◎ 논 문

# 가스터빈 연소실 냉각을 위한 충돌제트/유출냉각기법에서 사각핀 설치에 따른 열/물질전달 특성

홍성국* · 이동호** · 조형희**

# Heat/Mass Transfer Characteristics in Impingement/Effusion Cooling System with Rectangular Fins for Combustor Liner Cooling

Sung Kook Hong*, Dong-Ho Rhee** and Hyung Hee Cho**

*Key Words: Impingement/effusion cooling (충돌제트/유출냉각), Rectangular fins (사각핀), Crossflow (횡방향유동), Heat/mass transfer (열/물질전달)*

## ABSTRACT

The present study has been performed to investigate the influences of rectangular fins on heat transfer in an impingement/effusion cooling system with crossflow. To simulate the impingement/effusion cooling system with initial crossflow, two perforated plates are placed in parallel and staggered arrangements with a gap distance of 2 times of the hole diameter. The crossflow passes between the plates, and various rectangular fins are installed on the plates. Reynolds number based on the hole diameter is fixed to 10,000 and the flow rate of crossflow is changed from 0.5 to 1.5 times of that of the impinging jet. A naphthalene sublimation method is used to obtain the heat/mass transfer coefficients on the effusion plate. Also to analyze the flow characteristics, a numerical calculation is performed. When rectangular fins are installed, the flow and heat transfer pattern is changed greatly from the case without fins. In the injection hole region, the jet impinges on effusion plate without deflection and wall jet spreads symmetrically. In the effusion region, the crossflow accelerates due to the decrease of cross-sectional area in the channel. Local heat/mass transfer coefficients are enhanced significantly compared to the case without fins. As the blowing ratio increases, the effect of rectangular fins against the crossflow becomes more significant and then the higher average heat/mass transfer coefficients are obtained than the case without fins. However, the increase of blockage effect gives more pressure loss in the channel.

* 연세대학교 대학원
** 연세대학교 기계공학과
책임저자 E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

## 1. 서 론

가스터빈 엔진의 효율과 성능 향상을 위하여 터빈 입구 온도의 상승은 필수적이다. 그러나 현재 요구되고 있는 가스터빈 입구온도는 금속의 허용온도를 훨씬 상회하고 있다. 따라서, 고온의 연소가스로부터 연소실 (combustor linar) 벽면 및 터빈의 블레이드 (blade)와 베인 (vane)을 보호하고 적정 수명을 유지하기 위해 가스터빈 요소 냉각기술이 절실히 요구되고 있다.

이러한 가스터빈에 적용되고 있는 냉각방법으로 막냉각 (film cooling), 충돌제트 (impingement cooling), 내부관 대류냉각(internal channel convective cooling) 등이 있으며, 보다 높은 냉각성능을 얻고자 이러한 냉각방법들을 동시에 적용한 복합냉각방법들에 대한 연구들이 계속적으로 수행되고 있다.

복합냉각기법 중의 하나인 충돌제트/유출냉각기법 (impingement/effusion cooling)은 연소실이나 터빈블레이드와 같은 고온요소의 내부표면을 충돌제트를 이용하여 냉각시킨 후, 막냉각을 통하여 고온가스와 접촉하는 표면을 보호하는 방법으로써 충돌제트 냉각과 막냉각의 효과를 동시에 얻을 수 있는 장점으로 인해 많은 관심의 대상이 되고 있다.

하지만 높은 냉각성능을 갖는 충돌제트/유출냉각기법이 적용되는 실제 연소실이나 터빈 내부유로에는 횡방향 유동 (crossflow)이 존재하는데 이러한 횡방향 유동은 전체적인 냉각시스템에서 좋지 못한 영향을 일으키게 된다. 횡방향 유동이 충돌제트가 균일하게 유출판에 충돌하는 것을 방해하여 전체적인 시스템의 냉각성능을 저하시키게 된다. 따라서 충돌제트/유출냉각기법에서 횡방향 유동으로 발생되는 문제점을 해결하는 것이 필요하다.

그러나 지금까지 충돌제트/유출냉각에 관한 연구는 기초적인 연구들[1]~[5]이 대부분이고 실제 연소실이나 터빈 블레이드의 내부유로에 발생되는 횡방향 유동의 영향을 고려한 연구는 유출홀이 없는 배열 충돌제트에 대해서 제한적으로 이루어졌다. Metzger와 Korstad[6], Florschuetz 등[7], Haiping 등[8]은 배열 충돌제트에서 횡방향 유동이 열전달 특성에 미치는 연구를 통하여, 횡방향 유동이 충돌제트의 상류영역에서 열전달 성능을 감소시키는 것을 확인하였다.

최근 들어, Rhee 등[9]은 초기 횡방향 유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각기법에서 요철설치에 따른 유출판에서의 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 그 결과, 요철설치로 인해 벽제트가 횡방향 유동에 의해 휩쓸려 가는 것을 막아줌으로써 보다 높은 냉각성능을 얻는 것으로 나타났다. 홍성국 등[10]은 원형 핀-휜을 설치하여 횡방향 유동의 방해 및 유동교란 증가로 보다 높은 냉각성능을 얻는 것으로 보고하였다.

본 연구에서는 횡방향 유동에 의해 발생되는 낮은 열전달 영역을 감소시켜 보다 균일한 냉각성능을 얻으며 구조적으로 안정된 냉각방법을 얻기 위해 초기 횡방향 유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각방법에 대하여 사각핀을 설치하는 경우에 대한 실험을 수행하였다. 이 때, 설치되는 사각핀 형상 및 횡방향 유동의 유량을 변화시켜가며 실험을 수행하였고 사각핀이 설치되지 않은 경우와 냉각성능을 비교하였다. 이를 위해 본 연구에서는 열/물질상사성을 이용한 나프탈렌 승화법을 사용하였으며 횡방향 유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각 시스템에서의 충돌제트 및 유출유동간의 유동 특성을 고찰하기 위하여 수치해석도 함께 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 크게 분사부, 유출부, 횡방향 유동부로 구성된다. 실험장치의 자세한 구성 및 사양은 Rhee 등[9]에 제시되어 있다. Fig. 1은 시험부 및 유출판 (effusion plate)의 개략도를 나타내는 그림이다. Fig. 1(a)에 제시된 바와 같이 시험부는 윗면에 분사판, 아래 부분에 유출판이 설치되어 있으며 그 사이에 횡방향 유동이 지나는 채널이 설치되어 있다. 이 때, 채널의 단면은 300 mm($W$) × 20 mm($H$)이며, 수력직경 ($Dh$)은 37.5 mm이다.

Fig. 1(b)는 시험부에서 유출판의 개략도를 나타낸 것으로 국소 열/물질전달계수를 측정하기 위하여 나프탈렌이 주조된 시험시편을 유출판에 설치하였다. 분사홀과 유출홀의 직경은 10 mm이며, 홀 직경 대비 높이 비 ($H/d$)는 2에 해당된다.

분사판과 유출판은 각각 사각배열인 25(5×5)개의 홀을 갖으며, 홀 직경 대 간격 ($Phole/d$)은 6.0이다. 이 때, 분사판과 유출판의 홀 배열은 지그재그 배열 (staggered arrangement)이 되도록 하였다.

본 연구에서는 채널 내에 발생되는 압력강하를 측정하기 위해 첫 번째 분사홀과 마지막 유출홀로부터

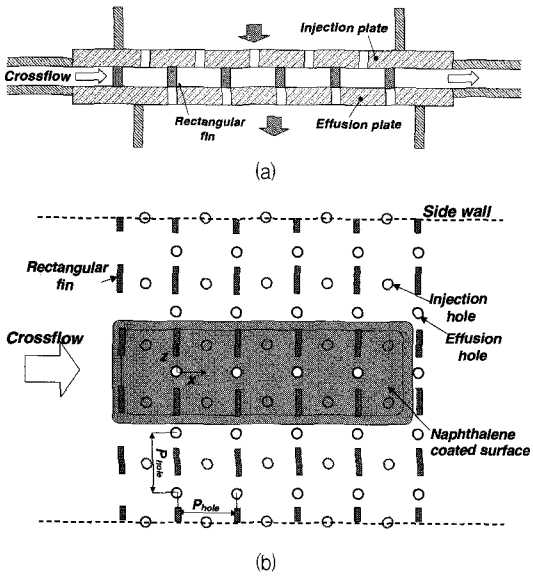


Fig. 1 Schematic view of test section : (a) test section and (b) top view of effusion plate

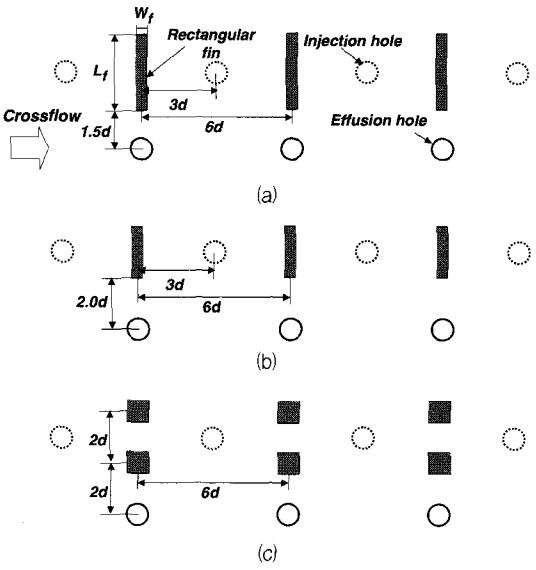


Fig. 2 Fin configurations : (a) RF0, (b) RF1 and (c) RF2

각각 100 mm 떨어진 측면 벽에 압력탭을 설치하였다. 또한, 충돌/유출에 따른 압력강하를 측정하기 위해 분사 챔버와 유출 챔버에도 압력탭을 설치하였으며 차압 센서 (LPE 9145 model, Druck)를 이용하여 압력강하를 측정하였다.

## 2.2 사각핀 형상 및 배열

본 연구에서는 사각핀 형상 및 배열변화에 따른 열/물질전달 특성을 고찰하기 위하여 총 3가지의 사각핀 형상에 대해서 실험을 수행하였다. Fig. 2는 사각핀이 설치된 개략도를 나타낸 그림으로 본 연구에서는 각각의 경우를 RF0, RF1, RF2로 명명하였다. 여기서, RF0, RF1, RF2 경우에 설치된 사각핀 길이 ($L_f$)는 각각 30 mm, 20 mm, 10 mm이며, RF0와 RF1의 경우에 너비 ($W_f$)는 5 mm이고 RF2의 경우에는 10 mm이다. 또한, 모든 사각핀의 높이는 채널 높이에 동일한 20 mm로 유출판과 분사판에 연결되게 된다.

RF0와 RF1의 사각핀 위치는 분사홀간의 중심선상에 놓여지며 RF2의 경우에는 중심선으로 $1d$ 만큼 떨어져 위치하게 된다. 분사홀간의 너비가 60 mm이므로 설치된 사각핀으로 인해 채널단면적 대 사각핀의 채널 차단 면적율은 RF0의 경우 50%이고 RF1과 RF2경우는 33%에 해당된다.

## 2.3 작동조건

본 연구에서는 초기 횡방향 유동의 영향을 고찰하고자 분사제트의 유량을 일정하게 유지하고 이에 대한 횡방향 유동의 유량을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이 때, 횡방향 유동과 분사제트의 유량비를 분사비라고 하였으며, 분사비는 다음과 같이 정의된다.

$$M = Q_c/Q_i \qquad (1)$$

각각의 경우에 따라 분사비를 0.5에서 1.5까지 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이 때, 채널의 수력직경을 기준으로 횡방향 유동의 Reynolds 수는 ReDh= 6,000~18,000에 해당한다. 분사비를 변화시키기 위하여 분사제트의 총 유량과 유출홀을 통해 나가는 유량을 홀 직경 기준 Reynolds 수 $Re_d$=10,000으로 일정하게 유지하고, 횡방향 유동의 유량을 변화시켰다.

## 2.4 열/물질 전달계수

본 연구에서 측정된 국소 물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(\Delta y/\Delta\tau)}{\rho_{v,w}} \qquad (2)$$

본 연구에서는 유입되는 유동에 나프탈렌이 포함되어 있지 않으므로 $\rho_{V,\infty}=0$ 이다. 물질전달계수 ($h_m$)는 나프탈렌의 승화량 ($\triangle y$), 실험시간 ($\triangle\tau$), 고체나프탈렌의 밀도 ($\rho_S$)와 표면에서의 나프탈렌의 증기밀도 ($\rho_{V,W}$)로부터 구할 수 있다. 여기서, 표면에서의 나프탈렌 증기밀도는 Ambrose 등[11]이 제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구한다. 물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathrm{Sh} = h_m D_h / D_{naph} \qquad (3)$$

여기서, 나프탈렌의 물질확산계수 (Dnaph)는 Goldstein과 Cho[12]에서 제시된 바와 같다.

앞에서 계산된 물질전달계수는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\mathrm{Nu}/\mathrm{Sh} = (\mathrm{Pr}/\mathrm{Sc})^{0.4} \qquad (4)$$

실험결과의 오차해석은 Kline과 McClintock[13]이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 전체적으로 ±7.1% 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

### 2.5 수치해석

충돌제트/유출냉각 시스템 내부의 유동특성을 고찰하기 위해 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT (ver. 6.1)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 모델은 3차원 비압축성 유동의 정상상태로 가정하고, RNG $k-\varepsilon$ 난류 모델에 enhanced wall treatment를 사용하여 충돌면에서 보다 많은 격자를 사용하여 계산을 수행하였다. 충돌제트/유출냉각 시스템이 반복적인 형상조건을 갖기 때문에 주기 (Periodic)조건을 사용하였다.

본 연구에서는 격자 독립성 시험(grid independent test)을 통해 정확성과 경제성을 고려하여 약 80만개의 격자를 계산에 이용하였다. 계산은 분사비 $M$=1.0에 해당되는 사각핀이 설치되지 않은 경우와 사각핀 설치된 RF1의 경우에 대해 수행하여 사각핀의 영향을 고찰하였다. 이 때, 충돌제트와 횡방향 유량은 실험조건과 동일하게 적용하였으며 난류강도는 10%로 설정하여 계산을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 유동 특성

Fig. 3은 사각핀이 설치되지 않은 경우의 분사홀

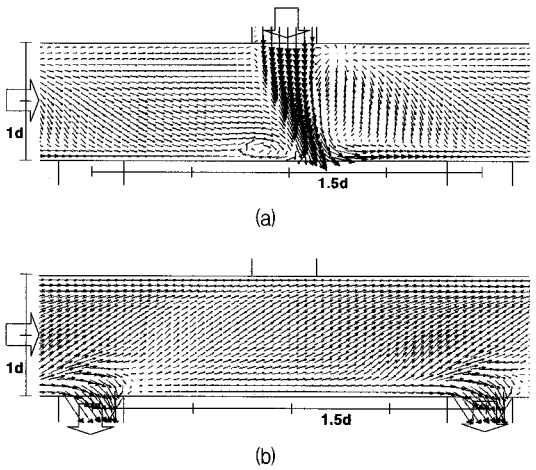


Fig. 3 Velocity vector in case without fins at M=1.0 : (a) On injection plane (z/d=3.0) and (b) On effusion plane (z/d=0.0)

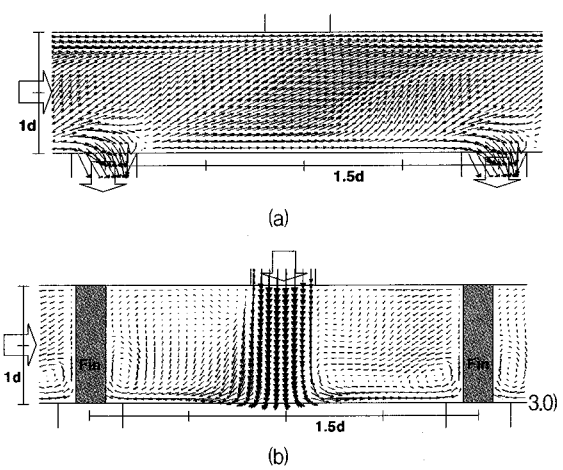


Fig. 4 Velocity vector in RF1 case at M=1.0 : (b) On effusion plane (z/d=0.0) and (a) On injection plane (z/d=0.0)

단면($z/d$=3.0)과 유출홀 단면($z/d$=0)의 속도벡터를 도시한 것이다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 사각핀이 없는 단순 충돌유출 냉각의 경우 횡방향 유동으로 인해 분사제트가 하류방향으로 이동됨을 볼 수 있다. 횡방향 유동은 채널내로 수직 분사되는 제트를 분사홀 출구부터 하류방향으로 서서히 밀어내면서 일부 횡방향 유동은 분사제트로 유입되며 하향류가 형성됨을 볼 수 있다. 또한, 유출판과의 충돌 후 발달되는 벽제트(wall jet)는 상류방향으로 거의 발달되지 못하고 횡방향 유동과 충돌하면서 정체점(stagnation point) 앞에서 2차 와류를 형성되게 된다. 결국, 벽제트의 대부분이 하류방향으로만 발달해 가는 것을 알 수 있다.

유출홀 단면(Fig. 3(b))에서는 단순 채널유동의 특성을 보이게 되나 유출홀 상류에서 유출홀로 빠져나가는 벽제트와의 상호작용에 의해 약한 상향류가 발생되고 유출홀 근처에서 유출유동이 가속됨을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 사각핀이 설치된 경우(RF1)의 속도벡터를 나타낸 것으로 앞서 언급한 사각핀이 없는 경우와는 다른 유동 특성을 갖게 된다. 상류영역에 분사홀 중심영역을 가로지르는 사각핀이 설치되어 이 영역을 횡방향 유동이 지나가지 못하도록 하는 차단효과(blockage effect)로 인해 채널내로 분사되는 제트는 횡방향 유동에 의한 영향을 거의 받지 않게 된다. 따라서 하류방향으로 편향되지 않는 분사제트 특성이 나타나며 벽제트는 상하류 방향으로 균일하게 발달된 후, 사각핀을 만나 2차 유동을 형성되게 된다. 오히려 분사홀 중심으로 상류쪽 사각핀 후류영역에서의 저압부와 하류쪽 사각핀 선단영역의 고압부 형성으로 인한 압력 차이로 자유 분사제트 경계 영역에서 유동이 좀 더 상류방향으로 이동됨을 볼 수 있다.

유출홀 단면에서의 유동(Fig. 4(b))에서는 사각핀이 없는 경우와 동일하게 유출홀이 존재하는 채널유동 특성이 나타나지만 사각핀 설치로 채널내의 단면 축소로 인해 전체적으로 유동 속도가 증가됨을 알 수 있다.

### 3.2 국소 열/물질전달 특성

Fig. 5는 분사비 $M$=1.0인 충돌제트/유출냉각에서 사각핀이 설치되지 않은 경우와 다양한 사각핀이 설치된 경우, 유출판에서의 열/물질전달계수 분포로써 흰색의 원(점선)과 두개의 반원(실선)은 각각 분사홀의 투영된 위치와 유출홀을 나타낸다. 또한, 흰색의 사각형들은 채널내에 설치된 각각의 사각핀을 의미한다.

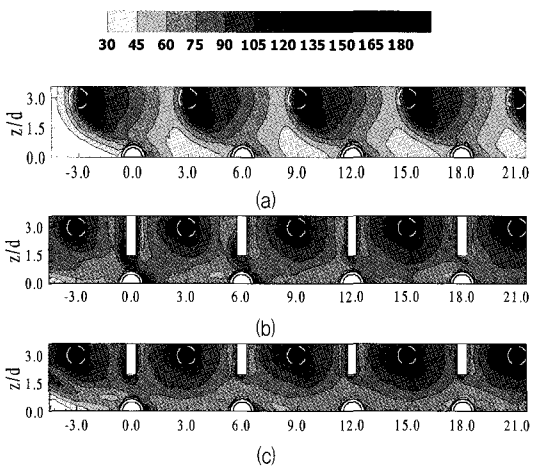


Fig 5. Contour plots of sh : (a) without fins, (b) RF0 and (c) RF1

Fig. 5(a)는 사각핀이 설치되지 않은 경우로, 초기 횡방향 유동으로 열/물질전달 촉진영역이 하류방향으로 치우쳐 비대칭적인 분포가 나타나며, 벽제트가 횡방향 유동에 의해 하류방향으로 쓸려가면서 유출홀 사이에 열/물질전달이 낮은 영역이 형성됨을 볼 수 있다.

그러나 채널내에 사각핀이 설치된 경우(Fig. 5(b)~(d)) 열/물질전달계수 분포는 크게 달라진다. 앞서 유동결과로부터 예측되듯이 분사홀 영역($z/d\cong$3.0)에서 충돌제트로 형성되는 열/물질전달 촉진 영역이 대칭적으로 형성되며, 사각핀이 설치되지 않은 경우에 나타나는 유출홀 사이의 낮은 열/물질전달영역이 감소되고 보다 균일한 냉각성능을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 사각핀이 설치된 영역에서 유동충돌로 인한 와류(vortex) 발생으로 높은 열/물질전달 특성을 관찰할 수 있다.

사각핀 형상 및 배열 변화에 따른 영향을 살펴보면, 사각핀의 차단면적율이 50%에 해당되는 RF0의 경우와 33%에 해당되는 RF1은 전체적으로 유사한 열/물질전달계수 분포를 보이고 있다. 다만 채널 차단면적율이 작은 RF1의 경우, 유출홀 영역($z/d\cong$0.0)에서 단순 채널 유동에 의한 특징이 보다 더 나타남을 볼 수 있다.

사각핀에 의한 차단면적율이 33%이고 분사홀 중앙영역이 횡방향 유동에 열려 있는 사각핀 배열인 RF2

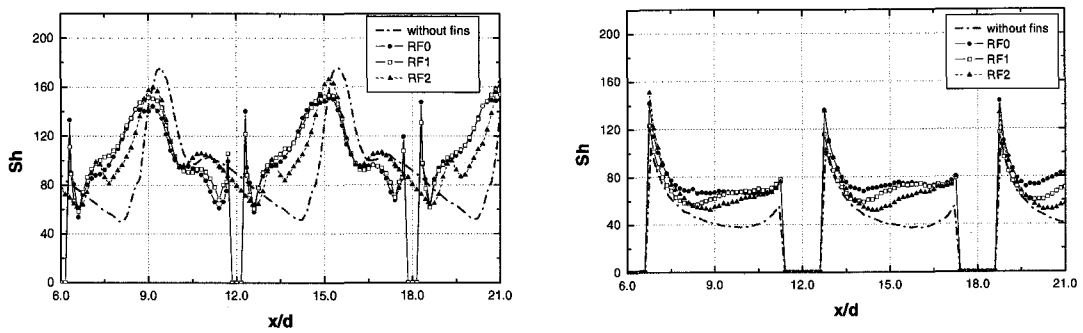


Fig. 6 Local distributions of Sh for impingement/effusion cooling with various fin configurations at $M$=1.0 : (a) At $z/d$=3.0 and (b) At $z/d$=0.0

의 경우 (Fig. 5(d))는 앞서의 분사홀 중심영역을 차단한 경우들과는 열/물질전달계수 분포에 있어 차이를 보이게 된다. 분사홀의 중심으로 좌우 대칭적인 특성이 사라지면서 충돌제트의 정체점이 횡방향 유동에 의해 하류방향으로 이동됨을 볼 수 있다. 하지만 여전히 사각핀에 의한 횡방향 유동에 대한 차단효과가 크기 때문에 벽제트 발달에 의한 높은 열/물질전달계수 분포가 넓게 나타나고 있다.

Fig. 6은 사각핀이 설치된 경우 $6.0 \le x/d \le 21.0$ 구간에 대해서 $z/d$=3.0, 0.0에서의 국소 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. 그림에서 0으로 표시된 부분은 사각핀의 위치 혹은 유출홀의 위치를 나타낸다. 점선은 사각핀이 설치되지 않은 충돌제트/유출냉각에서의 국소 열/물질전달계수 값이다.

Fig. 6(a)는 $z/d$=3.0에서의 값으로 횡방향 유동에 의해 사각핀이 설치되지 않은 경우, 정체점이 하류쪽으로 치우침을 뚜렷하게 볼 수 있으며 분사된 제트와 횡방향 유동과의 상호작용에 의한 유동교란의 증가로 높은 극대값이 형성된다. 이에 반해 사각핀이 설치된 경우, RF0과 RF1은 횡방향 유동의 영향이 거의 없어 대칭적인 열/물질전달계수 분포를 형성하게 된다. 따라서, 정체점 기준으로 하류방향에서는 사각핀이 없는 경우에 비해 상대적으로 낮은 값을 갖게 되지만 상류방향에서는 매우 높은 분포를 보이게 된다. 사각핀 양쪽 끝단에서는 발달된 벽제트의 충돌에 의한 강한 모서리 와류의 형성으로 2차 극대값이 형성됨을 볼 수 있다.

RF2의 경우에는 횡방향 유동의 영향이 존재하기 때문에 사각핀이 설치되지 않은 경우와 앞서 기술된 RF0의 특성이 복합적으로 발생된다. 횡방향 유동으로 정체점은 하류로 이동되고 극대값은 커지나 차단효과에 의해 벽제트가 상류방향으로 많이 이동되어 상류방향에서도 높은 열/물질전달계수 분포가 나타나게 된다.

Fig. 6(b)는 유출홀 중심인 $z/d$=0.0에서의 국소 열/물질전달 분포로서 모든 경우에 유출홀 끝단 영역에서 유출유동의 유동교란 증가 및 유출유동의 충돌로 인해 가장 높은 값이 나타나고 점차 낮아진 후 다시 유출홀 앞에서 유동가속으로 인해 높아지는 분포를 보이게 된다.

사각핀이 설치된 경우, 이 영역에 사각핀이 설치되지 않았음에 불구하고 35~55%의 열/물질전달 계수가 향상된다. 이는 유출홀 영역에서의 유동속도 증가에 따른 것으로 차단면적이 가장 큰 RF0의 경우가 RF1과 RF2 경우에 비해 높은 열/물질전달 값이 형성됨을 볼 수 있다.

### 3.3 분사비 변화에 따른 영향

Fig. 7은 사각핀이 설치된 경우 (RF1), 분사비 변화에 따른 국소 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. Rhee 등[9]에 의해 보고된 바와 같이 사각핀이 존재하지 않은 단순 충돌제트/유출 경우에는 분사비가 증가될수록 횡방향 유동 영향의 증가로 벽제트가 더욱 더 하류로 쓸려나가면서 전체적인 열/물질전달계수 분포가 크게 감소된다.

하지만 사각핀이 설치된 경우에는 분사비에 상관없이 정체점과 벽제트 초기영역이 일정하게 유지되고 있음을 관찰할 수 있다. 사각핀의 차단영역이 미치지 못하는 중간영역 ($z/d \cong 1.0$)에서는 분사비가 증가될수록 벽제트가 측면방향으로 발달하지 못하여 하류방향

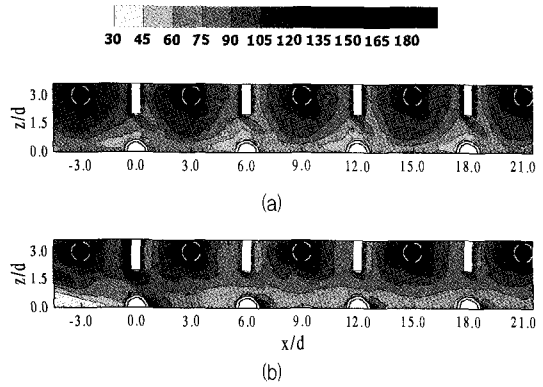


Fig. 7 Contour plots of Sh for RF1 case at different blowing ratio : (a) M=0.5 and (b) M=1.5

으로 쓸려가는 현상이 나타난다.

그러나 이 영역에서도 횡방향 유동속도의 증가로 인해 사각핀이 없는 경우와는 달리 높은 열/물질전달 계수 분포를 형성하게 된다.

### 3.4 평균 열/물질전달

Fig. 8은 각각의 사각핀에 대한 면적 평균된 열/물질전달계수를 나타내는 그림이다. 이 때, 면적평균을 위한 구간은 $-3.0 \le x/d \le 21.0$, $0.0 \le z/d \le 3.0$으로 하였다.

분사비 $M$=1.0인 경우, 국소 열/물질전달계수 분포에서 알 수 있듯이, 사각핀을 설치한 모든 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 열/물질전달계수가 20%정도 향상됨을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 사각핀 설치에 따른 차단 효과로 벽제트가 하류방향으로 쓸려나가는 것을 막아주고 사각핀 설치로 인한 유동속도가 증가되었기 때문이다. $M \le 1.0$에서는 사각핀 형상 및 배열에 따른 평균 열/물질전달 값에 대한 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

분사비 변화에 따른 평균 열/물질전달계수의 영향을 살펴보면, 사각핀이 없는 경우에는 분사비가 증가함에 따라 횡방향 유동 영향의 증가로 평균 열/물질전달계수가 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타난다. 이에 반해 사각핀이 설치된 경우에는 분사비 증가에 변화 없이 평균 열/물질전달 값이 높음을 알 수 있다. 특히, RF0의 경우에는 분사비 증가에 따라 평균 열전달은 점차 증가됨을 볼 수 있는데 이는 분사홀 영역에서 분사비에 관계없이 일정하게 유지되고 유출홀 영역에서는 분사비 증가에 따른 횡방향 유량의 증가에 의한 채널내의 속도 증가로 인해 보다 열전달이 촉진되었기 때문이다.

결국, 초기 횡방향이 존재하는 충돌제트/유출냉각기법에서 분사비가 증가될수록 사각핀 설치 효과는 더욱더 증가됨을 알 수 있다.

### 3.5 압력강하

본 연구에서는 설치된 사각핀으로 발생되는 채널내의 압력강하를 평가하기 위하여 압력을 측정하였다. Fig. 9는 각각의 경우에 대한 채널 내에서 발생되는 압력강하율을 나타낸 것으로 채널 내에서 발생되는 압력강하 ($\triangle P_{cross}$)를 유출 챔버와 분사 챔버 사이에서 발생되는 압력강하 ($\triangle P_{jet}$)로 나누었다.

그림에서 볼 수 있듯이 채널 내에서 발생되는 압력강하는 분사비와 사각핀 차단면적율의 증가에 따라 증가됨을 알 수 있다. 특히, 차단 적율이 50%인 RF0의 경우, 사각핀이 설치되지 않은 경우에 비해 매우

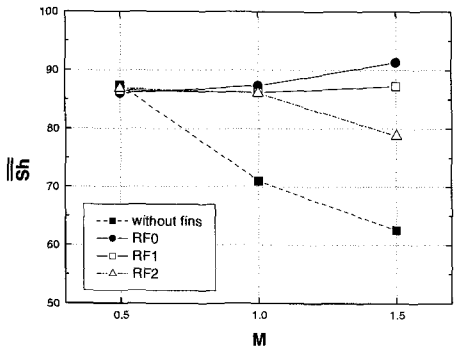


Fig. 8 Overall average Sh for impingement/effusion cooling at various blowing ratios

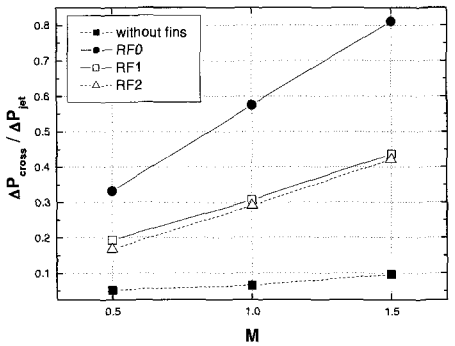


Fig. 9 Pressure drop ratios for impingement/effusion cooling at various fin cases

높은 압력강하가 발생되고 있다. 이와 같은 높은 압력강하는 충돌제트/유출냉각 시스템에 냉각유체를 공급하기 위해 추가적인 동력이 요구되므로 좋지 못한 영향을 초래하게 된다.

따라서 사각핀 적용을 통한 냉각성능 향상을 위해서는 충돌제트/유출냉각 시스템에 대한 정확한 운전조건을 고려하여 사각핀 설치가 이루어져야 함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각방법에서 사각핀을 설치하는 경우 유동 및 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 분사홀간 중심선상에 사각핀이 놓여진 경우 (RF0, RF1), 설치된 사각핀은 횡방향 유동을 차단하여 벽제트를 상하류 방향으로 넓게 발달시켜, 분사홀 영역 ($z/d \cong 3.0$)에서 균일하고 높은 열/물질전달계수 분포를 형성시켰다.
2) 분사홀간 중심선상에 떨어져 사각핀이 설치되는 경우 (RF2), 횡방향 유동이 분사홀 중심영역으로 지나가면서 대칭적인 열/물질전달계수 분포가 사라지나 횡방향 유동에 대한 사각핀의 차단효과가 크기 때문에 벽제트가 주변으로 넓게 퍼지면서 높은 열/물질전달계수 분포가 나타났다.
3) 유출홀 영역 ($z/d \cong 0.0$)에서는 설치된 사각핀에 의한 채널면적 감소로 유동이 가속됨을 관찰할 수 있었으며 이로 인해 유출홀 영역에서도 사각핀이 설치되지 않은 경우에 비해 열/물질전달이 향상되었다.
4) 분사비가 $M=1.0$인 경우, 사각핀이 설치된 모든 경우가 사각핀이 설치되지 않은 경우에 비해 평균 열/물질전달 값에서 20% 향상되는 것으로 나타났다.
5) 분사비가 증가될수록 횡방향 유동의 차단효과 및 채널내의 유동속도 증가로 인해 사각핀 설치 효과는 더욱 더 증가되는 것을 확인할 수 있었다.
6) 사각핀 설치를 통해 발생되는 압력강하는 분사비와 사각핀의 차단면적율이 증가함에 따라 크게 증가됨을 확인하였다. 따라서 사각핀 적용을 통한 냉각성능 향상을 위해서는 충돌제트/유출냉각 시스템에 대한 정확한 운전조건을 고려하여 사각핀 설치가 이루어져야 함을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정 연구실 사업 지원의 결과이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Hollwarth, B. R. and Dagan, L., 1980, "Arrays of Impinging Jets with Spent Fluid Removal through Vent Holes on the Target Surface Part 1: Average Heat Transfer," Journal of Engineering for Power, Vol. 102, pp. 994~999.
(2) Hollwarth, B. R, Lehmann, G. and Rosiczkowski, J., 1983, "Arrays of Impinging Jets with Spent Fluid Removal through Vent Holes on the Target Surface Part 2: Local Heat Transfer," Journal of Engineering for Power, Vol. 105, pp. 393~402.
(3) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1996, "Effect of Hole Arrangements on Impingement/ Effusion Cooling," Proceeding of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference, pp. 71~76.
(4) Cho, H. H. and Rhee, D. H., 2001, "Local Heat/Mass Transfer Measurement on the Effusion Plate in Impingement/ Effusion Cooling System," Journal of Turbomachinery, Vol. 123, pp. 601~608.
(5) Cho, H. H., Choi, J. H. and Rhee, D. H. 2001, "The Effects of Hole Arrangements on Heat/Mass Transfer of Impingement /Effusion Cooling System," Proceedings of ExHFT-5, pp. 975~980.
(6) Metzger, D. E. and Korstad, R. J., 1992, "Effects of Cross flow in Impingement Heat Transfer," Journal of Engineer-

ing for Power, Vol. 94, pp. 35~41.
(7) Florschuetz, L. W., Metzger, D. E. and Su, C. C., 1984, "Heat Transfer Characteristics for Jet Array Impingement With Initial Crossflow," Journal of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 34~41.
(8) Haiping, C., Wanbing, C. and Taiping, H., 1999, "3-D Numerical Simulation of Impinging Jet Cooling with Initial Crossflow," ASME Paper No. 99-GT-256.
(9) Rhee, D. H., Nam, Y. W. and Cho, H. H., 2004, "Local Heat/Mass Transfer with Various Rib Arrangement in Impingement/Effusion Cooling System," ASME Paper No. GT2004-53686.
(10) 홍성국, 이동호, 조형희, 2004, "충돌제트/유출냉각기법에서 판-휜 설치에 따른 냉각특성에 대한 연구," 제3회 한국유체공학 학술대회, pp. 663~666.
(11) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," Journal of Chemical Thermodynamics, Vol. 7, pp. 1173~1176.
(12) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 10, pp. 416~434.
(13) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3~8.