

오목표면에 분사되는 난류원형충돌제트에 대한 국소열전달계수 측정에 관한 연구

Measurement of the Local Heat Transfer Coefficient on a Concave Surface with a Turbulent round Impinging Jet

임 경 빈*
K. B. Lim

Key words : Impinging Jet(충돌제트), Liquid Crystal(액정), Concave Surface(오목표면), Local Heat Transfer Coefficient(국소열전달계수)

Abstract

Measurements of the local heat transfer coefficients on a spherically concave surface with a round impinging jet are presented. 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 crystals for the measurement of the surface temperature. The Reynolds numbers used were 1,000, 23,000 and 50,000 and the nozzle-to-jet distance was $L/d=2, 4, 6, 8, 10$. Presented results are compared to previous measurements for flat plate.

In the experiment, the local heat transfer Nusselt numbers on a concave surface are higher than those on a flat plate. Maximum Nusselt number at all region occurred at $L/d=6$ and second maximum in the Nusselt number occurred at $R/d=2$ for both $Re=50,000$ and $Re=23,000$ in case of $L/d=2$ and for only $Re=50,000$ in case of $L/d=4$. All other cases exhibit monotonically decreasing value of the Nusselt number along the curved surface.

기 호 설 명

C_p : specific heat of Plexiglas[J/Kg · K]
 D : concave curvature diameter[m]
 d : jet diameter[m]
 h : local heat transfer coefficient[W/m² · K]
 k : thermal conductivity of Plexiglas[W/m · K]
 L : nozzle-to-jet distance[m]
 Nu : local Nusselt number(=hd/k)
 R : radial coordinate of plate

Re : jet Reynolds number(based on d)
 t : time[sec]
 T : temperature[°C]
 T^* : nondimensional surface temperature

그리스 문자

γ : quantity defined by Eq.(2)
 e : emissivity of the liquid crystal coated surface
 ρ : density of Plexiglas[kg/m³]

* 대전산업대학교 기계설계공학과

하 첨 자

- o : initial
- s : stagnation point
- w : wall(plexiglas)
- ∞ : ambient air

1. 서 론

최근 산업사회의 발달과 더불어 열유체기기의 사용은 광범위하게 확대되고 있으며 이러한 열유체기기의 열효율 향상 및 성능개선을 위한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있다.

특히 충돌제트(impinging jet)는 열유체기기의 열전달 효율을 증대시키는데 가장 폭넓게 사용되는 방법으로서 강관의 냉각, 유리의 템퍼링(tempering), 종이와 직물 및 박막의 건조, 가스터어빈과 연소기 구성부품 및 전자장비 냉각 등 많은 문제에서 광범위하게 응용되고 있다.

충돌제트의 유체 및 열전달 특성은 제트의 속도, 난류강도(turbulent intensity), 제트분사표면의 형태, 제트노즐의 형상 및 열경계조건 등을 포함한 많은 인자들의 영향을 받고 있기 때문에 이들 인자에 대한 충돌제트의 연구는 많은 공학자들의 연구대상이 되어왔다.¹⁻⁵⁾

그동안 충돌제트 열전달에 대한 연구는 수치적으로나 실험적으로 많은 연구가 이루어져 왔지만 충돌제트의 충돌표면 형상은 평판에 대한 연구가 대부분이었다.⁶⁻⁹⁾ 그러나 많은 산업 열유체기기의 냉각문제에서 곡면(curved surface)에의 충돌제트 문제는 흔히 볼수 있으나, 곡면상에 대한 제트 냉각에 대한 연구는 몇몇 연구에 불과한 실정이다.

Thomann¹⁰⁾은 난류경계층에서 오목한 표면의 곡률이 열전달에 미치는 영향을 연구한 결과 평판에 비하여 열전달은 약 20% 증가된다고 보고 하였다. Metzger¹¹⁾은 오목한 원통형표면에 원형제트에 대한 냉각현상을 연구하여, 최대 열전달이 발생하는 노즐과 충돌면 사이의 거리와 최대 열전달계수와의 상관관계식을 제시하였다. Hrycak¹²⁾은 오목한 반구형의 면(hemispherical plate)에 분사되는 충돌제트에 대한 열전달현상을 실험적으로 연구하였다. 그러나 그는 Reynold수와 노즐과 충돌면사이의 거리

의 상관관계식으로 평균열전달계수를 구하였으나 국소열전달계수를 구하지는 못하였다. Gau¹³⁾은 슬롯제트(slot-jet)를 이용하여 원통형 오목표면에서 표면곡률효과에 따른 열전달에 미치는 영향을 연구하였으며, 곡면표면에 따른 국소열전달계수와 평균열전달계수와의 상관관계식을 제시하였다.

이와같이 오목한 곡면에서의 열전달계수의 측정은 몇몇 연구가들에 의해 수행되어왔지만 난류원형제트에 대한 오목한 반구표면에서의 국소열전달계수측정에 관한 연구는 아직 보고된 적이 없어 이들 난류유동의 열전달 특성은 정확히 규명하지 못하고 있으며 정확한 실험자료의 부족으로 수치 해석 결과의 검증을 위한 난류모델링을 개선시키는데도 많은 문제가 있다.

본 연구에서는 liquid crystal transient method를 사용하여 산업유체기기들에서 많이 볼수 있는 곡률진 표면에 분사되는 충돌제트에 대한 열전달 특성을 규명하고자 실험적 연구를 수행하였다. 실험모형은 반구 오목표면(hemispherical concave surface)에 난류원형제트를 분사시켜 국소열전달계수를 측정하였으며, 제트의 속도, 거리에 따른 국소열전달계수를 측정하고자 반구의 직경과 노즐직경과의 비 $D/d=8$ 인 경우, 3가지의 Reynold수($Re=11,000, 23,000$ 및 $50,000$)과 5가지의 노즐과 충돌표면사이의 거리($L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10)에 대하여 실험을 수행하여 열전달특성을 연구해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용되는 실험장치는 개략도는 Fig.1과 같다.

유량조정이 가능한 원심송풍기에서 공급되는 공기제트는 충분히 유동이 발달된 긴 관(관직경 3.8 cm의 약 60배)을 통하여 측정표면에 분사되며 제트의 온도는 열교환기를 사용하여 주위공기의 온도차가 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 내로 되도록 유지시켰으며, 제트의 온도측정을 위하여 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 까지 보정된 K-형 열전대를 사용하였다.

실험모형은 4.8mm두께를 가진 직경D가 30.5cm인 반구의 플렉시글라스 돔(plexiglas dome)을 사용하였으며 반구의 아랫면에는 스티로폼(styrofoam)

를 사용하여 열손실을 방지하였다.

실험모형의 오목표면에는 온도에 따른 색깔의 변화를 기록할 수 있게 하기 위하여 공기 브러쉬(air brush)를 이용하여 매우 얇은 층(약 0.03mm~0.05 mm)으로 검은 페인트를 입힌후 완전히 마른다음 그위에 물과 1:1 비율로 섞인 액정(liquid crystal)을 입혔다. 또한 CCD카메라와 비디오장치를 설치하여 측정표면의 시간과 위치에 따른 액정의 온도반응에 따른 색의 변화를 기록할 수 있도록 하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 오목표면에서의 난류원형충돌제트에 대한 국소열전달계수를 측정하기 위하여 liquid crystal transient method를 사용하였다.

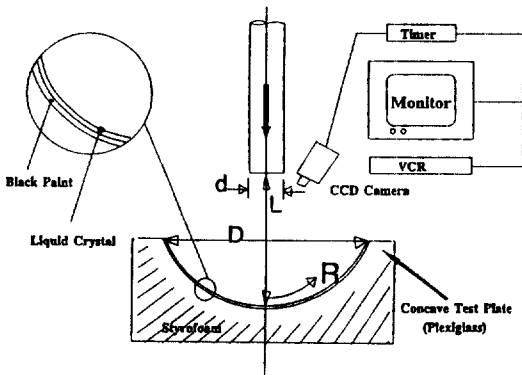


Fig.1 Experimental Apparatus of Impinging Jet on the Concave Curvature Surface.

이 방법은 측정표면을 검은페인트와 액정을 얇게 입혀서 오븐(oven)에서 제트온도보다 일정온도로 높게 가열하여 갑자기 충돌제트에 노출시킴으로써 시간과 거리에 따른 충돌표면의 온도변화를 비디오시스템을 사용하여 기록하여 곡면에서 국소열전달계수를 측정하는 방법이며, 이러한 liquid crystal transient method는 최근 Baughn등¹⁴⁾과 Yan등⁸⁾이 액정을 이용한 온도 측정기법을 개발하여 덕트나 평판등의 난류열전달현상을 규명하는데 사용하여 좋은 결과가 얻어졌음이 보고되었다. 액정은 색깔의 반복성이 뛰어나며 색깔의 반응이 비디오시스템에 쉽게 기록될 수 있어 열전대나 다른 온도측정장치에 비하여 온도변화를 연속적으로 알 수 있고, 온도장 전체를 한번에 가시화 할 수 있기 때문에 최근 온도장의 해석에 이 방법의 응용이 확대되고 있으며, 곡률진 덕트나 가스터어빈 기의 냉각 등을 포함한 형상이 매우 복잡한 문제의 난류열전달 현상을 규명하는데 유용하게 이용될 수 있는 장점이 있다.

본 실험에 사용된 시험모형의 오목표면에서 유동방향의 열전도손실을 무시하면(Vedula등¹⁵⁾, Yan 등⁸⁾ 대류열전달계수의 경계조건을 갖는 반무한(semi-infinite)고체에서의 과도열전도방정식의 측정표면의 온도분포는 다음과 같이 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

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

Table 1 Uncertainty Analysis(L/d=6, D/d=8, Re=50,000)

Parameter X_i	Typical Value	σ_{X_i}	$\left(\frac{XX_i}{Nu} \frac{\partial Nu}{\partial X_i}\right) \times 100(\%)$		
			R/D= 0	5	
D	0.0403(m)	0.0002	0.5	0.5	
t	2.71 ; 19.86(sec)	0.08	1.3	0.2	
T_{w0}	40.01(°C)	0.15	2.8	2.9	
T_∞	26.5(°C)	0.1	1.0	1.1	
T_k	34.95(°C)	0.25	7.2	7.5	
$\sqrt{(PC/k)}$	569	29	5.2	5.3	
ϵ	0.5	0.1	0.4	1.0	
			$\delta Nu/Nu =$	9.4	9.8(%)

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

여기서 T_{II} 는 시간에 따른 측정표면의 온도, T_{III} 는 측정표면의 초기온도, T_z 는 제트의 온도이다.

오븐에서 가열하여 일정온도(약 40°C)로 유지된 측정표면에 충돌제트를 분사시키면 액정의 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 도달할때까지의 시간 t 를 위치에 따라 비디오장치를 이용하여 측정하면 식(1)과 (2)에서 국소열전달계수를 구할 수 있다.

측정표면에서 R-G천이층이 나타나는 온도를 보정(calibration)하기 위하여 알루미늄시편에 액정(liquid crystal)을 입혀 온도구배를 만들어 R-G천이층이 나타나는 액정의 온도를 열전대를 이용하여 수회에 걸쳐 측정하여 보정하였으며, 그 결과 본 실험에서 사용되었던 액정의 R-G천이층의 온도는 $34.95^\circ\text{C} \pm 0.25^\circ\text{C}$ 이었다. 이때 온도측정을 위하여 사용된 열전대는 직경이 약 0.08mm인 K-형으로 Rosemount항온조와 표준백금온도계(PRT, platinum resistance thermometer)을 사용하여 온도보정식을 만들어 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 까지의 정확성을 갖도록 온도를 보정하였다.

공기제트의 속도는 피토투브(pitot tube)와 마이크로 마노미터(merian instrument)를 사용하여 측정하였으며 제트의 평균속도는 Schlichting^[6]의 난류속도분포식을 사용하였다.

본 실험에서는 항온조에 연결된 열교환기를 이용하여 온도($40 \pm 0.15^\circ\text{C}$)를 일정하게 유지할 수 있게 제작한 오븐에 실험측정모형과 스타이로폼으로 제작한 덮개와 함께 넣어 6-8시간 가열한 후 충돌제트에 갑자기 뚜껑을 열어 측정표면에 분사시켰으며 이때부터 측정표면에 나타나는 R-G천이층의 시간을 측정하기 위하여 CCD 카메라, VCR, 타이머 및 텅스텐 광원을 사용하였다.

또한 실험에서의 불확실성(uncertainty)을 해석하기 위하여 Kline과 Mcclintock^[7]가 제시한 방법을 사용하여 $Re=50,000$ 과 $L/d=6$ 인 경우에서의 실험 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타난

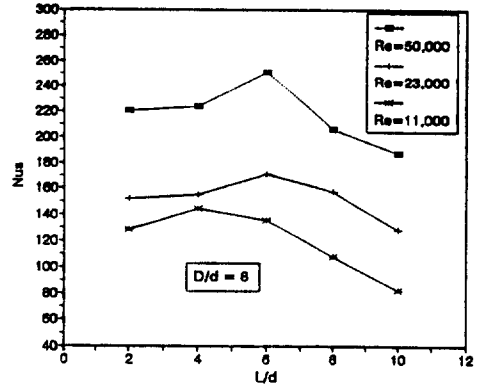


Fig.2 Effect of Jet Distance on the Stagnation Point Nusselt Number for Different Reynolds Number.

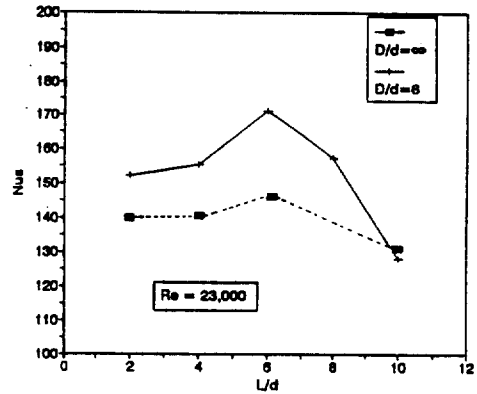


Fig.3 Comparison of Stagnation Point Nusselt Number between Concave Surface(D/d=8) and Flat Plate(D/d=infinity) at Re=23,000.

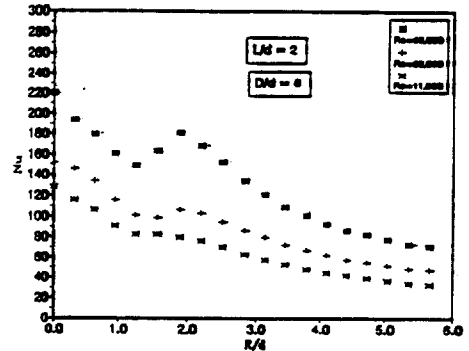


Fig.4 Radial Nusselt Number Distribution with Reynolds Number for L/d=2 on the Concave Surface.

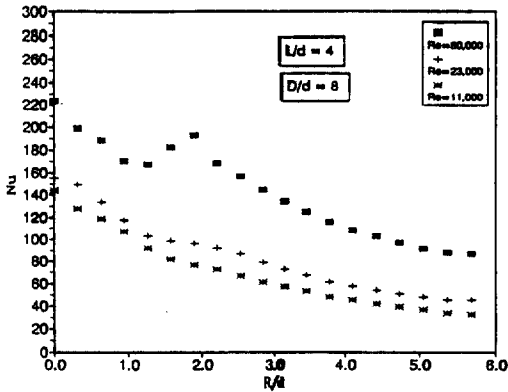


Fig.5 Radial Nusselt Number Distribution with Reynolds Number for $L/d=4$ on the Concave Surface.

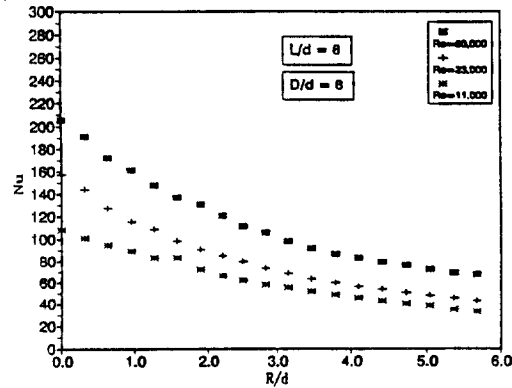


Fig.6 Radial Nusselt Number Distribution with Reynolds Number for $L/d=8$ on the Concave Surface.

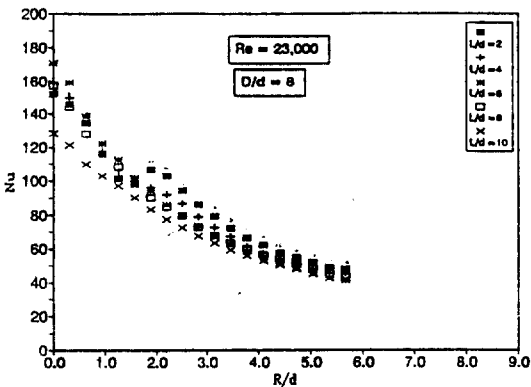


Fig.7 Radial Nusselt Number Distribution along the Concave Surface for Five Jet Distance from $L/d=2$ to 10 at $Re=23,000$.

바와 같이 Nu수의 전체불확실성(total uncertainty)은 약 9.6%이었으며, R-G천이층의 온도측정의 불확실성이 가장 크게 나타났고, Reynold수의 불확실성은 약 2%정도로 나타났다.

3. 결과 및 토의

3.1 정체점에서의 열전달(stagnation point heat transfer)

대부분의 경우 정체점에서의 열전달현상은 열전달계수가 가장 크기 때문에 열유체기기의 냉각 혹은 가열하고 문제에서 정체점에서의 국소열전달의 측정은 중요한 문제이다.

Fig.2에서는 Reynold수의 변화에 따른 정체점에서의 열전달계수를 노즐과 총돌표면사이의 거리 L/d 에 따라 측정한 결과를 나타내었다. Fig.2 에서 볼 수 있듯이 (Fig.3에서도 나타나지만) $Re=11,000$ 인 경우 $L/d=4$ 에서 최대열전달이 발생하고 $Re=23,000$ 및 $50,000$ 에서는 $L/d=6$ 에서 최대 열전달이 발생하며, 이는 $Re=11,000$ 인 경우를 제외하고는 평판에서의 총돌제트에 대한 실험을 수행한 Yan 등⁸⁾의 결과와 일치한다.

이러한 현상은 $L/d=6$ 에서 난류강도(turbulent intensity)가 가장 높고 제트의 중심속도가 노즐 출구속도가 거의 유지되기 때문에 최대열전달이 발생한다는 연구결과⁹⁾에서도 찾아 볼 수 있다.

Fig.3에서는 $Re=23,000$ 일때 곡률을 갖는 오목표면($D/d=8$)인 경우 정체점에서의 Nu수를 Yan 등⁸⁾의 평판에 ($D/d=\infty$)에 대한 실험결과와 비교하여 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 $D/d=8$ 인 오목표면의 Nu수와 평판의 Nu수와 차이가 $L/d=2\sim 4$ 사이에서 점차 커지면서 $L/d=6$ 에서 최대 18%정도 높게 나타나며 $L/d>6$ 에서는 점점 차이가 줄어들다가 $L/d=10$ 에서는 거의 같게 됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 Gau¹³⁾ 등의 실험결과와 일치하는데 Gau 등은 유동가시화의 실험을 통하여 표면곡률이 증가할수록 곡률효과로 인한 원심력이 유동을 불안정하게 하여 제트의 혼합영역에서 와류를 발생시켜 그 결과 potential core의 길이가 줄어들면서 표면을 따라 유동의 운동량 수송과 열전달을 증가시킨다고 보고 하였다.

3.2 표면을 따른 국소열전달계수 분포

오목표면을 따른 국소열전달계수의 분포를 나타내기 위하여 $Re=11,000, 23,000$ 및 $50,000$ 과 $L/d=2, 4, 8$ 인 경우에 본 실험에서 구한 오목표면($D/d=8$)의 국소열전달계수 분포를 Fig.4와 Fig.5 및 Fig.6에 나타내었다.

Fig.4에서 보듯이 일반적으로 Nu수는 Reynold수가 증가할수록 증가하였고, $L/d=2$ 에서 $Re=23,000$ 과 $Re=50,000$ 인 경우에는 정체점에서 최대값을 갖고 감소하다가 $R/d=1.2$ 에서 Nu수는 다시 증가함을 볼 수 있으며, 또한 층류경계층에서 난류경계층으로의 천이과정에서 발생하는 2차 최대 Nu수는 $R/d=2.0$ 에서 발생하며 Reynold수가 증가할수록 증가함을 알 수 있다.

Fig.5에서 알수있듯이 $L/d=4$ 인 경우에는 2차 최대 Nu수는 $Re=50,000$ 인 경우에만 $R/d=2.0$ 에서 발생하고 $Re=23,000$ 인 경우에는 $R/d=1.3$ 부근에서 기울기만 변하고 있음을 볼수 있으며 Fig.6에서와 같이 $L/d=8$ 인 경우에 표면을 따른 국소 Nu수는 R/d 에 따라 열 경계층의 두께가 점차 커짐에 따라 단조감소(monotonic decrease)하며 $L/d=6$ 과 $L/d=10$ 인 경우에도 같은 결과를 나타내었다.

Fig.7에서는 $Re=23,000$ 일때 $L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10인 경우 오목표면에서의 국소열전달계수 분포를 나타내었다.

그림에서 최대열전달계수는 정체점에서의 Nu수와 같이 $L/d=6$ 에서 발생함을 알 수 있으며 $L/d=2$ 인 경우 $R/d=2.0$ 에서 2차정점이 나타나고 $L/d=4$ 인 경우 $R/d=1.3$ 부근에서 기울기가 변함을 볼수 있는데 이는 본 실험($D/d=8$)의 경우 Reynold수 $Re=11,000, 23,000$ 및 $50,000$ 의 3가지와 충돌표면사이의 거리 $L/d=2, 4, 6, 8$ 및 10의 5가지 경우에 있어서 2차정점이 나타나는 분기점(threshold)은 Fig.4와 Fig.5에서도 나타나듯이 Reynold=23,000 이상과 $L/d=4$ 이하에서 나타남을 볼 수 있다.

일정곡률을 갖는 오목표면($D/d=8$)과 평판($D/d=\infty$)에서의 국소열전달계수 분포를 비교하기 위하여 $Re=23,000$ 일때 $L/d=2, 4$ 및 8일 경우의 국소열전달계수분포를 Fig.8과 Fig.9 및 Fig.10에 나타내었다.

Fig.8과 Fig.9에서 알수 있듯이 곡률이 증가(D/d 의 값은 감소)함에 따라 2차 최대 Nu수는 정체점에

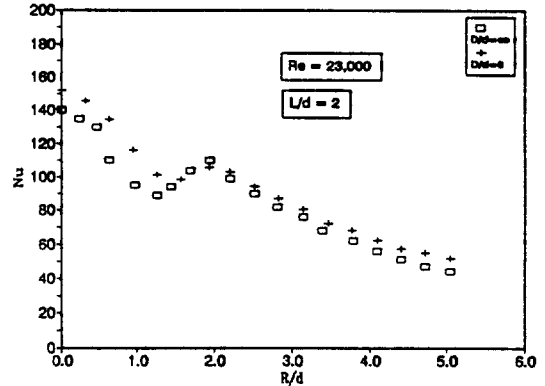


Fig.8 Comparison of Nusselt Number between $D/d=8$ and $D/d=\infty$ for $L/d=2$ and $Re=23,000$.

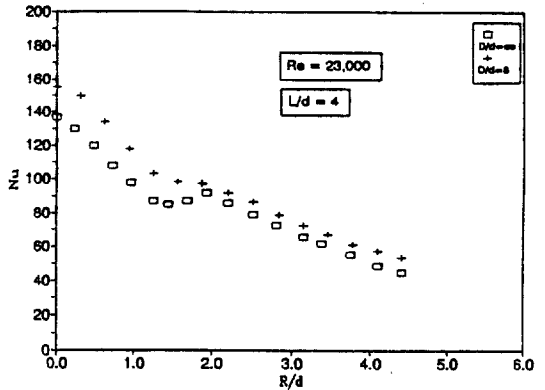


Fig.9 Comparison of Nusselt Number between $D/d=8$ and $D/d=\infty$ for $L/d=4$ and $Re=23,000$.

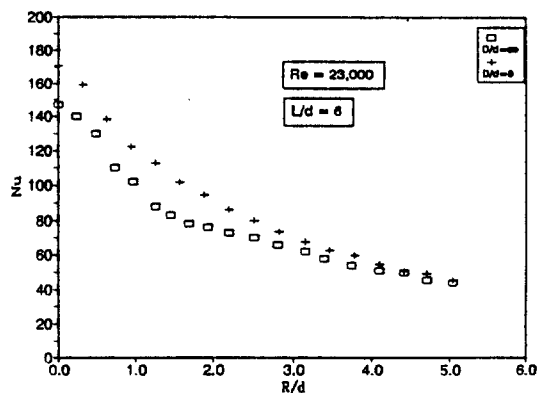


Fig.10 Comparison of Nusselt Number between $D/d=8$ and $D/d=\infty$ for $L/d=6$ and $Re=23,000$.

서의 Nu수에 비하여 그 증가폭이 감소함을 알수 있다. 또한 각 표면위치에서 국소열전달계수는 정체점의 열전달계수와 같이 평균보다 높게 나타남을 알수 있으며 이러한 현상은 표면을 따른 곡률의 영향으로 경계층의 두께를 감소시킴에 따라 난류 강도와 열전달을 증가시키는 결과라고 생각한다.

4. 결 론

본 연구에서는 liquid crystal transient method를 사용하여 $D/d=8$ 의 곡률을 갖는 오목표면에 분사되는 난류원형제트에 대한 국소열전달계수를 3가지의 Reynold수와 5가지의 충돌제트와 분사표면 사이의 거리에 따라 실험하여 측정된 결과 다음과 결론을 얻었다.

1) 정체점에서 $Re=11,000$ 인 경우를 제외하고 정체점을 포함한 모든 영역에서 최대열전달은 충돌제트와 분사표면 사이의 거리 $L/d=6$ 에서 발생하였다.

2) 2차 최대 Nu수는 $L/d=2$ 경우에는 $Re=23,000$ 과 $Re=50,000$ 그리고 $L/d=4$ 의 경우에는 $Re=50,000$ 일때 $R/d=2$ 에서 발생하며 나머지 경우에는 단조감소(monotonic decreasing)하였다.

3) 곡률이 있는 오목표면인 경우 평균보다 열전달계수는 최대 약 18% 정도 높았다.

4) 본 실험에 사용된 liquid crystal transient method는 충돌표면 형상이 복잡한 난류 열전달 현상을 규명하는데 매우 유용하게 사용되어 질 수 있다.

후 기

본 연구는 1992년도 한국과학재단(Korean Science and Engineering Foundatin) 후반기 해외 Post-Doc. program에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다. 또한 본 실험에 많은 도움을 주신 UC Davis 기계공학과 Baughn 교수에게도 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. 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. 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.
4. 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.
5. Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces", Advances in Heat Transfer, Vol.13, pp.1-60.
6. Goldstein, R.J., and Franchett, M.E., "Heat Transfer from a Flat Surface to an Oblique Impinging Jet", Journal of Heat Transfer, Vol.110, pp.84-90, 1988.
7. 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.
8. 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.1-7.
9. Lee, S.J., Lee, J.H., Lee, D.H., and Grief, R., 1993, "Heat Transfer from a Plate to a Fully Developed Axisymmetric Impinging Jet", Enhanced Cooling Techniques for Electronics Application, ASME HTD-Vol.263, pp.11-18.
10. Thomann, H., 1968, "Effect of Streamwise Wall Curvature on Heat Transfer in a Turbulent Boundary Layer", Journal of Fluid Mechanics, Vol.33, pp.283-292.
11. 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.
12. 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.
 13. Gau, C., and Chung, C.M., 1991, “Surface Curvature Effect on Slot-Air Jet Impingement Cooling Flow and Heat Transfer Process”, ASME Journal of Heat transfer, Vol.113, pp.858-864.
 14. Baughn, J.W., and Y X.an, 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.
 15. Vedula, R.P., Metzger, D.E., and Bickford, W.B., 1988, “Effect of Lateral and Anisotropic 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. Schlichting, H., 1979, Boundary Layer Theory, 7th ed., McGraw-Hill, New York.
 17. Kline, S.J., and Mcklintock, F.A., 1953, “Describing Uncertainties in Single Sample Experiments”, Mechanical Engineering, Vol.75, No.1, pp.3-8.