

〈 논문 〉

원형가이드 설치에 따른 충돌제트/유출냉각에서 열/물질전달 특성

홍성국* · 조형희†

(2006년 5월 10일 접수, 2006년 9월 27일 심사완료)

Heat/Mass Transfer for Impingement/Effusion Cooling System with Circular Guide

Sung Kook Hong and Hyung Hee Cho

Key Words: Impingement/Effusion Cooling(충돌제트/유출냉각), Circular Guide(원형가이드), Initial Crossflow(초기 횡방향 유동), Heat/Mass Transfer(열/물질전달)

Abstract

An experimental investigation was conducted to enhance the heat/mass transfer for impingement/effusion cooling system when the initial crossflow was formed. For the improvement of heat transfer, the circular guide is installed on the injection hole. At the fixed jet Reynolds number of 10,000, the measurements were carried out for blowing ratios ranging from 0.5 to 1.5. The local heat/mass transfer coefficients on the effusion plate are measured using a naphthalene sublimation method. The result presents that the circular guide protects the injected jet from the initial crossflow, increasing the heat/mass transfer. The heat transfer of stagnation region is hardly changed regardless of the blowing ratio. The secondary peak is obviously formed by flow transition to turbulent flow. At high blowing ratio of 1.5, the circular guide produces 26~30% augmentation on the averaged heat/mass transfer while the case without circular guide leads to the low and non-uniform heat/mass transfer. With the increased heat/mass transfer, the installation of circular guide is accompanied by the increase of pressure loss in the channel. However, the pressure drop caused by the circular guide is lower than that for other cooling technique with the circular pin fin.

기호설명

<p>d : 분사홀 및 유출홀의 내경[m]</p> <p>D_{in} : 원형가이드 내경[m]</p> <p>D_{out} : 원형가이드 외경[m]</p> <p>D_h : 덕트 수력직경[m]</p> <p>D_{naph} : 공기중에서 나프탈렌 물질확산계수[m²s⁻¹]</p> <p>H : 분사홀과 유출판 사이의 간격[m]</p> <p>H_D : 덕트 유로의 높이[m]</p> <p>h_m : 물질전달계수[ms⁻¹]</p> <p>L : 원형가이드 길이[m]</p>	<p>M : 분사비, Q_c/Q_i</p> <p>Nu : Nusselt 수</p> <p>Pr : Prandtl 수</p> <p>P_{hole} : 분사홀 또는 유출홀 사이의 간격[m]</p> <p>Q_c : 횡방향 유동의 유량[m³s⁻¹]</p> <p>Q_i : 분사제트의 유량[m³s⁻¹]</p> <p>Re_d : Reynolds 수, $Re_d = \rho V_d d / \mu$</p> <p>Re_{Dh} : 덕트수력직경에 기초한 Reynolds 수</p> <p>Sc : Schmidt 수</p> <p>Sh : Sherwood 수, 식 (2)</p> <p>\overline{Sh} : 전체 평균 Sherwood 수</p> <p>t : 분사판의 두께[m]</p> <p>V_c : 횡방향 유동의 유속[ms⁻¹]</p> <p>V_i : 분사제트의 유속[ms⁻¹]</p> <p>W_D : 덕트 유로의 폭[m]</p>
--	--

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

x, z : 유출홀 중심으로부터의 좌표[Fig. 1(b)]
 ΔP_{cross} : 덕트 내에서 발생하는 압력강하[Pa]
 ΔP_{jet} : 유출챔버와 분사챔버 사이의 압력강하

1. 서론

가스터빈 엔진에는 충돌제트 냉각(impingement jet cooling), 막냉각(film cooling), 내부관 냉각(internal cooling)과 같은 다양한 냉각방법들이 연소실(combustor liner) 내벽 및 베인(vane), 블레이드(blade)에 적용이 되어 고온의 연소가스로부터 보호하는 역할을 하고 있다. 가스터빈 엔진의 열효율 및 성능개선을 위해서는 터빈입구온도의 증가가 필수적으로 요구됨에 따라 기존의 냉각방법들 보다 향상된 냉각방법에 대한 연구들이 지속적으로 이루어지고 있다. 개선된 냉각방법들 중에 막냉각과 충돌제트냉각을 동시에 적용한 충돌제트/유출냉각기법(impingement/effusion cooling)은 요소부품의 내벽을 충돌제트로 냉각시킨 후, 사용된 냉각유체가 다시 외벽의 표면을 고온의 연소가스로부터 차단시켜 보호하기 때문에 매우 높은 냉각성능을 얻을 수 있다. 따라서, 이러한 충돌제트/유출냉각기법은 연소실 내벽, 베인 및 블레이드로 적용이 점차 확대되고 있다.

지금까지 충돌제트/유출냉각에 대한 연구들을 살펴보면 유출홀 크기 및 배열이나 충돌제트/유출유량 변화와 같은 기본적인 연구들이 진행되어 Hollwarth 등,^(1,2) Cho 등,⁽³⁻⁵⁾ Yoon 등⁽⁶⁾은 유출홀 설치로 인해 단순 배열충돌제트에 비해 냉각성능이 향상됨을 확인하였다. 또한, 실제 연소실 내벽의 상류영역 또는 터빈블레이드의 전연부(leading edge)냉각으로 이용되는 냉각유체로 인해 발생하는 횡방향 유동(crossflow)에 대한 연구들이 진행되었다. Metzger와 Korstad,⁽⁷⁾ Florschuetz 등,⁽⁸⁾ Haiping 등,⁽⁹⁾ Yoon 등⁽¹⁰⁾은 0.1에서 3까지 다양한 분사비(M)에 따른 횡방향 유동에 대한 연구를 수행하여 배열 충돌제트에서 횡방향 유동이 상류영역에서 열전달에 좋지 못한 영향을 끼치는 것으로 보고하였다. Rhee 등⁽¹¹⁾은 충돌제트/유출냉각에서 횡방향 유동이 존재하는 경우, 횡방향 유동의 유량이 증가함에 따라 충돌제트에 의한 열전달이 감소되면서 유출홀간의 사이영역에서 낮은 열/물질전달 분포가 형성됨을 보였다.

횡방향 유동으로 발생하는 열전달의 감소를 해

결하기 위해 Rhee 등⁽¹²⁾은 충돌제트/유출냉각 시스템에 다양한 요철(rib turbulators)을 설치하여 벽제트를 횡방향 유동으로 보호함으로써 열전달이 향상됨을 보고하였다. 또한, Hong 등⁽¹³⁾은 원형핀(circular pin fin)을 설치하여 높은 분사비($M=1.5$)에서 평균 열전달계수가 16~22% 향상됨을 보였다. 그러나, 이러한 원형핀과 같은 구조물 설치하는 상대적으로 채널 내의 높은 압력강하를 수반하게 된다. 그러므로 압력강하의 증가를 최대한 줄이면서도 높은 열전달 특성을 얻을 수 있는 냉각방법에 대한 연구가 필요하다.

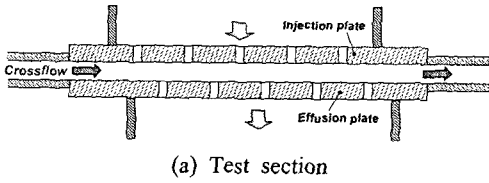
따라서, 본 연구에서는 횡방향 유동에 의해 발생하는 낮은 열전달 영역을 감소시켜 보다 균일한 냉각성능을 얻으면서 횡방향 유동의 방해줄여 채널 내의 압력강하를 최소화하기 위해 원형가이드를 분사홀에 적용하였다. 설치된 원형가이드 길이와 횡방향 유동 유량의 변화에 따른 열/물질전달 특성의 변화를 살펴보았으며 동시에 원형가이드 설치에 따른 채널 내에 발생하는 압력손실도 함께 고찰하였다. 이를 위해 본 연구에서는 압력측정과 동시에 열/물질전달 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법을 이용하였다.

2. 실험장치 및 방법

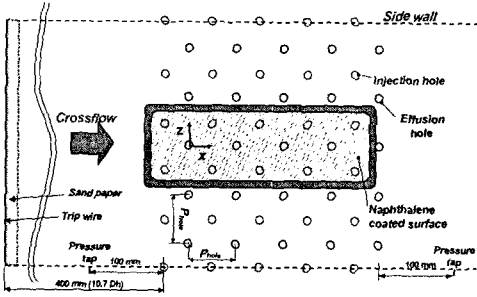
2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 분사부, 유출부, 횡방향 유동부로 구성되며 실험장치의 자세한 구성 및 사양은 Rhee 등⁽¹¹⁾에 제시된 바와 같다.

Fig. 1은 시험부 및 유출판(effusion plate)의 개략도이다. 본 연구에서는 연소실 내벽과 베인 또는 블레이드의 중심영역(midcore)에 적용되는 충돌제트/유출냉각을 모사하기 위하여 Fig. 1(a)와 같이 시험부는 윗면에 분사판, 아래 부분에 유출판을 설치하고 그 사이에 횡방향 유동이 지나는 덕트를 설치하였다. 이 때, 덕트의 단면은 $300 \text{ mm}(W_D) \times 20 \text{ mm}(H_D)$ 이며, 수력직경(D_h)은 37.5 mm 이다. 균일한 횡방향 유동을 얻기 위해 면적비 6:1인 수축부를 설치하였으며 덕트의 입구에서 첫 분사홀 열까지의 거리는 $400 \text{ mm}(10.7D_h)$ 에 해당된다. 또한, 덕트입구부에 와이어(trip wire)와 사포(sand paper)를 설치하여 측정영역에서 완전 발달된 난류유동을 얻었으며 본 실험에서는 25°C 의 공기가 작동유체로 사용되었다.



(a) Test section



(b) Top view of effusion plate

Fig. 1 Schematic view of test section

본 연구에서는 유출판 외부에서의 유동의 영향을 고려하지 않았다. 이는 Cho 등⁽¹⁴⁾에 의해 보고된 바와 같이 유출판 내부표면에서의 열/물질전달 계수는 유출판 외부에서의 횡방향 유동(주유동)에 의한 영향을 받지 않기 때문이다.

Fig. 1(b)는 시험부에서 유출판의 개략도를 나타내는 것으로 국소 열/물질전달 계수를 측정하기 위하여 나프탈렌이 주조된 시험시편을 유출판에 설치하였다. 이 때, 시험시편은 총 4개의 유출홀을 갖도록 하였으며 코팅되는 나프탈렌의 면적은 $8.4d \times 28d$ 에 해당된다.

분사홀과 유출홀의 직경은 10 mm이며, 판의 높이는 20 mm($t/d=2.0$)이다. 분사판과 유출판은 각각 사각배열인 25(5×5)개의 홀을 갖으며, 홀 직경 대 간격(P_{hole}/d)은 6.0이다. 이 때, 분사판과 유출판의 홀 배열은 엇갈림 배열(staggered array)이 되도록 하였다.

Fig. 2는 분사판에 원형가이드가 설치된 개략도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 외경(D_{out})과 내경(D_{in})이 각각 14 mm와 10 mm인 원형가이드를 설치하였으며 가이드의 길이(L)는 10 mm, 15 mm로 2가지 경우를 고려하였다. 따라서, 원형가이드 설치로 인한 충돌면과 실제 분사홀과의 거리(H/d)는 1.0과 0.5에 해당되며 원형가이드가 설치되지 않은 경우의 충돌면과 분사홀과의 거리는 2.0이다. 각각의 원형가이드 경우를 CG10과 CG15로 명명하였다.

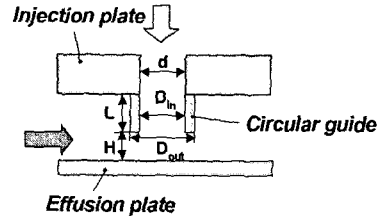


Fig. 2 Schematic view of circular guide

본 연구에서는 채널 내에 발생하는 압력강하를 측정하기 위해 첫 번째 분사홀과 마지막 유출홀로부터 각각 100 mm 떨어진 측면 벽에 압력탭을 설치하였다[Fig. 1(b)]. 또한, 충돌/유출에 따른 압력강하를 측정하기 위해 분사 챔버와 유출 챔버에도 압력탭을 설치한 후, 차압 센서(LPE 9145 model, Druck)로 압력강하를 측정하였다.

2.2 작동 조건

본 연구에서는 초기 횡방향 유동의 영향을 고찰하기 위해 분사제트의 유량을 일정하게 유지하고 이에 대한 횡방향 유동의 유량을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이 때, 횡방향 유동과 분사제트의 유량 비를 분사비라고 하였으며, 다음과 같이 정의된다.

$$M = Q_c / Q_j \quad (1)$$

원형편이 설치된 경우 분사비를 0.5에서 1.5까지 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이 때, 덕트의 수력직경을 기준으로 한 횡방향 유동의 Reynolds 수는 $Re_{Dh}=6,000 \sim 18,000$ 에 해당한다.

분사비를 변화시키기 위하여 본 연구에서는 분사제트의 총 유량과 유출홀을 통해 나가는 유량을 홀 직경 기준 Reynolds 수 $Re_d=10,000$ 으로 일정하게 유지하고, 횡방향 유동의 유량을 변화시켰다.

2.3 열/물질전달 계수

본 연구에서 국소 열/물질전달 특성을 고찰하기 위하여 나프탈렌 승화법을 이용하였으며 실험에서 얻어진 물질전달 계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = h_m d / D_{naph} \quad (2)$$

여기서, 나프탈렌의 물질확산계수(D_{naph})와 국소 물질전달계수(h_m)의 수식은 Goldstein과 Cho⁽¹⁵⁾가 제시된 바와 같다. 앞에서 계산된 물질전달 계수

는 Eckert⁽¹⁶⁾가 제시한 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여 열전달 계수로 전환할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$Nu/Sh = (Pr/Sc)^{0.4} \quad (3)$$

실험은 상온에서 이루어졌으며, 25°C 기준으로 $(Pr/Sc)^{0.4}=0.624$ 에 해당된다. 따라서, 본 실험에서 얻어진 100의 Sh는 62.4의 Nu로 환산되게 된다.

측정된 실험결과의 오차해석은 Kline과 McClintock⁽¹⁷⁾이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 전체적으로 $\pm 7.1\%$ 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국소 열/물질전달 특성

3.1.1 원형가이드 설치에 따른 영향

Fig. 3은 충돌제트/유출냉각에서 원형가이드가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우($M=1.0$), 열/물질전달 계수 분포로써 흰색의 원(점선)과 검은색의 원(실선)은 각각 분사홀의 투영된 위치와 유출홀을 의미한다.

원형가이드가 설치되지 않은 경우[Fig. 3(a)], 초기 횡방향 유동에 의해 분사된 제트의 정체영역(stagnation region)은 하류방향으로 치우쳐 비대칭적인 열/물질전달 분포가 나타난다. 또한, 벽제트(wall jet)도 횡방향 유동에 의해 하류방향으로 쓸려가면서 유출홀 사이에 열/물질전달 계수가 낮은 영역이 형성된다.

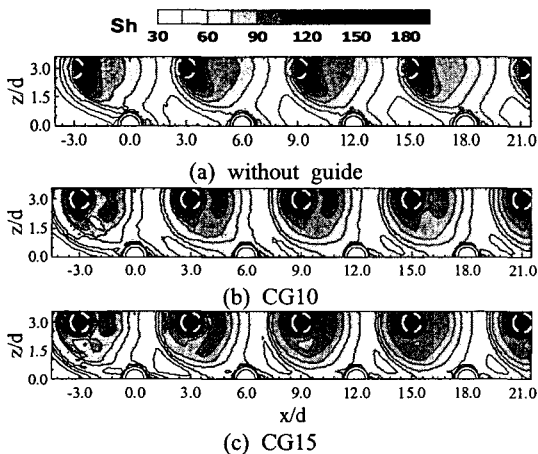


Fig. 3 Contour plots of Sh for various cases with circular guide at $M=1.0$

Fig. 3(b)와 3(c)는 각각 원형가이드가 설치된 경우로 정체영역이 하류로 이동되지 않고 분사홀 중심($x/d=3, 3, 9, 15, 21$)에 형성되면서 정체점을 기준으로 상류영역으로도 높은 열/물질전달 영역이 나타난다. 또한, 벽제트도 측면방향(z 방향)으로 잘 퍼져나가기 때문에 유출홀 사이의 낮은 열/물질전달 영역이 감소되면서 전체적으로 보다 균일한 열/물질전달 분포가 나타난다. 이는 원형가이드 설치로 채널 내에서 분사된 유동과 횡방향 유동이 충돌하는 면적을 줄여줌으로써 분사제트에 대한 횡방향 유동의 영향이 크게 감소되었기 때문이다.

Fig. 4는 국소적인 열/물질전달 특성을 파악하기 위해 분사비 $M=1.0$ 일 때 $6.0 \leq x/d \leq 21.0$ 구간에 대해서 $z/d=3.0$ 과 0.0에서의 국소적인 Sh 분포를 나타낸 것이다.

분사홀 중심이 위치하는 $z/d=3.0$ [Fig. 4(a)]에서 원형가이드 설치여부에 따라 국소적인 Sh값이 크게 달라짐을 볼 수 있다. 원형가이드가 설치되지 않은 경우에는 횡방향 유동이 분사되는 유동을 밀어내면서 정체점이 분사홀 중심에서($x/d=9, 15$) 약 0.5d정도 하류방향으로 이동된다. 또한, 횡

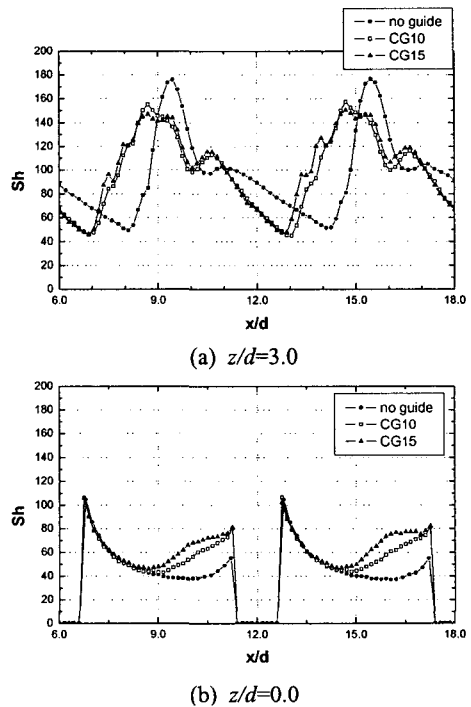


Fig. 4 Local plots of Sh for various cases with circular guide at $M=1.0$

방향 유동과 분사된 제트와의 상호간섭이 커지면서 층돌제트의 난류강도 증가로 인해 높은 극대값이 나타난다. 하지만 원형가이드가 설치된 경우에는 분사되는 제트와 횡방향 유동과의 간섭이 크게 줄어들기 때문에 정체점의 위치는 분사홀 중심에 그대로 유지되면서 상대적으로 작은 극대값을 형성하게 된다. 정체점으로부터 $1.5d$ 떨어진 하류영역에서는 난류로의 천이에 의한 2차 극대값이 뚜렷하게 나타난다. 정체점 상류영역에서는 상대적으로 횡방향 유동의 영향을 받기 때문에 2차 극대값이 감소 또는 사라지면서 보다 급격히 감소되는 열/물질전달 분포가 형성된다. 그러나 원형가이드가 없는 경우에 비해 정체점의 상류영역은 매우 높고 균일한 열/물질전달이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 유출홀이 설치된 $z/d=0.0$ 의 국소적인 Sh 분포로 이 때, Sh가 0인 지점은 설치된 유출홀의 위치를 의미한다.

유출홀의 끝단영역($x/d=6.5, 12.5$)에서는 모든 경우에 동일하게 유출유동의 층돌 및 가속으로 인한 극대값이 나타나게 된다.⁽¹⁸⁾ 이후영역에서는 유동이 재발달하면서 단조감소하는 분포를 갖게 된다. 하지만, 유출홀간의 중간영역($x/d=9, 15$)에서부터 원형가이드의 설치에 따른 차이가 발생된다. 원형가이드가 설치되지 않은 경우에는 대부분의 벽제트가 유출홀 영역($z/d=0.0$)까지 발달하지 못하고 하류영역으로 밀려나가기 때문에 낮은 Sh 분포가 유지된 후, 유출홀 전단영역($x/d=11.5, 17.5$)에서 유출유동의 가속으로 약하게 상승하게 된다.

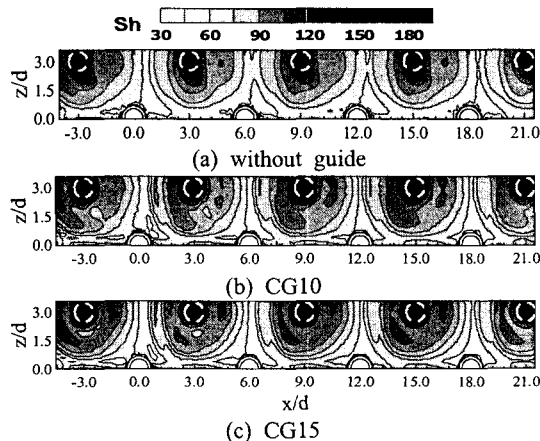


Fig. 5 Contour plots of Sh for various cases with circular guide at $M=0.5$

그러나 원형가이드가 설치된 경우에는 벽제트에 대한 횡방향 유동 영향의 감소로 벽제트가 유출홀 영역($z/d=0.0$)으로 잘 발달해 가면서 유출홀 중간영역부터 상대적으로 높은 열/물질전달 분포를 형성하게 된다. 이러한 경향은 분사제트의 보호효과가 증가된 CG15 경우에 보다 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다.

3.1.2 분사비 변화에 따른 영향

Fig. 5는 분사비(횡방향 유동의 유량)가 작은 경우($M=0.5$)에 대한 열/물질전달 분포를 나타낸 것이다. 분사비가 작은 경우 분사제트에 대한 횡방향 유동에 의한 영향이 감소되기 때문에 원형가이드 설치에 관계없이 $M=1.0$ (Fig. 3)에 비해 보다 균일한 열/물질전달 분포가 형성된다. 원형가이드가 설치된 경우에는 횡방향 유동의 영향이 더욱더 줄어들기 때문에 2차 극대영역과 함께 유출홀 영역($z/d=0.0$)에서도 벽제트간의 간섭에 의한 증가된 열/물질전달 분포가 나타난다.

Fig. 6은 $z/d=3.0$ 에서의 국소적인 Sh값으로 원형가이드가 없는 경우는 $M=1.0$ [Fig. 4(a)]과 동일하게 횡방향 유동과의 간섭으로 인해 높은 1차 극대값을 갖게 된다. 원형가이드가 설치된 경우는 상대적으로 낮은 정체값을 갖지만 전체적으로 대칭적인 분포가 나타난다. 특히, CG15 경우에 높은 2차 극대값이 형성됨을 볼 수 있다. 이는 기존의 단일층돌제트 결과⁽¹⁹⁾에서와 같이 분사홀과 층돌면간의 거리(H/d) 감소에 따라 난류로 천이되는 영역에서의 난류강도 증가에 기인한다. 또한, 벽제트간의 상호간섭에 의한 2차 와류의 발생⁽⁴⁾으로 3차 극대값이 형성되는데 위치는 횡방향 유동에 의해 분사홀간 중간위치($x/d=6, 12$)에서 하류방향으로 이동되어 나타남을 볼 수 있다.

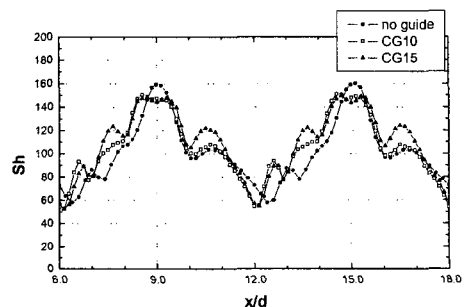


Fig. 6 Local plots of Sh for various cases with circular guide at $M=0.5$ ($z/d=3.0$)

분사비가 큰 경우($M=1.5$)에는 횡방향 유동의 영향이 크게 증가되었기 때문에 원형가이드가 없는 경우[Fig. 7(a)]에는 대부분의 증돌체트가 하류 방향으로 크게 쏠려 나가면서 전체적으로 열/물질전달이 감소하게 된다. 이에 비해 원형가이드가 설치된 경우에는 분사제트에 대한 횡방향 유동의 영향이 크게 감소되기 때문에 상대적으로 높고 균일한 열/물질전달 분포가 나타난다. 하지만 정체점을 기준으로 상류영역과 측면으로 퍼져 나가는 벽제트는 증가된 횡방향 유동의 영향을 받게 되므로 분사비가 작은 $M=0.5$ (Fig. 5)에 비해서는 낮은 열/물질전달 분포가 형성됨을 볼 수 있다.

Fig. 8은 $z/d=3.0$ 에서의 국소적인 Sh 분포로 원형가이드가 설치되지 않은 경우에는 횡방향 유동의 큰 증가로 인해 극대값은 $M \leq 1.0$ (Figs. 4, 6)에 비해 감소되고 $1d$ 이상 하류방향으로 이동된다.

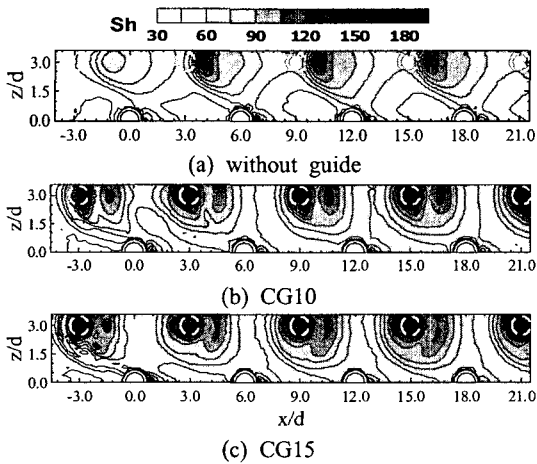


Fig. 7 Contour plots of Sh for various cases with circular guide at $M=1.5$

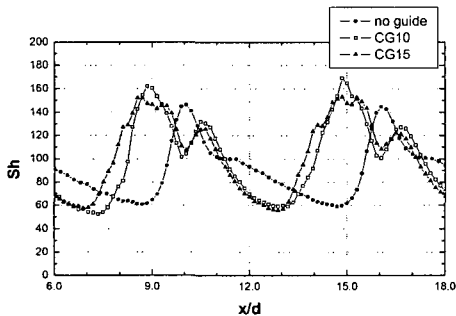


Fig. 8 Local plots of Sh for various cases with circular guide at $M=1.5$ ($z/d=3.0$)

원형가이드가 설치된 경우에는 분사비 증가에 상관없이 정체값과 위치가 일정하게 유지되며 정체점 하류영역에서도 여전히 2차 극대값이 형성되고 있음을 볼 수 있다. CG10 경우에는 횡방향 유동에 의한 난류강도 증가로 정체값이 다소 증가하게 되나 CG15에 비해 정체점 상류영역에서 열/물질전달 값이 감소됨을 볼 수 있다.

3.2 평균 열/물질전달 특성

본 연구에서 수행된 모든 경우에 대한 면적 평균 열/물질전달 계수 값을 Fig. 9에 나타내었다. 이때, 면적평균을 위한 구간은 $-3.0 \leq x/d \leq 21.0$, $0.0 \leq z/d \leq 3.0$ 이다. 또한, 기존의 냉각방법인 원형핀이 설치된 결과와 비교를 하기 위해 원형핀에 대한 결과⁽¹³⁾도 함께 도시하였다.

원형가이드가 설치되지 않은 경우, 분사비 증가에 따라 횡방향 유동의 영향이 커져서 평균 열/물질전달 값이 크게 감소하게 된다. 원형가이드가 설치된 경우에는 분사비가 0.5에서 1.0으로 증가함에 따라 평균 Sh값은 감소되지만 분사비가 1.5인 경우에는 $M=1.0$ 인 경우와 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러므로 분사비가 1.5인 경우에, 원형가이드가 설치되지 않은 경우에 비해 평균 열/물질전달 값이 26~30% 향상됨을 볼 수 있다. 따라서, 분사비 증가시 원형가이드 설치에 따른 열/물질전달 상승효과가 커짐을 알 수 있다. 또한, 모든 분사비에 대해 CG15 경우가 CG10에 비해 높은 평균 Sh값이 얻어지는데 이는 횡방향 유동 영향의 감소와 함께 H/d의 감소에 따른 2차 극대값 증가에 기인한다.

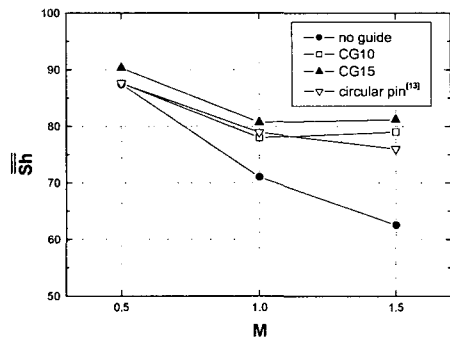


Fig. 9 Overall average Sh for various cases with different blowing ratios

그림에서 비교되는 바와 같이, 원형가이드 설치는 기존의 냉각방법인 원형핀 설치된 경우와 유사한 평균 열/물질전달 값이 얻어지며 높은 분사비 $M=1.5$ 인 경우에는 보다 증가된 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

3.3 압력강하 특성

본 연구에서는 설치된 원형가이드로 발생하는 채널 내의 압력강하를 평가하기 위하여 압력을 측정하여 Table 1에 제시하였다. Fig. 10은 채널 내에서 발생하는 압력강하율을 무차원으로 나타낸 것으로 채널 내에서 발생하는 압력강하(ΔP_{cross})를 유출 챔버와 분사 챔버 사이에서 발생하는 압력강하(ΔP_{jet})로 나누었다. 또한, 원형핀에 대한 압력강하율도 함께 제시하였다.

표와 그림에서 볼 수 있듯이, 분사비(횡방향 유동 유량) 증가에 따라 채널 내에서 발생하는 압력강하는 커지게 된다. 원형가이드 설치로 인해 원형가이드가 설치되지 않은 경우에 비해 약 1.5~2.0배 채널 내의 압력손실이 증가됨을 볼 수 있다. 하지만 원형핀이 채널 내에 설치된 경우에 비해 상대적으로 낮은 압력강하가 발생된다.

Table 1 Pressure drop for impingement/effusion cooling at various cases (Pa)

	no guide		CG10		CG15		circular pin	
	ΔP_{jet}	ΔP_{cross}	ΔP_{jet}	ΔP_{cross}	ΔP_{jet}	ΔP_{cross}	ΔP_{jet}	ΔP_{cross}
$M=0.5$	472	24	510	39	522	43	506	72
$M=1.0$	483	32	516	57	527	68	536	147
$M=1.5$	498	48	543	95	546	108	562	251

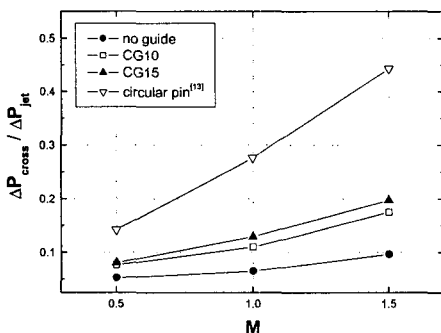


Fig. 10 Pressure drop ratios for various cases with different blowing ratios

이는 원형핀 설치로 발생하는 채널 내의 횡방향 유동에 대한 차단면적에 비해 원형가이드로 인한 채널 내의 차단면적이 크게 감소되었기 때문이다.

따라서, 기존의 원형핀 적용에 비해 원형가이드 설치로 인해 열/물질전달 향상과 함께 채널 내에서 상대적으로 낮은 압력강하를 발생시킴을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초기 횡방향 유동이 존재하는 증돌제트/유출냉각방법에서 원형가이드를 설치하여 유출판에서의 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 원형가이드 설치는 채널 내의 횡방향 유동으로부터 분사제트를 보호하여 균일한 정체영역을 형성하였다. 또한, 벽제트가 횡방향 유동에 의해 쓸려 나가는 현상이 줄어들게 되어 유출홀 사이의 낮은 열/물질전달 영역이 감소되었다.

(2) 원형가이드의 길이가 길어질수록 횡방향에 대한 분사제트의 보호효과 증가와 함께 분사홀과 증돌면간의 거리(H/d) 감소로 인한 난류강도 증가로 인해 열/물질전달이 향상되었다.

(3) 분사비가 증가될수록 횡방향 유동에 대한 원형가이드의 효과가 커져 원형가이드가 설치되지 않은 경우에 비해 상대적으로 큰 열/물질전달 분포가 나타났으며 $M=1.5$ 일 때, 평균 열/물질전달 값이 26-30%정도 상승됨을 확인하였다.

(4) 원형가이드 설치는 채널 내의 횡방향 유동에 대한 차단면적 증가로 인해 압력강하를 증가시킨다. 하지만 채널 내에서의 횡방향 유동의 방해를 최소화하기 때문에 기존의 개선방법인 원형핀 설치 경우에 비해 압력강하를 크게 줄일 수 있다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업기술개발사업의 지원에 의한 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," *J. 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," *J. 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," *J. 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) Yoon, P. H., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2001, "Flow and Heat/Mass Transfer Characteristics of Arrays of Impingement Jets with Effusion Holes," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 25, No. 11, pp. 1606~1615.
- (7) Metzger, D. E. and Korstad, R. J., 1992, "Effects of Cross flow in Impingement Heat Transfer," *J. of Engineering for Power*, Vol. 94, pp. 35~41.
- (8) Florschuetz, L. W., Metzger, D. E. and Su, C. C., 1984, "Heat Transfer Characteristics for Jet Array Impingement With Initial Crossflow," *J. of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 34~41.
- (9) 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*.
- (10) Yoon, P. H., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2000, "Effect of Arrays of Impinging Jet with Crossflow on Heat/Mass Transfer," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 24, No. 2, pp. 195~203.
- (11) Rhee, D. H., Choi, J. H. and Cho, H. H., 2002, "Flow and Heat (Mass) Transfer Characteristics in an Impingement/Effusion Cooling System with Crossflow," *J. of Turbomachinery*, Vol. 125, pp. 74~82.
- (12) Rhee, D. H., Nam, Y. W. and Cho, H. H., "Heat/Mass Transfer Characteristics on Rib-roughened Surface for Impingement/Effusion Cooling System with Initial Crossflow," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 28, No. 3, pp. 338~348.
- (13) Hong, S. K., Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2005, "Heat/Mass Transfer on Effusion Plate with Circular Pin Fins for Impingement/Effusion Cooling System with Intial Crossflow," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 7, pp. 828~836.
- (14) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1995, "Heat (Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness with Injection Through Discrete Holes Part I: Within Holes and on the Back Surface," *J. of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 440~450.
- (15) 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.
- (16) Eckert, E. R. G., 1976, "Analogies to Heat Transfer Processes," in *Measurements in Heat Transfer*, ed. Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., pp. 397~423, Hemisphere Pub., New York.
- (17) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (18) Goldstein, R. J., Cho, H. H. and Jabbari, M. Y., 1997, "Effect of Plenum Crossflow on Heat (Mass) Transfer Near and Within the Entrance of Film Cooling Holes," *J. of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 761~769.
- (19) Lytle, D. and Webb, B. W., 1994, "Air Jet Impingement Heat Transfer at Nozzle-plate Spacing," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 12, pp. 1687~1697.