

완전 발달된 원형 총돌제트의 노즐 직경이 열전달에 미치는 영향

이대희* · 원세열** · 이영민*** · 조현노***
(1999년 5월 28일 접수)

The Effect of Nozzle Diameter on Heat Transfer to a Fully Developed Round Impinging Jet

Dae Hee Lee, Se Youl Won, Young Min Lee and Heon No Cho

Key Words: Impinging Jet(총돌제트), Nozzle Diameter Effect(노즐 직경 영향), Nusselt Number (Nusselt 수), Liquid Crystal(액정), Uniform Heat Flux(균일한 열유속), Gold Film Intrex(금박막 필름)

Abstract

The effect of nozzle diameter on the local Nusselt number distributions has been investigated for an axisymmetric turbulent jet impinging on the flat plate surface. The flow at the nozzle exit has a fully developed velocity profile. A uniform heat flux boundary condition at the plate surface was created using gold film Intrex. Liquid Crystal was used to measure the plate surface temperature. The experiments were made for the jet Reynolds number (Re) 23,000, the dimensionless nozzle to surface distance (L/d) from 2 to 14, and the nozzle diameter (d) from 1.36 to 3.40 cm. The results show that the Nusselt number at and near the stagnation point increase with an increasing value of the nozzle diameter.

기호설명

A : 금박막 필름의 면적(m²)
 d : 노즐의 직경(cm)
 f : 금박막 필름의 도금 균일도
 h : 국소 열전달 계수(W/m²K)
 I : 금박막 필름에 공급되는 전류 (A)
 ka : 공기의 열전도도(W/mK)
 L : 노즐과 평판 사이의 거리(m)
 L/d : 노즐과 평판 사이의 무차원 거리
 Nu : 국소 Nusselt 수 $\left(= \frac{h_c d}{k_a} \right)$

Nu_{st} : 정체점 Nusselt 수
 q_c : 전도 열손실(W/m²)
 q_r : 복사 열손실(W/m²)
 q_v : 순수 열유속(W/m²)
 r : 정체점으로부터 유체흐름 방향으로의 거리(m)
 r/d : 정체점으로부터 유체흐름 방향으로의 무차원 거리

Re : Reynolds 수 $\left(= \frac{U_{ce} d}{\nu} \right)$

T_a : 평판 주위의 온도(°C)
 T_j : 노즐 출구의 제트온도(°C)
 T_w : 평판의 벽면온도(°C)
 U_c : 제트 중심선 평균속도(m/s)
 U_{ce} : 노즐 출구의 제트 중심선 평균속도(m/s)
 $\sqrt{u^2}/U_{ce}$: 노즐 출구의 난류강도
 V : 금박막 필름에 공급되는 전압(V)

*회원, 인제대학교 기계자동차공학부

E-mail : mechdhl@ijnc.inje.ac.kr

TEL : (0525)320-3185 FAX : (0525)324-1723

**회원, 인제대학교 대학원 기계공학과

***인제대학교 대학원 기계공학과

그리스문자

- ϵ : 액정과 검정페인트가 코팅된 표면의 방사율
 σ : Stefan-Boltzman 상수(W/m^2K^4)
 ν : 공기의 동점성 계수(m^2/s)

1. 서 론

충돌제트는 열 및 물질 전달율을 증대시키는 데 많이 사용되는 방법 중의 하나로 강판의 냉각, 유리의 템퍼링(tempering), 종이 및 필름의 건조, 가스터빈날개와 전자부품의 냉각, 박막액정표시장치(TFT-LCD)의 제조 등의 산업에 광범위하게 응용되고 있다. 충돌제트에 관한 연구는 주로 레이놀즈 수, 노즐과 충돌면 사이의 거리, 노즐형상, 제트온도와 방향, 다중제트, 교차유동, 충돌면의 형상 등이 유동과 열전달에 미치는 영향을 다루었고, Martin,⁽¹⁾ Down과 James,⁽²⁾ Goldstein 등,⁽³⁾ Viskanta 등⁽⁴⁾에 의해 연구가 수행되었다.

지금까지 대부분의 연구는 평판에서의 충돌제트에 의한 열전달 및 유체유동에 관한 것이었다. Hoogendoorn⁽⁵⁾은 긴 직관과 수축노즐을 사용하여 정체점에서 열전달에 관한 난류의 영향을 액정을 사용하여 연구하였다. Lee 등⁽⁶⁾과 Yan⁽⁷⁾은 평면에 충돌하는 완전 발달된 원형제트에 의한 열전달 계수를 측정하였으며, Goldstein과 Franchett⁽⁸⁾는 경사진 평면에 충돌하는 제트에 대한 열전달을 연구하였다. Lee 등⁽⁹⁻¹³⁾은 블록 및 오목면에서의 충돌제트에 의한 열전달 및 유체유동특성을 액정을 이용하여 연구하였다. 그리고, 많은 원형충돌제트에 의한 열전달 연구에서 서로의 실험결과를 비교하는데 있어 충돌제트의 노즐 직경이 다름에도 불구하고 서로의 결과를 비교하는 것을 볼 수 있다. 이것은 충돌제트의 유동과 형상 그리고 열전달간의 상사성이 존재한다는 가정하에 같은 L/d 와 Reynolds 수에서는 노즐 직경에 관계없이 Nusselt 수가 같다고 추론하였기 때문이다. 그러나, 이러한 상사성에 대해서 정확하게 규명한 연구는 볼 수 없었다. 따라서, 본 연구는 실제로 충돌제트의 유동과 형상 그리고 열전달 간의 상사성이 적용될 수 있는가를 규명하고자 한다.

본 연구에서는 긴 원형직관으로부터 분사되는 완전 발달된 공기가 평판에 수직으로 충돌할 때 정체점에서의 열전달 계수를 열전대와 액정센서 및 금박막이 코팅된 폴리에스터(gold film Intrex)

를 이용하여 측정하였다. 또한, 자유제트의 중심선 속도와 난류강도의 분포도 함께 측정하였다. 실험시 같은 Reynolds 수에서 노즐과 평판사이의 거리 및 노즐 직경의 변화가 열전달에 미치는 영향을 연구하기 위하여 Reynolds 수는 23,000으로 고정하였으며, 노즐과 평판사이의 거리는 $L/d=2$ 에서 14까지, 노즐 직경은 $d=1.36, 2.16, 3.40$ cm로 변화시켰다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험실 공기는 2마력의 원심송풍기에 의해 먼저 내경 6.35 cm의 동관으로 보내어지며 동관은 ASME 오리피스 유량계가 설치된 내경 6.3 cm 아크릴관과 연결되어 있으며, 노즐 직경의 변화에 따른 열전달 및 유체 유동의 변화를 측정하기 위해서 각각 세 개의 서로 다른 내경 $d=1.36, 2.16, 3.40$ cm와 길이가 각각 $Z=79, 125, 197$ cm의 아크릴관을 설치하였다. 이때 아크릴관 길이에 대한 내경의 비는 $Z/d \cong 58$ 로서 세 경우 모두 같다. 따라서, 노즐 끝에서 분사되는 제트는 완전 발달된 난류의 속도분포를 갖게 된다.

제트의 온도를 측정하기 위하여 지름이 0.025 cm인 Chromel-Constantan(E type) 열전대를 사용하였다. 또한, 실험모델의 주위 온도를 측정하기 위하여 동일한 형태의 열전대 2개를 사용하였다. 그리고, 이 실험에 사용된 열전대는 데이터 수집 시스템(STRAWBERRY TREE/DATA Shuttle 12-bit A/D board & IBM-486/PC)에 연결되어 있으며, 오차가 $\pm 0.01^\circ C$ 인 항온조(NESLAB/RTE- 221D)내에

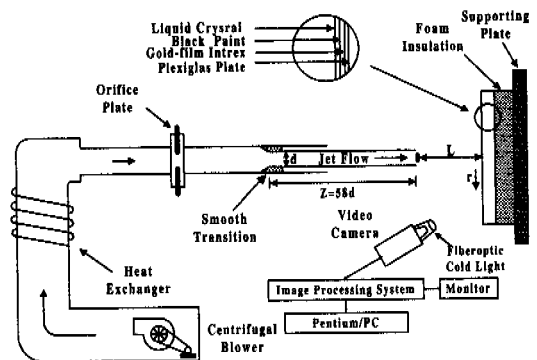


Fig. 1 Schematic diagram of the test apparatus for the jet impinging on the flat plate surface

서 백금온도센서에 대하여 보정하였다. 원관은 피스톤-실린더 형태로서 노즐 출구와 평판 중심 사이의 거리를 0.05 cm의 정확도로 최대 L= 48 cm까지 변화시킬 수 있다. 열교환기는 노즐로부터 분사되는 제트온도를 조절하기 위하여 사용되며, 주위의 온도와 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 내에서 유지되도록 한다. 송풍기의 속도는 인버터로 조절되며, 유량은 ASME 오리피스와 $\pm 0.001 \text{ cm(water column)}$ 의 정확도를 가지는 마이크로 마노미터(MERIAM/34MB2-TM)로 측정하였다.

실험모델은 두께가 5 mm인 Plexiglas판 위에 단면적이 0.0576 m²인 Intrex를 접착시켰으며, 구리전극을 Intrex 양단에 붙였다. 이때 구리전극과 Intrex면 사이의 전기적 접촉을 돕기 위하여 은이 함유된 페인트를 칠하여 전류가 흐를 때 균일한 열유속 경계조건이 Intrex의 표면에 형성되도록 하였다. 전극은 용량 100 V, 7 amps인 직류 전원 공급장치를 사용하여 Intrex에 공급되는 전류를 조절할 수 있게 하였다. 그리고, air-brush를 사용하여 Intrex의 표면에 검정페인트와 액정(미세캡슐 형태의 "R35C1W")을 균일하게 코팅하였다.

특정한 색깔의 정확한 측정과 시각적인 오차를 최소화하기 위하여 액정의 교정이 필요한데, 액정의 교정실험에는 16.8 cm×7.5 cm×5 cm의 크기를 갖는 알루미늄 각주를 사용하였다. 이 각주에 Chromel-Constantan(E type) 7개의 열전대를 전면으로부터 0.1 cm 깊이와 측면으로부터 2 cm 깊이의 위치에 등간격으로 심었다. 알루미늄 각주의 전면에는 검정페인트와 액정을 air-brush를 사용하여 균일하게 도포 하였다. 그리고, 각주의 상부에는 100 W 용량의 막대형 열원을 장착하여 DC 전력을 공급하여 적절한 온도를 유지할 수 있도록 하고, 하부의 약 4 cm 정도는 항온수조에 담겨져 적당한 온도구배를 형성시켰다. 실험중 각주 표면으로부터의 열전달을 최소화하기 위해서, 스티로폼 단열재로 각주를 커버시켰다.

막대형 열원에 적당한 전력을 공급하고, 항온수조의 온도를 알맞게 조절하면 각주 표면에는 거의 1차원적인 온도구배가 형성된다. 온도가 정상 상태에 도달했을 때 비디오 카메라(SONY/CCD-FX410)와 프레임 그레버(DARIM/Visible Office)와 Pentium PC로 구성되어 있는 디지털 칼라영상처리장치를 사용하여 화상을 처리하였으며, 이와 같은 장치를 이용하여 화상을 처리할

경우 비디오 카메라의 각도뿐만 아니라 광원의 각도 및 거리에 따라 화상과 색상이 왜곡될 수 있으므로, 액정의 보정시 광원과 비디오카메라의 위치, 각도 등을 실험시와 같이 유지시켜 실험함으로써 화상과 색상의 왜곡을 최소화시켰다. 한편, 디지털 영상처리장치를 이용하여 실험할 때 복사에 의한 열전달을 최소화하기 위하여 광섬유를 사용한 미 발열체 백색광원을 사용하였다. 좀더 자세한 액정의 교정법에 관해서는 정영석 등⁽¹²⁾에 나와있다.

제트의 중심선 속도와 난류강도를 측정하기 위해서는 정온형 열선풍속계(TSI IFA-300)와 TSI-1210 I형 열선을 사용하였다. 열선의 출력신호는 IFA-300 신호 조절기를 통해 5 kHz에서 low-pass 필터된 후, 10 kHz의 주파수로 14 bit A/D 컨버터를 가지는 D6000에 의해 디지털화 된다. 데이터는 20번의 앙상블로 4096개를 취하여 평균값으로 저장되었다.

3. 실험해석

본 연구에서는 Lee 등^(10,11,14)에 의하여 사용된 측정기법을 사용하였는데, 액정의 칼라를 인식하여 표면 온도를 측정하는 방법으로 도금된 Intrex를 전기적으로 가열시킴으로써 벽면에 균일한 열유속 조건을 형성할 수 있으며, 열유속은 Intrex를 지나는 전류를 바꿈으로써 조절할 수 있다. 이때 일정한 열유속 조건하에서 Intrex 표면상의 특정한 칼라(등온선)는 열전달계수로 나타내어지며, 열유속이 바뀔 때 칼라의 위치도 바뀐다. 특정한 칼라위치에서의 국소 열전달계수는 다음 식 (1)으로 계산된다.

$$h = \frac{q_v}{T_w - T_j} \quad (1)$$

여기서, T_w 는 액정의 칼라에 의해 측정되는 벽면 온도, T_j 는 제트온도, 그리고 q_v 는 Intrex의 전체 열유속으로부터 열손실을 제외한 순수 열유속이다.

$$q_v = \frac{fIV}{A} - \epsilon\sigma(T_w^4 - T_a^4) - q_c \quad (2)$$

여기에서 f는 Intrex에서 국소적인 전기가열과 평균가열의 비로서 Intrex의 도금코팅의 균일도를 나타낸다. Lee 등⁽¹⁴⁾은 Intrex의 시험부를 코팅이 비교적 균일한 roll의 중앙부에서 취할 경우 코팅의 균일도가 98%에 이른다는 사실을 알았다. 실제

로 본 실험의 경우 Intrex roll의 중앙부의 코팅이 균일한 부분을 사용하였으므로 $f=1$ 이라고 가정하여 열유속을 계산하였다. 그러나, 추후 열유속의 불확실도 계산시 금코팅의 균일도가 불확실도에 미치는 영향을 고려하기 위하여 식 (2)에 f 를 그대로 두었다. 실험모델 벽에서의 전도 열손실 q_c 는 표면에서의 전체 가열에 비하여 매우 작기 때문에 0으로 가정하였으나, 전체적인 불확실도 해석에 필요하기 때문에 식 (2)에 또한 포함시켰다. Nusselt 수의 불확실도 해석은 20 : 1 odd (95%)의 신뢰도를 기본으로 하였으며, Kline과 Mcklintock⁽¹⁵⁾의 방법을 이용하였다. 계산한 결과, Table 1에 의하면 $Re=23,000$, $L/d=6$, $r/d=0$ 과 5.09일 경우에 Nusselt 수의 불확실도는 각각 2.90%와 2.96%이다. 이때 도금의 균일도 f 의 불확실도가 가장 크게 나타났고, 액정에 의해 측정된 평판의 벽면온도가 그 다음으로 나타났다.

4. 결과 및 토의

본 연구와 같은 실험장비를 이용하여 이전에 측정된 노즐출구에서의 제트유동은 완전 발달된 속도분포를 갖고 있음이 증명되었다(Lee 등⁽¹⁴⁾). 따라서, 본 연구는 완전 발달된 원형제트가 평면에 수직으로 충돌할 때의 정체점에서의 열전달 계수 및 자유제트에서의 중심선 속도와 난류강도 분포를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

Figs. 2와 3은 각각 $Re=23,000$ 에서 노즐 직경이 $d=1.36, 2.16, 3.40$ cm일 경우 자유제트의 중심선 속도와 난류강도를 보여주고 있다. Giralt 등⁽¹⁶⁾은 노즐출구에서부터 중심선 속도(U_c)가 노즐출구

속도 (U_{ce})의 98%에 해당되는 지점까지의 거리를 포텐셜 코어라고 정의하였다. 따라서, 이 정의에

따르면 Fig. 2는 $d=1.36, 2.16, 3.40$ cm일 경우 포텐셜 코어의 길이가 각각 노즐 직경의 약 2.3, 2.7, 3배에 해당하고 있음을 알 수 있다. 즉, 슬롯 노즐일 경우에는 노즐의 폭이 증가할수록 2차원적인 와류의 형성이 커질 뿐만 아니라 외부공기의 혼합이 증가함으로 인해 일반적으로 포텐셜 코어 영역이 짧아짐을 보여주고 있으나, 원형 노즐일 경우에는 2차원적인 와류가 형성되지 않으며 노즐의 직경이 증가할수록 유체의 고유한 momentum과 유동량이 커짐으로 인해 포텐셜코어 영역은 증가한다. 또한, 이것은 같은 L/d 에서 노즐직경이 클수록 제트의 momentum이 커짐을 보여준다. Fig. 3은 포텐셜코어 영역내에서의 난류강도가 약 4~5% 정도를 유지하고 있음을 보여주고 있다. 하지만, 일반적으로 포텐셜 코어를 벗어난 영역 이후의 난류강도는 주위공기와 혼합이 증가되어 급격히 증가하며, 노즐 직경이 클수록

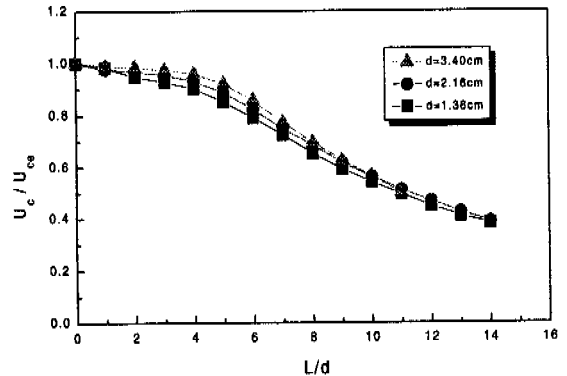


Fig. 2 Mean velocity profiles along the free jet centerline for $Re=23,000$

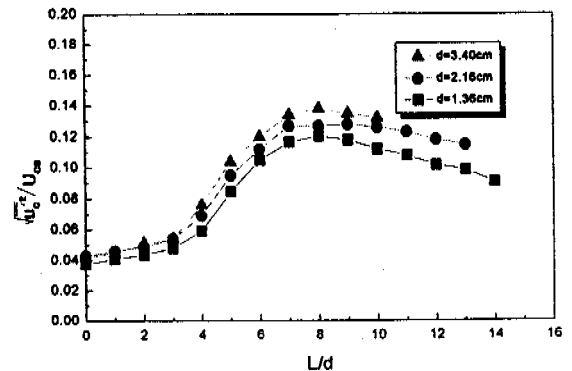


Fig. 3 Turbulence intensity profiles along the free jet centerline for $Re=23,000$

Table 1 nusselt number uncertainty analysis

X_i	Value	δX_i	$\left(\frac{\partial X_i}{\partial Nu} \frac{\partial Nu}{\partial X_i} \right) \times 100(\%)$	
			$r/d = 0$	5.09
f	1	0.02	2.00	2.00
T_w	35.5(°C)	0.20	1.44	1.43
T_i	21.5;21.4(°C)	0.15	1.04	0.95
q_c	0(W/m²)	22.17;6.55	0.97	0.89
V	34.88;19.48(V)	0.125	0.36	0.64
I	3.79;2.17(A)	0.01	0.26	0.46
d	2.16(cm)	5.0×10^{-3}	0.22	0.23
ϵ	0.9	0.05	0.19	0.60
A	0.0576(m²)	5.0×10^{-5}	0.09	0.09
Total Nu uncertainty		$\delta Nu / Nu = 2.90$	2.96	

난류강도가 커짐을 보여준다. 이와 같이 노즐출구에서 노즐 직경이 커짐에 따라 난류강도가 증가함을 제시한 본 연구는 양근영 등⁽¹⁷⁾이 제시한 슬롯제트에서의 노즐 폭의 증가에 따른 난류강도의 연구결과에서 찾아볼 수 있으며, 관 직경이 커짐에 따라 절대난류강도($\sqrt{u^2}/U_{ce}$)가 커지는 이유는 같은 Re 내에서 관 직경이 커질수록 관 출구에서의 평균속도(U_{ce})가 작은 직경의 관에 비해서 상대적으로 작아지기 때문이다. 한편, 노즐직경의 관에 따른 난류강도의 크기는 $L/d \cong 8$ 까지는 L/d 가 증가함을 볼 수 있다. 그리고, 제트가 완전히 발달된 지점 $L/d=8$ 이후에서의 노즐직경에 따른 난류강도의 크기는 서서히 감소함을 알 수 있다 따라서, 노즐의 직경이 증가할수록 유체의 유동량이 커지고 주위로부터 활발한 공기의 유입이 증가함으로 인하여 하류에서 보다 급격하게 난류강도가 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 4는 $Re=23,000$ 일 때 노즐 직경의 변화와 노즐과 평판사이의 거리(L/d)에 따른 정체점 Nusselt 수 (Nu_{st})의 변화를 보여주고 있다. 노즐직경이 $d=3.40$ cm 일 때의 Nu_{st} 는 $d=2.16$ cm보다 최대 10%가 증가함을 볼 수 있으며, $d=1.36$ cm 일 때보다는 최대 19.1%가 증가함을 볼 수 있다. 본 연구 결과를 $d=4.03$ cm의 원형직관 노즐을 이용한 Yan⁽⁷⁾의 결과와 비교할 때 열전달 경향은 거의 비슷하며 Yan의 경우가 본 연구의 $d=3.40$ cm의 경우보다 Nu_{st} 값이 최대 4.7%가 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 노즐 직경이 커짐에 따라 보다 많은 유량의 유체유동이 있고, 유체가 지니고 있는 momentum이 커지며, 난류강도가 증가하기 때문이라고 파악되며, 이러한 현상을 Figs. 2 와 3에서 볼 수 있다. 한편, Gau 와 Chung⁽¹⁸⁾은 그들의 연구에서 노즐 직경이 커질수록 평판에 부딪히는 와류(Vortex)의 사이즈가 커짐으로 인하여 열전달이 증가함을 보여주고 있다. 그리고 $L/d \cong 7$ 에서의 Nu^* 값이 가장 높은 이유는 자유제트의 후기 천이영역에서 제트의 중심속도가 거의 변하지 않을 뿐만 아니라 난류강도도 거의 최대치에 도달되기 때문이다.

Lee 등⁽¹⁴⁾과 Kataoka⁽¹⁹⁾는 Nu_{st} 값이 $L/d=6 \sim 8$ 에서 최대가 된다고 보고하였다. 이것은 본 연구에서 측정된 제트의 중심선 상에서의 유동장 결과 (Figs. 2 and 3)와도 잘 일치함을 볼 수 있다. 그리고, 노즐 직경에 따른 영향은 $L/d=7$ 을 지남

에 따라 점차적으로 줄어들기 시작하여 $L/d=18 \sim 20$ 지점에 도달하면 노즐 직경에 따른 영향은 거의 보이지 않을 것으로 파악된다.

Fig. 5는 $Re=23,000$ 에서 노즐 직경의 변화에 따른 국소 Nusselt 수를 측정 한 것이다. 이 결과에 의하면, 노즐과 충돌면사이의 거리가 먼 경우 ($L/d \geq 6$)에는 충돌영역($r/d \cong 0.5$ 까지)에서는 노즐 직경이 클수록 Nusselt 수가 커짐을 볼 수 있다. 그러나, 충돌영역을 지나 벽면제트 영역에서는 노즐 직경에 대한 Nusselt 수의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 제트가 충돌한 이후에는 경계층의 재발달 과정에서 자신의 본래의 성질을 잃어버리기 때문이다. 그러나, 노즐과 충돌벽면의 거리가 아주 적을 경우($L/d \leq 1$)에 양근영 등⁽¹⁷⁾의 실험결과를 보면 노즐 폭의 영향이 벽면제트영역까지 영향을 미치고 있음을 볼 때, 본 실험에서도 노즐과 충돌벽면간의 거리가 아주 적을 경우

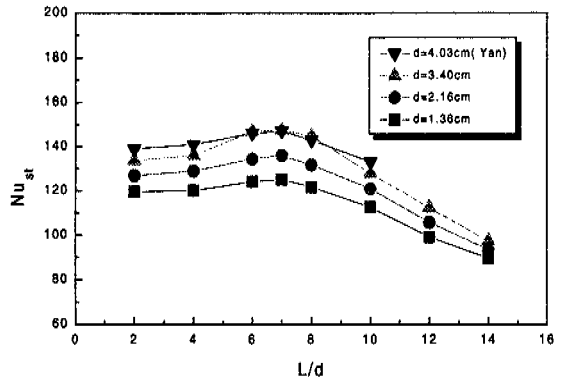


Fig. 4 The Effect of Nozzle diameter on the stagnation point Nusselt number for $Re=23,000$

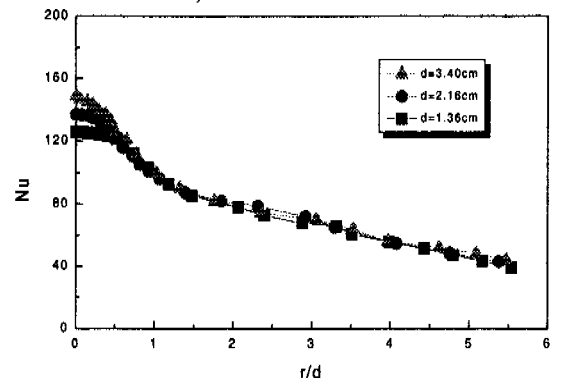


Fig. 5 The Effect of nozzle diameter on the local Nusselt number distributions for $L/d=6$ and $Re=23,000$

에는 노즐직경의 영향이 벽면제트영역까지 나타날 것으로 생각된다

5. 결 론

본 연구는 완전 발달된 원형제트를 균일한 열 유속을 가지는 평면에 충돌시킬 때, $Re=23,000$ 와 노즐출구와 평판사이의 거리 ($L/d=2\sim 14$) 와 노즐 직경($d=1.36, 2.16, 3.40$ cm)의 변화에 따른 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

실험결과, $d=3.40$ cm일 때의 정체점에서 Nusselt 수(Nu_{st})는 $d=2.16$ cm보다 최대 10%가 증가함을 볼 수 있으며, $d=1.36$ cm일 때보다 최대 19.1%가 증가함을 볼 수 있었다. 이러한 경향이 나타나는 이유는 노즐 직경이 커짐에 따라 보다 많은 유량의 유체유동이 있고, 유체가 지니고 있는 momentum이 커지며, 또한 난류강도가 증가하기 때문이라고 볼 수 있다. 그리고, Nu_{st} 는 무한정 증가하는 것이 아니라 $L/d=7\sim 8$ 지점을 지나면서 점점 감소하기 시작하여 $L/d=18\sim 20$ 지점에 도달하면서 노즐 직경의 변화에 따른 Nu_{st} 의 영향이 소멸될 것으로 추측된다. 한편, 노즐 직경에 따른 국소 Nusselt 수는 노즐과 충돌면간의 거리가 $L/d \geq 2$ 보다 클 경우에 충돌영역($r/d \leq 0.5$)에서는 노즐 직경이 클수록 Nusselt 수가 커지나, 벽면제트 영역에서는 노즐 직경의 영향이 거의 없음을 알 수 있는데, 이것은 제트가 충돌한 이후 경계층의 재발달 과정에서 고유한 성질을 잃어버리기 때문이다. 또한, 노즐과 충돌면 간의 거리가 $L/d \leq 1$ 경우에는 벽면제트영역까지 노즐직경의 영향이 나타날 것이다.

참고문헌

- (1) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, New York, Vol. 13, pp. 1~60.
- (2) Down, S. J., and James, E. H., 1987, "Jet Impinging Heat Transfer-A Literature Survey," *ASME paper No. 87-H-35*.
- (3) Goldstein, R. J., Behbahani, A. I., and Heppelmann, K. K. 1986, "Streamwise Distribution of the Recovery Factor and The Local Heat Transfer Coefficient to an Impinging Circular Air Jet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 8, pp. 1227~1235.
- (4) Viskanta, R., 1993, "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Frame Jet," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 111~134.
- (5) Hoogendoorn, C. J., 1977, "The Effect of Turbulence on Heat Transfer at Stagnation Point," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 1333~1338.
- (6) Lee, D. H., and Grief, R., Lee, S. J., and Lee, J. H., 1995, "Heat Transfer from a Surface to a Fully Developed Axisymmetric Impinging Jet," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 772~776.
- (7) 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.
- (8) Goldstein, R. J., and Franchett, M. E., 1988, "Heat Transfer From a Flat Surface to an Oblique Impinging jet," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 84~90.
- (9) Chung, Y. S., Lee, D. H., Lee, J. S., 1999, "Heat Transfer Characteristics of an Axisymmetric Jet Impinging on The Rib-Roughened Convex Surface," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2102~2110.
- (10) Lee, D. H., Chung, Y. S., and Kim M. G., 1999, "Turbulent Heat Transfer from a Convex Hemispherical Surface to a Round Impinging Jet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 1147~1156.
- (11) Lee, D. H., Chung, Y. S., Won, S. Y., 1999, "The Effect of Concave Surface Curvature on Heat Transfer from a Fully Developed Round Impinging Jet," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 2489~2497.
- (12) 정영석, 이대회, 이준식, 1998, "표면조도를 가지는 볼록한 면에 충돌하는 제트에 의한 열전달 계수 측정," 대한기계학회논문집, 제22권, 제

- 3호, pp. 373~385.
- (13) 이대회, 원세열, 이준식, 1999, "표면조도를 가지는 오목한 면에 충돌하는 원형제트에 의한 열전달 측정," 대한기계학회논문집, 제23권 제6호, pp. 734~743.
- (14) Lee, D. H., Chung, Y. S., and Kim, D. S., 1997, "Turbulent Flow and Heat Transfer Measurements on a Curved Surface with a Fully Developed Round Impinging Jet," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 18, No. 1, pp. 160~169.
- (15) Kline, S. J., and McKlintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (16) Giralt, F., Chia, C., and Trass, O., 1977, "Characterization of the Impingement Region in and Axisymmetric Turbulent Jet," *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 16, pp. 21~28.
- (17) 양근영, 최만수, 이준식, 1997, "평판제트 충돌냉각에서 슬롯제트 폭의 변화에 따른 제트 유동장 및 열전달 특성에 관한 연구," 대한기계학회 1997년도 춘계학술대회논문집(B), pp. 619~624.
- (18) 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. 857~864.
- (19) Kataoka, K., Sahara, R., Ase, H. and Harada, R., 1987, "Role of Large Scale Coherent Structures in Impinging Jet Heat Transfer," *Journal of Chemical Engineering-Japan*, Vol. 20, pp. 71~76.