

# 원형제트출구 전단류 조절에 따른 제트충돌면에서의 열전달 특성 (2)

- 음향여기된 제트 -

황상동\* · 이창호\* · 조형희\*\*

(1999년 4월 13일 접수)

## Heat Transfer Characteristics on Impingement Surface with Control of Axisymmetric Jet (2)

- With Acoustic Excitation -

Sang Dong Hwang, Chang Ho Lee and Hyung Hee Cho

**Key Words** : Impinging Jet(충돌제트), Vortex Pairing(와류병합), Potential Core(포텐셜코어), Acoustic Excitation(음향여기), Heat Transfer Coefficient(열전달계수)

### Abstract

The flow and heat transfer characteristics on the impingement surface can be controlled by the change of vortex with the acoustic excitation, because the flow characteristics of an impinging jet are affected strongly by the vortices formed at the jet exit. To investigate the effects of acoustic excitation, we measured the velocity, turbulent intensity distributions for the free jet and local heat transfer coefficients on a impingement surface. As the acoustic excitation, subharmonic frequency of excited frequency plays an important role to the control of the jet flow. If the vortex pairings are promoted by the acoustic excitation, turbulence intensity of the jet flow is increased quickly. On the other hand if the vortex pairings are suppressed, the jet flow has low turbulence intensity at the center of the jet. Therefore, the low heat transfer rates are obtained on the impingement plate for a small nozzle-to-plate distance. However, it has high heat transfer rates at a large distance between the nozzle and plate due to the increasing of potential-core length.

### 기호설명

$D$ : 제트출구 직경 (= 24.6 mm)	$T_w$ : 벽면에서의 온도
$H$ : 제트출구와 충돌면사이의 거리	$T_w^u$ : 제트내부 온도
$h$ : 국소열전달계수	$U_j$ : 제트출구 속도
$k$ : 공기의 열전도계수	$u'$ : 섭동속도 성분 ( $=\sqrt{u'^2}$ )
$Nu$ : Nusselt 수 ( $= hD/k$ )	$x$ : 유동방향좌표
$q_w$ : 벽 열유속	$y$ : 충돌면에서 제트출구방향의 좌표
$Re_D$ : Reynolds 수 ( $= U_j D / \nu$ )	$\nu$ : 동점성계수
$r$ : 반경방향좌표	
$St_D$ : Strouhal 수 ( $= fD/U_j$ )	

### 1. 서론

\* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@bubble.yonsei.ac.kr

TEL : (02)361-2828 FAX : (02)312-2159

충돌제트는 충돌면에서 국소적으로 높은 열/물질 전달 효과를 얻을 수 있기 때문에 터빈블레이

드 및 연소기 벽면 등의 고온면 냉각에 효과적으로 이용되어 왔다. 또한 종이 및 천의 건조, 유리의 가공과 컴퓨터의 소형화/집적화에 따른 컴퓨터칩의 냉각에도 응용되고 있다. 충돌제트는 넓은 응용분야와 그 중요성으로 인해 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔다. Gardon 등<sup>(1)</sup>은 제트가 표면에 충돌할 때, 제트출구와 충돌면 사이의 간격변화와 난류가 열전달에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Kataoka 등<sup>(2)</sup>은 원형제트 노즐주위에 생기는 주기적인 큰 규모의 와류를 관찰하여, 와류의 주기가 충돌면에서의 열전달에 큰 영향을 미친다는 사실을 밝혔다.

제트의 유동특성은 제트출구의 초기조건에 매우 민감하게 된다. 이것은 자유전단층(free shear layer)에서 Kelvin-Helmholts 불안정성에 의해 자연스럽게 와류가 생성(roll-up)되고, 생성된 와류 및 와류고리(vortex ring)의 성장과 병합(vortex pairing)이 제트의 유동특성에 큰 영향을 미치기 때문이다. 또한 제트중심에서 속도와 난류강도는 주위에 생성되는 이러한 와류들의 발달에 영향을 받게 된다. 그러므로 노즐출구 주위에 생성되는 와류의 조절을 통해 충돌면에서의 열전달 특성 변화를 기대할 수 있으며, 이에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 그 중 하나가 음향여기(acoustic excitation)로 제트 주위에 자연적으로 형성되는 와류의 기본 주파수(fundamental frequency)나 부조화 주파수(subharmonic)로 음향여기시키는 방법이다. 이 경우 주위 와류는 더욱 증폭되거나 반대로 와류 형성이 억제되어, 제트의 포텐셜코어길이(potential core length) 및 유동특성이 변하게 된다. Crow<sup>(3)</sup>는 제트출구에 일정 주파수와 진폭으로 주기적 여기를 가해 유동의 전단층에서 자연적으로 보이던 불규칙한 요동(jitter)을 감소시킬 수 있었으며,  $St_b=0.3$  부근에서 제트의 와류구조가 가장 강력해지는 것을 발견하여 이것을 최적모드(preferred mode)라 하였다. 제트의 전단층에 주변의 교란을 극복할 정도로 충분한 여기를 하게 되면, 유동은 여기주파수에 의해 지배되는 와류구조에 종속되게 된다. 그리고 와류의 형성과 성장, 병합은 가해진 주파수에 매우 의존하게 된다. Liu<sup>(4)</sup>는 노즐과 충돌면 사이의 거리를 변화시켜가면서 여기된 원형충돌제트에 대하여 유동구조와 열전달 특성에 대해 연구하였다. 제트의 기본주파수나 부조화 주파수로

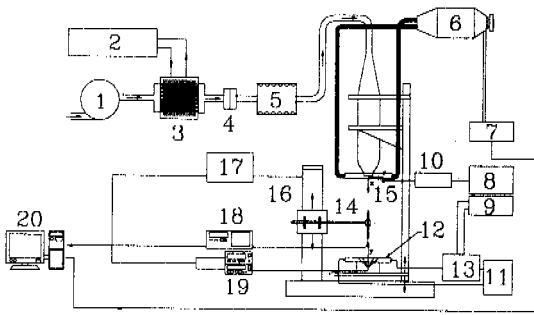
여기하였을 때 벽제트영역에서 국소열전달계수가 증가 또는 감소하는 결과를 얻을 수 있었고, 와류구조와 국소열전달계수 사이의 관계를 유동가시화와 유동의 난류성분 스펙트럼을 측정하여 해석하였다. Zaman<sup>(5,6)</sup>은 제트 중심을 따라 하류로 난류강도를 측정하여 난류강도가 높아지는 최적 모드도 있지만 반대로 난류강도가 여기하지 않은 경우보다 낮아지는 경우도 존재함을 밝혔다. 이때 와류구조에 영향을 미치는 주파수성분은 조화 성분뿐만 아니라 부조화성분도 중요한 역할을 하게 된다.

본 연구에서는 제트주위에 생성되는 와류의 발달 및 병합을 음향여기를 통해 제어함으로써 유동 및 열전달특성 변화를 고찰하였다. 이를 위해 열선유속계(hot-wire anemometer)를 이용하여 속도 및 난류강도를 측정하였으며, FFT(fast fourier transform)를 사용해 와류의 주파수 특성을 분석하였다. 또한 연기열선법(smoke-wire method)을 이용한 유동가시화를 수행함으로써 와류의 거동을 정성적으로 파악하였다. 마지막으로 충돌면에서의 국소열전달계수를 측정하여 자유제트의 유동 특성변화에 따른 충돌면에서의 열전달 효과 변화를 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험은 원형제트 노즐출구에서 형성되는 와류를 조절하여 조절된 제트에 의한 충돌면에서의 열전달특성 변화를 살펴보기 위해 노즐출구 주위에 환형 음향여기장치를 설치하였다. 여기장치를 통하여 노즐출구에 음파를 가함으로써 제트주위에 형성된 전단류의 유동안정성(stability)을 변화시켜 와류의 형성을 제어할 수 있도록 하였다.

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 주제트 유동은 송풍기(3.7 kw)를 사용하여 공급하였으며, 속도제어는 송풍기에 연결된 인버터(inverter)를 사용하였다. 송풍기를 통하여 흡입된 공기는 항온조(constant temperature water bath)와 연결된 열교환기를 지나게 하여 주위 공기와 같은 온도를 갖도록 하였으며, 오리피스 유량계를 사용하여 공급되는 유량을 측정하였다. 오리피스를 지난 공기는 노즐로 공급되기 전에 송풍기에서 생성되는 음향에 의한 영향을 최소화하고 공급공기의 성분성분을 줄일 수 있도록 큰 용량의



- 1 : blower
- 2 : constant temperature water bath
- 3 : heat exchanger
- 4 : orifice
- 5 : silencer
- 6 : woofer speaker
- 7 : amplifier
- 8 : oscilloscope
- 9 : multimeter
- 10 : dB meter
- 11 : power supply
- 12 : impingement surface
- 13 : shunt
- 14 : hot wire
- 15 : acoustic excitation unit
- 16 : 3-axis traverse
- 17 : motor controller
- 18 : hot-wire system
- 19 : temperature measuring system
- 20 : data acquisition system

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

소음기(silencer)를 통과하도록 하였다. 분사노즐은 50:1의 노즐면적 수축비를 가지며 출구에서 균일한 속도분포 및 낮은 난류강도를 얻을 수 있었다.<sup>(7)</sup>

분사제트내의 속도 및 난류성분측정은 열선유속계를 사용하였다. 열선유속계는 피토폴(pitot tube)을 사용하여 보정하였으며, 센서는 I형 텅스텐선을 사용하였다. 열선유속계는 정온형(constant temperature anemometer)으로 평균속도와 유동방향 난류성분의 RMS 값을 얻었다. 열선유속계센서는 3축 이송장치에 고정하여 제트 진행방향과 반경방향으로 이송하면서 측정하였다. 열선유속계에서 측정된 측정값은 DAS-20 board를 통하여 컴퓨터에 저장하였으며, 속도측정 및 FFT에서의 검출률(sampling rate)은 4000 Hz로 하였다. 데이터수는 4096개이고 2000 Hz의 LPF(low pass filter)를 사용하였다.

충돌면에서의 열전달계수는 표면 열유속(heat flux)을 일정하게 만든 후 제트를 충돌시켜 표면 온도분포를 측정하여 구하였다.<sup>(7)</sup> 일정 열유속조건에서 벽면에서의 온도( $T_w$ )와 제트내부에서의 온도( $T_j$ )를 측정하면 열전달계수(heat transfer coefficient)는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

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

여기서  $q_w$ 는 측정면에서의 열유속이다. 따라서 다음 식에 의하여 Nu를 계산할 수 있다.

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{q_w}{T_w - T_j} \frac{D}{k} \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 냉각공기의 열전도계수이고  $D$ 는 제트의 노즐출구 직경이다.

유동에 가해지는 음향은 일정 주파수의 구형파(sine wave)를 주파수발생 프로그램(CoolEdit, Syntrillium Software Corp.)을 사용하여 사운드카드를 통해 생성하고, 생성된 음파를 증폭기를 통해 원하는 음압으로 증폭시켜 200 W 용량의 저음역용 스피커(woofer)로 출력하였다. 생성된 음파는 8개의 내경 10 mm 고무관을 통하여 제트출구 주위에 설치한 환형 여기장치로 들어가게 되고, 이 음파를 이용하여 제트의 전단류에 형성되는 와류를 제어하게 된다. 출구에서의 음압은 95 dB로 유지하였으며, 오실로스코프를 이용하여 출력되는 파형과 주파수를 확인하였다. 여기되는 음향 이외의 잡음을 최대한 줄이기 위하여 스피커는 흡음재를 이용하여 완전히 주위와 차단하였고 노즐주위도 흡음재를 이용하여 방음하였다.

실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock이 제시한 방법<sup>(12)</sup>을 이용하여 수행하였다. 표면에서의 열전달계수 불확실성 해석결과 95% 신뢰도에서 상대오차는 4.8%로 계산되었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 와류의 주파수 특성

제트의 와류생성과 병합의 주파수 특성은 열선유속계로 측정된 속도값을 FFT 처리함으로써 파악할 수 있었다. 이렇게 파악된 유동의 주파수특성을 통해 와류를 적절한 주파수로 여기하여 유동특성의 변화를 가져올 수 있었다. Fig. 2는  $ReD=34,000$ 인 경우 제트 중심에서 유동방향을 따라 측정한 FFT 결과이다. 여기하지 않은 유동의 기본주파수 특성(Fig. 2(a))을 보면, 노즐출구 근처에서( $x/D=1.0$ ) 두 개의 극대값이 존재하는 것을 알 수 있다. 하나는 약 1,000 Hz ( $St_b \approx 1.2$ )로써 제트노즐 출구에서 생성되는 와류의 기본주파수이고 다른 하나는 이의 절반에 해당하는 약 500 Hz ( $St_b \approx 0.6$ )의 와류 병합에 의해 생성되는 주파수이다. 기본주파수(1000 Hz)는 자유제트 초기의 불안정성에 의해 생성되는 와류의 고유한 주파수 특성이다. 생성된 와류는 하류로 진행하면서 병합의 과정이 일어나기 시작하는데, 이러한 과정

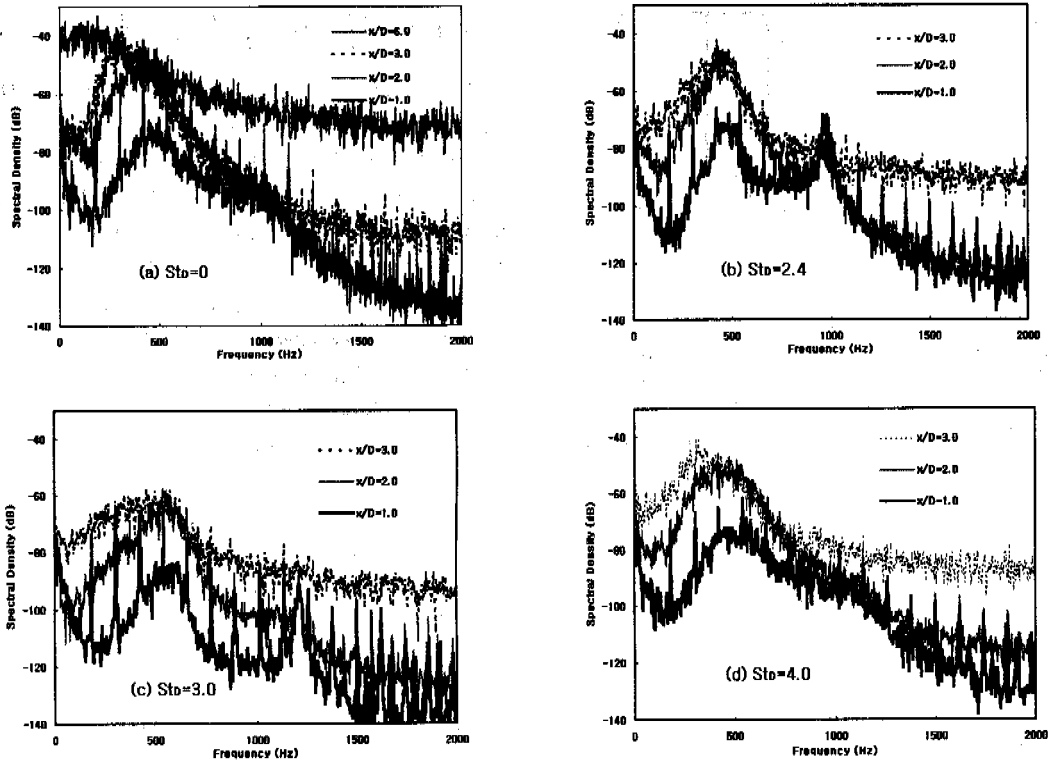


Fig. 2 Power spectral density of jet along the center line ( $Re_D=34,000$ )

을 통해 두 개의 와류는 하나로 합쳐지게 되어 그 절반의 주파수 (500 Hz) 특성이 나타나게 된다. 또한 병합에 의하여 와류의 크기도 성장하기 때문에, 하류로 진행하면서 강도가 점차 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 제트가 하류로 더욱 진행함에 따라 이전까지 나타나던 두 가지 주파수 특성(와류 생성주파수와 와류병합에 의한 주파수 특성)은 와류의 발달로 주파수는 점차 감소하게 되고 강도도 거의 일정하게 된다. 제트가 완전히 발달하게 되면 와류가 확산, 천이되어 우세주파수가 사라지고 전 주파수 영역에 고른 분포를 나타내게 된다. 이와 같은 자유제트에 음향여기를 하게 되면 와류의 주파수 특성이 변하게 된다. Fig. 2(b)는  $St_D=2.4$  (1951 Hz)로 여기하였을 때 결과로 초기 와류생성에 의한 기본주파수는 여기하지 않은 경우보다 강화되는 것을 볼 수 있다. 이 경우 기본주파수를 가지는 와류 성분을 강화 시킴으로써, 와류의 발달을 억제하는 효과를 가져오게 된다. 이 결과 하류로 대류되면서 병합이

일어나도 여기하지 않은 경우처럼 강도는 증가하지만, 그 특성 주파수가 일정하게 유지되게 된다.  $St_D=3.0$  (2439 Hz)으로 여기하는 경우(Fig. 2(c)) 제트의 초기 와류생성 주파수가 높아져서 약 1,200 Hz ( $St_D \approx 1.45$ ) 부근에서 극대점을 보이고 있으며, 앞의 경우처럼 전체적으로 와류의 성장이 억제되는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 제트주위에 생성되는 와류는 여기주파수의 절반에 해당하는 부조화주파수에서 가장 잘 제어됨을 알 수 있다.  $St_D=4.0$  (3252 Hz)으로 여기한 경우(Fig. 2(d))는 초기 와류생성 주파수특성이 음향여기를 하지 않은 경우와 비슷하지만, 하류로 진행하면서 약 500 Hz의 병합주파수 특성이 지속되는 것을 알 수 있다.

### 3.2 유동가시화

음향여기에 의해 제트주위에 형성되는 와류의 특성변화를 관찰하기 위하여 연기열선법을 사용하여 유동가시화를 수행하였다. Fig. 3은 유동가

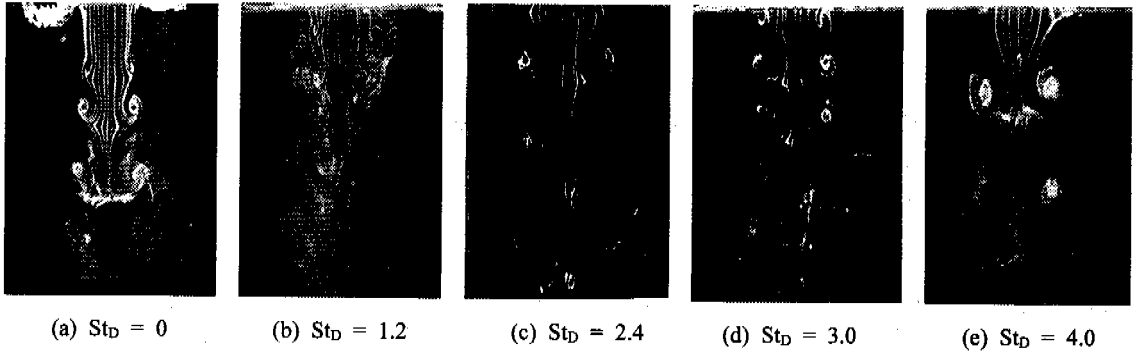


Fig. 3 Flow visualization of free jet with acoustic excitation ( $Re_D=3,400$ )

시화 결과를 나타낸다. 음향여기를 하지 않았을 경우(Fig. 3(a)), 노즐에서 분사된 유동은 주위 정체유체사이에서 전단류가 생성되면서 와류가 형성되고, 생성된 와류는 전단류의 대류불안정성에 의해 하류로 진행하면서 발전/병합하게 된다. 생성된 와류는 초기에는 제트 중심부까지 영향을 미치지 못하지만, 하류로 진행하면서 와류가 성장하여 제트의 중심부까지 영향을 미치게 된다. 이와 같은 특성을 갖는 자유제트에 음향여기를 하게 되면 유동특성이 크게 변하는데, Fig. 3(b)는  $St_D=1.2$ 로 여기한 경우이다. 여기서 전단층 주위에 특징적인 와류가 나타나 있지 않고 깨진 것을 볼 수 있다. 이것은 와류생성 기본주파수와 같은 주파수로 여기한 경우이다.  $St_D=2.4$ 로 여기한 경우는 제트주위에 일정한 크기의 와류가 하류까지 유지되는 것을 알 수 있다.  $St_D=3.0$ 으로 여기한 경우도 이와 유사한 경향을 나타낸다. 이것은  $St_D=2.4$ 와  $St_D=3.0$ 으로 여기할 경우 초기 제트의 불안정성에 의해 생긴 와류를 강화하고 와류의 병합과 발달을 억제하기 때문에 성장하지 못하고 일정한 크기로 하류까지 유지되기 때문이다. 마지막으로  $St_D=4.0$ 으로 여기한 경우는 비교적 큰 크기의 와류가 일찍 생성되고 강화됨으로써, 제트 포텐셜코어까지 일찍 영향을 미침을 알 수 있다. 이와 같은 유동 가시화 결과는 앞에서 정량적으로 측정된 와류의 주파수특성(FFT) 결과와 잘 일치한다.

### 3.3 속도분포와 난류성분

Fig. 4는 음향여기 주파수를 변화시키면서 제트 중심을 따라 하류방향으로 측정된 속도와 난류강도를 나타내고 있다. 앞에서 유동가시화 및 FFT

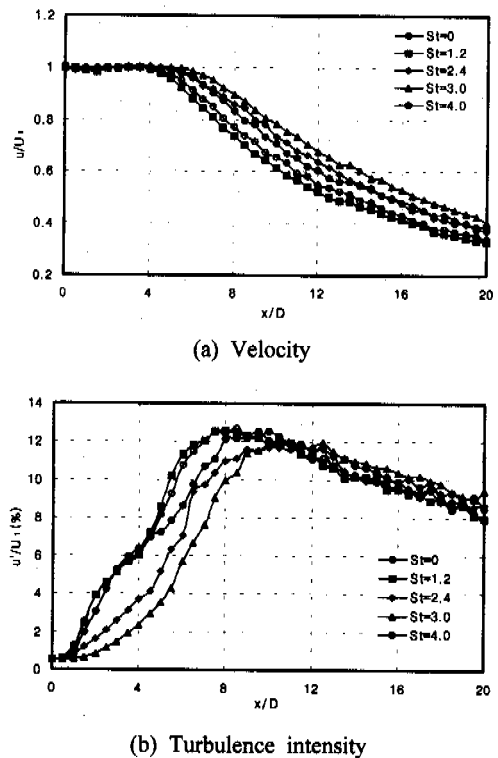


Fig. 4 Velocity and turbulence intensity distributions along the center line of the jet ( $Re_D=34,000$ )

결과에서 본 것처럼 음향여기에 의해 제트의 유동특성, 즉 와류생성과 병합특성이 바뀌게 되는 것을 알 수 있었다. 따라서 유동의 속도 및 난류 성분 특성도 다르게 나타나게 된다. 우선 제트 중심에서 측정된 속도변화(Fig. 4(a))를 살펴보면 음향여기를 하지 않았을 경우( $St_D=0$ ) 노즐에서 분사된 유동은 일정거리까지 출구 속도를 유지하지

만, 주위 정체유체와의 전단류 생성에 의해 와류가 성장, 발달함에 따라 중심까지 영향을 미치게 되어  $x/D \cong 4$  이후에 서서히 감소하게 되는 경향을 나타낸다. 난류강도 역시 유동이 발달하면서 증가하다가  $x/D \cong 8$  이후 유동의 충분한 발달과 속도감소에 의해 서서히 감소하게 된다. 음향여기를 하게 되면 유동가시화에서 본 것처럼 제트 주위에 생성되는 와류의 특성을 바꾸게 되어 전체적인 경향은 비슷하지만 속도 및 난류강도값이 바뀌게 된다. 속도의 경우 가까운 거리( $x/D \leq 4-5$ )에서는 제트의 포텐셜코어길이 내에 있으므로 그 차이가 크게 나타나지 않게 된다. 하지만  $St_D=2.4, 3.0$ 으로 여기한 경우 음향여기를 통해 와류의 병합을 억제하게 되므로 비교적 먼 거리까지 높은 속도 성분을 유지하게 되고, 따라서 포텐셜코어도 길어지게 된다. 이후 제트가 발달하면서 비슷한 기울기로 감소하게 된다. 난류강도 역시 여기를 하지 않았을 경우에 비해 상당히 낮은 값을 가지게 된다. 이와 반대로 와류병합을 촉진하게 되면( $St_D=1.2$ ) 속도는 감소하고 난류강도는 약간 상승하게 되지만, 제트가 충분히 발달하게 되면( $x/D \cong 8$ ) 거의 비슷한 난류강도값을 갖게 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 5는  $St_D$ 에 따른 난류강도 변화를 보여주는데, 앞서 설명한 바와 같이  $St_D=2.4, 3.0$ 의 경우 가까운 거리에서는 낮은 난류강도값을 가지지만  $x=12D$  이후 역전되어 약간 높은 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

지금까지 살펴본 것처럼 여기 주파수에 따라 제트의 유동특성에 미치는 영향이 달라지게 되는

것을 알 수 있다. 음향여기에는 와류생성의 기본 주파수와 관련하여, 여기주파수 자체보다는 여기주파수의 부조화성분이 중요한 역할을 하게 된다. 즉  $St_D=2.4, 3.0$ 으로 여기하는 경우, 여기주파수의 부조화성분에 의해 초기 와류생성주파수가 강화된다. 따라서 와류 병합을 억제하게 되므로 가까운 거리의 제트 중심에서 낮은 난류강도를 나타내며, 포텐셜코어를 하류까지 비교적 길게 유지하게 된다. 하지만  $St_D=1.2, 4.0$ 의 경우는 여기주파수의 부조화성분이 와류의 병합 및 발달을 촉진시켜 비교적 짧은 포텐셜코어길이를 갖게 된다.

3.4 열전달계수

Fig. 6은 여기하지 않은 경우 노즐출구와 충돌면 사이의 간격 변화에 따른 반경방향으로의 열전달계수 분포를 보여주고 있다. 우선 노즐출구와 충돌면 사이의 간격이 작은 경우( $H/D=2$ ) 두개의 극대점이 존재하는 것을 알 수 있다. 정체점( $r/D=0$ )에서 극소값을 갖는 것은 이미 알려진 바와 같이 제트의 포텐셜코어 내에 충돌면이 존재함으로써 정체유동을 형성하게 되고, 정체점에서 형성된 유동은 유동의 가속으로 경계층 두께가 얇아져 열전달이 증가하게 되므로  $r/D \cong 0.5$ 에서 극대점을 가지게 된다. 이후 유동이 반경방향으로 흘러감으로써 경계층이 발달하기 때문에 열전달이 감소하게 된다. 하지만  $r/D \cong 1.2$ 에서 다시 증가하기 시작하여  $r/D \cong 2.0$ 에서 2차극대점을 가지게 되는데, 이것은 유동경계층이 층류에서 난

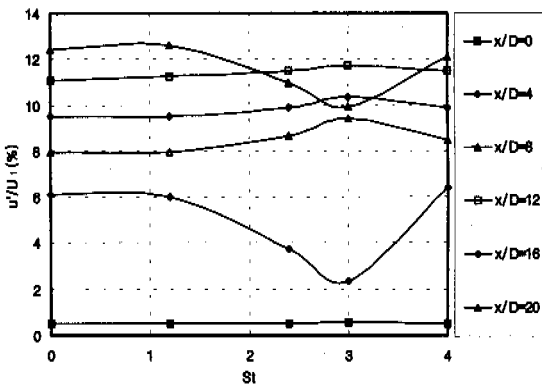


Fig. 5 Turbulence intensity distributions with various Strouhal numbers at the center of the jet ( $Re_D=34,000$ )

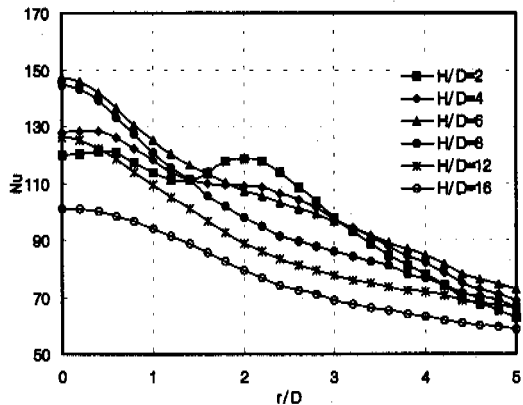


Fig. 6 Local heat transfer coefficients for different nozzle-to-plate distance ( $Re_D=34,000$ )

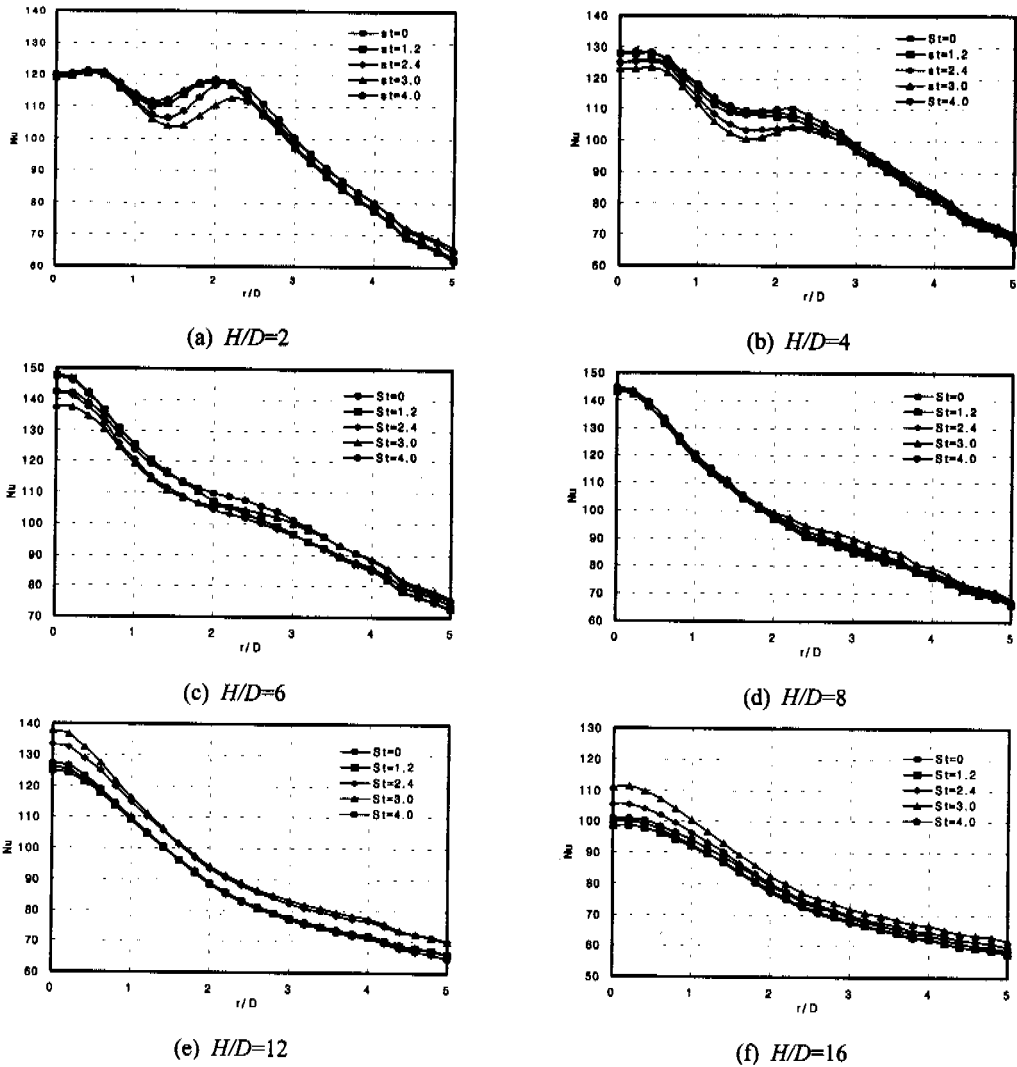
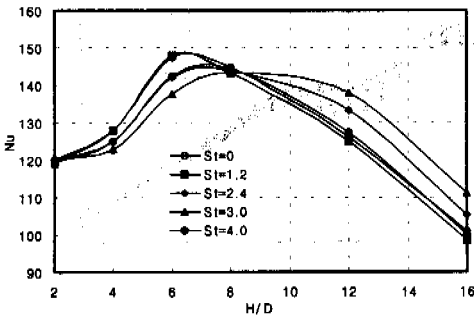


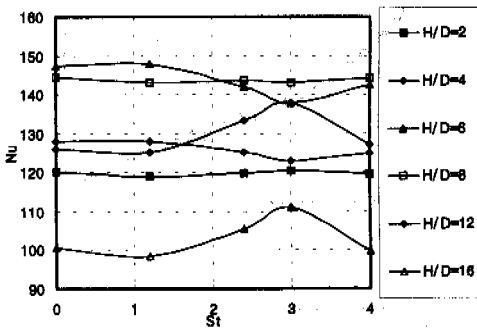
Fig. 7 Local heat transfer coefficient distributions for various nozzle-to-plate distances with acoustic excitation ( $Re_D=34,000$ )

류로 천이되기 때문에 열전달 증가한다고 생각할 수 있다. 또한 제트주위에 형성된 주와류가 하류로 이동하면서 역압력구배를 형성함으로써 충돌면  $r/D \approx 1.5$ 인 지점에서 이차와류가 형성된다. 이와 같은 이차와류의 형성은 경계층 유동을 혼합시키므로 열전달을 증가시키고 난류경계층으로 천이를 쉽게 하게 된다. 이차극대점 이후 충돌제트 유동은 벽체를 형성하면서 유동면적 증가에 따른 속도감소 및 경계층 발달에 의해 열전달계수가 단조감소하게 된다. 제트 노즐출구와 충돌면 사이의 간격이 증가하여  $H/D=4$ 인 경우 속도

측정에서 알 수 있듯이 아직 포텐셜코어 내에 있기 때문에 정체점 영역에서 극소값을 갖는다. 따라서  $H/D=2$ 일 때에 비하여 완만하지만  $r/D \approx 0.5$ 에서 극대값을 가진다. 하지만 정체영역에서 열전달계수의 절대값은 난류강도의 증가 때문인가까운 거리일 때 보다 높게 된다. 제트 노즐출구와 충돌판 사이의 간격이 멀어지게 되면( $H/D \geq 6$ ) 유동이 충분히 발달하여 충돌면이 제트포텐셜코어 밖에 있게 된다. 따라서 정체영역에서 높은 난류강도로 인해  $H/D=6$ 일 때 정체점에서 최대 열전달계수를 가지게 된다. 그리고 반경방향



(a) Various H/D



(b) Various Strouhal number

Fig. 8 Local heat transfer coefficients at the stagnation point ( $Re_D=34,000$ )

으로 단조감소하는 경향을 나타내게 된다. 이 경우 2차극대점을 갖지 않는 것은 정체점에서 유동이 이미 난류경계층유동으로 시작하므로 천이가 일어나지 않으며, 간격이 크기 때문에 충돌면 근접지역에서 주와류의 강도가 약해져 충돌면  $r/D \approx 1.5$ 영역에서 이차와류가 형성되지 않기 때문인 것으로 생각된다. 거리가 계속 증가하게 되면 속도는 감소하며 난류강도도 더 이상 증가하지 않기 때문에 전체적인 열전달계수값은 낮아지게 된다.

Fig. 7에서는 음향여기를 하였을 경우 각각의 노즐과 충돌면 사이의 고정된 간격에서 열전달 특성을 보여주고 있다.  $H/D=2$ 인 경우는 노즐출구와 충돌면 사이의 거리가 가까기 때문에 정체점에서는 거의 차이가 없지만 2차극대점이 나타나는 위치가 변하게 된다. 즉 와류병합을 억제했을 경우( $St_D=3.0$ ), 여기하지 않은 경우보다 극소점과 극대점이 반경방향으로 이동한 것을 볼 수 있다. 이는 유동이 여기하지 않은 경우보다 늦게

난류로 천이되기 때문에 열전달계수의 2차극대점 생성이 지연되는 것으로 볼 수 있다.  $H/D=4$ 일 때  $St_D=2.4, 3.0$ 인 경우, 2차와류 생성과 난류로의 천이에 의한 2차극대점이  $r/D \approx 2.5$ 에 명확히 존재하게 되는데, 이것은 여기하지 않았을 경우에  $r/D \approx 2.0$ 에 약하게 형성되는 것과 대비된다. 이는 중심부에서의 낮은 난류강도와 높은 속도로 인하여 여기하지 않은 경우보다 유동의 천이과정이 늦게 일어나기 때문이다. 노즐과 충돌면 사이의 간격이 증가함에 따라  $H/D=8$ 인 경우에는 거의 비슷한 열전달계수 분포를 나타내게 된다. 노즐출구와 충돌면사이의 간격이 멀어지게 되면  $St_D=2.4, 3.0$ 으로 여기하는 경우는 상당히 높은 열전달계수값을,  $St_D=1.2, 4.0$ 으로 여기하는 경우는 낮은 열전달계수값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 와류병합을 억제할 경우 포텐셜코어가 길어져 제트 중심부에서 높은 속도값을 하류까지 유지하기 때문에 전체적으로 열전달이 상승되는 효과를 가지게 되고, 반대로 와류의 발달을 촉진하는 경우에는 중심부에서 낮은 속도값 때문에 낮은 열전달계수값을 가지게 된다. 이와 같은 경향은  $H/D=16$ 일 때도 마찬가지로 나타나게 된다.

Fig. 8은 거리변화에 따른 정체점에서의 열전달계수 분포를 나타내고 있다. 가까운 거리( $H/D < 8$ )에서는  $St_D=2.4, 3.0$ 인 경우 와류병합을 억제하여 중심에서 낮은 난류강도를 갖게 되므로 열전달계수값도 낮게 나타났다. 하지만 거리가 멀어질수록( $H/D > 8$ ), 앞서 속도 및 난류강도 측정 결과에서 본 것처럼 길어진 포텐셜코어길이와 속도의 영향으로 상당히 높은 열전달계수값을 가지게 된다. 이것은 제트주위에 환형관을 통해 2차유동을 분사한 경우에 나타나는 특징과 유사하다.<sup>(11)</sup> 반대로 와류병합과 발달을 촉진하는 경우( $St_D=1.2, 4.0$ )는 가까운 거리에서는 포텐셜코어 내에 있게 되어 별 차이가 없지만, 먼 거리에서는 와류병합 증진에 따라서 난류강도는 약간 증가한 반면 낮은 속도를 갖기 때문에 여기를 하지 않았을 경우에 비해 낮은 열전달계수값을 나타내었다.

#### 4. 결론

(1) 분사제트의 와류제어에는 와류생성의 기본 주파수와 관련하여, 여기주파수성분 자체보다는



여기주파수의 부조화성분이 중요한 역할을 하였다.

(2) 유동특성에 있어  $St_D=2.4, 3.0$ 인 경우 와류병합을 억제하여 제트중심에서 출구속도를 먼 거리까지 유지하였지만, 반대로  $St_D=1.2, 4.0$ 에서는 와류병합이 촉진되어 비교적 높은 난류강도와 짧은 포텐셜코어길이를 나타내었다.

(3) 음향여기를 통한 충돌제트의 유동제어는 가까운 거리보다 먼 거리에서의 열전달에 효과적이었다.  $St_D=2.4, 3.0$ 으로 여기하였을 경우 가까운 거리( $H/D < 8$ )에서 낮은 난류강도에 의해 극대점 생성이 지연되었으며, 먼 거리에서는 포텐셜코어의 증가에 따라 여기하지 않은 경우보다 높은 열전달계수값을 나타냈다. 반대로  $St_D=1.2, 4.0$ 으로 여기할 경우 먼 거리에서는 여기하지 않은 경우와 비슷하게 열전달계수의 감소를 나타냈다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 1997년 핵심전문연구과제 지원(과제번호 : 971-1006-033-2)에 의하여 연구되었으며 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) 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.
- (3) Crow, S. C. and Champagne, F. H., 1971, "Orderly Structure in Jet Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, part 3, pp. 547~591.
- (4) Liu, T. and Sullivan, J. P., 1996, "Heat Transfer and Flow Structures in an Excited Circular Impinging Jet," *Int. J. Heat/Mass Transfer*, Vol. 39, No. 17, pp. 3695~3706.
- (5) Zaman, K. B. M. and Hussain, A. K. M. F., 1980, "Vortex Pairing in a Circular Jet Under Controlled Excitation. Part 1. General Jet Response," *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, Part 3, pp. 449~491.
- (6) Zaman, K. B. M. and Hussain, A. K. M. F., 1980, "Vortex Pairing in a Circular Jet Under Controlled Excitation. Part 2. Coherent Structure Dynamics," *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, Part 3, pp. 493~544.
- (7) 이창호, 김영석, 조형희, 1998, "원형제트 출구 전단류 조절에 따른 제트충돌면에서의 열전달 특성 (1)-균일속도분포제트," 대한기계학회논문집(B), 제22권, 제3호, pp. 386~398.
- (8) Huang, L. M. and Elgenk, M. S., 1994, "Heat Transfer of an Impinging Jet on a Flat Surface," *Int. J. Heat/Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1915~1923.
- (9) Fox, M., Kurosaka, M., Hedges, L. and Hirano, K., 1993, "The Influence of Vortical Structures on the Thermal Fields of Jets," *J. fluids Mech.*, Vol. 255, pp. 447~472.
- (10) Didden, N. and Ho, C. M., 1985, "Unsteady Separation in a Boundary Layer Produced by an Impinging Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 160, pp. 235~256.
- (11) Cho, H. H., Lee, C. H. and Kim, Y. S., 1998, "Characteristics of Heat Transfer in Impinging Jets by Controls of Vortex Pairing," *International Gas Turbine and Aeroenging Congress and Exposition*, 98-GT-276.
- (12) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.