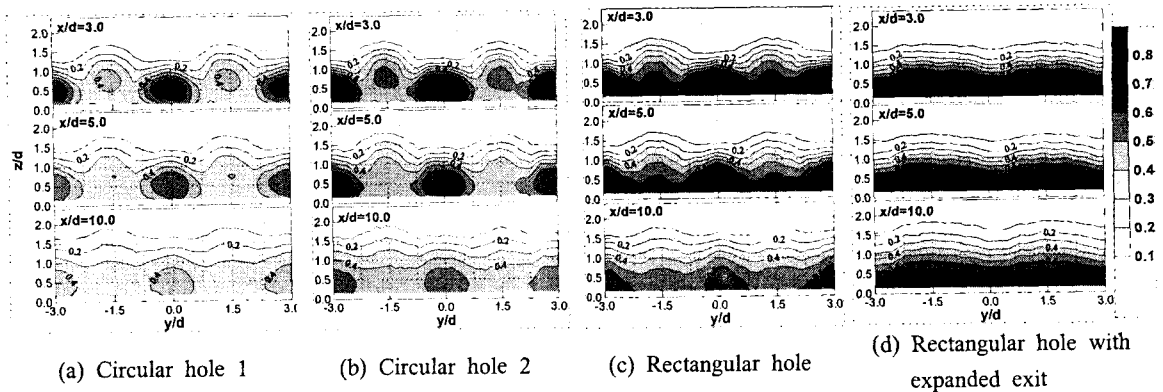


Fig. 5 Contour plots of dimensionless temperature field downstream of two rows for $M=1.0$

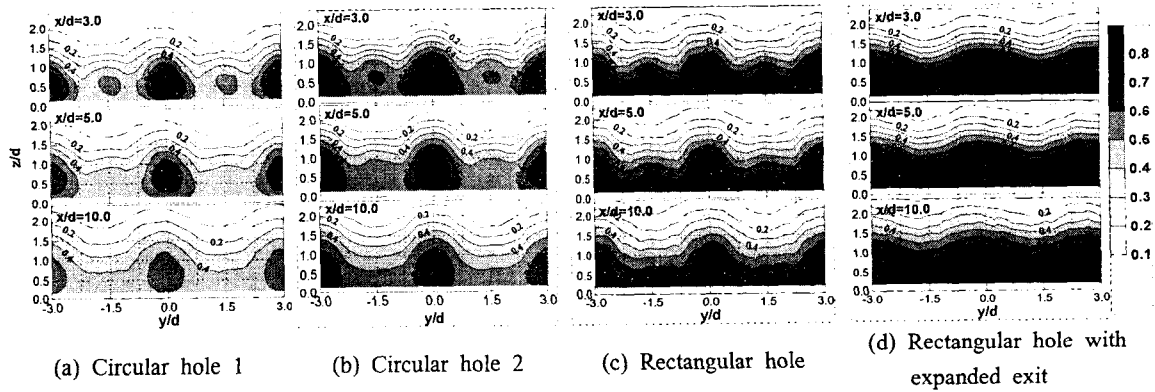


Fig. 6 Contour plots of dimensionless temperature field downstream of three rows for $M=1.0$

한 홀 형상에 대하여 실험을 통해 얻은 홀 하류에서의 온도장 분포를 나타낸 것이다. 상류홀에서 분사된 이차유동이 홀 사이에 위치하게 되어 1열에서 발생하는 홀과 홀 사이로의 주유동의 유입을 막아주는 효과가 나타나는 것을 볼 수 있다. 홀 형상에 따른 이차유동의 분포의 특징을 살펴보면 원형홀 2의 경우가 원형홀 1보다 조금 더 높은 값을 갖는 것을 확인할 수 있는데 이는 원형홀 2의 직경이 원형홀 1보다 더 커서 같은 분사율에 대하여 냉각유체의 유량이 44% 증가했기 때문이다. 사각홀의 경우 원형홀에 비하여 상류홀과 하류홀에서 분사된 이차유동의 중심이 좀 더 바닥 쪽에 위치하고 있음을 확인할 수 있으며, 바닥 근처에서의 무차원 온도값이 더 크고 높게 나타나는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 코안다 효과에 의한 것이다. 확장 사각홀의 경우 무차원 온도값이 슬롯 형태의 경우와 유사하게 거의 2차원적으로 표면에 가깝고 고르게 분포하고 있다. 이는 출구에서의 운동량 감소로 인한

것으로 생각할 수 있다.

열 수의 영향을 살펴보면, 3열의 경우에 2열의 경우보다 온도장분포가 더욱 고르고 바닥으로부터 높은 위치까지 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 원형홀의 경우 두 번째 열에서 분사된 이차유동의 중심이 마지막 열의 홀에서 분사된 유동의 중심과 비슷한 정도까지 바닥으로 이동했음을 알 수 있는데, 이는 첫 번째 열의 홀에서 분사된 냉각유체에 의한 누름 효과에 의한 것이다. 이로 인하여 홀과 홀 사이의 영역에서 더 높은 무차원 온도값이 나타나는 것을 확인할 수 있으며 마지막 열의 홀에서 분사된 유체를 더욱 강하게 눌러주게 되어 바닥 면 근처에서 더욱 높은 무차원 온도값이 나타났다. 전체적으로 2열의 경우보다 바닥으로부터 더 높은 위치까지 냉각유체가 분포하게 되는 것은 첫 번째 열의 홀 위치가 마지막 홀의 위치와 겹치고 같은 분사율에 대하여 3열의 경우가 2열의 경우 보다 절대 유량이 더 많기 때문이다.

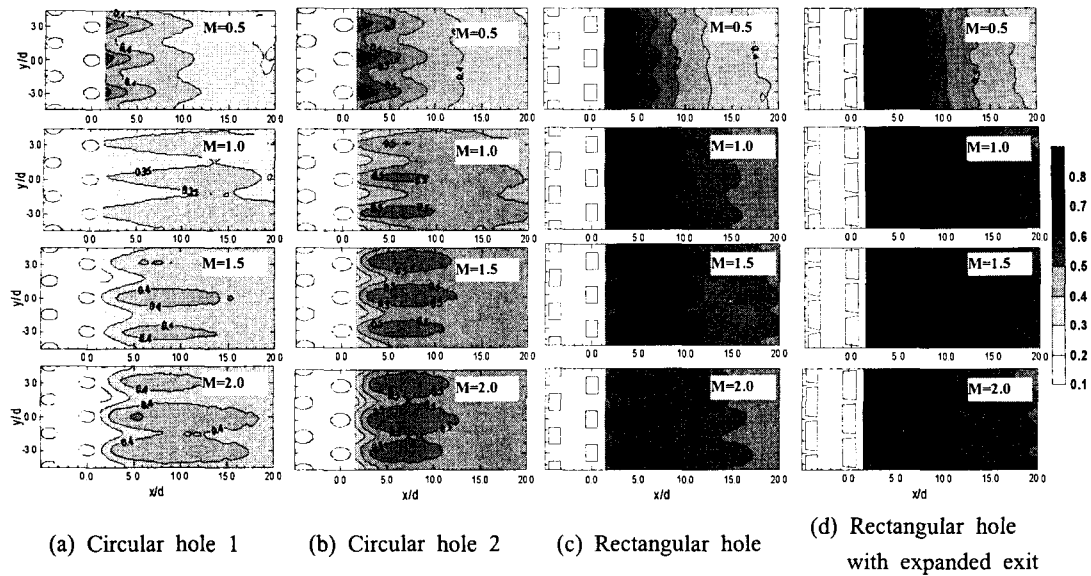


Fig. 7 Contour plots of film cooling effectiveness of two rows of holes for various shapes and blowing rates

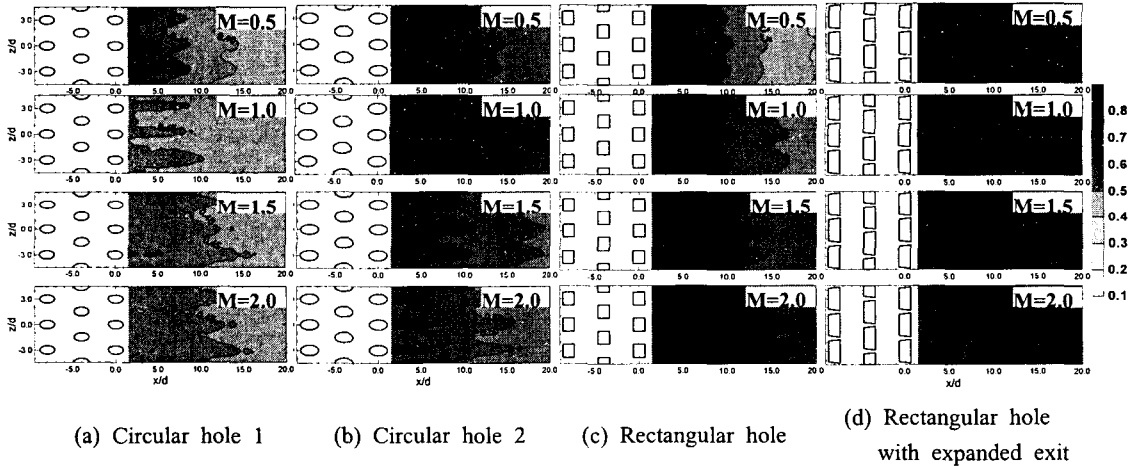


Fig. 8 Contour plots of film cooling effectiveness of three rows of holes for various shapes and blowing rates

3.3 막냉각 효율

2열과 3열의 홀 배열에 대하여 실험을 통하여 막냉각 효율 값의 분포를 구하였다. Fig. 7은 2열의 경우에 대한 막냉각 효율의 분포를 보여주고 있다. 원형홀 1과 2의 경우 분사율 0.5일 때 홀 출구 직후에서 가장 높은 막냉각 효율값이 나타나며 하류로 갈수록 효율이 단조감소 하는 것을 볼 수 있다. 상대적으로 높은 분사율($M \geq 1.0$)에 대해서는 냉각 유체가 바닥으로부터 이탈하였다가 재부착되는 현상을 관찰할 수 있다($x/d \geq 3.0$). 분사율이 증가함에 따라 재부착에 의해 막냉각

효율이 높은 영역이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 높은 분사율의 경우 분사 유량 및 냉각 유체의 운동량이 커지면서 분사된 이차유동간에 혼합이 더 잘 이루어지기 때문이다. 홀과 홀 사이($z/d = \pm 1.5$) 영역의 경우 홀 중심의 하류 영역에 비해 상대적으로 낮은 효율값의 분포를 보이지만, Fig. 4에서 설명한 바와 같이 상류홀에서 분사된 이차유동의 영향으로 인하여 주유동으로부터 보호받아 1열의 경우(12)와 비교해 볼 때 막냉각 효율값이 증가한다.

사각홀의 경우 원형홀에 비해 더욱 높고 고른 막냉각 성능이 나타났다. 상대적으로 높은 분사

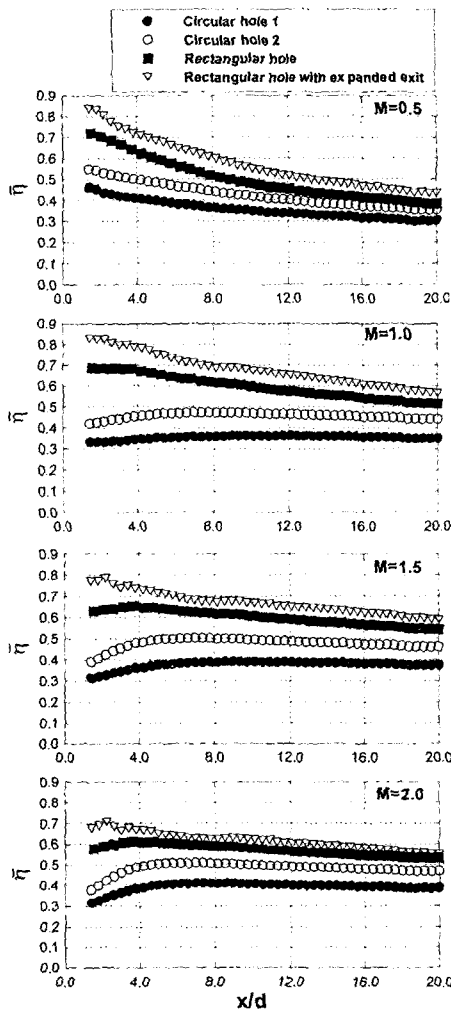


Fig. 9 Spanwise averaged film cooling effectiveness for two rows of holes of various shapes and blowing rates

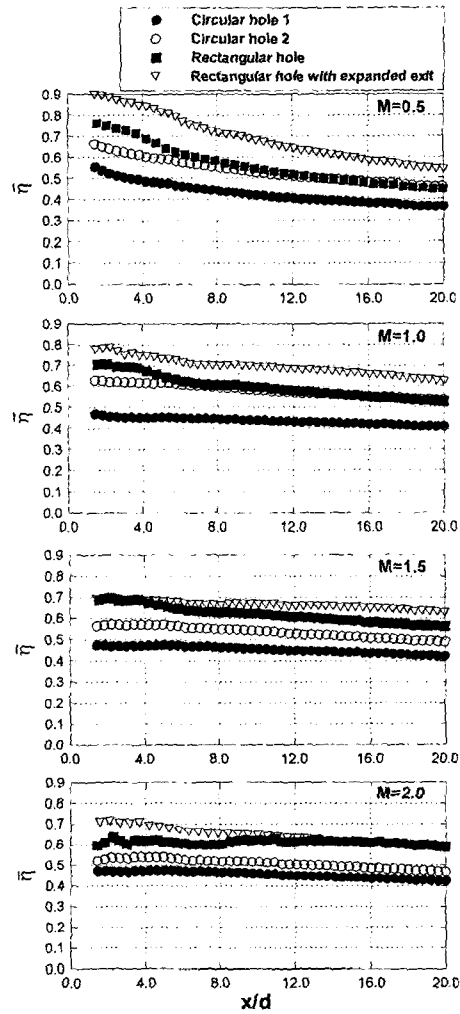


Fig. 10 Spanwise averaged film cooling effectiveness for three rows of holes of various shapes and blowing rates

울에 대해서도 바닥으로부터 이차유동의 박리가 나타나지 않았다. 이는 사각 형상으로 인한 코안다 효과와 상류홀에서 분사된 이차유동에 의한 누름 효과로 인해 냉각유체가 주유동으로 뚫고 들어가지 않고 바닥 면에 막을 잘 형성하기 때문이다. 하지만 높은 분사율($M=2.0$)에서는 주유동과 이차유동의 교란이 심해지면서 홀 인접영역에서의 효율이 약간 감소하는 것으로 나타났다.

사각 확장홀의 경우 홀 출구 면적이 확장되면서 출구에서의 운동량이 감소되어 가장 고르고 높은 막냉각 효율이 얻어졌다. $M=0.5$ 인 경우 막냉각 효율은 슬롯 형태의 막냉각효율과 같은 거

의 2차원적인 분포를 나타냈다. 분사율이 증가함에 따라 냉각유체와 주유동과의 상호작용에 의해 홀과 홀 사이 영역에서 막냉각 효율이 약간 낮은 것을 볼 수 있다. 하지만 출구에서의 운동량이 감소하는 효과로 인해 분사율의 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 3열의 경우에 대한 막냉각 효율의 분포를 나타낸다. 2열보다도 훨씬 높고 고른 막냉각 성능이 얻어지는 것을 확인할 수 있다. 원형 홀의 경우 상류 쪽의 두 개의 열에서 분사된 이차유동의 영향으로 홀 인접 하류 부근에서 가장 높은 막냉각 효율이 나타나고 재부착 현상이 사

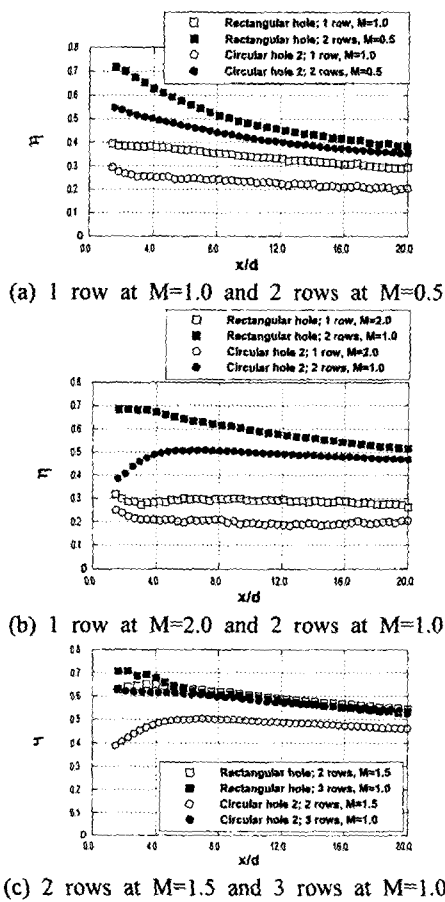


Fig. 11 Comparisons of spanwise averaged film cooling effectiveness for row(s) of holes with the same flow rate of coolant (experimental results)

라지면서 하류로 갈수록 효율값이 단조 감소하는 분포를 갖는다.

사각홀의 경우 전체적인 효율 분포는 2열의 경우와 거의 비슷한 경향을 보였다. 홀 형상의 특징 및 상류홀에서 분사된 냉각유체의 영향으로 인하여 이차유동이 벽 근처에 잘 분포하기 때문에 분사율이 큰 경우($M=2.0$)에도 높고 고른 막냉각 효율이 나타난다. 확장 사각홀의 경우 1열의 홀이 더 추가되면서 2열의 경우보다 더욱 높고 고른 효율 분포를 나타냈다.

Fig. 9와 10은 2열과 3열의 막냉각홀에 대해서 횡방향 평균 막냉각 효율 분포를 나타내는 그림이다. 2열의 사각홀의 경우(Fig. 9), 모든 경우의 분사율에 대하여 원형홀들보다 높은 막냉각 성능

을 가지는 것을 알 수 있으며 하류 쪽으로 갈수록 효율이 단조 감소하는 경향을 보였다. 또한 분사율을 증가시키에 따라 하류에서의 막냉각 성능이 좋아졌는데 이는 냉각유체의 유량이 증가했기 때문이다. 이는 먼 하류로 가서도 냉각 유체가 바닥 면을 잘 보호하고 있다는 것을 의미한다. 그러나 원형홀들의 경우 상대적으로 높은 분사율($M \geq 1.5$)일 때 $x/d=5.0 \sim 6.0$ 부근에서 막냉각 효율의 국소적인 극대점이 나타나게 되는데 이는 앞에서 언급한 바와 같이 이차유동의 재부착에 기인한 것이다.

3열의 경우(Fig. 10) 전체적인 경향은 2열의 경우와 비슷하다. 낮은 분사율($M=0.5$)에 대하여 모든 홀 형상에 대해 막냉각 효율값은 하류 방향으로 단조감소 하는 것을 볼 수 있다. 그러나 분사율이 1.0 이상인 경우 막냉각 효율은 전체적으로 거의 균일하게 나타난다. 또한 사각홀과 원형홀의 효율값의 차이가 2열에 비해 작게 나타나는데 이는 열의 수가 증가함에 따라 홀 형상의 영향이 줄어들었음을 의미한다.

Fig. 11은 분사되는 냉각유체의 유량이 일정한 경우에 열의 수 변화에 따른 횡방향 평균 막냉각 효율분포를 나타내고 있다. 1열과 2열의 경우를 비교해 보면(Fig. 11(a), (b)) 2열의 경우가 1열에 비하여 훨씬 높은 막냉각 성능을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 2열의 경우 누름 및 방어 효과가 나타나는 반면 1열의 경우엔 누름 효과가 나타나지 않고 홀과 홀 사이 지역이 주유동으로부터 보호받지 못하기 때문이다. 분사율을 증가시킬 경우 1열과 2열의 냉각 성능 차이는 더욱 커지는 것을 볼 수 있다(Fig. 11(b)). 이는 분사율이 높아지면서 1열의 경우 이차유동이 주유동으로 뚫고 들어가 바닥에서 이탈되기 때문이다.

2열과 3열의 경우에는 열의 수에 의한 영향이 감소한다(Fig. 11(c)). 사각홀의 경우 막냉각 효율은 2열과 3열의 경우가 전 부분에 걸쳐 거의 같게 나타났다. 원형홀의 경우에도 1열과 2열의 경우에 비해 열 수의 증가에 의한 효과가 줄어들어서 2열과 3열의 효율값이 대략 20% 정도의 차이가 나는 것으로 나타났다. 따라서 3열 이상의 막냉각홀이 설치된 경우 막냉각 성능은 일정한 유량에 대하여 홀 형상 및 분사율의 영향이 크지 않을 것으로 예상된다.

후 기

4. 결 론

본 연구에서는 사각홀과 확장사각홀로 이루어진 2열 및 3열의 배열에서 온도장 및 국소적인 막냉각효율을 구하고 원형홀 결과와 비교하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 막냉각홀을 다열로 배열하는 경우, 상류홀에서 분사된 이차 유동이 하류 홀에서 분사된 냉각 유체를 눌러주어 바닥 면으로부터의 이탈을 막고 (누름 효과) 홀과 홀 사이 영역에 주유동이 유입되는 것을 막아주는(방어 효과) 역할을 하며, 이로 인해 1열로 배열한 경우 보다 좋은 막냉각 성능을 얻을 수 있었다.

- 2열의 배열에서 원형홀의 경우 홀 인접 영역과 홀 사이 영역에서는 상대적으로 낮은 막냉각 효율값이 나타난 반면 홀 하류 부근에서 이차유동의 재부착에 의해 국소적으로 높은 막냉각 효율을 갖는 영역이 존재하였다.

사각홀의 경우 코안다 효과에 의하여 원형홀의 경우보다 냉각 유체가 더욱 바닥 면에 가깝고 고르게 분포하기 때문에 모든 영역에서 원형홀보다 높고 균일한 막냉각 성능을 갖는 것으로 나타났다. 분사율이 증가하는 경우, 홀 출구 인접영역에서는 막냉각성능이 약간 감소하는 경향이 있지만 유량의 증가로 인하여 하류 영역에서 낮은 분사율의 경우 보다 균일하고 높은 막냉각 성능을 얻었다.

확장 사각홀의 경우 홀 출구에서의 면적확장에 따른 운동량의 감소로 인하여 슬롯에서의 막냉각과 유사한 막냉각성능을 얻을 수 있었다.

- 3열 배열의 경우 전체적인 효율분포는 2열의 경우와 유사하지만, 더욱 고르고 높은 막냉각 효율값을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 홀 형상 및 분사율에 의한 영향이 크게 감소하였다.

- 냉각유체 유량이 일정할 때 막냉각홀 열 수를 변화시키는 경우, 열 수가 1열에서 2열로 증가되는 경우에는 막냉각 성능이 매우 향상되지만, 2열에서 3열로 증가되는 경우에는 홀 형상 및 열 수가 막냉각 성능에 미치는 영향이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 3열 이상의 배열에서는 홀 형상과 열 수가 막냉각 성능에 큰 영향을 주지 않으리라 예상할 수 있다.

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 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.
- (2) Gritsch, M., Schulz, A. and Wittig, S., 1998, "Adiabatic Wall Effectiveness Measurements of Film-Cooling Holes With Expanded Exits," *J. of Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 549~556.
- (3) Kohli, A. and Bogard, D. G., 1999, "Effects of Hole Shape on Film Cooling with Large Angle Injection," *ASME Paper No. 99-GT-165*.
- (4) Cho, H. H., Rhee, D. H. and Kim, B. G., "Enhancement of Film Cooling Performance Using A Shaped Film Cooling Hole With Compound Angle Injection," *JSME International Journal, Series B*, Vol. 44, No. 1, pp. 99~110.
- (5) Bunker, R. S., 2000, "Effect of Partial Coating Blockage on Film Cooling Effectiveness," *ASME Paper No. 2000-GT-0244*.
- (6) Muldoon, F. and Acharya, S., 1999, "Numerical Investigation of the Dynamical Behavior of a Row of Square Jets in Crossflow over a Surface," *ASME Paper No. 99-GT-127*.
- (7) Licu, D. N., Findlay, M. J., Gartshore, I. S. and Salcudean, M., 1999, "Measurements of Heat Transfer Characteristics for Film Cooling Applications," *ASME Paper No. 99-GT-167*.
- (8) Watanabe, K., Matsuura, M. Suenaga, K. and Takeishi, K., 1999, "An Experimental Study on the Film Cooling Effectiveness with Expanded Hole Geometry," *Proceed. of 7th IGTC*, 2, pp. 615~622.
- (9) Takahashi, H., Nuntadusit, C., Kimoto, H., Ishida, H., Ukai, T. and Takeishi, K., 2000, "Characteristics of Various Film Cooling Jets Injected in a Conduit," *Proceedings of Turbine 2000 International Symposium on Heat Transfer in*

- Gas Turbine Systems*, pp. 76~78.
- (10) Sargison, J. E., Guo, S. M., Oldfield, M. L. G., Lock, G. D. and Rawlinson, A. J., 2001, "A Converging Slot-hole Film-cooling Geometry Part I: Low-speed Flat-plate Heat Transfer and Loss," ASME Paper No. 2001-GT-0126.
- (11) Sargison, J. E., Guo, S. M., Oldfield, M. L. G., Lock, G. D. and Rawlinson, A. J., 2002, "Flow Visualisation of a Converging Slot-Hole Film-Cooling Geometry," ASME Paper No. GT-2002-30177.
- (12) Rhee, D. H., Lee, Y. S. and Cho, H. H., 2002, "Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer of Rectangular-Shaped Film Cooling Holes," ASME Paper No. 2002-GT-30168.
- (13) Kruse, H., 1974, "Film Cooling Measurements," DEVLR Report No. 352-74/9.
- (14) Le Brocq, P. V., Launder, B. E., and Priddin, C. H., 1973, "Discrete Hole Injection as a Means of Transpiration Cooling, An Experimental Study," *Proc. Inst. Mech. E.*, Vol. 187, pp. 149~157.
- (15) Ligrani, P. M., S. Ciriello, D. T. Bishop, 1992, "Heat Transfer, Adiabatic Effectiveness, and Injectant Distributions Downstream of a Single Row and Two Staggered Rows of Compound Angle Film Cooling Holes," *J. of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 687~700.
- (16) B. Y. Maitech and B. A. Jubran, 1999, "Influence of Mainstream Flow History on Film Cooling and Heat Transfer From Two Rows of Simple and Compound Angle Holes in Combination," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 153~165.
- (17) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (18) Leylek, J. H. and Zerkle, R. D., "Discrete-Jet Film Cooling: A Comparison of Computational Results with Experiments," *ASME, J. of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 358~368.
- (19) Lee, S. W., Lee, J. S and Ro, S. T., 1994, "Experimental Study on the Flow Characteristics of Streamwise Inclined Jets in Crossflow on Flat Plate," *J. of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 97~105.
- (20) Goldstein, R. J., 1971, "Film Cooling, in *Advances in Heat Transfer*," *Academic Press*, Vol. 7, pp. 321~379.