

원형분사제트 조절을 통한 유동특성 및 제트 벡터링의 효과 고찰

조형희 · 이창호 · 이영석 (연세대학교)

Experimental Studies on Flow Characteristics and Thrust Vectoring of Controlled Axisymmetric Jets

Cho Hyung Hee · Lee Chang Ho · Lee Young Suk (Yonsei Univ.)

ABSTRACT

Axisymmetric shear layers around a free jet is forced by co-flowing and counter-flowing secondary jets from/to an annular tube around the jet nozzle. The jet potential core extends far downstream with co-flowing secondary jets due to inhibited vortex developing and pairing. For counter-flowing cases, the axisymmetric shear layer around the jet transits from convective instability to absolute instability for velocity ratios $R = 1.3 \sim 1.65$ for the uniform velocity jets. Consequently, the jet potential core length increases and the turbulence level in the jet core is reduced significantly. The jets are controlled better with extension collars attached to the outer nozzle exit because the annular secondary flow is guided well by the extension collars. For the vectoring of jet, the annular tube around the jet is divided in two parts and the only one part is used for suction. The half suction makes the different shear layer around the jet and vectoring the jet by Coanda effect. The vectoring and turbulent components are varied significantly by the suction ratio. The experiments are carried out to investigate the characteristics of forced free jets using flow visualization, velocity and turbulence measurements.

초 록

자유제트를 제어하는 방법중 하나는 분사제트 주위에 형성되는 와류를 조절하는 것이다. 이를 위하여 제트노즐 주위에 환형관을 설치하여 환형관으로부터 2차제트를 분사 또는 흡입함으로써 제트주위에 형성되는 전단류를 변화시켰다. 2차제트를 분사하는 경우($R < 1.0$) 주제트 주위에 형성되는 와류의 발달을 억제함으로써 제트포텐셜코어의 길이가 아주 길어지는 제트유동을 얻을 수 있었고 흡입하는 경우에는($R > 1.0$) 제트주위의 전단류가 흡입비 $R = 1.3 \sim 1.65$ 에서 대류불안정성에서 절대불안정성으로 바뀌어 형성된 와류가 하류에서 제트중심부까지 발전, 결합되는 것을 방지하여 더 긴 포텐셜코어와 중심에서 낮은 난류강도를 얻었다. 위의 결과는 환형관 주위에 부착한 것의 높이 변화에 따라서 변화

하였는데, 이것은 것이 환형관을 통한 흡입유동의 유로역할을 함으로써 출구 주위의 유체가 직접 흡입되는 것을 방지하기 때문이다. 분사제트 벡터링을 위하여 제트노즐 주위의 환형관을 이등분하여 한 쪽으로만 흡입함으로써 제트주위에 다른 전단류를 형성함과 동시에 코안다(Coanda)효과를 이용하여 분사제트를 편향시켰다. 편향되는 정도 및 난류성분은 흡입속도비에 따라서 크게 바뀌었다. 실험은 속도분포와 난류강도 측정이 수행되었으며 가시화를 이용하여 유동특성을 관찰하였다.

기 호 설 명

D	제트출구 직경 (24.6mm)
L	깃(collar) 길이
r	반경방향 좌표
R	흡입비 또는 전단류 속도비 ($=\Delta u/2 \bar{U}$)
Re	Reynolds 수 ($=UD/\nu$)
u	제트속도
u'	섭동속도성분 ($=\sqrt{u'^2}$)
U_1	주제트의 평균속도
U_2	흡입유동의 평균속도
\bar{U}	전단류 평균속도 ($=(U_1 + U_2)/2$)
x	유동방향 좌표
ΔU	전단류 속도차이 ($=U_1 - U_2$)
ν	동점성계수

1. 서 론

자유제트 주위에 형성되는 와류의 형태에 따라서 제트의 확산정도, 속도분포 및 내부 난류성분, 제트포텐셜코어(core)길이가 크게 바뀌게 된다. 그러므로 노즐에서 분사된 제트의 형태에 따라 얻어지는 추력은 변하게 되며, 또한 소음 발생정도도 변화하게 된다. 이러한 분사제트를 비행기 수직이착륙시 V/STOL에 적용할 경우의 유동장 변화는 그 분사제트의 유동특성에 따라 바뀌게 될 것이다. 또한 노즐에서 분사된 제트의 방향제어는 분사제트를 직접 조정(thrust vectoring)하는 것이 기익을 조정하여 방향을 제어하는 것보다 훨씬 빠르게 추력방향을 바꿀 수 있기 때문에 항공기와 로켓에서 보다 중요한 문제다.

제트주위에 형성되는 와류를 조절하기 위하여 그 동안 많은 연구가 진행되어 왔다. 가장 일반적

인 방법으로 음향여기(acoustic excitation)와 진동기(actuator)를 사용하여 제트주위의 와류형성을 조절하는 것인데¹⁾⁻⁵⁾, 자연적으로 형성되는 와류의 주파수(와류의 고유주파수)와 같은 주파수로 음향 또는 진동여기시키는 경우 제트 주위 와류는 더욱 증폭되고 그렇지 않은 경우 제트주위 와류의 형성이 억제되어 더 긴 제트코어의 길이 및 제트코어 주위에서 작은 크기의 와류들이 형성된다. 제트주위의 와류 형성을 조절하기 위한 다른 방법은 노즐출구의 형태를 변화시키거나 또는 돌기를 붙임으로써 와류형성을 제어할 수 있는 것인데^{6),7)}, 이 경우 노즐출구형상 및 돌기위치에 따라서 비대칭적인 와류의 형성 및 속도 분포를 얻을 수 있다. 다른 방법으로는 자유전단류(free shear layer flow)의 안정성원리를 이용하는 방법이다. 전단류의 경우 두 전단유동이 다른 방향 또는 같은 방향으로 흐르는 경우, 그 정도에 따라서 와류의 형성 및 발달이 다르게 되는데 이차원 전단류에서 속도비 $R=(U_1-U_2)/U_1+U_2$; U_1 : 주제트 평균분사속도, U_2 : 2차제트 분사 또는 흡입 평균속도)이 1.315보다 작을 때에는 대류 불안정성(convective instability)을 갖는 것으로 보고되고 있다. 마찬가지로 축대칭 제트에서는 제트노즐 출구주위에 환형관을 만들어 그 환형관을 통해서 주제트와 다른 속도로 분사시키거나 또는 흡입함으로써 임의의 전단류를 만들 수 있다. 주제트 유동과 같은 방향의 속도로 분사시키는(coflowing mixing layer, $R<1$) 연구는 Perry et al.⁸⁾에 의하여 수행되어졌고 주유동과 반대방향으로 환형관 주위에서 흡입하는 경우(counterflowing mixing layer)는 앞에서 언급했듯이 R 이 1.32이상(축대칭의 경우)되는 경우 대류 불안정성(convective instability)에서 절대 불안정성(absolute instability)으로 전단류가 천이될 수 있다.⁹⁾

본 연구에서는 분사제트를 조절하기 위하여 축대칭 제트노즐 주위에 설치한 환형관을 통하여 주 제트 유동방향과 같은 방향으로 분사(coflowing mixing layer)하는 경우와 반대로 환형관을 통하여 흡입(counterflowing mixing layer)하는 경우에 대하여 분사 또는 흡입속도비($0.45 \leq R \leq 2.06$)를 변화시키면서 포텐셜코어길이의 변화, 속도분포 및 난류강도를 측정하였다. 본 실험에서 사용한 노즐은 종모양의 곡률을 가지고 수축되어지는 형태로 노즐 출구에서 균일한 속도분포를 가지는 층류제트를 형성하도록 만들어, 제트주위에 형성되는 전단류의 크기변화에 따른 영향을 고찰하였다.

제트노즐 출구 주위에 환형관을 설치하여 흡입함으로써 전단류를 만들 때, 경우에 따라서는 전단류가 제트주위에 잘 형성되지 않고 외각의 정체 유동이 흡입되었다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 환형관 앞에 깃(collar)을 설치하여 보다 전단류를 잘 형성할 수 있도록 도왔다. 그 깃의 효과를 보기 위하여 깃의 길이를 변화시키면서 주 제트의 속도 및 난류성분 분포를 측정하였다.

분사제트 벡터링(thrust vectoring)을 위해서는 주로 제트노즐 출구의 방향을 물리적으로 바꾸는

것에 대하여 연구되어 졌다.^{10,11)} 최근 들어서 2차원제트 또는 사각제트에 대하여 한쪽 면에서 유체를 흡입 또는 분사시킴으로써 코안다(Coanda)효과를 이용하여 제트 벡터링하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.^{12,13)} 본 연구에서는 원형제트 주위에서 등분된 환형관 일부분에서만 제트를 흡입함으로써 다른 크기의 전단류를 형성하여 분사제트가 휘는 정도(thrust vectoring)에 대하여 실험을 수행하였고 흡입속도비에 따른 분사제트의 편향정도 및 속도 분포와 난류성분 분포를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 제트노즐 출구에서 생성되는 와류를 조절하기 위하여 노즐출구 주위에 환형관을 설치하여 분사제트주위의 유동을 약간 흡입(counterflowing) 또는 분사(coflowing)함으로써 전단류(mixing layer)를 만들 목적으로 장치를 설계하였다. 실험장치는 Fig. 1에서 보여주듯이 송풍기, 열교환기, 오리피스 유량계(orifice flowmeter), 층류 유량계(laminar flowmeter), 플레넘(plenum), 노즐

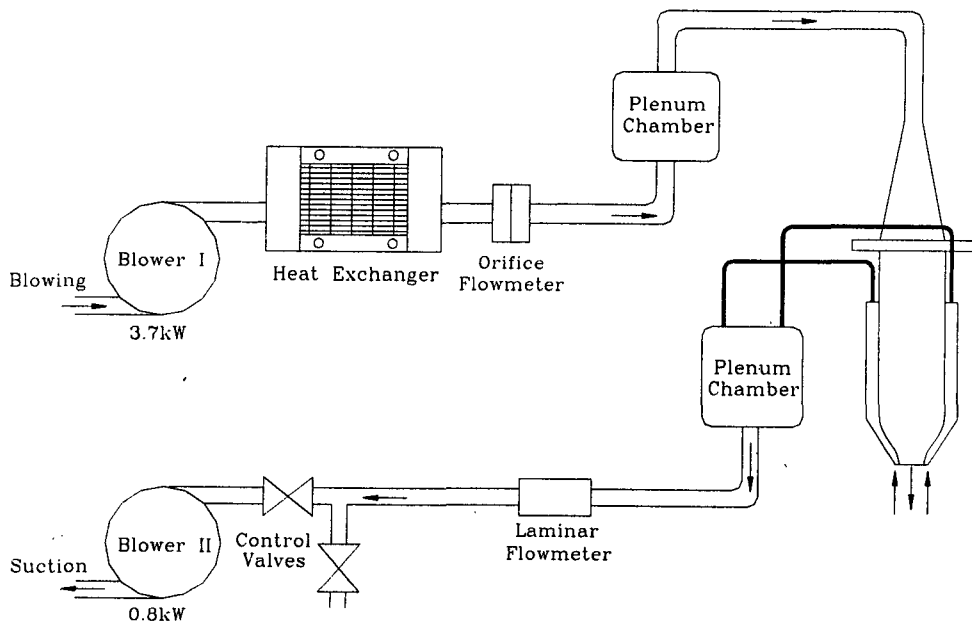


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

등으로 구성되어 있다. 주제트유동은 3.7kw출력의 송풍기를 사용하여 공기를 공급하였으며, 속도제어는 송풍기에 연결된 인버터(inverter)를 사용하였다. 송풍기를 통하여 흡입된 공기는 공기 이송관에 연결된 열교환기를 통하여 제트주위 공기와 같은 온도(온도차이 0.2℃이내)를 갖도록 하였다. 유량측정은 열교환기와 플레넘 사이에 연결된 오리피스유량계를 사용하였다. 본 실험에 사용된 오리피스 유량계는 1" 탭과 4개의 다른 직경비를 가지는 오리피스판을 사용하여 유속을 조절하였으며 검증을 통하여 1%오차 이내에서 유량을 얻을 수 있었다.

노즐에 공급되는 공기를 균일하게 하기 위하여 오리피스 유량계와 제트노즐사이에 큰 플레넘을 설치하여 공급공기의 섭동을 줄여서 균일한 분사

제트를 만들 수 있도록 하였다. 제트를 분사하는 노즐은 층류의 균일 속도분포(uniform velocity distribution)를 가질 수 있도록 만들었다.

층류의 균일 속도분포를 얻기 위하여 단면수축비가 큰 노즐을 사용하였다. 플레넘에서 공급되는 공기는 확대각 14°의 원뿔형 디퓨저(conical diffuser)를 사용하여 확장시켰는데 디퓨저 내에서의 유동안정을 위하여 디퓨저 입구, 중간 및 출구에 작은 간격의 망(mesh)을 설치하였다. 디퓨저 출구에 연결된 관은 내경이 175mm이고 길이는 500mm로 유동안정 및 균일한 분포를 얻기 위하여 두께 75mm의 허니콤(honeycomb)을 설치하였으며 그 다음으로 노즐수축부 전에 고운망(fine mesh, #24: SUS304)을 설치하였다.

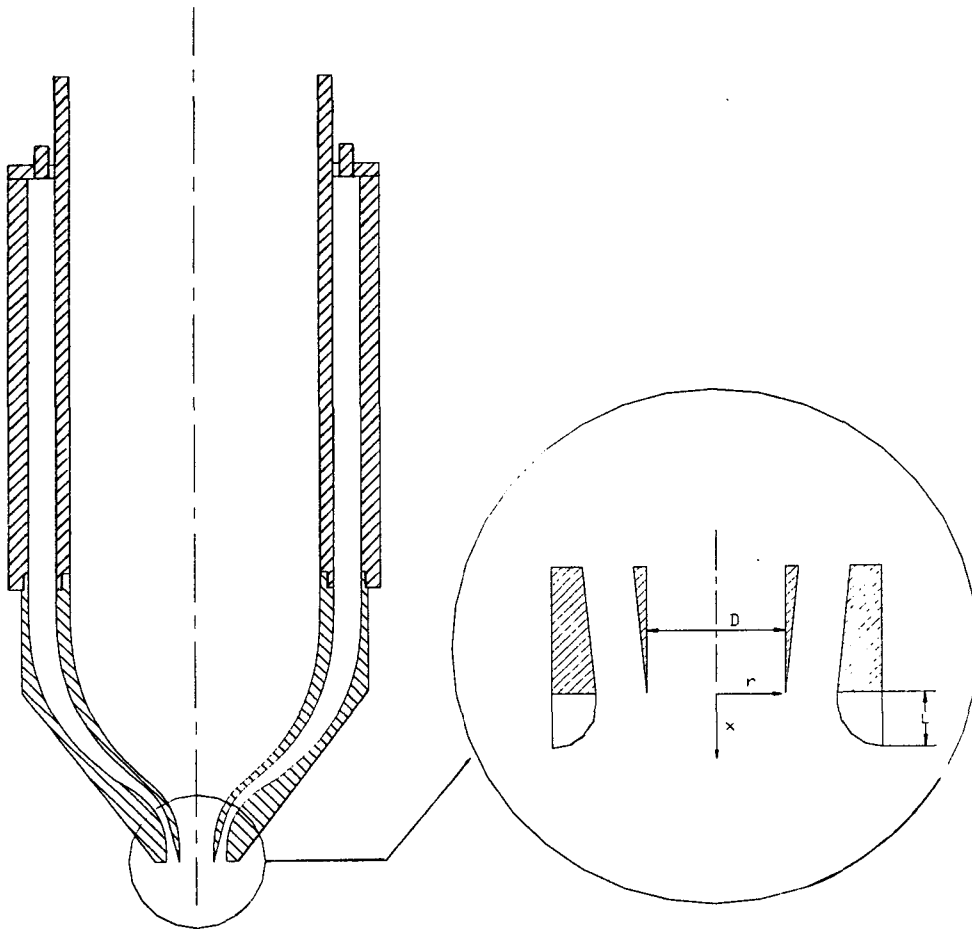


Fig. 2 Cross section of axisymmetric jet and shape of collar

노즐은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 Morel에 의해 제안된 유선형의 곡률(두개의 3차식)을 사용하여 완만하게 수축하도록 하였다.¹⁴⁾ 또한 노즐면적 수축비(area contraction ratio)는 50:1의 크기로 줌으로써 균일 출구 속도분포 및 낮은 난류강도(0.3%이내)를 가질 수 있도록 하였다. 여기서 노즐출구 직경은 24.6mm로 하였으며 두께는 제작상의 어려움 때문에 2mm정도로 약간 두껍게 제작하였다. 노즐 두께를 완만하게 증가하도록 하여 환형관에서 흡입하는 유동과 전단류를 잘 형성하도록 하였다. 분사제트 주위에 전단류(mixing layer)를 만들어 속도비를 조절함으로써 와류형성을 제어하여 제트의 안정성, 속도분포 및 난류성분의 변화를 고찰할 목적으로 제트노즐 출구에 환형관을 설치하였다. 가능한 안정된 전단류를 얻기 위하여 제작된 환형관을 통하여 제트주위유동의 흡입 또는 분사하는 속도비를 변화시킨다. 환형의 유로를 만들기 위하여 노즐외벽도 3차식 곡률로 제트노즐과 같은 모양으로 가공하여 설치하였다. 환형노즐의 유로폭은 9.4mm(0.38D)로 만들었으며 그 끝에는 약간 폭이 큰 환형 플레넘을 설치하였다. 이 환형 플레넘은 다시 커다란 원통형 플레넘과 8mm내경의 고무관 12개를 사용하여 연결하였다.

원통형 플레넘은 유량을 측정할 수 있는 층류 유속계(laminar flowmeter)와 연결하였다. 층류유속계는 송풍기와 연결되었는데 경우에 따라서 0.8kw와 3.7kw용량의 송풍기를 사용하였다. 유량 제어는 송풍기와 층류유속계 사이에 설치되어 있는 제어용 밸브 및 송풍기 인버터를 사용하였다.

제트노즐주위에 설치된 환형관을 통하여 공기를 흡입할 때, 어떤 경우는 제트 주위의 공기를 흡입하여 전단류(mixing layer)를 만들기 보다는 외각 공기를 흡입할 수 있는데, 이와 같은 현상을 방지하고 보다 잘 전단류를 만들게 하기 위하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 환형관 앞에 깃(collar)을 설치하였다. 깃의 높이는 제트 노즐 출구 직경의 0.4배, 0.8배인 경우에 대하여 수행하였으며, 유동을 완만하게 흡입하기 위하여 깃의 입구는 사분원의 곡률을 갖도록 제작하였다.

분사제트 벡터링을 위하여 제트노즐 주위의 환

형관을 이등분(또는 삼등분)하여 한쪽 환형관에서만 흡입할 수 있도록 만들었다. 분사제트벡터링의 경우는 흡입에 따른 전단류변화 및 코안다(Coanda)효과를 주기 위하여 깃이 있는 경우에만 실험을 수행하였다.

2.1 유동가시화 기법

분사제트 주위에 형성되는 와류의 유동형태를 보기 위하여 연기열선법(smoke-wire technology)을 사용하여 유동가시화를 하였다. 유동가시화에 사용된 열선은 직경 0.1mm(0.004")의 니크롬 또는 텅스텐선으로 제트노즐 출구에 가깝게 설치하였다. 니크롬선 한 끝은 고정시키고 다른 끝에는 무거운 추를 매달아 전류를 통하여 가열시 선이 열 팽창으로 휘는 것을 방지하였다. 가해진 전압은 유동조건 및 오일종류에 따라 변압기를 사용하여 변화시켰는데 보통 0.75V/cm로 주었다.

텅스텐선에 면봉을 사용하여 기어오일을 바른 후 순간적으로 전류를 가해주면 열선에 맺혔던 기름방울들이 증발하여 연기선을 만든다. 연기는 제트 유선을 따라감으로써 형성된 유맥선(streak line)을 사진으로 찍어서 제트 주위에 형성되는 와류의 크기 및 형태를 관찰할 수 있다. 니크롬선에 맺히는 오일의 방울을 고르게 하기 위하여 본 실험에서는 기어오일에 계면활성제를 혼합하여 사용하였다. 연기선은 보통 1초정도 볼 수 있는데 사진 촬영을 위하여 2개의 500W 할로겐 램프(halogen lamp)를 양옆에서 가는 홈(slot)을 통하여 조명하였다. 사진 촬영은 Nikon FM2 사진기를 이용하였고 필름은 감도가 좋은 Kodak TMAX-ASA 3200/6400 흑백필름을 사용하였다. 사진촬영속도(exposure time)는 조명정도에 맞게 1/250~1/1000초로 변화시키면서 측정하였다.

제트의 유속이 빠른 경우 연기선을 잘 촬영할 수 없기 때문에 저속에 유동가시화를 수행하였는데, 주제트의 분사속도를 2~3m/s로 하였다. 이 경우 열선의 직경기준으로 Re수가 약 20이내로 연기열선법에서 열선에 의한 유동의 간섭효과를 배제할 수 있는 Re수가 40이내이면 가능하므로 본 실험은 이 조건을 충족한다.

2.2 속도와 난류성분 측정

분사제트내의 속도 및 난류성분측정은 열선유속계(TSI IFA300)와 피토판을 사용하였다. 열선유속계는 사용전 피토판을 사용하여 보정하였으며, 센서는 I형 텅스텐선을 사용하였다. 열선유속계는 CTA(constant temperature anemometer)로 평균속도와 주유동방향 난류성분 $\sqrt{u'^2}$ 의 RMS값을 얻었다. 열선유속계센서는 2축 이송장치에 고정하여 주제트 진행방향과 반경방향으로 이송하면서 측정하였다. 열선유속계에서 측정된 측정값은 DAS20 board를 통하여 컴퓨터에 저장하였으며, 한 지점에서 측정 데이터수는 1초 간격으로 1024개씩 3072개의 값을 측정하여 평균속도 및 난류성분을 구하였다.

3. 실험결과 및 분석

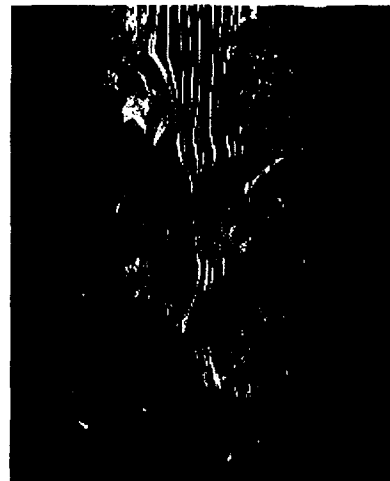
3.1 유동가시화 결과

분사제트의 유동현상 및 제트주위에 형성되는 와류의 형태를 관찰하기 위하여 환형관에서 2차제트 분사 및 흡입속도비를 변화시키면서 고찰하였다. Fig. 3(a)는 $R=1.0$ 로 단지 주제트만 분사될 때의 유동 및 와류의 형성을 보여주고 있다. 이미 알려진 바와 같이 분사제트 외각에서 주위 정체유체와의 전단류가 형성됨으로써 와류(vortex)가 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 있다.

Fig. 3(b)는 분사제트주위의 환형관에서 유체를 흡입하는 경우에 대한 결과로 속도비는 $R=1.45$ ($U_2/U_1=-0.18$)에 해당된다. 이 경우 2차유동이 없는 $R=1.0$ 일 때와 전혀 다른 와류의 양상을 보여주고 있다. $R=1.0$ 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. 이 경우 제트코어



(a)



(b)

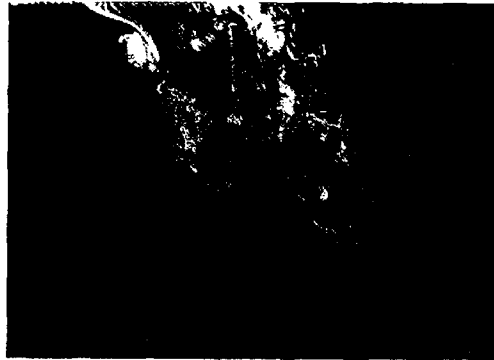
Fig. 3 Smoke-wire flow visualization for axisymmetric jets
(a) $R=1.0$ (b) $R=1.45$

가 길어지는 효과가 예상되지만 Re 수가 3,500으로 저속이기 때문에 주위 정체유체와의 간섭으로 코어의 확장을 가시적으로 알 수 없었다.

분사제트 벡터링에 대한 유동가시화를 위하여 환형관을 이등분하여 한쪽으로부터 유동을 흡입하였다. Fig. 4(a)는 $R \approx 2.1$ ($U_2/U_1 = -0.36$)에 대한 결과로 유동이 흡입하는 쪽으로 편향되는 것을 알 수



(a)



(b)

Fig. 4 Smoke-wire flow visualization for vectorized axisymmetric jets
(a) $R=2.2$ (b) $R=3.3$

있다. 이 경우 제트노즐출구에서 와류도 비대칭적으로 형성되는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 흡입비를 증가시켜서 $R \approx 3.3 (U_2/U_1 = -0.54)$ 로 하였을 경우의 제트유동을 보여주고 있다. 이 경우 아주 심하게 제트가 편향되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 흡입유동 속도비에 따라서 분사제트를 효과적으로 벡터링시킬 수 있다.

3.2 속도 및 난류강도측정 결과

본 연구는 분사되는 축대칭 제트의 유동특성에 영향을 미치는 제트주위의 전단류(mixing layer)를 환형관을 통하여 주위유동을 흡입(counter-flowing), 또는 분출(coflowing)함으로써 조절하고

자 하였다. 속도비는 유동의 안정성을 변화시키고 전단면에서 형성되는 와류의 크기, 강도, 주기 및 거동(vortex pairing등)에 영향을 준다.

분사제트주위의 와류형태에 따라서 주제트유동은 영향을 받아서 속도분포, 난류성분 및 포텐셜 코어길이 등이 변하게 된다. 본 실험에서는 노즐에서 분사되는 제트에 대하여 흡입 및 이차분사속도비를 조절함으로써 주제트의 유동변화를 고찰하였다.

주제트의 평균속도는 $U_1=20\text{m/s}$ 로 고정하여 분사제트 직경과 평균속도를 기준으로한 Re수는 $Re=33,500$ 정도이다. 결과해석에서 주제트와 2차흡입 또는 분사유동 사이의 속도비는 $R = \frac{\Delta U}{2\bar{U}}$ 로 나타내는데 여기서 속도차 $\Delta U = (U_1 - U_2)$ 이고 $\bar{U} = (U_1 + U_2)/2$ 로 주어진다. 평균속도 \bar{U} 는 전단류의 고속유동과 저속유동(또는 역유동)에 의해서 결정되는 전단류 평균속도로 전단면에 형성된 와류의 이동속도 등에 관계된다. 자유제트의 경우 $U_2=0$ 이기 때문에 $R=1$ 이며, 제트주위유동을 흡입하는 경우 U_2 는 음수값을 갖기 때문에 $R > 1.0$ 이고 분사하는 경우 U_2 는 양수로 $R < 1.0$ 이다.

Fig. 5는 제트노즐에서 분사되는 제트의 속도를 노즐출구 근접위치($x/D \approx 0$)에서 측정한 결과이다. 3차식의 유선형 노즐제트의 경우 수축면적비 50:1로 매우크다. 그 결과 반경방향 속도분포 ($2r/D=0$ 는 축대칭 노즐중심, $2r/D=1.0$ 는 노즐출구 끝)가 매우 균일한 것을 알 수 있고, 난류성분도 중심부에서 약 0.3%정도로 낮은 값을 갖고 있다.

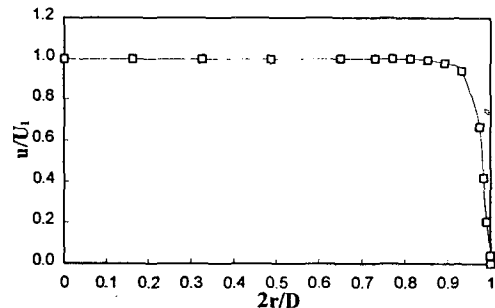


Fig. 5 Radial distributions of velocity at jet exit ($Re=33,500, U_1=20\text{m/s}$)

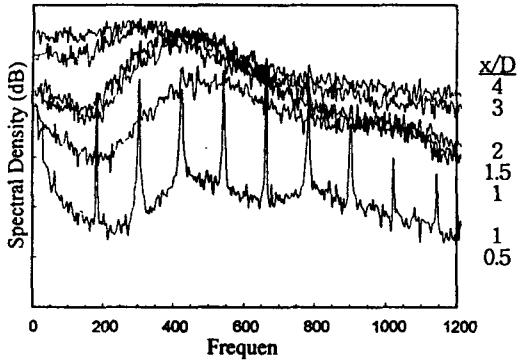


Fig. 6 Power spectral density in an axisymmetric jet without counterflow ($L/D=0.8$, $r/D=0$, $Re=33,500$)

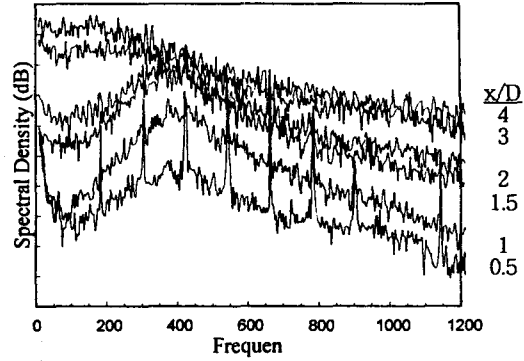
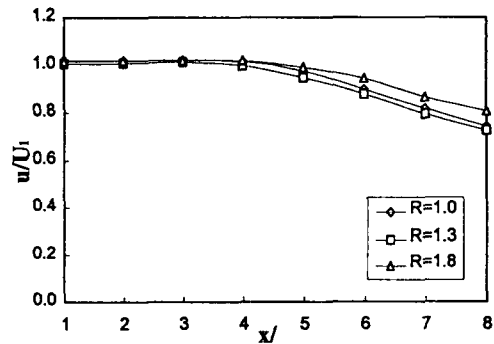


Fig. 7 Power spectral density in an axisymmetric jet with counterflow ($L/D=0.8$, $r/D=0$, $R=1.45$, $Re=33,500$)

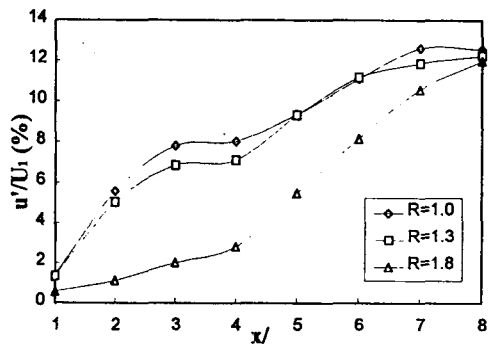
제트주위에 생성되는 와류의 주파수 특성을 알기 위해서 유동방향으로 측정된 값을 이용하여 FFT(fast fourier transform)처리 하였다. 한 지점에서 주파수 측정을 보다 잘 확인하기 위하여 1024개씩 16번 측정하여 평균하였고 검출률(sampling rate)은 4kHz이다. Fig. 6은 흡입유동이 없는 경우에 $0.5 \leq x/D \leq 5$ 에 대한 중심에서의 일반적인 주파수 특성이다. 제트의 전단층에서 생성되는 와류의 영향은 상당히 크기 때문에 중심에서 측정하여도 그 특성을 잘 판별할 수 있다. x/D 가 증가할수록 우세주파수(dominant frequency)는 점차 감소하여 $x/D=0.5$ 와 3인 경우를 비교해 보면 우세주파수가 전단층에서의 와류병합(vortex pairing)에 의해 절반으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 더욱 하류로 내려가면 가시화에서 나타난 것처럼 대류불안정성(convective instability)에 의해 우세주파수는 계속 감소할 것이 예상된다.

이에 비하여 $R=1.45$ 로 흡입한 경우 Fig. 7에서 보는 바와 같이 와류발달특성이 변하게 되는데 우세주파수(dominant frequency)가 하류로 내려갈수록 변화하지 않는 것을 볼 수 있다. 즉, 제트주위의 와류가 절대불안정(absolute instability)으로 바뀌면서 단일 주파수로 나타나는 것이다.

Fig. 8은 환형관을 통하여 흡입이 없는 경우 ($R=1$)와 흡입을 증가시킬 때의 결과를 보여주고 있다. 여기서 u' 은 난류성분 $\sqrt{u'^2}$ 의 RMS값을 나타낸다. 흡입비가 큰 $R=1.86$ 에서 제트포텐셜코어



(a)



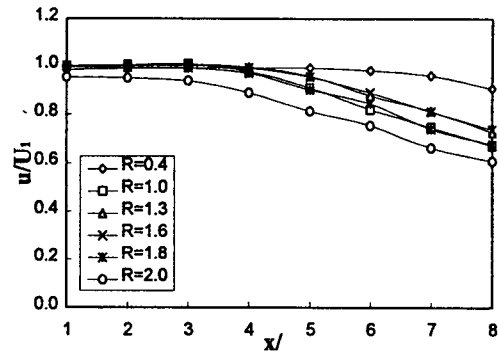
(b)

Fig. 8 Axial distributions for axisymmetric jet without collar ($L/D=0$, $r/D=0$, $Re=33,500$)
(a) velocity (b) turbulent intensity

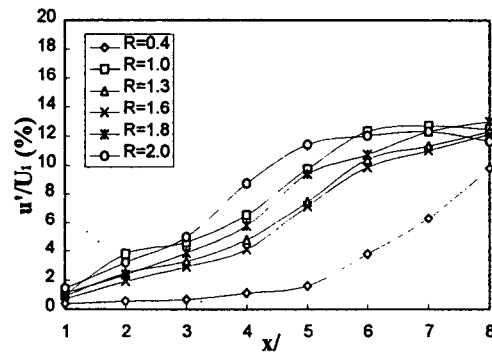
의 길이가 가장 길게 유지되며, 난류성분은 $R=1.0$ 과 1.3에서 노즐출구로부터 급격히 증가하여 거의 전 영역에서 $R=1.86$ 보다 높은 값을 갖는다. 이것은 제트외각에서 전단류에 의해서 형성된 와류가 큰 강도를 가지고 빠르게 중심부까지 침투하는 것을 의미한다. 하지만 $R=1.86$ 의 경우 전단류가 대류 불안정성(convective instability)에서 절대 불안정성(absolute instability)으로 변화된 결과로 중심에서 난류강도가 낮다. 흡입이 없는 경우($R=1.0$) 노즐출구에서 형성된 와류가 하류로 이동하면서 크기가 커지고 앞에서 형성된 와류와 결합(vortex pairing)하여 더욱 큰 와류를 형성하여 쉽게 중심부까지 영향을 주고 제트의 포텐셜코어의 길이를 짧게 한다. $R=1.86$ 의 경우 제트의 주위 유동흡입에 따른 전단류에서 형성된 와류는 절대불안정성을 가지고 발달함으로 와류간의 결합이 형성되지 않기 때문에 주로 제트 외각에서 발달되고 중심부로 영향을 미치는 효과가 하류에서 나타난다. 하류($x/D \sim 8$)에서는 제트주위의 와류가 중심부까지 도달했기 때문에 모든 경우에 비슷한 난류강도를 가지고 있다.

이 실험에서 흡입비(R)에 따른 대류불안정성에서 절대불안정성으로의 천이가 자유전단류의 경우의 $R=1.32$ 보다 더 큰 값에서 일어났다. 이 원인은 환형관에서 흡입할 때 흡입유동이 주제트유동과 평행하게 흡입되지 못하고 환형관 바깥쪽에서 주로 흡입되기 때문에 실제 전단류에서 흡입속도의 크기는 환형관 입구에 얻은 값보다 훨씬 작을 것으로 생각된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 환형관 주위에 깃(collar)을 붙임으로써 흡입 또는 분사 유동이 그 유로를 통해서 흡입됨으로써 주제트와 평행한 전단류를 만들 수 있도록 하였다. 깃의 효과를 보기 위해서 두 개의 다른 높이를 사용했는데 그 높이는 $L/D=0.4$ 와 0.8 이다. 환형관을 통한 유동이 없는 경우($R=1.0$) 주제트 유동의 깃의 설치에 따른 효과를 보기 위해서 속도 및 난류성분을 측정하였다. 깃이 있는 경우 코안다(Coanda)효과 때문에 분사된 제트가 더 퍼질 수도 있지만, 본 실험에서는 환형관의 폭이 $0.38D$ 로 크기 때문에 그 효과는 거의 무시될 정도로 적었다.

Fig. 9는 분사제트에 대하여 환형관 주위에 $0.4D$



(a)



(b)

Fig. 9 Axial distributions for axisymmetric jet with collar ($L/D=0.4$, $r/D=0$, $Re=33,500$)
(a) velocity (b) turbulent intensity

높이의 깃을 붙인 경우에 대하여 제트중심에서 유동을 따라가면서 속도 및 난류성분을 측정된 결과이다. 이 결과와 깃이 없는 경우인 Fig. 8과 비교해 보면 환형관 주위에서의 흡입효과가 확연하게 다르게 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 예상대로 깃에 의해서 환형관을 통한 흡입유동이 주제트와 더욱 평행한 유동을 형성하여 더 큰 전단(shear layer)효과를 만듦에 기인된다.

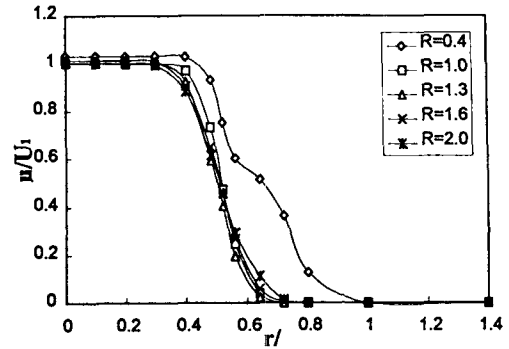
환형관에서 유체가 분사(coflowing; $R < 1.0$)되는 경우 주제트의 포텐셜코어의 길이가 훨씬 더 길어진 것을 알 수 있는데, 이것은 환형제트가 주제트와 주위의 정체유체사이에서 분사되어 2개의 전단

류를 형성하고 두 전단류에서 형성된 와류가 같은 방향으로 회전함으로써 와류발달이 억제되기 때문이다. 이 결과 와류가 중심부로 침투되지 않기 때문에 제트중심부에서의 난류강도는 매우 낮은 것을 알 수 있고, $x/D \geq 5$ 부터 증가하기 시작한다.

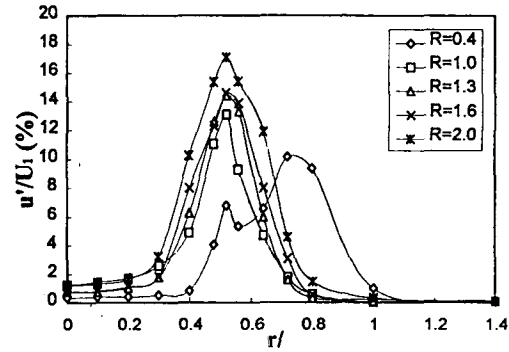
환형관을 통하여 주제트 주위 공기를 흡입시키는 경우(counterflowing ; $R > 1.0$), $R=1.0$ 의 경우보다 $R=1.3$ 과 $R=1.65$ 의 경우 포텐셜코어의 길이가 길어졌다가 흡입비가 더욱 증가하면 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 낮은 난류강도와 작은 경계층 두께의 제트를 발사시키는 경우 어느 특정 속도비(여기서는 $R=1.3 \sim 1.65$)에서 제트 주위의 와류들이 형성후 결합되는 것을 방지시켜서 포텐셜코어 영역에서 더 낮은 난류강도와 더 긴 포텐셜코어를 가짐을 알 수 있다.

난류 강도에서도 이와 같은 현상을 보여주어서 $R=1.0$ 일 때보다 $R=1.3$ 과 $R=1.65$ 일 때 중심에서 낮은 값을 가지고 다시 흡입비가 증가함에 따라서 증가한다. 이 결과는 앞에서 설명했듯이 환형관에서 주제트 공기를 어느 정도 흡입함으로써 전단류에서 대류불안정성을 절대불안정성으로 변환시킴으로써 노즐출구에서 형성된 와류가 전방와류와 결합(vortex pairing)하여 더 큰 와류를 형성하는 효과가 줄어들어 제트 주위 와류가 중심부까지 영향을 미치는 영역이 늦어지게 된다. 이 경우 하류($X/D \geq 8$)에서는 모든 속도비에 대하여 와류가 중심부까지 영향을 주어 혼합됨으로써 비슷한 난류강도를 가짐을 보여주고 있다.

Fig. 10은 $X/D=1$ 인 지점에서 반경 방향으로의 속도 및 난류성분 분포를 보여주고 있다. 환형관에서의 2차제트 분사시($R=0.45$)의 특징은 난류 강도가 두개의 극대점을 가짐을 보여주고 있다. 이것은 주분사제트와 2차 분사제트 사이에 하나의 전단류가 형성되고, 2차 분사제트와 주위의 정체 공기사이에도 또 다른 하나의 전단류가 형성됨을 보여주고 있다. 이 현상은 유동 가시화에서도 보여주었다. 이것은 주분사제트의 경계층이 매우 얇기 때문에 기인되는 것으로 사료된다. 가운데 있는 전단류에 의해서 형성된 와류는 바깥 2차 제트유동에 의해서 제한되기 때문에 더 낮은 난류강도를 갖고, 바깥에 형성된 전단류는 비록 속도비는 작



(a)



(b)

Fig. 10 Radial distributions for axisymmetric jet with collar ($L/D=0.4$, $x/D=1$, $Re=33,500$)
(a) velocity (b) turbulent intensity

지만 더 큰 난류강도를 가짐을 알 수 있다. 측정 위치가 제트 노즐 출구에 가깝기 때문에 환형관에서 흡입하는 경우에 대한 결과 차이는 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 $X/D=4$ 와 제트 중심($r/D=0$)에 속도비를 변화시키면서 측정한 난류성분을 보여 주고 있다. 여기서 알 수 있듯이 속도비가 작은 경우($R < 0.6$: 환형관에서 2차 제트 분사시) 낮은 난류강도를 갖지만, $R=0.6$ 부터 증가하기 시작하여 $R=0.85 \sim 1.15$ 에서 최대치를 갖는다. 그러나 속도비가 더 증가(흡입)함에 따라서 다시 감소하기 시작하여 $R=1.3 \sim 1.65$ 사이에서 다시 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명했듯이 약 $R=1.3$

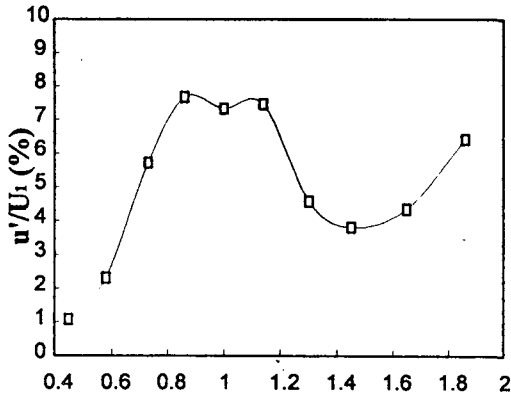


Fig. 11 Turbulent intensity distributions with variable velocity ratio (L/D=0.4, x/D=4, r/D=0, Re=33,500)

에서 전단류가 대류불안정성에서 절대불안정성으로 이동함을 알 수 있다. 이 R=1.3은 다른 전단류에서의 임계값과 근사함을 알 수 있다. 속도비가 더욱 증가하여 R>1.85이면 환형관을 통하여 흡입되는 유동량이 증가하여 주제트가 깃 주위로 확산되어 코안다(Coanda)효과가 생기도록 하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 9(a)에서 R=2.06일 때 분사된 직후에 중심에서의 속도가 1.0보다 낮은 것에서 알 수 있다.

깃(Collar)의 높이 효과를 보기 위하여 Fig. 12는 깃 높이 L/D=0, 0.4 및 0.8의 경우에 대하여 비교하였다. 깃의 높이가 큰 L/D=0.8의 경우가 속도

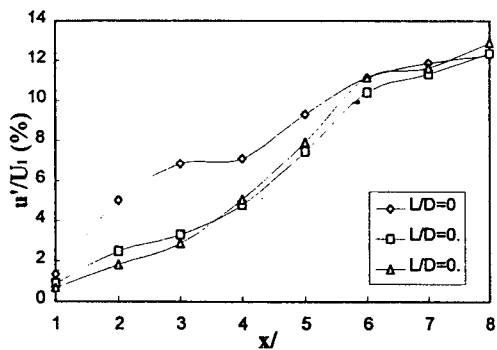
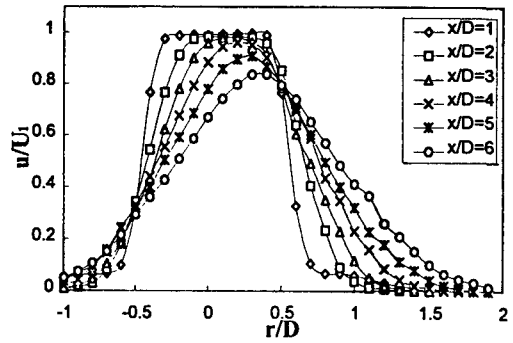
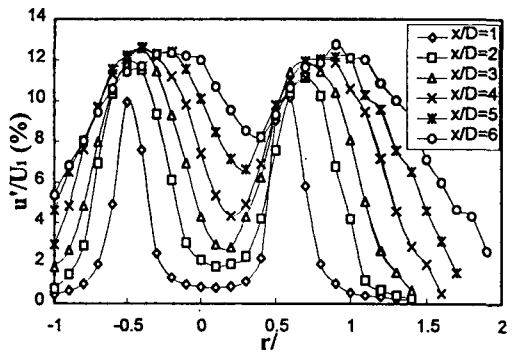


Fig. 12 Turbulent intensity distributions with variable collar length (r/D=0, Re=33,500)



(a)



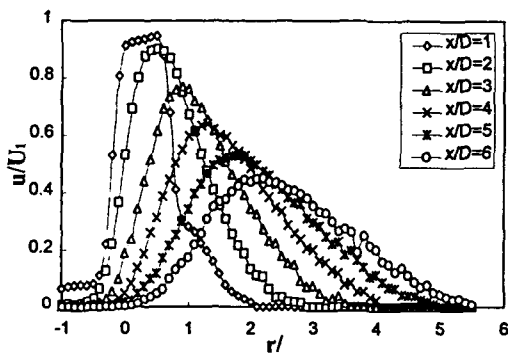
(b)

Fig. 13 Radial distributions for vectorized jet at R=1.7 (L/D=0.8, Re=33,500) (a) velocity (b) turbulent intensity

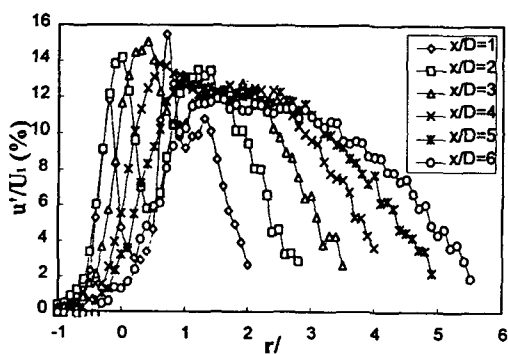
비 효과가 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 결과는 주 제트 주위 공기를 환형관을 통해서 흡입하는 경우, 깃의 높이를 조정함에 따라서 적은 양의 공기를 흡입해도 더 큰 흡입효과를 얻을 수 있다. 그러므로 적은 양의 공기로 주제트의 조절이 가능 할 것이다.

Fig. 13은 분사제트 벡터링을 위하여 이동분된 환형관의 한쪽에서만 분사제트 주위유동을 흡입한 경우에 대한 결과이다. 이 경우 속도비 R=1.7 (U1=20m/s, U2=-5.2m/s)로, 제트노즐출구는 -0.5 ≤ r/D ≤ 0.5에 위치하고 x/D=1.0일 때는 거의 대칭인 제트의 속도분포가 하류로 가면서 제트중심이 편향되는 것을 알 수 있다. 하지만 편향된 제트중

심을 기준으로 속도 분포는 대칭에 가깝다. 난류 성분분포는 $x/D=1$ 일 때 노즐출구를 중심($r/D=0$)으로 거의 대칭이다. 제트포텐셜코어영역($-0.3 \leq r/D \leq 0.3$)에서는 낮은 난류강도를 가지고 양쪽 제트 외각 전단류영역($r/D \sim \pm 0.5$)에서는 높은 값으로 약 10% 정도이다. 이 분포는 제트가 하류로 이동하면서 중심이 편향되지만, 속도분포와 같이 편향중심을 기준으로 대칭이다. 제트중심에서는 난류강도는 하류로 진행하면서 증가하지만 전단류영역에서는 흡입영역이나 자유전단류영역이나 거의 비슷한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 작은 흡입속도비에 기인하는 것으로 사료된다.



(a)



(b)

Fig. 14 Radial distributions for vectorized jet at $R=2.2$ ($L/D=0.8$, $Re=33,500$)

(a) velocity (b) turbulent intensity

Fig. 14는 이분된 환형관의 한쪽에서만 속도비 $R=2.2$ ($U_1=20\text{m/s}$, $U_2=-7.5\text{m/s}$)로 앞의 경우보다 약간 강하게 흡입한 경우에 대한 결과이다. 이 경우 앞의 $R=1.7$ ($U_2=-5.2\text{m/s}$)과 전혀 다르게 분사제트가 급격히 편향되는 것을 알 수 있다. 이와같은 현상은 유동가시화에서도 보여주었듯이 분사제트 주위에 형성된 전단류변화에 따른 효과와 코안다(Coanda)효과가 복합되어 분사제트의 큰 벡터링효과로 나타난다.

제트의 속도분포는 하류로 갈수록 비대칭적으로 나타나는데 이것은 속도측정 방향이 분사제트 노즐출구와 수평하게 열선유속계를 이동하면서 측정된 것에 어느 정도 기인한다.

난류속도성분은 더욱 비대칭적인 분포를 보여주고 있는데, 이분된 환형관중 흡입하지 않는 쪽 ($r/D \leq 0$)은 앞의 경우와 같이 전단류 부근에서 극대값을 가지고 중심부분에서 낮은 값을 갖는다. 하지만 흡입되는 쪽($r/D \geq 0$)에서는 다른 쪽보다 약 2% 정도 낮은 난류강도 값을 갖고 전체적으로 균일분포를 가지고 있다. 그 결과 $x/D \geq 4$ 에서는 단지 하나의 극대값이 넓은 범위에서 존재한다. 이것은 큰 흡입비에 따라 제트주위에 생긴 전단류가 큰 와류를 형성하여 주제트의 포텐셜코어길이가 짧아짐을 의미한다.

이와 같이 약간의 흡입비증가에도 분사제트의 방향이 크게 바뀔 수 있다. 이 결과를 제트 벡터링에 이용하면 쉽게 분사제트의 추력방향을 바꿀 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 실험은 원형제트주위의 유동을 흡입 또는 2차분사함으로써 와류(vortex)유동을 변화시켜 주제트의 속도분포, 난류성분 및 유동방향을 제어하기 위한 연구이다. 실험결과로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- i) 분사제트주위의 환형관으로부터 2차분사하는 경우 주제트 주위에 형성된 와류의 발전 및 결합이 크게 억제되어 제트포텐셜코어의 길이가 크게 길어졌으며, 이 결과는 분사 속도비에 크게 영향 받지 않았다.

- ii) 환형관으로부터 주제트 주위의 유동을 흡입하는 경우 특정 흡입비($R=1.3\sim 1.65$)에서 전단류가 절대불안정성으로 바뀜으로써 주제트 주위의 와류들이 발달 및 결합하여 제트중심까지 영향을 주는 것을 늦출 수 있었다.
- iii) 환형관 주위에 설치한 깃의 높이가 길어질수록 흡입비 효과는 더 크게 나타났으며, 깃의 높이 변화로써 적은 흡입비로도 큰 효과를 얻을 수 있을 것이다.
- iv) 이등분된 환형관의 한쪽에서만 주제트 주위의 유체를 흡입하는 경우 분사제트를 편향(벡터링)시킬 수 있고, 편향정도는 흡입속도비에 따라서 크게 바뀌었다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 기계공학 연구분야 지원연구비(ME95-A-06)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Lepicovsky, J., Ahuja, K. K., Brown, W. H., and Morris, P. J., "Acoustic control of free jet mixing," AIAA Shear Flow Control Conference, AIAA-85-0569, March 1985.
- 2) Parekh, D. E., Reynolds, W. C., and Mungal, M.G., "Bifurcation of round air jets by dual-mode acoustic excitation," AIAA 25th Aerospace Sciences Meeting, AIAA-87-0164, January 1987.
- 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, 1980, pp.449-491.
- 4) Zaman, K. B. M. and Hussain, A. K. M. F., "Turbulence suppression in free shear flows by controlled excitation," J. Fluid Mech., Vol. 103, 1981, pp. 133-159.
- 5) Reisenthel, P., Xiong, Y., and Nagib, H. M., "The preferred mode in an axisymmetric jet with and without enhanced feedback," AIAA 29th Aerospace Sciences Meeting, AIAA 91-0315, January 1991.
- 6) Longmire, E. K., Eaton, J. K., and Elkins, C. J., "Control of jet structure by crown-shaped nozzles," AIAA Journal, Vol.30, No.2, February 1992.
- 7) Wlezien, R. W. and Kibens, V., "Passive control of jets with indeterminate origins," AIAA Journal, Vol.24, No.8, August 1986.
- 8) Perry, A. E., Lim, T. T., and Chong, M. S., "The instantaneous velocity fields of coherent structures in coflowing jets and wakes," J. Fluid Mech., Vol.101, part 2, 1980, pp.243-256.
- 9) Strykowski, P. J. and Niccum, D. L., "The stability of countercurrent mixing layers in circular jets," J. Fluid Mech., Vol.227, 1991, pp.309-343.
- 10) Capone, F., Smereczniak, P., Spentnagal, D., and Thayer, E., "Comparative investigation of multiplane thrust vectoring nozzles," AIAA 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper 92-3264, July 1992.
- 11) Cornelius, K. C., and Lucius, G. A., "Thrust vectoring control from underexpanded axisymmetric nozzles," AIAA 3rd Shear Flow Conference, AIAA Paper 93-3261, July 1993.
- 12) Doonan, J. G., and Kuchar, A. P., "Scale model test results of a multi-slotted 2DCD ejector nozzle," AIAA 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper 92-3264, July 1992.
- 13) Grandmaison, E. W., Pollard, A., and NG, S., "Scalar mixing in a free, turbulent rectangular jet," Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.34, No.10, 1991, pp.2653- 2662.
- 14) Morel, Thomas, "Design of two-dimensional wind tunnel contractions," Journal of Fluids Engineering, 1977, pp.371-378.