

음향여기된 축대칭 충돌제트의 유동 특성

조형희* · 이창호**

Flow Characteristics of Acoustically Excited Axisymmetric Impinging Jet

Hyung-Hee Cho* and Chang-Ho Lee**

ABSTRACT

The velocity and turbulent intensity of the jet core are affected by the vortices around jet. By the control of vortex acoustically, we can expect the changes of the flow and heat transfer characteristics of free and impinging jets. On this paper, we studied the effects of vortex forcing. If vortex pairings are promoted by acoustic excitation, the turbulent intensity is increased and the high heat transfer coefficients are obtained at the small nozzle to plate distance. On the other hand, it has low turbulent intensity at the center of jet. However due to increase of potential core length, it is more effective at the large nozzle to plate distance. Therefore the excited frequency, especially its subharmonic frequency, has an important role to control the jet flows.

초 록

무제트초기의 불안정성이 하류에서의 와류성장에 영향을 끼치기 때문에 와류의 조절에 의한 충돌면의 유동 및 열전달 효과의 변화를 기대할 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서는 FFT를 이용함으로써 제트의 와류생성과 병합의 주파수 특성을 연구하고 이에 적절한 주파수로 와류를 여기하여 자유제트의 유동특성 변화와 충돌제트의 유동 및 열전달 특성을 고찰하였다. 음향여기를 하게되면 제트주위의 와류형성을 조절할 수 있게되는데, 자연적으로 형성되는 와류의 주파수(와류의 고유주파수)와 관련하여 여기해준 주파수성분 자체보다는 여기주파수의 부조화성분이 중요한 역할을 하게 된다. 음향여기를 통해 와류의 병합이 촉진되면 중심부에서의 난류강도가 증가하게 되고 억제하면 난류강도는 감소하게 된다. 따라서 와류병합을 촉진하면 가까운 거리에서는 높은 난류강도로인해 정체점에서의 열전달이 증가하지만 멀어질수록 포텐셜코어길이의 감소로 오히려 낮은 결과를 나타내었다. 이와 반대로 와류병합을 억제하면 중심부에서의 낮은 난류강도로 가까운 거리에서는 열전달이 감소하였으나 포텐셜코어길이가 길어지면서 먼거리에서는 열전달에 효과적이었다.

*연세대학교 기계공학과(Yonsei University, Dept. of Mechanical Engineering)

**연세대학교 대학원(Yonsei University, Graduate School)

1. 서 론

축돌제트는 국소적으로 높은 열/물질 전달 효과를 얻을 수 있어서 터빈 블레이드 냉각과 연소기 벽면 냉각에 효과적으로 응용될 수 있다. 지난 20~30년간 여러 연구자들에 의해 많은 연구가 진행되어 왔다.

이러한 제트의 유동특성은 제트출구의 초기조건에 매우 민감한데 Kelvin-Helmholts 불안정성은 불안정한 자유전단층에서 자연적인 와류생성(roll-up)과 개개의 와류고리 형성의 원인이 되고 이 고리의 성장과 병합(pairing)은 제트의 유동특성에 상당히 영향을 미친다. 제트주위에 생성되는 이러한 와류에 의해 제트중심에서 속도와 난류강도가 변하게 된다. 또한 제트초기의 불안정성은 하류에서의 와류성장에 영향을 끼치기 때문에 와류의 조절에 의한 충돌면에서의 열전달 효과 상승을 기대할 수 있다. 제트주위에서의 와류 및 와류형성을 조절하기 위하여 그동안 많은 연구가 진행되어 왔는데 가장 일반적인 방법으로 음향여기(acoustic excitation)를 사용하여 제트주위의 와류형성을 조절하는 것이다. 자연적으로 형성되는 와류의 주파수(와류의 고유주파수)나 부조화 주파수(subharmonic)로 음향여기 시키는 경우 제트 주위 와류는 더욱 증폭되고 그렇지 않은 경우 제트 주위 와류의 형성이 억제되어 더 긴 제트코어의 길이 및 제트코어 주위에서 작은 크기의 와류들이 형성된다. Crow¹⁾는 제트출구에 일정주파수와 진폭으로 주기적 여기를 가했을 때 유동의 전단층에 대해 음향을 주기적으로 가하여 자연적으로 보이던 불규칙한 요동(jitter)을 감소시킬수 있는 것을 보였고 $St_D = 0.3$ 부근에서 제트의 와류구조가 가장 강력해지는 것을 발견하여 이것을 최적모드(preferred mode)라 하였다. 전단층이 자연적인 주변의 교란을 극복할 정도로 충분히 크게 여기될 때 여기 주파수에서 유동은 와류구조안으로 말려 올라가게 되고 이러한 형성과 성장 그리고 와류구조의 병합(vortex pairing)은 가해진 주파수에 매우 의존하게 된다. Liu²⁾는 노즐과 충돌면 사이의 거리를 변화시켜가면서($H/D \leq 2$) 여기된 원형충돌제트에 대하여 유동구조와 열전달을 연구하였

다. 벽제트영역에서 국소열전달계수의 향상과 감소는 제트의 고유주파수와 그것의 부조화 주파수 근처에서 여기되었을 때 얻을 수 있었고 이러한 와류구조와 국소 열전달 사이의 관계는 유동가시화와 열전달 스펙트럼을 이용하여 연구하였다. Zaman^{3,4)}은 제트 중심을 따라 하류로 난류강도를 측정하여 난류강도가 높아지는 최적모드(preferred mode)도 있지만 난류강도가 여기하지 않은 경우보다 낮아지는 경우($St_D = 1.6, 2.4$)도 있음을 보았다. 이때 와류구조는 조화성분 뿐만 아니라 부조화성분도 중요한 역할을 하는 것을 보였다.

본 연구에서는 제트주위에 생성되는 와류의 병합(vortex pairing)을 직접 제어함으로써 제트의 유동특성과 하류 충돌면에서의 열전달특성 변화를 고찰하고자 하였다. 이를 위해서 열선유속계를 이용한 속도 및 난류강도 측정 그리고 FFT를 이용한 제트의 와류 주파수 특성을 연구하였다. 또한 충돌면에서의 열전달을 측정함으로써 이러한 자유제트의 특성변화에 따른 열전달 효과 변화를 보았다.

2. 실험장치

본 실험은 제트노즐 출구에서 형성되는 와류를 조절하기 위하여 노즐출구 주위에 환형관을 설치하여 노즐출구에 제트의 고유주파수 근처의 음향을 가함으로써 다른 종류의 전단류(mixing layer)를 만들 목적으로 장치를 설계하였다.

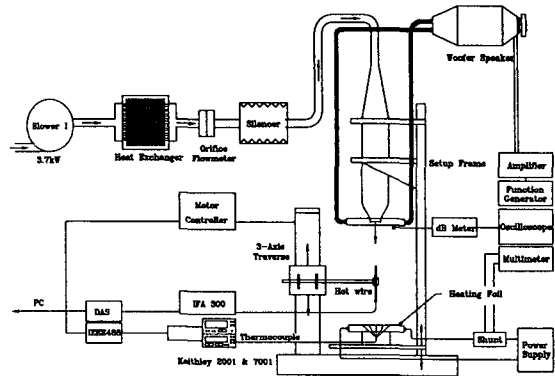


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 주제트유동은 3.7kw출력의 송풍기를 사용하여 공기를 공급하였으며, 속도제어는 송풍기에 연결된 인버터(inverter)를 사용하였다. 송풍기를 통하여 흡입된 공기는 공기이송관에 연결된 열교환기를 통하여 제트주위 공기와 같은 온도(온도차이 0.2 °C 이내)를 갖도록 하였고 유량측정은 열교환기와 소음기(消音器; silencer) 사이에 연결된 오리피스 유량계를 사용하였다. 오리피스를 지난 공기는 노즐로 공급되기 전에 송풍기에서 생성되는 음향에 의하여 받는 영향을 최소화하고 공급공기의 섭동을 줄여서 균일한 분사제트를 만들 수 있도록 오리피스 유량계와 제트노즐사이에 설치된 소음기를 통과하도록 하였다.

제트를 분사하는 노즐은 층류의 균일 속도분포(uniform velocity distribution)를 가질 수 있도록 만들었는데 이를 위하여 노즐면적 수축비(area contraction ratio)는 50:1의 크기로 좁으로써 균일 출구 속도분포 및 낮은 난류강도를 가질 수 있도록 하였다. 여기서도 노즐출구 직경은 24.6mm이다³⁾.

주위에 음향을 가함으로써 와류형성과 병합을 제어하여, 속도분포 및 난류성분의 변화를 고찰할 목적으로 제트노즐 출구에 환형 여기장치를 설치하였다. 제트에 가해지는 음향은 일정 주파수의 구형파(sine wave)를 함수발생기(Goldstar FG_202C)를 통하여 생성하고 이 생성된 파형을 증폭기(Crest LA901)를 통해 원하는 음압으로 증폭시킨 후 200W의 저음역용 스피커(woofer speaker)로 출력하였다. 이 음파는 8개의 내경 10mm 고무관(flexible tube)을 통하여 제트출구 주위에 설치한 환형 여기장치 주위로 들어가게 되고 이 음파로 제트의 전단류에 형성되는 와류를 제어하게 된다. 제트가 통과하는 중심부는 환형 여기장치 설치로 인한 간섭을 최소화하기 위하여 상단보다는 하단의 지름을 크게 조절하였다. 출구에서의 음압은 음압측정기(TES1350)를 이용하여 음압이 95dB로 유지됨을 확인하였고 오실로스코프(Goldstar OS-9040D)를 이용하여 출력되는 파형과 주파수를 수시로 보았다. 여기되는 음향 이외의 잡음을 최대한 줄이기 위하여 스피커는 흡음재를 이용하여 완전

히 주위와 차단하였고 노즐주위도 흡음재를 이용하여 방음하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 FFT처리결과

분사제트내의 속도 및 난류성분측정은 열선유속계(TSI IFA300)를 사용하였다. 열선유속계는 사용 전 피토프관을 사용하여 보정하였으며, 센서는 I형 텅스텐선을 사용하였다. 열선유속계는 CTA(constant temperature anemometer)로 평균속도와 주유동 방향 난류성분 $\sqrt{u'^2}$ 의 RMS값을 얻었다. 열선유속계센서는 3축 이송장치에 고정하여 주제트 진행 방향과 반경방향으로 이송하면서 측정하였다. 열선유속계에서 측정된 측정값은 DAS20 board를 통하여 컴퓨터에 저장하였으며, 속도측정의 경우 검출률(sampling rate)은 2000Hz이고 FFT(fast fourier transform)의 경우 4000Hz로 측정하였다. 데이터수는 4096개이고 5000Hz의 Low pass filter를 사용하였다.

열선유속계로 측정된 값을 FFT 처리하므로써 제트의 와류생성과 병합의 주파수 특성을 연구하고 적절한 주파수로 와류를 여기하여 제트의 유동특성을 변화시킬 수 있었다. Fig. 2는 $Re_D = 34,000$ 인 경우, 제트중심에서 측정된 자유제트에 대한 FFT 처리결과로 노즐출구에서 하류방향으로 노즐지름의 1.0~6.0배에 이르는 거리까지 측정하였다. 앞에서 설명했듯이 제트의 전단층에서 생성되는 와류의 영향은 제트중심에 영향을 미칠 정도로 크고 노즐출구 하류로 퍼져나가는 제트의 전단층을 따라가면서 측정하는 것은 힘들기 때문에 제트의 중심에서 측정하였다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 노즐출구에서 약 $x = 2D$ 에 이르는 거리까지 약 1,000Hz($St_D \approx 1.2$)에 와류생성에 의한 제트의 고유주파수가 보이고 있다. 이 주파수특성은 자유제트 초기의 불안정성에 의해 생성되는 와류의 고유한 주파수 특성으로 제트의 유속과 관련이 있다. 또한 이 주파수 특성은 약 $x = 2D$ 이전에서는 출구 초기조건이 층류인 경우 생성되는 아주 얇은 와류고리(vortex ring) 생성과 연관된 운동량두께

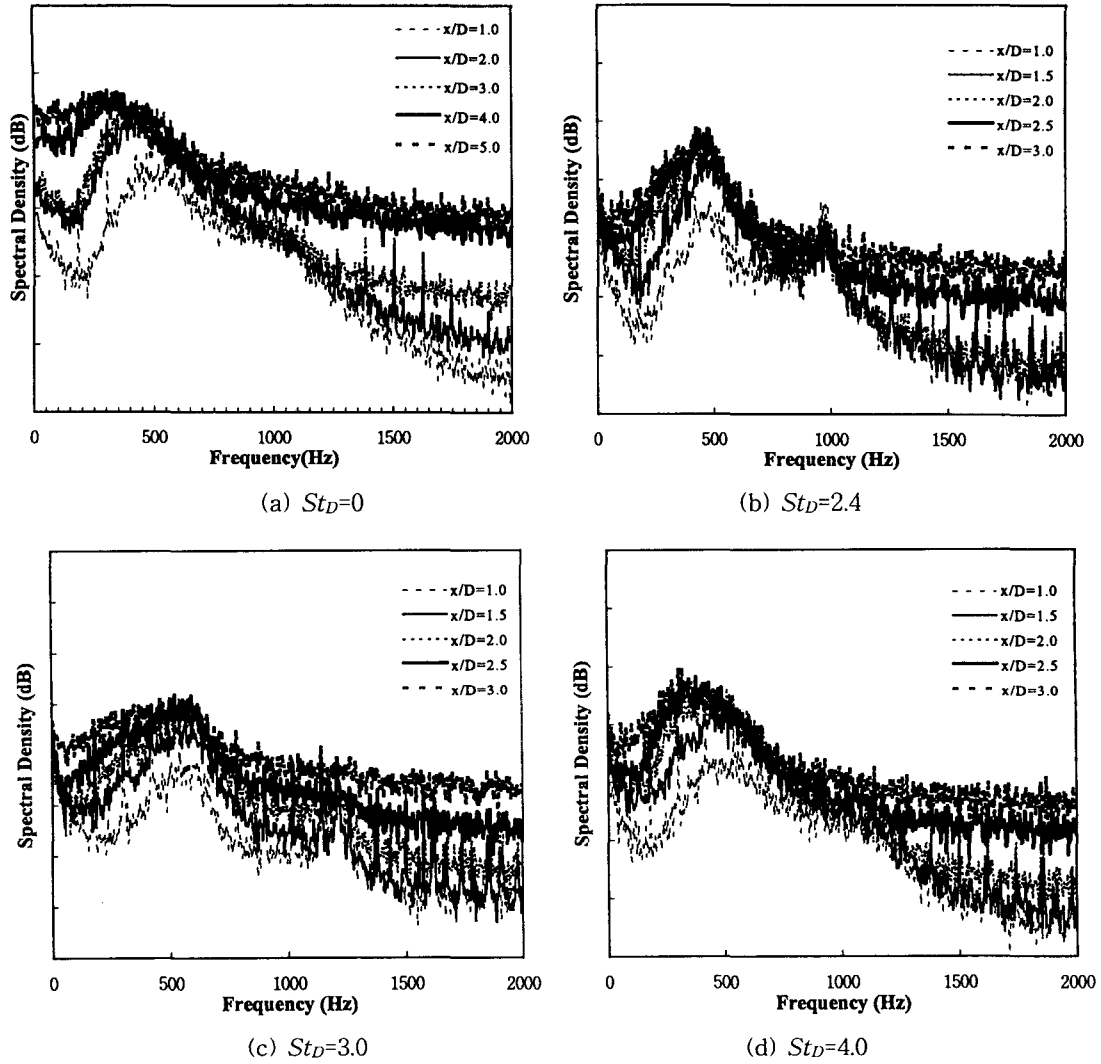


Fig. 2 Power spectral density of jet ($Re_D=34,000$)

에 따라 변하게 된다. 하지만 $x=2D$ 이후 하류에서는 출구 초기조건에 무관하게 제트의 직경에 따라 변하게 된다. 이렇게 생성된 와류는 하류로 대류되면서 와류병합(vortex pairing)이 일어나기 시작하는데 이러한 과정을 통해 두 개의 와류는 하나로 합쳐지게 되고 그 절반의 주파수 특성($St_D \approx 0.6$)이 강하게 나타나게 된다. 또한 병합에 의하여 크기(amplitude)도 성장하기 때문에 하류로 진행하면서 dB이 점차 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 약 $2D$ 하류까지 나타나던 이러한 와류병합에

의한 두가지 주파수 특성은 이후 단일 주파수로 균일하게 나타나지만 와류의 충분한 성장으로 주파수는 점차 감소하고 그 크기는 거의 일정하게 된다. 하지만 하류로 갈수록 와류가 확산되어 완전히 천이되어서 우세주파수가 사라지고 전 주파수 영역에 고른 분포를 보여주고 있다.

Fig. 2(b)은 $St_D=2.4$ 로 여기하였을 때 처리결과인데 초기 제트의 와류생성에 의한 주파수는 여기하지 않은 경우에 비하여 강화되어서 와류의 주파수 특성은 비슷하지만 그 크기가 상당히 성장하는

것을 볼 수 있다. 이것은 곧 와류병합을 억제하는 효과를 가져오게 되고 이후 병합이 일어나게 되어 도 여기까지 않은 경우처럼 하류로 대류되면서 주파수가 감소하는 것은 보이지 않는다. $St_D = 3.0$ 인 경우를 보면 불안정성에 의한 와류생성 주파수가 높아져서 약 $1,200\text{Hz}$ ($St_D \approx 1.45$) 부근에서 보이고 있고 이 경우 전체적으로 와류의 성장이 억제되는 경향이 보이고 있다. $St_D = 4.0$ 인 경우는 거의 초기 와류생성에 의한 주파수가 보이지 않고 여기에 의해 와류병합이 촉진되는 것을 알 수 있다. 이렇게 일찍 성장한 와류들은 하류로 대류되면서 상당히 성장한 것을 볼 수 있다.

위의 결과를 St_D 수에 따라 나타내 보면 Fig. 3과 같다. 이미 설명한 바와 같이 음향여기에 의해 강화된 와류는 와류성장예 의한 주파수 감소가 없이 $x = 2D$ 까지의 약 $St_D = 1.2$ 의 주파수와 와류병합에 의한 약 $St_D = 0.6$ 의 주파수가 나타나고 있다. 하지만 $St_D = 4.0$ 으로 여기된 경우는 여기하지 않은 경우와 마찬가지로 규칙적인 와류병합을 강화하여 와류의 성장을 촉진하는 것으로 나타났다.

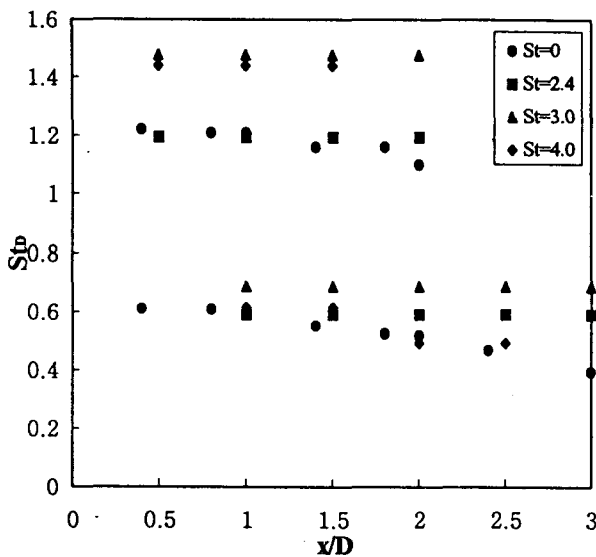
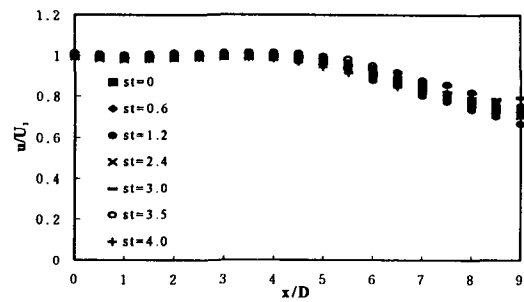


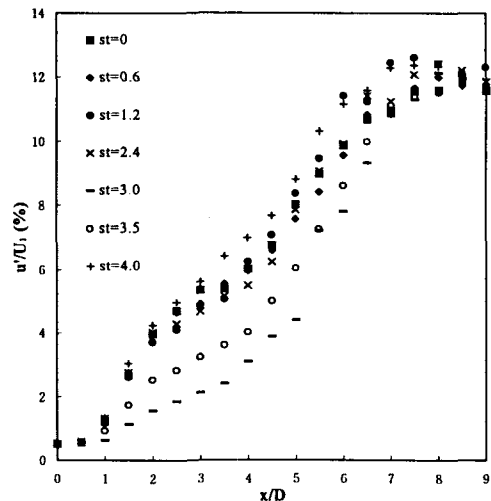
Fig. 3 Strouhal number distribution at the center of jet ($Re_D = 34,000$)

3.2 속도측정결과

Fig. 4는 St_D 수를 변화시키면서 하류방향으로 측정된 제트중심에서의 속도와 난류강도를 나타내고 있다. 앞서 FFT측정 결과에서 살펴본 바와 같이 와류생성과 병합특성 변화에 따라 경향이 바뀌는 것을 볼 수 있는데 제트의 고유주파수와 같은 $St_D = 1.2$ 로 여기한 경우를 보면 4D이후에서 약간 난류강도가 상승한 것을 볼 수 있지만 그다지 영향이 없는 것으로 생각된다. 하지만 $St_D = 4.0$ 과 같은 경우 와류의 병합을 촉진하여 중심에서의 난류강도가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 하지만 $St_D = 2.4 \sim 3.5$ 까지는 불안정성에 의해 생성된 와류가 강화되어 와류병합을 억제함으로써 상당히 낮은 난류강도를 얻을 수 있었다. 이는 제트



(a) velocity



(b) turbulent intensity

Fig. 4 Velocity and turbulent intensity distribution ($r/D = 0, Re_D = 34,000$)

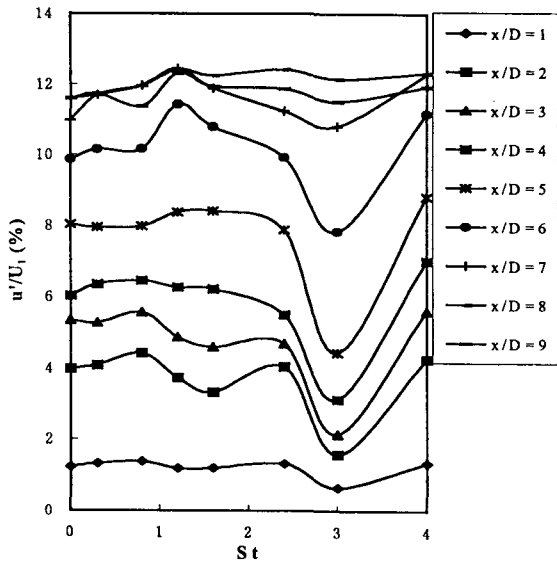


Fig. 5 Turbulent intensity at the center of jet for various Strouhal numbers

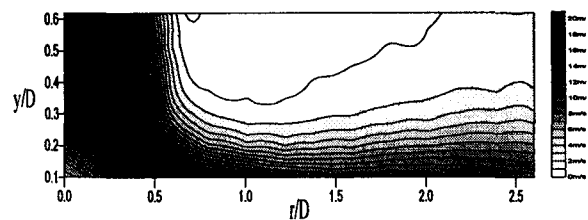
의 고유주파수와 유사한 주파수로 여기하기 보다는 그 부조화 주파수(subharmonic)성분이 와류병합에 중요한 역할을 한다는 것을 보여주는 것이다. 이러한 전단층 여기에 의한 효과는 약 $x = 8D$ 까지 유지되고 이후 거의 비슷한 값을 갖는다.

Fig. 5는 St_D 수에 따른 난류강도 변화를 보여주는데 전체적으로 $St_D = 3.0$ 에서 낮은 난류강도를 갖는 것이 보이고 $x/D \leq 4$ 에서는 $St_D = 0.8$, $x/D > 4$ 인 경우는 $St_D = 1.2$ 에서 난류강도의 증가가 나타났다. 이는 가까운 거리에서는 여기하지 않은 경우보다 그 부조화 주파수로 여기함으로써 와류를 강화하여 중심의 난류강도를 상승시켰으나 이후 와류병합은 오히려 약간 억제된 결과가 되었고 멀어질수록 초기에 생성된 와류의 고유주파수와 가까운 값으로 여기하여 와류의 생성을 촉진함으로써 하류의 난류강도 상승을 가져왔다고 생각된다. 이후 $x = 8D$ 이상이 되면 난류강도가 거의 일정한 값을 갖게 된다.

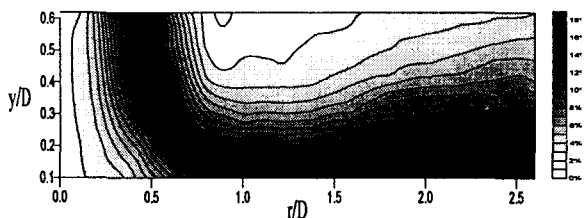
Fig. 6은 노즐과 충돌면 사이의 거리가 출구 지름의 2배인 경우 ($H/D=2$) 측정된 속도와 난류강도 선도이다. 측정은 열선유속계를 반경방향으로 설치하여 바닥으로부터 약 $0.1D$ 위로부터 y 방향으

로 측정하였다. 노즐출구로부터 나온 제트는 바닥에 충돌하면서 점차 감속되고 반경방향으로 가속되기 시작한다. 난류강도측면에서 보면 제트전단층의 높은 난류강도는 제트가 반경방향으로 가속되면서 난류강도가 점차 낮아진다. 이는 앞서 말했듯이 가속의 안정효과가 제트를 층류로 유지시키기 때문이다. 이 벽을 따라 반경방향으로 퍼지던 제트는 경계층 바깥에 생성되는 주와류에 의한 이차와류(비정상 역압력구배)에 의해 천이가 촉진되는데^(6,7,8) 이것은 반경방향으로 약 $1.5D$ 부근에서 난류강도가 급격히 증가하는 것으로 관찰된다.

Fig. 7은 여기하지 않은 경우 반경방향으로 측정된 속도와 난류강도를 나타낸다. 바닥으로부터 $0.42D$ 위쪽 부근의 속도는 정체점에 가까운 이유로 중심부에서의 속도감소와 그 주변의 반경방향으로 가속이 보이고 있다. 바닥에 가까운 $y = 0.12D$ 에서의 속도는 반경방향으로 가속되는 제트의 속도를 잘 보여주고 있는데 약 $r = 0.6D$ 부근에서 최대값을 나타내고 이후 감소하기 시작한다.

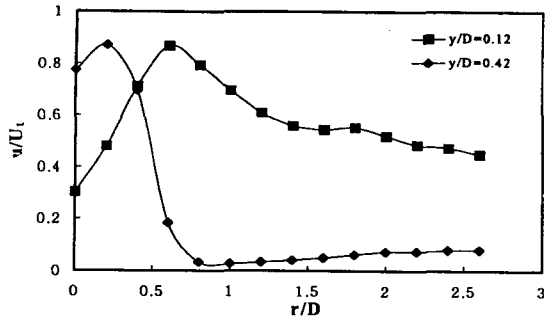


(a) velocity

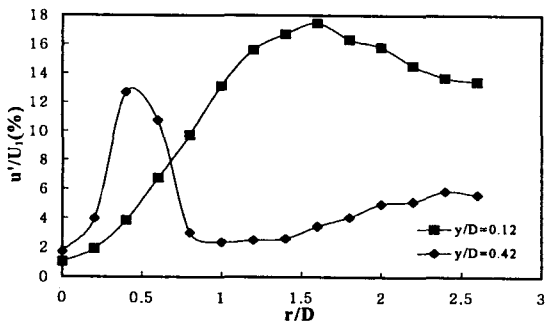


(b) turbulent intensity

Fig. 6 Contour plots of velocity and turbulent intensity without excitation ($H/D = 2, Re_D = 34,000$)

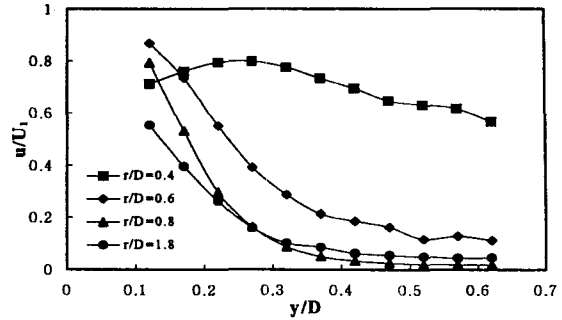


(a) velocity

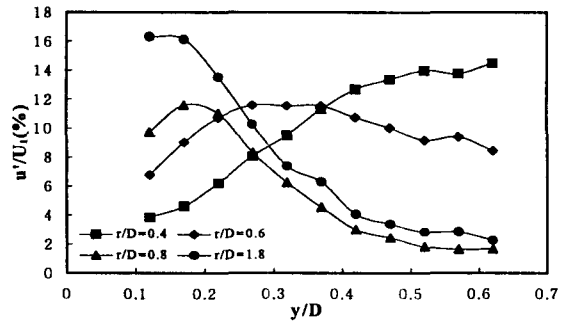


(b) turbulent intensity

Fig. 7 Radial distributions of velocity and turbulent intensity without excitation ($H/D = 2$, $Re_D = 34,000$)



(a) velocity



(b) turbulent intensity

Fig. 8 Vertical distributions of velocity and turbulent intensity without excitation ($H/D = 2$, $Re_D = 34,000$)

때문에 가속에 의한 경계층 두께 감소로 열전달계수의 상승을 가져오게 되고 일차정점(inner peak)의 원인이 된다. 난류강도의 경우는 $y = 0.42D$ 에서 보면 중심에서의 낮은 난류강도와 경계층이 보이고 있으며 $y = 0.12D$ 일 때 난류강도는 약 $r = 1.6D$ 에서 최대값을 나타내고 있는데 이 부근이 와류가 존재하는 지점으로 생각된다.

Fig. 8은 $St_D = 0$ 인 경우 충돌면에서 상류방향으로 측정된 속도와 난류강도이다. 노즐에서 나온 제트는 충돌면에 부딪치면서 축방향 속도성분이 반경방향으로 바뀌기 시작하는데 $r/D = 0.4$ 인 경우 거의 출구속도의 70%를 유지하던 유체가 $r/D = 0.6$ 이 되면서 $y/D = 0.2$ 이하에서 급격한 가속을 보이고 있다. 이후 제트는 점차 감속하게 된다. 한편 $r/D = 0.4$ 일 때 상류의 난류강도는 약 15% 정도였으나 표면에 충돌하여 반경방향으로 가속되면서 안정화가 된다. 때문에 표면에 가까운 부근

에서는 약 4%의 난류강도를 나타내고 있다. 이후 점차 증가하기 시작하여 $r/D = 1.8$ 에서 16%로 바뀌고 있다. 이것은 앞서 말했듯이 약 $r/D \approx 0.6$ 부근에서의 와류의 존재를 나타낸다고 할 수 있다.

Fig. 9에서는 $St_D = 3.0$ 과 4.0으로 여기하였을 때 난류강도선도를 나타내는데 속도선도에서는 충돌면 사이의 거리가 가까운 이유로 여기하지 않은 경우와 큰 차이를 발견할 수 없으나 $St_D = 3.0$ 으로 여기한 Fig. 9(a)의 경우 전단층에 난류강도가 상당히 감소한 것이 보이고 이 영향으로 중심부에서 낮은 난류강도를 나타내고 있다. 이것은 음향에 의해 와류의 생성이 억제되고 이것이 와류병합의 억제로 이어지는 것으로 생각된다. $St_D = 4.0$ 으로 여기한 결과는 Fig. 9(b)에서 보여주고 있는데 다른 경우와 달리 전단층에서 난류강도가 높은 지점이 섬과 같이 보이고 있다. 이것은 와류가 강하게 여기되어 나타나는 것으로 보인다. 이와같이 여기

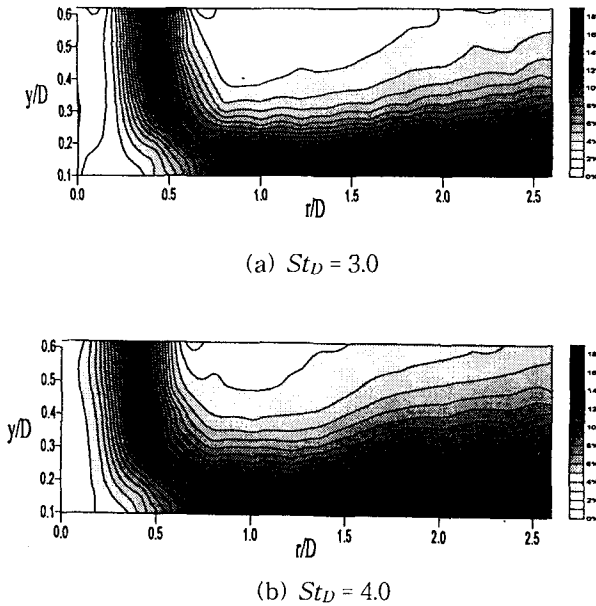


Fig. 9 Contour plots of turbulent intensity with excitation ($H/D = 2, Re_D = 34,000$)

된 와류는 노즐과 총돌면 사이의 거리가 큰 경우에 자유제트와 같이 와류의 병합을 증진할 것으로 보인다.

3.3 열전달계수 측정결과

Fig. 10에서는 노즐과 총돌면 사이의 거리를 변화시켰을 때 여기에 대한 정체점에서의 열전달계수 변화를 나타내고 있는데 거리가 가까울 경우 거의 변화가 보이지 않지만 거리 증가에 따라 그 차이가 명확하게 보이고 있다. 특히 $St_D = 2.4, 3.0$ 인 경우 낮은 난류강도로 인해 전체적으로 열전달이 낮게 나타나고 있다. 하지만 거리가 멀어지게 되면($H/D \geq 8$), 길어진 포텐셜코어의 영향으로 열전달이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 제트주위 환형판에서 분사한 경우에 나타나던 특징과 유사하며 먼 거리에 있는 총돌면의 열전달 증진에 효과적이라고 생각된다. 반면에 $St_D = 1.2$ 로 여기했을 경우, 가까운 거리에서는 와류병합 증진에 의해 높은 값을 나타내지만 운동량손실로 인해 거리가 멀어질수록 그 효과가 줄어들다. $St_D = 4.0$ 에서는 초기에 와류병합을 증진시킴으로써

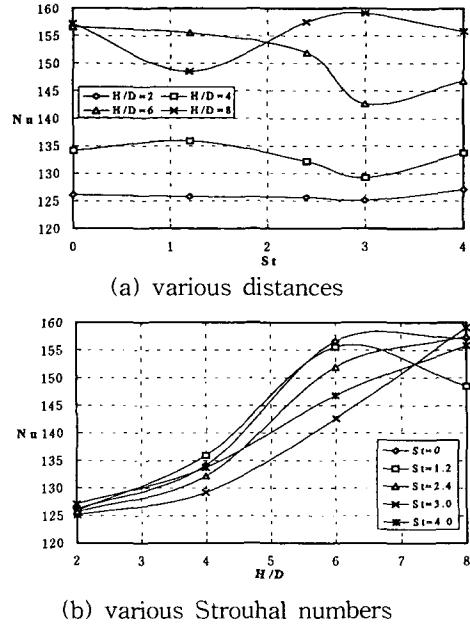


Fig. 10 Local heat transfer coefficients at the stagnation point ($Re_D = 34,000$)

$H/D = 2$ 에서는 다른 경우에 비해 열전달효과가 우수하지만 이후 전체적으로 오히려 낮은 값을 보이고 있다.

4. 결 론

1. 와류생성을 제어하기 위해서 여기해준 주파수 성분 자체보다는 여기주파수의 부조화 성분이 중요한 역할을 하였다.
2. 자유제트의 경우 $St_D = 2.4, 3.0, 3.5$ 인 경우 와류생성을 억제하여 중심에서 가장 낮은 난류강도를 나타냈다. 반대로 $St_D = 1.2, 4.0$ 에서 와류병합이 촉진되었다.
3. 총돌제트의 경우 가까운 거리($H/D < 8$)에서 $St_D = 2.4, 3.0$ 으로 여기하였을 경우 와류생성을 억제하여 열전달계수가 낮았으나 멀어질수록 여기하지 않은 경우보다 상승하였고 $St_D = 1.2, 4.0$ 는 가까운 거리에서의 열전달계수가 증가하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 1997년 핵심전문연구 과제 지원 (과제번호: 971-1006-033-2)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다. 또한 실험에 도움을 준 황상동군에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Crow, S. C. and Champagne, F. H., "Orderly structure in jet turbulence," J. Fluid Mech., Vol. 48, part 3, pp. 547~591, 1971.
2. Liu, T. and Sullivan, J. P., "Heat transfer and flow structures in an excited circular impinging jet," Int. J. Heat/Mass Transfer, Vol. 39, No. 17, pp. 3695~3706, 1996.
3. Zaman, K. B. M. and Hussain, A. K. M. F., "Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation. Part 1. General jet response," J. Fluid Mech., Vol. 101, part 3, pp. 449~491, 1980.
4. Zaman, K. B. M. and Hussain, A. K. M. F., "Vortex pairing in a circular jet under controlled excitation. Part 2. Coherent structure dynamics," J. Fluid Mech., Vol. 101, part 3, pp.493~544, 1980.
5. 조형희, 이창호, 김영석, "원형분사제트 조절을 통한 유동특성 및 제트벡터링의 효과 고찰", 한국추진공학회 논문집, Vol. 1, pp.33~45, 1997.
6. Fox, M., Kurosaka, M. and Hirano, K., "Total temperature separation in jets," AIAA 21st Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference, AIAA Paper 90-1621, 1990.
7. Fox, M., Kurosaka, M., Hedges, L. and Hirano, K., "The influence of vortical structures on the thermal fields of jets," J. fluids Mech., Vol. 255, pp.447~472, 1993.
8. Didden, N. and Ho, C. M., "Unsteady separation in a boundary layer produced by an impinging jet," J. Fluid Mech., Vol. 160, pp.235~256, 1985.