충돌제트/유출냉각기법에서 횡방향유동이 열/물질전달에 미치는 영향

남 용 우* · 이 동 호* · 최 종 현* · 조 형 희†

Effect of Crossflow on Heat (Mass) Transfer of an Impingement/Effusion Cooling System

Yong Woo Nam, Dong Ho Rhee, Jong Hyun Choi and Hyung Hee Cho

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Impingement Cooling(충돌제트냉각), Effusion Cooling(유출냉각), Initial Crossflow(초기 횡방향유동), Heat and Mass Transfer Analogy(열전달과 물질전달 상사성)

Abstract

Two perforated plates are placed in parallel and staggered arrangements with a gap distance of 2 times of the hole diameter, and initial crossflow passes between the plates. Both the injection and effusion hole diameters are 10 mm, and the Reynolds number based on the hole diameter and hole-to-hole pitch are fixed to 10,000 and 6 times of the hole diameter, respectively. To investigate the effect of crossflow, the flow rate of crossflow is changed from 0.2 to 2 times of that of the impinging jet. A naphthalene sublimation method is used to determine the local heat/mass transfer coefficients on the upward facing surface of the effusion plate. With the initial crossflow, the heat/mass transfer rates on the effusion (target) plate decrease as the velocity of crossflow increases, since the crossflow induces the locally low transfer regions formed at the mid-way between the effusion holes. However, the impingement/effusion cooling with crossflow presents higher heat/mass transfer rates than the array jet impingement cooling with the same initial crossflow.

기 호 설 명

d : 분사홀, 유출홀의 내경
D_h : 수력직경
D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌의 물질확산계수
H : 분사판과 유출판 사이의 간격
h_m : 국소 물질전달계수, 식 (2)
I : 운동량비, $\rho_c V_c^{\ 2} / \rho_i V_i^{\ 2}$
$\dot{m}$: 단위면적당 나프탈렌 질량유속
M : 분사율, Q_c/Q_i
MR : 질량유량비, $\rho_c V_c / \rho_i V_i$
Nu : Nusselt 수
Pr : Prandtl 수
P : 홀사이의 간격
Q_c : 횡방향유동의 유량
Q_i : 분사제트의 유량
Re_d : Reynolds 수, $Re_d = \rho V_i d / \mu$
Re_{Dh} : 수력직경에 기초한 Reynolds 수
Sc : Schmidt 수
Sh : Sherwood 수, 식 (3)
$\overline{Sh}$: 전체 평균 Sherwood 수
t : 분사판의 두께
V_c : 횡방향유동의 유속
V_i : 분사제트의 유속

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

x, z : 유출홀 중심으로부터의 좌표 (Fig. 1(b))

그리스문자

Δy : 나프탈렌 승화깊이
$\Delta \tau$: 나프탈렌표면의 유동장 노출시간
ρ_c : 횡방향유동의 밀도
ρ_i : 분사제트의 밀도
ρ_s : 고체나프탈렌의 밀도
$\rho_{v,w}$: 나프탈렌표면에서의 나프탈렌 증기밀도
$\rho_{v,\infty}$: 분사제트의 나프탈렌 증기밀도

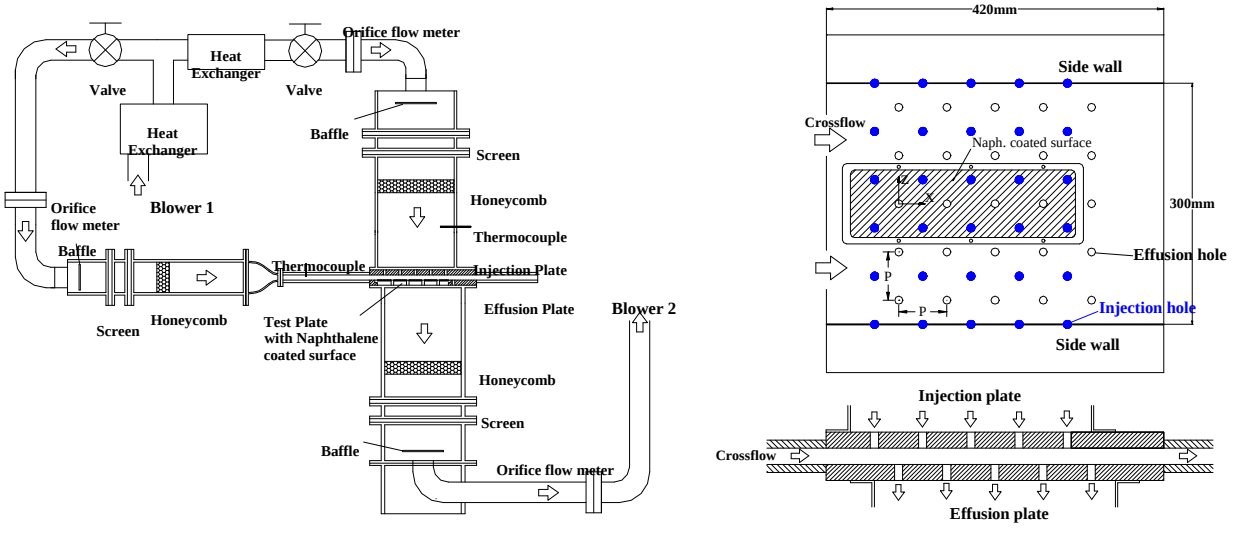
1. 서 론

가스터빈엔진의 열효율과 비추력은 터빈입구온도에 크게 좌우된다. 그러나 입구온도는 높은 벽면온도에 따른 재질의 강도저하와 높은 열응력 등으로부터 발생할 수 있는 터빈요소들의 구조적 결함으로 인해 제한된다. 따라서 벽면온도를 낮추기 위해 막냉각, 충돌제트냉각, 내부관 대류냉각 등의 다양한 냉각방법에 대한 연구가 이루어지고 있다. 최근에는 더 높은 냉각효율을 얻기 위해 복합냉각기술인 충돌제트/유출냉각기법에 대한 연구가 진행되고 있다. 충돌제트/유출냉각기법은 연소실이나 터빈블레이드와 같은 고온요소의 내부표면을 충돌제트를 이용하여 냉각시킨 후, 막냉각을 통하여 고온가스와 접촉하는 표면을 보호하는 방법으로써 충돌제트냉각과 막냉각의 효과를 동시에 얻을 수 있는 이점을 갖는다.

실제적으로 연소실이나 터빈블레이드의 내부유로에는 횡방향유동이 존재한다. 따라서 고온요소의 냉각성능을 향상시키기 위해서는 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각의 기본적인 열전달특성에 관한 정보가 필요하다.

횡방향유동의 영향에 관한 연구는 주로 유출홀이 없는 평판에서의 배열제트에 관한 것으로, Metzger와 Korstad[4] 그리고 Florschuetz 등[5]은 횡방향유동이 배열제트의 열전달 및 유동특성에 미치는 영향에 대하여 연구하여 초기 횡방향유동으로 인해 상류의 열전달율이 감소함을 보였으며, Haiping 등[6]은 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트의 유동 및 열전달특성을 수치적 방법으로 연구하였다. 또한, Cho 등[7]은 배열제트의 열전달특성에 있어서 횡방향유동의 영향에 관하여 연구하였고, 분사판에 유출홀이 있는 경우와 비교하였다.

열점(hot spot)의 발생을 막고 향상된 냉각성능을 유지하기 위해서는 전반적인 열전달특성 뿐 아니라 국소적인 열전달계수에 대한 정보가 필요하다.[8] 따라서 본 연구에서는 열/물질전달 사이의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각에 따른 유출판 내부 표면에서의 국소 열전달계수를 측정하였다. 나프탈렌 승화법은 열전달 실험에서의 전도 및 복사오차를 제거할 수 있는 장점을 갖으며, 나프탈렌 표면은 등온조건에, 그 외의 부분들은 단열



(a) Experimental apparatus (b) Hole arrangement

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus and hole arrangement

조건에 해당한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 시편

Fig. 1(a)는 실험장치 개략도를 나타낸 그림이다. 실험장치는 크게 분사부, 유출부, 횡방향유동부로 구성된다. 원하는 작동조건을 얻기 위하여 인버터로 조절되는 2개의 송풍기를 사용하였다. 송풍기 1(Blower 1)은 분사유동과 횡방향유동을 공급하며 각각의 유량은 밸브를 이용하여 조절한다. 측정부의 유동은 송풍기 2(Blower 2)에 의해 유출홀을 따라 흡입된다. 또한, 분사유동, 횡방향유동, 유출유동의 유량을 측정하기 위하여 각각의 유로에는 오리피스 유량계(orifice flowmeter)가 설치되었다. 각 플러넘의 온도는 T-type 열전대로 측정되며, 열교환기를 사용하여 실내온도와의 차를 0.2℃내로 유지하였다. 균일한 유동을 얻기 위해 각 플레넘(Plenum)에는 배플(baffle), 스크린(screen), 허니콤(honeycomb)이 설치되었다.

분사플레넘과 유출플레넘 사이에는 횡방향유동의 유로인 덕트가 존재하며, 송풍기 1을 이용하여 실내공기를 횡방향유동플러넘에 유입시키고 다시 덕트를 통해 외부로 배출시킨다. 횡방향유동덕트의 단면은 300 mm(W)×450 mm(H)이며, 수력직경(D_h)은 37.5 mm이다. 횡방향유동덕트의 입구에는 균일한 유동을 얻기 위해 면적비 6:1인 수축부가 존재하며, 횡방향유동덕트의 입구에서 첫 분사홀까지의 거리는 400 mm(10.7D_h)이다. 또한, 횡방향유동의 난류촉진을 위해 횡방향유동덕트의 입구부에 트립와이어(trip wire)와 사포(sand paper)를 설치하였다.

Fig. 1(b)는 좌표계와 분사홀, 유출홀의 배열을 나타낸다. 분사홀과 유출홀의 직경은 10 mm이며, 판의 두께는 20 mm(t/d=2.0)이다. 또한, 분사판과 유출판은 각각 사각배열인 25(5×5)개의 홀을 갖으며, 홀직경에 대한 홀간격의 비(P/d)는 6.0이다. 그리고 나프탈렌표면에서의 온도를 정확히 측정하기 위해 시편내에는 T-type 열전대가 설치되어 있다.

2.2 실험인자 및 작동조건

분사율은 분사제트와 횡방향유동의 유량비를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

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

본 실험은 분사율 0.2~2.0(Re_{Dh}=2,500~25,000) 범위의 다양한 분사율에 대해 수행되었다. 분사판과 유출판의 간격은 20 mm(H/d=2.0)이다. 분사홀과 유출홀을 통한 공기의 유량은 일정하게 유지하였으며, 분사홀과 유출홀을 통한 유동의 Reynolds 수(Re_d)는 10,000으로 고정하였다. 실험인자 및 작동조건의 자세한 내용은 Table 1에 요약되어 있다.

2.3 물질전달량 측정장치

열/물질전달계수를 계산하기 위해 자동 표면측정장치를 이용하며, 시험시편에 주조된 나프탈렌층의 표면형상을 실험 전후에 측정한다. 실험하는 동안의 승화량은 실험 전후의 나프탈렌표면의 높이차로부터 계산된다. 이를 위한 측정장치는 깊이측

Table 1 Test parameters

Cooling scheme	M	MR	I	Re_d	Re_{Dh}	d	D_h	H/d
Crossflow only	-	-	-	-	6,130 12,270	-	37.5 mm	2.0
Array impinging jet	0.5 1.0	0.164 0.327	0.027 0.107	10,000	6,130 12,270	10 mm	37.5 mm	2.0
Impingement/effusion cooling with initial crossflow	0.2 0.35 0.5* 1.0* 1.5* 2.0	0.065 0.114 0.164 0.327 0.491 0.654	0.004 0.013 0.027 0.107 0.241 0.428	10,000	2,454 4,295 6,130 12,270 18,400 24,540	10 mm	37.5 mm	2.0

(*: numerical simulation)

정기(depth gauge), 선형신호 제어기(linear signal conditioner; LUCAS ATA-101), 디지털 멀티미터(Keithley model 2001), 위치제어를 위한 두개의 스테핑모터(stepping motor), 모터제어기(motor controller), 컴퓨터와 연결된 GPIB(IEEE-488)보드로 구성된다. 깊이측정기는 선형가변차동변환기(Linear Variable Differential Transformer; LVDT)로 Schaevitz사 제품(LBB-375TA-020)이며, 분해능(resolution)은 0.025 μm이다. 실험 중 승화되는 평균 깊이인 40 μm에 대한 평판에서의 LVDT 측정오차는 1%미만이다.

3. 열/물질전달계수

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 $\rho_{v,\infty}$=0이다. 따라서 물질전달계수는 나프탈렌 승화량(Δy), 실험시간($\Delta\tau$), 고체 나프탈렌 밀도(ρ_s), 표면에서의 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,w}$)를 이용하여 구할 수 있다. 이때, 표면에서의 나프탈렌 증기밀도는 Ambrose 등[9]이 제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구한다.

물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, D_{naph}는 Goldstein과 Cho[10]가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

앞에서 계산된 물질전달계수는 Eckert[11]가 제시한 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

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

본 실험은 실온에서 수행하였으며, 이에 따른 Lewis 수(Pr/Sc)는 0.307이다.

Sherwood 수에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock[12]이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 측정온도, 깊이, 위치, 그리고 보정식들을 고려하여 전체적으로 ±7.1%의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같은 불확실성은 대부분 나프탈렌 물성치의 불확실성에 기인한 것으로, 나프탈렌 포화증기압은 3.8%, 공기에 대한 나프탈렌 물질확산계수는 5.1%의 불확실성을 갖는다. 하지만 나프탈렌 승화깊이의 불확실성은 0.7%로 매우 작으며, 표면온도, 고체 나프탈렌의 밀도, 물질전달계수의 불확실성은 각각 0.2%, 1.1%, 4.9%로 나타났다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각의 유동 및 열/물질전달특성을 고찰하였으며, 충돌제트냉각과 대류냉각(횡방향유동만 존재)의 결과와 비교하였다.

4.1 횡방향유동만 존재하는 대류냉각

Fig. 2는 횡방향유동만 존재하는 경우, 유출판 표면에서의 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. 여기서, Sh 수는 다른 냉각방법과의 비교를 위해 분사홀의 직경(d)을 기준으로 제시하였으며, 횡방향유동의 Reynolds 수($\mathrm{Re_{Dh}}$)는 각각 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각에서 M=0.5, 1.0일 때의 횡방향유동의 Reynolds 수와 같다. 또한, Fig. 2에는 완전발달한 난류유동과 층류유동에 대한 Sherwood 수가 표시되어 있으며, 이는 각각 완전발달한 난류유동에 대한 Sherwood 수의

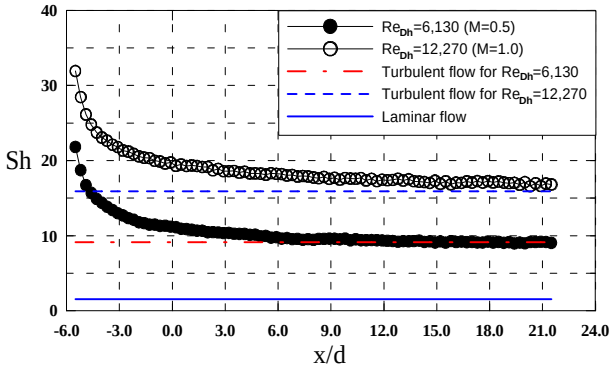


Fig. 2 Distributions of Sh for crossflow only (without impingement/effusion flow)

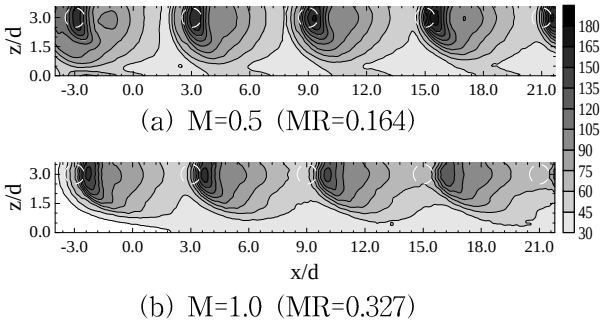


Fig. 3 Contour plots of Sh for array jet impingement with initial crossflow at Re_d=10,000 and H/d=2.0

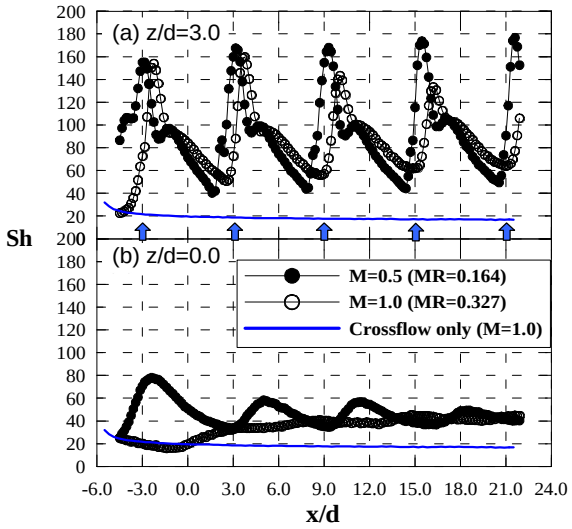


Fig. 4 Local distributions of Sh for array jet impingement with initial crossflow at Re_d=10,000 and H/d=2.0

Dittus-Boelter 상관식($Sh=0.023Re^{0.8}Sc^{0.4}$)과 매끄러운 원형파이프 내에서 나타나는 층류유동에 대한 일정한 값으로부터 얻은 수치이다. 국소 Sherwood 수는 상류영역에서 높은 값을 나타내고 하류로 갈수록 농도(열)경계층의 발달로 인해 단조감소하며, Re_{Dh}=6,130(M=0.5)과 Re_{Dh}=12,270(M=1.0)에 대한 Sherwood 수는 각각 완전발달한 난류유동에서의 값에 수렴함을 알 수 있다.

4.2 초기 횡방향유동이 존재하는 배열제트냉각

Fig. 3은 M=0.5, 1.0인 경우에 대한 초기 횡방향유동이 존재하는 배열제트냉각의 등 Sh선도를 나타낸다. 이때 흰색의 원형점선은 분사홀이 투영된 위치를 나타낸다. 일반적으로, 초기 횡방향유동이 존재하지 않을 경우에도 구속된 공간에서는 배열제트로부터 발생하는 사용유체에 의해 횡방향유동이 형성되며, 하류로 갈수록 횡방향유동의 유량이 증가한다. 그러므로 충돌제트의 정체점은 하류로 이동하고, 횡방향유동과 함께 발달하는 열경계층으로 인해 중간영역(z/d=0.0)에서의 열전달율은 감소한다. M=0.5인 경우, 높은 열전달영역은 폭방향으로 퍼지며, 중간영역(z/d=0)에 형성되는 부가극대점은 하류로 편향하고 x/d가 증가할수록 부가극대점의 Sh값은 감소한다. 그리고 M=1.0인 경우의 전체적인 Sh분포는 M=0.5인 경우와 비슷하나, 정체점에서의 Sh값은 M=0.5인 경우보다 더 낮으며, 그 위치도 하류로 더 편향한다. 또한, 중간영역(z/d=0)에 존재하던 부가극대점은 증가한 횡방향유동으로 인해 하류로 완전히 쓸려 내려간다.

초기 횡방향유동이 존재하는 배열제트에 대한 국소 Sh분포를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이, M=0.5인 경우, 횡방향유동과의 상호작용에 의한 제트코어의 난류강도증가로 x/d가 증가할수록 정체점에서의 국소 Sh값은 증가한다. 그러나 M=1.0인 경우에는 x/d가 증가할수록 정체점에서의 Sherwood 수는 감소하며, 극대점의 위치도 하류로 편향한다. 이는 강한 횡방향유동이 분사제트를 쓸고 내려가 충돌판에서의 충돌제트를 약화시키기 때문이다.

Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이, M=0.5인 경우에는 인접 벽제트 간의 상호작용에 의한 부가극대점이 존재하며, 이 극대점의 값은 횡방향유동의 증가로 인해 x/d가 증가할수록 감소한다. 그러나 M=1.0인 경우에는 충돌제트로부터의 벽제트가 강한 횡방향유동에 의해 완전히 쓸려 내려가 중간영역(z/d=0)에 형성되던 벽제트 간의 상호작용이 사라졌기 때문에 부가극대점이 존재하지 않는다.

4.3 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각

4.3.1 국소 열/물질전달특성

Fig. 5는 Re_d=10,000, H/d=2.0인 조건에서, 다양한 분사율에 따른 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각의 등 Sh선도를 나타낸다. 흰색의 원형점선과 작은 반원(M=1.0인 경우엔 원형)은 각각 분사홀의 투영된 위치와 유출홀의 위치를 나타낸다.

초기 횡방향유동이 존재하지 않는 경우(Fig. 5(a)), 국소 Sh분포는 대칭성을 보인다. 그리고

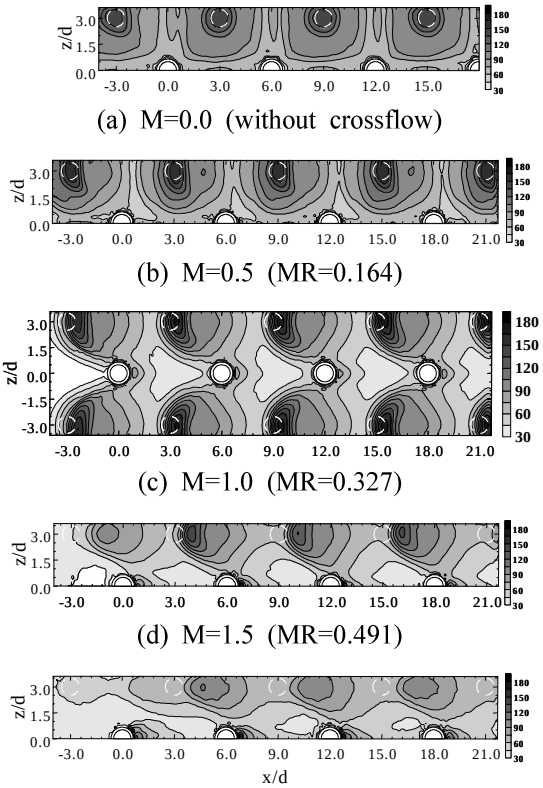


Fig. 5 Contour plots of Sh for various blowing rates at Re_d=10,000 and H/d=2.0

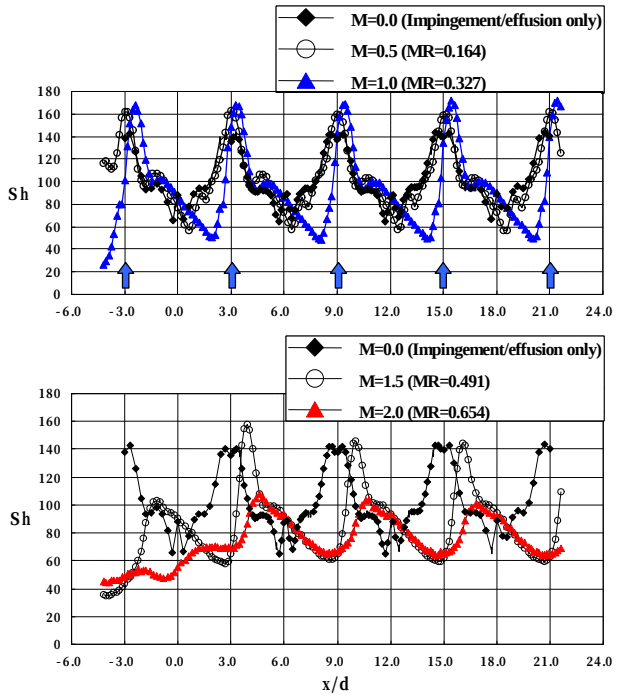


Fig. 6 Local distributions of Sh for impingement/ effusion cooling with initial crossflow at z/d=3.0

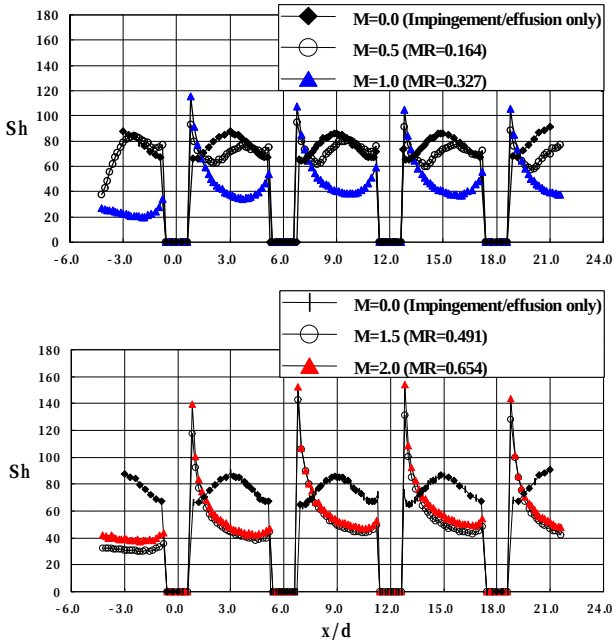


Fig. 7 Local distributions of Sh for impingement/ effusion cooling with initial crossflow at z/d=0.0

Sherwood 수는 정체점 주위에서 높은 값을 나타내며, 충돌 후 벽제트의 경계층이 발달함에 따라 감소한다. 또한, 인접 벽제트 간의 상호작용과 유출홀을 향해 가속되는 유동으로 인해 분사제트 사이(x/d=0.0, 6.0, 12.0)에 부가극대점이 형성된다.[2]

상대적으로 분사율이 높은 경우, 열/물질전달분포는 초기 횡방향유동이 없는 경우와 확연한 차이를 보인다. 분사제트는 편향하며, 벽제트는 초기 횡방향유동에 의해 쓸려 내려간다. 따라서 Sh분포는 불균일하며, 비대칭적인 양상을 보인다. M=1.0인 경우, 정체점의 높은 열/물질전달영역은 하류로 편향한다. 그러나 상류 이외의 영역에 대한 Sh분포는 주기적인 경향을 보이는데, 이는 유출홀을 통해 배출되는 횡방향유동과 사용유체의 양이 일정하고 유동의 유입과 배출이 균형을 이루기 때문이다. M=0.0, 0.5인 경우에 나타나던 부가극대점이 M=1.0인 경우에는 관찰되지 않으며, 유출홀 사이에는 하트모양의 낮은 열전달 영역이 형성된다. 이는 횡방향유동에 의해 쓸려 내려가는 벽제트가 유출홀로 흡입되기 때문이다. 또한, 유출홀을 향한 유동의 가속과 교란으로 인해 유출홀 입구 주위에는 국부적으로 높은 열/물질전달영역이 형성된다.

M=1.5, 2.0인 경우에는 충돌제트의 영향을 받는

영역이 상당히 감소하며, 따라서 전체적인 Sh값은 $M \leq 1.0$인 경우보다 더 낮아진다. 특히, 상류영역에서의 열/물질전달계수는 충돌제트를 약화시키는 강한 횡방향유동으로 인해 크게 감소한다. 그러나 횡방향유동의 유속이 증가할수록 유출홀 주위에서의 유동이 더 심하게 교란되기 때문에 유출홀 사이의 열/물질전달계수는 M=1.0인 경우의 값보다 더 높게 나타난다.

z/d=3.0, 0.0에 대한 초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각의 국소 Sh분포를 Fig. 6와 7에 각각 나타내었다. M=0.5인 경우, 횡방향유동의 영향에도 불구하고 각 정체점에서의 최대값은 거의 일정하다. 또한, 난류로 천이하는 벽제트로 인해 이차 극대점[15]이 정체점의 하류영역에 존재하며, 그 값은 횡방향유동이 존재하지 않는 경우의 값보다 더 높다. 그리고 정체점의 상류에는 정체점 하류에 형성되는 이차 극대점보다 낮은 값의 이차 극대점이 존재하며, 이는 충돌제트와 벽제트의 편향에 기인한다. 정체영역을 제외한 Sherwood 수의 전체적인 경향은 M=0.0(초기 횡방향유동이 존재하지 않는 경우)인 경우와 유사하며, 정체영역에서의 더 높은 Sh값은 분사제트의 증가된 난류강도에 기인한다.

M=1.0인 경우에는 분사제트의 난류강도를 증가시키는 횡방향유동과 충돌제트 간의 상호작용이 하류로 갈수록 증가하여, 정체점에서의 최고값은 하류로 갈수록 약간씩 증가한다. 그러나 정체점의 하류에 발생하는 이차 극대점은 M=0.5인 경우보다 낮으며, 정체점 상류의 이차 극대점은 사라진다.

분사율이 증가할수록 횡방향유동의 영향은 두드러진다. 상류영역에서의 열/물질전달율은 상당히 감소하며, M=1.5, 2.0인 경우에 대한 상류영역에서의 Sherwood 수는 $M \leq 1.0$인 경우의 30%~60% 수준에 그친다. 이러한 경향은 하류영역까지 유지되며, 정체영역에 존재하는 극대점도 하류로 이동한다. 국소 Sherwood 수는 두 번째 정체점에서 최대값을 갖으며, 이후 하류로 갈수록 조금씩 감소한다. 또한, 이러한 값들은 $M \leq 1.0$인 경우의 값보다 20%~40% 낮게 나타난다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 M=0.5인 경우, z/d=0.0인 유출홀 사이에는 상대적으로 높은 부가극대점이 존재하며, 이는 인접 벽제트 간의 상호작용에 기인한다. 그러나, 이러한 부가극대점은 분사율이 증가함에 따라 사라진다. 상대적으로 분사율이 높은 경우($M \geq 1.0$)에는 Sherwood 수가 유출홀의 하류쪽 모서리 부근에서 극대값을 나타내며 이후 단조 감소한다. 이는 물질(열)경계층의 농도(온도)가 높은 공기가 유출홀을 통해 제거되고, 유출홀의 하류쪽 모서리 부근에 덕트코어유동이 충돌하며, 이후 유동은 다시 다음 유출홀의 상류로 이동하여 물질(열)경계층이 재발달하기 때문이다.

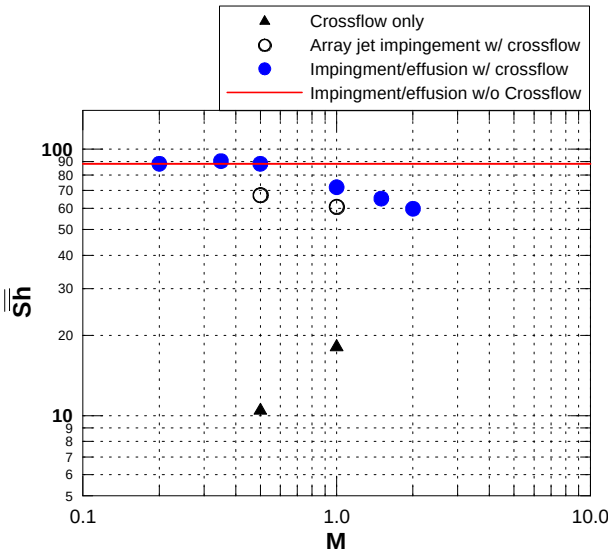


Fig. 8 Overall averaged Sh for various cooling schemes and blowing rates at Re_d=10,000 and H/d=2.0

4.3.2 평균 열/물질전달특성

Fig. 8은 다양한 냉각방법과 분사율에 대한 유출판에서의 전체적인 평균 Sherwood 수를 나타낸다. 충돌제트/유출냉각은 배열제트보다 20%~30% 높은 냉각성능을 보이며, 대류냉각(횡방향유동만 존재)보다는 3.5~9배 높은 냉각성능을 보인다. 충돌제트/유출냉각과 배열제트냉각에 있어서, M=1.0인 경우의 전체 평균 Sh값은 M=0.5인 경우보다 낮으며, 이는 냉각유체의 유량이 더 많음에도 불구하고 많은 양의 횡방향유동이 유출판에서의 열/물질전달율을 감소시키기 때문이다.

초기 횡방향유동이 존재하는 충돌제트/유출냉각에 있어서, $M \leq 0.5$인 경우의 전체 평균 Sh값은 횡방향유동이 존재하지 않는 경우와 거의 일치한다. 그러나 $M \geq 0.5$인 경우의 전체 평균 Sh값은 분사율이 증가할수록 감소하는 경향을 갖는다. 그러므로 높은 냉각성능을 얻기 위해서는 가능한 한 분사율을 줄일 필요가 있다.

5. 결 론

- 열/물질전달특성에 있어서 초기 횡방향유동이 존재하는 경우에는 횡방향유동이 존재하지 않는 경우의 결과와 확연한 차이를 보이며, 횡방향유동에 의해 분사제트는 교란되고 인접 벽제트 간의 상호작용도 감소한다.

- 낮은 분사율에서의 냉각성능은 초기 횡방향유동이 존재하지 않는 경우와 유사하나 분사율이 증가할수록 유출판에서의 열/물질전달율은 감소하며, 횡방향유동으로 인해 유출홀 사이에 국부적으로 낮은 열전달영역이 형성된다. 그러므로 높은 냉각성능을 얻기 위해서는 횡방향유동의 유량을 감소시킬 필요가 있다.

- 초기 횡방향유동이 존재하는 경우, 충돌제트/유출냉각은 횡방향유동의 영향과 사용유체의 재유입량이 적기 때문에 배열제트보다 20%~30% 높은 냉각성능을 보이며, 대류냉각(횡방향유동만 존재)보다는 3.5~9배 높은 냉각성능을 보인다.

후 기

본 연구는 과학기술부 주관 국가지정연구실사업(NRL)의 지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 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.

(2) 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.

(3) 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.

(4) 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.

(5) 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.

(6) 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.

(7) Cho, H. H., Yoon, P. H. and Rhee, D. H., 2001, “Heat/mass transfer characteristics of arrays of impingement jets with effusion holes,” *Proceedings of ExHFT-5*, pp. 955~960.

(8) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1997, “Total Coverage Discrete Hole Wall Cooling,” *J. of Turbomachinery*, Vol. 119, No. 2, pp. 320~329.

(9) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, “The Vapor Pressure of Naphthalene,” *J. Chem. Thermo.*, Vol. 7, pp. 1173~1176.

(10) 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.

(11) Eckert, E. R. G., 1976, “Analogies to Heat Transfer Processes,” in Measurements in Heat Transfer, ed. Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., Hemisphere Pub., New York, pp. 397~423.

(12) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, “Describing Uncertainty in Single Sample Experiments,” *Mech. Engineering*, Vol. 75, p. 3~8.

(13) Dittus, P. W. and Boelter, L. M. K., 1930, Univ. Cal. Pebl. Engng, Vol. 2(13), pp. 443~461; 1985 reprinted in Int. Commun. Heat Transfer, Vol. 12, pp. 3~22.

(14) 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.

(15) Cho, H. H., Lee, C. H. and Kim, Y. S., 1997, “Characteristics of Heat Transfer in Impinging jets by Control of Vortex Pairing,” *ASME Paper* No. 97-GT-276.