

PIV 기법을 이용한 비등온 부력제트의 유동구조에 관한 연구

신대식* · 윤정환** · 이상준†

(1999년 12월 21일 접수, 2001년 3월 8일 심사완료)

Velocity Field Measurements of a Vertical Turbulent Buoyant Jet Using a PIV Technique

Dae Sig Shin, Jong-Hwan Yoon and Sang-Joon Lee

Key Words : Buoyant Jet(부력제트), Entrainment (유입), Velocity Field(속도장)

Abstract

The flow characteristics of a turbulent buoyant jet were experimentally investigated using a single -frame PIV system. The Reynolds number based on the nozzle exit velocity and nozzle diameter was about $Re=5 \times 10^3$. The instantaneous velocity fields in the streamwise plane passing the jet axis were measured in the near field $X/D < 11$ with and without the temperature gradient. By ensemble averaging the instantaneous velocity fields, the spatial distributions of mean velocity, vorticity, and higher-order statistics up to third order were obtained. The temperature difference of 10°C does not affect a significant influence to the flow structure in the near field, but the total entrainment rate is increased slightly. The entrainment rate shows a linear variation with the streamwise distance in the region after $X/D=5.0$.

기호설명

- D : 제트 노즐직경(mm)
- r_e : 제트 노즐반경(mm)
- U_e : 제트 출구속도(m/s)
- R_e : 레이놀즈수
- ΔT : 온도차($^\circ\text{C}$)

1. 서론

제트유동은 산업현장과 난류 연구에 매우 중요한 역할을 담당해 오고 있다.⁽¹⁾ 특히 온도구배가 존재하는 부력제트는 폐기물 처리장치, 하수 처리장치, 냉각탑, 굴뚝 등에서 많이 볼 수 있다. 이와 같은 유동현상을 제대로 이해하고 성능을 향상시키기 위해서는 부력제트의 거동을 정확히 이해하는 것이 중요하다.

난류제트는 두 가지 변수 즉, 초기 운동량 플럭스(momentum flux)와 비부력 플럭스(specific buoyant flux)의 상대적인 중요도에 따라 플룸(plume)과 제트유동(jet)으로 구분된다. 운동량 플럭스가 비부력 플럭스 보다 작을 때 이를 플룸이라고 하고, 운동량 플럭스에 비해 비부력 플럭스를 무시할 수 있는 경우를 제트유동이라고 한다. 그리고 이 두 가지 변수가 모두 중요한 경우를 부력제트라고 한다.

일반적으로 수직 부력제트는 운동량과 비부력 플럭스의 상대적인 크기에 따라 제트 출구에서 하류로 나아간 거리에 따라 3 개의 유동영역으로 구분한다. 첫 번째는 초기 제트영역으로 제트 출구가 가까이에 위치하여 운동량 플럭스가 비부력 플럭스 보다 훨씬 크기 때문에 부력의 영향은 거의 무시된다. 두 번째는 천이영역으로 운동량과 비부력 플럭스가 모두 중요한 영향을 미친다. 세 번째는 플룸 영역으로 비부력 플럭스가 유동특성을 지배하는 하류영역에 해당한다.

제트의 근접영역(near field)은 자기보존상태(self-preservation state)를 이루지 못한 제트영역으로 운동량 플럭스가 지배적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 지금까지 많은 연구자들이 제트유동을 연구해 오고 있으며,⁽²⁻⁵⁾ 일부 결과들은 성공적으

* 회원, 삼성전자, 가전정보총괄 냉공조사업부
 ** 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : sjlee@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2169 FAX : (054)279-3199

로 실제시스템에 적용을 되기도 하였다. 그러나 상대적으로 부력제트에 대한 연구는 아직 미흡하다. 그리고 제트에 대한 대부분의 연구는 먼 하류영역(far field)에 대해 수행되어 왔다. 왜냐하면 이 영역에서는 자기보존상태를 유지하기 때문에 이론 및 수치해석적 연구가 보다 용이하기 때문이다. 그러나 자기보존이 일어나지 않은 근접영역에 나타나는 난류전단층의 발달과 와류 특성들 사이의 관계가 아직 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 근접영역에서도 자기보존상태가 이루어 진다고 가정하여 So와 Aksoy⁽⁶⁾은 난류 수직 부력제트의 운동량과 온도에 관한 와확산을 이론적으로 연구하였다.

최근에 Weisgraber와 Liepmann⁽⁷⁾은 PIV 기법을 이용하여 제트유동의 천이영역에 대해 연구하였다. 이 영역에서는 레이놀즈수가 유동구조와 평균속도를 지배하는 가장 중요한 요인이며, PIV로 구한 난류특성치가 기존의 열선유속계로 구한 결과와 잘 일치한다고 하였다. Drobnik 등⁽⁸⁾은 온도차가 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 인 공기 제트유동에 대해 열선유속계를 사용하여 제트 근접영역에서 발생하는 조직적 와류구조와 열전달 강도 사이의 관계를 실험적으로 연구하였다. 그들은 조직적 와류구조로 인해 생성되는 난류성분의 상당 부분을 열전달 과정이 담당하고 있으며, 온도와 속도의 섭동성분들의 상호작용으로 인해 반경방향의 열전달이 향상된다고 하였다.

윤과 이⁽⁹⁾는 최근 레이저형광여기(LIF) 온도장 측정기법을 이용하여 레이놀즈수 증가에 따른 수직 부력제트의 온도장 변화를 측정하였다. 본 연구에서는 주위 유체와 제트유동 사이에 온도차가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 제트 근접영역에서의 난류특성치들을 비교하고자 한다. 이러한 결과는 부력제트의 유동구조에 대한 이해를 증진시키고 열유체 설비의 설계 및 효율개선에 도움이 될 것이다. 또한, 이론 및 수치적으로 연구하는 연구자들에게 비교 자료를 제공할 수 있을 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구는 시험부 크기가 400(H) × 400(W) × 600(L) mm인 사각 수조 시험부내에 파이프 노즐을 수직으로 설치하여 제트 근접영역에서의 속도장을 측정하였다. 수직 부력 제트는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 제트유동과 주위 유체의 온도제어에 필요한 두 개의 항온조, 유량계, 펌프와 사각수조, 그리고 파이프 노즐 등으로 구성되어 있다. 시험부인 사각 수조는 투명아크릴로 제작하여 입자영상 취득이 용이하게 하였다. 파이프 노즐의 직경(D)은 6.35 mm이며, 파이프의 길이를 70D 이상으로 충분히 길게 하여 제트 노즐 출구에서의 유동

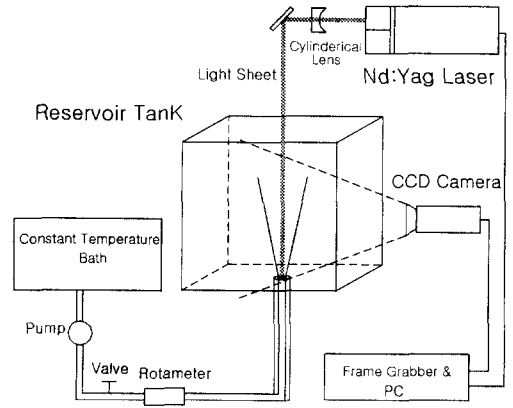


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

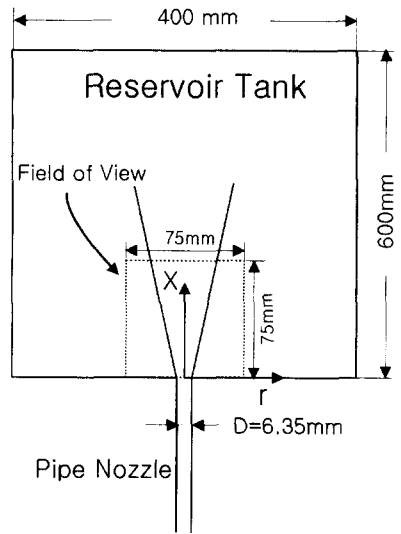


Fig. 2 Measurement section and coordinate system

이 완전히 발달된 유동형태를 가지도록 하였다. 특히, 유동에 의한 제트노즐의 진동을 방지하기 위하여 직경이 30 mm인 아크릴 파이프를 외부에 설치하여 내부의 제트 노즐 파이프를 견고하게 지지하도록 하였다. 그리고 두 개의 파이프 사이 공간을 밀폐하여 안쪽 파이프 내부의 작동유체와 외부공기 사이의 열전달을 최소화하였다. 작동유체로는 수돗물을 사용하였고, 항온조를 지나 수조 바닥면 중앙에 설치한 제트노즐을 통하여 중력가속도와 반대 방향인 수직으로 제트를 분사하였다. 탱크 상부의 유체는 외부의 항온조로 재순환시켜 일정한 온도로 가열한 후 제트노즐로 공급되며 유량은 로터미터(rotameter)를 사용하여 측정하였다. 시간경과에 따른 수조 내부유체의 온도상승을 최소화하기 위하여, 수조상부에 위치한 상대적으로 높

은 온도의 유체를 항온조를 거쳐 재순환시켰다.

속도장 측정은 주위 유체와의 온도차가 없는 경우($\Delta T = 0^\circ C$)와 온도차가 $\Delta T = 10^\circ C$ 인 두 가지 경우에 대해 수행하였다. 분사되는 제트유동의 온도는 $\pm 0.5^\circ C$ 의 오차를 가지는 항온조에 의해 일정하게 유지되었으며, 제트 출구속도는 $U_e = 0.7 m/s$ 로 고정하여 운동량 플럭스를 $\pi r_e^2 U_e^2 = 1.5 \times 10^3 (cm^4/sec^2)$ 으로 같게 하였다. 파이프 직경에 기초한 레이놀즈수는 온도조건에 따라 점성계수가 변하므로 등온 제트의 경우 약 $Re_c = 4 \times 10^3$ 이고, 온도차 $\Delta T = 10^\circ C$ 인 경우는 약 $Re_c = 5 \times 10^3$ 이다. 비부력 플럭스 $\pi r_e^2 U_e [g(\rho - \rho_0)/\rho]$ 는 약 $4.3 \times 10^2 (cm^4/sec^2)$ 이다.

Fig. 2 는 본 연구에서 속도장을 측정할 유동단면과 좌표계를 보여주고 있다. 제트가 분사되는 주유동 방향을 X 축이라고 하고, 그 제트의 반경 방향을 r 방향으로 설정하였다.

2.2 PIV 속도장 측정

본 연구에 사용된 싱글 프레임 PIV 속도장 측정시스템은 Nd:Yag 레이저, CCD 카메라, 영상처리보드, 제어 및 분석용 컴퓨터, 동기장치 등으로 이루어져 있으며, 그 개략도를 Fig. 3 에 나타내었다.

레이저로는 두 개의 광원을 가지고 있는 2-head Nd:Yag 레이저를 이용하였는데 펄스 당 약 25mJ 의 에너지를 방출한다. 영상취득에 사용한 CCD 카메라(SMD4M4)는 영상편이(image shift) 기능이 내장되어 있으며, 해상도는 2K x 2K 이다. 카메라에서 나오는 영상신호(video signal)는 12 비트(bit)이며, 카메라의 셀(cell) 충전율은 100%이고, 초당 4 장의 영상을 얻을 수 있다. 영상처리에는 AM-DIG16R 카드를 장착하고 있는 이미지 보드

(IC-PCI)를 사용하였고, 시스템 제어 및 영상 데이터 분석은 컴퓨터를 이용하여 수행하였다.

본 연구에서 사용한 싱글 프레임 PIV 기법은 하나의 프레임에 이중 노출된 입자영상으로부터 속도장을 추출하는 방식으로 속도벡터 추출을 위해 상호상관법(cross-correlation)을 사용하였다. 상호상관 함수를 구하기 위해 사용되는 두 번째 미소 조사구간은 9 픽셀 만큼 이동시켰다. 이 경우 상호상관 함수는 속도방향을 나타내는 큰 상관 값과 함께 상대적으로 작은 상관 값이 반대위치에 나타나게 되므로 방향 모호성 문제를 해결할 수 있다. 싱글 프레임 PIV 기법을 이용한 속도장 측정에 대한 자세한 정보는 참고문헌⁽¹⁰⁾에 나와있다.

미소조사구간의 크기는 영상 이동량을 고려하여 공간해상도와 SNR(signal-to-noise ratio)이 최적인 상태가 되는 48 x 48 픽셀로 설정하였고, 오버랩핑은 50%로 하였다. 따라서, 공간해상도는 0.878 x 0.878 mm 이다. 산란입자로는 Vestosint[®] 1118 를 사용하였는데, 이 입자의 평균직경은 37 μm 이고 비중은 1.016 이었다.

모든 난류 통계량들은 순간 속도장 500 장을 이상블 평균하여 구하였고, 제트 출구속도(U_e)로 무차원화 시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평균속도

온도구배가 없는 경우와 있는 경우의 평균속도 분포를 Fig. 4 에 나타내었다. 두 경우의 평균속도 분포를 비교해보면 하류로 나아감에 따라 온도구배로 인한 평균속도분포 변화가 거의 나타나지 않는다. 그러므로 운동량 플럭스가 지배적인 제트 근접영역에서는 $\Delta T = 10^\circ C$ 정도의 온도차이에 기인한 부력의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

3.2 난류강도

축 방향과 반경방향 난류강도분포를 Figs. 5 와 6 에 각각 나타내었다. 축방향 난류강도의 경우 전반적인 분포형태와 반경방향으로 확장되는 제트폭은 거의 유사하다. 다만 하류거리 $X/D = 11$ 위치에서 온도구배가 있는 경우의 난류강도의 분포가 온도구배가 없는 경우보다 반경방향으로 제트폭이 약간 증가했음을 볼 수 있다.

하류거리에 따른 축방향 난류강도의 최대값 위치의 궤적을 Fig. 6 에 나타내었다. 여기서 보면 초기 운동량 플럭스가 동일하고 경계조건이 같기 때문에 노즐 출구 부근에서 온도차가 $\Delta T = 10^\circ C$ 로 주어진 경우가 온도차가 없는 경우에 비해 축방향

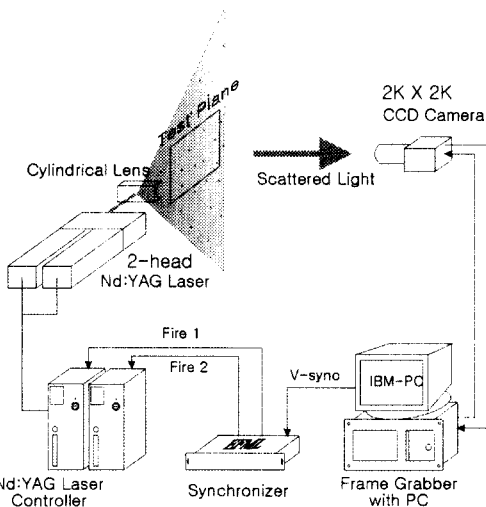
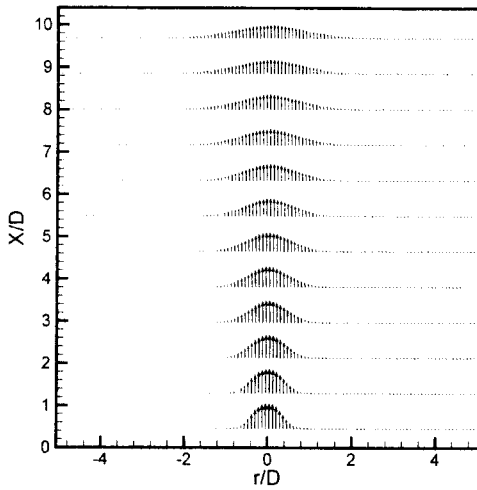
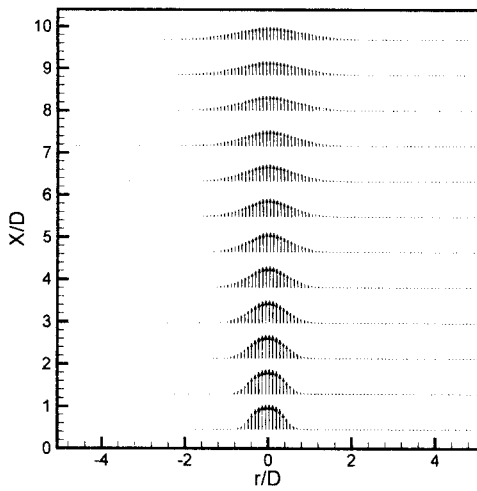


Fig. 3 Hardware set-up of the single-frame PIV system



(a) $\Delta T = 0^\circ\text{C}$



(b) $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

Fig. 4 The mean velocity vectors of a buoyant axisymmetric jet

난류강도가 미소하나 큰 값을 가지며, $X/D = 3$ 이후 영역에서는 하류로 나아감에 따라 최대강도 값을 갖는 위치가 약 5% 정도 반경방향으로 이동되고 알 수 있다. 최대강도 사이의 폭은 약 5% 정도 제트중심에서 반경방향으로 이동되고 있다. 이것은 뒤에서 다시 언급하겠지만, 온도차에 기인하여 제트내부로 유입하는 주위 유체의 유입량이 증가함에 기인한 것으로 생각되어진다.

Fig. 7 에 나타낸 반경방향 속도성분의 난류강도 분포를 보면 노즐 출구부근에서 온도차가 없는 경우에 비해 제트 중심영역에서 다소 작은 값을 가

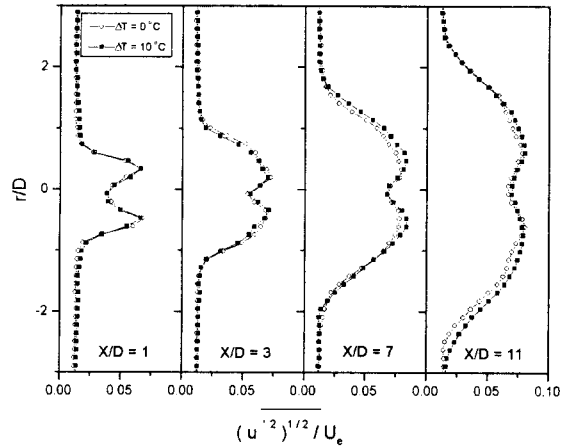


Fig. 5 The streamwise turbulent intensity profiles

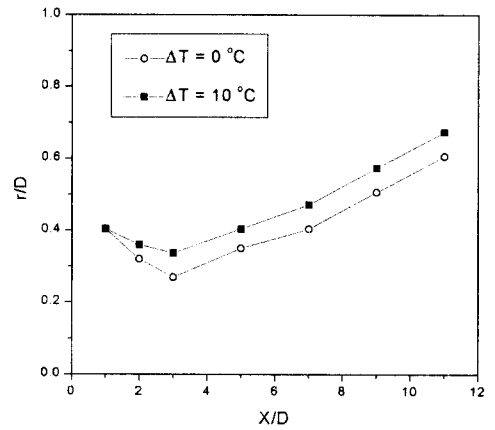


Fig. 6 The variations of the points of maximum turbulent intensity

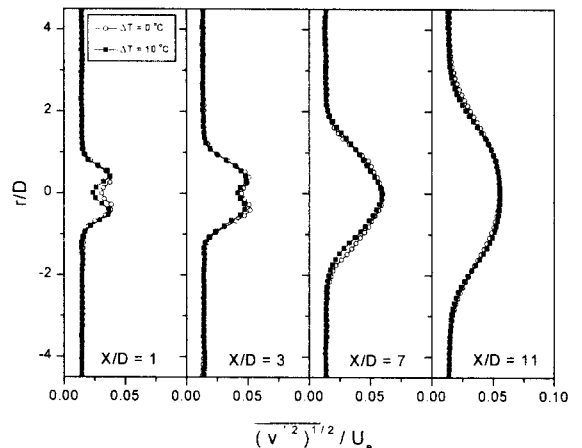
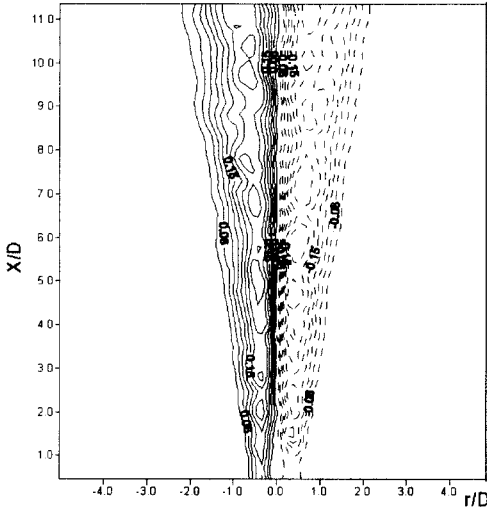
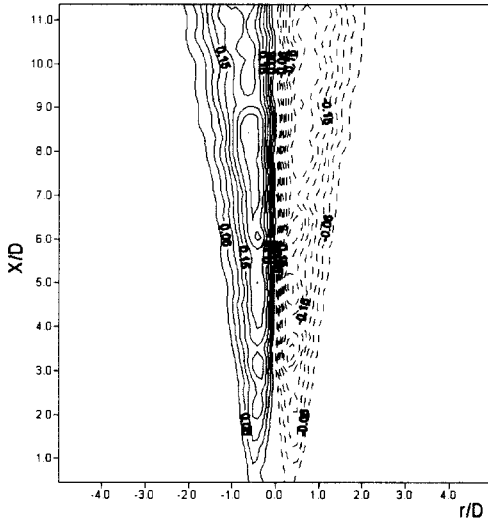


Fig. 7 Variations of the spanwise turbulent intensity profiles



(a) $\Delta T = 0^\circ\text{C}$



(b) $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

Fig. 8 Contour plots of the Reynolds shear stress $\overline{u'v'}$

지나 하류로 나아감에 따라 거의 동일한 분포형태를 가진다. 이것으로부터 동일한 초기 운동량 플럭스 조건하에서 온도차가 주어진 경우 부력효과에 기인하여 축방향 난류강도분포는 다소 증가하고 최대강도를 갖는 위치가 반경방향으로 확장되지만, 반경방향 난류강도는 초기영역에서 오히려 감소함을 알 수 있다.

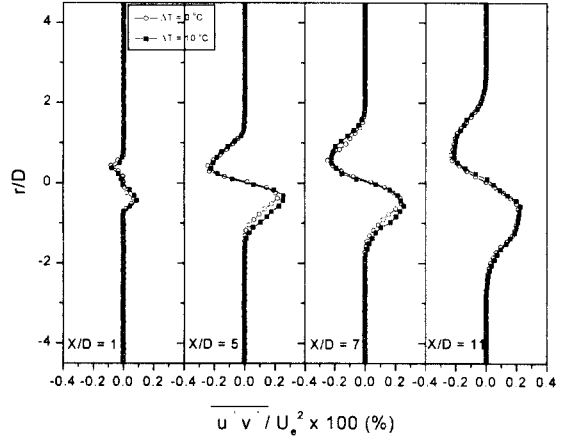


Fig. 9 Variations of the Reynolds shear stress profiles

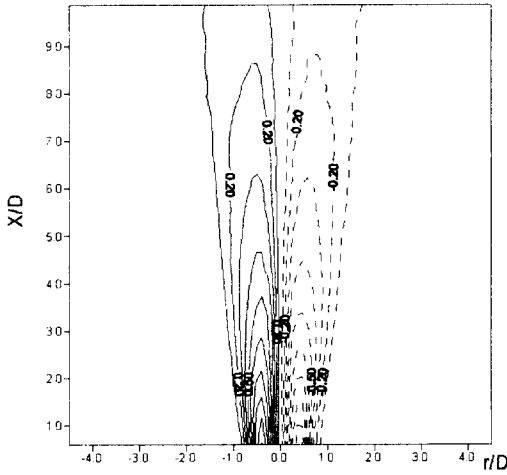
3.3 전단응력

온도구배가 있는 경우와 없는 경우의 전단응력의 공간분포를 Fig. 8에 윤곽선(contour) 형태로 나타내었다. 여기서 음의 값을 가지는 전단응력은 점선으로 표시하였다. 온도구배에 상관없이 전단응력분포는 왼쪽에서 양의 값을, 오른쪽에서 음의 값을 가지며 제트 중심축을 기준으로 거의 대칭적인 형태를 보여주고 있으며, 하류거리에 따른 전단응력의 폭은 거의 같다.

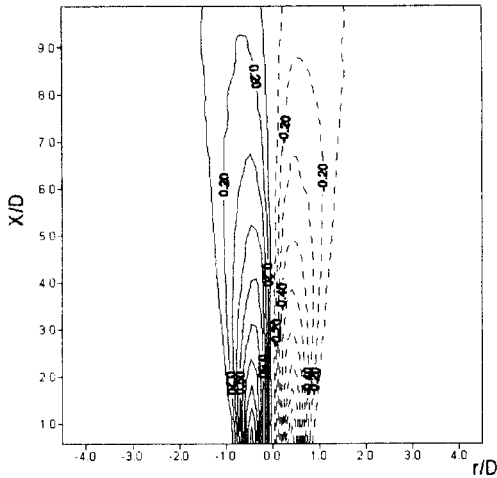
전단응력값은 평균속도 구배에 비례하므로 Fig. 4의 평균속도 분포에서 속도구배가 큰 영역에서 국부적인 최대값을 가진다. 온도구배에 따른 전단응력분포의 차이점을 좀 더 자세히 비교하기 위하여 하류거리에 따른 전단응력 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 보면 하류거리에 따른 전단응력 분포차이는 크지 않다. 이것으로부터 밀도차에 의해 제트 초기영역에서 축방향 난류강도값은 다소 증가하였지만, 반경방향의 난류강도가 상대적으로 감소하여 직접적인 전단응력의 증가로 이어지지 않음을 알 수 있다.

3.4 와도분포

속도장 결과로부터 구한 와도분포를 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 시계방향으로 회전하는 음의 와도를 점선으로 표시하였다. 언뜻 보면 온도차에 상관없이 와도분포는 전단응력과 마찬가지로 거의 유사한 공간분포를 가지는 것처럼 보인다. 그러나, 제트 초기영역을 자세히 보면 온도차가 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 로 주어진 경우가 부력효과로 유입량이 증가하여 다소 큰 와도값을 가지며, 하류로 나아갈수록 일정한 와도값을 갖는 윤곽선이 제트 중심쪽으로 다



(a) $\Delta T = 0^\circ\text{C}$



(b) $\Delta T = 10^\circ\text{C}$

Fig. 10 Spatial distributions of the vorticity contours

소 줄어들음을 볼 수 있다.

3.5 유입량

주위 유체의 유입량(entrainment rate) Q_e 는 임의의 하류 위치에서의 유량 Q 와 노즐출구 유량 Q_0 에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$Q_e = Q - Q_0 \quad (1)$$

여기서, $Q = 2\pi \int_0^\infty ur dr$ 이다.

온도차이가 있는 경우와 없는 경우의 유입량 변

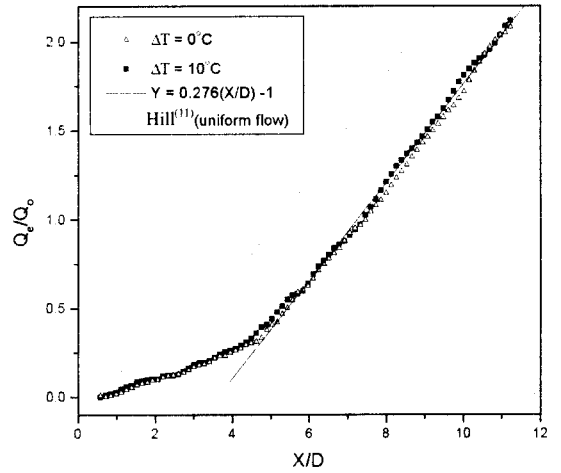


Fig. 11 Comparison of the entrainment rate

화를 제트 출구로부터 하류거리에 따른 함수로 하여 Fig. 11 에 나타내었다. 축대칭 오리피스 제트 유동에 대한 비교를 위해 Hill⁽¹¹⁾의 결과를 함께 표시하였다. 레이놀즈수 $Re = 6 \times 10^4$ 로 노즐 출구에서 균일유동조건인 Hill의 결과가 충분히 발달된 포물선 형태의 노즐 출구 속도분포를 갖는 본 연구에 비해 초기영역에서 훨씬 많은 유입량을 보여주고 있다, 그러나 $X/D = 5$ 이후 영역에서 두가지 제트유동의 유입량은 거의 유사한 기울기를 가지고 있음을 볼 수 있다. 그리고 온도차 유무에 상관없이 유입량은 $X/D = 5$ 이후 영역에서 하류로 나아감에 따라 선형적으로 증가하고 있다. 이것은 노즐 끝에서 발달한 전단층이 제트 중심축과 만나는 지점 이후부터 유체들이 활발하게 혼합되어 난류의 확산성이 거의 비슷하게 증가하기 때문으로 보인다. 그러나 $X/D = 4$ 이후 영역을 자세히 보면 온도차가 있는 경우가 없는 경우에 비해 다소 높은 유입량을 보여주고 있다. 이것은 온도차이에 기인한 부력 효과로 증가한 유입량을 나타낸다. 제트출구부터 $X/D = 11$ 위치까지의 유입량을 적분한 결과, 온도차 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 인 경우가 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 인 경우에 비해 전체 유입량이 약 4 % 증가한 것으로 나타났다.

3.6 3차 모멘트

온도구배가 없는 경우와 있는 경우의 비대칭도(skewness) 분포를 Fig. 12 에 나타내었다. 두 경우에 대한 비대칭도의 전반적인 분포 형태는 비슷하며, 제트 전단층 경계부분에서 크게 감소하는 경향을 보이고 있다. 제트 중심에서는 음의 값을 가

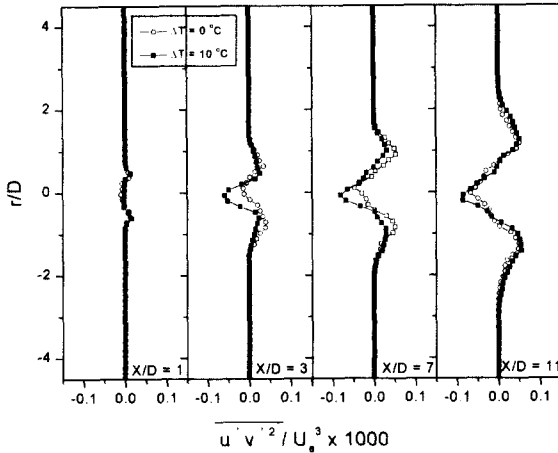


Fig. 12 Variations of the skewness factor

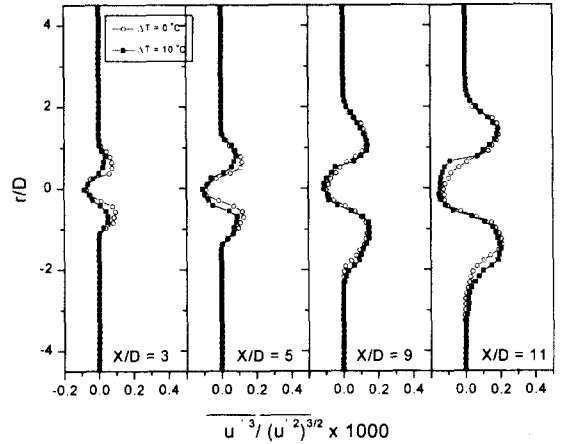


Fig. 13 Turbulent transport of the Reynolds shear stress

지며 와류들이 활발하게 발달하는 전단층 영역에서는 양의 값을 가진다. 하류거리 $X/D = 11$ 위치에서 구한 비대칭도의 최대정점 사이의 거리는 온도구배가 있는 경우가 없는 경우보다 약 5% 정도 제트중심에서 반경방향으로 증가하였다. 이것은 앞의 축방향 난류강도의 경향과 일치하고 있다.

두 경우에 대하여 하류거리로 나아감에 따른 난류전단응력의 전달분포 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 제트중심에서는 난류전달 성분이 음의 값을 가지며, 전단층 영역에서는 양의 값을 가진다. 이는 전단층에서 전단응력이 반경방향으로 전달되는 것을 보여주는 것으로 주위 유체의 유입에 기인한 혼합효과를 나타낸다. 그리고 온도구배가 있는 경우 하류로 나아감에 따라 온도차가 없는 경우보다 운동량전달이 반경방향으로 확장되어 나감을 볼 수 있다. 그래서 하류거리 $X/D = 11$ 위치에서 최대값 사이의 거리를 측정해 본 결과, 온도구배가 있는 경우가 없는 경우보다 최대값 사이의 폭이 약 5% 정도 제트중심에서 반경방향으로 증가한 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 온도차가 주어진 경우, 온도차가 없는 경우에 비해 축방향 난류강도와 함께 비대칭도와 전단응력 난류전달분포에서 최대값을 갖는 위치가 반경방향 쪽으로 약 5% 정도 증가한 것으로 나타났다.

4. 결론

PIV 입자영상 유속계를 이용하여 제트 근접영역에서 온도차가 있는 경우($\Delta T = 10^\circ\text{C}$)와 없는 경

우($\Delta T = 0^\circ\text{C}$)에 대하여 제트유동의 속도장을 측정하여 난류특성 변화를 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 초기 운동량 플럭스가 같고, 온도차가 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 인 경우, 온도차가 제트 근접영역의 평균속도에 미치는 영향은 거의 없었다.
- (2) 온도차가 주어진 경우, 부력효과에 기인하여 초기 영역에서 축방향 난류강도는 다소 증가하나 반경방향 난류강도는 감소하였다.
- (3) 제트 근접영역에서 온도차에 기인하여 전체 유입량이 약 4% 증가하였으나, $X/D = 4$ 이후 영역에서 유입량 증가율은 온도차가 없는 경우와 같게 나타났다.
- (4) 온도차 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 가 주어진 경우, 유입량 증가로 인해 제트 근접영역에서 축방향 난류강도, 비대칭도와 전단응력의 난류전달분포에서 최대값을 갖는 정점사이의 거리가 약 5% 정도 증가하였다.

후 기

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Liepmann, H. W. and Laufer, J., 1947, "Investigation of Free Turbulent Mixing," *NACA TN* 1257.
- (2) Wygnanski, I. And Fieldler, H., 1969, "Some

- Measurements in the Self-Preserving Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, pp. 577 ~ 612.
- (3) Yule, A. J., 1978, "Large-scale Structure in the Mixing Layer of a Round Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 89, pp. 413 ~ 423.
- (4) Liepmann, D. M., 1991, "Streamwise Vorticity and Entrainment in the Near Field of a Round Jets," *Phys. Fluids A*, 3, pp. 1179 ~ 1187.
- (5) Hussein, H. J., Capp, S. P. and George, W. K., 1994, "Velocity Measurements in a High-Reynolds-Number, Momentum-Conserving, Axisymmetric, Turbulent Jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 258, pp. 31 ~ 75.
- (6) So, R. M. C. and Aksoy, H., 1993, "On the Vertical Turbulent Buoyant Jets," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 13, pp. 3187 ~ 3200.
- (7) Weisgraber, T. H. and Liepmann, D., 1998, "Turbulent Structure during Transition to Self-Similarity in a Round Jet," *Exp. in Fluids*, Vol. 24, pp. 210 ~ 224.
- (8) Drobniak, S., Elsner, J. W. and EL-Kassem, E. S. A., 1998, "The Relationship between Coherent Structures and Heat Transfer Processes in the Initial Region of a Round Jet," *Exp. in Fluids*, Vol. 24, pp. 225 ~ 237.
- (9) 윤정환, 이상준, 2000, "레이저형광여기(LIF)를 이용한 비등온 제트유동의 온도장 측정," 대한기계학회논문집 B 권, Vol. 24, No. 10, pp. 1399 ~ 1408.
- (10) 신대식, 이상준, 2000, "고해상도 CCD 카메라를 이용한 Single-Frame PIV 속도장 측정기법 개발," 대한기계학회논문집 B 권, Vol. 24, No. 1, pp. 21 ~ 28.
- (11) Hill, B. J., 1972, "Measurement of Local Entrainment Rate in the Initial Region of Axisymmetric Turbulent Air Jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 51, Part 4, pp. 773~779.