

< 논문 >

과도액정 기법을 이용한 오목표면 경사각도에 따른 난류 충돌 제트의 열전달 특성에 관한 연구

임경빈[†] · 이창희* · 이상훈**

(2006년 2월 21일 접수, 2006년 5월 10일 심사완료)

A Study on the Heat Transfer Characteristics of Turbulent Round Jet Impingement on the Inclined Concave Surface Using Transient Liquid Crystal Method

Kyoungbin Lim, Changhee Lee and Sanghoon Lee

Key Words : Transient Liquid Crystal Method(과도액정법), Impingement Jet(충돌제트), Nusselt Number of Stagnation Point(Nu_s : 정체점 열전달), Concave Surface(오목 표면)

Abstract

The effects of concave hemispherical surface with inclined angle on the local heat transfer from a turbulent round jet impinging were experimentally investigated using transient liquid crystal method. This method suddenly exposes a preheated wall to an impinging jet and then the video system records the response of liquid crystals for the measurement of the surface temperature. The Reynolds numbers were used 11000, 23000 and 50000, nozzle-to-surface distance ratio from 2 to 10 and the surface angles $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and 40° . Correlations of the stagnation point Nusselt number according to Reynolds number, jet-to-surface distance ratio and dimensionless surface angle are investigated. In the stagnation point, in term of Re^n , n ranges from 0.43 in case of $2 \leq L/d \leq 6$ to 0.45 in case of $6 < L/d \leq 10$. The maximum Nusselt number occurs 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. The maximum displacement is about 0.7 times of the jet nozzle diameter.

기호설명

- C_p : 플렉시글라스 비열[J/kg. K]
- D : 플렉시글라스 직경[m]
- d : 충돌제트 직경[m]
- h : 국부적인 대류 열전달 계수[W/m². K]
- k : 플렉시글라스 열전도도[W/m. K]
- L : 충돌 제트와 충돌면사이 거리[m]
- R : 오목 표면의 반경
- t : 시간[sec]
- T : 온도[°C]

- T^* : 무차원 표면 온도
- Nu : 국부적인 Nusselt number(Nu_s)
- Re : 충돌제트의 Reynolds number
- X_i : 불확실도 변수

그리스 문자

- ρ : 플렉시글라스 밀도[kg/m³]
- ϵ : 액정표면의 방사율

하첨자

- lc : 액정
- o : 초기
- s : 정체점
- w : 표면(Plexiglas)
- ∞ : 주변 공기(ambient)
- m : 최대

[†] 책임저자, 회원, 한밭대학교 기계공학과
 E-mail : kblim024@hanbat.ac.kr
 TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550

* 회원, 한양대학교 기계공학과
 ** 한밭대학교 대학원 기계공학과

1. 서론

표면에 충돌되는 단일제트 또는 이러한 제트들의 배열은 가열과 냉각 및 건조에 대하여 향상된 열전달 계수들을 얻기 위하여 이용되며, 충돌제트(impinging jet)는 열유체 기기의 열전달 효율을 증대시키기 위하여 가장 많이 사용되는 방법으로서 산업공정의 가열과 냉각에 많이 이용되고 있다. 또한, 강판의 냉각, 유리의 템퍼링(tempering), 종이와 직물 및 박막의 건조, 가스 터빈과 연소기 구성부품 및 고밀도 전자장비의 냉각 등 많은 부분에서 광범위하게 응용되고 있다.

충돌제트의 유체 및 열전달 특성은 제트의 속도, 난류강도, 제트 분사 표면의 형태, 제트노즐의 형상 및 열 경계조건 등을 포함한 많은 인자들의 영향을 받고 있기 때문에 이들 인자에 대한 충돌제트의 연구는 많은 공학자들의 연구 대상이 되어 왔다. 충돌제트 열전달에 대한 연구는 주로 제트 분사표면의 형태에 따라 평판 표면과 오목 표면 및 볼록 표면등에 대하여 실험적으로 많은 연구가 이루어져 왔다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나, 충돌제트는 2 차원적인 열전달 현상 뿐만 아니라 3 차원적인 열전달 특성을 보이기도 하므로 그 여러 가지 특성을 파악하기란 무척이나 난해한 과제이다. 많은 산업 열유체 기기들의 냉각문제에서 곡면(curved surface)에서의 충돌제트 문제는 흔히 볼 수 있으며, 또한 표면형상 혹은 노즐위치의 제약으로 인하여 많은 응용에 있어서 충돌제트가 표면에 수직인 형상보다는 경사되어 있는 경우를 흔히 볼 수 있으나 이들에 관한 연구는 몇몇 연구에 불과한 실정이다.

Goldstein 등⁽⁵⁾은 평행표면에 분사되는 경사충돌제트에 대한 열전달 실험을 수행하여 Re 수가 10000 ~ 35000 사이에서 $L/d=4, 6, 10$, 경사각도 30~90°인 경우에 대한 유동장의 국소 열전달 계수를 측정하였으며, 국소 열전달 계수의 상관관계식을 제시하였다. Lamomt 등⁽⁶⁾과 Rubel 등⁽⁷⁾은 경사충돌제트에 관한 연구에서 정체점 또는 최대 열전달은 제트출구방향과 충돌표면의 교차점에서 이동되어 발생하는 것을 관찰하였다. Gau 와 Chung 등⁽⁸⁾은 슬롯 제트(slot jet)를 이용하여 원통형 볼록 표면과 오목표면에서 표면곡률효과에 따른 열전달에 미치는 영향을 실험을 통하여 수행하였으며, 곡면 표면에 따른 국소 열전달 계수와 평균 열전달 계수와의 상관관계식을 제시하였고 또한, 2 차원 슬롯 제트가 분사되는 원통형의 오목면과 볼록면에서의 열전달 연구에서 볼록면의 정체점에서 일련의 3 차원 와류에 의한 운동량 전달의 증가에 의해 열전달이 촉진되며, 벽면제트 영역에서의 유동은 구심력에 의해 안정되므로 열전달률이 감소함을 규명하였다. Yan⁽⁹⁾은 평면에 충돌하는 완전 발달된 원형제트에 의한 열전달 계수를 액정(liquid crystal)을 이용하여 측정하였다.

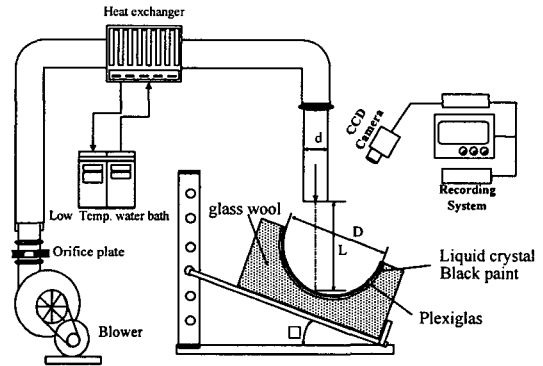


Fig. 1 Schematic diagram of impinging jet for transient liquid crystal method

본 연구에서는 과도액정법을 사용하여 오목 표면에 분사되는 경사충돌제트에 대한 열전달 특성을 규명하였으며, 오목 반구 표면(hemispherical concave surface)에 난류 원형제트를 분사시켜 $Re=11000 \sim 50000$ 에 대한 열전달 특성을 규명하였다. 국소 열전달 계수를 측정하기 위하여 충돌각과 노즐 출구와 충돌 표면 사이 거리에 따른 특성 및 열전달 상관 관계를 파악하여 경사진 오목 표면의 충돌제트에 대한 난류 열전달 특성을 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1은 난류 충돌 제트를 이용하여 오목한 반구의 열전달 특성을 측정하기 위한 장치를 나타낸 개략도이다. 실험장치는 크게 3부분으로 구성되어 있다.

원심송풍기 부분과 완전히 발달한 흐름을 위한 긴 관과 충돌면으로 구성되어 있다. 일정한 유량을 조절하기 위하여 송풍기 출구 부분에 마노메타를 이용하여 속도를 측정하였으며, 제트 온도를 일정하게 유지하기 위하여 열교환기를 설치하여 실험 모형의 주위 공기와 온도 차를 일정하게 유지하였다. 실험모형의 직경과 두께는 300mm와 4.7mm로 구성되어 있으며, 반구의 플렉시글라스 돔(plaxiglas dome)과 반구 밑면에는 글라스울(glass wool)과 스티로폼(styrofoam) 절연체를 사용하여 열손실을 방지하였다. 또한 충돌 표면의 경사각을 조절하기 위하여 각도 조절장치를 설치하였다. 실험모형의 충돌면인 오목표면에는 온도에 따른 색깔의 변화를 기록할 수 있게 하기 위하여 액정(R35C1W: black paint liquid crystal)의 두께를 0.03~0.05mm로 얇은 표면 막을 형성시켰다. 측정되는 모든 실험 데이터와 가시화 결과는 CCD 카메라(PULNIX TMC-7)와 화상 기록장치를 이용하여 측정 표면의 시간과 위치에 따른 액정의 색의 변화

를 기록하였다.

2.2 실험 방법

본 실험에서는 Yan 등⁽¹¹⁾과 Baughn 등⁽¹²⁾에 의하여 사용된 측정기법으로서 과도액정법을 사용하였다. 액정은 색깔의 반복성이 뛰어나며 색깔의 반응이 비디오 시스템에 쉽게 기록될 수 있어 열전대나 다른 온도 측정 장치에 비하여 온도변화를 연속적으로 알 수 있으며, 온도장 전체를 한번에 가시화할 수 있기 때문에 곡률진 덕트나 가스터빈 기의 냉각등의 형상과 같이 매우 복잡한 경우에서의 열전달 현상을 규명하는데 유용하게 이용될 수 있는 장점이 있다. 실험에 사용된 실험모형의 오목 표면에 관하여 유동방향의 열전도손실을 무시하면[Vedula 등,⁽¹³⁾ Yan 등⁽¹¹⁾] 대류 열전달 계수의 경계 조건을 갖는 반 무한(semi-infinite) 고체에서의 과도 열전도 방정식의 측정표면의 온도분포는 다음과 같이 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

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

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

여기서, T_w 는 시간에 따른 측정 표면의 온도, T_{wo} 는 측정 표면의 초기 온도, T_∞ 는 제트의 온도이다. 항온조(incubator)에서 실험 모형을 가열 한 후 측정 표면의 열전대를 붙여 일정 온도로 유지되고 있음을 확인한 후, 단열재로 만들어진 덮개를 이용하여 항온조에서 꺼낸 후 측정표면에 충돌제들 분사시켜 액정으로 입혀진 측정 표면이 냉각되면서 표면에 나타나는 등온선의 얇은 천이층이 나타나는데 측정위치에 따라 R-G 천이층을 나타내는 온도에 도달할 때까지의 시간 t 에 따라 측정하면 식 (1)과 (2)를 이용하여 국소 열전달 계수를 구할 수 있다. 측정표면에서 R-G 천이층이 나타나는 온도를 보정(calibration)하기 위하여 알루미늄시편에 액정을 입혀 온도구배를 만들어 R-G 천이층이 나타나는 액정의 온도를 열전대를 이용하여 수회에 걸쳐 측정하여 보정하였으며, 그 결과 본 실험에서 사용되었던 액정의 R-G 천이층의 온도는 $34.9^\circ\text{C} \pm 0.25^\circ\text{C}$ 이었다. 이때 온도측정을 위하여 사용된 열전대들은 직경이 약 0.08mm 인 K형 열전대로 Rosemount 사의 항온조와 표준 백금 온도계(PRT, platinum resistance thermometer)를 사용하여 온도 보정식을 만들어 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 까지의 정확성을 갖도록 온도를 보정하였다. 오목 표면의 일정온도를 일정하게 유지하기 위하여 표면에 6개의 보정된 온도계를 이용하여 48.5°C 를 유지하였으며, 오목

Table 1 Uncertainty analysis

Parameter X_i	Typical Value	δX_i	$\left(\frac{\delta X_i}{Nu} \frac{\partial Nu}{\partial X_i} \right) \times 100\%$	
			X/d=0	4
d	0.030(m)	0.0002	0.7	0.7
t	9.58;44.52(s)	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_{lc}	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
$\frac{\delta Nu}{Nu} =$			8.8	9.8(%)

표면에 단열재를 이용하여 온도변화를 최소화하였다. 충돌제트에 충돌하는 순간 양쪽으로 튀어나갈 수 있도록 설계하였다. 실험에서의 불확실성을 해석하기 위하여 Kline 과 Mcklintock⁽¹⁴⁾가 제시한 방법을 사용하여 $Re=23000$, $L/d=6$ 과 $\alpha=30^\circ$ 인 경우에 해석한 결과 Nusselt 수의 전체 불확실성(total uncertainty)은 약 9.8%이었으며, Plexiglas 물성치 값의 불확실성이 가장 크게 나타났고, R-G 천이층의 온도 측정의 불확실성은 다음으로 큰 불확실도 요인으로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Re 수에 따른 정체점에서의 열전달 특성

충돌제트의 정체점에서의 대류열전달 계수는 상대적 큰 열전달 계수를 이용함으로 냉각 및 가열하는 문제에서 정체점의 국소열전달 계수 측정은 중요한 문제라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 과도액정법을 이용하여 $D/d=10$ 의 곡률을 갖는 오목 표면에 분사된 원형 제트에 대한 국소 열전달 계수를 레이놀즈 수 및 경사각(0, 15, 30, 40)과 노즐과 충돌 표면 사이의 거리($L/d=2, 4, 6, 8, 10$)에 대한 정체점(stagnation point)에서의 열전달 계수를 측정하였다.

레이놀즈 수가 11000 ~ 50000 일 때, 노즐과 충돌 표면의 거리 및 경사각도 변화에 따른 정체점에서의 열전달 계수 특성 결과를 Fig. 2 와 Fig. 3 에 나타내었다. Fig. 2의 결과를 통하여, 충돌 제트와 충돌 면사이의 경사각이 증가함에 따라 정체점 내에서 열전달 계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 평판과 달리 오목한 표면을 갖는 반구 형태의 경우 포텐셜 코어 주변에서 유입되는 즉 운동량 교환이 활발이 이루어지지 않았기 때문이다.

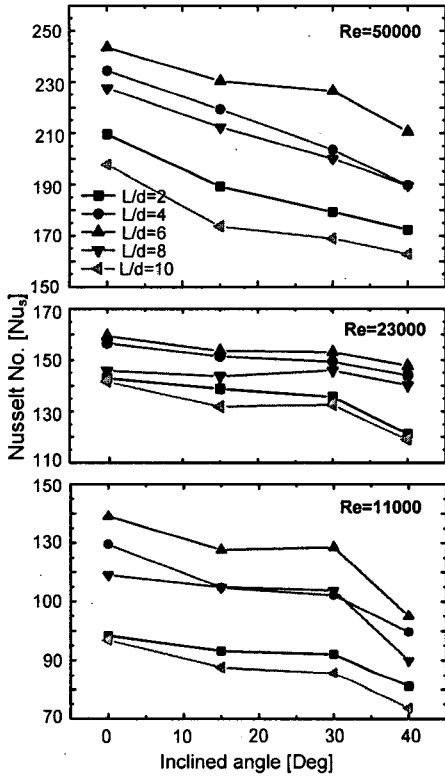


Fig. 2 Effect of L/d ratio on the stagnation point Nusselt number for inclined angle and Re=11000, 23000 and 50000

Fig. 3 은 노즐과 충돌 표면 사이의 거리에 따른 정체점내에서의 열전달 계수의 변화를 충돌 표면 경사각의 영향을 나타낸 결과이다. Fig. 2 에서 언급했듯이 경사각도가 증가함에 따라 정체점내에서의 열전달 계수 값이 선형적으로 감소하는 경향을 보인 반면, L/d=6 이외의 노즐과 충돌 표면 사이의 거리에서는 2 차원적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 경사각도의 증가로 인하여 충돌 제트와 충돌 표면과의 유입되는 운동량 교환이 급격한 감소로 인하여 열전달 특성이 감소한 것으로 사료된다. 노즐에서 분사된 충돌제트의 포텐셜 코어로 유입되는 운동량이 충돌 표면의 경사 각도 및 충돌 표면과의 거리에 따라 유입되는 운동량의 감소로 인하여 정체점내에서의 열전달 계수가 작아지는 특성을 보인 결과라고 생각된다. 레이놀즈 수 Re=11000, Re=23000, Re=50000 에 대하여 국소 열전달이 가장 작은 충돌거리(L/d=10)와 가장 큰 충돌거리(L/d=6)의 국소 열전달 비율은 1.8%, 5.5%, 10.5%로서 레이놀즈 수가 증가할수록 증가율이 커지는 것을 알 수 있었다.

이러한 결과를 토대로 싱글 충돌 제트에 대한 열전달 특성을 최대로 하기 위해서는 충돌 제트와 충돌 표면과의 거리 즉 제트의 포텐셜 코어의 길

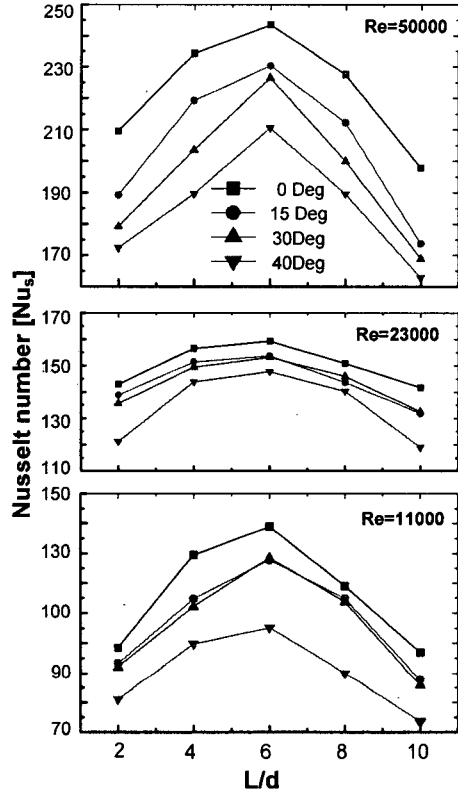


Fig. 3 Effect of inclined angle on the stagnation point Nusselt number for L/d and Re=11000, 23000 and 50000

이를 고려한 위치인 L/d=6 인 지점을 고려한다면 최대 열전달 계수를 얻을 수 있을 것으로 판단된다

3.2 열전달 계수 상관관계식

Fig. 4 와 Fig. 5 는 정체점에서의 열전달 계수에 대한 레이놀즈 수, 충돌 제트와 충돌 면과의 거리 및 충돌 면의 경사각에 대한 실험적인 다음과 같은 상관관계식을 얻었다.

$2 \leq L/d \leq 6, 11000 \leq Re \leq 50000, 0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ 인 경우,

$$Nu_s = 1.70(Re)^{0.43} (L/d)^{0.20} (\sin(45^\circ - \alpha))^{0.08} \quad (3)$$

로서 산란도 5.6%를 가지며,

$6 \leq L/d \leq 10, 11000 \leq Re \leq 50000, 0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ 인 경우,

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

로서 6.7%의 산란도를 가진다. 식 (3)과 식 (4)의 상관관계식에서 볼 수 있듯이 $2 \leq L/d \leq 6$ 인 경우로서 $Nu_s \propto (Re)^{0.43}$ 에 따라 변하다가 $6 \leq L/d \leq 10$ 의 영역에서는 $Nu_s \propto (Re)^{0.45}$ 에 비례함을 알 수 있었다. 이것은 $Nu_s \propto (Re)^{0.5}$ 의 층류 경계층 범위에 속

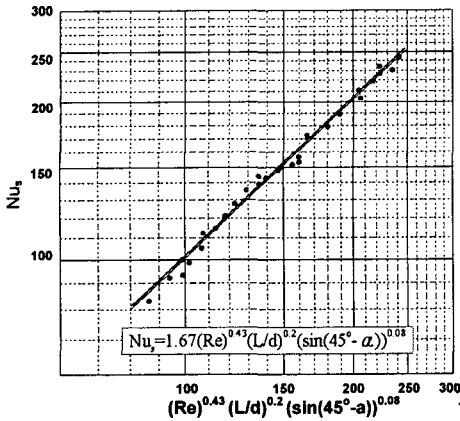


Fig. 4 Correlation of the stagnation point Nusselt numbers(Nu_s) on the concave surface for $2 \leq L/d \leq 6$, $11000 \leq Re \leq 50000$ and $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$

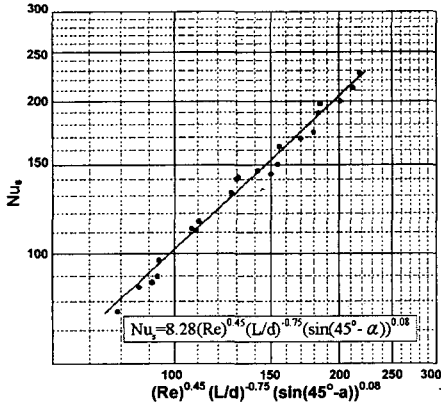


Fig. 5 Correlation of the stagnation point Nusselt numbers(Nu_s) on the concave surface for $6 \leq L/d \leq 10$, $11000 \leq Re \leq 50000$ and $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$

하는 것으로서 오목표면의 경사각도에 의해서 충돌 제트의 영역이 여전히 층류 경계층을 형성하는 것으로 생각된다.

본 연구 결과를 통하여 충돌제트에 의한 열전달에서 경사각도가 미치는 영향은 표면곡면에 미치는 영향에 비해 크지 않음을 알 수 있다.

3.3 L/d와 레이놀즈 수에 따른 열전달 특성

충돌 표면과의 경사각이 15° 일 때, 충돌 제트와 충돌표면 간의 거리 변화 및 레이놀즈 수 변화에 따른 열전달 특성 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Nu 수는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 증가하고 2차 정체점이 뚜렷이 나타나지만[Fig. 6(a)], L/d 가 증가하면 2차 정체점은 나타나지 않고 Nu 수는 X/d 가 증가함에 따라 감소하였다.

2차 정체점(second stagnation point)이 발생하는 지점이 중심에서 후면으로 진행되는 특성을 보였다. 일반적으로 평판의 충돌 제트의 경우, $L/d=2$ 일

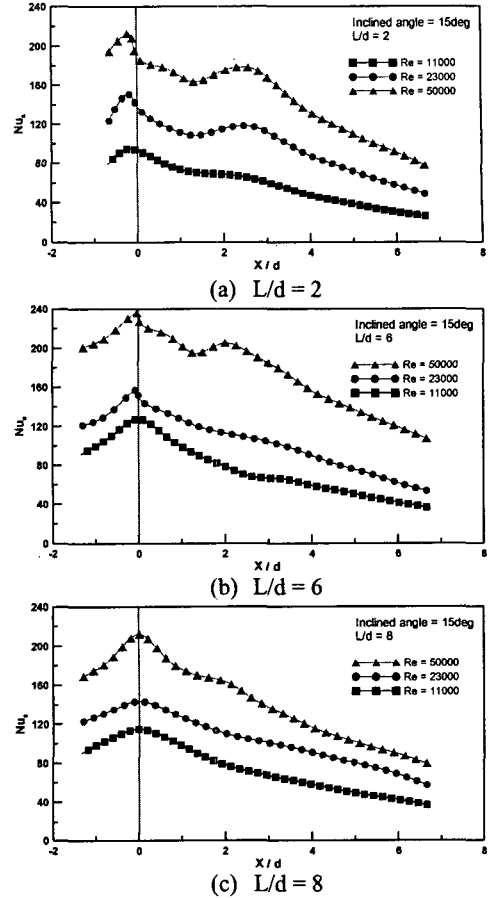


Fig. 6 Comparison of Nusselt number distribution along the X direction according to the variation of L/d and Re number at inclined angle $\alpha=15^\circ$

때 레이놀즈 수 증가에 관계없이 직경의 약 2d 지점에서 2차 정체점이 발생한다고 알려져 있다. 그러나 오목한 반구 형태의 경우, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 2차 정체점이 후면으로 이동하는 특성을 나타낸다. 또한, L/d 가 증가함에 따라 2차 정체점이 사라지고 단조로운 감소 형태를 보이는 특성을 보이고 있다.

3.4 L/d와 경사각도에 따른 X/d 방향의 열전달 특성

Fig. 7은 $Re=50000$ 일 때 $L/d=2, 6$ 및 8 에 대하여 표면 경사각도가 Nu 수에 미치는 영향을 보여주고 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 Fig. 7(a)의 $L/d=2$ 일 때 상류($X/d < 0$)측에서의 국소열전달계수의 분포는 수직충돌제트($\alpha=0^\circ$)인 경우에 정체점에서 가장 큰 값을 갖고 감소하다가 층류 경계층에서 난류 경계층으로의 천이과정에서 생기는 2차 정체점이 $X/d=2.0$ 지점에서 2차 최대 Nu 값을 나타내고 있음을 볼 수 있는데, 2차 최대점의 Nu 수가 정체점의 값에 거의

근접한다고 보고한 Yan 의 결과와 비교하여 볼 때 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 경사각이 증가함에 따라 2 차 정체점 최대 Nu 수에 대한 X/d 의 위치는 후면으로 이동하는 특성을 나타내며, 2 차 최대 Nusselt 는 발생하지 않고 표면을 따라 Nusselt 수는 단조롭게 감소하였다. Fig. 7(b) ~ (c)의 결과에서 볼 수 있듯이 하류측에서 2 차 정체점이 L/d=4 와 $\alpha=15^\circ$, 30° 및 40° 인 경우 X/d=2.67 에서 발생하지만, L/d=6 일 때 X/d=2.0 에서 발생하는 것으로 보아 충돌표면과 노즐 출구사이의 거리가 증가할수록 2 차 정체점 정체점 가까이에서 발생함을 알 수 있다.

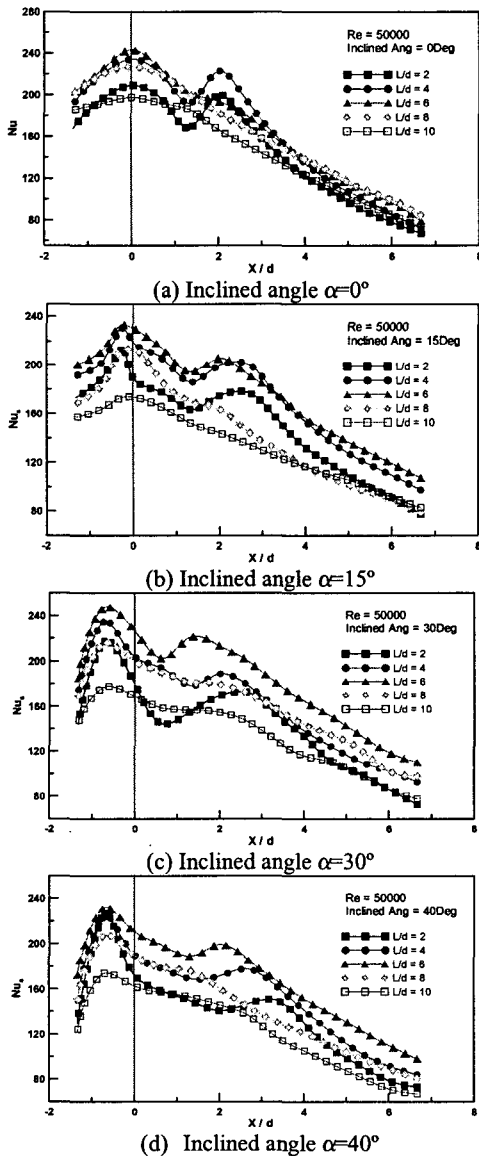


Fig. 7 Effect of the inclined angle and L/d on the local Nusselt number at Re = 23000

Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 경사각도 $\alpha=0^\circ$ 인 경우 Re=50000 일 때 표면을 따른 열전달계수의 분포는 정체점에서 가장 큰 값을 나타내고 이후 표면을 따라 단조롭게 감소하고 있음을 볼 수 있다.

레이놀즈 수가 50000 일때의 최대 Nu_m 의 발생 위치는 경사각 $\alpha=0^\circ$ 일 때는 정체점에서 발생하지만, 경사각도가 $\alpha=15^\circ$ 일 때 X/d=-0.23, $\alpha=30^\circ$ 일 때 X/d=-0.67 로 경사각도가 증가할수록 정체점에서 멀리 이동되어 나타남을 알 수 있다. 본 연구의 실험범위에서 이와 같은 현상은 L/d=2, 6 및 10 에서도 같게 나타났고, 최대 이동거리는 노즐직경의 약 0.7 배로 나타났다. 이러한 결과는 경사평판 $\alpha=20^\circ$ 에 대하여 최대 벽면압력계수의 위치가 약 0.7d 만큼 상류쪽으로 이동됨을 연구한 Yoon 등⁽¹⁶⁾ 의 결과와 비교해 볼 때, 오목 표면에서의 이동거리는 경사각도가 증가함에 따라 정체점으로부터 최대 이동거리가 커짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 과도액정법을 사용하여 곡률을

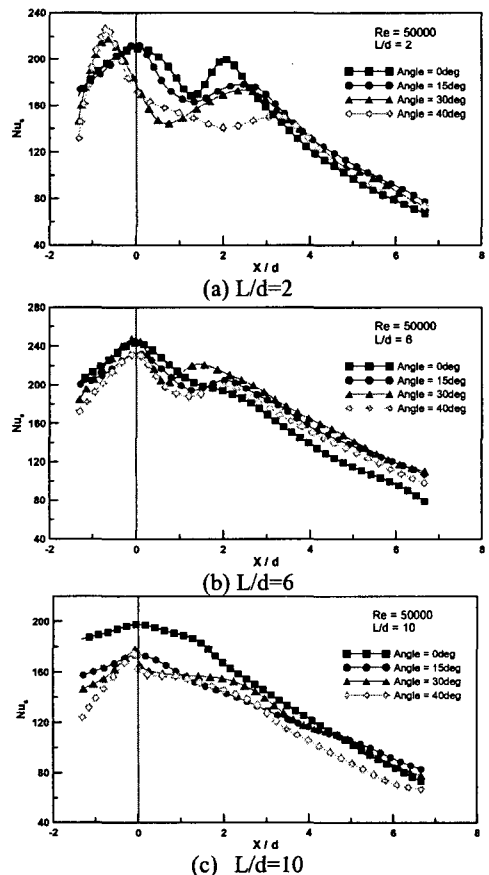


Fig. 8 Effect of the inclined angle and L/d on the local Nusselt number at Re = 50000

갖는 오목표면에 분사 되는 난류 경사원형제트에 대한 국소열전달계수를 $Re=11000, 23000, 50000$ 인 경우에 5 가지의 충돌제트와 분사표면사이의 거리 (L/d)와 4 가지의 경사각도 α 에 따라 실험하여 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2 차 정체점은 하류방향에서는 L/d 가 감소할수록 또는 경사각이 증가할수록 정체점으로부터 하류방향으로 멀리 이동하여 발생함을 알 수 있었다.

(2) 정체점에서의 Nu 는 Reynolds 수가 일정할 때 경사각도가 증가함에 따라 감소하며, 모든 경사각도에 대하여 $L/d=6$ 인 경우에 가장 큰 것으로 나타났다.

(3) 본 실험에서 Reynolds 수, L/d , α 와 Nus 와의 상관관계를 도출한 결과, Nus 가 $2 \leq L/d \leq 6$ 인 경우 $Nus \propto Re^{0.43}$ 에 따라 변하다가 $6 < L/d \leq 10$ 인 경우 $Nus \propto Re^{0.45}$ 에 비례함을 알 수 있었는데, 제트유동이 L/d 값이 커질수록 Reynolds 수보다는 경사각도에 대한 의존성이 커 여전히 층류경계층 유동의 결과인 $Nus \propto Re^{0.5}$ 을 유지하는 것으로 나타났다.

(4) 정체점에서의 국소 열전달계수(Nus) 및 최대 열전달 계수(Num)와 레이놀즈 수, 제트와 충돌표면 사이의 거리(L/d) 및 경사각에 대한 관계식을 얻었으며, 냉각, 유리의 텀퍼링, 박막의 건조 및 전자장비의 냉각의 제조등에 있어서 적용가능 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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 TN D-5690.
- (4) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jet and Solid Surfaces," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1-60.
- (5) 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.
- (6) Lamont, P.L. and Hunt, B.L., 1980, "The Impingement of Under expanded, Axi-symmetric Jets on Perpendicular and Inclined Flat Plates," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 100, Part 3, pp. 471-511.
- (7) Rubel, A., 1981, "Computations of the Oblique Impingement of Round Jets upon a Plane Wall," *AIAA Journal*, Vol. 19, pp. 863-871.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Lim, K.B., 1995, "Measurement of the Heat Transfer Coefficient on a Concave Surface with a Turbulent Round Impinging Jet," *The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea* Vol. , No. 1, pp. 112-119.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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 Mcklintock, F.A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 3-8.
- (15) Lim, K.B. and Lee, D.H., 1997, "Concave Surface Curvature Effect on Heat Transfer from a Turbulent Round Impinging Jet," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 21, No. 5, pp. 691-699.
- (16) 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.
- (17) 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," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 21, No. 4, pp. 579-588.