

# 원형제트출구 전단류 조절에 따른 제트충돌면에서의 열전달 특성(1) - 균일속도분포제트 -

이창호\* · 김영석\* · 조형희\*\*  
(1997년 9월 26일 접수)

## Heat Transfer Characteristics on Impingement Surface with Control of Axisymmetric Jet ( I ) - Uniform Velocity Distribution Jet -

C. H. Lee, Y. S. Kim and H. H. Cho

**Key Words :** Impinging Jet (충돌제트), Jet Vortex Control (제트와류조절), Jet Suction Ratio (제트 흡입비), Heat Transfer Coefficient (열전달계수), Uniform Heat Flux (균일열유속)

### Abstract

The present experiment is conducted to investigate heat transfer characteristics on the impinging surface with secondary flows around circular nozzle jets. The changed vortex pattern around jet affects significantly the flow characteristics and heat transfer coefficients on the impinging surface. The effects of the jet vortex control are also considered with jet nozzle-to-plate distances and main jet velocities. The vortex pattern around a jet is changed from a convective instability to an absolute instability with a velocity suction ratio of the main jet and the secondary counterflow. With the absolute instability condition, the jet potential core length increases and the heat transfer on the impinging surface is increased by small scale eddies. The region of high heat transfer coefficients is enlarged with the high Reynolds number due to increasing secondary peak values. The effect of suction flows is influenced largely with collars attached the exit of the jet nozzle because the attached collar guides well the counterflow around the main jet.

### 기 호 설 명

- |                                |                                       |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| $A$ : 열전달 표면 면적                | $q_w$ : 벽 열유속                         |
| $D$ : 제트출구 직경 (24.6 mm)        | $R$ : 흡입 속도비 ( $=\Delta U/2\bar{U}$ ) |
| $h$ : 국소열전달계수                  | $\hat{R}$ : 전열판의 전기저항                 |
| $I$ : 전류                       | $Re$ : Reynolds수 ( $=UD/\nu$ )        |
| $k$ : 공기의 열전도계수                | $r$ : 반경방향 좌표                         |
| $L$ : 갓(Collar) 길이             | $T_{aw}$ : 단열벽온도                      |
| $Nu$ : 국소 Nusselt수 ( $=hD/k$ ) | $T_j^o$ : 제트의 총온도                     |
|                                | $T_w$ : 벽온도                           |
|                                | $t$ : 전열판의 두께                         |
|                                | $U_1$ : 주제트의 평균속도                     |

\*회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 연세대학교 기계공학과

- $U_2$  : 흡입유동의 평균속도  
 $\bar{U}$  : 전단류 평균속도(= $(U_1 + U_2)/2$ )  
 $\Delta U$  : 전단류 속도차이(= $U_1 - U_2$ )  
 $u$  : 제트속도  
 $u'$  : 섭동속도성분(= $\sqrt{u'^2}$ )  
 $W$  : 전열판의 폭  
 $x$  : 유동방향 좌표  
 $\delta X_i$  : 독립변수에서의 불확실성  
 $\rho_e$  : 전열판의 비저항  
 $\nu$  : 동점성계수

## 1. 서 론

충돌제트(Impinging jet)는 국소적으로 높은 열전달 및 물질전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 많은 분야에서 응용되고 있고, 큰 효율성 때문에 그동안 많은 연구가 진행되었다. 주 응용 분야는 가스 터빈의 냉각, 고온 강판과 유리 가공에서의 냉각, 종이와 천의 건조 등이었으나, 최근 들어 컴퓨터의 집적화와 소형화에 따른 국소적인 냉각이 중요시되어 충돌제트가 컴퓨터 칩의 냉각에도 응용되기에 이르렀다. 지난 20~30년동안 제트노즐과 판사이의 간격, 제트노즐의 모양, 충돌판의 곡률 그리고 배열제트(array jets)에서 제트사이의 간격 및 배열방법에 대해서 많은 연구가 진행되었지만 아직도 정확한 유동 및 열전달 해석을 보여주고 있지 않다.

Garçon 등<sup>(1)</sup>은 자유제트가 표면에 충돌할 때 제트출구와 충돌면 사이의 간격에 따라 열전달특성에 난류가 미치는 영향을 보였고, Martin<sup>(2)</sup>은 평판에 충돌하는 제트를 단일 원형 노즐, 단일 슬롯 노즐, 배열 원형 노즐 그리고 배열 슬롯 노즐로 구분하여 각각의 노즐에 대하여 열 및 물질전달량의 특성을 정리하였다. Hoogendoorn<sup>(3)</sup>은 출구에서 완전히 발달된 속도 분포를 가지는 긴 관형제트와 면적이 축소되는 노즐형 제트에 대하여 제트출구와 충돌면 사이의 간격이 작은 경우에, 전체 영역에서 열전달 효과를 보였다. Goldstein 등<sup>(4,5)</sup>은 원형 제트에서 충돌면과 제트사이의 거리에 따른 회복계수(recovery factor)의 분포에 대하여 연구하고, 원형 제트의 배열 간격의 변화에 따른 국소적인 열전달계수를 측정하였다. Stevens 등<sup>(6,7)</sup>은 원형제트의 노즐형상에 따른 속도 및 난류강도 그리고 열전달량의

분포를 구하였다. Kataoka 등<sup>(8)</sup>은 원형 노즐제트 주위에 생기는 주기적인 큰 규모의 와류를 관찰하여 와류의 주기가 충돌면에서의 열전달 효과를 바꾸어 줄 수 있다는 것을 알았다. Lytle과 Webb<sup>(9)</sup>은 노즐직경보다 작은 노즐과 충돌면사이의 거리( $x/D \leq 1.0$ )에서 거리변화에 따른 충돌면에서의 열전달 특성을 연구하였으며, Hung과 Elgenk<sup>(10)</sup>은 원형제트가 분사되는 평판에서  $Re$ 수 및 제트와 충돌면사이의 거리변화에 따른 열전달 특성을 평균열전달계수를 구하여 연구하였다. 이정호 등<sup>(11)</sup>은 서로 다른 네가지 노즐 출구형상에 대하여 노즐과 평판 사이의 거리비를 2, 4, 6, 10으로 변화시키면서 가열평판에서의 국소 열전달계수를 측정하였다. 양근영 등<sup>(12)</sup>은 반원 오목면에 분사되는 슬롯제트의 냉각에 관하여 연구하여 노즐모양에 따른 자유제트의 유동구조 및 그에 따른 충돌면에서의 열전달량을 보여주었으며, 이대희 등<sup>(13)</sup>은 볼록한 반구면에서 원형 충돌제트의 열전달에 관하여 연구하여, 충돌면과 제트사이 거리의 변화 그리고  $Re$ 수의 변화에 따른 효과를 보여 주었다. 조형희 등<sup>(14)</sup>은 노즐 출구에서 균일속도분포와 완전발달된 관유동속도분포를 가지는 두가지 형태의 노즐에 대하여 노즐주위 환형관에서 흡입 또는 분사하는 경우 제트의 속도 및 난류강도 변화를 연구하였다.

본 연구에서는 분사 제트를 조절하여 충돌면에서의 열전달 변화를 보기 위하여 실험을 수행하였다. 분사제트 주위 유체를 약간 흡입함으로써 제트의 유동특성을 변화시켜, 그것이 충돌면에 미치는 열전달 효과에 대하여 실험적인 방법으로 연구를 수행하였다. 제트의 조절은 충돌면에서 열전달 효과를 증가시키기 위하여 제트노즐 출구 주위에서 약간 양의 주제트(main jet)를 흡입함으로써 전단류형성을 변화시켜 와류형성을 조절하였다. 실험에 사용된 분사제트는 완만한 곡률의 노즐형상을 이용하여 출구에서 층류의 균일 속도분포(uniform velocity distribution)를 가지도록 하였고, 주제트 주위유체를 흡입하기 위하여 노즐 주위에 균일간격의 환형관을 설치하여 주위유동을 균일하게 흡입할 수 있도록 하였다.

가시화를 통하여 주와류(main vortex)와 이차와류(secondary vortex)의 형성과 상호작용에 대하여 연구하고 열선유속계(hot-wire anemometer)를 사용하여 조절된 제트 내에서 속도장 및 난류강도의 변화를 측정하였다. 또한 등열유속조건하에서

열전대(T type)를 사용하여 층돌면에서의 흡입비에 따른 국소적인 열전달계수분포를 구하였다. 흡입을 통해 제트 주위에 형성되는 와류를 조절할때 층돌면에서의 열전달에 미치는 영향을 관찰함으로써 제트조절을 통하여 더 높은 열전달 효과를 얻을 수 있는 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 유동설비

본 실험은 제트출구 주위에 설치된 환형관을 통하여 분사제트를 흡입함으로써 제트주위에 형성되는 와류를 조절하고자 장치를 설계하였다. 실험장치는 송풍기, 열교환기, 오리피스 유량계, 플레넘(plenum chamber), 노즐 및 등열유속 조건의 층돌판 등으로 구성되며, 전체적인 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다.

분사제트유동을 만들기 위해서 3.7 kW의 송풍기를 사용하였으며 연속적인 유량 조절을 위하여 인버터를 사용하였다. 흡입된 유동은 주위 공기온도와 동일하도록 하기위하여(0.2℃ 이내) 열교환기를 사용하였고 유량측정을 위해 오리피스 유량계를 사용하였다. 오리피스 유량계는 1"압력탭과 4개의 서로 다른 직경비를 가지는 오리피스판을 사용하여 유속을 측정하였으며, 검증을 통해 1% 오차이내에

서 유량을 측정할 수 있었다. 이후 유동은 요동성분을 줄이기 위해 커다란 플레넘을 지나게 되고 출구에서 균일한 속도분포를 가지는 유동을 얻기위해 완만한 곡률을 가지는 큰 수축비의 노즐을 통하여 분사된다. 노즐을 안정되게 수직으로 유지하기 위하여 철제구조물에 장착하였으며, 정확한 수직이송을 위해 뒤쪽 지지부에 슬릿을 두어 눈금자를 이용하여 노즐출구와 층돌면사이의 거리를 조절할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 노즐의 전체적인 형태를 나타내고 있는데, 플레넘에서 공급되는 공기는 확대각 14°의 원뿔형 디퓨저를 사용하여 확장시켰는데 디퓨저 내에서의 유동안정을 위하여 디퓨저 입구, 중간 및 출구에 작은 간격의 망(#24: SUS304)을 설치하였다. 디퓨저 출구에 연결된 관은 내경이 175 mm이고 길이는 500 mm로 유동안정 및 균일한 분포를 얻기 위하여 두께 75 mm의 허니콤(honeycomb)을 설치하였으며, 그 다음으로 노즐수축부 전에 고운 망을 설치하였다.

노즐은 유선형의 곡률(두 개의 3차식)을 사용하여 완만하게 수축하도록 하였다.<sup>(15)</sup> 노즐면적 수축비는 50 : 1의 크기로 좁으므로써 균일 출구 속도분포를 가질 수 있도록 하였다. 여기서 노즐출구 직경은 24.6 mm로 하였으며 두께는 제작상의 어려움 때문에 2 mm정도로 약간 두껍게 제작하였다. 노

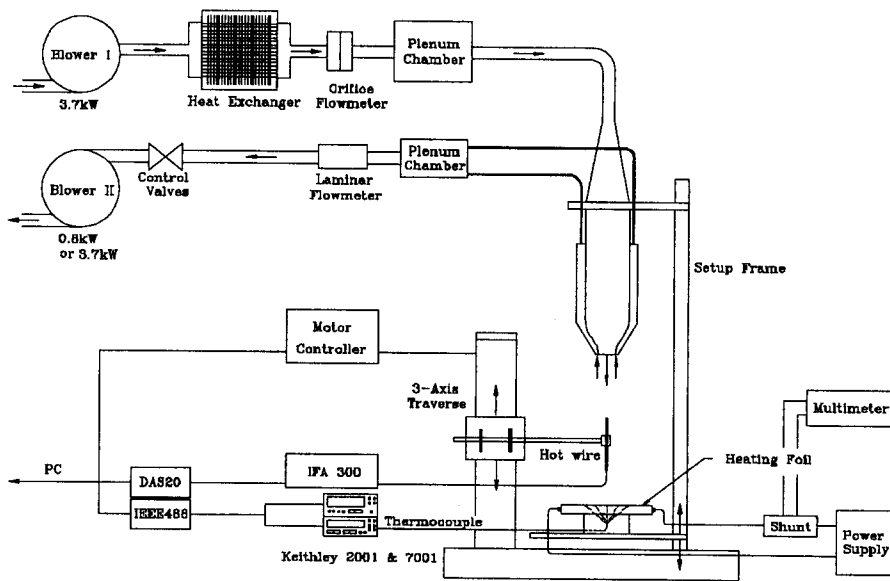


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

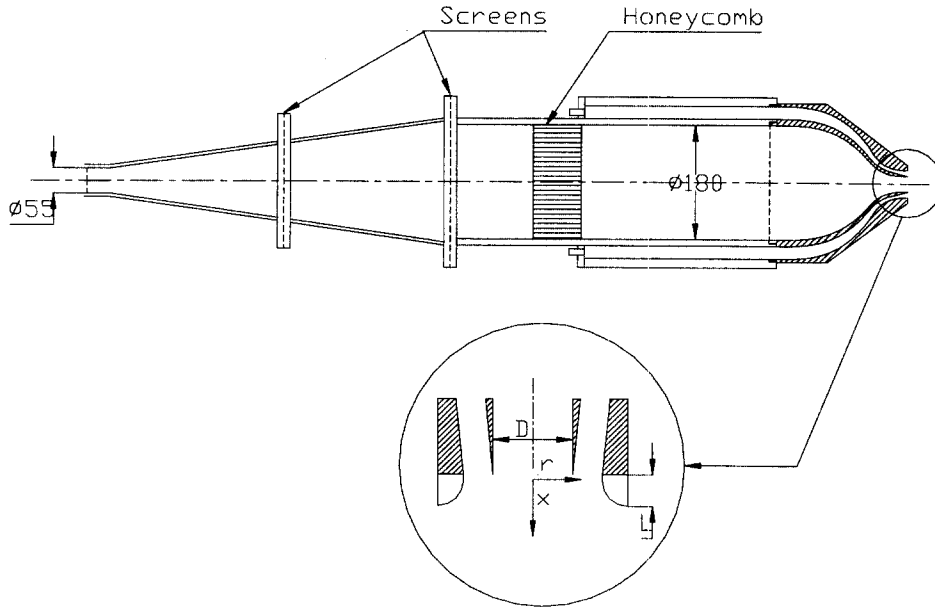


Fig. 2 Cross section and coordinate system of circular nozzle jet exit.

즐 두께를 완만하게 증가하도록 하여 노즐출구 주위의 환형관에서 흡입하는 유동과 전단류를 잘 형성하도록 하였다. 분사제트 주위에 전단류를 만들어 속도비를 조절함으로써 와류형성을 제어하여 제트의 안정성, 속도분포 및 난류성분의 변화를 고찰할 목적으로 제트노즐 출구에 환형관을 설치하였다. 가능한 안정된 전단류를 얻기 위하여 제작된 환형관은 Fig. 2에서 보여주고 있고 설치된 환형관을 통하여 제트주위유동의 흡입 또는 분사하는 속도비를 변화시킨다. 환형의 유로를 만들기 위하여 노즐외벽도 3차식 곡률로 제트노즐과 같은 모양으로 가공하여 설치하였다. 환형노즐의 유로 폭은 9.4 mm(0.38D)로 만들었으며 그 끝에는 약간 폭이 큰 환형 플레넘을 설치하였다. 이 환형 플레넘은 다시 커다란 원통형 플레넘과 8 mm내경의 고무관 12개를 사용하여 연결하였다. 원통형 플레넘은 유량을 측정할 수 있는 층류유속계(laminar flowmeter)와 연결하였다. 층류유속계는 송풍기와 연결되었는데 경우에 따라서 0.8 kw와 3.7 kw용량의 송풍기를 사용하였다. 유량제어는 송풍기와 층류유속계 사이에 설치되어 있는 제어용 밸브 및 송풍기 인버터를 사용하였다. 이 분사장치로 노즐출구에서의 평균속도  $U_1=6$  m/s에서  $U_1=42$  m/s까지(출구직경기준  $Re=10,000$ 에서  $Re=70,000$ 까지) 실험 수행이 가능하다.

환형관의 출구부근에는 이차유동의 유로를 안내할 목적으로 깃을 설치하였으며 깃의 길이변화에 따른 효과를 보고자 하였다. 깃의 길이는 0.4D, 0.8D로 두가지 종류를 각각 설치하였다.

주유동과 흡입유동의 속도비는  $R=\Delta U/2\bar{U}$ 라고 정의한다. 이때  $\Delta U$ 는 전단류의 속도차( $U_1-U_2$ )이고  $\bar{U}$ 는 두 유동의 평균속도( $\frac{1}{2}(U_1+U_2)$ )이다.  $R=1.0$ 인 경우는  $U_1$ (주유동)만이 존재하고  $U_2$ (이차유동)가 없는 경우이고,  $R<1.0$ 인 경우는  $U_1$ 과  $U_2$ 의 방향이 같은 경우로 환형관에서 분사되는 것을 의미한다.  $R>1.0$ 이면  $U_1$ 과  $U_2$ 의 방향이 서로 다른 경우로 환형관을 통해 흡입되는 것이다.

## 2.2 전열판 및 열전달계수 측정방법

생각되는 충돌면에서의 열전달계수를 측정하기 위하여 열유속을 일정하게 만든 후 제트를 충돌시키며 충돌면에서의 표면 온도분포를 측정하였다. Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 등 열유속조건을 만들기 위하여 두께가 25.4 $\mu$ m인 스테인레스 스틸판을 사용하였으며, 스테인레스 스틸판( $k=15$  W/mK)의 비저항값( $\rho_e$ )은 약  $106 \times 10^{-8} \Omega m$ 이며 이 전열판을 가열하기 위하여 100A까지의 고전류를 낼 수 있는 변압기를 사용하였다. 스테인레스 스틸판은 2 mm의 얇은 단열판(laminated plate,  $k=$

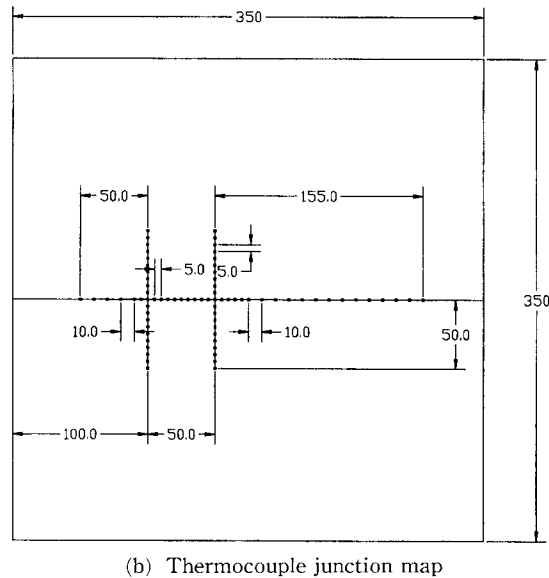
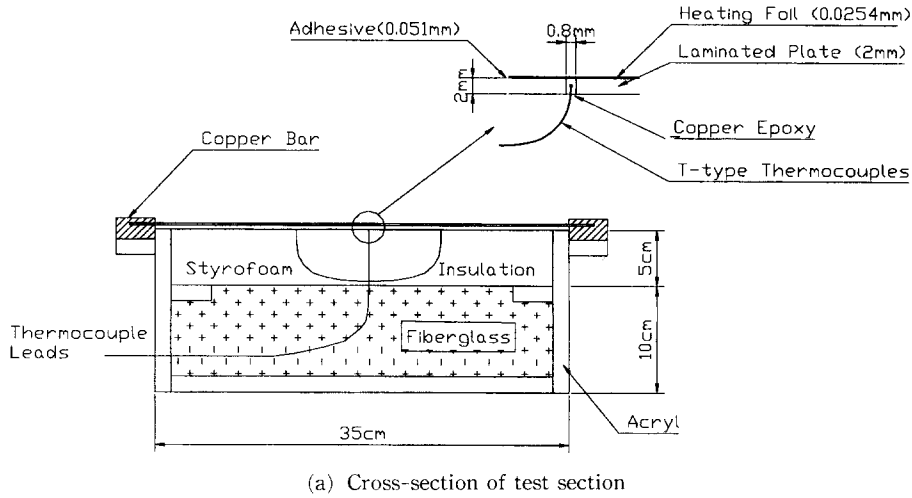


Fig. 3 Heat transfer coefficient measuring device.

0.09 W/mK)에 두께 51 $\mu$ m의 양면 접착테이프( $k=0.03$  W/mK)로 밀착되어 있고, 온도를 측정하고자 하는 위치에 직경 0.8 mm의 구멍을 뚫어 열전대를 스테인레스 스틸판 밑에 설치하였으며, 열전대의 접착을 위해서는 열이 잘 전달되는 구리에 폭시를 사용하였다. 열손실을 최소로 하기 위하여 단열판 밑면에 두께 50 mm의 압축 스티로폼( $k=0.028$  W/mK)과 유리섬유( $k=0.046$  W/mK)를 이용하여 단열하였다. 전열판(스테인레스 스틸)에 균일하게 전류를 가하기 위하여 양 끝면에 두꺼운 구리막대를 접착시키고 각각 3지점에 변압기와 전선

을 연결하였다.

총돌면의 온도분포는 정체점으로부터 30개의 열전대를 일정간격으로 설치하여 온도분포를 측정하였으며, 대칭성을 확인하기 위하여 정체점에서 수직되게 10개씩의 열전대를 더 두어 온도 분포를 검사하였다. 측정된 온도는 스위칭 시스템(Keithley model 7001)과 멀티미터(Keithley model 2001)에 의하여 기록되며, GPIB 보드를 통하여 컴퓨터(IBM PC)에 저장하였다.

일정 열유속조건에서 벽면에서의 온도( $T_w$ )와 벽면단열 온도( $T_{aw}$ )를 측정하면 국소열전달계수는

다음식에서 구할 수 있다.

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_{aw}} \quad (1)$$

여기서 제트의 유속이 작기 때문에 벽면 단열벽면 온도  $T_{aw}$ 는 분사제트의 온도( $T_j^o$ )와 거의 비슷한 값을 갖는다. 최대실험속도( $U_1=42$  m/s)에서 동온도(dynamic temperature)는  $0.88^\circ\text{C}$ 이다. 그렇기 때문에 열전달계수는 다음식을 이용하여 계산하는 것이 편리하다.

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_j^o} \quad (2)$$

여기서  $q_w$ 는 측정면 양단에서의 전류( $I$ )를 제공하는 값과 측정면의 저항( $\bar{R}$ )을 곱한 값에서 측정면에서 단열재면을 통한 전도 열손실을 뺀 값을 가리키는데, 단열재의 열전도계수가 스테인레스 스틸의 열전도도에 비하여 매우 작기 때문에 무시(50A에서 전도에 의한 열손실은 약 0.08%인)할 수 있으므로 이러한 손실은 발열량 계산시 포함하지 않았다.

$$q_w = I^2 \frac{\bar{R}}{A} = \left(\frac{I}{W}\right)^2 \frac{\rho_e}{t} \quad (3)$$

여기서  $A$ 는 가열되는 전열면의 면적이고,  $W$ 와  $t$ 는 스테인레스 스틸판의 폭과 두께를 나타낸다. 무차원 열전달계수인  $Nu$ 수는 다음 식에서 계산할 수 있다.

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{q_w}{T_w - T_{aw}} \frac{D}{k} \quad (4)$$

여기서  $k$ 는 냉각공기의 열전도계수이다.

$Nu$ 수를 결정하는데 있어서의 불확실성 해석 결과를 Kline과 McClintock이 제시한 방법<sup>(16)</sup>을 토대로 계산하였다. 본 실험에서  $L/D=0.8$ ,  $R=$

1.3,  $Re=33,500$ 일 때,  $Nu$ 수의 오차는 약  $\pm 3.0\%$ 로 나타났으며, 등열유속조건을 만드는 전류( $I$ )가 가장 큰 오차를 유발하는 것으로 평가되었다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 가시화 결과

##### 3.1.1 유막법(Oil and Lampblack Method)

어느 정도의 점도를 가진 기름과 미세한 탄소 분말의 혼합액을 충돌면에 칠하고 제트를 분사하면 유동에 의해서 생기는 표면 전단력을 따라 탄소 입자들이 움직이게 되고 결국 그 입자의 궤적은 제트가 충돌면에 가한 국부적인 전단력의 방향을 나타내게 되므로 이 방법을 사용하여 조절된 분사제트가 면에 충돌하는 경우 어떠한 유동특성을 갖는지를 연구하였다. 이 경우 최적의 유동가시화 결과를 얻을 수 있도록 기름 및 탄소 분말을 일정 비율로 혼합하여 혼합액의 점도와 농도를 조절하였고 또한 실험시간에 따라 결과가 달라질 수 있으므로 실험시간을 일정하게 유지하면서 각각의 흡입비별 실험을 수행하였다.

$Re=33,500$ 인 경우 충돌제트의 효과를 보기 위하여 표면유동가시화를 수행하였다. Fig. 4(a)는  $x/D=4$ ,  $L/D=0.8$ ,  $R=1.0$ 일 때 충돌면에서의 유동현상을 보여주고 있는데 제트중앙에 거의 노즐의 직경과 비슷한 크기로 정체영역(stagnation region)이 보이고 있다. 이 영역에서는 알려진 바와 같이 경계층이 일정하게 유지되면서 축방향 속도성분들이 반경방향으로 바뀌기 시작한다.<sup>(1)</sup> 이 주위 영역에서는 유체가 반경방향으로 가속되면서 탄소입자가 밀려나가 하얗게 보이고 있으며 이 부

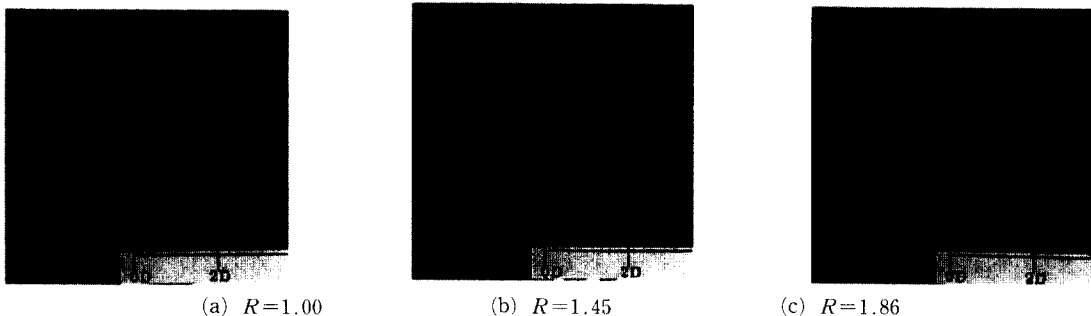


Fig. 4 Flow visualization by oil and lampblack method( $x/D=4$ ,  $L/D=0.8$ ).

분에서 가속에 의해 경계층이 감소하게 된다. 분사 제트 전단층에 형성된 제트의 강한 주와류에 의해  $r/D \cong 1.5$  부근 표면 근접지역에서 이차와류(비정상 압력구배에 의한 비정상 박리)가 생성되며, 표면에서 제트유동은 난류로 천이된다. 이 위치에서 약간 진한색의 띠가 형성됨을 표면유동가시화하여 보여주고 있다. 그 이후부터는 벽제트가 형성되어 밖으로 퍼져나감에 따라서 일정 영역(전단류가 유막층을 밀어낼 수 있는 곳)까지 다시 희게 보임을 알 수 있다. Fig. 4(b)는  $R=1.45$ 로 제트주위에서 공기를 약간 흡입하는 경우인데, 위의 경우와 마찬가지로 정체영역 이후에 가속구간이 보이고  $R=1.0$ 인 경우에 비해 각 구간들이 더욱 뚜렷한 모양을 보여주고 있다. 이는 주제트 주위에 형성된 와류가 절대불안정성으로 바뀌면서 제트코어 중심까지 침투하는 것이 늦어지는 것을 보여준다. 천이 이후에 벽제트 영역의 결과는  $R=1.0$ 보다는 확대되었으나 이차분사의 경우만  $R=0.45$ 에<sup>(17)</sup> 비해서는 그다지 넓어지지 않는 것이다. Fig. 4(c)는  $R=1.86$ 으로  $R=1.45$ 에 비해 흡입을 더 강하게 해주는 경우 코안다효과(Coanda effect)에 의해서 오히려 주제트가 흡입에 의해 분산되어 포텐셜코어가 짧아지므로 정체점도 잘 관찰되질 않고 바닥에서 영역 구분이 모호해지며 제트에 영향받는 영역도 가장 작다.

### 3.1.2 연기열선법 (Smoke-Wire Method)

전단류의 유동특성을 관찰하기 위해서 직경이 0.1 mm의 텅스텐선을 알루미늄 지지대에 추를 달아 고정시켜 열팽창에 의해 선이 휘는 것을 방지할 수 있도록 하였다. 면봉을 이용하여 텅스텐선에 기름(engine oil)을 얇게 바른 후 변압기를 이용해 1 cm 당 0.4~0.5V를 순간적으로 가해주면 열선에 뱃혔던 기름방울들이 증발하는데 증발한 연기는 유동을 따라서 움직이게 되고 이로써 유동이 갖는 와류의 크기나 형성위치와 같은 특성을 볼 수 있게 된다. 연기열선 가시화는 저속의 정상유동에서 유맥선(streakline)을 가시화하는데 적당하므로 분사 속도( $U_1$ )를 3.5 m/s로 하였다.

이 방법은 연기가 잘 보이도록 해야 하므로 주위를 매우 어둡게 한 후 제트의 양옆에서 2개의 500 W 할로젠 램프를 가는 홈 slit을 통해 비추어 유동의 단면을 따라 움직이는 연기를 순간적으로 촬영하였다. 여기에 사용된 카메라는 Nikon FM2이



Fig. 5 Flow visualization by smoke wire method ( $x/D=2$ ,  $R=1.0$ ,  $Re=3,500$ ).

며, Kodak TMAX 흑백필름(ASA 3200/6400)을 사용하였다.

자유제트를 조절하기 위하여 환형관으로부터의 주위유동 흡입 및 이차제트 분사에 대한 유동가시화는 조형희 등<sup>(14)</sup>에서 보여주고 있는데,  $R=1.0$ 인 경우(주제트만 분사), 이미 알려진 바와 같이 분사 제트 외각에서 주위 정체유체와의 전단류가 형성됨으로써 와류가 형성되고 하류로 진행하면서 발전되어 그 크기가 커진다. 결국 제트중심까지 영향을 미침으로써 제트의 포텐셜코어가 없어짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 전단류의 대류불안정성(convective instability)에 기인하여 와류가 발전 및 결합(vortex pairing)하여 그 크기가 커짐을 알 수 있었다. 분사제트주위의 환형관에서 유체를 흡입하는 경우,  $R=1.45$  ( $U_2/U_1=-0.18$ )에서는 2차 유동이 없는  $R=1.0$ 일 때와 전혀 다른 와류의 양상을 보여주었다.  $R=1.0$ 일 때와 같이 노즐출구의 전단류에서 형성된 와류가 하류로 진행하면서 발전하기 보다는 각 지점에 와류가 형성 발전하는 양상을 가지게 된다. 이 결과는 제트유동이 전단류의 속도차이에 기인하는 절대불안정(absolute instability)영역에 속함을 보여주고 있다. 이와 같이 와류유동은 주제트 유동의 조절(흡입)정도에 따라서 크게 바뀔 수 있다.

Fig. 5는 충돌제트의  $R=1.0$ 인 경우 충돌면에 생성되는 와류의 형태를 보여주고 있는데 노즐과 충돌면 사이의 거리가  $2D$ 인 경우이다. 이미 Fig. 4에서 보인 바와 같이 정체점에서부터 반경방향으로 가속되던 유체는 자유제트영역에서 생성되었던 와류가 바닥에 부딪치면서 나타나는 주와류에 의해 바닥면에 이차와류가 생성되게 되고 이로인한 비정상 역압력구배로 천이가 촉진되게 된다. 이때 생성되는 작은 크기의 와(eddy)들로 인해 표면에서의 열전달이 급격히 상승하게 되고 이후 제트는 벽제

트영역으로 퍼져나가게 된다.

### 3.2 열전달계수 측정 결과

유동장 및 난류제트유동은 열선유속계(TSI IFA 300)를 사용하여 측정하였으며, 열선유속계의 측정값은 피트관을 이용하여 검증하였다. 실험에 사용된 열선유속계는 I형 센서를 갖고 있는 CTA(constant temperature anemometer)이다. 열선유

속계에서 측정된 측정값은 DAS20 board를 통하여 컴퓨터(IBM PC)에 저장되고 난류강도 및 평균속도는 같은 지점에서 1초 간격으로 1024개씩 3072개의 측정값을 받아들여 계산하도록 하였다.

노즐출구에서의 속도분포는 Fig. 6에서 보여주고 있다. 대부분의 영역에서 일정한 값을 가지며 노즐벽 근처에서 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이때의 난류강도는 벽근처의 전단층에서 1.4%이고 대부분 영역에서 0.6% 이내의 값을 갖는 층류제트 유동이다.

제트조절에 따른 난류성분 변화를 자유제트 영역에 대하여 Fig. 7에서 보여주고 있다.

환형관에서 주제트 주위공기를 흡입( $R > 1.0$ )하는 경우 중심부의 난류강도 감소에 의해 포텐셜코어가 길어지는 효과를 볼 수 있었고 전단영역( $r/D \sim 0.5$ )에서 난류성분은 크게 증가됨을 볼 수 있다. 이와 같이 제트주위의 와류특성조절에 따라서 제트의 유동이 크게 바뀌게 됨을 알 수 있다.

조절되지 않는 제트( $R=1.0$ )에 대하여 노즐출구와 충돌면사이의 간격을 변화시키면서 충돌면에서 열전달계수를 측정하였다. Fig. 8은 그 결과를 보여주는데 노즐출구와 충돌면사이의 간격이 작은 경우( $x/D=2$ ) 두 개의 극대점이 존재하는 것을 보여주고 있다. 정체점( $r/D=0$ )에서 극소값을 갖는데 이것은 작은 간격에 따라 제트의 포텐셜코어가 존재함으로써 정체유동을 형성함에 기인한다. 정체점에 형성된 층류경계층이 가속되면서 경계층 두께가 얇아서 열전달 계수는 증가하여  $r/D=0.5$ 에서 극대점을 가지게 된다. 그후 경계층이 발달하면서

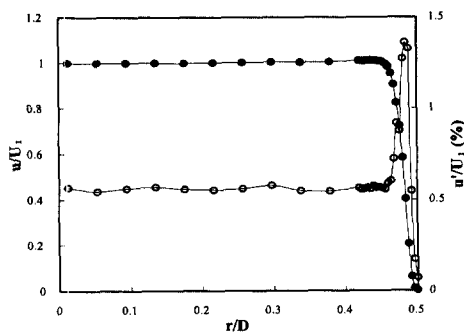
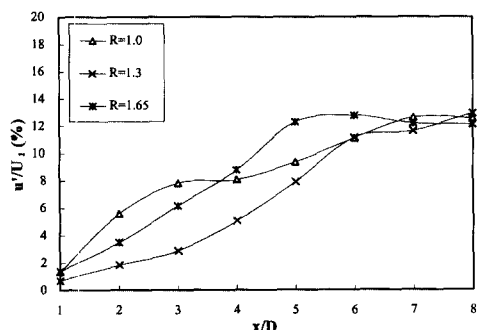
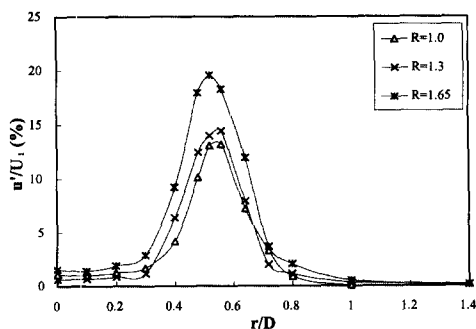


Fig. 6 Radial distributions of velocity and turbulent intensity at jet exit ( $Re=33,500$ ).



(a) Axial direction ( $r/D=0$ )



(b) Radial direction ( $x/D=1$ )

Fig. 7 Turbulent intensity distributions of free jet ( $L/D=0.8$ ,  $Re=33,500$ ).

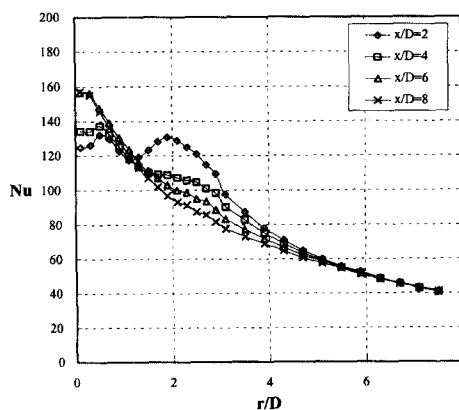


Fig. 8 Local heat transfer coefficients for impinging jet without suction ( $L/D=0.8$ ,  $R=1.0$ ,  $Re=33,500$ ).



열전달계수는 감소하게 된다.  $r/D \approx 1.0$ 에서 다시 증가하기 시작하여  $r/D \approx 1.9$ 에서 이차극대점을 가지게 되는데 이것은 층류경계층 유동이 난류경계층으로 천이됨으로써 열전달 증가로 생각할 수 있다. 또한 제트주위에 형성된 주와류가 하류로 이동하면서 천이적인 역압력 구배를 형성함으로써 충돌면  $r/D \approx 1.5$ 인 지점에서 이차와류가 형성된다. 이것은 Fig. 4에서 보여준 표면유동장 가시화에서 간접적으로 알 수 있다. 이와 같은 이차와류의 형성은 경계층 유동을 혼합시키므로 열전달을 증가시키고 경계층을 쉽게 천이시킬 것이다.

이차 극대점 이후 충돌제트 유동은 벽제트를 형성하면서 유동면적 증가에 따른 속도감소 및 경계층 발달에 기인하여 열전달 계수가 단조 감소하게 된다. 이는 Hoogendoorn의 결과와 일치한다.<sup>(3)</sup>

제트노즐출구와 충돌면사이의 간격이 증가하여  $x/D=4$ 인 경우 자유제트 속도측정에서 알 수 있듯이 아직 어느 정도 포텐셜코어를 유지하고 있기 때문에 정체점영역에서 극소값을 갖는다. 이 결과  $x/D=2$ 일 때에 비하여 완만하지만  $r/D \approx 0.5$ 에서 극대값을 가진다. 하지만 정체영역에서 열전달 계수의 절대값은  $x/D=2$ 일 때 보다 높다. 그 이유는 주제트의 난류강도의 증가에 기인한다. 이 경우 명확한 이차 극대점을 가지지 않고 곡선의 기울기가 평평한 영역이  $r/D \approx 2$ 인 지점에 존재한다. 이것은 하류로 진행하면서 주와류의 강도가 약해져서 이차와류의 형성이 미약하기 때문인 것으로 사료된다. 이후 벽제트 영역에서는 앞의 경우와 유사한 열전달계수 값을 가진다. 제트노즐출구와 충돌판사이의 간격이  $x/D=6$ 인 경우 제트 포텐셜코어가 표면충돌하기 전에 발달되었기 때문에  $r/D \sim 0$ 영역에서 정체유동장을 형성하지 않는다. 제트중심( $r/D=0$ )에서 충돌전에 자유제트가 최대속도를 가지게 되며 또한 난류강도도 증가하여 약 15%로 매우 높다. 그 결과  $r/D=0$ 일 때 최대 열전달 계수를 갖게 되며 반경방향으로 단조 감소하게 된다. 이 경우 이차극대점을 갖지 않는 이유로는 정체점에서 유동이 이미 난류경계층유동으로 시작하므로 천이가 일어나지 않으며, 또한 큰 간격에 기인하여 충돌면 근접지역에서 주와류의 강도가 약해져 충돌면  $r/D \sim 1.5$ 영역에서 이차와류가 형성되지 않기 때문인 것으로 사료된다.  $x/D=8$ 인 경우도  $x/D=6$ 인 경우 비슷한 열전달 계수분포를 보여주고 있는데  $r/D=0$ 에서는 약간 높고  $r/D \sim 2.0$ 인 영역에

서는 약간 낮다. 모든 간격에 대하여  $r/D \geq 4$ 인 벽제트 영역에서는 같은 열전달계수 값을 갖는다. 이것은 제트 충돌영역에서는 주제트의 속도 및 난류성분 분포와 와류의 형성이 중요하지만 외각지역에서는 단지 제트운동량에 따라 형성된 벽제트의 운동량에 기인되는 것으로 사료된다. 이런 이유에서 주제트 주위에 형성되는 와류를 조절함으로써 충돌면의 정체영역에서 열전달 효과를 조절하고자 한다. 와류를 조절하기 위하여 제트노즐 주위에 환형판을 설치하여 제트주위 공기를 흡입함으로써 전단류를 조절하고자 하였다.

Fig. 9~12는 각각의 주어진 제트노즐 출구와 충돌면 간격에서 제트주위유동 흡입속도비를 변화시키면서 얻은 국소열전달계수의 분포를 보여주고 있

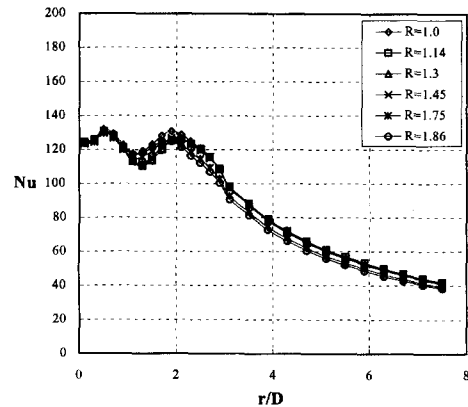


Fig. 9 Local heat transfer coefficients for impinging jet with suction ( $L/D=0.8$ ,  $x/D=2$ ,  $Re=33,500$ ).

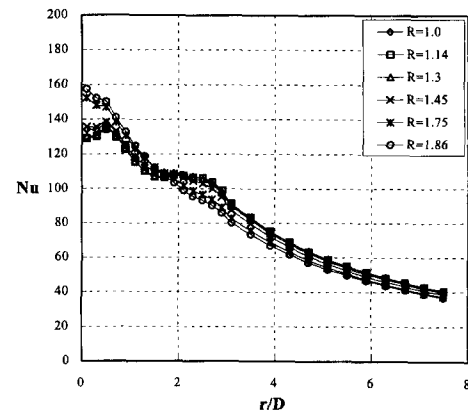


Fig. 10 Local heat transfer coefficients for impinging jet with suction ( $L/D=0.8$ ,  $x/D=4$ ,  $Re=33,500$ ).

다. Fig. 9에서 간격이 작은 경우( $x/D=2$ ) 흡입속도비 변화에 따른 차이가 거의 없다. 이것은 작은 간격에 기인하여 조절된 와류가 전체유동에 큰 영향을 주지 않은 것으로 사료된다. 단지 이차극대점 위치에서 흡입속도비증가에 따라서 열전달계수가 약간 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 10에서 보여주듯이 간격  $x/D=4$ 일 때는 속도흡입비에 따라서  $R=1.75$ 와  $R=1.86$ 일 때 정체영역에서 약 15%~20%정도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 이 경우 정체점에서 극대점을 가지며  $r/D\sim 0.5$ 에서의 극대점은 없다.  $r/D\sim 2.5$ 주위에서  $R\leq 1.45$ 일 때는 약간의 이차극대점영역을 보여주고 있지만  $R=1.75$ 와  $R=1.86$ 의 경우에는 단조 감소하여 다른 경우보다 낮은 값을 갖는다. 정체점에서 멀어져

벽제트를 형성하면서 모든 경우에 거의 비슷한 열전달계수 값을 갖는다. 노즐출구와 충돌면 사이의 간격이 증가하여  $x/D=6$ 일 때는 흡입속도비에 대하여 거의 비슷한 열전달 결과를 보여주고 있다. 단지 흡입속도비가 큰 경우( $R=1.75$ 와  $1.86$ ) 정체점 ( $r/D=0$ ) 영역에서는 약간 높고 이차극대점 영역인  $r/D\sim 2.5$ 영역에서는 감소함을 알 수 있다.  $x/D=8$ 일 때는 Fig. 12에 보여주듯이 대부분의 경우는 비슷한 열전달계수를 가지며 단지 큰 흡입비인  $R=1.75$ 와  $R=1.86$ 일 때 전체적으로 약간 낮은 값을 갖는다. 이것은 큰 흡입에 따라 주제트가 더 빨리 발달함으로써 정체점 영역에서 낮은 속도를 갖기 때문으로 사료된다.

Fig. 13는 정체점에서 주어진 제트노즐출구와 충돌판 사이의 주어진 간격에서 흡입속도비 변화에 따른  $Nu$ 수 변화를 보여주고 있다.  $x/D=2$ 일 때는 흡입속도비에 따라서  $Nu$ 수가 일정한 값을 갖는다. 이것은 가까운 간격 때문에 조절된 주위와류가 중심까지 영향을 주지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 간격이 증가되어  $x/D=4$ 일 때는 흡입속도비가 작은  $R\sim 1.2$ 에서  $Nu$ 수가 약간 감소했다가 흡입속

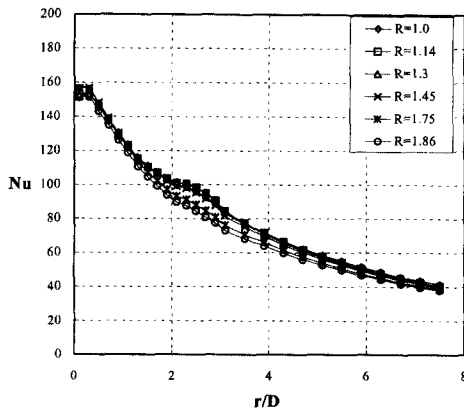


Fig. 11 Local heat transfer coefficients for impinging jet with suction ( $L/D=0.8$ ,  $x/D=6$ ,  $Re=33,500$ ).

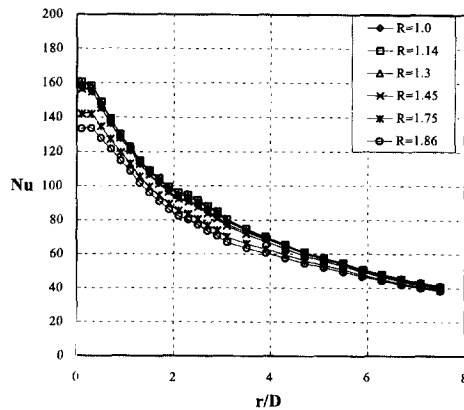


Fig. 12 Local heat transfer coefficients for impinging jet with suction ( $L/D=0.8$ ,  $x/D=8$ ,  $Re=33,500$ ).

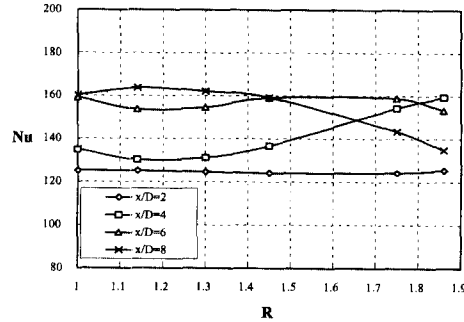


Fig. 13 Local heat transfer coefficients at a stagnation point ( $L/D=0.8$ ,  $Re=33,500$ ).

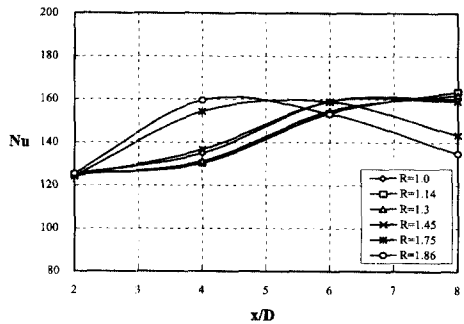


Fig. 14 Local heat transfer coefficients at a stagnation point ( $L/D=0.8$ ,  $Re=33,500$ ).

도비가 증가함에 따라서  $Nu$ 수가 약 20%로 크게 증가한다.  $x/D=6$ 일 때는 흡입속도비가  $R \sim 1.2$ 부근에서 약간 감소하였다가 다시 증가함을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 제트주위유동 흡입에 따라서 제트의 속도는 크게 변화하지 않지만 난류성분은 크게 변화함으로써 충돌면에서 열전달률이 변하게 된다.  $x/D=8$ 에서는 흡입속도비 증가와 함께  $Nu$ 수가 감소하는데, 이 경우는 큰 흡입속도비에서 주제트의 난류성분은 비슷하지만 평균속도성분이 중심에서 감소하기 때문이다.

Fig. 14은 위의 결과를 다른 관점에서 고찰하였다. 이 그래프에서 보여주듯이  $R=1$ 일 때 정체점에서의  $Nu$ 수는 분사제트 노즐출구와 충돌면 사이의 간격 변화에 따라서 증가한다. 흡입속도비 증가에 따라서 최대  $Nu$ 수가 생기는 위치가 간격( $x/D$ )이 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 15는  $x/D=2$ 에서 흡입이 없는 경우 ( $R=1.0$ )에 대하여 제트분사속도( $Re$ 수)변화에 따른  $Nu$ 수의 변화를 나타내고 있다. 저속제트( $Re=10,000$ )에서는 이차극대점없이  $Nu$ 수가 단조 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 제트분사속도가 증가할 수록 이차극대점( $r/D=2.0 \sim 2.5$ )의 열전달이 증가하여  $Re=70,000$ 에서는 정체영역에서의 일차 극대점에서의  $Nu$ 수 보다 약 20% 높은 값을 갖는다. Fig. 16은  $x/D=4$ 에서 흡입이 없는 경우에 대한  $Re$ 수 변화에 따른  $Nu$ 수 변화를 보여주고 있다. 제트노즐 출구와 충돌면사이의 간격 증가에 따라서 제트 포텐셜코어의 발달에 기인하여 이차극대점에서의  $Nu$ 수의 크기가  $x/D=2$ 일 때 보다 크게 감소했음을 알 수 있다. 여기서도  $Re$ 수 증가에 따

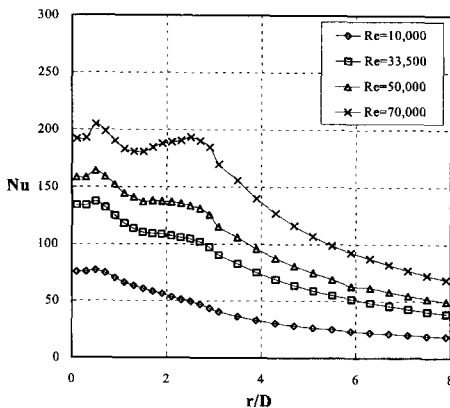


Fig. 15 Local heat transfer coefficients for impinging jet without suction ( $x/D=2, L/D=0.8$ ).

라 이차 극대점에서의  $Nu$ 수는 미약하지만 증가한다.

Fig. 17는  $x/D=2$ 와  $Re=70,000$ 에서 흡입속도비 변화에 따른  $Nu$ 수의 분포를 보여주고 있다. 여기서 알 수 있듯이  $Re$ 수에 관계없이 제트노즐과 충돌면 간격이 작은 경우( $x/D=2.0$ ) 흡입 속도비에 따라서 충돌면에서 열전달율은 일정하다. 고속제트에서 간격이 증가한 경우 ( $Re=70,000, x/D=4$ )에 대한 결과는 Fig. 18에서 보여주고 있다. 이 경우 흡입속도비가 큰 경우 정체영역( $r/D < 2$ )에서  $Nu$ 수가 15%증가됨을 알 수 있다. 이것은 앞에서 언급했듯이 환형관을 통하여 흡입시킴으로써 전단류의 안정성을 바꾸어줌으로써 제트 중심에서의 난류강도가 증가되어 정체영역에서 열전달 증가시키는 것으로 사료된다.

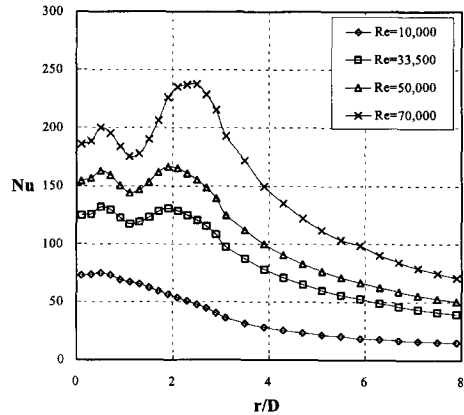


Fig. 16 Local heat transfer coefficients for impinging jet without suction ( $x/D=4, L/D=0.8$ ).

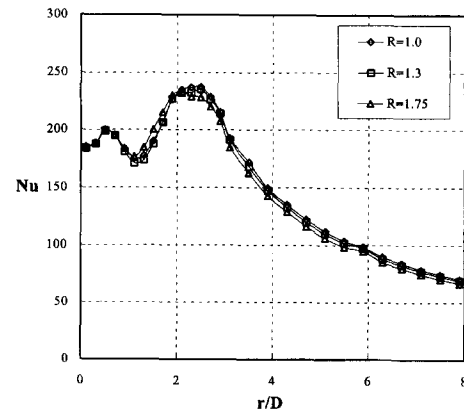


Fig. 17 Local heat transfer coefficients at  $x/D=2$  and  $Re=70,000$  ( $L/D=0.8$ ).

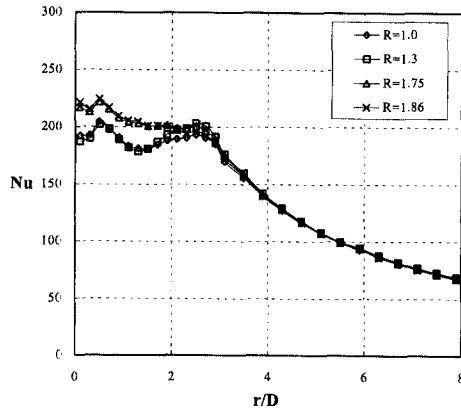


Fig. 18 Local heat transfer coefficients at  $x/D=4$  and  $Re=70,000$  ( $L/D=0.8$ ).

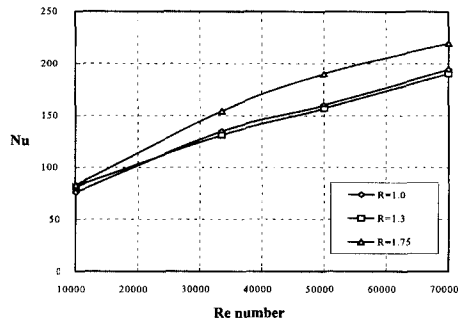


Fig. 19 Local heat transfer coefficients at stagnation point ( $x/D=4$ ,  $L/D=0.8$ ).

Fig. 19은  $x/D=4$ 일 때 정체점에서 주어진 흡입 속도비에  $Re$ 수변화에 따른  $Nu$ 수의 변화를 나타내고 있다. 여기서 알 수 있듯이  $Re=10,000$ 인 경우, 열전달계수값은 작지만 흡입으로  $R=1.0$ 인 경우에 비해 약 9%증가하였고  $Re>40,000$ 에서는  $Nu$ 수 절대값의 상승과 함께 흡입속도비  $R=1.75$ 에서  $Nu$ 수가 약 15%증가됨을 알 수 있다.

## 결 론

본 실험에서는 노즐형 제트주위의 유동을 환형관을 통하여 흡입함으로써 와류유동을 크게 바꾸어 줄 수 있었으며, 이 변화된 와류유동에 따라서 총돌면에서의 열전달 특성에 대하여 연구하였다. 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 흡입비를 조절하여 총돌면에서 이차정점의 열전달률은 작아지지만 정체구역에서의 열전달률은

증가시킬 수 있다.

(2) 흡입비 및 총돌면과 제트사이의 거리변화에 따라 다양한 국소 열전달계수의 분포를 나타내는데,  $Re=33,500$ 일 때 흡입을 함으로써 정체구역에서 더 높은 열전달률을 얻을 수 있었는데, 거리변화에 따라  $x/D=2$ 일 때  $R=1.86$ ,  $x/D=4$ 일 때  $R=1.86$ ,  $x/D=6$ 일 때  $R=1.45$ ,  $x/D=8$ 일 때  $R=1.14$ 로 최적흡입비가 변하였다.

(3)  $Re$ 수가 증가함에 따라 총돌면에서의 열전달이 증가하였고,  $x/D=4$ 일 때  $Re>40,000$ ,  $R=1.75$ 인 경우, 흡입이 없는 경우( $R=1.0$ )에 비해 정체영역( $r/D<2$ )에서  $Nu$ 수가 전체적으로 약 15% 증가함을 보았다.

## 후 기

본 논문은 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 연구분야)에 의한 연구(ME 95-A-06)의 결과이며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Gardon, R. and Akfirat, J. C., 1963, "The Role of Turbulence in Determining the Heat-Transfer Characteristics of Impinging Jets," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 1261~1272.
- (2) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces," *Adv. Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1~60.
- (3) Hoogendoorn, C. J., 1977, "The Effect of Turbulence on Heat Transfer at a Stagnation Point," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 1333~1338.
- (4) Behbahani, A. I. and Goldstein, R. J., 1982, "Local Heat Transfer to Staggered Arrays of Impinging Circular Air Jets," *ASME Paper* 82-GT-211.
- (5) 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.
- (6) Stevens, J., Pan, Y. and Webb, B. W., 1992,

- "Effect of Nozzle Configuration on Transport in Stagnation Zone of Axisymmetric, Impinging Free-Surface Liquid Jets: Part I -Turbulent Flow Structure," *ASME J of Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 874~879.
- (7) Stevens, J., Pan, Y. and Webb, B. W., 1992, "Effect of Nozzle Configuration on Transport in Stagnation Zone of Axisymmetric, Impinging Free-Surface Liquid Jets: Part II -Local Heat Transfer," *ASME J of Heat Transfer*, Vol. 114, pp. 880~886.
- (8) Kataoka, K., Mihata, I., Maruo, K., Suguro, M. and Chigusa, T., 1986, "Quasi-Periodic Large-Scale Structure Responsible for the Selective Enhancement of Impinging Jet Heat Transfer," *Proceedings of the 8th Int. Heat Transfer Conf.* Vol. 3, pp. 1193~1198.
- (9) Lytle, D. and Webb, B. W., 1994, "Air-Jet Impingement Heat-Transfer at Low Nozzle Plate Spacings," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1687~1697.
- (10) Huang, L. M. and Elgenk, M. S., 1994, "Heat-Transfer of an Impinging Jet on a Flat Surface," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1915~1923.
- (11) 이정호, 이상준, 1996, "노즐 형상에 따른 축대칭 충돌분류의 난류열전달 특성 연구," 대한기계학회 '96년도 추계학술대회논문집 B, pp. 74~79.
- (12) 양근영, 최만수, 이준석, 1994, "반원 오목면에 분사되는 제트충돌 냉각에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 '94년도 추계학술대회논문집 (II), pp. 537~542.
- (13) 이대회, 김무근, 1994, "불룩한 반구면에 충돌하는 원형제트에 의한 열전달," 대한기계학회 '94년도 추계학술대회 논문집 (II), pp. 103~108.
- (14) 조형희, 이창호, 김영석, 1997, "환형관을 통해 조절된 원형제트에서의 유동특성," 한국항공우주학회논문집 제25권, 제6호, pp. 22~33.
- (15) Morel, T., 1977, "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contractions," *J. Fluids Engineering*, Vol. 99, pp. 371~378.
- (16) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (17) 이창호, 조형희, 1997, "주제트 주위의 이차 유동분사에 의한 유동 및 열전달 특성변화," 한국항공우주학회 '97년도 추계학술대회 논문집 pp. 306~312.