

연소실 냉각을 위한 충돌제트/유출냉각기법에서 유출판에서의 열전달특성

이 동 호* · 조 형 희**
(1999년 8월 7일 접수)

Heat Transfer Characteristics on Effusion Plate in Impingement/Effusion Cooling for Combustor

Dong Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words : Impingement/Effusion Cooling(충돌제트/유출냉각), Heat and Mass Transfer Analogy (열전달과 물질전달 유사성), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌 승화법), Hole Arrangement(홀배열), Gap Distance(판 사이 간격)

Abstract

The present study is conducted to investigate the local heat/mass transfer characteristics for flow through perforated plates. A naphthalene sublimation method is employed to determine the local heat/mass transfer coefficients on the effusion plate. Two parallel perforated plates are arranged for the two different ways: staggered and shifted in one direction. The experiments are conducted for hole pitch-to-diameter ratios of 6.0, for gap distance between the perforated plates of 0.33 to 10 hole diameters, and for Reynolds numbers of 5,000 to 12,000. The result shows that the high transfer region is formed at stagnation region and at the mid-line of the adjacent impinging jets due to secondary vortices and flow acceleration to the effusion hole. For flows through the perforated plates, the mass transfer rates on the surface of the effusion plate are about six to ten times higher than for effusion cooling alone (single perforated plate). More uniform and higher heat/mass transfer characteristic is obtained in overall region with small gap between two perforated plates.

기호설명

- d : 분사홀 및 유출홀의 내경
- dy : 나프탈렌 승화 깊이
- D_{naph} : 공기중에서의 나프탈렌의 물질확산계수
- H : 분사판과 유출판 사이의 간격
- h_m : 국소 물질전달계수, Eq. (1)
- \dot{m} : 단위면적 당 나프탈렌 질량유속
- Nu : Nusselt 수, $Nu = h d / k$
- Pr : Prandtl 수, $Pr = \mu C_p / k$
- P : 분사홀 또는 유출홀 사이의 간격
- Re_d : Reynolds 수, $Re_d = \rho u d / \mu$
- Sc : Schmidt 수,

- Sh : Sherwood 수, Eq. (2)
- t : 분사판의 두께
- x, z : 유출홀 중심으로부터의 좌표 (Fig. 2)

그리스문자

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

1. 서 론

가스터빈엔진의 열효율과 비추력은 터빈입구온도에 크게 좌우된다. 현재 사용중인 가스터빈엔진의 열효율 및 비추력을 높이기 위해서, 연소실 및 터빈요소에서는 재질의 용융점보다 훨씬 높은 온도의 연소가스가 통과하기 때문에 이러한 요소의

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hhcho@bubble.yonsei.ac.kr
TEL : (02)361-2828 FAX : (02)361-2159

냉각을 위해 여러 가지 냉각방법이 사용되고 있다.

최근 들어 전면막냉각(total coverage film cooling) 방법과 투과냉각(transpiration cooling) 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 투과냉각의 경우 높고 균일한 냉각성능을 얻을 수 있는 방법으로 알려져 있다. 하지만 이러한 냉각방법은 재질의 강도 등 여러 문제점으로 인하여 실용화되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 다공성 평판을 이용한 전면막냉각기법 및 충돌제트/유출냉각방법 등이 연구, 개발되고 있다. 이러한 냉각기법은 연소실 벽면 혹은 블레이드 표면과 같은 고온요소의 내부표면을 충돌제트에 의해 냉각시키고 이후에 고온가스와 접촉하는 표면을 막냉각을 통해 냉각시키는 복합냉각기법으로 높은 냉각효율을 얻을 수 있다. 이러한 냉각기법의 효율증가 및 내구성 향상을 위해서는 전반적인 열전달특성에 대한 고찰뿐만 아니라 국소적인 열전달계수의 분포에 대한 정보가 필요하다.⁽¹⁾

Hollworth와 Dagan,⁽²⁾ Hollworth 등⁽³⁾은 충돌제트/유출냉각에 대한 평균/국소 열전달계수를 구하였으며, 그 결과 단순평판에 대한 충돌제트 냉각에 비해 다공성 평판에 대한 냉각의 경우가 더 높은 열전달이 이루어짐을 보였다. 그러나 이러한 연구결과는 국소적인 열전달현상과 열응력의 해석을 위한 자료로서는 매우 미흡하다.

본 연구에서는 원형홀이 설치된 2개의 다공평

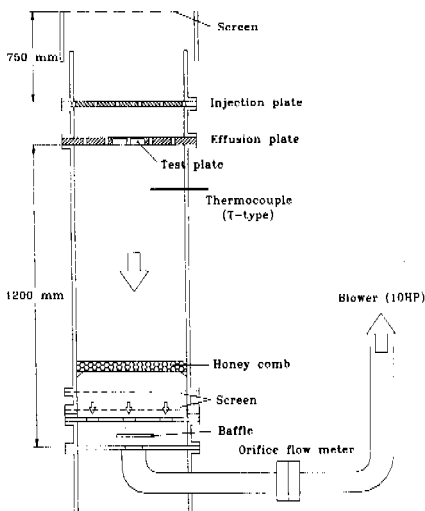
판을 통하여 충돌제트/유출냉각기법을 모사하였으며, 분사판과 유출판 사이 간격 및 홀 배열 변화에 대한 유출판 내부 표면에서의 열/물질전달특성을 고찰하였다. 유출판 내부 표면에서 유출홀 주위의 국소적인 열/물질전달계수의 분포를 파악하기 위하여, 물질전달실험방법의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하여 국소 열/물질전달특성을 고찰하였다. 이 실험방법은 열전달실험방법에서 발생하는 전도 및 복사오차를 제거할 수 있으며, 벽면 경계조건은 열전달실험조건에 있어서 등은조건에 해당한다.

2. 실험장치 및 방법

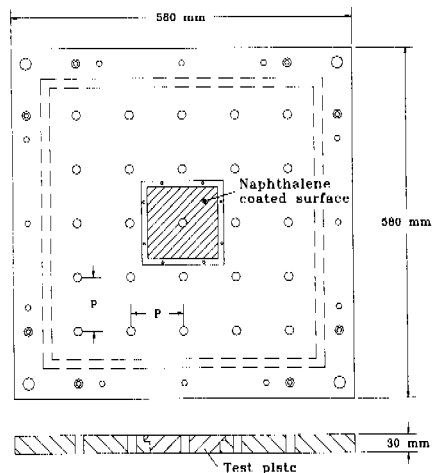
2.1 실험장치

Fig. 1에 실험장치와 유출판(effusion plate)의 개략도가 제시되어 있다. 대기 중의 공기가 배플(baffle)을 통해 분사판(injection plate)과 유출판을 거쳐, 유량측정을 위한 오리피스 유량계(orifice flowmeter)를 통과한 후 송풍기를 통해 외부로 유출된다. 플레넘 챔버의 크기는 450×450×1200 mm이다. 유동의 균일한 흡입을 위하여 플레넘 챔버 내부에 고온 망과 하니콤(honey comb)을 설치하였다.

분사판(injection plate)과 유출판은 평행하게 설치되어 있으며, 각 판에서의 홀배열은 정사각격자배열이며, 홀 사이 간격(P)은 6d, 홀 직경(d)은



(a) Experimental apparatus



(b) Effusion plate

Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus and effusion plate

15 mm, 분사판의 두께(t)는 1.33d이다. 유출판의 경우 홀의 개수는 25(5×5)개이며, 분사판의 경우 25개의 홀과 더불어 홀 배열변화를 위한 11개의 홀이 추가로 설치되어 있다.

유출판 내부표면에서의 국소 물질전달계수를 측정하기 위하여 Fig. 1(b)에서와 같이 나프탈렌 시험시편을 유출판의 중앙에 설치하였다. 시험시편에서 나프탈렌이 입혀진 영역은 8.3d×8.3d이며, 유출홀은 시험시편의 중앙에 위치한다.

홀 배열변화의 효과를 보기 위하여 엇갈림 홀배열(staggered hole arrangement)과 한방향 편심배열(shifted hole arrangement) 등 2가지 홀배열에 대하여 실험을 수행하였다. 각각의 홀배열의 개략도와 실험에 사용된 좌표축이 Fig. 2에 제시되어 있다. 각각의 홀배열에 있어서 시험시편의 유출홀의 중심이 좌표축의 원점이다. 엇갈림 배열의 경우 인접 4개의 유출홀 사이에 분사홀이 존재하며, 한방향 편심배열의 경우 분사홀이 유출홀이 좌우로 3d만큼 떨어진 곳에 위치한다.

2.2 시험시편

유출냉각시편의 개략적인 치수와 형상이 Fig. 3에 제시되어 있다. 유출분사홀은 유동방향과 평행하게 제작되어 수직 막내각홀 내부에서의 열/물질전달특성을 고찰하도록 하였다. 유출홀의 직경은 15 mm이고, 홀 주위에 8.3d의 정사각 면적에 5 mm의 깊이로 나프탈렌층이 입혀져 있다. 나프

탈렌이 채워지는 면에는 깊이 2 mm, 폭 5 mm의 홈을 설치하여 나프탈렌층이 시편에 잘 부착하도록 하였다. 나프탈렌 표면 부근에 T-type(copper-constantan) 열전대를 부착하여 실험중 나프탈렌 표면온도를 측정하였다.

2.3 승화 깊이 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.

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

본 연구에서는 분사되는 제트에 나프탈렌이 포함되어있지 않으므로 $\rho_{v,\infty} = 0$ 이다. 따라서 물질전달계수는 나프탈렌 승화량(dy), 실험시간(dr), 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.

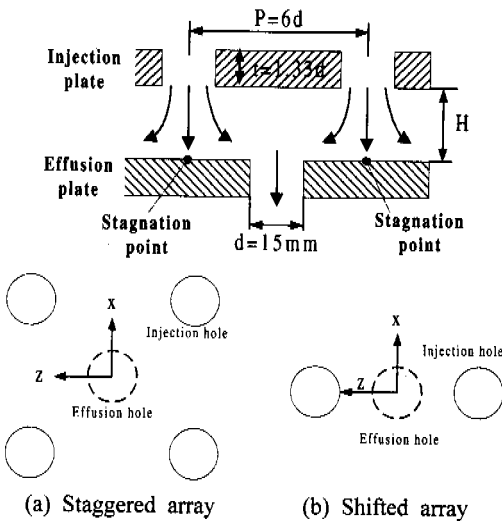


Fig. 2 Schematic view of hole arrangements and coordinate (hole size not to scale)

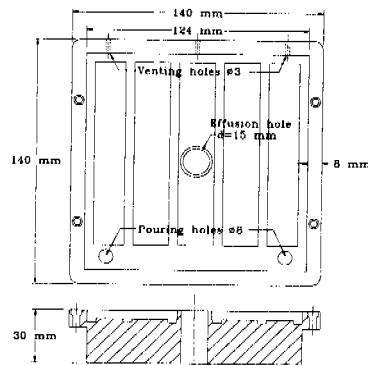


Fig. 3 Test plate for impinging/effusion cooling experiment

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

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

앞에서 계산된 물질전달계수는 열전달과 물질전달간의 유사성을 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%로 매우 작으며, 표면온도, 고체 나프탈렌의 밀도, 물질전달계수의 불확실성은 각각 0.2%, 1.1%, 4.9%로 나타났다.

4. 유동가시화

분사되는 제트의 유동특성을 고찰하기 위하여 연기열선법(smoke-wire flow visualization)을 통하여 유동가시화를 수행하였다. 2개의 가느다란 니크롬선(직경 0.1 mm)을 분사판과 유출판의 표면 부근에 설치하여 분사홀 중심선에서의 유동장을 가시화하였다. 유동가시화를 하기 위하여 니크롬선에 기어오일을 바르고 전원공급장치를 통하여 약 60V의 전원을 가하면 니크롬선에 묻혀진 기어오일 방울들이 증발하면서 하얀 유맥선을 형성하게 된다. 이렇게 가시화된 유동장은 비디오 카메라(SONY NTSC CCD-F36)를 통하여 촬영하였

Table 1 Test parameters

Hole arrangement		H/d	Red
Single layer		-	10,000
Double layer	Staggered array	0.33, 1.0, 2.0,	5,000
		6.0, 10.0	10,000
	Shifted array	1.0	12,000
			10,000

다. 비디오 카메라는 화상처리보드(image processing board, MIL-Lite Matrox II board)와 연결되어 촬영된 유동장은 동영상파일로 저장된다. 이 동영상파일을 통하여 유동장의 순간적인 사진을 획득하였으며, 이러한 결과를 통하여 유동장에 대한 정성적인 연구를 수행하였다.

5. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 나프탈렌 승화법을 이용하여 판 사이 간격, Reynolds 수, 홀 배열변화시의 열/물질전달특성을 고찰하였으며, 실험인자를 Table 1에 정리하였다.

Fig. 4는 유출판만이 존재하는 경우 유출판 내면에서의 등계수선도와 국소적인 Sh 수 분포를 나타내는 그림이다. 등계수선도에서 2개의 반원은 유출홀과 홀 테두리를 나타낸다. 이 경우 유동이 유출홀에 근접함에 따라 유동이 가속되며 유출홀 주위에 대칭적으로 열/물질전달 촉진영역이 형성되는 것을 알 수 있다. 인접 유출홀 간의 상호작용으로 인하여 촉진영역이 환형이 아닌 마름모형태를 갖는 것으로 생각된다.

5.1 판 사이 간격 변화의 효과

Fig. 5는 $Re_d=10,000$, 엇갈림 배열의 경우 판 사이 간격변화에 따른 유출판 내면에서의 등 Sh 수 선도를 나타내는 그림이다. 하얀 점선으로 나타난 원은 분사홀의 위치를 나타낸다.

모든 경우에 있어서 Sh 수의 분포가 대칭적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 분사홀 간의 간격이 넓기 때문에 분사제트가 충돌하는 영역에서는 단일충돌제트의 경우와 매우 유사한 열/물질전달특성을 갖는다. 즉, 정체점(stagnation point

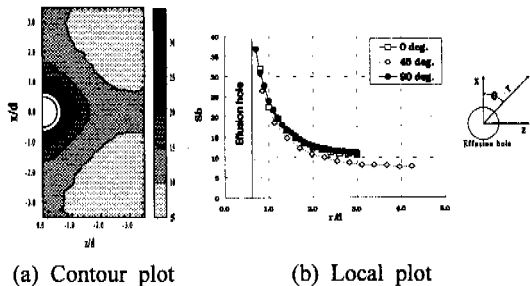


Fig. 4 Sherwood number for single layer with $Re_d=10,000$

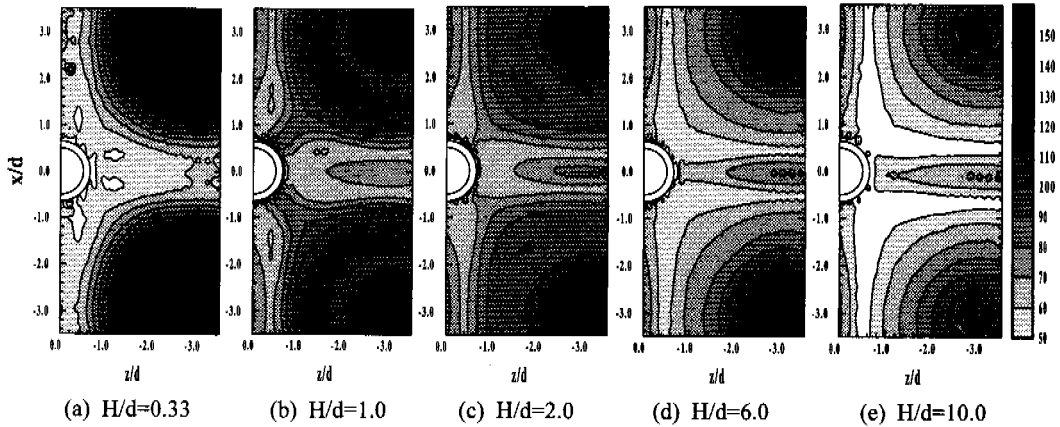


Fig. 5 Contour plots of Sherwood number for $Re_d=10,000$ with staggered array

Table 2 Average Sherwood number for various gap distances at $Re_d=10,000$ and staggered array

H/d	Single layer	0.33	1.0	2.0	6.0	10.0
\bar{Sh}	11.0	100.8	96.0	92.8	82.9	68.2

; $z/d=-3.0$ and $x/d=\pm 3.0$) 부근에서 높은 열/물질 전달이 이루어지며, 이후 벽제트(wall jet)가 진행하면서 경계층의 발달로 인하여 서서히 감소하는 경향이 나타난다.

판 사이 간격이 작은 경우($H/d=0.33, 1.0$) 정체점으로부터 약 $1.5d$ 떨어진 곳에 2차 극대점이 형성되는 것을 알 수 있는데, 이는 정체점 부근에서 유동이 가속되기 때문에 벽제트가 층류화되었다가 반경방향으로 진행하면서 난류로 천이되기 때문이다. 판 사이 간격이 큰 경우($H/d \geq 2$) 정체점에서 Sh 수가 최대 값을 가지며, 그 이후 단조 감소하는 분포를 갖는다.

분사제트가 유출면에 충돌한 이후 유동이 진행하면서, 인접 벽제트간의 상호작용으로 인하여 유출홀 사이 중간영역에 상승와류가 형성된다.⁽⁹⁾ 또한 이에 반하는 2차와류가 형성되어 유출홀로 유입되면서 중간영역에 열/물질전달촉진영역이 형성된다. 하지만 $H/d=0.33$ 과 같이 판 사이 간격이 아주 작은 경우 정체점 부근에서의 물질전달은 매우 높게 나타났으나, 유출홀 사이의 중간영역에서는 내부판 유동과 유사한 유동이 형성되며, 유출홀로의 유동의 흡입이 강하기 때문에 인

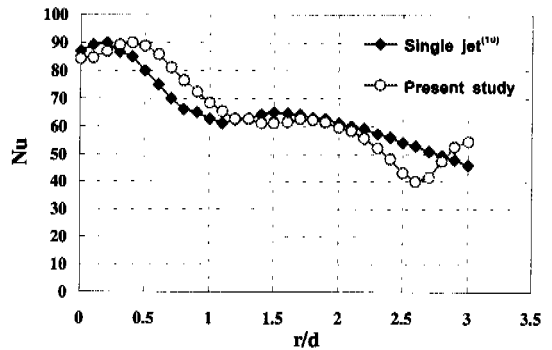


Fig. 6 Comparison of local heat transfer coefficients for impinging jet with other result for $H/d=2.0$ and $Re_d=10,000$

접제트간의 상호작용이 약화되고 열/물질전달 촉진정도가 매우 약한 것으로 나타났다.

Table 2에 유출판만 존재하는 경우와 판 사이 간격변화에 따른 평균 Sh 수를 제시하였다. 평균에 사용된 Sh 수는 $-3.5 \leq x/d \leq 3.5, -3.5 \leq z/d \leq 0.0$ 의 영역의 값을 취했다. 그림에서 예상할 수 있듯이, 2개의 다공성 평판을 설치하는 경우 \bar{Sh} 는 유출판만이 존재하는 경우에 비하여 6~10배 정도 높은 값을 갖는 것으로 나타났다. 또한 $H/d=0.33$ 인 경우 최대값을 가지며, 판 사이 간격이 커질수록 평균값이 작아진다.

Fig. 6은 $H/d=2, Re_d=10,000$ 인 경우에 대하여 Sh 수를 열전달과 물질전달간의 상사성을 이용하여 Nu 수로 전환한 값을 단일충돌제트에 대한 실험결과⁽¹⁰⁾와 비교한 그림이다. 실험조건이 동일

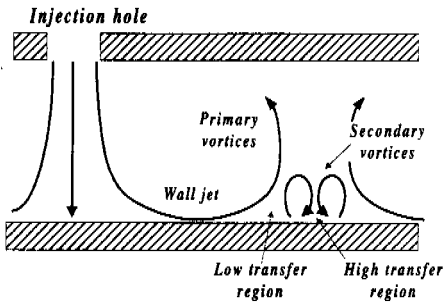


Fig. 7 Expected flow pattern of array impinging jets

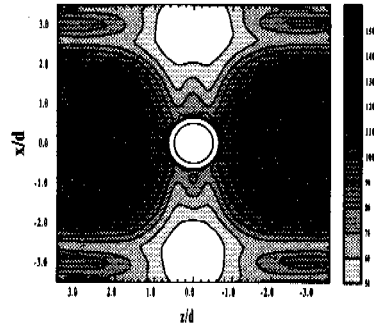


Fig. 9 Contour plots of Sherwood number for shifted array with $H/d=1.0$ and $Re_d=10,000$

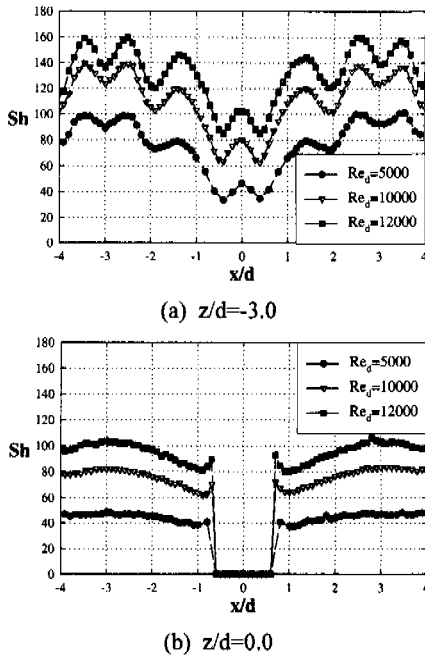


Fig. 8 Local plots of Sherwood number for various Reynolds number with staggered array and $H/d=1.0$

하지 않기 때문에 Nu 수 분포가 동일하지는 않지만, Nu 수의 크기가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 배열제트를 이용하였으므로, $r/d=3.0$ 부근에 2차와류에 의한 열/물질전달촉진 영역이 형성되며, 분사제트의 상승와류와 2차와류의 사이 영역인 $r/d=2.5$ 부근에 정체영역이 형성되는 것을 알 수 있다. 배열제트에서의 유동의 개략도를 Fig. 7에 제시하고 있으며, 이러한 유동 특성은 이후에 제시될 연기열선법 결과를 통해

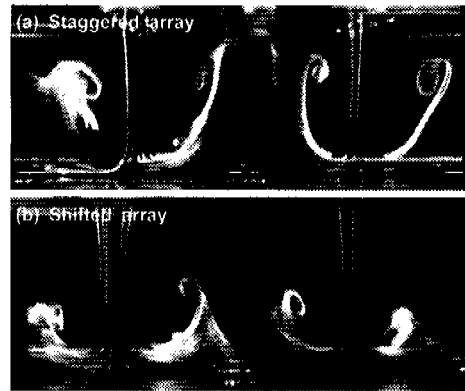


Fig. 10 Flow visualization by smoke-wire technique with different hole arrangements

명확히 알 수 있다.

5.2 Reynolds 수 변화의 효과

Fig. 8은 $H/d=1.0$ 인 경우 Re 수의 변화에 따른 국소 Sh 수의 분포를 나타내는 그림이다. Sh 수의 분포는 Reynolds 수의 변화에 관계없이 매우 유사한 분포를 나타내고 있으나, Re 수가 증가함에 따라 전반적으로 Sh수가 상승하는 것을 알 수 있다.

5.3 홀 배열변화의 효과

Fig. 9는 엇갈림 배열과 한방향 편심배열에 대하여 $H/d=1.0$, $Re_d=10,000$ 인 경우에 대한 등Sh수선도이다. 한방향 편심배열의 경우 Fig. 2에서와 같이 유출홀이 중앙에 위치하며, 양옆에 분사홀이 위치한다. 한방향 편심배열의 경우도 정체점 부근에서의 열/물질전달분포는 엇갈림 배열의 경우와 유사하다. 하지만 유출홀 부근영역($-0.6 < x/d < 0.6$)을 제외한 $z/d=0.0$ 영역에서 낮은 열/물질전달영역이

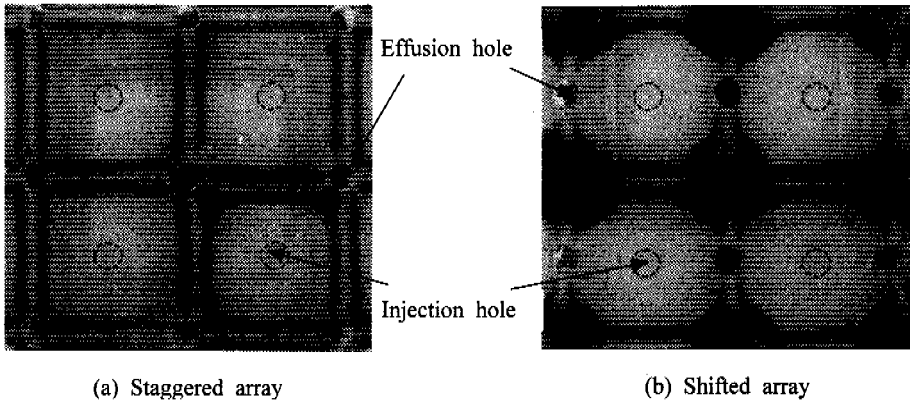


Fig. 11 Photographs of oil & lampblack visualization for $H/d=2.0$

존재하는 것을 알 수 있다. 분사제트의 상호작용에 의해 형성된 2차와류가 유출홀로의 흐름이 원활하지 못하기 때문에, 2차와류의 강도가 약화되어 이러한 정체영역이 형성되는 것으로 생각된다. 따라서 엇갈림 배열의 경우와 다르게 열/물질 전달촉진영역이 보다 작은 영역에 국한되는 것으로 나타났다.

위와 같은 사실로부터 단순배열제트에 의한 냉각에 비해 냉각표면에 유출홀이 존재하는 경우, 홀 배열이 엇갈림 배열의 경우가 2차와류의 흐름을 원활하게 해줌으로써 좀더 향상된 냉각성능을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 10은 $H/d=4$ 인 경우에서 홀 배열변화에 따른 열전달에 의한 유동가시화 결과이다. 엇갈림 배열의 경우 인접제트간의 상호작용으로 인하여 중앙부근에서 강한 상승 와류가 생성되는 것을 관찰할 수 있으며, 이에 반대되는 2차와류가 생성되는 것으로 생각된다. 하지만 한방향 편심배열의 경우 유출홀로 유동이 흡입되면서 상승와류의 강도가 훨씬 더 약화되는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 $H/d=2$, $Re_d=10,000$ 인 경우에 대한 유동가시화 결과를 나타낸다. 유출홀 사이 중간영역에서의 2차와류를 관찰하기 위하여 기름과 탄소가루의 묽은 혼합액을 사용하였다. 엇갈림 배열의 경우 불질전달실험결과와 마찬가지로 사각형태의 격자가 형성되는 것을 알 수 있으며, 유출홀 사이 영역에 2차와류로 인한 촉진영역이 관찰된다. 또한 Fig. 7에서 언급했듯이 분사제트의 상승와류와 2차와류 사이에 정체영역이 형성되는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 한방향 편심배열의 경우 유출홀 사이영역에 낮은 전달영역이 형

성되는 것을 알 수 있으며, 2차와류의 영향을 받는 영역이 상대적으로 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

6. 결론

(1) 엇갈림 배열 홀배열의 경우 유출판만이 존재하는 경우에 비해서 평균물질전달이 6~10배정도 증가하였다. 정체점에서의 Sh 수는 $H/d=6.0$ 인 경우 최대값을 가지며, 평균적인 열/물질전달은 판사이 간격이 작아질수록 증가하는 것으로 나타났다.

(2) Reynolds 수의 변화에 따른 열/물질전달분포는 유사하지만, Reynolds 수가 증가할수록 Sh 수가 증가하였다.

(3) 한방향 편심배열의 경우 2차와류의 강도가 약화되어, 엇갈림 배열의 경우가 보다 나은 냉각성능을 갖는 것으로 나타났다. 이는 엇갈림 배열의 경우 유출홀의 영향으로 인해 유동이 가속되며 2차와류가 강화되기 때문인 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 터보동력기계 연구센터(TPMRC) 및 한국과학재단(과제번호:98-02-00-13-01-3)의 지원에 의한 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1997, "Total Coverage Discrete Hole Wall Cooling," *ASME J.*

- of Turbomachinery*, Vol. 119, No. 2, pp. 320~329.
- (2) 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," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 102, pp. 994~999.
- (3) Hollwarth, B. R. and 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," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 393~402.
- (4) 이동호, 김병기, 조형희, "분사각도변화에 따른 단일 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달 및 막냉각효율 특성," 1998, 대한기계학회논문집(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, Hemisphere Pub., New York.
- (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. 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.
- (10) Lee, J. H. and Lee, S. J., 1998, "Turbulent Heat Transfer Characteristics in a Stagnation Region of Axi-Symmetric Jet Impingement," *Proceedings of 11th IHTC*, Vol. 5, pp. 433~438.