

오목한 표면위에 분사되는 경사충돌제트에 대한 국소열전달계수의 측정

Local heat transfer measurement from a concave surface to an oblique impinging jet

임 경 빈*, 김 학 주**
K. B. Lim, H. J. Kim

Key words : Oblique impinging jet(경사충돌제트), Liquid crystal(액정), Nusselt number(누셀수),
Concave surface(오목표면)

Abstract

Measurements of the local heat transfer coefficients on a hemispherically concave surface with a round oblique impinging jet were made. The liquid crystal transient method was used for these measurements.

This method, which is a variation of 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 23,000 and the nozzle-to-jet distance was $L/d=2, 4, 6, 8$ and 10 and the jet angle was $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and 40° .

In the experiment, the maximum Nusselt number at all region occurred at $L/d \cong 6$ and Nusselt number decreases as the inclined jet angle increases.

For the normal jet the contours of constant Nusselt number are circular and as the jet is inclined closer and closer to the surface the contours become elliptical shape.

The decreasing rate of the Nusselt number at $X/d > 0$ (upstream) on a surface curvature are higher than those on a flat plate and the decreasing rate of the Nusselt number at $X/d < 0$ (downstream) on a surface curvature are lower than those on a flat plate. And also, the decreasing rate of local Nusselt number distribution at $X/d > 0$ (upstream) exhibit lower than with $X/d < 0$ (downstream) as jet angle increases.

The second maximum Nusselt number occurred at long distance from stagnation point as jet angle increases.

* 정회원, 대전산업대학교 기계설계공학과

** 한국자원연구소 석유해저연구부

기 호 설 명

Cp : 플렉스그라스의 비열, J/kg-K
 D : 오목 반구의 직경, m
 d : 노즐 직경, m
 h : 국소열전달계수, W/m²-k
 k : 플렉스그라스의 열전도계수, W/m-k
 L : 노즐과 충돌표면 사이의 거리, m
 Nu : 국소 뉴셀수(=hd/k)
 R : 정체점에서 반경방향거리, m
 Re : 제트 레이놀즈수(based on nozzle diameter d)
 t : 시간, sec
 T* : 무차원 표면온도
 ε : 시험 표면의 방사율
 ρ : 플렉스그라스의 밀도, kg/m³
 α : 경사각도
 γ : $\left(= \frac{h\sqrt{t}}{\sqrt{\rho C_p k}} \right)$

하첨자

lc : 액정
 o : 초기
 s : 정체점
 w : 벽면
 ∞ : 공기(ambient)

1. 서 론

충돌제트는 열유체기기의 열전달 효율을 증대시키는 데 가장 폭넓게 사용되는 방법으로서 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(turbulent intensity), 제트 분사표면의 형태, 제트노즐의 형상 및 열경계조건 등을 포함한 많은 인자들의 영향을 받고 있기 때문에 이들 인자에 대한 충돌제트는 많은 공학자들의 연구대상이 되어왔다.

그동안 충돌제트(impinging jet) 열전달에 대한

연구는 수치적으로나 실험적으로 많은 연구가 이루어져 왔지만 대부분의 연구는 평판표면 형상에 수직인 충돌제트의 연구^(1,2)가 대부분이었다. 그러나 많은 산업 열유체기기의 냉각문제에서 곡면(curved surface)에의 충돌제트 문제는 흔히 볼 수 있으며, 표면형상 혹은 노즐의 위치제약으로 인하여 많은 응용에 있어서 충돌제트가 표면에 수직 보다는 경사되어 있는 경우가 많이 있으나, 곡면상에 대한 충돌제트에 대한 연구와 경사충돌제트에 관한 연구는 몇몇에 불과한 실정이다.

Thomann⁽³⁾은 난류경계층에서 오목한 표면의 곡률이 열전달에 미치는 영향을 연구한 결과 평판에 비하여 열전달은 20% 증가된다고 보고하였다. Metzger 등⁽⁴⁾은 오목한 원통형표면에 원형제트에 대한 냉각현상을 연구하여, 최대열전달이 발생하는 노즐과 충돌면 사이의 거리와 최대열전달계수와 상관계수를 제시하였다. Foss⁽⁵⁾는 Reynolds수가 48,000, 노즐과 충돌면사이의 거리 L/d=4.95, 노즐과 충돌면 사이의 경사각도 45°에서의 충돌제트에 대한 유동장 해석을 하였으며, Lamomt 등⁽⁶⁾과 Rubel⁽⁷⁾은 경사제트에 관한 연구에서 정체점 또는 최대열전달은 제트출구 방향과 충돌표면의 교차점에서 이동되어 발생하는 것을 관찰하였다.

Hrycak⁽⁸⁾은 오목한 반구형의 면(hemispherical plate)에 분사되는 충돌제트에 대한 열전달현상을 실험적으로 연구하였다. 그러나 그는 Reynolds수(Reynolds number)와 노즐과 충돌면사이의 거리의 상관계식으로 평균열전달계수를 구하였으나 국소열전달계수를 구하지는 못하였다.

Goldstein 등⁽⁹⁾은 평행표면에 분사되는 경사충돌제트에 대한 열전달실험을 수행하여 Reynolds수가 10,000~35,000사이에서 L/d=4, 6, 10, 경사각도 30°~90°인 경우에 대한 유동장의 국소열전달계수를 측정하였으며 국소열전달계수의 상관계식을 제시하였다.

Gau등⁽¹⁰⁾은 슬롯제트(slot-jet)를 이용하여 원통형 블록표면과 오목표면에서 표면곡률효과에 따른 열전달에 미치는 영향을 실험을 통하여 수행하였으며, 곡면표면에 따른 국소열전달계수와 평균열전달계수와 상관계식을 제시하였다.

최근 Lim⁽¹¹⁾은 오목표면에 분사되는 난류원형제

트에 대한 국소열전달계수를 액정(liquid crystal)을 이용한 transient method를 이용하여 실험 측정하였으며 평행평판의 국소열전달계수와 비교 분석하였다.

이와같이 오목한 표면과 볼록한 표면에서의 열전달계수의 측정과 경사충돌제트에서의 열전달에 관한 연구는 몇몇 연구가들에 의해 수행되어 왔지만 난류원형제트에 대한 오목한 표면에서 경사충돌제트에 따른 국소열전달계수에 관한 연구는 아직 보고된 적이 없어 이들 난류유동의 열전달 특성은 정확히 규명하지 못하고 있으며 정확한 실험 자료의 부족으로 수치해석 결과의 검증에 위한 난류모델링을 개선시키는데도 많은 문제가 있다.

본 연구에서는 liquid crystal transient method를 사용하여 산업유체기기들에서 많이 볼 수 있는 오목표면에 분사되는 경사 충돌제트에 의한 열전달 특성을 규명하고자 실험적연구를 하고자 한다.

실험은 반구 오목표면(hemispherical concave surface)에 난류원형제트를 분사시켜 국소열전달계수를 측정하며, 충돌표면사이의 경사각, 제트의 속도, 거리에 따른 국소열전달계수를 표면곡률 $D/d=10$ 과 Reynolds수가 $Re=23,000$ 일 때 4가지의 충돌표면사이의 경사각($\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40°)과 5가지의 노즐과 충돌표면사이의 거리($L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10)에 대하여 실험을 수행하여 경사진 오목표면 충돌제트에 의한 난류열전달특성을 연구해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용되는 실험장치는 Fig.1과 같다.

유량 조절이 가능한 원심송풍기에서 공급되는 공기는 충분히 발달된 긴관(관직경 $d=30\text{mm}$ 의 약 67배)을 통하여 측정표면에 분사되며 제트온도의 측정은 열교환기를 사용하여 주위공기의 온도차가 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 까지 보정된 K형 열전대를 사용하였다. 실험모형은 4.7mm 두께를 가진 직경 D 가 300mm인 반구의 플렉시글라스 돔(plaxiglass dome)을 사용하였고, 반구의 아랫면에는 유리면(glass wool)과 스티로폼(styrofoam)절연체를 사용하여 열손실

을 방지하였으며, 충돌표면의 경사각을 위하여 각도를 조절할 수 있도록 제작하였다.

실험모형의 충돌표면인 오목표면에는 온도에 따른 색깔의 변화를 기록할 수 있게 하기 위하여 깨끗한 표면을 유지시켰으며, 그 표면에 검은 페인트를 압축된 공기로 공기브러쉬(air-brush)를 사용하여 반복 분사하여 두께 약 0.03~0.05mm로 매우 얇은 층을 입혔고, 페인트가 완전히 건조한 다음 그 위에 증류수와 1:1 비율로 섞인 액정(R40C1W)을 역시 공기브러시를 사용하여 얇게 입혔다.

측정되는 모든 것의 기록과 가시화를 위하여 칼라 CCD 카메라(ULNIX TMC -7)와 비디오 장치를 이용하여 측정표면의 시간과 위치에 따른 액정의 온도반응에 따른 색의 변화를 기록할 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 오목표면에서의 난류원형경사충돌제트에 대한 국소열전달계수를 측정하기 위하여 liquid crystal transient method를 사용하였으며, Reynolds수가 23,000일 때 5가지의 충돌제트와 분사표면사이의 거리($L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10)와 4가지의 각도($\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40°)에 따라 실험하고 측정하였다.

Liquid crystal transient method는 액정을 이용한 온도장 해석의 응용방법으로서, 이 방법은 측

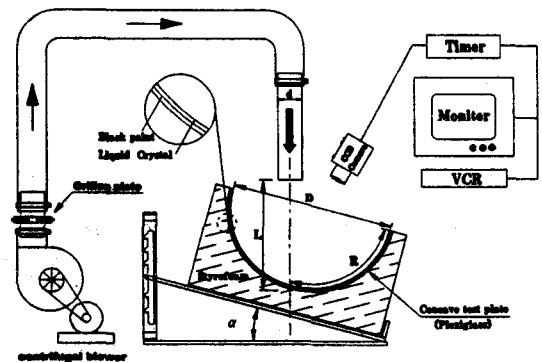


Fig.1 Experimental apparatus of impinging jet on a concave surface

정표면을 검은 페인트와 액정을 얇게 입혀서 오븐(oven)에서 제트온도보다 일정온도로 높게 가열하여 갑자기 충돌제트에 노출시킴으로써 시간과 거리에 따른 충돌표면의 온도변화를 비디오시스템으로 기록하여 표면에서의 국소열전달계수를 측정하는 방법이다.

액정은 비디오 시스템에 쉽게 기록될 수 있으며, 색깔의 반복성이 뛰어나며 열전대나 다른 온도측정장치에 비하여 온도변화를 연속적으로 알 수 있고 온도장 전체를 가시화 할 수 있기 때문에 온도장 해석에 액정을 이용한 방법이 응용이 확대되고 있다.

온도변화의 측정은 2가지 방법으로 나눌 수 있으며, 첫째는 흡입하는 공기온도를 측정표면의 온도보다 높게하여 측정표면이 실험이 진행되는 동안 가열되는 방법이며, 둘째는 흡입공기보다 높은 온도로 실험단면을 가열한 후 실험측정표면을 냉각하면서 온도변화를 측정하는 방법이다.

즉 가열과 냉각의 두가지 방법이 모두 이용될 수 있으나, 가열의 단점은 구성 시스템이 복잡하여 비싸고, 가열된 공기 열교환기에 의해 분배되는 과정에서 일정한 온도분포를 유지하기 어려운 점이 많기 때문에 주로 냉각방식을 이용하여, 본 연구에서 사용한 liquid crystal transient method는 냉각방식을 사용하였다.

이러한 liquid crystal transient method의 적용은 최근에도 Baughn 등⁽¹²⁾이 액정을 이용한 온도 측정기법을 개발하여 덕트나 평판 등의 난류열전달현상을 규명하는데 사용하여 좋은 결과가 얻어졌음이 보고되었다.

실험에 사용된 시험모형의 오목표면에서 유동방향의 열전도손실을 무시하면(Vedula 등⁽¹³⁾, Yan 등⁽¹⁴⁾) 대류열전달계수의 경계조건을 갖는 반무한(semi-infinite) 고체에서의 과도열전도방정식의 측정표면의 온도분포는 다음과 같이 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$T^* = \frac{(T_w - T_\infty)}{(T_{w0} - T_\infty)} = e^{\gamma^2} \text{erfc}(\gamma) \quad (1)$$

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

여기서 T_w 는 시간에 따른 측정표면의 온도, T_{w0} 는 측정표면의 초기온도, T_∞ 는 제트의 온도이며 h 는 대류열전달계수이다.

오븐에서 실험측정모형과 절연체로 제작한 덮개와 함께 넣어 2~3시간 가열하여 일정온도(약 55℃)를 유지시킨 후에 실험모형을 충돌제트로 이동시켜 갑자기 덮개를 열어 측정표면을 충돌제트에 노출시키면 오목면 측정표면이 냉각되면서 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 도달할때까지의 시간 t 를 CCD 카메라, VTR, 타이머 및 텅스텐 광원 등의 비디오 시스템 장치를 이용하여 위치에 따라 측정하면 식(1)과 (2)에서 국소열전달계수를 구할 수 있다.

측정표면에서 R-G천이층이 나타나는 온도를 보정하기 위하여 알루미늄 시편에 액정을 입혀 온도구배를 만들어 R-G천이층이 나타나는 액정의 온도를 열전대를 이용하여 수회에 걸쳐 측정하여 보정하였으며, 본 실험에서 사용되었던 액정의 R-G천이층의 온도는 $43 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 이었다. 온도측정을 위하여 사용된 열전대는 직경이 약 0.08mm인 K형으로 항온조와 표준백금온도계(PRT, platinum resistance thermometer)를 사용하여 온도보정식을 만들어 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 까지의 정확성을 갖도록 온도를 보정하였고, 제트의 평균속도는 Schlichting⁽¹⁵⁾의 난류속도분포식을 사용하였다.

또한 실험에서의 불확실성(uncertainty)을 해석하기 위하여 Kline과 Mcklintock⁽¹⁶⁾가 제시한 방법을 사용하였다.

3. 결과해석 및 및 검토

3.1 정체점에서의 열전달

정체점에서의 열전달은 열전달계수가 가장 크기 때문에 유체기기의 냉각 또는 가열하는 문제에서 정체점의 국소열전달계수 측정은 중요한 문제이다. 본 연구에서는 liquid crystal transient method를 사용하여 $D/d=10$ 의 곡률을 갖고 오목표면에 분사되는 난류원형제트에 대한 국소열전달계수를 $Re=23,000$ 일 때 5가지의 노즐과 충돌표면사이의

거리(L/d=2, 4, 6, 8 및 10) 및 4가지의 각도($\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40°)에 따라 실험하여 정체점(stagnation point)에서의 열전달계수 Nu_s 를 측정하였다.

Fig.2에서의 $Re=23,000$ 인 경우 경사각도 α 변화에 따른 정체점에서의 열전달계수 Nu_s 를 노즐과 충돌표면사이의 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. 이는 평판에서의 충돌제트에 대한 열전달에 대한 실험을 수행한 Yan 등⁽¹⁴⁾의 결과와 일치하며, L/d=6에서 난류강도(turbulent intensity)가 가장 높고 제트의 중심속도가 노즐 출구속도와 거의 유지되기 때문에 최대열전달이 발생하기 때문이다.

또한 그림에서 나타나듯이 L/d=2인 경우를 제외하고는 경사각도가 증가할수록 정체점에서의 Nu_s 는 감소하게 나타남을 알 수 있으며, L/d=6과 경사각 $\alpha = 0^\circ$ 인 경우 $Re=23,000$ 일 때 $Nu_s=207$ 의 값을 갖고, L/d=6, $\alpha = 40^\circ$ 에서는 $Nu_s=163$ 으로 나타났으며 L/d=6, $\alpha = 40^\circ$ 에서의 Nu_s 는 L/d=6, $\alpha = 0^\circ$ 에 비해 약 19.3% 감소하게 나타났다.

Fig.3은 $Re=23,000$ 인 경우 노즐과 충돌표면사이의 거리 L/d 변화에 따른 정체점에서의 열전달계수의 변화를 경사각도 α 에 따라 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 제트와 충돌표면과의 거

리 L/d에 따른 정체점에서의 Nu_s 는 L/d=6에서 최대값이 나타나고 있으며, L/d=2보다는 L/d=8에서 조금 높게 나타남을 알 수 있다. 그리고 L/d=10에서의 각도변화에 따른 평균 Nu_s 는 L/d=2, 4, 6 및 8과 같이 비슷한 형태로 나타나지만, 정체점에서의 평균 Nu_s 의 값은 본 실험에서는 $Re=23,000$ 에서 $Nu_s=151$ 로 L/d=6에 비해 약 26.9% 적게 나타났다.

3.2 표면을 따른 국소열전달계수 분포

오목표면을 따른 국소열전달계수의 분포를 나타내기 위하여 $Re=23,000$ 인 경우 4가지 경사각 $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 을 갖는 오목표면의 등열전달계수 등고선(contours)을 노즐과 충돌표면사이의 거리 L/d=2와 6인 경우 각각 X축과 Y축의 비율로 Fig.4에 나타내었다.

Fig.4에서 볼 수 있듯이 경사각도 $\alpha = 0^\circ$ 에서는 모든 실험에서 등열전달계수는 완전한 동심원의 형태를 유지하고 있으며, 경사각도가 있는 경우 등열전달계수는 타원형태로 나타났고 경사각도가 증가할수록 더 찌그러진 타원형태로 나타남을 알 수 있다. 또한 $Re=23,000$ 일 때 L/d=6인 경우에는 Nu 의 점침현상이 어떤 경사각에도 발생하지 않으나 충돌경계층에서 난류경계층으로의 천이과정에서 생기는 2차정점의 발생으로 L/d=2인 경우(Fig.4)에는 경사각 $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 에서 등열전달계수의 점침현상이 나타남을 볼 수 있다. 또한 평판에서

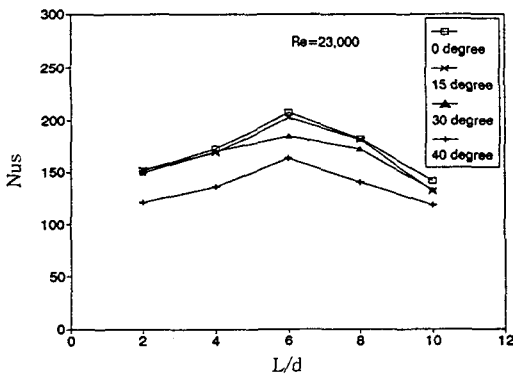


Fig.2 Effect of L/d on the stagnation point Nusselt number for $Re= 23,000$ and $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ and 40°

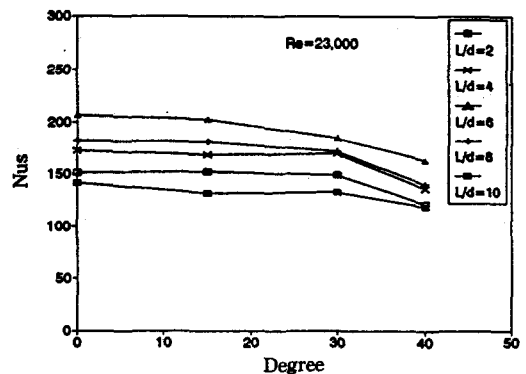


Fig.3 Effect of jet angle on the stagnation point Nusselt number for L/d=2, 4, 6, 8 and 10 and $Re=23,000$

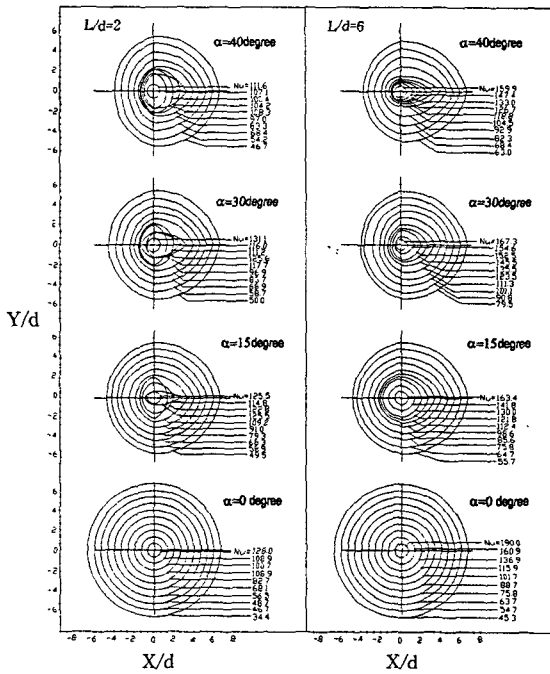


Fig.4 Contours of constant Nusselt number for $Re=23,000$, $L/d=2, 6$ and various jet angles

경사충돌제트에 대하여 실험을 수행한 Goldstein⁽⁹⁾ 등의 연구결과와 비교하여 볼 때, 본 연구의 곡률이 있는 표면에서의 경사충돌제트의 경우 등열전달계수는 곡률이 없는 경우보다 $X/d > 0$ (upstream)에서는 Nu 의 감소율이 크게 나타났고, $X/d < 0$ (downstream)에서는 Nu 의 감소율이 작게 나타났다.

또한 Fig.4에서 보는 바와 같이 같은 $Re=23,000$ 수의 경우 충돌제트의 경사각도가 증가함에 따라 국소열전달계수의 분포는 $X/d < 0$ (downstream)에서 보다는 $X/d > 0$ (upstream)에서의 Nu 의 감소율이 작게 나타남을 알 수 있다.

Fig.5, Fig.6 및 Fig.7은 $Re=23,000$ 일 때 각각 노즐과 충돌표면사이의 거리 $L/d=2, 6$ 및 8 인 경우 경사각도 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 에 따른 변화를 나타내었다.

Fig.5에서 알 수 있듯이 $Re=23,000$, $L/d=2$ 인 경우 x축 표면을 따르는 국소열전달계수의 분포는 $X/d < 0$ 에서의 Nu 는 수직충돌제트($\alpha=0^\circ$)인 경우에만 2차정점이 발생하며 경사각도가 증가할수록

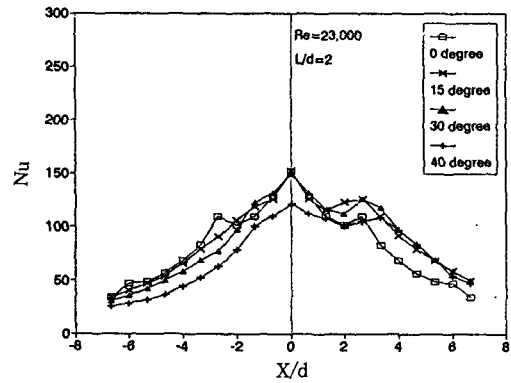


Fig.5 Comparison of Nusselt numbers distribution along the x axis for $L/d=2$, $Re=23,000$ and various jet angles

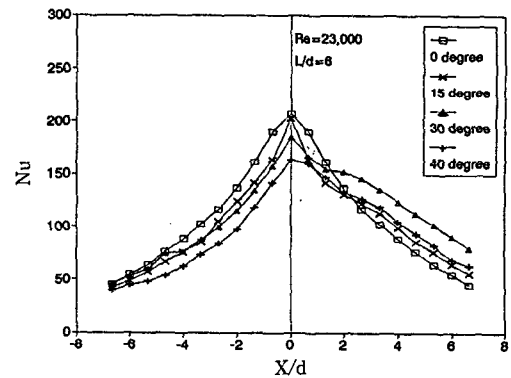


Fig.6 Comparison of Nusselt numbers distribution along the x axis for $L/d=6$, $Re=23,000$ and various jet angles

2차 최대 Nu 는 발생하지 않고 감소하게 나타내며 $X/d > 0$ 에서 Nu 는 경사각도 $\alpha=0^\circ$ 뿐만아니라 $\alpha=15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 에서 모두 2차정점이 발생하며 Nu 는 $\alpha=0^\circ$ 일 때보다 $\alpha=15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 에서 증가하게 나타났다. 또한, Fig.6의 $Re=23,000$ 과 $L/d=6$ 인 경우 $X/d < 0$ 에서 Nu 는 2차 정점은 발생하지 않고 경사각도의 감소에 따라 감소하며, $X/d > 0$ 에서 $\alpha=0^\circ$ 에서는 2차 정점이 발생하지 않으나, $\alpha=15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 에서 2차 정점이 나타남을 볼 수 있으며 Nu 는 $\alpha=15^\circ$ 및 30° 일 때 $\alpha=0^\circ$ 보다 크게 나타났다. Fig.7의 $Re=23,000$ 과 $L/d=8$ 의 경

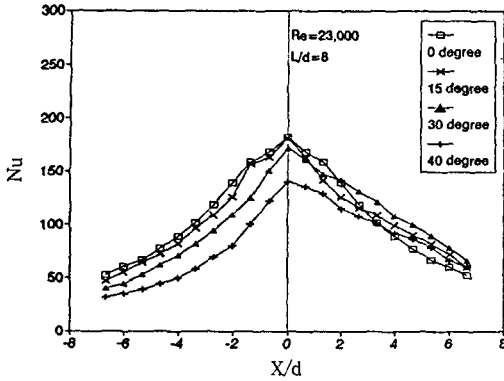


Fig. 7 Comparison of Nusselt numbers distribution along the x axis for $L/d=8$, $Re=23,000$ and various jet angles

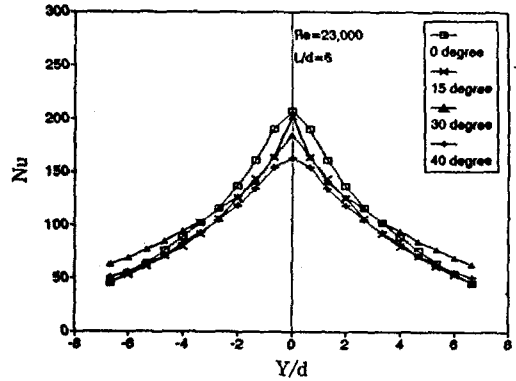


Fig. 9 Comparison of Nusselt numbers distribution along the y axis for $L/d=6$, $Re=23,000$ and various jet angles

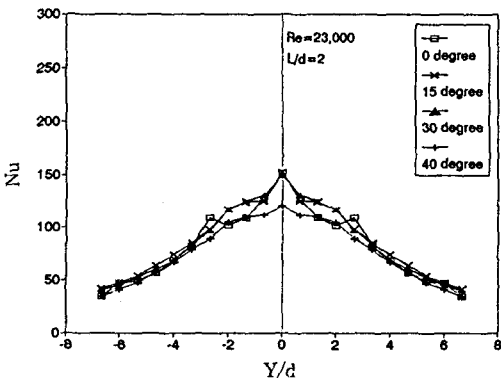


Fig. 8 Comparison of Nusselt numbers distribution along the y axis for $L/d=2$, $Re=23,000$ and various jet angles

우에 2차 정점은 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 의 어느 경우에도 나타나지 않고 $X/d < 0$ 에서 경사각도의 증가에 따라 Nu의 변화율은 크게 감소하나 $X/d > 0$ 에서 Nu의 변화율은 크지 않게 나타남을 알 수 있으며 $L/d=4, 10$ 의 경우에도 같은 현상으로 나타났다. 또한 노즐과 충돌면사이의 거리가 증가할수록 경사각도의 변화에 따른 Nu의 변화율은 $X/d < 0$ 에서 Nu의 변화율은 크게 나타났고 $X/d > 0$ 에서 Nu의 변화율은 작게 나타남을 알 수 있으며, 경사각도가 증가할수록 표면을 따른 국소열전달계수 분포는 $X/d < 0$ 에서의 Nu의 감소율이 크게 나타나

지만 $X/d > 0$ 일 때 Nu의 감소율은 작게 나타남을 알 수 있다.

Fig.8~9는 $Re=23,000$ 일 때 노즐과 충돌표면사이의 거리 $L/D=2$ 와 6인 경우 경사각도 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 변화에 따른 y축의 국소열전달계수 분포를 나타내었다.

Fig.8~9에서 알 수 있듯이 $Re=23,000$ $L/d=2$ 일 때 y축 표면을 따르는 국소열전달계수의 분포의 경우 경사각도 $\alpha=0^\circ$ 에서 2차 정점이 나타났고, $\alpha=15^\circ, 30^\circ$ 및 40° 에서 2차 정점은 나타나지 않았으며 경사각도가 작을수록 Nu의 분포의 기울기는 급격하게 나타남을 알 수 있다.

또한 $L/d=6$ 에서는 모든 각도의 변화에 따라서 2차 정점은 나타나지 않았고 $L/d=2$ 에서와 같이 각도가 감소할수록 Nu의 분포의 기울기는 급격하게 나타남을 알 수 있으며 $L/d=4, 8$ 및 10 에서도 같은 현상으로 나타났다.

Fig.10과 Fig.11은 $Re=23,000$ 과 경사각도 $\alpha=30^\circ$ 와 40° 일 때 노즐과 충돌표면사이의 거리에 변화에 따른 국소열전달계수의 분포를 나타내었다.

Fig.10~11에서 볼 수 있듯이 경사각도가 일정할 때 $L/d=6$ 에서 Nu는 가장 크게 나타났고, $L/d=10$ 일 때의 Nu가 가장 낮게 나타났다. 또한 운동량과 열전달이 급격히 증가되는 층류경계층에서 난류경계층으로의 천이과정에서 발생하는 국소열전달계수의 2차 정점은 $Re=23,000$ 인 경우 $\alpha=0^\circ$ 일때는 L/d

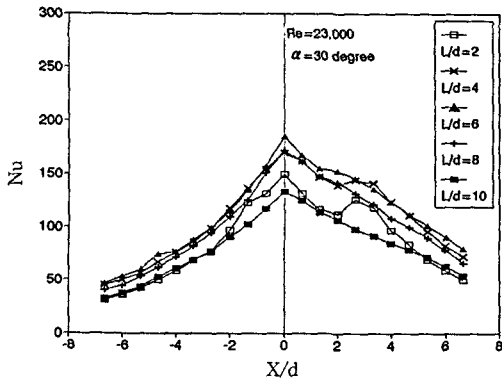


Fig.10 Comparison of Nusselt numbers distribution along the x axis for $\alpha=30^\circ$, $Re=23,000$ and various L/d

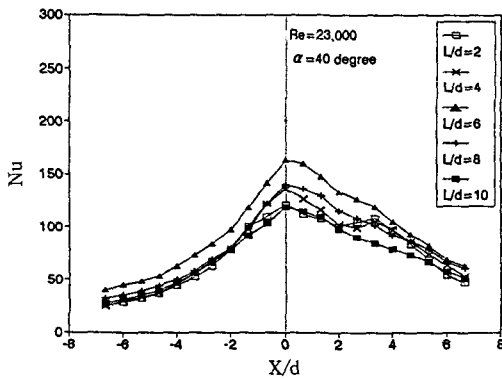


Fig.11 Comparison of Nusselt numbers distribution along the x axis for $\alpha=40^\circ$, $Re=23,000$ and various L/d

=2에서 2차 정점이 나타났으나 $\alpha=15^\circ$ 와 $\alpha=30^\circ$ (Fig.10) 및 $\alpha=40^\circ$ (Fig.11)의 경우에는 $L/d=2$ 에서 2차 정점이 나타났다. $\alpha=15^\circ$ 인 경우 그림으로 나타내지는 않았지만, Nu는 정체점에서 최대값을 갖고 감소하다가 $L/d=2$ 일 때 $X/d=1.3$, $L/d=4$ 일 때는 $X/d=2.0$ 에서 Nu가 다시 증가하였으며 2차 최대Nu는 $X/d=2.7$ 에서 발생하였고 $\alpha=30^\circ$ 인 경우 $L/d=2$ 와 $L/d=4$ 에서는 정체점에서 최대값을 갖고 감소하다가 Nu가 다시 $X/d=2.0$ 에서 Nu가 다시 증가하여 2차 최대Nu는 $X/d=2.7$ 에서 발생하였

Table 1 Uncertainty analysis($L/D=6$, $Re=23,000$, $\alpha=30^\circ$)

Parameter X_i	Typical Value	δX_i	$\left(\frac{\delta X_i}{N} \frac{\partial N}{\partial X_i} \right) * 100(\%)$
R/D=5			
D	0.03(m)	0.0002	0.5
t	7.88(sec)	0.08	0.5
T_{wo}	55.0($^\circ C$)	0.15	2.4
T_∞	26.7($^\circ C$)	0.1	0.6
T_{1c}	43.0($^\circ C$)	0.2	4.8
$\sqrt{(\rho C_p k)}$	569	29	3.9
ϵ	0.5	0.1	1.0
$\delta Nu/Nu=5.8(\%)$			

다. 또한 $\alpha=40^\circ$ 인 경우 $L/d=2$ 와 $L/d=4$ 일 때 $X/d=2.0$ 에서 Nu가 다시 증가하여 $X/d=3.3$ 에서 2차 최대Nu가 발생함을 알 수 있으며, 나머지 경우에 있어서 표면에 따르는 국소열전달계수는 경계층이 발달함에 따라 2차정점은 나타나지 않고 단조감소(monotonic decreasing)하게 나타났다. 따라서 2차 최대Nu는 경사각도에 따라서 경사각도 $\alpha=0^\circ$ 에서는 $L/d=2$ 에서만 발생하고 $\alpha=15^\circ$, 30° 및 40° 에서는 $L/d=2$ 와 4에서 발생하며 경사각도가 증가할수록 정체점에서 멀리 나타남을 알 수 있다.

또한 그림에서 볼 수 있듯이 제트와 충돌표면 사이의 거리가 변화할 때 경사각도 변화에 따른 국소열전달계수의 분포는 경사각도가 없는 경우(즉 $\alpha=0^\circ$)보다 경사각이 있는 경우 $X/d < 0$ (downstream)에서 Nu의 변화는 작게 나타났고 $X/d > 0$ (upstream)에서는 Nu의 변화율이 크게 나타났다.

실험에서의 불확실성(uncertainty)을 해석하기 위하여 Kline과 Mcklintock⁽¹⁶⁾가 제시한 방법을 사용하여 $Re=23,000$ 과 $L/d=6$ 및 $\alpha=30^\circ$ 인 경우에서의 실험결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타난 바와 같이 Nusselt수의 전체불확실성(total uncertainty)은 약 5.8%이었으며, R-G처리층의 온도측정의 불확실성이 가장 크게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 Liquid crystal transient method를 사용하여 $D/d=10$ 의 곡률을 갖고 오목표면에 분사되는 난류원형 경사충돌제트에 대한 국소열전달계수를 $Re=23,000$ 일 때 5가지의 노즐과 충돌표면사이의 거리($L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10) 및 4가지의 각도($\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 및 40°)에 따라 실험하여 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 정체점을 포함한 모든 영역에서의 Nu는 실험에서 $L/d=6$ 인 경우에 가장 크게 나타났고, 같은 Reynolds수인 경우 경사각도의 증가에 따라 Nu는 감소하였으며, $L/d=6$ 인 경우 정체점에서의 평균Nu는 경사각도 $\alpha=0^\circ$ 에 비하여 경사각도 $\alpha=40^\circ$ 인 경우에 최대 19.3% 감소하였다.

2) 수직원형충돌제트의 경우 등열전달계수는 중심원으로 나타났으나 경사충돌제트의 경우 등열전달계수는 타원형태로 나타났으며, 곡률이 있는 경우 등열전달계수는 곡률이 없는 경우보다 $X/d>0$ (upstream)에서는 Nu의 감소율이 크게 나타났고, $X/d<0$ (downstream)에서는 Nu의 감소율이 작게 나타났다.

3) 충돌제트의 경사각도가 있는 경우 경사각이 없는 경우보다 경사각의 변화에 따른 국소열전달계수의 변화율은 $X/d<0$ 에서 크게 나타났고 $X/d>0$ 에서는 작게 나타났으며, 노즐과 충돌면사이의 거리가 변화에 따른 국소열전달계수의 변화율은 $X/d<0$ 에서 작게 나타났고, $X/d>0$ 에서는 크게 나타났다.

4) 오목표면의 y축의 경우 수직원형제트일 때 $Re=23,000$ 에서 $L/d=2$ 인 경우에서 2차정점이 나타났으며, 경사충돌제트의 경우 모든 2차정점은 나타나지 않으며, 경사각도가 작을수록 Nu의 분포의 기울기는 급격하게 나타났다.

5) 2차 최대 Nu는 $Re=23,000$ 에서 수직충돌제트($\alpha=0^\circ$)인 경우에 $L/d=2$ 에서만 발생하고 경사충돌제트($\alpha=15^\circ, 30^\circ$ 및 40°)인 경우에는 $L/d=2$ 및 4에서 발생하며 경사각도가 증가할수록 정체점에서 멀리 나타났다.

후 기

이 논문은 1996년도 한국 학술진흥재단의 공모

과제연구비에 의하여 연구된 결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

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. 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.
3. Thomann, H., 1968, "Effect of stream-wise wall curvature on heat transfer in a turbulent boundary layer", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 33, pp. 282~292.
4. Metzger, D. E., Yamashida, T., and Jenkins, C. W., 1969, "Impingement cooling of concave surfaces with lines of circular air jets", ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 91, pp. 149~158.
5. Foss, J. F., 1979, "Measurement in large-angle oblique jet impingement flow", AIAA, Journal Vol. 17, p. 801.
6. Lamont, P. J., 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.
7. Rubel, A., 1981, "Computation of the oblique impingement of round jets upon a plane wall", AIAA, Journal, Vol 19, pp. 863~871.
8. Hrycak, P., 1982, "Heat transfer and flow characteristics of jets impinging on a concave hemispherical plate", Proceeding of International Heat Transfer Conference, pp. 357~362.

9. 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.
10. 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.
11. 임경빈, 1995, "오목표면에 분사되는 난류원형 충돌제트에 대한 국소열전달계수 측정에 관한 연구", *공기조화 냉동공학 논문집 제7권 제1호*, pp. 112~119.
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. 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. Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill, New York.
16. Kline, S. J., and Mcklintock, F. A., 1953, "Describing uncertainties in single sample experiments", *Mechanical Engineering*, Vol 75, No. 1, pp. 3~8.