

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.4.283

경사제트에 따른 충돌제트/유출냉각에서 열/물질전달 특성

홍성국* · 이동호** · 조형희†
(2007년11월 2일 접수, 2008년 1월 7일 심사완료)

Effect of Inclined Jet on Heat/Mass Transfer for Impingement/Effusion Cooling System

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

Key Words: Impingement/Effusion Cooling(충돌제트/유출냉각), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Inclined Jet(경사제트), Initial Crossflow(초기 횡방향 유동)

Abstract

An experimental investigation was conducted to investigate the heat/mass transfer for impingement/effusion cooling system with inclined jet. Jets with inclined angle of 60 are applied to impingement/effusion cooling. At the jet Reynolds number of 10,000, the experiments were carried out for blowing ratios ranging from 0.0 to 1.5. The local heat/mass transfer coefficients on the effusion plate are measured using a naphthalene sublimation method. The result indicates that the inclined jet causes the non-uniform and low heat/mass transfer compared to the vertical jet. At stagnation region, the peak position is shifted from the geometrical center of injection hole due to Coanda effect and its level is higher than that of vertical jet due to increase in turbulence intensity by steep velocity gradient near the stagnation region. Further, the secondary peak region disappears because the interaction between adjacent wall jets weakens. When the initial crossflow occurs, the distorted heat/mass transfer pattern appears. As the blowing ratio (crossflow rate) increases, the heat/mass transfer distributions become similar to those of the vertical jet. This is because the effect of crossflow is dominant compared to that of inclined jet under high blowing ratio ($M \geq 1.0$). At low blowing ratio ($M \leq 0.5$), averaged Sh value is 10% lower than that of vertical jet, whereas its value at high blowing ratio ($M \geq 1.0$) is similar to that of vertical jet.

기호설명

d : 분사홀 및 유출홀의 내경
 D_h : 덕트 수력직경
 D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌 물질확산계수
 H : 분사홀과 유출판 사이의 간격
 h_m : 물질전달계수
 M : 분사비, Q_c/Q_i
 Nu : Nusselt 수

Pr : Prandtl 수
 P_{hole} : 분사홀 또는 유출홀 사이의 간격
 Q_c : 횡방향 유동의 유량
 Q_i : 분사제트의 유량
 Re_d : Reynolds 수, $Re_d = \rho V_i d / \mu$
 Re_{Dh} : 덕트수력직경에 기초한 Reynolds 수
 Sc : Schmidt 수
 Sh : Sherwood 수, 식 (2)
 \overline{Sh} : 전체 평균 Sherwood 수
 t : 분사판 두께
 V_c : 횡방향 유동의 유속
 V_i : 분사제트의 유속
 W : 덕트 유로의 폭
 x, z : 유출홀 중심으로부터의 좌표 (Fig. 1(b))

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
 E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr
 TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159
 * 회원, 연세대학교
 ** 회원, 한국항공우주연구원

α : 충돌면과 분사홀과의 경사각도

1. 서론

충돌제트/유출냉각(impingement/effusion cooling)은 충돌제트냉각과 막냉각을 결합한 냉각성능이 매우 높은 복합냉각기법의 하나로써 고온의 연소 가스에 노출되는 가스터빈의 연소실 내벽 또는 터빈 블레이드 냉각에 사용되어진다. 이러한 충돌제트/유출 냉각기법에서 적용되는 분사제트는 실제 응용 상에 있어서 표면에 수직한 경우뿐만 아니라 경사 각도를 갖고 분사되는 경우를 볼 수 있다.^(1,2) 그러나 대부분의 충돌제트/유출 냉각기법의 연구들은 수직제트에 대해서만 분사홀간의 거리나 분사홀과 충돌면간의 거리에 따른 열전달 특성 변화에 대해 고찰하였다.⁽³⁻⁶⁾ 다만, 경사제트의 연구는 단일제트가 고려된 경우에만 일부 이루어졌다.^(7,8)

또한, 실제 충돌/유출시스템에서는 상류영역 냉각 및 냉각유동의 원활한 공급을 위해 시스템 내부에 초기 횡방향 유동이 존재하여 충돌/유출시스템의 상단 첫 번째 분사제트부터 횡방향 유동의 영향을 받게 된다. 이러한 경우, 기존의 유출홀 사이영역에서 낮은 열전달 영역이 발생되므로⁽⁹⁾ 이를 감소시키기 위한 연구들이 진행되어 왔다. Rhee 등⁽¹⁰⁾이나 Hong 등⁽¹¹⁾이 요철이나 원형편을 설치하여 유출홀 사이 영역에서의 열전달 특성이 개선됨을 보였다. 이러한 유출홀 사이의 낮은 열전달 영역을 감소시키기 위한 방법으로 분사제트를 종방향으로 향하는 경사제트를 적용하여 분사된 제트가 보다 넓게 유출홀 주변영역으로 퍼지도록 하는 것도 하나의 방법으로 고려될 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 충돌제트/유출 냉각기법에서 경사제트가 적용될 때, 기본적으로 열전달 특성이 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 또한, 초기 횡방향 유동이 존재하는 경우에 경사제트와 횡방향 유동과의 상호간섭에 따른 열전달 특성에 대해 고찰하였으며 수직제트가 적용된 경우와 비교 검토하였다. 본 논문에서는 나프탈렌 승화법을 사용하여 경사제트 적용에 따른 충돌/유출면에서 발생하는 국소적인 열/물질전달 계수를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

시험부 및 유출판(effusion plate)의 개략도는 Fig. 1과 같다. 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 첫 번째 분사제트부터 횡방향 유동의 영향을 받도록 하기 위해 초기 횡방향 유동이 유입되도록 상류 덕트를 시험부와 연결하였다. 이 때, 덕트의 단면은 300 mm(W) × 20 mm(H)이며, 수력직경(D_h)은 37.5 mm이다. 덕트의 입구에서 첫 분사홀 열까지의 거리는 400 mm ($10.7D_h$)으로 균일한 횡방향 유동을 얻기 위해 면적비 6:1인 수축부를 설치하였다. 이 때, 덕트입구부에 와이어(trip wire)와 사포(sand paper)를 설치하여 측정영역에서 완전 발달된 난류유동을 얻었다. 본 연구에 사용된 충돌/유출기법 실험장치의 자세한 구성 및 사양은 Rhee 등⁽⁹⁾에 제시된 바와 같다.

Fig. 1(b)는 시험부에서 유출판의 개략도로, 국소 열/물질전달 계수를 측정하기 위하여 나프탈렌이 주조된 시험시편을 유출판에 설치하였다. 이 때, 총 4개의 유출홀이 설치된 시험시편의 나프탈렌 면적은 $8.4d \times 28d$ 에 해당된다.

분사홀과 유출홀의 직경은 10 mm이며, 판의

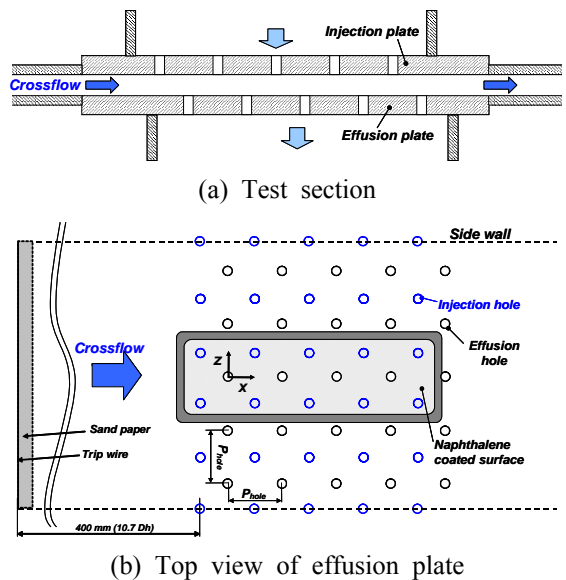


Fig. 1 Schematic view of test section

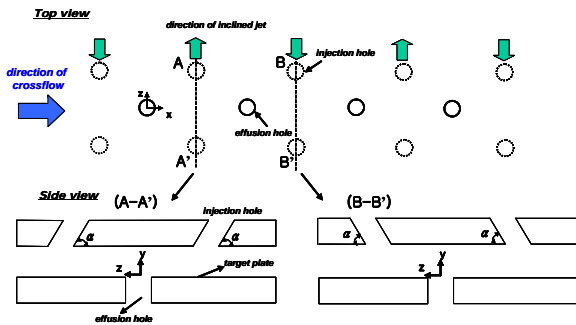


Fig. 2 Schematic view of inclined jet

높이는 20 mm($t/d = 2.0$)이고 분사홀과 유출판 사이의 높이비(H/d)는 2.0이다. 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 경사제트가 적용된 분사판의 단면도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 기존 경사제트 연구들^(7,8)에서 제시되고 있는 일반적인 각도이며 횡방향 유동 존재시, 유출홀 영역으로 분사된 제트 유동이 넓게 퍼질 수 있는 조건으로 판단되는 60도를 경사각도로 선정하였다. 따라서, 경사제트는 분사홀의 중심과 분사판의 출구면이 60도의 각(α)을 형성하여 기하학적으로 분사제트와 층돌면이 60도를 이루게 된다. 이 때, 적용된 경사제트는 덕트 하류방향(x방향)에 대해 종방향으로 설치하였으며 또한, 하류방향으로 진행되면서 서로 엇갈리도록 적용하여 이에 따른 횡방향 유동과 경사제트의 상호간섭에 따른 열전달 특성에 대해 살펴보았다.

2.2 실험조건

본 실험에서는 단순 경사제트에 따른 효과와 함께 초기 횡방향 유동의 영향을 고찰하기 위해 분사제트의 유량을 일정하게 유지하고 이에 대한 횡방향 유동의 유량을 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 이 때, 횡방향 유동과 분사제트의 유량비를 분사비라고 하였으며, 다음과 같이 정의된다.

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

분사비 0.5, 1.0, 1.5에 대해 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 분사

제트의 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 측정장치

열/물질전달 계수를 얻기 위해 시험시편의 나프탈렌층의 표면형상을 실험 전후에 측정하여 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정하였다. 이를 위해 접촉식 LVDT(Linear Variable Differential Transformer; LBB-375TA-020) 및 2차원 자동이송장치를 이용하였으며, 본 실험에서는 측정시편에서 총 7104 지점들을 측정하여 층돌/유출면에서의 국소적인 열/물질전달 계수 값을 얻었다. 이러한 측정 장치 및 방법에 대한 자세한 사양은 Rhee 등⁽⁹⁾에 제시된 바와 같다.

2.4 열/물질전달 계수

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

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

여기서, 나프탈렌의 물질확산계수(D_{naph})와 국소 물질전달계수(h_m)의 수식은 Goldstein과 Cho⁽¹²⁾가 제시된 바와 같다. 앞에서 계산된 물질전달 계수는 Eckert⁽¹³⁾가 제시한 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여 열전달 계수로 전환할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

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

본 실험은 상온에서 이루어졌으며, 25°C 기준으로 $(Pr/Sc)^{0.4} = 0.624$ 에 해당된다. 측정된 실험 결과의 오차해석은 Abernethy 등⁽¹⁴⁾이 제시하고 있는 방법으로 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, Sherwood 수에 대해 전체적으로 $\pm 7.1\%$ 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1 국소 열/물질전달 특성

3.1.1 경사 제트에 따른 영향

Fig. 3은 층돌제트/유출냉각에서 경사제트가 적

용된 경우와 기존 수직제트가 적용된 경우에 따른 열/물질전달 계수 분포로써 흰색의 원(점선)과 검은색의 원(실선)은 각각 출구 직전의 분사홀 위치와 유출홀을 의미한다. 수직제트 경우에는 열전

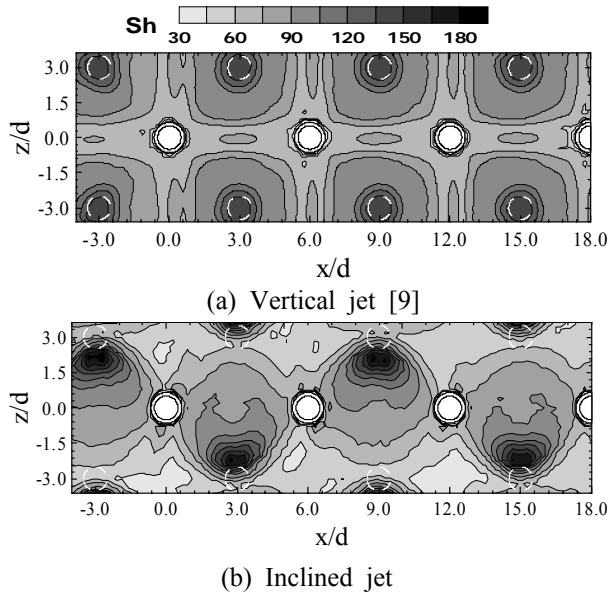


Fig. 3 Contour plots of Sh for impingement/effusion cooling with inclined jet at $M = 0.0$

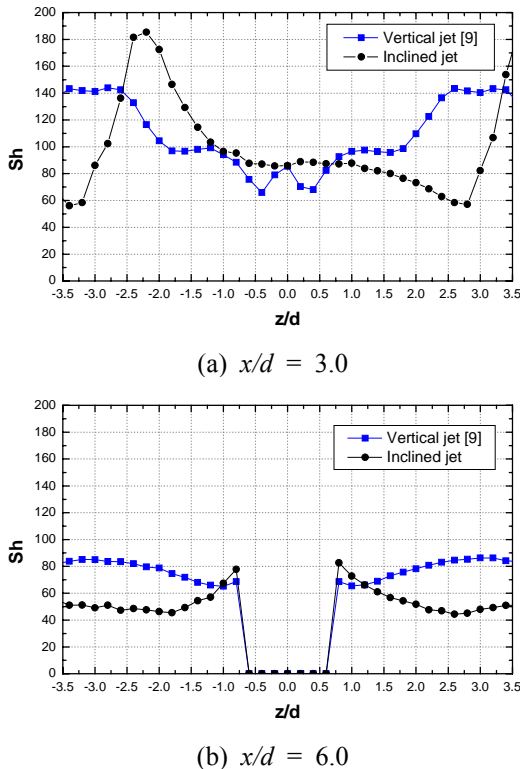


Fig. 4 Local plots of Sh for impingement/effusion cooling with inclined jet at $M = 0.0$

달 분포가 대칭적이고 균일한 특성이 나타나지만 경사제트가 적용된 경우에는 편향되는 제트유동 특성으로 인해 비대칭적인 열전달 특성이 뚜렷하게 나타난다. 또한, 정체영역에서 열/물질전달이 증가되는 대신 수직제트에서 형성되는 주변 제트와의 상호작용에 따른 2차 극대영역은 나타나지 않는다.

Fig. 4는 각각 두 번째 분사홀의 정체점과 유출홀 중심에 해당되는 $x/d = 3.0$ 과 $x/d = 6.0$ 에서의 열/물질전달 값을 나타낸 것이다. 정체점을 지나가는 지점($x/d = 3.0$)의 열/물질전달 값에서 수직제트와 뚜렷한 차이가 나타난다. 먼저, 극대값이 크게 증가되는데 이는 충돌면의 정체점을 기준으로 충돌제트유동의 방향 전환이 수직제트에 비해 더욱 급격하게 이루어지게 되므로 속도 구배 증가로 인해 정체점 근처에서 난류강도가 크게 증가되었기 때문이다. 또한, 경사각도로 형성되는 기하학적인 정체점 위치($z/d = -1.85$)를 기준으로 약 $0.4d$ 정도 이동되어 $z/d = -2.25$ 에 실제 정체점이 형성된다. 이는 코안다 효과(Coanda effect)에 의한 것으로 이러한 정체점의 특징은 기존 단일 경사제트의 결과^(7,8)들과 일치한다.

분사된 제트의 유동이 경사된 쪽으로 편향되기 때문에 정체점을 기준으로 불균일한 열전달 분포가 나타난다. 특히, 수직제트 경우에 제트간의 중간영역($z/d = 0.0$)에서 나타나는 추가적인 극대영역이 경사제트에서는 주변제트간의 상호간섭약화로 인해 발생되지 않는다. 이러한 주변 제트간의 상호간섭 감소특징은 유출홀을 포함하는 Fig. 4(b)에서도 나타난다. 따라서, 수직제트에서 $z/d = \pm 3.0$ 에서 높은 열/물질전달 특성이 나타나지만 경사제트에서는 상대적으로 낮은 열/물질전달 값이 형성된다. 다만, 유출홀 주변에서는 열/물질전달이 증가되는 특징을 보인다. 이는 유출홀로 빠져나가는 유동의 가속 및 교란으로 인한 유출유동^(5,9)의 영향에 더하여 경사제트의 경우, 편향된 벽제트 간의 상호간섭이 유출홀 주변에서 일부 발생되기 때문에 단순 유출유동 효과만 나타나는 수직제트에 비해 열/물질전달이 다소 증가되는 것으로 판단된다.

3.1.2 분사비 변화에 따른 영향

Fig. 5는 분사비 1.0에 해당되는 횡방향 유동이 존재하는 경우에서의 열/물질전달 분포이다. 수직제트와 경사제트 경우, 모두 횡방향 유동의 영향으로 전체적으로 하류방향으로 치우치는 열/물질

전달 분포를 형성하게 된다. 경사제트의 경우에는 일부 벽제트 유동이 유출홀간 사이영역($z/d \approx 0.0$)으로 발달해가지만 전체적으로 하류방향으로

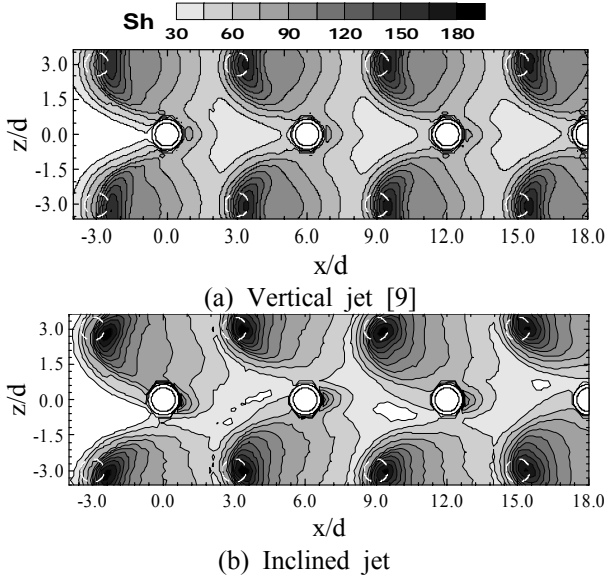
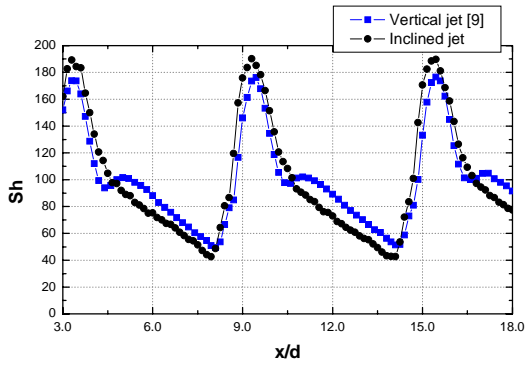
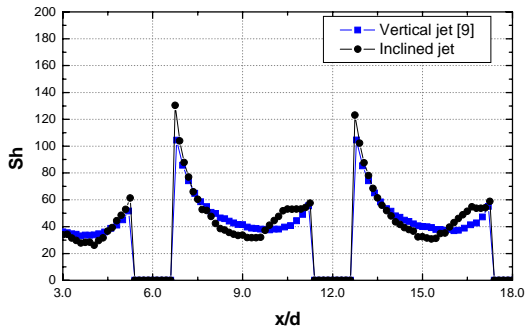


Fig. 5 Contour plots of Sh for impingement/effusion cooling with inclined jet at $M = 1.0$



(a) $z/d = 3.0$



(b) $z/d = 0.0$

Fig. 6 Local plots of Sh for impingement/effusion cooling with inclined jet at $M = 1.0$

쓸려나가게 된다. 따라서, 수직제트가 적용된 경우에서도 유출홀 사이에 낮은 열/물질전달 분포가 나타나며 결국, 상대적으로 종방향 경사제트의 적용을 통한 유출홀 사이영역 열/물질전달 개선효과는 크지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 특정위치에서의 극소적인 열/물질전달 값들을 나타낸 것이다. 수직제트의 경우, 분사된 제트와 횡방향 유동의 간섭으로 인한 난류강도 증가로 정체점의 값이 커지고 정체점 위치가 분사홀 중심위치($x/d = 3.0, 9.0, 15.0$)로부터 하류로 이동된다. 경사제트의 경우에도 정체점 이동은 유사하게 나타나지만 수직제트에 비해 다소 높은 극대값을 형성한다. 하지만 횡방향 유동이 존재하지 않는 경우와 유사한 극대값을 보이는데 횡방향 유동과 경사제트간의 상호간섭에 의한 열전달 증가량이 상대적으로 크지 않기 때문이다. 또한, 벽제트 유동이 편향되어서 발달해 나가기 때문에 정체점의 하류영역에서는 수직제트에 비해 낮은 열전달 특성이 나타난다.

Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이, 유출홀 끝단($x/d = 6.5, 12.5$) 영역에서는 유출유동의 가속 및 충돌로 인한 높은 극대값이 형성된 후, 단조 감소하는 열전달 분포가 나타난다. 한편, 유출홀 상단($x/d = 10.5, 16.5$) 영역에서 경사제트의 경우가 수직제트보다 상대적으로 높은 열전달 값을 갖는데 이는 편향된 벽제트 유동에 기인한다.

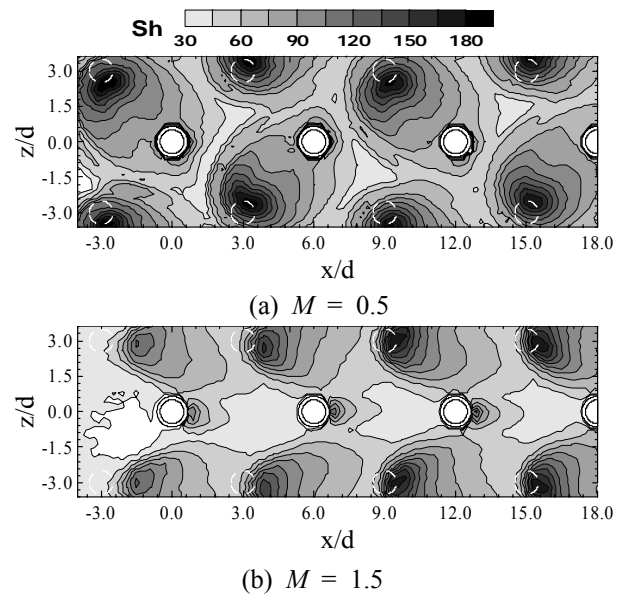


Fig. 7 Contour plots of Sh for impingement/effusion cooling with inclined jet at various blowing ratios

Fig. 7은 분사비(M)가 각각 0.5와 1.5인 경우에서의 열/물질전달 분포를 나타낸 것이다. $M = 0.5$ 인 경우[Fig. 7(a)]에는 횡방향 유동과의 충돌로 인해 대각선상의 유출홀 영역으로 퍼져나가는 열전달 분포가 형성된다. 따라서, 제트의 종방향 분사를 통해 유출홀 영역주변에서 국소적으로 열/물질전달이 증가되지만 주변 벽제트 유동간의 간섭이 크지 않으므로 분사홀간 사이영역에서 낮은 열전달 분포가 발생됨을 볼 수 있다. 그러나 횡방향 유동이 크게 증가된 경우 ($M = 1.5$)에는 앞서 언급한 $M = 1.0$ [Fig. 5(b)]인 경우와 같이 분사제트가 종방향으로 넓게 퍼져나가지 못하고 좁게 형성됨을 볼 수 있다. 즉, 경사제트의 영향은 거의 나타나지 않고 오직 횡방향 유동의 영향이 크게 미치면서 전체적인 열/물질전달 분포가 하류방향으로 치우치게 된다. 이러한 특징으로 인해 유출홀 사이에서 낮은 열/물질전달 영역이 확대됨을 확인할 수 있다.

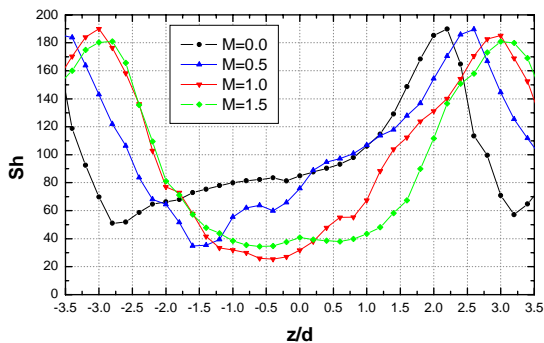


Fig. 8 Local plots of Sh for impingement/effusion cooling with inclined jet at various blowing ratios

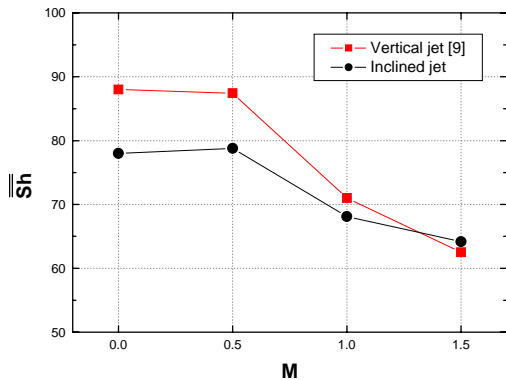


Fig. 9 Averaged Sh value at various blowing ratios

Fig. 8은 각각의 분사비에 따른 극대값이 형성된 지점에서의 국소적인 값을 비교한 것이다. 이때, 제시된 값은 세 번째 분사홀 영역($x/d \approx 9.0$)에서 얻어낸 것이다. 분사비가 증가될수록 정체점의 위치는 분사판의 출구직전 중심위치($z/d = 3.0$)로 이동되고 벽제트가 횡방향 유동에 의해 하류방향으로 흘러나가기 때문에 분사홀간의 사이영역에서 열/물질전달 분포가 저하되는 특징을 보인다. 결국, 분사비 1.0을 넘어서면서 횡방향 유동의 영향이 지배적임을 확인할 수 있다.

3.2 평균 열/물질전달 특성

본 연구에서 수행된 경사제트 경우에 대한 면적 평균된 열/물질전달 계수 값과 수직제트에 대한 값을 Fig. 9에 나타내었다. 이때, 면적평균을 위한 구간은 $-3.0 \leq x/d \leq 18.0$, $-3.0 \leq z/d \leq 3.0$ 이다.

횡방향 유동이 없는 경사제트의 경우에는 편향된 제트유동특성으로 인해 주변제트간의 상호간섭이 줄어들면서 2차 극대영역의 감소로 인해 평균 열/물질전달 값이 10% 낮아짐을 볼 수 있다. 또한, 횡방향 유동이 적은 경우($M = 0.5$)에도 이러한 평균값의 감소는 유사하게 나타난다. 그러나, 횡방향 유동이 증가될수록 경사제트의 영향보다는 횡방향 유동의 영향이 지배적으로 작용하여 평균 열/물질전달 값은 수직제트 경우와 유사해진다.

4. 결론

본 연구에서는 경사제트 적용에 따른 충돌제트/유출냉각방법에서 유출판에서의 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 정체영역에서는 단일경사제트에서 유사하게 정체점 이동 및 극대값의 증가현상이 나타나며 전체적으로 편향되는 열/물질전달 분포가 형성된다. 한편, 편향된 제트유동의 특성으로 수직으로 분사되는 배열제트경우에서 발생하는 2차 극대영역은 나타나지 않았다.

(2) 횡방향 유동이 존재하는 경우, 경사제트가 횡방향 유동과의 충돌로 인해 편향되는 열/물질전달 분포가 형성된다. 횡방향 유동(분사비)이 적은 경우에는 종방향으로 열전달 분포가 퍼지는 효과가 일부 나타나지만 횡방향 유동이 증가됨에

따라 종방향으로 퍼져나가는 경사제트의 효과보다는 횡방향 유동의 영향이 상대적으로 커져서 열/물질전달 분포가 횡방향의 하류영역으로 끌려가는 특징을 나타낸다. 따라서, 분사비가 높은 경우에는 경사제트 적용을 통한 종방향으로 열전달 분포가 넓게 퍼지게 하는 효과는 크지 않음을 확인하였다.

(3) 횡방향 유동이 존재하지 않거나 적은 경우에는 경사제트가 수직제트에 비해 평균열전달 값이 10% 정도 감소된다. 하지만 횡방향 유동이 증가되는 경우에는 경사제트의 영향보다는 횡방향 유동의 영향이 지배적이므로 평균 열/물질전달 값이 수직제트 경우와 유사해짐을 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 전력기반조성사업센터 주관 전력산업기술개발산업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Diane, L., Bernhard W., Jens Von W., Stefan D. and Roland L., 2007, "Heat Transfer Enhancement by Impingement Cooling in a Combustor Liner Heat Shield," IGTI 2007, ASME Paper No. GT2007-27908.
- (2) Ronald S. Bunker and Jeremy C. Bailey, 2005, "Turbine Blade Platform Impingement Cooling with Effects of Film Extraction and Roughness," IGTI 2005, ASME Paper No. GT2005-68415.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (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 KSME (B)*, Vol. 25, No. 11, pp. 1606~1615.
- (7) Golestein, R. J. and Franchett, M. E. 1988, "Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet," *J. of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 84~90.
- (8) Lim, K. B., Lee, C. H. and Lee, S. H., 2006, "A Study on the Heat Transfer Characteristics of Turbulent Round Jet Impinging on the Inclined Concave Surface Using Transient Liquid Crystal Method," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 30, No. 7, pp. 656~662.
- (9) Rhee, D. H., Choi, J. H. and Cho, H. H., 2002, "Flow and Heat (Mass) Transfer Characteristics in an Impingement/Effusion Cooling System with Cross flow," *J. of Turbomachinery*, Vol. 125, pp. 74~82.
- (10) 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 KSME(B)*, Vol. 28, No. 3, pp. 338~348.
- (11) 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 KSME (B)*, Vol. 29, No. 7, pp. 828~836.
- (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) 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.
- (14) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B. 1985, "Measurement Uncertainty," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.