

<논 문>

막냉각홀 주위와 원형돌출봉 주위에서의 열(물질)전달의 측정과 해석

김병기* · 우성제* · 조형희**

(1997년 2월 24일 접수)

Heat (Mass) Transfer Measurement and Analysis with Flows Around Film Cooling Holes and Circular Cylinders

B. G. Kim, S. J. Wu and H. H. Cho

Key Words : Film Cooling(막냉각), Compound Angled Injection(복합각도분사), Inclined Circular Protuding Cylinder(경사진 원형돌출봉), Heat/Mass Transfer Analogy(열/물질전달 유사성), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌 승화법)

Abstract

The present study investigates heat/mass transfer around film cooling jets and circular cylinders to compare the characteristics of each other. Experiments are conducted to obtain the detailed heat/mass transfer coefficients of flat plate with injections through an array of holes and for flows around an array of protuding circular cylinders using the naphthalene sublimation technique. The inclination angles of cylinders are set to the same ones of jets; α , the angle between the jet and the surface is fixed at 30° through the whole experiments and β , the angle between the projection of the jet on the surface and the direction of main stream is adjusted to 0° , 45° and 90° to investigate the effect of variation of injection angles. The influence of blowing rates of jets and those of cylinder length to diameter ratios are also investigated. The results indicate that the increase of angle β influences the spanwise uniformity of heat/mass transfer remarkably for both jets and cylinders, but that variation of cylinder length to diameter ratios has weaker effects on heat/mass transfer coefficients than that of blowing rates.

기 호 설 명

<p>d : 분사홀의 내경 또는 원형봉의 외경</p> <p>D_{naph} : 공기 중에서의 나프탈렌의 물질확산계수</p> <p>H : 원형봉의 길이 ($1d \leq H \leq 10d$)</p> <p>h_m : 국소물질전달 계수</p> <p>k : 열전도 계수</p> <p>M : 분사율 (blowing rate), $M = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty$</p> <p>$\dot{m}$: 질량유속</p>	<p>n : 식 (3)에서 사용되는 지수</p> <p>Nu : Nusselt 수, $Nu = hd/k$</p> <p>Pr : Prandtl 수, $Pr = \nu/\alpha$</p> <p>Re_a : Reynolds 수, $Re_a = U_\infty d/\nu$</p> <p>Sc : 공기중에서 나프탈렌의 Schmidt 수, $Sc = \nu/D_{naph}$</p> <p>Sh : Sherwood 수, $Sh = h_m d/D_{naph}$</p> <p>Sh_0 : 분사 또는 돌출물이 없는 평판유동에서의 Sherwood 수</p> <p>U_2 : 분사유체의 속도</p>
---	---

*회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

**회원, 연세대학교 기계공학과

- U_{∞} : 주유동의 속도
 x : 주유동 방향 좌표 (Fig. 1)
 dy : 나프탈렌의 승화 두께
 z : 횡방향 좌표 (Fig. 1)

그리스문자

- α : 제트 또는 원형봉의 바닥면에 대한 상대각 (Fig. 1)
 β : 제트 또는 원형봉의 주유동 방향에 대한 상대각 (Fig. 1)
 $d\tau$: 나프탈렌 표면의 유동장 노출 시간
 ν : 동점성 계수
 ρ_2 : 분사유체 밀도
 ρ_{∞} : 주유동유체 밀도
 ρ_s : 고체 나프탈렌 밀도
 $\rho_{v,w}$: 나프탈렌 표면에서 나프탈렌 증기밀도
 $\rho_{v,\infty}$: 무한유동장에서의 나프탈렌 증기밀도 ($\rho_{v,\infty} = 0$)

하첨자

- 0 : 분사 또는 돌출물이 없는 경우
 2 : 분사유체
 ∞ : 주유동유체
 m : 물질전달

1. 서 론

가스터빈의 고온요소냉각에 이용되는 대표적인 냉각방법중의 하나인 막냉각(film cooling)에 있어서, 분사율(blowing rate)과 분사각도(injection angle)는 냉각유체가 대상표면에 접촉되는 정도에 지배적인 영향을 미치는 주요 인자들이다. 분사율이 적정치 이하로 떨어지는 경우, 분사되는 냉각유체의 절대량 자체의 감소로 인하여 효과적인 냉각이 이루어지지 못하며, 이와 반대로 분사율이 지나치게 높은 경우, 냉각유체가 갖는 운동량의 증대로 인하여 냉각유체가 표면에 접촉되지 못하고 고온 연소가스의 경계층을 투과하게 되어 요소표면에 과도한 열부하를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같이 높은 분사율을 갖는 냉각유체의 제트의 형상을 단순화하여 분사홀(injection hole)의 내경과 동일한 직경의 원형봉으로 제트를 모사하였는데, 두 경우간의 냉각대상표면상의 열/물질전달특

성을 비교함으로써, 그 유사성과 상이성에 대하여 고찰하고, 또한 이를 통하여 막냉각방법에 대한 이해를 높이고자 하였다. 막냉각에 관련된 연구들의 관심대상은 주로 분사각도를 조절함으로써 막냉각 효율(film cooling effectiveness)를 제고하는 데에 있다.⁽¹⁾ Goldstein과 Taylor⁽²⁾는 유동방향으로 35°의 경사각으로 분사되는 일열의 분사홀 근처에서의 물질전달계수를 측정된 결과, 제트가 분사홀 근처에서의 물질전달계수를 증가시키는데, 특히 분사홀에 매우 인접한 영역과 홀의 중심선을 따라 하류의 영역에서 현저하게 증가시킴을 보였다. 또한 이들은 높은 분사율을 갖는 제트의 물질전달에 대한 영향이 분사홀을 고체봉(solid bar)으로 막고 유동장 내부까지 돌출시켰을 때의 효과와 여러 가지 면에서 유사함을 보여주었다. Cho와 Goldstein⁽³⁾은 교차유동(crossflow)내로 단일홀과 배열홀을 통하여 수직분사되는 제트에 대하여 표면물질전달계수 및 막냉각효율을 측정하였는데, 그 결과 분사홀 근방에서의 Sherwood 수가 분사가 없는 경우에 비하여 4배까지 증가함을 보였다. Lee 등⁽⁴⁾은 유막가시화 기법(oil-film flow visualization)을 이용하여 복합각(compound angle orientation)으로 분사되는 막냉각홀 근방에서의 표면유동모델(surface flow model)을 제안하였으며, 5공프토프를 이용한 유동장 측정을 통하여 와류의 경향을 분석하고 공력손실을 계산하였다. 평판표면에 부착된 돌출물은 유동장내에 노출되었을 때, 유동을 교란시킴으로써 유동의 난류성분을 증가시키며 결과적으로 표면의 열전달을 촉진시키므로 열교환기, 가스터빈 블레이드의 내부 냉각, 전자부품 주위의 냉각 등 여러 가지 열전달장치에 광범위하게 응용되고 있으며, 따라서 이에 대한 연구도 다양한 형상 및 조건에 대하여 활발하게 진행되어 왔다. Kawamura 등⁽⁵⁾은 유한한 길이의 단일 원형돌출봉 주위의 유동장 및 열전달특성에 관한 실험적인 연구를 통하여 열전달증강에 효과적인 형상조건을 제시하였고, Goldstein 등⁽⁶⁾은 서로 다른 길이 대 직경비(1과 12)의 원형봉을 이용하여 원형봉의 길이 변화에 따른 국소물질전달분포를 측정된 결과, 평균물질전달계수는 후미와류의 재부착으로 인하여 짧은 길이의 원형봉의 경우가 약 8% 가량 높게 나타남을 보여주었다. Fisher와 Eibeck⁽⁷⁾은 원형실린더와 테이퍼형 실린더의 두 가지 형상을 이용하여 말굽와류가 돌출물하류에서 평판상의 난류대류열전달을 변경시키

는 정도를 액정방법(liquid-crystal method)을 사용하여 측정한 바 있으며, Chyu와 Natarajan⁽⁸⁾은 다섯가지의 기본적인 기하학적 형상(원형봉, 사각형봉, 다이아몬드, 피라밋, 반구형)을 이용하여, 표면돌출물이 표면의 열/물질전달에 미치는 영향을 파악하기 위하여 나프탈렌 승화법을 이용한 물질전달계수측정 및 유액선 가시화를 수행하고, 각 형상에 대하여 열전달성능을 최적화하기 위한 요소간의 간격을 제안하였다. 그러나, 기존의 연구성과는 주로 돌출물을 표면에 수직하게 부착한 상태에서 얻은 결과들로서, 이러한 돌출물의 영향으로 발생하는 와류들은 경사각을 가지고 분사되는 제트 근방에서 형성되는 와류와는 상이한 거동을 보일 것으로 판단된다. 본 연구에서는 주유동방향분사각(axial injection) 및 복합분사각(compound-angled injection)으로 교차유동(crossflow)내로 분사되는 제트와의 비교를 위하여 평판상에 일렬의 원형봉을 제트와 동일한 각도조건으로 설치하고, 평판상의 물질전달계수를 나프탈렌승화법을 이용하여 측정하였으며, 원형봉의 길이 대 직경비를 변화시키면서 그 영향을 고찰하였다. 나프탈렌승화법은

기존의 열전달실험방법의 적용이 매우 어렵거나 불가능한 복잡한 형상에 응용할 수 있을 뿐 아니라, 열전달 실험에서 발생하기 쉬운 진동 및 복사에 의한 오차를 배제하면서도 정확한 경계조건의 부여가 가능하므로,⁽⁹⁾ 평균 열/물질전달계수 및 국소 열/물질전달계수를 구하는데 사용되고 있다. 본 연구에서 얻어진 결과는 막냉각 제트 출구 근방에서의 와류에 의한 열전달에 대한 이해를 돕고, 평판과 원형봉이 조합된 형상이 적용되는 각종 열전달장치에 대한 연구에 기본적인 자료로써 응용될 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

분사제트를 모사하기 위한 원형봉은 나프탈렌이 입혀진 시편의 표면에 대한 경사각(α)이 30°를 이루도록 설치되었으며, 유동방향에 대한 상대각(β)은 0°, 45° 및 90°를 사용하였는데 이는 제트의 분사각도와 같다. 이를 위하여 각도별로 서로 다른 세가지의 시험시편을 제작, 이용하였다. 원형봉의 각도 및 실험장치에 대한 개략도가 Fig. 1에 제시

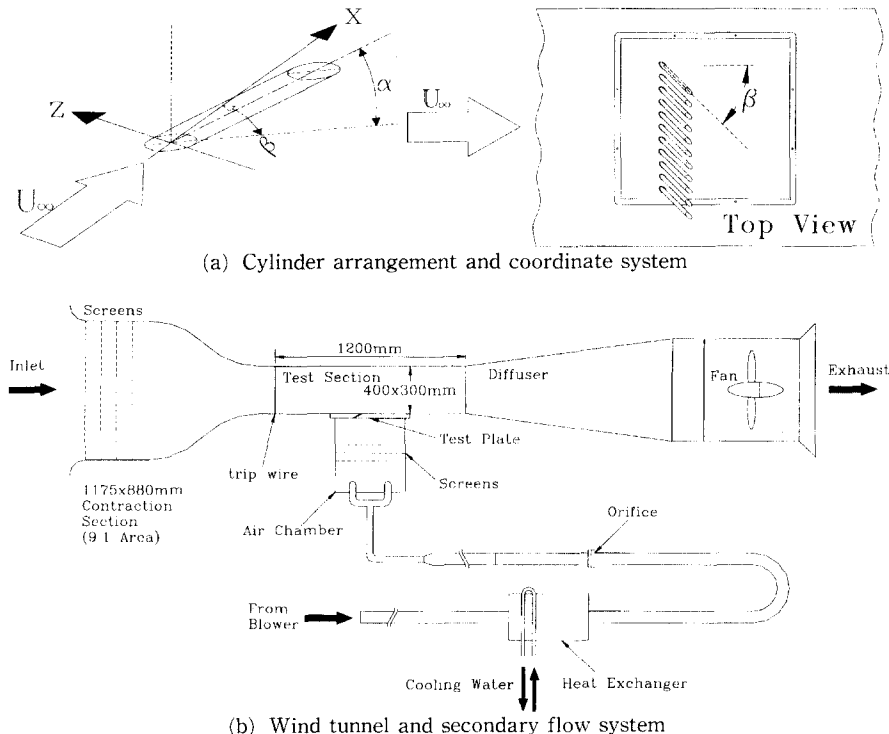


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

되어 있다.

제트가 분사되는 구멍의 내경은 7 mm이며 분사 제트를 모사하기 위한 원형돌출봉의 외경도 이와 동일하다. 분사홀과 원형봉의 설치간격은 각각 $3d$ 이며 원형봉의 고정단(바닥면)으로부터 말단까지의 길이의 직경에 대한 비(H/d)를 1, 2, 10으로 변화시키면서 그 영향을 고찰하였다. 각 β 의 크기에 따라 8~15개의 원형돌출봉을 설치하고 실험을 수행하였는데, 측면벽의 영향(side-wall effect)을 방지하기 위하여 중앙에 위치한 1~3개의 대칭영역을 측정하였다. 물질전달계수는 실험전후의 시편의 온도차(나프탈렌 승화두께)를 측정하여 계산된다. 초기표면고도가 측정된 시편을 풍동의 시험부에 조립 설치하고, 풍동에 유입되는 공기의 온도에 따라 100분 내외(평균 40 μm 길이 승화)의 시간동안 유동장에 노출시켜 시험시편의 표면에 입혀진 나프탈렌이 승화되도록 한 뒤 실험이 끝나면 시험시편의 표면고도를 재측정함으로써 승화두께를 구할 수 있다. 본 실험에 사용한 풍동은 개방흡입형으로 수축부의 면적축소비가 9 : 1이고, 시험단면의 크기는 300 mm \times 400 mm, 길이는 1200 mm이다. 시험단면을 통과하는 유속은 20 m/s로 이는 원형봉의 직경을 기준으로 하면 $Re_d \cong 9300$ 에 해당하며, 분사제트나 원형봉이 없을 때 벽면근접부를 제외하면 속도편차 0.46% 이내의 균일한 분포를 보였다. 열선풍속계(hot-wire anemometer)를 이용하여 측정 한 난류강도는 약 0.5% 이내로 유지되었다. 시험단면의 시작점(풍동수축부와의 연결지점)에는 난류경계층의 발달을 촉진시키기 위하여 직경 3.5 mm의 trip wire를 설치하였다. 제트의 분사지점은 trip wire로부터 480 mm 하류에 위치하고 있으며, 원형봉의 설치위치는 분사홀의 위치와 동일하다. 분사홀의 중심으로부터 상류로 13 mm 떨어진 위치에서 측정된 경계층의 두께는 16 mm이며 속도 분포는 7승근의 법칙과 잘 일치하였다. 변위두께 및 운동량두께는 각각 2.1 mm, 1.7 mm로 계산되었다. 수축부로 유입된 실내공기는 수축부, 시험단면, 디퓨저를 통과하여 건물 외부로 배출된다. 시험단면을 통과한 공기에는 나프탈렌이 포함되어 있으므로 풍동입구로 재유입되지 않도록 하였다. 시험시편에는 표면이 잘 연마된 주조판을 밀착, 조립시킨 상태에서 완전히 용융된 나프탈렌(용융점 : 80°C)을 주입관을 이용하여 주입한 후, 나프탈렌이 응고된 후에 전단력을 가하여 주조판을 분리시켜냄

으로써 표면이 매끈한 나프탈렌층을 형성시켰다. 나프탈렌이 입혀진 영역의 유동방향 길이는 원형돌출봉이 설치된 위치로부터 상류방향으로 10 d , 하류방향으로 30 d 이다. 시험시편에는 실험중 나프탈렌의 표면온도를 측정하기 위하여 J-type 열전대를 부착하였다. 나프탈렌층이 형성된 시험시편의 표면고도의 측정에는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer; Lucas ultra-precision LBB-375TA-020)를 사용하였는데, 정도(resolution)는 0.025 μm (1 μin)로 매우 정밀하다. LVDT 팁(tip)은 직경 1.5875 mm(0.0625")의 작은 구형을 사용하였다. 이와 같은 측정 장치를 사용하는 경우 측정 오차는 평판의 경우 0.15 μm 로, 실험중 평균 승화되는 길이는 40 μm 이므로 측정 오차는 1% 이내에 있다. 컴퓨터로 제어되는 2차원 자동이송장치를 통하여 LVDT 팁을 측정지점으로 이동시킴으로써 정확한 위치에서 표면 고도를 신속하게 측정할 수 있도록 하였다. 2차원 자동이송장치는 2개의 스테핑모터(steping motor)를 사용하여 한 축방향으로는 LVDT를 이송하고, 수직한 다른 한 축방향으로는 시편을 고정시킨 평판(350 mm \times 500 mm)을 이송한다. LVDT로부터의 신호는 linear signal conditioner(Lucas ATA-101), digital multimeter(Keithley model 2001), GPIB(IEEE-488) board를 통하여 컴퓨터와 연결하여 획득하였다. 이와 같이 컴퓨터로 제어되는 2차원 자동이송장치를 이용하면 대략 1시간에 2000점 이상의 측정이 가능하므로 짧은 시간동안 다량의 데이터를 획득할 수 있었다. 실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 Mc-Clintock에 의해서 제시된 방법을 사용하였다.⁽¹⁰⁾ 95% 신뢰수준(confidence level)에서 Sherwood 수의 상대오차는 7% 이내로 주어지지만, 대부분의 오차는 불확실한 물성치에서 기인한 것이다. 그 예로서 나프탈렌의 포화증기압은 3.77%, 공기중에서 나프탈렌의 확산계수는 5.1%의 오차를 갖지만, 승화량의 두께 측정 상대오차는 1%에 불과하였다.

3. 물질전달계수의 계산

실험전과 실험후에 측정된 시험시편의 나프탈렌 표면고도차로부터 나프탈렌의 승화깊이를 구하여 물질전달계수를 계산한다. 물질전달계수는 다음 식으로 표시된다.

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

여기서, 시험부를 통과하는 공기는 나프탈렌을 포함하고 있지 않으므로 $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 결국 나프탈렌의 승화깊이, 즉 실험전과 실험후의 표면고도차 (dy)와 실험시간($d\tau$), 고체 나프탈렌의 밀도와 표면에서 포화증기밀도($\rho_{v,w}$)에 의해서 물질전달계수는 결정된다. 위의 전달계수는 무차원 값인 Sherwood 수로 나타낼 수 있다.

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

여기서 d 는 분사홀의 직경이고, D_{naph} 는 공기 중에서 나프탈렌의 확산계수이다. 여기에 사용되는 물성치는 Goldstein과 Cho⁽⁹⁾에 제시되어 있다. 이와 같은 계산과정을 통하여 얻어진 물질전달계수는 물질전달과 열전달 사이의 유사성에 의하여 열전달 계수로 변환할 수 있는데 상관관계식은 아래와 같다.

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

우변의 지수는 난류유동에서 $n=0.4$, 층류유동에서 $n=1/3$ 로 사용되고 있다.⁽¹¹⁾

4. 실험결과 및 고찰

유동장내의 돌출물에 의하여 형성된 와류는 바닥면의 열/물질전달계수를 크게 변화시키는데 이는 돌출물의 형상 및 크기에 따라 달라진다. 와류의 영향으로 열/물질전달이 촉진되는 영역은 (1) 돌출물전면의 상류영역, (2) 인접측면영역, (3) 돌출물배면(背面)의 하류영역으로 구분할 수 있다. 원형봉전면에서는 바닥면 가까이 경계층 효과에 기인한 압력구배가 존재하고, 이로 인하여 유발되는 하향류(down-wash flow)는 말굽와류(horseshoe vortex)를 형성하며,⁽¹²⁾ 말굽와류와 두 접촉면 사이에는 반대로 회전하는 모서리와류(corner vortex)가 존재하게 된다. 원형봉의 상류와 측면에서의 열/물질전달의 촉진은 주로 이러한 와류들의 효과이다. 하류영역에서는 주유동(main stream)방향으로 진행하는 와류 및 원형봉주위를 따라 흐르는 주유동의 박리 이후 생성되는 후류(wake)가 복합적으로 열전달촉진에 기여한다. 그러나 원형봉에 상류에서 형성된 와류들은 그 강도에 따라서 후류영역에서

크게 확산될 수 있으므로 활발한 후류가 하류영역에서의 열전달촉진의 주요한 요인이 될 수도 있다.⁽⁷⁾ 분사된 제트는 주유동에 의하여 그 궤적이 주유동 방향으로 휘어지게 되는데, 분사율이 높아짐에 따라 제트의 출구 근방에서 돌출물과 유사하게 주유동을 방해하게 된다. 그러나 제트와 주유동간의 상호작용에 기인한 콩팥와류(kidney-type vortex), 제트가 주위의 와류에 부가하는 전단효과 등은 원형봉주위의 유동과 상이한 결과를 가져오게 할 것이다. 실험에서 얻어진 Sherwood 수는 돌출물 또는 분사제트가 없는 평판에 대하여 동일한 유동조건에서 얻어진 Sherwood 수(Sh_0)에 대한 상대적인 비(比)로 제시하였는데, 이러한 과정을 통하여 부정확한 물성치(나프탈렌의 포화증기압, 확산계수) 등에 의해 발생할 수 있는 오차문제를 해결할 수 있으며, 열전달 문제에 직접 적용가능한 잇점이 있다.

4.1 원형봉의 길이 대 직경비 변화와 제트의 분사율 변화에 의한 효과 비교

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 주유동에 대한 상대각(β)이 0° 일 때 길이 대 직경비(H/d)가 1인 원형봉과 분사율(M)이 1.0인 분사제트 주위에서의 물질전달계수비(Sh/Sh_0)를 구하여 그 값이 동일한 지점을 연결하여 나타낸 선도인데, 등전달계수선의 간격은 0.2이다.

Fig. 2(a)에서 보인 바와 같이 평판에 비하여 물질전달계수가 20%이상 증가된 영역의 형태는 중심선(z/d)을 기준으로 거의 대칭적으로 분포하고 있는데 원형봉 주위의 좌우측면영역 및 하류영역에서의 물질전달계수의 증가가 두드러진다. $x/d \cong 2.5$ 근방에서 볼 수 있는 폐곡선의 중심부는 평판에 비하여 물질전달계수가 220% 이상 증가한 영역으로

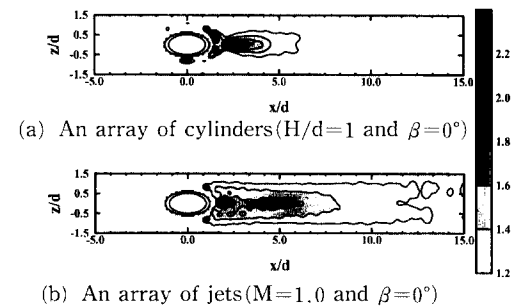


Fig. 2 Contour plots of normalized Sherwood number (Sh/Sh_0)

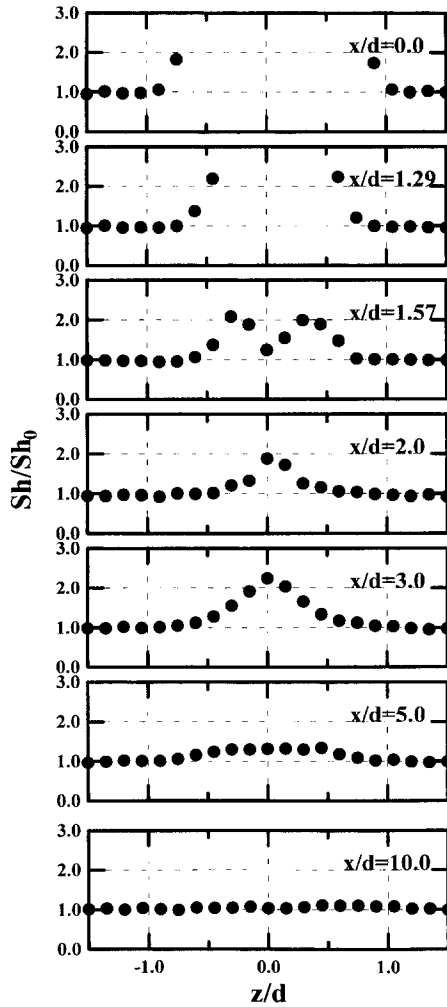


Fig. 3 Lateral distributions of normalized Sherwood number (Sh/Sh_0) for an array of cylinders ($H/d=1$ and $\beta=0^\circ$)

전영역중 가장 높은 수치를 보여주고 있다. Fig. 2(b)에서 보인 분사세트에 대한 선도에는 최대치 ($Sh/Sh_0 \geq 2.2$)가 나타나는 지점이 중심선의 $x/d \cong 2$ 근방에서 나타나고 있으며 등전달계수선의 형태는 원형봉에 대한 선도와 약간의 차이를 보여주고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 $\beta=0^\circ$, $H/d=1$ 인 경우의 국소적인 물질전달계수분포를 나타낸다. Fig. 3에 제시된 Sh/Sh_0 의 횡방향(z 방향)분포에서 볼 수 있듯이 $x/d=0$ 에서 두 개의 극대점이 $0.5 \leq |z/d| \leq 1.0$ 의 범위내에 대칭적으로 나타난다. 이는 말굽와류(horseshoe vortex)가 원형봉 주위를 따라 주유동

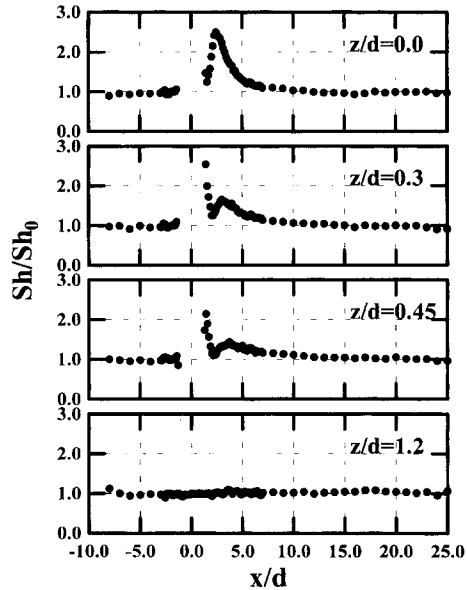


Fig. 4 Streamwise distributions of normalized Sherwood number (Sh/Sh_0) for an array of cylinders ($H/d=1$ and $\beta=0^\circ$)

방향으로 진행되는 과정을 통하여 이 지점에서의 물질전달을 촉진시킨 결과이다. 평판에 평행하게 원형봉을 가상적으로 절단하여 볼 때, 원형봉의 평판에 대한 경사각($\alpha=30^\circ$)으로 인하여 원형봉의 단면은 장축 대 단축의 길이가 2:1인 타원형상을 갖게 되는데 이러한 유선형 형상을 따라 와류가 하류로 전파되면서 원형봉 배면의 저압영역의 영향으로 두 개의 극대점이 중심선 방향으로 접근하게 된다. $x/d \geq 2.0$ 인 영역(원형봉의 유동방향끝점은 $x/d=1.0$)에서는 더 이상 두 개의 극대점이 존재하지 않으며, 하나의 극대점만이 존재하는 종형(鍾形)의 분포를 보여준다. $x/d=2.0$ 인 지점에 비하여 $x/d=3.0$ 인 지점에서의 극대치가 30%가량 증가됨을 볼 수 있는데, 이는 원형봉에 매우 인접한 배면에 재순환영역(recirculation region)이 존재하므로 이 지점에서의 낮은 속도에 기인하여 물질전달계수가 낮은 것으로 판단된다. $x/d=1.57$ 인 지점에서 보이는 두 극대점 사이의 극소점 또한 재순환영역에서의 낮은 값이다. 이후 극대점은 $x/d=5.0$ 인 지점에서 평균유동대비 30% 정도의 높은 값을 보이다가 $x/d=10$ 지점에서는 소멸한다.

Fig. 4는 국소적인 물질전달계수의 유동방향분포를 보여준다. 중심선($z/d=0$)에서의 물질전달계수의 변화추이를 살펴보면 원형봉에 인접한 하류영역

에서 급격하게 증가하여 $x/d \cong 2.5$ 인 지점에서 최대값이 나타나는데, 이 지점에서의 Sh/Sh_0 는 약 2.5에 달한다. 최대점 이후의 물질전달계수는 x/d 5인 지점까지 빠르게 감소하며, $5 \leq x/d \leq 10$ 인 영역에서는 그 감소추세가 완화되었다가 $x/d \geq 10$ 인 영역에서는 거의 일정한 값을 보여주고 있다. 즉, 이 영역에서는 더 이상 와류 및 후류에 의한 영향이 나타나지 않음을 볼 수 있다. 측면 및 하류영역에서는 물질전달계수가 상승한 반면, 원형봉 상류영역에서는 말굽와류에 의한 이러한 경향이 나타나지 않고 있는데, 이는 원형봉이 바닥면에 대하여 30° 의 경사로 기울어져 있으므로, 평판에 수직으로 부착된 돌출물의 전면에서의 높은 물질전달계수의 상승^(6,8)과는 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 수직 돌출물에 비하여 전면부에서의 압력구배가 감소하므로 상대적으로 크기가 작은 말굽와류가 형성되며, 이 결과로서 상류에서 물질전달계수가 증가되는 영역은 매우 협소하게 나타남이 예상된다. 본 연구에 사용된 시편에는 원형봉의 설치를 위하여 약 $0.2d$ 폭의 알루미늄 테두리 부분(Fig. 2에서 볼 수 있는 두 개의 타원 사이의 영역)이 가공되어 있으므로, 와류들이 단지 이 영역 내에 영향을 준다면 그 계측을 추적해낼 수 없다. Fig. 3에서 보듯이 $x/d = 0$ 인 지점에서 말굽와류에 의한 영향이 나타나는 영역의 폭이 $0.5d$ 정도로 국한되는 것을 볼 때, 상류에서의 영향영역은 이보다 더욱 좁게 나타날 것을 예상할 수 있다. $z/d = 0.3$ 및 0.45 에서의 물질전달계수 변화 추세는 중심선에서의 경향과는 달리 두 개의 극대점이 나타나고 있다. 원형봉에 근접하여 나타나는 첫 번째 극점은 원형봉 측면에서의 말굽와류의 효과이며, 재순환영역에서의 감소 이후, 후류영역에서의 두 번째 극점이 나타난다. $z/d = 1.2$ 에서의 분포에서는 물질전달계수비가 일정하게 $Sh/Sh_0 \cong 1$ 정도로 나타남을 볼 수 있는데 이것은 주유동이 원형봉에 의해서 영향을 받지 않음을 나타낸다. Fig. 3에서도 알 수 있는 바와 같이 $|z/d| \geq 1$ 인 영역($z/d = \pm 1.5$ 는 두 봉간의 중앙대칭선)에서는 물질전달계수의 증가가 나타나지 않는다.

Fig. 5는 원형봉의 길이 대 직경비의 변화에 대한 효과 및 세트의 분사를 변화에 대한 효과를 비교하기 위하여 각 경우에 대한 중심선($z/d = 0$)에서의 물질전달계수비의 분포를 보여주고 있다. 원형봉의 길이 대 직경비를 1, 2, 10으로 증가시킨

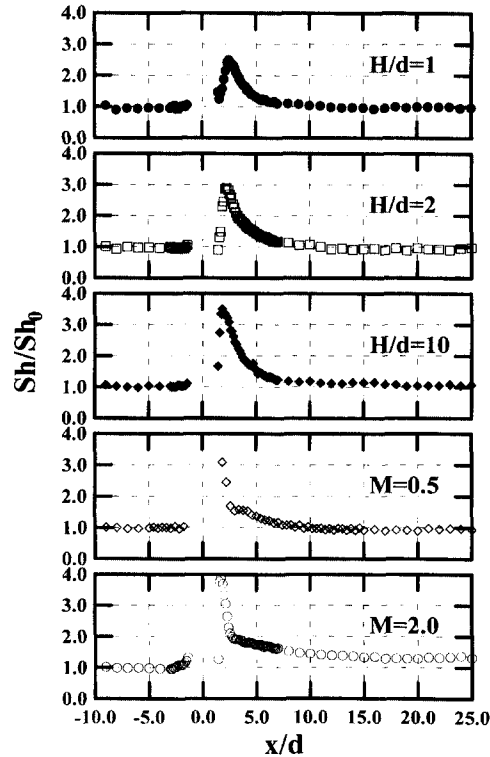


Fig. 5 Streamwise distributions of normalized Sherwood number (Sh/Sh_0) at centerline ($z/d = 0.0$) for $\beta = 0^\circ$

결과 극대점의 위치가 미소하게 원형봉에 근접하며 (상류방향, 즉 $-x$ 방향으로 이동) 그 크기도 증대되어, $H/d = 10$ 인 경우 $Sh/Sh_0 \cong 3.5$ 까지 증가하였다. 원형봉의 길이 증가에 따른 Sh/Sh_0 의 극대값 증분은 $H/d = 1$ 에서 2까지 증가시켰을 때에 약 40%, $H/d = 2$ 에서 10으로 증가시킨 경우에는 약 60% 정도이다. 원형봉의 길이 대 직경비의 증분이 각각 $1d$, $8d$ 임을 감안하면 원형봉의 길이의 증가에 따르는 극대값의 증가추세는 길이 증가에 비하여 완만함을 알 수 있다. 극대점 이후의 감소 경향은 길이의 변화에 관계없이 매우 유사한 양상을 보여준다. 세트 분사의 경우, 분사할 하류영역에서의 급격한 증가 및 감소와 이후 점진적인 감소 추세는 원형봉 하류영역에서의 경향과 유사하게 나타나는데 $M = 2.0$ 의 경우 최대값이 3.9에 이르며, $M = 0.5$ 의 경우에도 3.0에 달한다. 그러나 원형봉의 경우와는 달리 극대점의 위치가 분사율에 관계없이 거의 일정하며, 극대점 이후의 영역에서 $M = 2.0$ 인 경우가 $M = 0.5$ 인 경우에 비하여 35~48% 정도

의 차이를 일관되게 보여주고 있다. 특히 $x/d \geq 10$ 인 영역에서 $H/d=10$ 인 경우 Sh/Sh_0 가 거의 1에 가까워지고 있으나, $M=2.0$ 인 경우 최소 1.3 이상으로 유지되고 있다. 이러한 경향은 와류 및 후류가 원형봉 하류영역에 미치는 영향은 상대적으로 단거리내에서 소멸하는 반면, 분사제트에 의한 하류영역에서의 열전달계수 증가는 주로 분사제트 자체에 의한 것이므로 제트가 높은 분사율을 갖는 경우, 분사율로부터 상당히 떨어진 하류영역까지 주유동과의 상호작용에 의한 효과가 지속되는 데에 기인한다.

Fig. 6은 $-1.5 \leq z/d \leq 1.5$ 인 범위(배열의 한 피치구간)에 걸쳐 평균한 Sh/Sh_0 의 유동방향에 따른 분포를 제시하고 있다. $H/d=1, 2$ 의 경우, 하류영역에서 불규칙하게 나타나는 5% 이하의 미소한 편차를 보이지만 원형봉에 인접한 영역에서는 평균값이 거의 일치하고 있다. 그러나 $H/d=10$ 인 경우에는 유동방향 좌표변화에 따르는 증감추세는 유

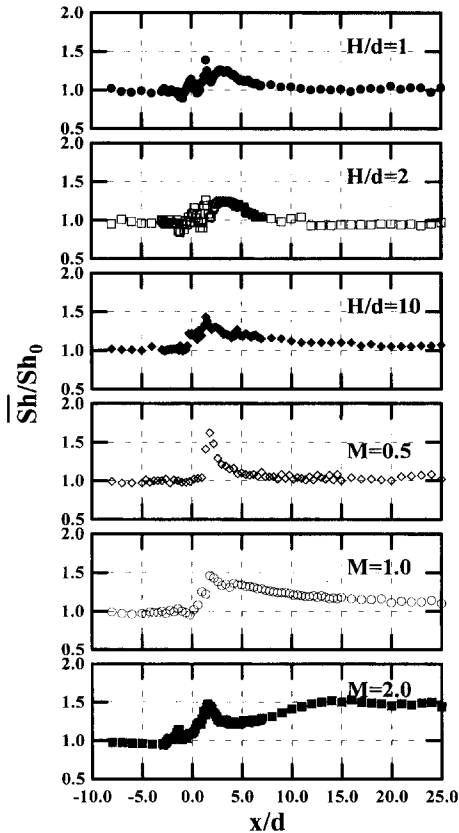


Fig. 6 Spanwise-averaged Sherwood number (\overline{Sh}/Sh_0) for $\beta=0^\circ$

사하지만, 후류영역의 확장에 따른 영향으로 $5 \leq x/d \leq 10$ 인 영역에서 다른 두 가지 경우에 비하여 약 10% 정도 높은 평균치를 보이고 있다. 이와 같이 길이 대 직경비에 의한 영향이 극히 미미한 반면, 분사율변화에 의한 영향은 두드러진다. 분사율이 가장 작은 $M=0.5$ 의 경우 분사되는 공기의 절대량이 부족하므로 분사율 하류에서 \overline{Sh}/Sh_0 가 급격히 감소하여 $x/d \geq 10$ 인 영역에서는 그 영향이 거의 소멸하였다. 그러나 $M=1.0$ 및 2.0 의 경우에는 측정된 전영역에 걸쳐서 높은 평균치가 지속되고 있다. 단, $x/d \leq 7$ 인 영역에서는 $M=1.0$ 인 경우의 \overline{Sh}/Sh_0 가 $M=2.0$ 에 비해 높은 값을 가지지만, 이후영역에서 $M=2.0$ 인 경우 \overline{Sh}/Sh_0 값이 급격히 상승하여 $\overline{Sh}/Sh_0 \approx 1.5$ 정도의 높은 값이 유지되는 결과를 보여주고 있다. 이는 분사율이 높은 $M=2.0$ 의 제트가 주유동을 투과하면서 표면에 접촉하지 못하여 분사율 인접영역에서는 표면물질 전달에 기여하는 바가 $M=1.0$ 에 비하여 작지만, 분사율로부터의 거리가 멀어질수록 인접분사제트 사이의 상호작용 및 주유동과의 활발한 혼합에 기인하여 상당한 거리의 하류영역에까지 영향을 미치기 때문이다. 이상의 결과를 종합해 보면, 원형봉 주위의 와류 및 후류에 의한 바닥면으로부터의 물질전달에 길이 대 직경비가 미치는 영향은 매우 제한적이며 국소적으로 발생하는 최대치의 변화에만 주고 있음을 알 수 있다. 이에 비하여 제트의 분사율 변화에 의한 영향은 현저하여, 높은 분사율의 제트에 의하여 물질전달계수비가 크게 증가하였으며, 특히 하류영역에서 인접제트간의 상호작용 및 주유동과의 활발한 혼합의 효과로 추측되는 지속적인 물질전달의 증가를 나타내었다.

4.2 원형봉의 주유동에 대한 상대각과 제트의 분사각도 변화에 의한 효과 비교

복합각도로 분사되는 제트와 이에 대응하는 원형봉으로 인한 바닥면으로부터의 물질전달현상의 각도조건에 따른 변화를 비교하기 위한 목적으로, 분사제트 및 원형봉의 주유동방향에 대한 상대각(β)을 45° 및 90° (lateral injection)로 변화시키면서 물질전달계수비를 구하고, 이를 0° (axial 혹은 streamwise injection)의 경우와 비교하였다.

Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 등전달계수선도로, 각각 $H/d=1$ 인 원형봉에 대하여 $\beta=45^\circ$ 와 90° 인 경우이며, Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 $M=1.0$ 인 분사제

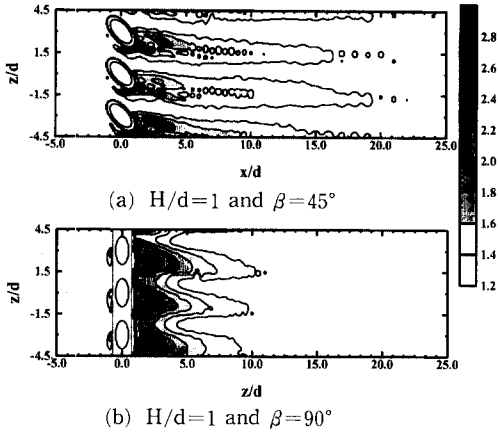


Fig. 7 Contour plots of normalized Sherwood number (Sh/Sh_0) for an array of cylinders

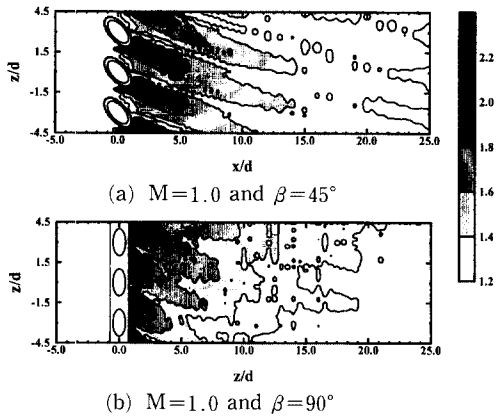


Fig. 8 Contour plots of normalized Sherwood number (Sh/Sh_0) for an array of jets

트에 대한 선도이다. Fig. 2에서 보여지는 $\beta=0^\circ$ 일 때의 결과와 비교해 볼 때 두드러진 차이는 Sh/Sh_0 가 1.2이상의 값을 갖는 영역의 현저한 확장 및 형상의 비대칭성이다. Fig. 2(a)와 Fig. 7(a), (b)를 비교하여보면, 각 β 의 증가에 따라 원형봉 우측(음의 z 방향)에서 성장하는 와류의 크기가 좌측에 비해 크므로 우측에서 뚜렷한 와류의 궤적이 보인다. $\beta=90^\circ$ 의 경우, 시편가공상의 난점으로 인하여 $-0.7 < x/d < 0.7$ 에 해당하는 영역을 알루미늄으로 처리하여 이 영역에서의 물질전달계수를 얻지 못하였으나, 이후영역($x/d > 0.7$)에서 얻어진 물질전달계수 또한 우측(원형봉 혹은 분사홀을 경계로 음의 z 방향)에서의 값이 좌측에서의 값에 비하여 매우 높게 나타났다. $\beta=90^\circ$ 의 경우에는 원형봉의 측면이 상류와 하류를 향하도록, 즉 단면의

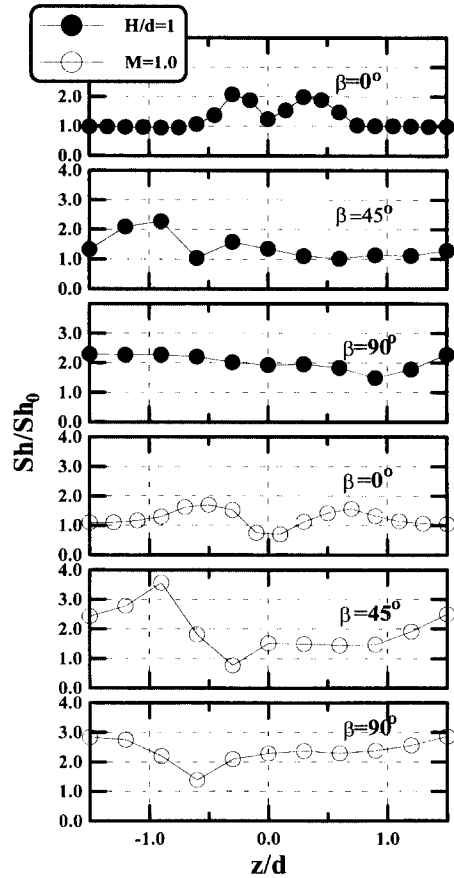


Fig. 9 Normalized Sherwood number (Sh/Sh_0) at $x/d=1.6$

타원의 장축이 z 축과 평행이 되도록 회전한 상태가 되므로, 원형봉이 주유동을 가로막는 효과가 크게 나타난다. 그 결과, 원형봉전면에 말굽와류에 의한 궤적이 뚜렷하게 형성되어 이 지점에서의 Sh/Sh_0 가 국소적으로 최대 2.3~2.5이상에 이르며 Fig. 7(b)에서 이를 확인할 수 있다. Fig. 8(a), (b)에 보여지는 제트에 의한 높은 물질전달영역 또한 좌우비대칭이고 거의 전영역에 걸쳐있다. 이를 Fig. 7(a), (b)와 비교해 볼 때 더욱 우측으로 편향되어있음을 알 수 있는데 이것은 제트가 갖는 횡방향(z 방향)의 운동량에 기인하는 것이다.

Fig. 9은 $x/d=1.6$ 인 지점에서의 국소적인 물질전달계수의 횡방향분포를 각 β 의 변화에 따라 보여주고 있다. 원형봉의 경우, 말굽와류에 의하여 원형봉의 인접하류지점에 생성되는 두 개의 대칭적인 극대점은 각 β 를 증가시키기에 따라 $\beta=45^\circ$ 의 경

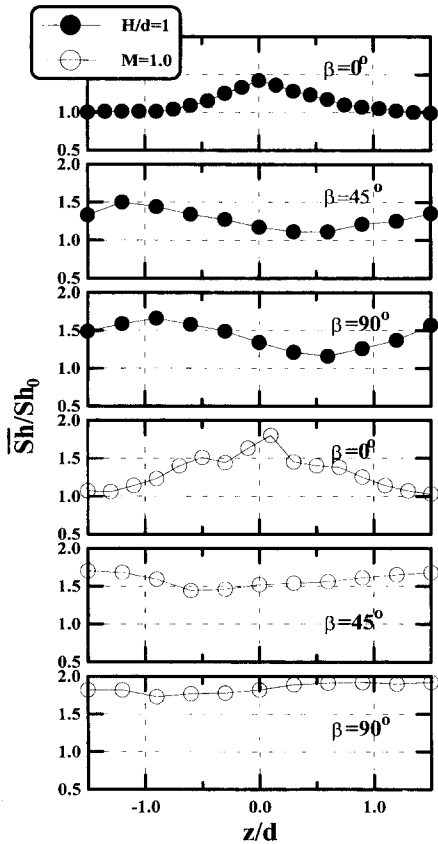


Fig. 10 Streamwise averaged Sherwood number (\overline{Sh}/Sh_0) with variation of lateral angle β

우 대칭성이 파괴되어 음의 z 방향으로 이동하였으며 두 극대점에서의 Sh/Sh_0 값도 서로 다르다. $\beta=90^\circ$ 의 경우에는 한 개의 극점만이 나타나는데 극점 주위의 넓은 영역까지 물질전달계수비가 높은 값을 갖는다. 이와 같이 하나의 극점이 음의 z 방향으로 편향되어 형성되는 이유는 각 $\beta=90^\circ$ 인 경우 원형봉이 음의 z 축과 30° 의 각을 이루며 기울어진 형상을 가지게 되므로 원형봉선단에서 형성된 발굽와류가 원형봉과 평판이 이루고 있는 30° 의 예각사이를 통과하면서 가속되어 그 강도가 커지는 반면, 반대편으로 진행하는 와류는 그 강도가 미약하여 급속히 소멸한 것으로 보인다. 제트 분사의 경우, $M=1.0$ 의 분사제트에 의한 양상은 각 $\beta=0^\circ$ 와 45° 의 경우 경향적으로는 원형봉의 경우와 유사하나 제트간의 상호작용의 영향으로 물질전달계수가 높아진 영역이 원형봉의 경우에 비하여 z 방향으로 넓게 나타나고 물질전달계수의 증가정도 또한 매우 크

다. $\beta=90^\circ$ 의 경우 $z/d \cong -0.6$ 근방에서 보이는 극소점의 좌우로 두 개의 극점이 보이는데 이는 Honami 등⁽¹³⁾과 Lee 등⁽⁴⁾의 유동장 측정결과와 비교하여 볼 때, $z/d \cong -1.5$ 근방에서의 극대점은 제트코어가 통과한 위치와 일치하며, $z/d \cong 0.3$ 근방에서의 극대점은 제트내부 좌측에 존재하는 반시계 방향의 강한 와류의 영향에 기인한 것으로 보인다.

Fig. 10은 $1.5 < x/d < 10.0$ 에 이르는 범위에 걸쳐 물질전달계수비를 평균하여 나타낸 횡방향분포이다. 원형봉의 경우, 각 β 의 증가에 따르는 비대칭적인 양상은 원형봉 좌우에서 발생하는 와류의 비대칭적 경향뿐만 아니라, 좌우측 박리위치의 차이에 의하여 후류영역이 중심선($z/d=0$)을 기준으로 음의 z 방향으로 이동하였기 때문이다. 분사된 제트의 경우, 제트간의 상호작용의 결과로 전영역에 걸친 물질전달계수의 고른 증가를 나타내고 있으며 특히 복합각도분사의 경우에는 평균물질전달계수의 횡방향변화의 편차가 매우 작게 나타났는데 $\beta=0^\circ$ 의 경우 최대값과 최소값의 차이가 $\Delta \overline{Sh}/Sh_0 \cong 0.79$ 에 달하지만, $\beta=45^\circ$ 와 90° 의 경우 각각 $\Delta \overline{Sh}/Sh_0 \cong 0.26$ 및 0.16 에 불과하였다.

5. 결론

바닥면과 30° 의 경사각을 이루면서 복합분사각으로 분사되는 제트를 원형봉으로 모사하여 원형봉주위에서의 물질전달계수를 나프탈렌승화법을 이용하여 측정함으로써 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 원형봉주위에서 형성된 와류 및 후류에 기인한 바닥면으로부터의 물질전달에 대한 원형봉의 길이 대 직경비의 변화에 의한 영향은 크지 않으며 국소적인 물질전달계수의 최대치에만 영향을 주었다. 반면 제트의 분사율 변화에 의한 영향은 매우 뚜렷하여 분사율이 증가시킴에 따라 물질전달계수가 크게 상승하였으며 그 영향이 하류영역에서 현저하게 나타났다.

(2) 원형봉의 주유동에 대한 상대각(β)을 증가시킴으로써 높은 물질전달계수를 갖는 영역이 확장되었으며, 원형봉의 주위에서 형성되는 와류 및 후류의 비대칭성에 기인하여 그 위치가 편향되었다. 분사제트의 경우, 제트가 갖는 운동량에 기인하여 이러한 경향이 심화되었으며, 그 결과 횡방향에 걸쳐 물질전달계수가 균일하게 분포하였다.

후 기

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Goldstein, R. J., 1971, "Film Cooling," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 7, Academic Press, pp. 321~379.
- (2) Goldstein, R. J., and Taylor, J. R., 1982, "Mass Transfer in the Neighborhood of Jets Entering a Crossflow," *J. of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 715~721.
- (3) 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.
- (4) Lee, S. W., Kim, Y. B. and Lee, J. S., 1997, "Flow Characteristics and Aerodynamic Losses of Film-Cooling Jets with Compound Angle Orientations," *J. of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 310~319.
- (5) Kawamura, T., Hiwada, M., Mabuchi, I. and Kumada, M., 1984, "Augmentation of Turbulent Heat Transfer on a Flat Plate with a Three-Dimensional Protuberance," *Bulletin of JSME*, Vol. 27, No. 234, pp. 2787~2794.
- (6) Goldstein, R. J., Chyu, M. K. and R. C. Hain, 1985, "Measurement of Local Mass Transfer on a Surface in the Region of the Base of a Protruding Cylinder with a Computer-controlled Data Acquisition System," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 28, No. 5, pp. 977~985.
- (7) Fisher, E. M. and Eibeck, P. A., 1990, "The Influence of a Horseshoe Vortex on Local Convective Heat Transfer," *J. of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 329~335.
- (8) Chyu, M. K. and Natarajan, V., 1996, "Heat Transfer on the Base Surface of Three Dimensional Protruding Elements," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, No. 14, pp. 2925~2935.
- (9) 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.
- (10) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (11) Eckert, E. R. G., 1976, "Analogies to Heat Transfer Processes," *Measurements in Heat Transfer*, ed. by Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., Hemisphere Publishing, New York, pp. 397~423.
- (12) Kawamura, T., Hiwada, M., Hibino, T., Mabuchi, I. and Kumada, M., 1984, "Flow around a finite circular cylinder on a flat plate," *Bulletin of JSME*, Vol. 27, No. 232, pp. 2142~2151.
- (13) Honami, S., Shizawa, T. and Uchiyama, A., 1994, "Behavior of the laterally injected jet in film cooling : Measurements of surface temperature and velocity/temperature field within the jet," *J. of Turbomachinery*, Vol. 116, pp. 106~112.