

## 블록한 표면위에 분사되는 원형경사충돌제트의 국소열전달계수 측정에 관한 연구

### Measurement of the local heat transfer coefficient on a convex hemispherical surface with round oblique impinging jet

최형철\*, 이세균\*\*, 이상훈\*\*\*, 임경빈\*\*\*\*  
H. C. Choi, S. G. Lee, S. H. Lee, K. B. Lim

**Key words:** Oblique impinging jet(경사충돌제트), Liquid crystal(액정), Convex surface(블록표면), Local heat transfer coefficient(국소열전달계수)

#### ABSTRACT

Measurements of the local heat transfer coefficients were made on a hemispherically convex surface with a round oblique impinging jet. The liquid crystal transient method was used for these measurements. This method, which is a variation on the transient method, suddenly exposes a preheated wall to an impinging jet while video recording the response of liquid crystal for the surface temperature measurements. The Reynolds number used was 23000 and the nozzle-to-surface distance was  $L/d=2, 4, 6, 8,$  and 10 and the jet angle was  $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  and  $40^\circ$ . In the experiment, the Nusselt number at the stagnation point decreases as the jet angle increases and has the maximum value for  $L/d=6$ . The X-axis Nusselt number distributions exhibit secondary maxima at  $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ, L/d \leq 4$  for  $X/d < 0$ (upstream) and at  $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ, L/d \leq 4$  and at  $30^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ, L/d \leq 6$  for  $X/d > 0$ (downstream). The secondary maxima occurs at long distance from the stagnation point as the jet angle increases or the nozzle-to-surface distance decreases. The Y-axis Nusselt number distributions exhibit secondary maxima at  $Y/d = \pm 2$  for  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$  and  $L/d \leq 4$ , and for  $\alpha = 40^\circ$  and  $L/d = 2$ . The displacement of the maximum Nusselt number from the stagnation point increases as the jet angle increases or the nozzle-to-surface distance decreases and the maximum distance is about 0.67 times of the nozzle diameter. The ratio of the maximum Nusselt number to the stagnation Nusselt number increases as the jet angle increases.

#### 기 호 설 명

- $C_p$  : 플렉시글라스의 비열 [J/kg · K]
- $D$  : 블록반구 직경 [m]
- $d$  : 노즐 직경 [m]
- $h$  : 국소열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
- $k$  : 플렉시글라스의 열전도계수 [ $W/m \cdot K$ ]
- $L$  : 노즐출구와 충돌표면 사이의 거리 [m]

\* 정회원, 국방과학연구소

\*\* 정회원, 충북대학교 기계공학과

\*\*\* 대전산업대학교 대학원

\*\*\*\* 정회원, 대전산업대학교, 기계설계공학과

- $t$  : 시간 [sec]
- $T$  : 온도 [°C]
- $T^*$  : 무차원 표면온도  $\left( = \frac{T_w - T_\infty}{T_{w0} - T_\infty} \right)$
- $X$  : 제트의 유동방향을 따르는 축
- $Y$  : 제트의 유동방향에 직각인 축
- $Nu$  : 국소 누셀트수  $\left( \frac{hd}{k} \right)$
- $Re$  : 제트 Reynolds수  $\left( \frac{Ud}{\nu} \right)$

**그리스 문자**

- $\gamma$  :  $\left( = \frac{h\sqrt{t}}{\sqrt{\rho c_p k}} \right)$
- $\rho$  : 플렉시글라스의 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

**하첨자**

- $o$  : 초기
- $s$  : 정체점
- $w$  : 벽면
- $\infty$  : 대기
- $m$  : 최대

**1. 서론**

충돌제트(impinging jet)는 열유체기기의 열전달 효율을 증대시키는데 가장 폭넓게 사용되는 방법으로서 산업공정의 가열과 냉각에 이용되고 있으며, 강판의 냉각, 유리의 템퍼링(tempering), 종이와 직물 및 박막의 건조, 가스터빈과 연소기 구성부품 및 고밀도 전자장비의 냉각 등 많은 부분에서 광범위하게 응용되고 있다.

충돌제트의 유체 및 열전달 특성은 제트의 속도, 난류강도, 제트분사표면의 형태, 제트노즐의 형상 및 열경계조건 등을 포함한 많은 인자들의 영향을 받고 있기 때문에 이들 인자에 대한 충돌제트의 연구는 많은 공학자들의 연구대상이 되어 왔다. 그동안 충돌제트 열전달에 대한 연구는 수치적으로나 실험적으로 많은 연구가 이루어져 왔으나, 대부분의 연구는 평판표면형상에 수직충돌제트의 연구<sup>(1-5)</sup>가 대부분이었다. 그러나, 많은 산업 열유체기기들의 냉각문제에서 곡면(curved surface)에서의 충돌제트 문제는 흔히 볼 수 있으며, 또한 표면형상 혹은 노즐위치의 제약으

로 인하여 많은 응용에 있어서 충돌제트가 표면에 수직인 형상보다는 경사되어 있는 경우를 흔히 볼 수 있으나 이들에 관한 연구는 몇몇 연구에 불과한 실정이다.

Goldstein 등<sup>(6)</sup>은 평행표면에 분사되는 경사충돌제트에 대한 열전달실험을 수행하여 Reynolds 수가 10000~35000사이에서 L/d=4, 6, 10과 경사각도 30°~90°인 경우에 대한 유동장의 국소열전달계수를 측정하였으며, 국소열전달계수의 상관관계식을 제시하였다. Lamont 등<sup>(7)</sup>과 Rubel<sup>(8)</sup>은 경사제트에 관한 연구에서 정체점 또는 최대 열전달은 제트출구방향과 충돌표면의 교차점에서 이동되어 발생하는 것을 관찰하였다. Gau 등<sup>(9)</sup>은 슬롯제트(slot jet)를 이용하여 원통형 블록표면과 오목표면에서 표면곡률효과에 따른 열전달에 미치는 영향을 실험을 통하여 수행하였으며, 곡면표면에 따른 국소열전달계수와 평균열전달계수와 상관관계식을 제시하였고, 블록면의 정체점에서는 일련의 3차원 와류에 의한 운동량 전달의 증가에 의해 열전달이 촉진되며, 벽면제트 영역에서의 유동은 구심력에 의해 안정되므로 열전달률이 감소함을 밝혔다.

Yan<sup>(10)</sup>은 평면에 충돌하는 완전 발달된 원형제트에 의한 열전달 계수를 측정하였으며, 최근 Lim 등<sup>(11)</sup>은 경사진 오목표면에 분사되는 난류원형 제트에 대한 국소열전달계수를 액정(liquid crystal)을 이용한 과도기법을 이용하여 실험측정하였고, Lee 등<sup>(12)</sup>은 블록한 반구면에 수직충돌하는 원형제트의 열전달 및 유동특성을 액정을 사용하여 실험 측정하였다.

본 연구에서는 액정과도현상기법(liquid crystal transient method)을 사용하여 블록표면에 분사되는 경사충돌제트에 대한 열전달 특성을 실험적 연구를 통하여 규명하고자 한다. 실험은 반구블록표면(hemispherical convex surface)에 난류원형제트를 분사시켜 국소열전달계수를 측정하며, 수직충돌제트에서의 실험결과와 비교할 수 있도록 Re=23000에 대하여 수행하였다.

국소열전달계수를 측정하고자 블록반구직경대 노즐직경비 D/d=11.67인 경우 4가지의 충돌표면사이의 경사각( $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  및  $40^\circ$ )과 5가지의 노즐출구와 충돌표면사이의 거리(L/d=2, 4, 6, 8 및 10)에 대하여 실험을 수행하여 경사진 블록표면의 경사충돌제트에 대한 난류 열전달특성을 연

구 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 크게 원심송풍기 부분과 완전히 발달한 흐름을 위한 긴 관 부분과 충돌면 부분의 3부분으로 구성되어 있다. 원심송풍기 부분의 송풍기는 유량조절기를 부착하여 유량을 조절하도록 하였으며, 속도측정을 위하여 압력측정장치인 FC 0510 마이크로 마노메타를 사용하였다. 긴 관은 제트출구에서 완전히 발달한 흐름을 위하여 관직경의 약 67배가 되게 하였고, 제트온도는 열교환기를 사용하여 실험모형 주위공기와의 온도차가  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 까지 되도록 하였으며, 제트온도 측정은 보정된 K형 열전대를 사용하였다. 실험모형은 4.7 mm 두께를 가진 직경 D가 350 mm인 반구의 플렉시글라스 돔(plexiglas dome)을 사용하였으며, 반구의 아랫면에는 글라스 울(glass wool)과 스티로폼(styrofoam) 절연체를 사용하여 열손실을 방지하였고, 충돌표면의 경사각을 위하여 각도를 조절할 수 있도록 하였다. 실험모형의 충돌면인 블록표면에는 온도에 따른 색깔의 변화를 기록할 수 있게 하기 위하여 표면위에 공기 브러쉬(air brush)를 이용하여 압축공기로 검은색 페인트를 반복 분사하여 두께 약 0.03~0.05 mm으로 매우 얇은 층을 입혔고, 검은색 페인트가 완전히 건조

한 다음 그 위에 증류수와 1:1 비율로 섞은 액정(Hallcrest Inc.: R35C1W)을 역시 공기 브러쉬를 사용하여 얇게 입혔다.

측정되는 모든 실험자료의 기록과 가시화를 위하여 칼라 CCD카메라(PULNIX TMC-7)와 화상촬영 비디오장치로 측정표면의 시간과 위치에 따라 액정의 온도반응에 따른 색의 변화를 기록할 수 있도록 하였다.

### 2.2 실험방법

본 실험에서는 경사진 블록표면에서의 난류원형충돌제트에 대한 국소열전달계수를 측정하기 위하여 액정과도현상기법<sup>(13,14)</sup>을 사용하였으며, Reynolds수가 23000일 때 5가지의 충돌제트와 분사표면사이의 거리( $L/d=2, 4, 6, 8$  및  $10$ )와 4가지의 경사각도( $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  및  $40^\circ$ )에 따라 실험하고 측정하였다.

실험에 사용된 실험모형의 블록표면에서 유동방향의 열전도손실을 무시하면(Vedula 등<sup>(15)</sup>, Yan 등<sup>(14)</sup>) 대류열전달계수의 경계조건을 갖는 반무한(semi-infinite)고체에서의 과도 열전도방정식의 측정표면의 온도분포는 다음과 같이 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$T^* = \frac{(T_w - T_\infty)}{(T_{wo} - T_\infty)} = e^{\gamma^2} \text{erfc}(\gamma) \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{h\sqrt{t}}{\sqrt{\rho C_p k}} \quad (2)$$

여기서  $T_w$ 는 시간에 따른 측정표면의 온도,  $T_{wo}$ 는 측정표면의 초기온도,  $T_\infty$ 는 제트의 온도이며,  $h$ 는 대류열전달계수이다.

오븐(incubator)에서 실험모형을 약 3시간정도 가열한 후 일정온도( $50 \pm 0.5^\circ\text{C}$ )로 유지되고 있는 측정표면에 경사각을 주어 충돌제트를 분사시키면 액정으로 입혀진 측정표면이 냉각되면서 표면에서 빨강(Red)과 노랑(Yellow) 및 초록(Green)으로 이루어진 등온선의 얇은 천이층(이하 R-G 천이층이라 칭함)이 나타나는데, 측정위치에 따라 R-G천이층을 나타내는 온도에 도달할 때까지의 시간  $t$ 를 위치에 따라 비디오장치를 이용하여 측정하면 식(1)과 (2)에서 국소열전달계수를 구할 수 있다.

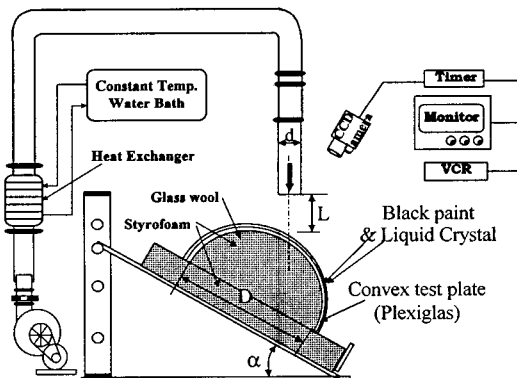


Fig. 1 Experimental apparatus of impinging jet on a convex curvature surface.

Table 1 Uncertainty Analysis  
(for Re=23000,  $\alpha=30^\circ$ , L/d=6)

Parameter $X_i$	Typical Value	$\delta X_i$	$\left(\frac{\delta X_i}{X_i} \frac{\partial Nu_s}{\partial X_i}\right) \times 100\%$
$d$	0.030(m)	0.0002	0.5
$t$	12.35;15.0(sec)	0.06	0.3
$T_{wo}$	50.36 (°C)	0.5	0.6
$T_\infty$	21.8 (°C)	1.0	6.2
$T_{ic}$	34.9 (°C)	0.25	3.2
$\sqrt{\rho C_p k}$	569	29	5.2
$\epsilon$	0.5	0.1	0.5
$\delta Nu_s / Nu_s =$			8.8(%)

측정표면에서 R-G천이층이 나타나는 온도를 보정(calibration)하기 위하여 알루미늄시편에 액정을 입혀 온도구배를 만들어 R-G천이층이 나타나는 액정의 온도를 열전대를 이용하여 수회에 걸쳐 측정하여 보정하였으며, 그 결과 본 실험에서 사용되었던 액정의 R-G천이층의 온도는  $34.9 \pm 0.25^\circ\text{C}$ 이었다. 이때 온도측정을 위하여 사용된 열전대들은 직경이 약 0.08 mm인 K형 열전대로 NESLAB 항온조와 표준 백금온도계 (PRT, platinum resistance thermometer)를 사용하여 온도 보정식을 만들어  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 까지의 정확성을 갖도록 온도를 보정하였다. 본 실험에서의 불확실성(uncertainty)을 해석하기 위하여 Kline 등<sup>(16)</sup>이 제시한 방법을 사용하여 Re=23000,  $\alpha=30^\circ$ 와 L/d=6인 경우에 대하여 해석한 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보듯이 Nu의 전체 불확실성(total uncertainty)은 약 8.8%이었으며, 제트온도의 측정으로 인한 불확실성이 6.2%로 가장 크게 나타났고, 그 다음으로 플렉시글라스(plexiglas)의 물성치값에 의한 불확실도가 큰 요인으로 나타났다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 정체점에서의 열전달

제트의 대칭축과 반구면의 중심이 교차하는 정체점에서의 열전달은 일반적으로 수직충돌제트의 경우와 같이 열전달계수가 크게 나타나기 때문에 유체기의 냉각 또는 가열하는 문제에서 정체점

의 국소열전달계수 측정은 중요한 문제이다. 본 연구에서는 액정과도현상기법을 사용하여 블록한 구직경대 노즐직경비 D/d=11.67을 갖고 블록표면에 분사되는 난류 원형제트에 대한 국소열전달계수를 Re=23000일 때 5가지의 노즐과 충돌표면 사이의 거리(L/d=2, 4, 6, 8 및 10)와 4가지의 경사각도( $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  및  $40^\circ$ )에 따라 실험하여 정체점(stagnation point)에서의 열전달계수를 측정하였다.

Fig. 2에서는 Re=23000인 경우 경사각도( $\alpha$ )의 변화에 따른 정체점에서의 열전달계수( $Nu_s$ )를 노즐과 충돌표면 사이의 거리 L/d에 따라 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 정체점에서의  $Nu_s$ 는 L/d=6까지 점차 증가하다가 L/d=6에서 최대 열전달이 발생하며 L/d=6보다 커질수록  $Nu_s$ 는 점차 감소하였다. 또한, 그림에서 보듯이 경사각도가 증가할수록 정체점에서의  $Nu_s$ 는 감소하게 나타났으며, 본 실험에서는 L/d=6과 경사각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우  $Nu_s=154$ 의 가장 큰 값을 갖고, L/d=2와  $\alpha=40^\circ$ 인 경우에서는  $Nu_s=137$ 로 가장 작은 값이 나타나 가장 큰  $Nu_s$ 값에 가장 작은  $Nu_s$ 값에 비해 약 12.4% 크게 나타났다.

한편, 경사각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우에 대한  $Nu_s$ 값은 블록표면에서의 수직충돌제트에 대한 실험결과<sup>(12)</sup>와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 Re=23000인 경우 노즐과 충돌표면 사이의 거리(L/d) 변화에 따른 정체점에서의 열전달계수의 변화를 경사각도( $\alpha$ )에 따라 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 L/d에 따른 정체점에서의

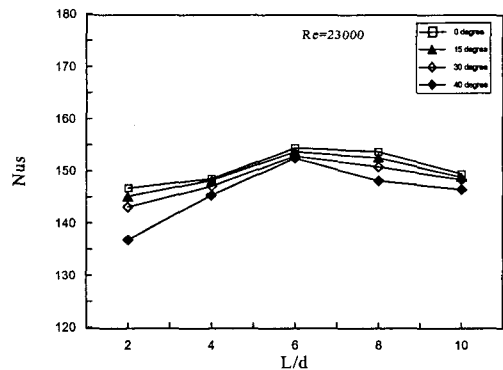


Fig. 2 Effect of L/d on the stagnation point Nusselt number for Re= 23000 and  $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  and  $40^\circ$ .

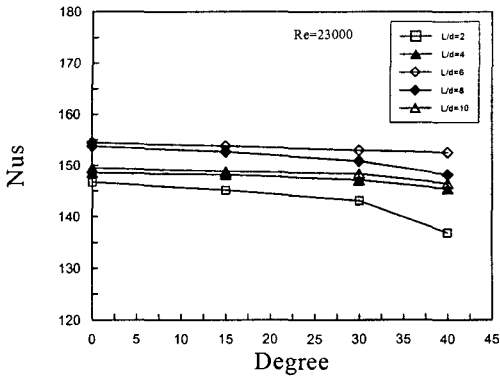


Fig. 3 Effect of jet angle on the stagnation point Nusselt number for  $Re=23000$  and  $L/d=2, 4, 6, 8$  and  $10$ .

$Nu_s$ 는  $L/d=6$ 에서 가장 큰 값이 나타나고 있으며,  $L/d=8, 10, 4, 2$  순으로 감소하였다.

블록표면을 따른 국소열전달계수의 분포를 나타내기 위하여  $Re=23000$ 인 경우 4가지 경사각  $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  및  $40^\circ$ 를 갖는 블록표면의 등열전달계수 등고선(contour)을 노즐과 충돌표면사이의 거리  $L/d=6$ 인 경우 각각 X축과 Y축의 비율로 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 경사각도  $\alpha=0^\circ$ 에서는 등열전달계수는 완전한 동심원의 형태를 유지하고 있으며, 경사각도가 있는 경우 등열전달계수는 타원형태로 나타났고, 경사각도가 증가할수록 더 찌그러진 타원형태로 나타남을 알 수 있다. 또한 최대  $Nu$ 가 나타나는 위치는 정체점으로부터  $X/d<0$ (상류)방향으로 이동되고 있음을 알 수 있으며, 경사각도  $\alpha=30^\circ$  및  $40^\circ$ 인 경우  $X/d>0$ (하류)에서 2차 정점이 나타나는 것을 볼 수 있다.

3.2 표면을 따른 열전달계수 분포

블록표면을 따른 국소열전달계수의 분포를 나타내기 위하여  $Re=23000$ 일 때 노즐출구와 충돌면 사이의 거리가  $L/d=2, 6$  및  $10$ 인 경우에 대하여 경사각도  $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  및  $40^\circ$ 에 따른  $Nu$ 변화를 Fig. 5~Fig.7에 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이  $Re=23000, L/d=2$ 인 경우 X축 표면을 따르는 국소열전달계수의 분포는 모든 경사각도에 대해서  $X/d>0$ (하류)에서는 정체점에서 가장 큰 값을 갖고 감소하다가  $X/d=1.3$ 에서 다시

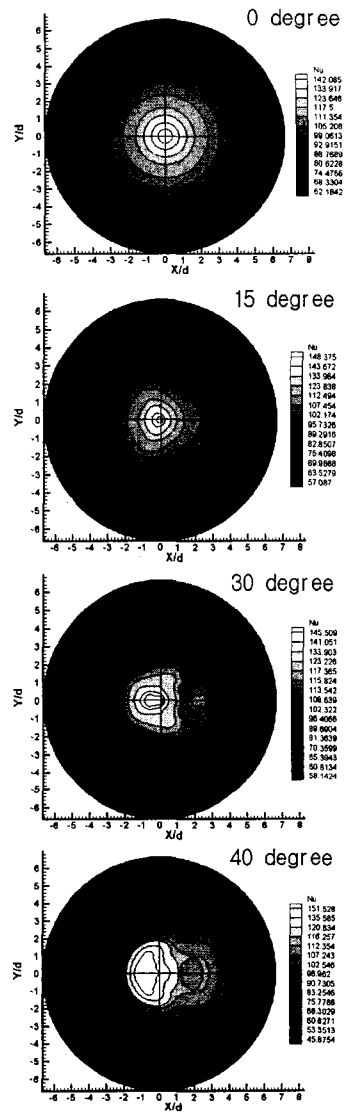


Fig. 4 Contours of constant Nusselt number for  $Re=23000, L/d=6$  and various jet angles.

증가하여 2차 정점이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 2차 정점의 발생은 유동이 층류에서 난류 경계층으로 천이함에 따라 난류강도가 증가하기 때문이다. 2차 정점의 발생위치는 경사각도에 따라 각각  $\alpha=0^\circ$ 일 때  $X/d=2, \alpha=15^\circ$ 일 때  $X/d=2, \alpha=30^\circ$ 일 때  $X/d=2.67, \alpha=40^\circ$ 일 때  $X/d=3.33$ 으로서 경사각도가 증가할수록 정체점에서 멀리 이동되어 나타남을 알 수 있다.

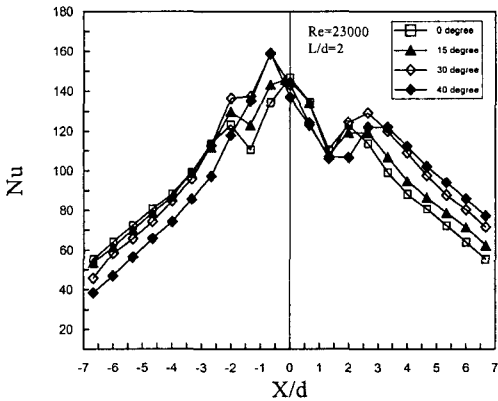


Fig. 5 Comparison of Nusselt number distribution along the X axis for  $L/d=2$ ,  $Re=23000$  and various angles.

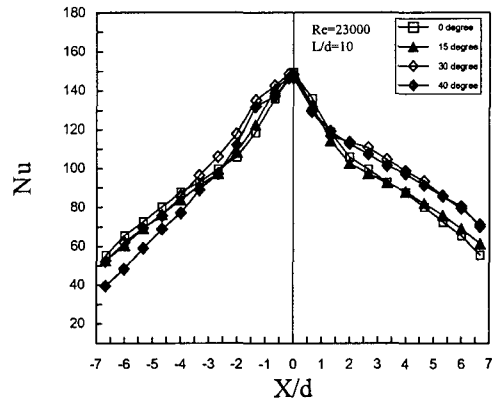


Fig. 7 Comparison of Nusselt number distribution along the X axis for  $L/d=10$ ,  $Re=23000$  and various angles.

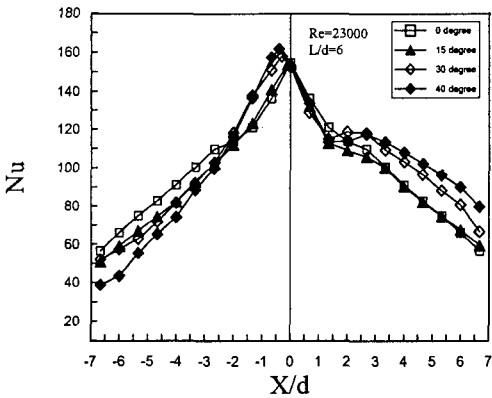


Fig. 6 Comparison of Nusselt number distribution along the X axis for  $L/d=6$ ,  $Re=23000$  and various angles.

또한, 최대열전달계수  $Nu_m$ 은 경사각도  $\alpha=0^\circ$ 를 제외하고는 모든 경사각도에서  $X/d < 0$ (상류) 쪽으로 이동되어 나타나는 것을 알 수 있다.  $Nu_m$ 이 정체점으로부터  $X/d < 0$ (상류) 쪽으로 이동되어 나타나는 이유는 제트의 유동이 벽면 충돌 후 정체점으로부터 상류 및 하류로 각각 나뉘게 되며, 이때 상류측에서 유동방향이 급격하게 바뀜으로 인하여 보다 활발한 유동혼합(flow mixing)이 발생하게 되어 높은 난류강도 값을 갖게 되기 때문이다.<sup>(17)</sup>

$Nu_m$ 의 발생위치는 경사각도  $\alpha=0^\circ$ 일 때는 정체점에서 발생하지만, 경사각도가 각각  $\alpha=15^\circ$ 일 때  $X/d=-0.17$ ,  $\alpha=30^\circ$  및  $\alpha=40^\circ$ 일 때  $X/d=-0.67$

으로서 경사각도가 증가할수록 정체점에서 멀리 이동되어 나타남을 알 수 있고, 본 논문의 실험 범위에서 이와 같은 현상은  $L/d=4, 6, 8$  및  $10$ 에서도 같게 나타났으며, 또한 본 실험에서 최대 이동거리는  $L/d=2$ 와  $\alpha=30^\circ$  및  $40^\circ$ 일 때 노즐직경의 약 0.67배로 나타났다. 이러한 결과는 경사 평판  $\alpha=20^\circ$ 에 대하여 최대 벽면압력계수의 위치가 약  $0.7d$  만큼 상류쪽으로 이동됨을 연구한 Yoon 등<sup>(17)</sup>의 결과와 비교해 볼 때, 평판에서보다 경사충돌제트에 의한 블록표면에서는 정체점으로부터의 최대 이동거리가 약간 짧게 나타나고 있음을 알 수 있다.  $Nu_s$ 값에 대하여  $Nu_m$ 값의 증가율은 경사각도에 따라 각각  $\alpha=15^\circ$ 일 때 0.4%,  $\alpha=30^\circ$ 일 때 10.9%,  $\alpha=40^\circ$ 일 때 16.4%로서 경사각도가 증가할수록 증가율이 커지는 것을 알 수 있다. 또한 상류에서의 2차 정점은  $\alpha=30^\circ$ 와  $\alpha=40^\circ$ 에서는 나타나지 않고,  $\alpha=0^\circ$  및  $\alpha=15^\circ$ 의 경우에 발생하였으며, 발생위치는  $X/d=-2$ 인 것으로 나타났다.

Fig. 6의  $Re=23000$ ,  $L/d=6$ 인 경우  $X/d > 0$ 에서 2차정점은  $\alpha=30^\circ$  및  $\alpha=40^\circ$ 에서 발생하며 발생 위치는 경사각도에 따라 각각  $\alpha=30^\circ$ 일 때  $X/d=2$ ,  $\alpha=40^\circ$ 일 때  $X/d=2.67$ 으로 나타났고,  $X/d < 0$ 에서의  $Nu_m$ 의 발생위치는 그림에서 볼 수 있듯이  $L/d=2$ 인 경우(Fig. 5)보다 정체점으로부터 약간 작게 이동되어 나타남을 알 수 있는데, 경사각도에 따라 각각  $\alpha=15^\circ$ 일 때  $X/d=-0.1$ ,  $\alpha=30^\circ$ 일 때  $X/d=-0.3$ ,  $\alpha=40^\circ$ 일 때  $X/d=-0.4$ 인 것으로 나타

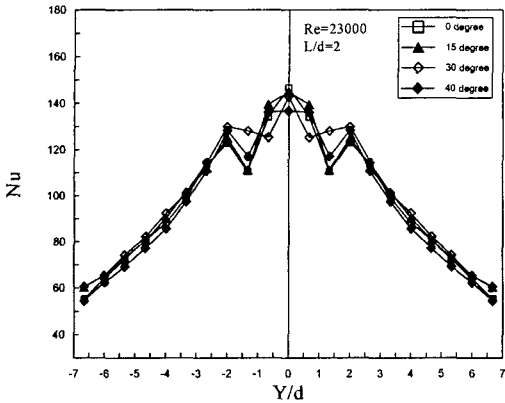


Fig. 8 Comparison of Nusselt number distribution along the Y axis for  $L/d=2$ ,  $Re=23000$  and various angles.

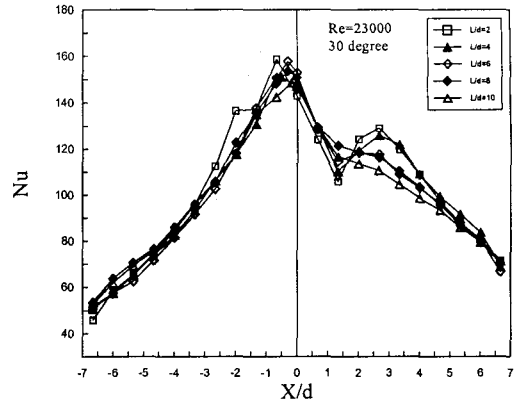


Fig. 10 Comparison of Nusselt number distribution along the X axis for  $\alpha=30^\circ$ ,  $Re=23000$  and various  $L/d$ .

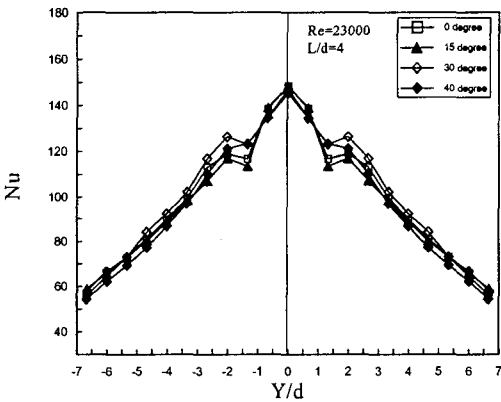


Fig. 9 Comparison of Nusselt number distribution along the Y axis for  $L/d=4$ ,  $Re=23000$  and various angles.

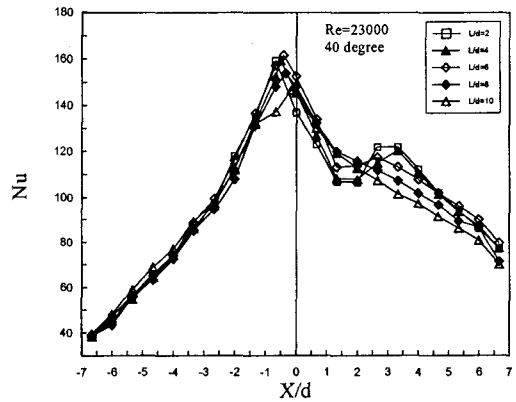


Fig. 11 Comparison of Nusselt number distribution along the X axis for  $\alpha=40^\circ$ ,  $Re=23000$  and various  $L/d$ .

났다.  $Nu_m$ 값은  $Nu_s$ 값에 비하여 경사각도에 따라 각각  $\alpha=15^\circ$ 일 때 0%,  $\alpha=30^\circ$ 일 때 3.2%,  $\alpha=40^\circ$ 일 때 5.9% 증가하는 것으로 나타났으며, 상류에서의 2차 정점은 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한, 그림으로 나타내지 않았지만 본 실험에서  $L/d=4$ 인 경우  $X/d>0$ 에서 2차 정점은 모든 경사각도에서 발생하였고,  $X/d<0$ 에서는  $\alpha=0^\circ$ 에서만 발생하였으나,  $L/d=8$ 인 경우에는 표면을 따른 열경계층의 두께가 점차 커짐에 따라 표면을 따른  $Nu$ 의 분포는 단조감소(monotonic decrease)하였으며, 2차 정점은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 7의  $Re=23000$ ,  $L/d=10$ 인 경우  $X/d>0$ 에서 2차 정점은 발생하지 않으며, 표면을 따른 국소  $Nu$ 는  $X/d$ 를 따라 열경계층의 두께가 두꺼워짐에 따라 단조감소(monotonic decrease)하는 것으로 나타났다.

Fig. 8과 Fig. 9는  $Re=23,000$  일 때 노즐과 충돌면 사이의 거리가  $L/d=2$ 와 4인 경우 경사각도 ( $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$  및  $40^\circ$ ) 변화에 따른 Y축의 국소 열전달계수 분포를 나타내었다. Fig. 8과 Fig. 9에서 알 수 있듯이 정체점에서의  $Nu_s$ 값은 경사각도가 증가할수록 감소하게 나타나고 있으며,  $L/d \leq 4$ 일 때  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 에서와  $L/d=2$ 일 때  $\alpha=40^\circ$

인 경우에 대하여 2차 정점이 나타났고, 2차 정점의 발생위치는 모든 경사각도에 대하여  $Y/d = \pm 2$ 로서 일정한 것으로 나타났다. 한편, 그림으로 나타내지 않았지만  $L/d=6, 8$  및  $10$ 에서는 모든 구간에서 단조감소하였다. 또한, Y축에서는 X축에서와는 달리 열전달계수의 변화 곡선이 대칭으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은  $Re=23000$ 일 때 경사각도  $\alpha=30^\circ$ 와  $\alpha=40^\circ$ 인 경우에 대하여 노즐과 충돌면 사이의 거리 변화에 따른 국소열전달계수 분포를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 경사각도  $\alpha=30^\circ$ 인 경우  $L/d=2, 4$  및  $6$ 일 때 하류에서만 2차 정점이 발생하였으며, 발생위치는  $L/d$ 에 따라 각각  $L/d=2$  및  $L/d=4$ 일 때  $X/d=2.67$ ,  $L/d=6$ 일 때  $X/d=2$ 인 것으로 나타나  $L/d$ 가 커질수록 2차 정점의 위치가 정체점으로부터 가까이 나타남을 알 수 있으며, 이러한 현상은 경사각도  $\alpha=40^\circ$ 인 경우에도 같게 나타났다. 또한, 그림에서 볼 수 있듯이 최대 열전달계수  $Nu_m$ 의 발생위치는  $L/d$ 에 따라 정체점으로부터 이동되어 나타남을 알 수 있으며, 경사각도  $\alpha=30^\circ$ 인 경우 각각  $L/d=2$ 일 때  $X/d=-0.67$ ,  $L/d=4$ 일 때  $X/d=-0.5$ ,  $L/d=6$ 일 때 및  $L/d=8$ 일 때  $X/d=-0.3$ ,  $L/d=10$ 일 때  $X/d=-0.17$ 인 것으로 나타나  $L/d$ 가 감소할수록 정체점으로부터 상류측으로 멀리 이동되어 나타남을 알 수 있고 이러한 현상은 경사각도  $\alpha=40^\circ$ 인 경우에도 같게 나타났다. 한편, 그림에서 볼 수 있듯이  $X/d < 0$ (상류)에서 국소열전달계수의 분포는 경사각도가 증가함에 따라서 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 액정과도현상기법(liquid crystal transient method)을 사용하여 블록반구직경대 노즐직경비  $D/d=11.67$ 을 갖는 블록 표면에 분사되는 난류 경사원형제트에 대한 국소 열전달계수를  $Re=23000$ 인 경우에 대하여 5가지의 충돌제트와 분사표면사이의 거리  $L/d$ 와 4가지의 경사각도  $\alpha$ 에 따라 실험하여 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정체점에서의  $Nu_s$ 는 경사각도가 증가함에 따라 감소하며, 모든 경사각도에 대하여  $L/d=6$ 인 경우에 가장 큰 것으로 나타났고,  $L/d=8, 10, 4, 2$

순으로 감소하였다.

(2) X축에 대한 2차 정점은 상류(upstream)의 경우  $L/d \leq 4$ 일 때  $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ 에서 나타났고, 하류(downstream)의 경우  $L/d \leq 4$ 일 때  $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ 와  $L/d \leq 6$ 일 때  $30^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ 에서 나타났다.

(3) Y축에 대한 2차 정점은  $L/d \leq 4$ 에서  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 와  $L/d=2$ 에서는  $\alpha=40^\circ$ 일 때  $Y/d = \pm 2$ 에서 나타났다.

(4) 최대  $Nu_m$ 의 발생위치는 경사각이 증가할수록 또한 노즐과 충돌표면 사이의 거리가 감소할수록 정체점에서 멀리 이동하며, 본 실험에서 최대 이동거리는  $L/d=2$ 와  $\alpha=30^\circ$  및  $40^\circ$ 인 경우 노즐직경의 약 0.67배 정도인 것으로 나타났다.

(5) 정체점에서의  $Nu_s$ 값에 비하여 최대  $Nu_m$ 값의 증가율은 경사각도가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며,  $L/d=2$ 와  $\alpha=40^\circ$ 인 경우 최대 16.4% 증가하였다.

#### 참고문헌

1. Baughn, J.W., Hechanova, A.E., and Yan, X., 1991, An experimental study of entrainment effects on the heat transfer from a flat surface to a heated circular impinging jet, ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 113, pp. 1023-1025.
2. Baughn, J.W. and Yan, X., 1991, A preheated wall transient method for measurements of the heat transfer from a surface to an impinging jet, Proceedings, Eurotherm Seminar No. 25, Pau, France, pp. 1-7.
3. Martin, H., 1977, Heat and mass transfer between impinging gas jet and solid surfaces, Advances in Heat Transfer, Vol. 13, pp. 1-60.
4. Hrycak, P., 1983, Heat transfer from round impinging jets to a flat plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 26, pp. 1857-1965.
5. Lee, S.J., Lee, D.H., and Grief, R., 1993, Heat transfer from a plate to a fully developed axisymmetric impinging jet, Enhanced Cooling Techniques for Elec-



- tronics Application, ASME HTD-Vol. 263, pp. 11-18.
6. Goldstein, R.J. and Franchett, M.E., 1988, Heat transfer from a flat surface to an oblique impinging jet, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 84-90.
  7. Lamont, P.L. and Hunt, B.L., 1980, The impingement of underexpanded, axisymmetric jet on perpendicular and inclined flat plate, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, part 3, pp. 471-511.
  8. Rubel, A., 1981, Computation of the oblique impingement of round jets upon a plane wall, *AIAA, Journal*, Vol. 19, pp. 863-871.
  9. Gau, C. and Chung, C.M., 1991, Surface curvature effect on slot-air jet impinging cooling flow and heat transfer process, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 858-864.
  10. Yan, X., 1993, A preheated wall transient method using liquid crystals for the measurement of heat transfer on external surfaces and in ducts, Ph. D. Dissertation, University of California, Davis.
  11. Lim, K.B. and Kim, H.J., 1998, Local heat transfer measurement from a concave surface to an oblique impinging jet, *空氣調和 冷凍工學 論文集 第10권 第3號*, pp. 324-333.
  12. Lee, D.H., Chung, Y.S., Kim, D.S., and Lim, K.B., 1997, Heat transfer and flow characteristics of a circular jet impinging on a convex curved surface, *KSME*, Vol. 21(B), No.4, pp. 579-588.
  13. Baughn, J.W. and Yan, X., 1991, An insertion technique using the transient method with liquid crystals for heat transfer measurements in ducts, *Fouling and Enhancement Interactions*, Rabas, T.J. and Chenoweth, J.M., Edited, ASME HTD-Vol. 164, pp. 77-83.
  14. Yan X., Baughn, J.W., and Mesbah, M., 1992, The effect of Reynolds number on the heat transfer distribution from a flat plate to an impinging jet, ASME HTD- Vol. 226, pp. 11-18.
  15. Vedula, R.P., Metzger, D.E., and Bickford, W.B., 1988, Effect of lateral and anisotropy conduction on determination of local convection heat transfer characteristics with transient tests and surface coating, ASME Collected Papers in Heat Transfer, HTD-Vol. 104, pp. 21-27.
  16. Kline, S.J. and Mcklintock, F.A., 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, *Mechanical. Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 3-8.
  17. Yoon, S.H., Kim, M.K., and Lee, D.H., 1996, Turbulence flow and heat transfer characteristics of a two-dimensional oblique plate impinging jet, *KSME Int. J.*, Vol. 11, No. 4, pp. 476-483.