대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 D pp. 489~496 KSME 01S479

충돌제트/유출냉각기법에서 분사판의 홀배열이 열전달에 미치는 영향

최 종 현*· 이 동 호*· 조 형 희†

The Effects of Impingement Hole Size on Heat Transfer of An Impingement/Effusion Cooling System

Jong Hyun Choi, Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words :Gas turbine(가스터빈), Impingement Cooling(충돌제트냉각), Effusion cooling(유출냉각), Hole arrangement(홀배열), Heat and mass transfer analogy(열전달과 물질전달 상사성)

Abstract

Two perforated plates are used to investigate local heat/mass transfer characteristics in an impingement/effusion cooling system. A naphthalene sublimation method is conducted to determine the local heat/mass transfer coefficients on the upward facing surface of the effusion plate. The two plates are placed in parallel position with gap distances of 1, 2, 4 and 6 times of effusion hole diameter. The effects of hole arrangements of the plates are studied for staggered, square, and hexagonal arrays. The experiments are conducted at Reynolds number of 10,000 based on the effusion hole diameter. The results show that the smaller hole size in the staggered array has the higher transfer coefficients on the stagnation region due to the formation of higher momentum flows through the impingement holes. In the square array, heat/mass transfer on the target plate is more uniform as the number of impingement holes increases. High and uniform heat/mass transfer coefficients are obtained in the hexagonal array.

기 호 설 명

d : 분사홀의 내경
D : 유출홀의 내경
dy : 나프탈렌 승화깊이
D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌의 물질확산계수
H : 분사판과 유출판사이의 간격
h_m : 국소 물질전달계수, Eqn. (1)
$\dot{m}$: 단위면적당 나프탈렌 질량유속
Nu : Nusselt 수
Pr : Prandtl 수
Ae/Ai : 분사홀과 유출홀 면적비
P : 홀 사이의 간격
Re_D : Reynolds 수, $Re_D=\rho uD/\mu$
Sc : Schmidt 수
Sh : Sherwood 수, Eqn. (2)
t : 분사판의 두께
x, z : 유출홀 중심으로부터의 좌표 (Fig. 2)

Greek symbols
ρ_s : 고체나프탈렌의 밀도
$\rho_{v,w}$: 나프탈렌표면에서의 나프탈렌 증기밀도
$\rho_{v,\infty}$: 분사제트의 나프탈렌 증기밀도
$d\tau$: 나프탈렌 표면의 유동장 노출시간

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

1. 서 론

가스터빈엔진의 열효율과 비추력은 터빈입구온도에 크게 좌우된다. 현재 사용중인 가스터빈엔진은 높은 열효율을 얻기 위하여 높은 터빈입구온도

에서 작동되며, 이로써 연소기 및 터빈요소들이 재질의 한계점보다 훨씬 높은 온도에 노출되기 때문에 이러한 요소들을 보호하기 위해 여러 가지 냉각 방법이 사용되고 있다.

일반적으로 가스터빈 요소들의 냉각에 있어 막냉각, 충돌제트 냉각, 내부관 대류냉각 등 세 가지 냉각기법들이 발전되어 왔다. 특히 전면막냉각(full-coverage film cooling)은 터빈 연소기에 적용되어 고온의 연소가스로부터 내벽을 효율적으로 보호할 수 있어서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 충돌제트는 표면에 국소적으로 매우 높은 열전달율을 얻을 수 있으며, 이를 응용한 배열제트의 형상을 조절하여 열전달 특성을 제어할 수 있다. 본 연구에서는 연소실 같은 고온요소의 내부표면을 충돌제트를 이용하여 냉각시킨 후 막냉각을 통하여 고온가스와 접촉하는 표면을 보호하는 복합냉각기술인 충돌제트/유출냉각기법을 두 개의 다공평판을 사용하여 모사하였다.

Sparrow[1]등은 정육각형 배열격자의 홀을 가진 하나의 다공평판에 레이놀즈 수를 2,000~20,000로 하여 표면에서의 열전달 계수를 측정하였다. 그 결과 Sherwood 수는 레이놀즈 수에 따라 증가함을 보였다. Cho와 Goldstein[2]은 홀 사이의 간격이 3D인 두 개의 다공평판으로 충돌제트/유출냉각 실험을 실시하여 유출판에서의 열전달 계수가 충돌제트 냉각만을 사용했을 경우에 비해 45%~55% 높으며, 유출냉각만을 사용했을 경우에 비해 3배이상 높다는 것을 보였다. Cho와 Rhee[3]는 분사홀과 유출홀의 내경이 같은 경우에 엇갈림배열과 한 방향 편심배열에 있어서 판사이 간격변화와 레이놀즈수 변화효과에 관하여 연구하였다. 본 연구는 분사홀과 유출홀의 여러 가지 배열 변화와 두 판사이의 간격 변화가 열전달 특성에 미치는 영향을 체계적으로 연구하였다.

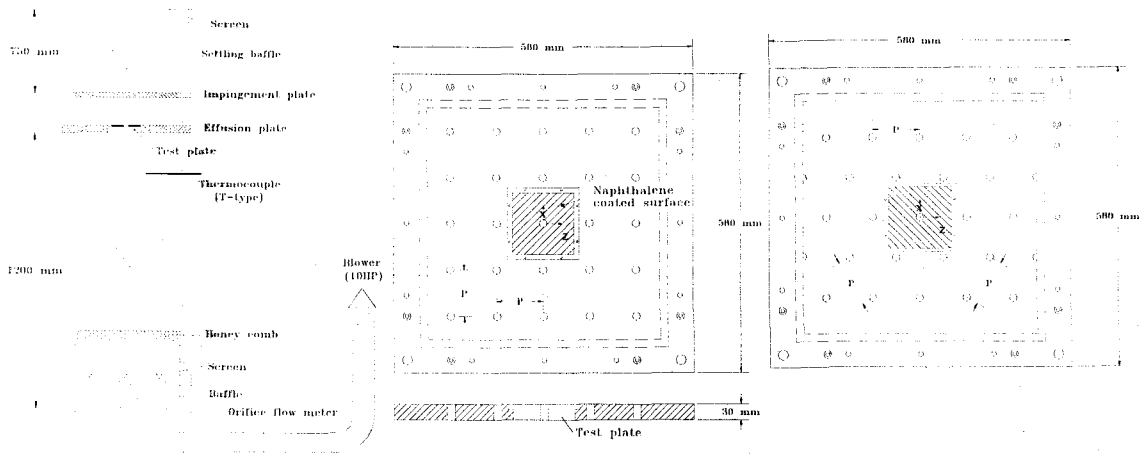
가스터빈엔진에 적용되는 복합냉각기술의 냉각효과를 고찰하기 위해선 전반적인 열전달 특성뿐 아니라 국소적인 열전달 계수에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 열/물질전달사이의 상사성을 이용한 나프탈렌 승화법으로 유출판 내부 표면에서의 국소 열전달특성 고찰에 초점을 맞추었다. 나프탈렌 승화법은 열전달 실험에서의 전도 및 복사오차를 제거할 수 있으며, 나프탈렌 표면은 등온조건에, 그 외의 부분들은 단열조건에 해당한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 시편

Fig. 1 (a)는 실험장치 개략도를 나타낸 그림이다. 상온의 공기가 흡입방식의 송풍기에 의하여 유입되어 두 개의 다공평판을 통과하고 오리피스 유량계(orifice flowmeter)를 지난후 배출된다. T-type 열전대를 플레넘과 시편에 각각 설치하여 분사유동과 나프탈렌의 온도를 측정하였다.

나프탈렌이 주조된 시험시편은 단면 450 mm× 450 mm의 플레넘위에 올려진 유출판(effusion

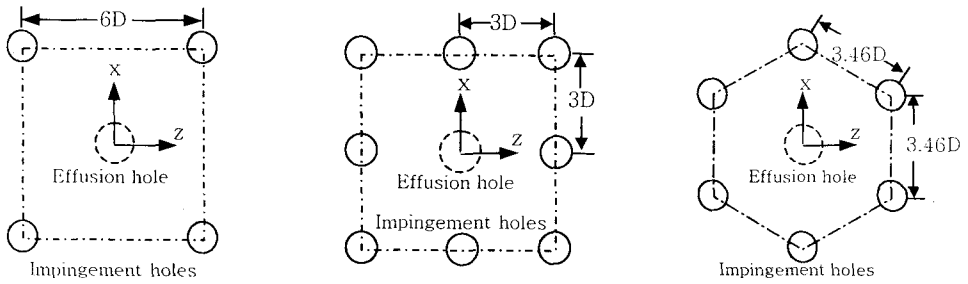


(a) Test apparatus

(b) Effusion plate for staggered and square array

(c) Effusion plate for hexagonal array

Fig. 1 Schematic diagrams of experimental apparatus and effusion plates



(a) Staggered array (b) Square array (c) Hexagonal array

Fig. 2 Schematic diagram of impingement hole arrangements

plate) 중앙에 설치된다. Fig. 1 (b)와 (c)에서와 같이 사각과 육각형태의 홀형상을 갖는 두 개의 유출판은 모두 내경 D=15 mm인 25(5×5)개의 홀을 갖고 있으며, 홀과 홀사이의 간격(P)은 6D이다. 평행한 분사판(impingement plate)과 유출판의 간격(H)은 유출홀 내경의 1, 2, 4, 6배로 하여 실험을 실시하였다. 또한 3개의 분사판의 내경(d)은 모두 10 mm이며, 두께는 1.33D (2d)이다. 시편의 중앙에 한 개의 유출홀이 위치하며, 그 둘레에 주조된 나프탈렌의 크기는 8.3D× 8.3D이다. 유출홀 내경을 특성 길이로한 레이놀즈수(Re_D)를 10,000으로 고정하여 유출홀을 통과하는 속도와 질량유량이 일정하게 유지되도록 하였다. 유출판은 충분히 많은 홀을 갖고 있으므로 중심에 위치한 시험시편에 미치는 끝벽의 영향은 거의 없다.

2.2 홀 배열

Fig. 2는 분사판에 천공된 3가지 형태의 홀 배열에 대한 개략도를 보여주고 있다.

(a) 분사홀과 유출홀의 개수가 같은 엇갈림배열

(b) 분사홀의 개수가 유출홀의 3배인 사각배열

(c) 분사홀의 개수가 유출홀의 2.4배인 육각배열

Table 1 Experimental parameters

Hole Configuration	Number of impingement holes relative to effusion holes	Ae/Ai
Staggered array	1 : 1 (25 : 25)	2.25
Square array	3 : 1 (75 : 25)	0.75
Hexagonal array	2.4 : 1 (60 : 25)	1.125

홀 배열을 포함한 실험인자들이 Table 1에 요약되어 있다. 이러한 실험조건의 결과를 분사홀 내경 d=15 mm의 엇갈림배열에 대한 이전 실험결과[3]와 비교분석하여 분사홀의 크기의 효과를 고찰하였다.

2.3 물질전달량 측정장치

열/물질전달계수를 계산하기 위해서 시험시편의 나프탈렌층의 표면형상을 실험전후에 측정하여 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정한다. 이를 위한 측정장치는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer; LBB-375TA-020) 및 2차원 자동이송장치로 구성된다. 측정장치의 자세한 사양은 이동호 등[4]과 동일하다.

3. 열/물질전달계수

국소 물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s (dy/d\tau)}{\rho_{v,w}} \qquad (1)$$

본 연구에서는 분사되는 제트에 나프탈렌이 포함되어있지 않으므로 $\rho_{v,\infty}$=0이다. 따라서 물질전달계수는 나프탈렌 승화량(dy), 실험시간($d\tau$), 고체 나프탈렌 밀도(ρ_s), 표면에서의 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,w}$)를 통해서 구할 수 있다. 표면에서의 나프탈렌 증기밀도는 Ambrose 등[5]이 제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구한다.

물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = \frac{h_m D}{D_{naph}} \quad (2)$$

여기서, D_{naph}는 Goldstein과 Cho[6]가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

앞에서 계산된 물질전달계수는 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며,[7] 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{0.4} \quad (3)$$

실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock[8]이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 전체적으로 7.1%의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

이와 같은 불확실성은 대부분 나프탈렌의 물성치의 불확실성에 기인하는 것으로, 나프탈렌 포화증기압의 경우는 3.8%, 나프탈렌 물질확산계수의 경우 5.1%의 불확실성을 갖는다. 하지만 나프탈렌 승화깊이의 불확실성은 0.7%으로 매우 작으며, 표면온도, 고체 나프탈렌의 밀도, 물질전달계수의 불확실성은 각각 0.2%, 1.1%, 4.9%로 나타났다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 분사판과 유출판을 조절하여 엇갈림배열, 사각배열, 육각배열로 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

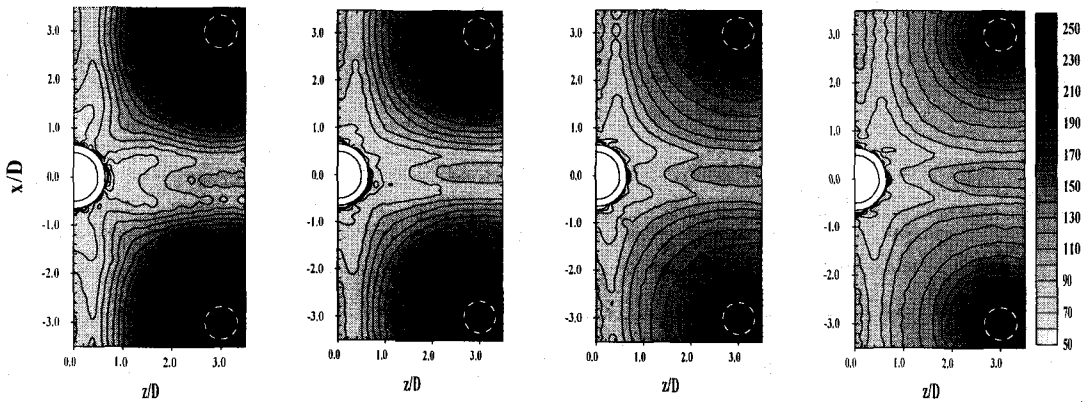
일반적으로 충돌제트 냉각에서는 제트노즐의 직경을 특성길이로 하여 무차원화하는데, 본 연구에서는 Sherwood 수 등의 무차원 수들은 모두 유출홀의 내경(D)을 기준으로 하여 무차원화하였다. 이것은 충돌제트/유출냉각 시스템에서 일정한 유출홀의 크기(일정 유량)에 대해 분사홀의 직경이 작아졌을 경우의 유동 및 열/물질전달 특성을 고찰하기 위함이다.

4.1 엇갈림배열에서의 열/물질전달

Fig. 3은 유출홀 내경 d=10 mm, Re_D=10,000의 엇갈림 배열에서 두 판사이 간격변화에 따른 등 Sh 선도를 나타내고 있다. 원형의 하얀 점선과 동심의 반원은 각각 분사홀과 유출홀의 위치를 나타내며, 등 Sh 선도는 대칭적으로 분포하므로 오른쪽 부분만을 제시하였다($0.0 \le z/D \le 3.0$).

모든 경우에서 정체점(stagnation point)부근에서는 매우 높은 열전달 효과가 나타나지만, 이후 벽제트 영역에서 경계층의 발달로 인하여 Sh 수가 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 정체점의 중간부근(z/D=3.0 and x/D=0.0)에서 인접한 벽제트와의 충돌로 인하여 상승하는 와류가 생기며, 이에 반하여 바닥면 근처에서 이차와류가 생겨 국소적으로 열/물질전달이 향상되는 영역이 발생한다(Fig. 3과 4).

Fig. 5는 z/D=3.0과 0.0에서의 국소 물질전달계수를 도시한 그림이다. Sh 값이 0으로 나타난 곳은 유출홀의 위치를 나타낸다. z/D=0.0 선상에서 고정된 레이놀즈 수를 갖는 유출홀의 근방에서는 두 판사이 간격변화의 영향은 거의 없음을 알 수 있다. z/D=3.0의 위치에서도 x/D=0.0 근접영역에서는 인접한 제트간의 상호작용으로 형성된 극대값은



(a) H/D=1.0 (b) H/D=2.0 (c) H/D=4.0 (d) H/D=6.0

Fig. 3 Contour plots of Sh for staggered array with d=10mm for various gap distances

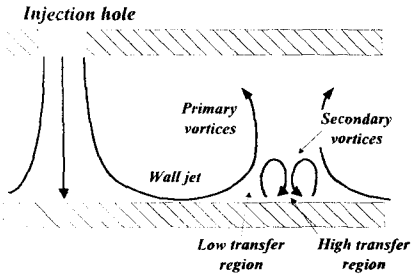


Fig. 4 Schematic flow pattern of array impingement jets

두 판사이의 간격이 변화하더라도 일정한 크기를 갖는 것으로 나타났다.

두 판사이의 간격이 작을 경우(H/D=1.0과 2.0), 정체점 근방에서 두 개의 극대점이 발생함을 알 수 있다. 정체점으로부터 약 0.3D(0.45d) 떨어진 첫 번째 극대값은 경계층의 두께를 얇게 하는 정체점 영역에서의 유동의 가속화현상에 기인한다. 이 극대점을 통과한 벽제트 유동이 경계층의 발달과 더불어 속도가 작아지므로 열/물질전달 또한 감소하는 경향을 갖게 된다. 이후 경계층이 $x/D\approx$ 2.2에서 난류로 천이하면서 열/물질전달계수는 정체점으로부터 1.2D(1.8d) 부근에서 두 번째 극대값을 갖게 된다. 또한 이 이차극대점은 분사제트에서 발생하는 와류의 비정상적인 압력구배에 의하여 벽제트영역에서 생성되는 이차와류에 기인되기도 한다[9]. 두 판사이의 간격이 큰 경우($H/D\geq$ 3)에는 분사제트가 발달하여 충돌전에 중심에서 난류강도가 증가하여 정체점 영역에서 열전달이 촉진되지만 두 번째 극대값은 발생하지 않음을 볼 수 있다.

정체점에서의 열/물질전달계수는 H/D=4.0의 경우에서 가장 높게 나타났는데, 이는 제트의 포텐셜 코어가 충돌면에 도달하기까지 발달하여 난류강도의 증가가 가장 두드러지기 때문이다. 두 판사이 간격이 이보다 더 커지게 되면 난류강도는 증가하나 속도감소 효과가 더욱 커지기 때문에 정체점에서의 Sh가 감소하게 된다. 이것을 분사홀의 직경(d=10 mm)으로 보면 H/D=4.0일 때 H/d=6.0이기 때문에 홀직경의 6배 위치에서 최대값이 존재하는 것으로 d=15 mm에서의 이전 결과[3]와 일치한다.

엇갈림 배열에 있어서 홀크기 변화 효과를 보면 (Fig. 5 (a)), d=10 mm의 정체점 부근영역과 이차극대점에서의 열/물질전달계수가 d=15 mm인 경우보다 약 두 배정도 됨을 알 수 있다. 이것은 제트

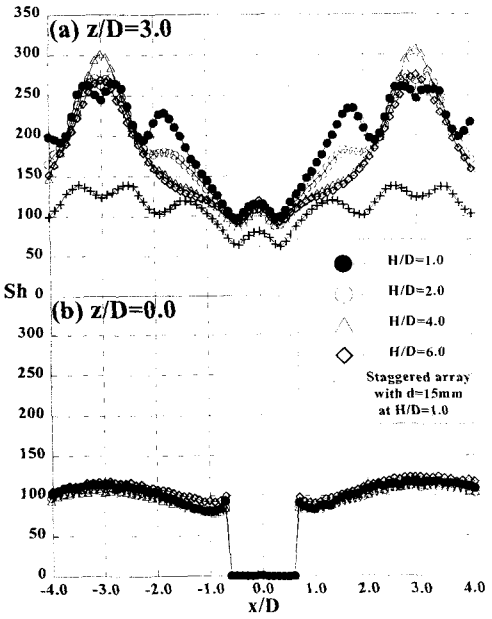
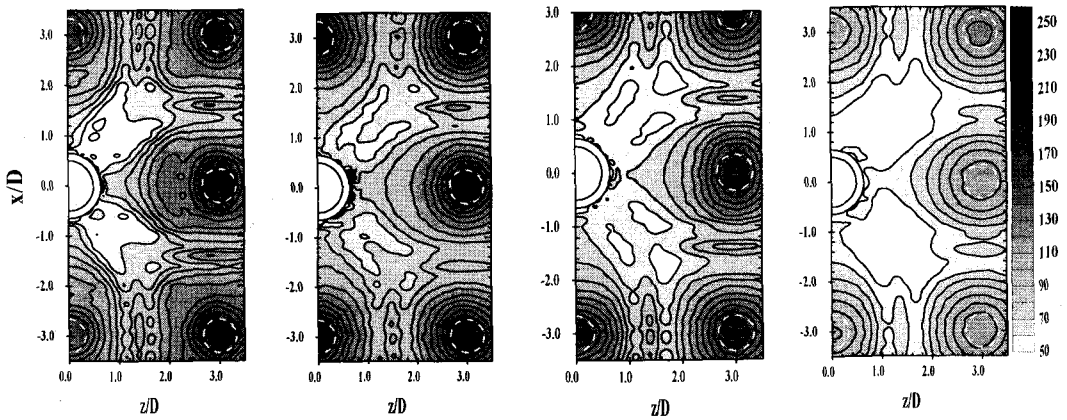


Fig. 5 Local Sh of staggered array with d=10 mm for various gap distances

가 동일한 질량유량 조건(Re_D=10,000)에서 내경이 10 mm의 분사홀을 통과할 때의 운동량이 15 mm의 홀을 지날때의 경우보다 훨씬 크기 때문이다. 즉 유출홀의 크기를 고정시키고 분사홀의 크기를 작게하면, 분사홀의 총면적에 대한 유출홀의 총면적의 비(Ae/Ai)가 커지게 되어 제트 운동량을 증대시키는 효과를 가져오기 때문이다. 분사홀의 크기가 다른 두 경우에 있어서 값의 차이는 크게 나타나고 있으나 열/물질전달의 경향은 유사함을 알 수 있다.

4.2 사각배열에서의 열/물질전달

Fig. 6은 d=10 mm의 사각배열에서 두 판사이 간격변화에 따른 등 Sh 선도를 보여주고 있다. 이 경우에서도 충돌제트의 정체점에서 높은 Sh 값을 나타내고 벽제트가 유출홀로 진행함에 따라 Sh 수가 감소하며, 인접제트사이에서 국소적으로 열전달이 촉진되는 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다. 엇갈림배열과 비교해보면 분사홀의 수가 많아져 동일한 면적을 냉각함에 있어 좀더 균일한 열전달 특성을 나타내지만 열/물질전달계수는 낮아진 것을 볼 수 있으며, H/D가 큰 경우에 유출홀의 대각선 방향으로 국소적으로 낮은 열전달 영역이 존재함을 알 수 있다.



(a) H/D=1.0 (b) H/D=2.0 (c) H/D=4.0 (d) H/D=6.0

Fig. 6 Contour plots of Sh for square array with d=10mm for various gap distances

Fig. 7에서 판사이 간격변화에 따른 사각배열에서의 국소적인 Sh 수 분포를 제시하고 있다. H/D=1.0의 경우를 제외한 모든 높이에서 정체점으로부터 유출흘까지 단조감소하는 경향을 나타내고 있다. H/D=1.0의 경우, 이차극대값이 z/D=0.0에서는 확연히 나타나지만 z/D=3.0에서는 작은 홀간격(P/D=3)으로 인한 벽제트사이의 강한 상호작용으로 이차극대값이 관찰되지 않았다. 그러나 강한 상호작용으로 인하여 정체점사이의 중간부근(x/D=±1.5)에서의 이차와류의 강도가 커져서 극대값이 증가하였다. 엇갈림배열에서와는 달리 H/D=2.0(H/d=3.0)에서 최대값을 보이고 있는데, 이것은 홀사이 간격이 작아졌기 때문에 인접제트의 영향으로 분사제트가 더욱 빠르게 발달하기 때문인 것으로 생각된다.

사각배열에서 분사홀의 수를 증가시킴으로써 얻을 수 있는 장점은 Sh 수 분포의 균일성이다. 사각배열에서 분사홀의 내경을 10 mm로 하면 d=15 mm인 엇갈림배열[3](Ae/Ai=1.0)의 경우에 비해 제트가 통과하는 유로면적이 작아져 면적비 상승요인이 되지만, 분사홀의 수가 늘어남으로써 결국 전체 면적비(Ae/Ai)는 0.75로 작아지게 된다. 따라서 분사홀을 통과하는 유체의 속도는 유출홀을 통과하는 유체의 속도보다 작게된다. 이것은 유량이 일정한 상태에서 홀을 통과하는 속도는 면적비에 따라 결정되기 때문이다. 면적비가 커질수록 분사홀을 지나는 제트의 속도가 증가하게 되며, 이는 열/물질전달 분포에서 크기와 균일성에 영향을 준다. 분사홀의 수가 많아지면 면적비가 작아져 크기는 줄어드는 반면 균일성은 높아지는 열/물질전달 특성을 갖게 된다.

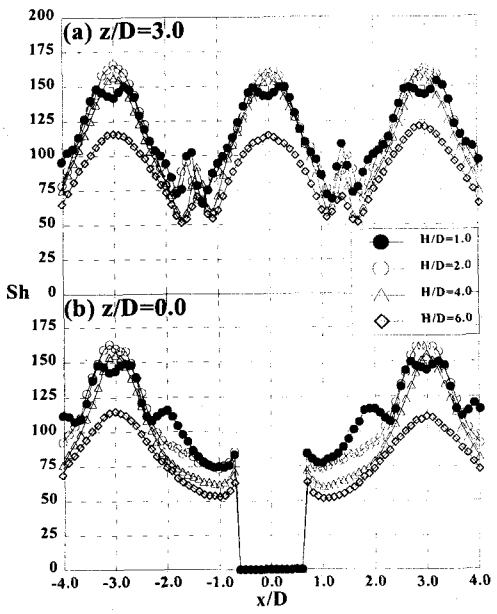


Fig. 7 Local Sh of square array with d=10 mm for various gap distances

Fig. 8에서 H/D=1.0, z/D=3.0의 경우에 있어서 사각배열의 최대 Sh 값은 분사홀에서의 제트속도가 낮으므로 d=10 mm의 엇갈림배열보다 낮게 나타나지만, d=15mm의 엇갈림배열에 비해 면적비가 작음에도 불구하고 약간 높은 것을 볼 수 있다. 이것은 사각배열의 d=10 mm의 분사홀을 통과한 제트가 유출판에 도달하기까지 진행한 거리(H/d=1.5)가 상대적으로 더 크고, 더 작은 인접제트와의 간격(P/D=3)의 영향으로 유동이 더욱 일찍 발달하여 난

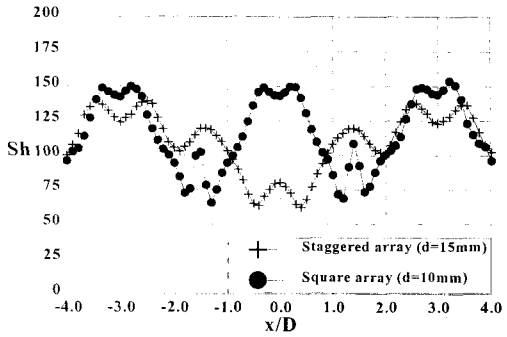


Fig. 8 Local Sh of various hole arrangements at z/D=3.0 for H/D=1.0

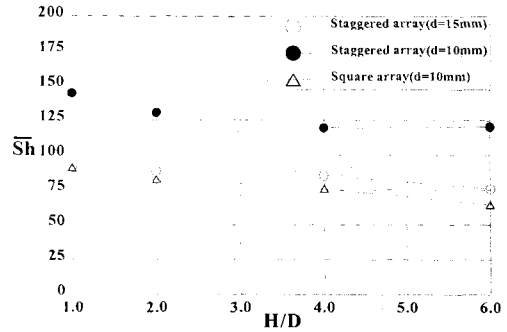
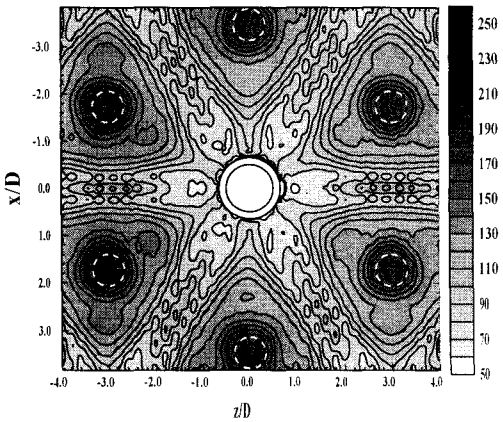


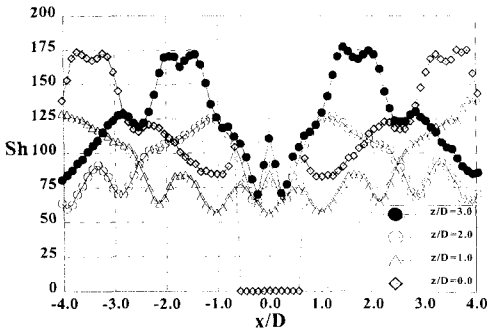
Fig. 9 Average Sherwood number for different arrays and various gap distances at Re_D=10,000

유강도가 증가하기 때문이다. 사각배열에서 분사홀 사이의 작은 간격은 또한 x/D=0.0에서 엇갈림배열에 비해 정체점을 한 번 더 생성하면서 전반적으로 보다 균일한 Sh 분포를 나타내지만, Fig. 7에서처럼 분사홀과 유출홀사이의 거리가 일정하지 않기 때문에 두 중심사이의 거리가 가장 큰 대각선상 $z/D \approx 1.5$, $x/D \approx \pm$ 1.5부근에서 국소적으로 낮은 열/물질전달 현상이 나타난다.

Fig. 9에서는 일정 유량(Re_D=10,000)에서 홀배열 변화와 판사이의 간격변화에 따른 평균 Sh 수 변화를 제시하고 있다. 평균에 사용된 Sh 수는 -3.0 ≤ x/D≤ 3.0, -3.0≤ z/D≤ 3.0의 영역의 값을 취했다. 평균 Sh 수는 H/D=1.0에서 최대값을 갖고 간격이 커질수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. d=10 mm의 엇갈림배열의 경우가 모든 높이에서 가장 높았고, 사각배열의 평균 Sh 수는 d=15 mm의 엇갈림배열의 경우보다 약간 작은 것으로 나타났는데, 이것은 면적비에 따른 결과이다. 즉 면적비가 커질수록 평균 Sh 수는 증가하게 된다. d=10 mm의 엇갈림배열이 가장 높은 열/물질전달 특성을 보



(a) Contour plot



(b) Local distribution

Fig. 10 Contour and local plots of Sh for hexagonal array with H/D=1.0 at Re_D=10,000

였지만 Fig. 5에서처럼 국소적인 Sh 값의 차이가 열응력 문제를 야기할 수 있다.

4.3 육각배열에서의 열/물질전달

Fig. 10은 H/D=1.0, Re_D=10,000에서 육각배열의 등 Sh 선도 및 국소분포를 보여주고 있다. 유출판과 분사판이 모두 정삼각형으로 이루어진 정육각 격자의 홀형상을 띄고 있으며, 각 분사홀을 통과하는 제트의 중심은 세 개의 유출홀이 이루는 정삼각형의 무게중심에 위치한다. 제트가 유출판에 충돌하며 정체영역을 형성한 후, 주위의 세 개의 유출홀로 빨려 들어가게 되므로 정삼각 형태의 높은 열/물질전달 영역을 형성한다. 육각배열에서는 모든 분사홀에서 유출홀까지의 거리는 동일하여 안정된 유동특성을 갖게되어 사각배열에서 유동이 정체되어 나타나는 국소적으로 낮은 열전달 영역을 제거하고 균일한 열전달 향상을 가능케 한다.

Fig. 8과 10의 x/D=3.0에 대한 분포에서 난류로의

천이로 인한 이차극대값을 비교했을 때, 육각배열의 Sh 수의 상대적 크기는 d=15 mm의 엇갈림배열의 경우보다 작고 사각배열의 Sh와 비슷함을 알 수 있다. 이것은 분사홀사이의 간격이 3.46D로 사각배열의 간격과 비슷하기 때문이다. 또한 육각배열에서 Sh 수의 최대값은 면적비(Ae/Ai=1.125)의 효과로 인해 d=15 mm의 엇갈림배열과 사각배열의 경우에 비해 큰 것을 알 수 있다. 인접한 두 개의 분사홀과 유출홀의 중심이 이루는 삼각형에서 구한 평균 Sh 수 또한 $\overline{Sh}$=96.8로 앞에서 언급한 두 경우($\overline{Sh}$=91.6과 90.8)보다 큰 것으로 나타났다(Fig. 9). 따라서 내경이 더 작은 홀을 갖는 분사판을 육각배열에 적용하면 보다 높고 균일한 냉각성능을 얻을 수 있으리라 예상된다.

5. 결 론

엇갈림배열의 경우 유출홀의 크기가 고정된 상태에서 분사홀의 크기 변화는 동일유량에서 분사제트의 운동량 변화시켜 열/물질전달 분포에 크게 영향을 주었다. 면적비가 증가할수록 높은 열/물질전달 계수를 얻었다. 본 연구에서 가장 큰 면적비를 갖는 d=10 mm의 엇갈림배열이 정체점 영역에서 다른 배열의 경우보다 약 두 배값을 가졌다. 또한 전반적으로 가장 높은 Sh 분포를 나타내며 평균 Sh 수도 가장 컸다. 그러나 매우 큰 최대·최소값의 차이로 인하여 과도한 열응력 발생을 야기할 수 있는 것으로 생각된다.

사각배열에서는 분사홀의 개수가 증가하여 보다 균일한 열/물질전달 특성을 얻을 수 있었다. 그러나 분사홀과 유출홀사이의 거리가 일정하지 않기 때문에 국소적으로 낮은 열/물질전달 영역이 존재하였다.

육각배열의 경우에서는 안정된 유동구조를 바탕으로 균일하고 높은 열/물질전달 분포를 얻을 수 있었으며, 좀더 작은 크기의 분사홀이 적용된다면 보다 향상된 냉각성능을 가질 것으로 예상된다.

후 기

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

참고문헌

(1) Sparrow, E. M. and Ortiz, M. C., 1982, "Heat Transfer Coefficients for the Upstream Face of a Perforated Plate Positioned Normal to an Oncoming Flow", *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25, No. 1, pp. 127～135.

(2) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1996, "Effect of Hole Arrangements on Impingement/Effusion Cooling", *Proceedings of the 3rd KSME-JSME Thermal Engineering Conference*, pp. 71～76.

(3) Cho, H. H. and Rhee, D. H., 2000, "Local Heat/Mass Transfer Measurement on the Effusion Plate in Impingement/Effusion Cooling System", ASME paper No. 2000-GT-0252 (*J. of Turbomachinery*, accepted).

(4) 이동호, 김병기, 조형희, "분사각도변화에 따른 단일 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달 및 막냉각효율 특성", 1998, 대한기계학회 논문집(B) 제22권 제10호, pp. 1434～1445.

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

(6) 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.

(7) 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.

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

(9) Cho, H. H., Lee, C. H. and Kim, Y. S., 1997, "Characteristics of Heat Transfer in Impingement Jets by Control of Vortex Pairing", ASME paper No. 97-GT-276.