

오목표면에 분사되는 경사충돌제트의 난류열전달 현상에 관한 연구

임 경 빈[†], 최 형 철^{*}, 이 세 균^{**}, 최 상 경^{*}, 김 학 주^{***}

대전산업대학교 기계설계공학과, ^{*}국방과학연구소, ^{**}충북대학교 기계공학과, ^{***}한국자원연구소

Turbulent Heat Transfer of an Oblique Impinging Jet on a Concave Surface

Kyoung-Bin Lim[†], Hyoung-Chol Choi^{*}, Se-Goun Lee^{**}, Sang-Kyoung Choi^{*}, Hak-Ju Kim^{***}

Department of Mechanical Design, Taejon National University of Technology, Taejon 302-717, Korea

^{}Development Agency for Defense, Taejon 305-600, Korea*

*^{**}Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Chongju 361-736, Korea*

*^{***}Korea Institute of Geology, Mining & Materials, Taejon 305-350, Korea*

(Received September 3 1999; received revision January 31, 2000)

ABSTRACT: The turbulent heat transfer from a round oblique impinging jet on a concave surface were experimentally investigated. The transient measurement method using liquid crystal was used in this study. In this measurement, a preheated wall was suddenly exposed to an impinging jet while recording the response of liquid crystals to measure surface temperature. The Reynolds numbers were 11000, 23000 and 50000, nozzle-to-surface distance ratio was from 2 to 10 and the surface angles were $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and 40° . Correlations of the stagnation point Nusselt numbers with Reynolds number, jet-to-surface distance ratio and dimensionless surface angle, which account for the surface inclined angle, are presented. The maximum Nusselt numbers, in this experiment, occurred in the direction of upstream. The displacement of the maximum Nusselt number from the stagnation point increases with increasing surface angle or decreasing nozzle-to-surface distance. In this experiment, the maximum displacement is about 0.7 times of the jet nozzle diameter when surface curvature, D/d is 10.

Key words: Oblique impinging jet(경사충돌제트), Liquid crystal(액정), Concave surface(오목표면), Turbulent heat transfer(난류열전달)

기 호 설 명

C_p : 플렉시글라스의 비열 [J/kg · K]

D : 오목반구 직경 [m]

d : 노즐 직경 [m]

h : 국소열전달계수 [$W/m^2 \cdot K$]

k : 플렉시글라스의 열전도계수 [$W/m \cdot K$]

L : 노즐출구와 충돌면사이의 거리 [m]

t : 시간 [s]

T : 온도 [$^\circ C$]

T^* : 무차원 표면온도 $\left(= \frac{T_w - T_\infty}{T_{w0} - T_\infty} \right)$

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-630-0360; fax: +82-42-630-0351

E-mail address: kbkim024@hyunam.tnut.ac.kr

- X : 제트의 유동방향을 따르는 축
 Y : 제트의 유동방향에 직각인 축
 Nu : 국소 Nusselt 수 ($\frac{hd}{k}$)
 Re : 제트 Reynolds 수 ($\frac{Ud}{\nu}$)

그리스 문자

- ϵ : 액정표면의 방사율
 γ : 식(2)에 의해 정의된 값
 ρ : 플렉시글라스의 밀도 [kg/m^3]

하첨자

- m : 최대
 o : 초기
 s : 정체점
 w : 플렉시글라스의 벽면
 ∞ : 대기

1. 서 론

충돌제트(impinging jet)는 열유체기기의 열전달 효율을 증대시키는데 가장 폭넓게 사용되는 방법으로서 최근 산업사회의 발달과 함께 산업공정의 가열과 냉각에 이용되고 있으며, 강판의 냉각, 유리의 템퍼링(tempering), 종이와 직물 및 박막의 건조, 가스터어빈과 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. 충돌제트 열전달에 대한 연구는 주로 제트 분사표면의 형태에 따라 평판표면과 오목표면 및 볼록표면 등에 대하여 실험적으로 많은 연구가 이루어져 왔다.⁽¹⁻⁴⁾

많은 산업 열유체기기들의 냉각문제에서 곡면(curved surface)에서의 충돌제트 문제는 흔히 볼 수 있으며, 또한 표면형상 혹은 노즐위치의 제약으로 인하여 많은 응용에 있어서 충돌제트가 표면에 수직한 형상보다는 경사되어 있는 경우를

흔히 볼 수 있으나 이들에 관한 연구는 몇몇 연구에 불과한 실정이다.

Goldstein and Franchett⁽⁵⁾는 평행표면에 분사되는 경사충돌제트에 대한 열전달 실험을 수행하여 Reynolds수가 10000~35000사이에서 $L/d=4, 6, 10$, 경사각도 $30^\circ \sim 90^\circ$ 인 경우에 대한 유동장의 국소열전달계수를 측정하였으며, 국소열전달계수의 상관관계식을 제시하였다. Lamont and Hunt⁽⁶⁾와 Rubel⁽⁷⁾은 경사충돌제트에 관한 연구에서 정체점 또는 최대 열전달은 제트출구방향과 충돌표면의 교차점에서 이동되어 발생하는 것을 관찰하였다. Gau and Chung⁽⁸⁾은 슬롯제트(slot jet)를 이용하여 원통형 볼록표면과 오목표면에서 표면곡률 효과에 따른 열전달에 미치는 영향을 실험을 통하여 수행하였으며, 곡면표면에 따른 국소열전달계수와 평균 열전달계수와 상관관계식을 제시하였고 또한, 2차원 슬롯제트가 분사되는 원통형의 오목면과 볼록면에서의 열전달 연구에서 볼록면의 정체점에서는 일련의 3차원 와류에 의한 운동량 전달의 증가에 의해 열전달이 촉진되며, 벽면제트 영역에서의 유동은 구심력에 의해 안정되므로 열전달률이 감소함을 밝혔다.

Yan⁽⁹⁾은 평면에 충돌하는 완전 발달된 원형제트에 의한 열전달계수를 액정(liquid crystal)을 이용하여 측정하였으며, 최근 Lim and Lee⁽¹⁰⁾는 오목표면곡률이 난류원형충돌제트의 열전달에 미치는 영향에서 액정(liquid crystal)을 사용한 과도기법을 이용하여 실험 측정하였다.

본 연구에서는 액정과도현상기법(liquid crystal transient method)을 이용하여 오목표면에 분사되는 경사충돌제트에 대한 열전달 특성을 규명하고자 실험적 연구를 하고자 한다. 실험은 오목반구표면(hemispherical concave surface)에 난류원형제트를 분사시켜 $Re=11000, 23000, 50000$ 에 대하여 실험하였다. 국소열전달계수를 측정하고자 4가지의 충돌표면 사이의 경사각($\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40°)과 5가지의 노즐출구와 충돌표면사이의 거리($L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10)에 대하여 오목반구면의 지름대 노즐비 $D/d=10$ 으로 실험을 수행하여 경사진 오목표면의 충돌제트에 대한 난류열전달 특성을 연구 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용되는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 크게 3부분으로 원심송풍기 부분과 완전히 발달한 흐름을 위한 긴 관 부분과 그리고 충돌면 부분으로 구성되어 있다. 송풍기 부분의 송풍기는 유량조절기를 부착하여 유량을 조절하도록 하였으며, 속도측정을 위하여 압력측정장치인 FC0510 마이크로 마노미터를 사용하였다. 긴 관은 제트출구에서 완전히 발달한 흐름을 위하여 관직경의 약 67배가 되게 하였으며, 제트온도의 측정은 열교환기를 사용하여 실험모형 주위공기와 온도차가 ±0.1℃까지 보정된 K형 열전대를 사용하였다. 실험모형은 4.7 mm 두께를 가진 직경 D가 300 mm인 반구의 플렉시글라스 돔(plaxiglas dome)을 사용하였으며, 반구의 아랫면에는 유리솜(glass wool)과 스티로폼(styrofoam) 절연체를 사용하여 열손실을 방지하였고, 충돌표면의 경사각을 위하여 각도를 조절할 수 있도록 하였다.

실험모형의 충돌면인 오목표면에는 온도에 따른 색깔의 변화를 기록할 수 있게 하기 위하여 그 표면 위에 공기 브러쉬(air brush)를 이용하여 검은색 페인트를 반복 분사하여 두께 약 0.03~0.05 mm으로 매우 얇은 층을 입혔고, 검은색 페인트가 완전히 건조한 다음 그 위에 증류수와 1:1 비율로 섞은 액정(R35C1W)을 역시 공기 브러쉬를 사용하여 얇게 입혔다.

측정되는 모든 실험자료의 기록과 가시화를 위하여 칼라 CCD카메라(PULNIX TMC-7)와 화상

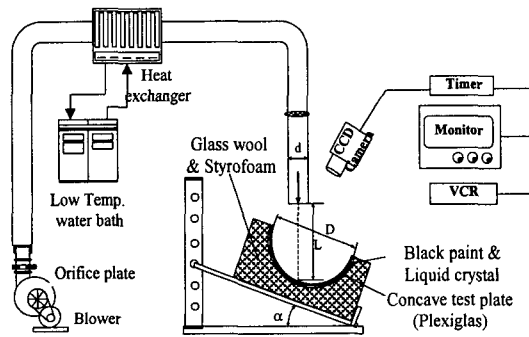


Fig. 1 Experimental apparatus of impinging jet on a concave curvature surface.

촬영 비디오장치로 측정표면의 시간과 위치에 따른 액정의 온도반응에 따른 색의 변화를 기록할 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 Yan et al.⁽¹¹⁾과 Baughn and Yan⁽¹²⁾에 의하여 사용된 측정기법으로서 액정과 도기법을 사용하였다. 액정은 색깔의 반복성이 뛰어나며 색깔의 반응이 비디오 시스템에 쉽게 기록될 수 있어 열전대나 다른 온도측정장치에 비하여 온도변화를 연속적으로 알 수 있고, 온도장 전체를 한번에 가시화할 수 있기 때문에 곡률진 덕트나 가스터빈 깃의 냉각등의 형상이 매우 복잡한 경우에서의 열전달 현상을 규명하는데 유용하게 이용될 수 있는 장점이 있다. 실험에 사용된 실험모형의 오목표면에 관하여 유동방향의 열전도손실을 무시하면(Vedula et al.⁽¹³⁾, Yan et al.⁽⁹⁾) 대류 열전달계수의 경계조건을 갖는 반무한(semi-infinite) 고체에서의 과도열전도방정식의 측정표면의 온도분포는 다음과 같이 식(1)과 식(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_∞ 는 제트의 온도이며, h 는 대류 열전달계수이다.

오븐(incubator)에서 실험모형을 약 3시간 가열한 후 측정표면의 세 곳에 열전대를 붙여 일정온도로 유지되고 있음을 확인한 후, 단열재로 만들어진 덮개를 이용하여 오븐에서 꺼낸 후 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-G천이층이라 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.

측정표면에서 R-G천이층이 나타나는 온도를

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

Parameter X_i	Typical Value	δX_i	$\left(\frac{\delta X_i}{X_i} \frac{\partial Nu_s}{\partial X_i}\right) \times 100\%$	
			R/d=0	4
d	0.030(m)	0.0002	0.7	0.7
t	9.58;44.52(sec)	0.06	0.4	0.9
T_{wo}	48.5 (°C)	0.2	3.7	3.9
T_∞	26.2 (°C)	0.5	2.9	3.1
T_{ic}	34.9 (°C)	0.25	4.8	5.2
$\sqrt{\rho C_p k}$	569	29	5.4	5.8
ϵ	0.5	0.1	1.3	2.9
$\delta Nu_s / Nu_s =$			8.8	9.8(%)

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 $34.9^\circ\text{C} \pm 0.25^\circ\text{C}$ 이었다. 이때 온도측정을 위하여 사용된 열전대들은 직경이 약 0.08 mm인 K형 열전대로 Rosemount사의 항온조와 표준 백금온도계(PRT, platinum resistance thermometer)를 사용하여 온도보정식을 만들어 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 까지의 정확성을 갖도록 온도를 보정하였다. 또한, 실험에서의 불확실성(uncertainty)을 해석하기 위하여 Kline and Mcklintock⁽¹⁴⁾이 제시한 방법(신뢰수준 95%)을 사용하여 Re=23000, L/d=6과 $\alpha=30^\circ$ 인 경우에 해석한 결과 Table 1과 같이 Nusselt수의 전체불확실성(total uncertainty)은 약 9.8%이었으며, Plexiglas 물성치값의 불확실성이 가장 크게 나타났고, R-G천이층의 온도측정의 불확실성은 다음으로 큰 불확실성 요인으로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 정체점에서의 열전달

제트의 대칭축과 오목반구표면의 중심이 교차하는 정체점($X/D=0$)에서의 열전달은 수직충돌제트의 경우와 같이 열전달계수가 크기 때문에 유체기기의 냉각 또는 가열하는 문제에서 정체점의 국소열전달계수 측정은 중요한 문제라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 액정과도현상기법을 사용하여 D/d=10의 오목반구면의 지름대 노출비를 갖

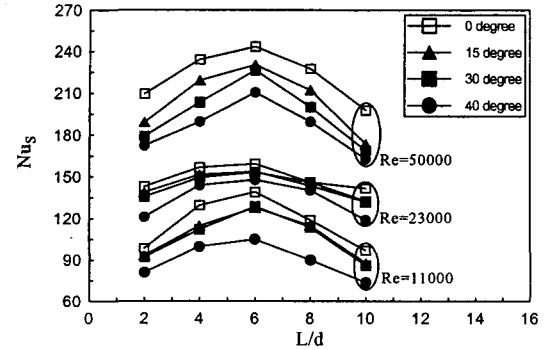


Fig. 2 Effect of Reynolds number and surface angle on the stagnation point Nusselt number.

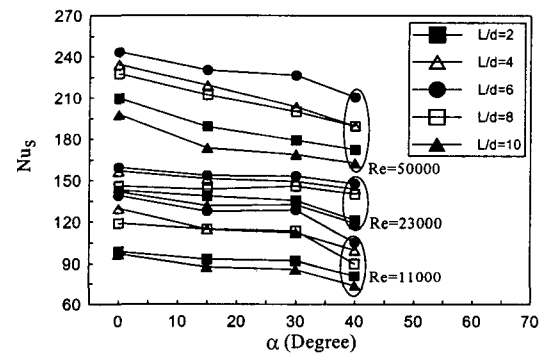


Fig. 3 Effect of Reynolds number and L/d on the stagnation point Nusselt number.

고 오목표면에 분사되는 난류 원형제트에 대한 국소열전달계수를 3가지 Reynolds수 Re=11000, 23000 및 50000일 때 4가지의 경사각도($\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40°)와 5가지의 노출과 충돌표면 사이의 거리(L/d=2, 4, 6, 8 및 10)에 따라 실험하여 정체점(stagnation point)에서의 열전달계수를 측정하였다.

Fig. 2에서는 Re=11000, 23000, 50000인 경우 모든 Reynolds수에 대하여 경사각도(α)변화에 따른 정체점에서의 열전달계수(Nu_s)를 노출과 충돌표면 사이의 거리 L/d에 따라 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 정체점에서의 Nu_s 는 L/d=6까지 점차 증가하다가 L/d=6에서 최대 열전달이 발생하였으며, L/d=6보다 커질수록 Nu_s 는 점차 감소하였고, 가장 큰 값을 갖는 Re=50000, L/d=6인 경우의 Nu_s 값은 L/d=10인 경우의 Nu_s 값 보다 약 23%크게 나타났다.

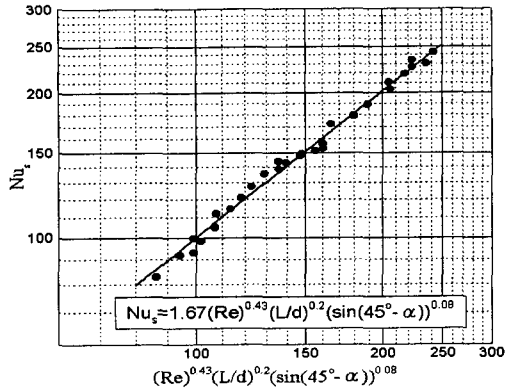


Fig. 4 Correlation of the stagnation point Nusselt number on the concave surface for $2 \leq L/d \leq 6$.

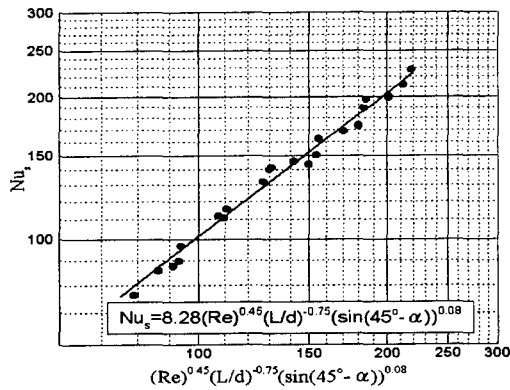


Fig. 5 Correlation of the stagnation point Nusselt number on the concave surface for $6 < L/d \leq 10$.

Fig. 3은 노즐과 충돌표면사이의 거리 L/d 변화에 따른 정체점에서의 열전달계수 (Nu_s)를 경사각도 α 에 따라 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 모든 Reynolds수에 대해서 충돌제트가 수직($\alpha=0^\circ$)인 경우의 Nu_s 가 가장 크게 나타났으나, 경사각도가 증가할수록 정체점에서의 열전달계수 값은 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, $Re=50000$ 인 경우 가장 큰 값을 갖는 $\alpha=0^\circ$ 일때의 Nu_s 는 가장 작은 값을 갖는 $\alpha=40^\circ$ 의 Nu_s 보다 약 16%크게 나타났다.

Fig. 4와 Fig. 5에서는 본 실험에서 구한 정체점에서의 열전달계수 Nu_s 를 본 연구의 실험범위인 $11000 \leq Re \leq 50000$ 및 $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ 에서 Re ,

L/d 및 α 의 향으로 상관관계를 나타내면 다음과 같다.

$$Nu_s = 1.67(Re)^{0.43} (L/d)^{0.20} (\sin(45^\circ - \alpha))^{0.08} \quad (3)$$

for $2 \leq L/d \leq 6$

$$Nu_s = 8.28(Re)^{0.45} (L/d)^{-0.75} (\sin(45^\circ - \alpha))^{0.08} \quad (4)$$

for $6 < L/d \leq 10$

식(3)과 식(4)의 산란도는 각각 5.6% 및 6.7%로 나타났다. 이와 같은 상관관계식에서 볼 수 있듯이 $2 \leq L/d \leq 6$ 인 경우에는 $Nu_s \propto Re^{0.43}$ 에 따라 변하다가, $6 < L/d \leq 10$ 인 경우에는 $Nu_s \propto Re^{0.45}$ 에 비례함을 알 수 있는데, 이는 노즐과 충돌표면사이의 거리가 증가할수록 주위 공기와의 운동량 교환이 크게 증가하여 난류강도가 커지기 때문이다.⁽¹⁵⁾

3.2 표면을 따른 열전달계수 분포

Fig. 6과 Fig. 7에서는 $Re=50000$ 과 $L/d=2$ 및 6에 대하여 표면 경사각도가 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 인 경우에 국소열전달계수(Nu)를 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 $L/d=2$ 일 때 하류($X/d > 0$)측에서의 국소열전달계수의 분포는 수직충돌제트($\alpha=0^\circ$)인 경우에 정체점에서 가장 큰 값을 갖고 감소하다가 2차 정점에서 2차 최대 Nusselt값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 2차 최대 Nusselt수는 수직충돌제트($\alpha=0^\circ$)의 경우 정체점에서의 Nusselt수와 거의 근접하게 나타났는데, 이러한 결과는 평판에서의 충돌제트실험을 수행한 Yan⁽⁹⁾의 결과와 유사한 경향으로 나타났

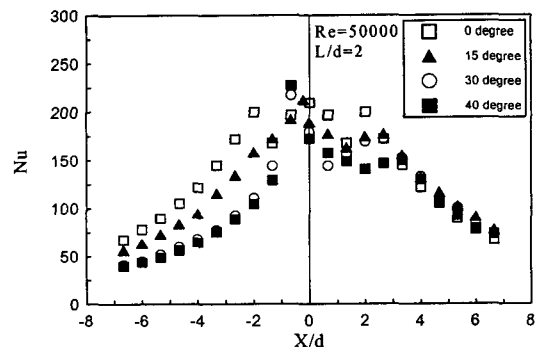


Fig. 6 Comparison to Nusselt numbers distribution along the X axis for various angles at $Re=50000$ and $L/d=2$.

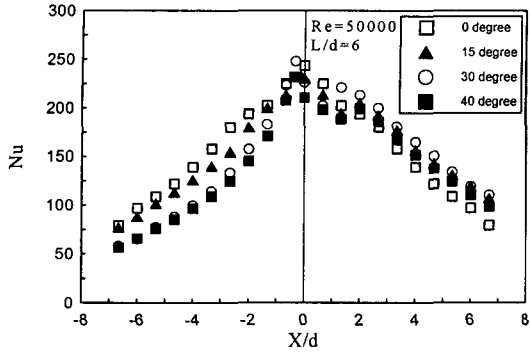
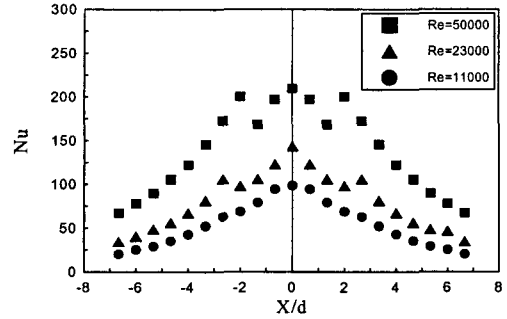
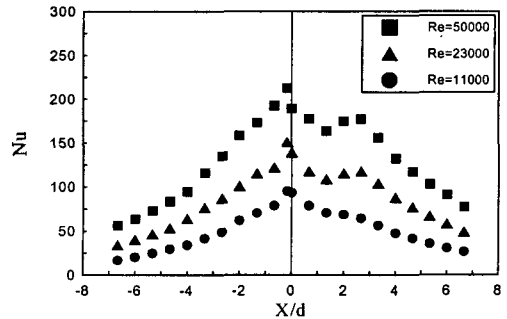


Fig. 7 Comparison to Nusselt numbers distribution along the X axis for various angles at $Re=50000$ and $L/d=6$.

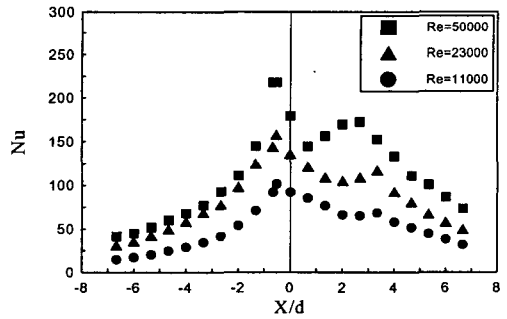
고, 2차 최대 Nusselt수는 경사각도가 감소할수록 감소하였으며, 이와 같은 현상은 $L/d=4$ 인 경우에도 같게 나타났다. 그러나, Fig. 7에서 보는 바와 같이 $Re=50000$ 과 $L/d=6$ 인 경우에는 $L/d=2$ 및 $L/d=4$ 에서와는 달리 수직충돌체트($\alpha=0^\circ$)인 경우에 2차 정점이 발생하지 않다가 경사각을 갖는 경우 2차 정점이 발생함을 알 수 있다. 이러한 현상은 노즐출구와 충돌표면사이의 거리가 가까울수록 제트와 표면과의 충돌로 인한 공기의 큰 와류형성 때문에 2차 최대 Nusselt수가 발생하지만 노즐출구와 충돌표면 사이의 거리가 멀어지면 수직충돌체트($\alpha=0^\circ$)의 경우 곡면표면을 따라 경계층이 발달하여 2차 정점이 발생하지 않는다. 그러나, 경사각을 이루는 경우에는 하류($X/d>0$)측에서는 곡률이 완만해짐에 따라 경사로 인한 곡면효과가 줄어들면서 층류경계층에서 난류경계층으로의 천이과정에서 생기는 주위 공기와의 운동량교환의 증가로 인하여 난류강도가 커지기 때문인 것으로 사료된다. 한편, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 2차 정점의 위치는 수직충돌체트($\alpha=0^\circ$)의 경우 $X/d=2.0$ 에서 발생하였으며, $\alpha=15^\circ$ 및 30° 인 경우 2차 정점은 $X/d=2.7$ 에서 발생하였고, $\alpha=40^\circ$ 인 경우 $X/d=3.3$ 에서 발생하여 경사각도가 증가할수록 2차 정점이 정체점으로부터 멀리 이동되어 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나, 상류($X/d<0$)측에서의 2차 정점은 수직충돌체트($\alpha=0^\circ$)인 경우를 제외하고는 본 실험에서 경사각도가 증가할수록 2차 최대 Nusselt수는 발생하지 않고 표면을 따라 단조감소(monotonic decrease)하게 나타났다. 또한,



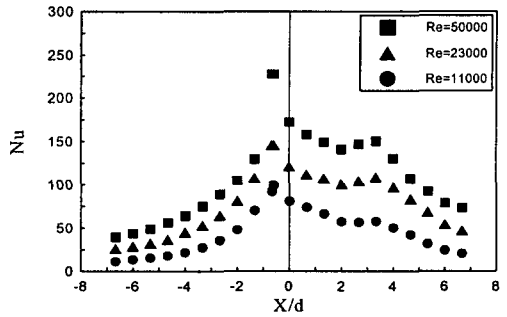
(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=15^\circ$



(c) $\alpha=30^\circ$



(d) $\alpha=40^\circ$

Fig. 8 Nusselt numbers distribution along the concave surface for $L/d=2$.

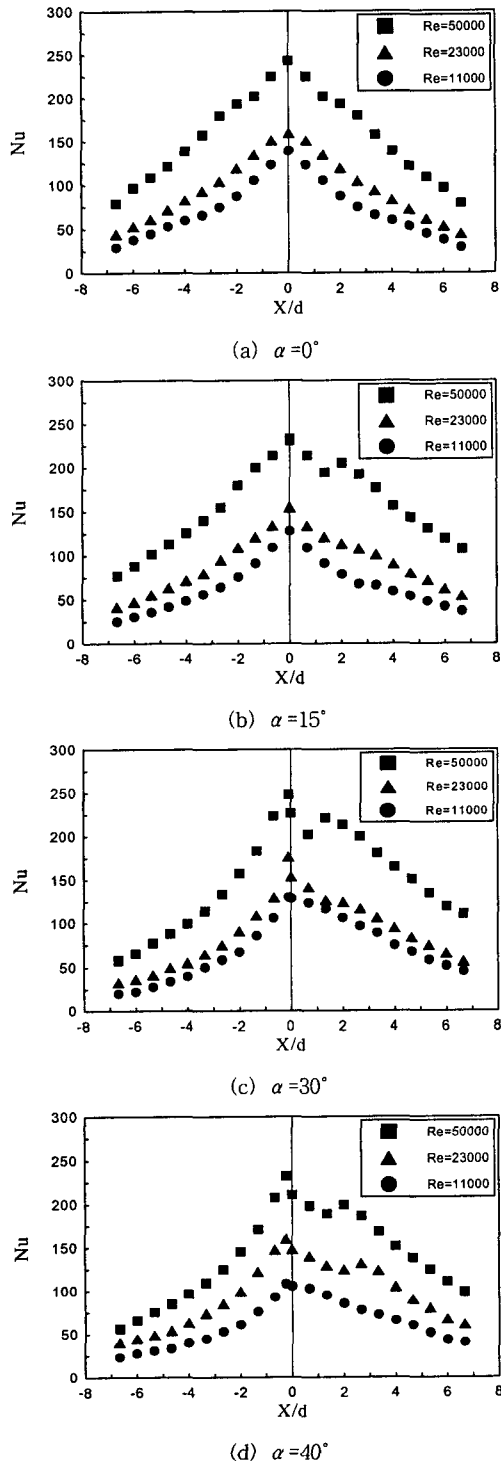


Fig. 9 Nusselt numbers distribution along the concave surface for $L/d=6$.

Fig. 6에서는 최대 열전달계수값(Nu_m)이 정체점으로부터 상류($X/d < 0$)쪽으로 이동되어 나타나고 있음을 볼 수 있다. 최대 열전달계수값(Nu_m)이 정체점으로부터 $X/d < 0$ (상류)측으로 이동되어 나타나는 이유는 제트의 유동이 벽면 충돌후 정체점으로부터 상류 및 하류로 각각 나뉘게 되며, 이때 상류측에서는 유동방향이 급격하게 바뀌므로 인하여 보다 활발한 유동혼합(flow mixing)이 발생하게 되어 높은 난류강도 값을 갖게 되기 때문이다. 최대 열전달계수 Nu_m 의 발생위치는 Fig. 6에서 보듯이 경사각도 $\alpha=0^\circ$ 일 때는 정체점에서 발생하지만, 경사각도가 $\alpha=15^\circ$ 일 때 $X/d=-0.23$, $\alpha=30^\circ$ 일 때 $X/d=-0.67$, $\alpha=40^\circ$ 일 때 $X/d=-0.7$ 로 경사각도가 증가할수록 정체점으로부터 멀리 이동되어 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 7에서도 볼 수 있으며, $L/d=4, 8$ 및 10 에서도 같은 경향으로 나타났고, 본 연구의 실험범위에서 최대 열전달계수(Nu_m)의 정체점으로부터의 최대 이동거리는 $Re=50000$ 과 $L/d=2$ 일 때 $\alpha=40^\circ$ 인 경우 노즐직경의 약 0.7배로 나타났다.

Fig. 8과 Fig. 9에서는 본 실험에서 구한 오목표면을 따른 국소열전달계수의 분포를 $Re=11000, 23000$ 및 50000 과 노즐출구와 충돌표면사이의 거리 $L/d=2$ 와 $L/d=6$ 인 경우에 경사각도에 따라 나타내었다. 그림에서 보듯이 Reynolds수가 증가할수록 또는 경사각도가 감소할수록 Nusselt 수도 증가함을 알 수 있다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 $L/d=2$ 인 경우 $Re=11000$ 일 때 경사각도 $\alpha=0^\circ$ 인 경우에 표면을 따른 열전달계수의 분포는 정체점에서 가장 큰 값을 나타내고 이후 표면을 따라 단조롭게 감소하고 있음을 볼 수 있으나, $Re=23000$ 및 $Re=50000$ 일 때는 각각 $X/d=2.7$ 및 $X/d=2.0$ 에서 2차 정점이 나타나고 있어 Reynolds수가 증가함에 따라 2차 정점이 정체점 가까이에서 나타나고 있음을 볼 수 있으며, 이와 같은 현상은 $L/d=6$ 일 때를 나타낸 Fig. 9에서도 같게 나타났다. 또한, Fig. 8 및 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 최대 열전달계수 Nu_m 이 나타나는 위치는 Reynolds수가 증가할수록 정체점으로부터 멀리 이동되는 것을 알 수 있다. Reynolds수 $Re=11000, 23000$ 및 50000 과 노즐과 충돌표면사이의 거리 $L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10 과 충돌표면의 경사각도 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 인 본 연구의 실험범위에 있어서 2차 정점이 나타나는 분기점

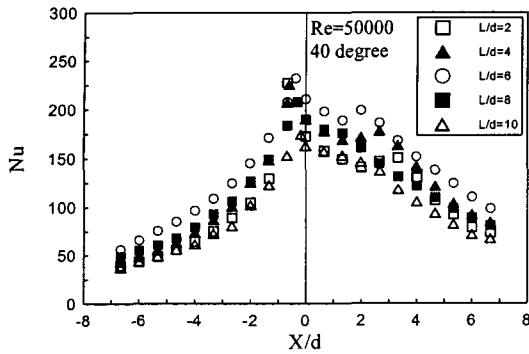


Fig. 10 Comparison of Nusselt numbers distribution along the X axis for $\alpha=40^\circ$, $Re=50000$ and various L/d .

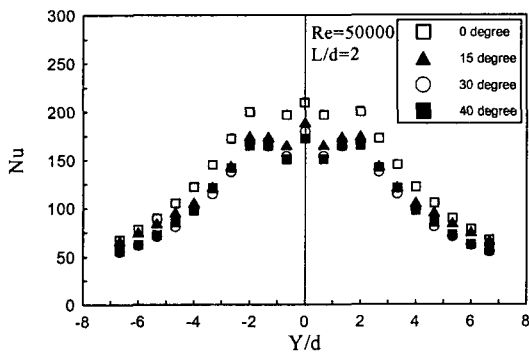


Fig. 11 Comparison to Nusselt numbers distribution along the Y axis for various angles at $Re=50000$ and $L/d=2$.

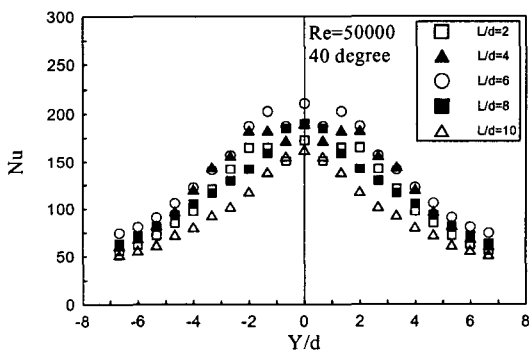


Fig. 12 Comparison to Nusselt numbers distribution along the Y axis for various L/d at $Re=50000$ and $\alpha=40^\circ$.

(threshold)은 $Re \geq 23000$, $L/d \leq 4$ 및 $\alpha \geq 0^\circ$ 로 나타났다.

Fig. 10은 $Re=50000$ 일 때 경사각도 $\alpha=40^\circ$ 인 경우에 대하여 노즐과 충돌면 사이의 거리 변화에 따른 국소열전달계수 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 L/d 가 증가할수록 2차 정점이 정체점 가까이에서 나타나고 있음을 볼 수 있으며, 또한 최대 열전달계수 (Nu_m)이 발생하는 위치는 L/d 가 작을수록 정체점에서 멀리 이동되어 나타남을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 $Re=50000$ 일 때 Y축 표면을 따른 국소열전달계수의 분포를 나타낸 것인데, Fig. 11의 $L/d=2$ 인 경우 Y축 표면을 따른 분포에서는 경사각도가 증가함에 따라 2차 정점이 정체점 가까이에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 12에서 알 수 있듯이 경사각도 $\alpha=40^\circ$ 에 대해서 $L/d=2$ 와 $L/d=4$ 인 경우에는 $Y/d=2.0$ 에서 2차 정점이 발생하고 있으나, $L/d=6$ 인 경우에는 $Y/d=1.3$ 에서 발생하였으며, $L/d \geq 8$ 인 경우에는 2차 정점이 나타나지 않고 단조감소(monotonic decrease)하게 나타났으며, 따라서 경사각도가 일정할 경우 노즐출구와 충돌표면 사이의 거리가 증가할수록 2차 정점이 정체점 가까이에서 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 액정과도현상기법(liquid crystal transient method)을 사용하여 곡률을 갖는 오목표면에 분사 되는 난류 경사원형제트에 대한 국소열전달계수를 $Re=11000$, 23000 및 50000 인 경우의 세가지 Reynolds수와 $L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10의 5가지 노즐과 충돌표면 사이의 거리 및 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 의 4가지 경사각도에 따라 실험하여 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 실험에서 Reynolds수, L/d , α 와 Nu_s 와 의 상관관계를 도출한 결과, Nu_s 가 $2 \leq L/d \leq 6$ 인 경우 $Nu_s \propto Re^{0.43}$ 에 따라 변하다가 $6 < L/d \leq 10$ 인 경우 $Nu_s \propto Re^{0.45}$ 에 비례함을 알 수 있었으며, 정체점에서의 Nusselt수 Nu_s 는 Reynolds수가 일정할 때 경사각도가 증가함에 따라 감소하였다.

(2) 오목표면의 경사충돌제트에 의한 2차 정점은 경사각도가 증가할수록 정체점으로부터 멀리 나타났고, Reynolds수와 노즐과 충돌표면 사이의 거리가 증가할수록 정체점 가까이에서 나타났으

며, 본 실험의 범위에서 2차 정점이 나타나는 분기점(threshold)은 $L/d \leq 4$, $Re \geq 23000$, $\alpha \geq 0^\circ$ 로 나타났다.

(3) 최대 열전달계수의 발생위치는 경사각이 증가할수록 또한 노즐과 충돌표면 사이의 거리가 감소할수록 정체점에서 멀리 이동하며, 본 실험에서 $L/d=2$ 와 $\alpha=40^\circ$ 인 경우 최대이동거리는 노즐직경의 약 0.7배 정도인 것으로 나타났다.

(4) 최대 열전달계수, Nu_m 값은 정체점에서의 열전달계수, Nu_s 보다 경사각도가 증가할수록 크게 증가하여 나타났으며, 본 연구의 실험에서 $Re=50000$ 일 때 $L/d=2$, $\alpha=40^\circ$ 인 경우 Nu_m 이 Nu_s 보다 약 31.8% 증가하여 나타났다.

(5) Y축 표면에서 2차 정점의 발생은 노즐과 충돌표면 사이의 거리와 경사각도가 증가할수록 정체점 가까이에서 나타났다.

후 기

본 연구는 1996년도 대전산업대학교 교내 학술 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- Gardon, R. and Cobonpue, J., 1962, Heat transfer between a flat plate and jets of air impinging on it, International Development in Heat Transfer, ASME, pp. 454-460.
- Gardon, R. and Akfirat, J.C., 1965, The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 8, pp. 1261-1272.
- Hrycak, P., Lee, D.T., Gauntner, J.W. and Livingood, J.N.B., 1970, Experimental flow characteristics of a single turbulent jet impinging on a flat plate, NASA TND-5690.
- Martin, H., 1977, Heat and mass transfer between impinging gas jet and solid surfaces, Advances in Heat Transfer, Vol. 13, pp. 1-60.
- 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.
- Lamont, P.L. and Hunt, B.L., 1980, The impingement of under-expanded, axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 100, Part 3, pp. 471-511.
- Rubel, A., 1981, Computations of the oblique impingement of round jets upon a plane wall, AIAA Journal, Vol. 19, pp. 863-871.
- 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.
- 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, U.S.A.
- Lim, K.B. and Lee, D.H., 1997, Concave surface curvature effect on heat transfer from a turbulent round impinging jet, KSME International Journal, Vol. 21(B), No. 5, pp. 691-699.
- 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.
- 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., Ed., ASME HTD -Vol. 164, pp. 77-83.
- 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.

14. Kline, S.J. and McClintock, F.A., 1953, Describing uncertainties in single sample experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 3-8.
15. 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 International Journal*, Vol. 21(B), No. 4, pp. 579-588.