

< 논 문 >

연소기 내벽의 전면 막냉각 사용시 효율 증대에 관한 연구

조형희* · R. J. Goldstein**

(1996년 8월 3일 접수)

Experimental Study to Enhance Cooling Effects on Total-Coverage Combustor Wall

Hyung Hee Cho* and Richard J. Goldstein**

Key Words : Total-Coverage Film Cooling(전면 막냉각), Naphthalene Sublimation Technique (나프탈렌 승화법), Heat Transfer Coefficient(열전달계수), Gas Turbine(가스터빈), Impingement/Effusion Cooling(충돌제트/유출 냉각)

Abstract

The present study investigates heat/mass transfer for flow through perforated plates for application to combustor wall and turbine blade film cooling. The experiments are conducted for hole length-to-diameter ratios of 0.68 to 1.5, for hole pitch-to-diameter ratios of 1.5 and 3.0, for gap distance between two parallel perforated plates of 1 to 3 hole diameters, and for Reynolds numbers of 60 to 13,700. Local heat/mass transfer coefficients near and inside the cooling holes are obtained using a naphthalene sublimation technique. Detailed knowledge of the local transfer coefficients is essential to analyze thermal stress in turbine components. The results indicate that the heat/mass transfer coefficients inside the hole surface vary significantly due to flow separation and reattachment. The transfer coefficient near the reattachment point is about four and half times that for a fully developed circular tube flow. The heat/mass transfer coefficient on the leeward surface has the same order as that on the windward surface because of a strong recirculation flow between neighboring jets from the array of holes. For flow through two perforated plate layers, the transfer coefficients on the target surface (windward surface of the second wall) affected by the gap spacing are approximately three to four times higher than that with a single layer.

기 호 설 명

D : 분사홀직경 ($4.76\text{mm} \leq D \leq 25.4\text{mm}$)
 D_{naph} : 공기중에서 나프탈렌의 물질확산계수
 G : 두 다공성평판 사이의 간격 ($1D \leq G \leq 3D$)
 h_m : 국소 물질전달계수, 식 (1)
 \dot{m} : 단위면적, 단위시간 당 국소 물질전달량
 Nu : 홀내경을 기준으로 한 Nusselt수

Pr : Prandtl수
 P : 홀배열에서 홀과 홀 사이의 간격
 r, R : 반경
 Re : 홀직경과 홀내의 평균 속도를 기준으로 한 Reynolds수
 Sc : 공기중에서 나프탈렌의 Schmidt수 (298K, 0.1MPa에서 약 2.28)
 Sh : 홀직경을 기준으로 한 Sherwood수, 식 (2)

*회원, 연세대학교 기계공학과

**University of Minnesota

- t : 분사홀 길이 ($0.68 \leq t/D \leq 1.5$)
 X, Z : 흡중심으로부터의 거리(직교좌표계, Fig. 3)
 Y : 흡축을 따라 흡입구부터의 거리
 $\delta\tau$: 실험시간
 δz : 국소 나프탈렌 승화량
 ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도
 $\rho_{v,w}$: 표면에서 기체 나프탈렌 밀도
 $\rho_{v,\infty}$: 무한유동장에서의 기체 나프탈렌 밀도 ($\rho_{v,\infty}=0$)
 σ : 표준 오차
 θ : 흡주위에서의 각도(Fig. 3)

1. 서 론

가스터빈의 열효율은 터빈 연소실의 출구온도에 크게 좌우된다. 연소온도를 증가시키므로 높은 열효율을 얻을 수 있지만, 그 온도는 요소재질의 열피로 한계 또는 열응력에 견디는 정도에 따라 제한된다. 그러므로 재질 한계온도 이상의 고온에서 운전하기 위해서는 냉각이 필요하다. 연소실 벽면 냉각 방법으로 전면 막냉각이 가장 효율적으로 사용될 수 있다.^(1,2)

본 연구는 연소기 내벽을 고온의 연소가스로부터 보호하기 위하여 사용될 수 있는 전면 막냉각에 대한 열/물질전달에 대하여 실험적인 연구를 하였고, 그 효율을 증가시키는 방법으로 다층 평판 막냉각(laminated plates with perforations)에 대하여 연구하였다. 전면 막냉각 사용시 표면에서 열전달량을 해석하기 위해서는 네 개의 값이 필요하다: 즉, 요소표면(exposed surface)에서의 막냉각효율(film cooling effectiveness)과 열전달계수(heat transfer coefficient)가 필요하고, 그 외 내벽(internal passage)과 흡안(inside hole surface)에서의 열전달계수가 필요하다. 본 연구에서는 모든 면에서의 국소 열/물질전달계수를 나프탈렌 승화법을 사용하여 구하였다. 물질전달 실험방법(naphthalene sublimation technique)은 열전달 실험방법에서 가장 큰 문제인 전도 및 복사오차를 없앨 수 있다.⁽³⁾ 이 방법에서 표면 경계 조건은 열전달의 등온 조건에 해당된다. 위에서 얻은 물질전달 결과는 열전달과 물질전달 사이의 상사성에 의하여 열전달계수로 전이할 수 있다.⁽⁴⁾ 전면 막냉각판, 즉 다공성판에서의 유동은 흡과 흡 사이의 간격에 따라 크게 좌

우되며, 전체 유동장은 각각 흡주위의 유동장 요소들로 나누어진다. Ortiz⁽⁵⁾는 평균 물질전달계수를 격자 흡배열에서 승화량 무게 측정법으로 구했다. Andrews 등^(6,7)은 다공판 주위 유동에 대하여 평균 열전달계수를 여러 다른 조건에서 구했다. 그 실험 결과는 판 두께, 흡 사이의 간격, Reynolds수에 따라 변했다. Andrews 등^(6,7)은 평균값 측정으로부터 주된 열전달은 전면(windward surface)과 흡내면에서 일어나며 후면(leeward surface)에서는 무시된다고 주장하였다. 하지만 본 실험에서 얻은 결과는 흡과 흡 사이의 간격이 작은 경우($P \leq 3D$) 후면에서도 높은 열전달계수를 얻었다. 본 논문은 다공성 평판에서 최적설계조건을 얻기 위해서 국소 전달계수를 구하고자 한다. 또한 다공성평판 내면에서의 열전달효과를 높이기 위하여 충돌제트/유출방법을 사용하였다. 이 방법은 충돌제트의 국소적으로 높은 열전달효과와 막냉각의 장점을 함께 사용하여 요소냉각효과를 극대화하기 위함이다. 앞에서도 언급했듯이 막냉각에서 효율을 증가시키고 국소 고온 부위를 없애고, 열응력 해석을 위해서는 전체 평균 열전달계수를 얻는 것과 더불어 국소값을 구하는 것이 중요하다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

커다란 사각 플레넘(plenum)의 윗면에 다공성 평판을 놓고, 그 플레넘을 통하여 공기를 흡입시킴으로써 평판에 있는 흡주위와 흡내면에서의 열/물질전달량을 구하였다. 사각 플레넘의 크기는 정사각단면($572\text{mm} \times 572\text{mm}$)에 1400mm의 높이로 균일 유동장을 얻음을 목적으로 한다(Fig. 1). 플레넘 입구에는 주위에 있는 불규칙한 공기 유동이 흡입 입구 유동장에 영향을 미치는 것을 방지하기 위하여 칸막이를 했다. 공기가 흡입되는 칸막이 입구에는 조밀한 간격의 철망을 놓아 불규칙한 유동이 흡입되는 것을 방지하였다. 다공성평판을 통과한 공기는 사각 플레넘 바닥에서 나오는 관(pipe)과 연결되어 있는 유량계(orifice)를 통하여 송풍기로 흡입된 후 건물 밖으로 방출된다.

본 실험장치는 막냉각 흡주위와 흡내벽에서 국소 또는 평균 열/물질전달계수의 측정을 가능하도록 설계하였다. 물질전달계수를 측정하기 위해서 흡주위에 얇은 나프탈렌층을 입히고 그 승화되는 양을

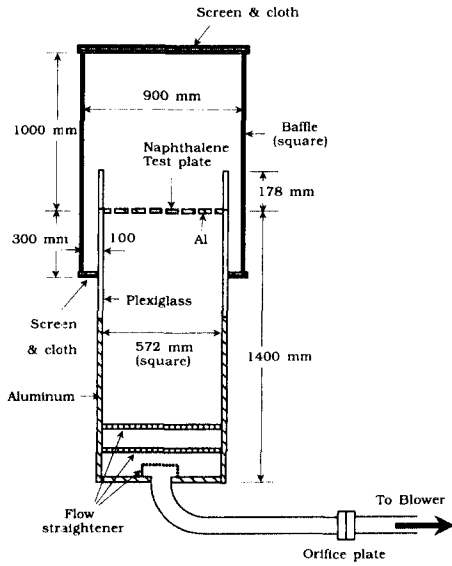


Fig. 1 Schematic front view diagram of the experimental apparatus.

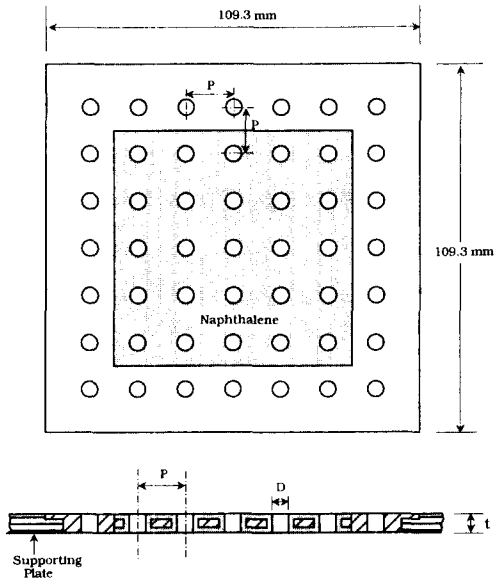


Fig. 2 Test plate of an array of holes for entire domain measurements.

측정할 수 있도록 시편을 만들었다. 본 실험에서는 두 종류의 다른 시편을 사용했는데, 하나는 전체적인 평균값을 얻기 위해서 작게 만들고, 다른 하나는 홀주위와 내면에서의 국소값을 얻기 위하여 큰 시편으로 만들었다. 이중 다공성 평판의 경우 관 사이의 간격 및 홀 배열 효과를 보기 위해서 설계되었다. 평균 전달계수 측정을 위한 작은 시편은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 전체 7×7 홀 배열 주위에서 가운데 3×3 또는 5×5 홀들이 나프탈렌으로 구성되어 있다. 국소 전달계수의 측정을 위해서는 큰 시편을 사용하여 가운데 홀주위에만 나프탈렌으로 만들었다(Fig. 3). 사용된 시편에 대한 홀 직경 등의 수치는 Table 1에 주어져 있다. 모든 시편에 나프탈렌을 입히기 위해서 주조 방법을 사용하였다. 가열하여 녹인 나프탈렌용액을 주물에 부어 굳힌 후, 그 주물 덩개 판 및 봉을 시편으로

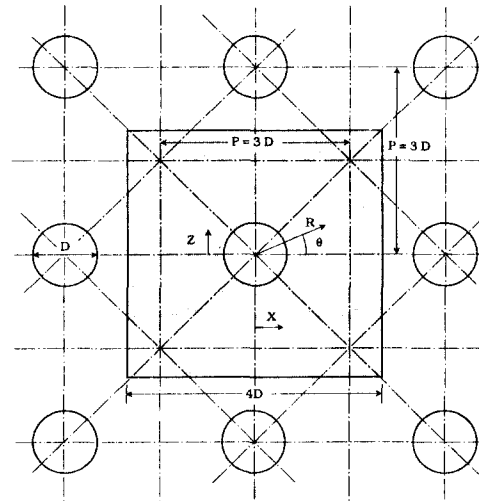


Fig. 3 Symmetry lines and coordinate system at an in-line array of holes.

Table 1 Configurations of the test plates (total number of holes=7×7)

D (mm)	4.76	4.76	4.76	9.51	25.4
P/D	3.0	3.0	3.0	1.5	3.0
t/D	1.36	0.95	0.95	0.68	1.48
No. of active holes	5×5	3×3	5×5	5×5	1

부터 분리함으로써 시편을 얻었다. 매끈한 나프탈렌 표면은 잘 연마된 주물 덮개로써 얻어진다.

2.2 물질전달률 측정장치 및 방법

물질전달계수를 측정하기 위해서 주조된 나프탈렌 시편을 실험하기 전과 후의 표면 높이를 측정하여 그 차이로써 실험중 나프탈렌이 승화된 양을 구하였다. 나프탈렌 표면 고도를 측정하는 장치로는 LVDT(linear variable differential transformer)를 사용했고, 정도는 $0.025\mu\text{m}(1\mu\text{in})$ 로 매우 정교하다. 이 LVDT를 컴퓨터로 조정되는 자동이송장치에 연결하여 빠르고 정확한 위치에서 표면고도를 측정할 수 있도록 했다. 이와 같은 측정장치를 사용하는 경우 측정오차는 평균의 경우 $0.15\mu\text{m}$, 홀내면의 경우 $0.45\mu\text{m}$ 로써 실험중 평균 승화되는 양이 $50\mu\text{m}$ 이므로 측정오차는 1% 이내에 있다. 또 자동 이송장치의 사용으로 평균 1시간에 2000점을 측정하는 것이 가능하므로 빠른 시간에 많은 국소값을 구할 수 있었다. 하지만 나프탈렌의 포화 증기압은 온도에 매우 민감하여 1°C 에 10% 정도가 변한다. 그러므로 나프탈렌 표면에서의 정확한 온도 측정이 필수적이다. 본 실험에서는 T-type(copper-constantan) 열전대를 사용하였고, 실험중 온도변화는 0.2°C 이내로 유지시켰다. 물질전달계수는 다음 식으로 표시된다.

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

여기서, 흡입공기는 나프탈렌을 포함하고 있지 않기 때문에 $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 결국 나프탈렌의 승화량, 즉 높이 차이(δz)와 실험시간($\delta \tau$), 고체 나프탈렌의 밀도와 표면에서 포화 증기압($\rho_{v,w}$)에 의해서 물질전달계수는 결정된다. 위의 전달계수는 무차원 값인 Sherwood수로 나타낼 수 있다.

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

여기서 D 는 분사홀의 직경이고, D_{naph} 는 공기중에서 나프탈렌의 확산계수이다. 여기에 사용되는 물성치는 Goldstein and Cho⁽³⁾에 잘 나타나 있다. 여기서 얻어진 물질전달계수는 물질전달과 열전달 사이의 유사성에 의하여 열전달계수로 바꿀 수 있다. 그 관계식은

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

으로 주어지고, 난류 유동에서는 $n=0.4$, 층류 유동에서는 $n=1/3$ 으로 사용되고 있다.

실험결과에 대한 오차해석은 Kline 과 McClintock⁽⁸⁾에 의해서 제시된 방법을 사용하였다. 95% 오차범위(confidence interval)에서 Sh수의 상대오차는 7.1% 이내로 주어지지만, 대부분의 오차는 불확실한 물성치에 기인되었다. 그 예로써 나프탈렌의 포화증기압은 3.77%, 공기중에서 나프탈렌의 확산계수는 5.1%의 오차를 갖지만, 승화량 두께 측정상대오차는 0.9%에 불과했다.

3. 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 첫번째로 in-line 홀배열의 얇은 단층 다공성 평판 주위의 유동에 대하여 연구하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 홀과 홀 사이의 간격이 작은 경우 한 홀주위의 유동은 주위에 있는 다른 홀유동에 의해서 제한된다. 앞면에서 접근하는 유동은 홀과 홀 사이의 중간에 정체선(stagnation lines)을 가지며, 전체 유동은 정체선들로 나뉘어 각 홀주위마다 하나의 독립된 유동장을 가지게 된다. 각 분리된 유동장(subdivided cell)은 각각 홀에서 같은 형태를 가지게 된다. 홀 안에서의 유동장은 단일 홀을 통하는 유동과 큰 차이가 없을 것으로 예측된다. 홀로 유입된 유동은 홀 입구에서 박리되어 입구유동 속도에 따라 홀내면에서 재부착된 후 홀 밖으로 분사된다. 각 홀에서 분출된 제트

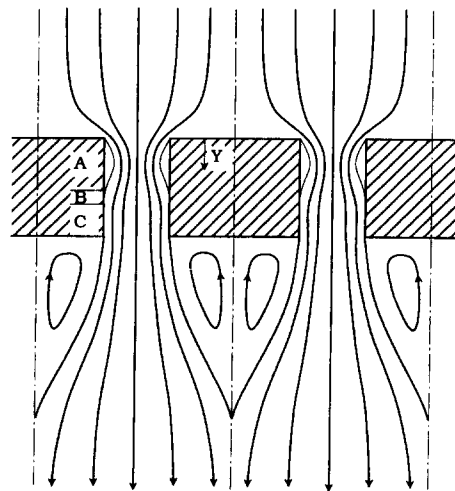


Fig. 4 Schematic flow pattern through an array of holes.

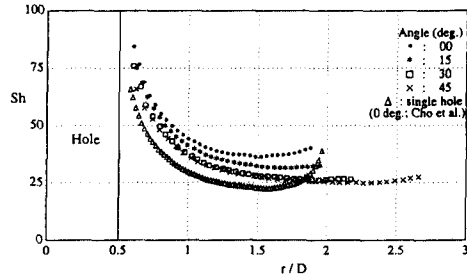
가 상호간섭하여 와류를 형성하면서 분사홀 바닥면에 영향을 준다. 이와 같은 유동 현상이 각각 면에서 열/물질전달에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 자세히 고찰하고, 뒷면 상류에 다공성판이 하나 더 있는 경우, 즉 laminate된 다공성판에서의 열/물질전달 특성에 대하여도 고찰하고자 한다.

3.1 전면과 후면에서의 열/물질전달

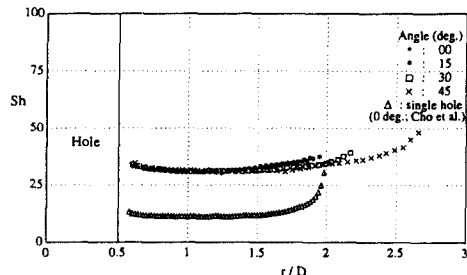
Fig. 5는 한 예로써 $Re=1,460$ 에서 전면과 후면에서의 국소전달계수를 보여 주고 있다. 이 경우는 전체 7×7 홀배열중에서 가운데 5×5 홀배열이 나프탈렌으로 덮여 있으므로 물질전달이 일어난다. 이 결과는 가운데 홀주위에서는 거의 주변효과(edge-effect)를 받지 않음을 보여주고 후면에서는 후류가 잘 혼합되어 거의 균일한 물질전달을 가지고 있음을 보여주고 있다. 그러므로 7×7 홀배열중 가운데 홀주위의 유동은 무한 홀배열에서 얻어지는 결과를 대표할 수 있는 것으로 사료되며, 앞으로의 결과는 가운데 홀주위에서만 상세하게 보여 줄 것이다.

Fig. 6은 $Re=11,800$ 에서 가운데 홀주위의 전면과 후면에서의 물질전달계수를 원통 좌표로 나타내었다. 이 결과는 단일 홀만 있는 경우와 비교해 보았다.⁽⁹⁾ 단일 홀(single hole)주위의 유동결과는 가장 기초가 되는 자료이고, 또한 홀배열에서 홀과

홀 사이의 간격이 큰 경우 결국 단일 홀주위의 유동에 근접할 것이다. 전면(windward surface)에서 보면 배열의 경우 물질전달계수가 약 50% 증가함

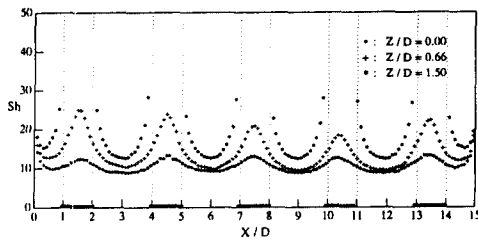


(a) Windward surface

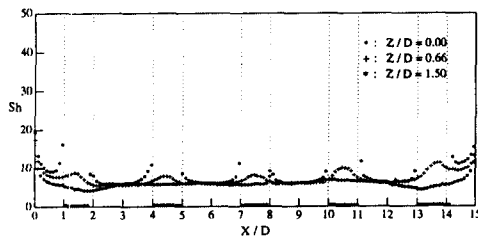


(b) Leeward surface

Fig. 6 Local Sherwood number at $Re = 11,800$ compared with that of a single hole flow⁽⁹⁾.

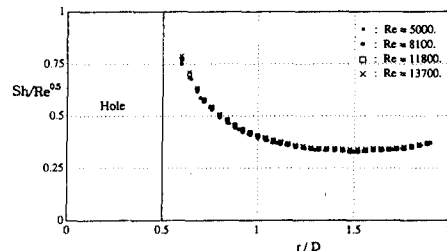


(a) Windward surface

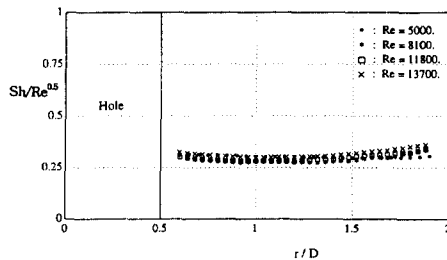


(b) Leeward surface

Fig. 5 Local Sherwood number of an array of holes at $Re=1,460$.



(a) Windward surface



(b) Leeward surface

Fig. 7 Normalized Sherwood number at $\theta=0^\circ$.

을 보여주고 있다. 이것은 유동이 다공성평판에 근접하면서 정체선을 형성하여 물질전달을 증가시키고, 또한 정체선으로부터 흡입구까지의 짧은 유동 거리에 기인한다. 후면(leeward surface)의 경우 물질전달계수는 앞에서 언급했듯이 전체면에서 매우 균일하고, 이 값은 단일 흡주위 유동의 경우보다 3배 정도 크다. 또 이 후면에서의 전달계수는 전면에서의 값과 거의 같은 크기로 매우 높다. 이 높고 균일한 값은 분출된 제트 사이의 상호작용과 후류형성에 의한 높은 난류강도에 기인된다. Fig. 7은 Reynolds수 변화에 따른 전달계수 값의 변화를 보여주고 있는데 Sherwood수를 $Re^{0.5}$ 로 나누면 모든 값이 한 곡선에 일치하고 있다. 이 결과로부터 전면과 후면에서의 $Sh/Re^{0.5}$ 값은 Reynolds수에 의해 변화하지 않고 일정하다는 결론을 얻을 수 있다.

3.2 출내면에서의 열/물질전달

배열홀 내부에서의 유동은 단일홀(single hole) 내부에서의 유동과 큰 차이를 보이고 있지 않다. 물질전달계수의 결과로부터 출내부를 Fig. 4에서 예시한 바와 같이 세 가지 영역으로 나눌 수 있다.

- A. 흡입구에서의 박리 및 재순환 영역(separation/recirculation region)
- B. 재부착 영역(reattachment region)
- C. 발전 영역(developing region)

Fig. 8은 국소 물질전달계수(Sherwood 수)를 Reynolds수의 변화에 따라 보여주고 있다. 이 결

과를 또한 단일홀의 결과와 비교하였다. 영역 A에서의 물질전달계수는 낮는데, 그 이유는 재순환 영역에서의 낮은 속도와 순환에 의한 물질전달의 단절에 기인된다. 이 물질전달계수는 재부착점에 근접함에 따라 급격히 증가한다. 일반적으로 재부착점 근방에서는 높은 난류강도를 가지는데, 이것은 주유동이 박리경계에서 가지는 높은 전단에너지의 확산에 기인된다. 재부착후, 유동과 물질전달 경계층이 발전함에 따라 물질전달계수는 점차적으로 감소한다(영역 C). 재부착점(정확히는 최대 Sh)의 위치는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 단일홀의 경우보다 입구에 가깝다. 그 원인은 배열홀의 경우 제한 유동 영역에 따라 유동이 흡입구로 근접할 때 적은 횡방향 운동량(lateral momentum)을 가지게

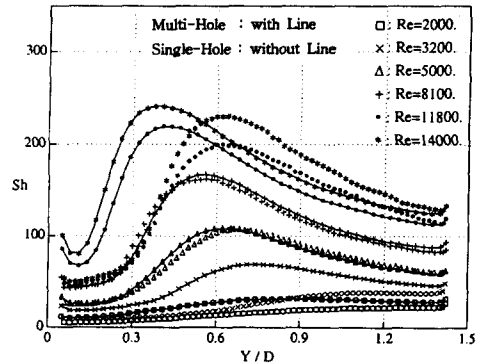


Fig. 8 Comparison of Sh inside the holes for an array of holes and a single hole flow⁽⁹⁾.

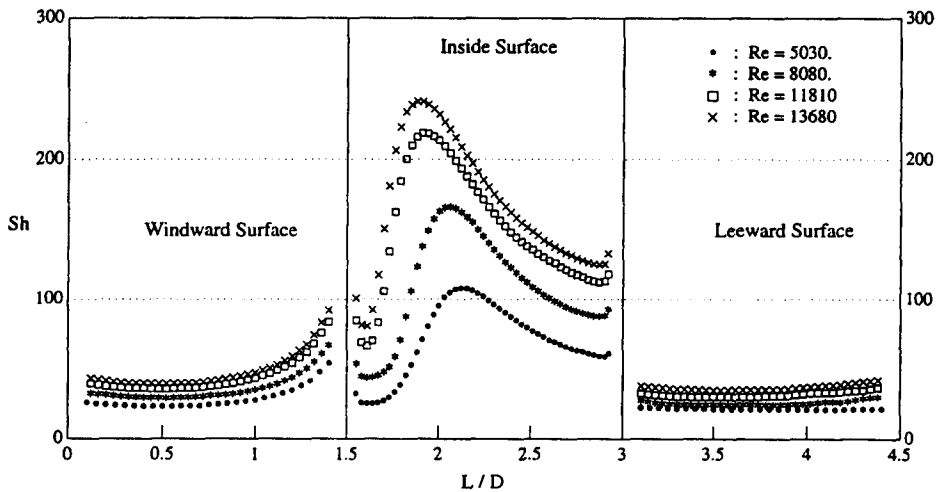


Fig. 9 Comparison of local Sh for an array of holes.

된다. 또한, 배열홀판으로의 근접 유동은 전단면에 충돌하여 더 빨리 난류 유동으로 바뀌기 때문에 짧은 재부착 길이를 가진다. 일반적으로 난류유동이 더 짧은 박리 영역을 가지며 재부착점에서 높은 Sherwood수를 가진다. 그러나 각 재부착점에서 최고 Sherwood수를 비교하면 Re 5,000인 경우 거의 같은 값을 가지고 있다. 이상에서 얻어진 각 면에서의 결과를 Fig. 9에서 비교하였다. 그림에서 보듯이 열/물질전달은 주로 홀내벽에서 일어나고 있다. 이 형상에서 홀내면의 면적은 전체의 22%인데 반해 물질전달량은 전체의 50% 정도를 보여주고 있다. 전면과 후면에서는 거의 같은 정도의 물질전달량을 보여주고 있는데, 이것은 단일홀의 경우 후면에서의 무시될 정도로 적은 물질전달량 값과 비교된다.⁽⁸⁾

3.3 충돌제트/유출에 의한 냉각(이중 다공성 평판유동)

막냉각판의 내부 벽면에서의 열/물질전달계수를 증가시키기 위해서 충돌제트를 사용해서 다공성평판을 냉각시키는 경우의 효과를 보았다. 충돌제트는 국소적으로 높은 열전달효과⁽¹⁰⁾를 가지므로 막냉각 탕법과 병행하는 경우 연소기 내벽 냉각에 좋은 효과를 줄 것이다. 본 연구에서는 Fig. 10에

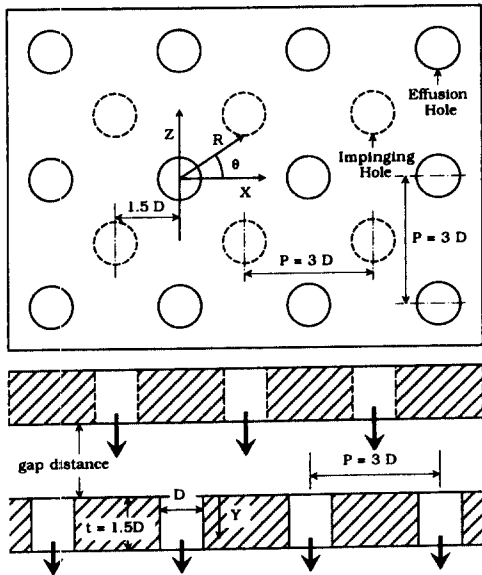


Fig. 10 Hole arrangement between two staggered layers (impingement/effusion cooling scheme).

서 보인 바와 같이 편심격자 홀배열(staggered layers)를 사용하였다. Fig. 11은 Re=5,070에서의 물질전달계수를 나타내고 있다. 두 충돌제트 홀은 Z/D=1.5에 위치한다. 충돌제트의 영향으로 Sherwood수는 Z/D=-2~-1 또는 1~2에서 매우 높고 균일하다. 물질전달계수는 Z/D=0.3에서 최소값을 가지나, Z/D=0에 근접함에 따라 급격히 증가한다. 이것은 근접한 두 충돌제트 사이에 형성된 와류가 두번째 판에 있는 유출홀로 가속되면서 그 강도가 커짐에 따라 높은 난류강도를 가지

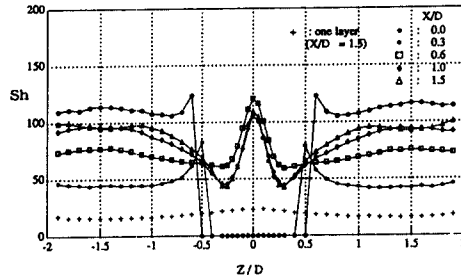


Fig. 11 Local Sh at two staggered layers with $G=2D$ ($Re=5,070$).

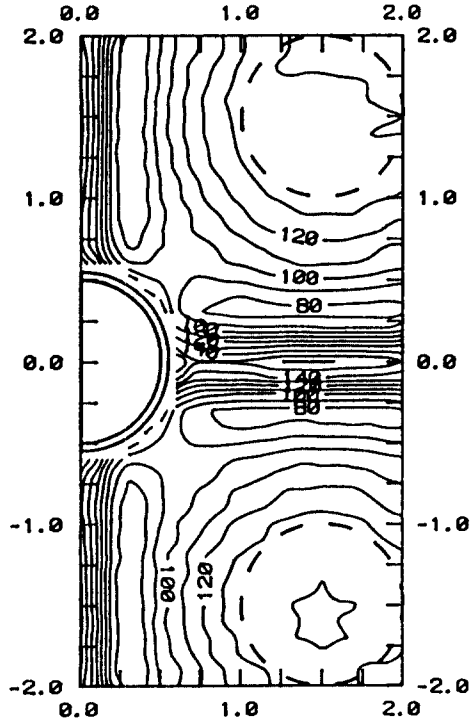


Fig. 12 Sh contour plot for two staggered layers with $G=2D$ ($Re=8,100$)

기 때문이다. 이 값을 앞 절에서 보인 단일 평판의 경우(그림에서 “+” 심벌)와 비교하면 3~4배정도 높은 값을 가진다. 이것은 충돌제트와 유출(막냉각)을 함께 사용하는 경우 좋은 냉각효과를 얻을 수 있음을 보여준다. Fig. 12는 위의 결과를 등전달계수 곡선으로 그린 그림이다. 이 실험결과는 좋은 대칭성을 보여주고 있다. 가운데 있는 두 동심원은 나프탈렌 승화량 측정을 위해 사용된 알루미늄 띠를 나타내고 있고, 점선 원은 충돌제트가 위치한 자리이다. Sherwood수가 중앙대칭선에서 2차 와류에 의해서 급격히 변화함을 잘 보여주고 있다.

Fig. 13은 두 다공성판 사이의 간격 변화에 따른 전달계수의 변화를 두 선상($X/D=0.6$ 과 1.5)에서 보여주고 있다. $X/D=1.5$ 선상(Fig. 13(b))에서 보면 그 차이가 매우 적다. 자세히 관찰하면 제트가 충돌되는 영역($Z/D=+1.5$)에서 Sherwood수는 간격 $G=1D$ 와 $2D$ 의 경우 같은 값을 가지고 있다. 그와 다르게, Fig. 13(a)에서 보여주듯이 중앙부분($Z/D=0$)에서 $G=2D$ 와 $3D$ 의 경우 같은 Sherwood수를 가진다. 이와 같은 판 사이 간격의 영향은 분사된 제트가 간격에 따라 어느 정도 발전(developed)되는지에 따라 달라지고, 또한 제트가 판에 충돌후 2차 와류를 형성할 때 그 간격에 따라

와류의 강도나 크기가 결정되기 때문이다. Fig. 13은 분사제트의 발전 정도와 2차 와류형성이 열/물질 전달에 미치는 영향을 보여주고 있고, 이 전달계수의 값은 단일 다공성판의 경우보다 3~4 배 높은 값을 얻을 수 있음을 보여준다.

4. 결론

· 단일 다공성판에서의 열/물질전달

- (1) 전면(windward surface)에서 단일홀(single hole)의 경우에 비해 약 50% 정도의 물질전달량 증가를 보였다.
- (2) 후면(leeward surface)에서는 단일홀의 경우에 비해 거의 3배 정도의 높은 증가를 보였다.
- (3) 홀내면에서 전체 물질전달량의 약 50%로 작은 면적(22%)에도 불구하고 주된 물질전달은 이곳에서 일어났다.

· 충돌제트/유출 냉각

- (1) 충돌제트에 의하여 단일 다공성판의 경우보다 거의 3~4배 정도 높은 물질전달계수를 얻었다. 이 결과는 연소가 내벽을 냉각하기 위하여 충돌제트/유출 방법을 사용하여 크게 개선할 수 있음을 보여준다.
- (2) 다공성판 사이의 간격 변화에 따른 효과는 크지 않지만, 그 간격에 따라 분사제트의 발전 정도와 2차 와류의 형성에 영향을 미침을 보여준다.

참고문헌

- (1) Goldstein, R. J., 1971, "Film Cooling," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 7, Academic Press, pp. 321~379.
- (2) Cho, H. H. and Goldstein, R. J., 1995, "Heat (Mass) Transfer and Film Cooling Effectiveness with Injection through Discrete Holes-Part II : on the Exposed Surface," *J. of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 451~460.
- (3) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (4) Eckert, E. R. G., 1976, "Analogies to Heat Transfer Process," *Measurements in Heat Trans-*

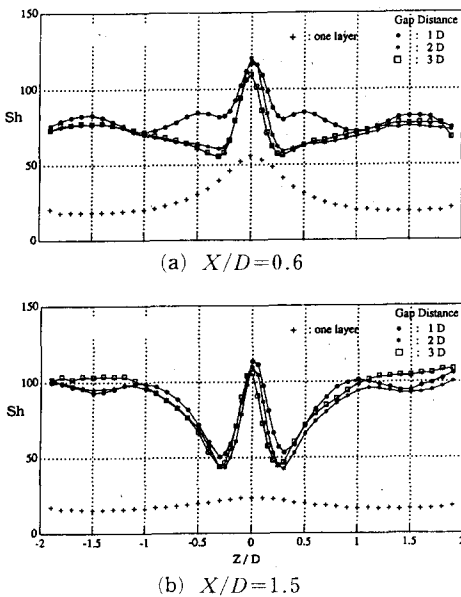


Fig. 13 Comparison of Sh for different gaps at Re= 5,070

- fer*, ed. by Eckert, E. R. G and Goldstein, R. J., Hemisphere Publishing Corp., New York, pp 379~423.
- (5) Ortiz, C., 1981, "Heat Transfer Coefficients for the Upstream Face of a Perforated Plate Positioned Normal to an Oncoming Flow," M. S. Thesis, Univ. of Minnesota, U. S. A.
- (6) Andrews, G. E., Asere, A. A., Gupta, M. L. and Mkpadi, M. C., 1985, "Full Coverage Discrete Hole Film Cooling ; The Influence of Hole Size," *ASME paper* 85-GT-47.
- (7) Andrews, G. E., Asere, A. A., Mkpadi, M. C. and Tirmahi, A., 1986, "Transpiration Cooling : Contribution of Film Cooling to the Overall Cooling Effectiveness," *ASME paper* 86-GT-136.
- (8) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single-Sample Experiments," *Mech. Engineering* Vol. 75, pp. 3~8.
- (9) Cho, H. H., Jabbari, M. Y. and Goldstein, R. J., 1996, "Experimental Mass (Heat) Transfer In and Near A Circular Hole In A Plate," *Int. J. Heat Mass Transfer* (in press).
- (10) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," *Adv. Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1~60.