

LIF와 PIV 기법을 이용한 부력제트의 온도장과 속도장 동시측정

김석^{*}·장영길^{*}·이상준^{**}

Simultaneous Measurements of Temperature and Velocity Fields of a Buoyant Jet Using LIF and PIV Techniques

Seok Kim^{*}, Young Gil Jang^{*} and Sang Joon Lee^{**}

Key words : LIF(레이저 이미징 유도형광), PIV(입자 영상 유속계), Buoyant Jet(부력제트), Mixing(혼합)

Abstract

The flow structure and heat transfer characteristics of a turbulent buoyant jet were investigated experimentally. The instantaneous temperature and velocity fields in the near field were measured using a two-frame PIV and PLIF techniques. A thin light sheet illuminated a two-dimensional cross section of the buoyant jet in which Rhodamine B was added as a fluorescent dye. The intensity variations of LIF signal from Rhodamine B molecules scattered by the laser light were captured by a CCD camera after passing an optical filter. By ensemble averaging the instantaneous temperature and velocity fields, the mean temperature and velocity fields as well as the spatial distributions of turbulent statistics were obtained. The results show the flow structure and convective heat transfer of the developing shear layer in the near field.

1. 서 론

제트 유동은 혼합공정과 전자부품의 냉각, 그리고 유동소음 제어 등과 같은 많은 공학분야에서 응용되고 있다. 특히 온도 구배가 존재하는 부력제트는 폐기물 처리나 하수 처리시설, 냉각탑, 굴뚝 등에서 많이 볼 수 있다. 이와 같은 유동현상을 제대로 이해하고 성능을 향상시키기 위해서는 부력제트의 거동을 정확히 이해하는 것이 매우 중요하다.

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

일반적으로 수직 부력제트는 운동량 플러스와 비부력 플러스의 상대적인 크기에 따라 제트 출구에서 하류로 나아간 거리에 따라 크게 3개의 유동영역으로 구분한다. 첫 번째는 초기 제트영역으로 제트 출구 가까이에 위치하여 운동량 플러스가 비부력 플러스 보다 훨씬 커 부력의 영향은 거의 무시된다. 두 번째는 천이영역으로 운동량 플러스와 비부력 플러스가 모두 중요한 영향을 미친다. 세 번째는 플룸 영역으로 비부력 플러스가 유동특성을 지배하는 하류영역에 해당한다. 기존의 많은 연구는 주로 자기보존(self-preservation) 조건을 만족시키

는 후류영역에 초점을 맞추었다. 그러나, 실제 많은 응용분야에서 나타나는 유동 문제를 제대로 해결하기 위해서는 근접영역의 유동구조의 파악이 중요하다. 그리고, 제트의 유동특성을 이해하기 위해서는 근접영역에서의 코히어런트 구조와 와ortex)의 소멸 메커니즘을 알아야 한다.

본 연구에서는 LIF 기법과 PIV 기법을 이용하여 부력제트의 순간 온도장과 속도장을 측정하였다. 순간 속도장과 온도장의 양상을 평균을 통해 부력제트의 근접영역에서의 혼합 메커니즘과 전단층 발달, 열전달 특성을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험의 장치개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 크기가 $400 \times 400 \times 600 \text{ mm}^3$ 인 저장탱크 바닥 면에 수직으로 지름이 3mm이고 길이가 510mm인 원형 파이프를 설치하였다. 열전대를 이용하여 주위의 온도(T_a)와 제트의 온도(T_j)를 측정하였다. 2 대의 항온조를 이용하여 저장탱크의 물의 온도를 일정하게 유지시키고, 일정한 온도로 가열된 물을 원형 파이프로 주입시켜 부력제트를 생성시켰다. 두 대의 $1K \times 1K$ CCD 카메라를 이용하여 LIF 신호와 입자영상은 획득하였다. 배경 노이즈의 영향을 제거하고 방출된 빛을 선택적으로 취득하기 위해 광학필터를 사용하였다. 이때, 레이저 광장을 포함한 흡수 광장영역의 신호를 제거할 수 있는 광학 필터($\lambda > 570\text{nm}$)를 사용하여 방출 스펙트럼 신호만을 취득하여 측정오차를 최소화하였다. 다른 한 대의 $1K \times 1K$ CCD 카메라를 이용하여 속도장 측정을 위한 입자 영상을 획득하였다. 이 두 대의 CCD 카메라를 delay generator를 이용하여 Nd:YAG 레이저와 동기 시켰다.

광학 필터를 통과한 Rhodamine B의 LIF 신호 영상 취득 시, 카메라의 게인(gain)과 배경 노이즈 레벨을 조절하여 충분한

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

E-mail: jandi@postech.ac.kr

TEL: (054) 279-5552, FAX: (054) 279-3199

** 화원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail: sjlee@postech.ac.kr

TEL: (054) 279-2169, FAX: (054) 279-3199

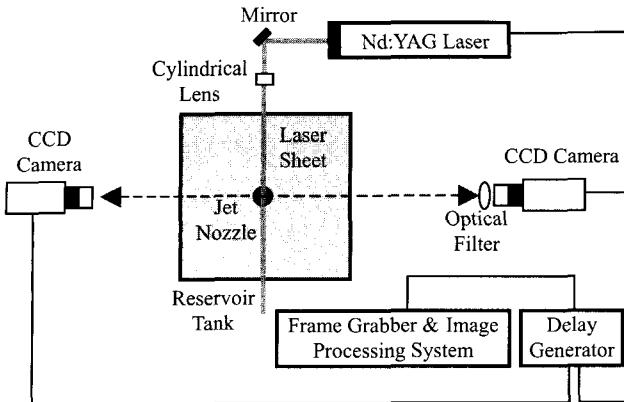


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for LIF and PIV simultaneous measurements

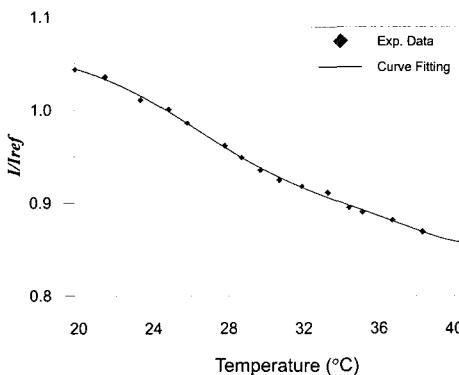


Fig. 2 LIF image intensity versus real temperature

크기의 LIF 신호를 측정하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 레이놀즈 수를 $Re=1\times10^3, 2\times10^3, 4\times10^3$ 로 변화시키면서 온도차가 $\Delta T=0, 20.2^\circ\text{C}$ 인 제트유동을 LIF 기법과 PIV 기법을 이용하여 온도장과 속도장을 동시에 측정하였다. 저장탱크에 물을 채우고 온도장 측정에 앞서 Rhodamine B를 약 0.15 mg/liter 첨가한 수용액을 가지고 LIF 신호와 온도와의 상관관계를 구하기 위한 보정실험을 수행하였다. LIF 신호와 온도 사이의 관계는 카메라와 레이저의 광학적 조건에 따라 변화한다. 따라서, 카메라 및 레이저 광량, 조명 조건 등을 실제 측정과 동일한 조건에서 보정실험을 수행하였다. 저장탱크의 내부를 항온조와 연결하여 내부의 작동유체를 일정 온도로 유지시킨 후, 열전대를 이용하여 내부의 온도를 측정하고 동시에 LIF 신호를 측정하였다. 보정실험 시 작동유체의 온도를 증가시키면서 온도 변화에 따른 LIF영상을 측정하였다. Fig. 2는 측정한 LIF 신호의 크기와 온도 사이의 관계를 나타낸 보정결과이다. 측정구간인 약 19.0°C 에서 41.0°C 사이에서 LIF 신호의 강도(intensity)가 온도 증가에 따라 선형적으로 감소하고 있다. 각각의 픽셀에서 온도 증가율과 LIF 신호의 강도 감소율의 비를 계산한 다음, 이를 이용하여 CCD 카메라로 측정하고 LIF 영상으로부터 온도분포를 구할 수 있다. 제트유동의 속도장 및 온도장 측정시 가열된 유체를 원형 파이프를 통해 항온조를 이용하여 일정온도로 유지한 tank 내부로 유입시켰다. 실험을 수행하는 동안, 렌즈의 조리개는 f2.8 조건으로 고정하였고 온도 정보가 없는 입자 사이의 배경처리와 노이즈 제거를 위하여 8×8 픽셀 가우시안(Gaussian) 필터를 이용하였

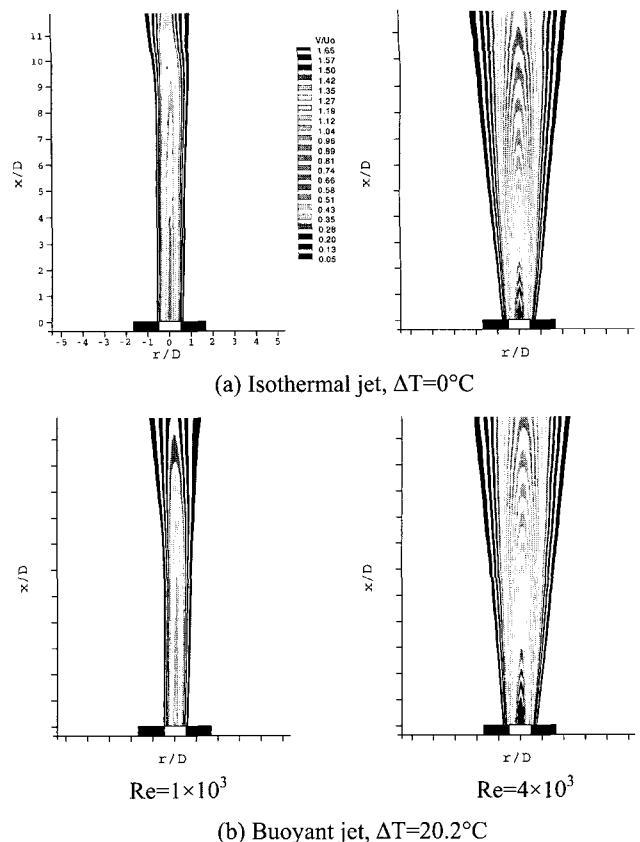


Fig. 3 Variation of streamwise mean velocity fields

다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평균 속도장 측정 결과

평균 속도장은 500장의 순간속도장을 앙상을 평균하여 얻었다. 본 실험은 Reynolds 수 $Re=1\times10^3, 2\times10^3, 4\times10^3$ 에서 수행하였다. Fig. 3(a)와 3(b)는 등온 제트와 비등온 부력제트의 축 방향의 평균 속도장 결과이다. 부력 제트 실험에서 제트의 온도(T_j)는 주위의 온도(T_∞)보다 20.2°C 높다. 두 경우의 평균속도분포를 비교해보면 하류로 나아감에 따라 온도구배로 인한 평균 속도분포 변화가 크게 나타나지 않았다. 그러므로 운동량 플러스가 지배적인 제트 근접영역에서는 $\Delta T=20^\circ\text{C}$ 정도의 온도 차이에 기인한 부력의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

3.2 난류강도 변화

축 방향과 반경 방향 난류강도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 축 방향 난류강도의 경우, 전반적인 분포형태와 반경 방향으로 확장되는 제트폭은 등온제트의 결과와 거의 유사하다. 다만 하류거리 $x/D=7$ 위치에서 온도구배가 있는 경우의 난류강도의 분포가 등온제트의 경우보다 반경방향으로 제트폭이 약간 증가했음을 볼 수 있다. 반경 방향 속도성분의 난류강도분포를 보면 노즐 출구부근에서 온도차가 없는 경우에 비해 제트 중심영역에서 다소 작은 값을 가지나 하류로 나아감에 따라 거의 동일한 분포형태를 가진다. 이것으로부터 동일한 초기 운동량 플러스 조건하에서 온도차가 주어진 경우 부력효과에 기인하여 축 방향 난류강도분포는 다소 증가하고 최대강도를 갖는 위치가 반경 방향으로 다소 확장되지만, 반경 방향 난류 강도는 초기영역에서 오히려 감소함을 알 수 있다.

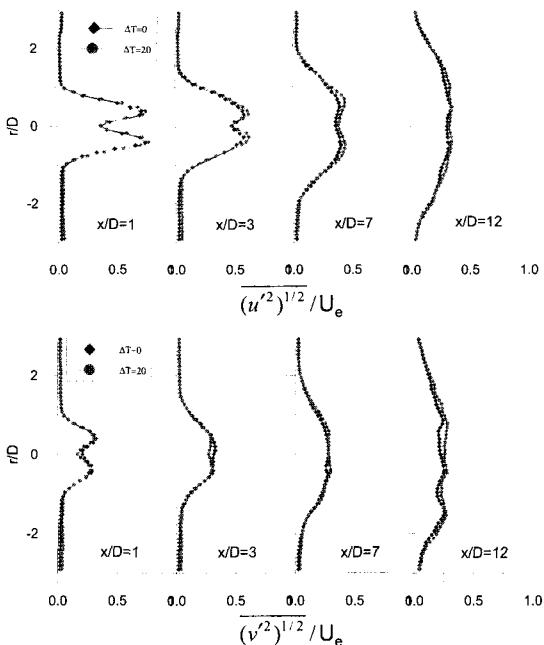


Fig. 4 Variation of the streamwise and spanwise turbulent intensity profiles, $Re=4\times 10^3$

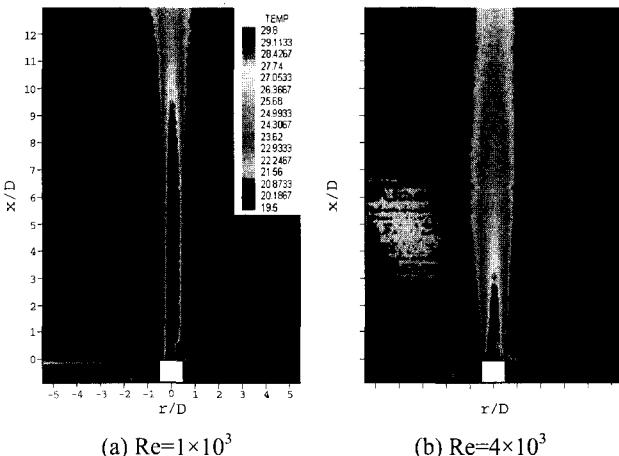


Fig. 5 Mean temperature field, $\Delta T=20.2^\circ\text{C}$

3.3 평균 온도장 측정 결과

Fig. 5는 $Re=1\times 10^3$, 4×10^3 , 온도차이 $\Delta T=20.2^\circ\text{C}$ 인 조건 하에서 500장의 순간 LIF 화상을 평균하여 구한 부력 제트의 평균 온도장 결과를 나타낸 것이다. 평균 온도장은 평균 속도장 결과와 비슷한 공간 분포를 가지는 것으로 나타났다. 자세히 보면 제트 출구에는 원뿔형태의 포텐셜 코어(potential core) 영역이 존재하는데, 이 영역 내에서는 외부 유체와의 혼합이 거의 이루어지지 못해 제트의 출구 온도가 거의 그대로 유지되고 있다. 제트가 하류로 나아감에 따라 제트폭이 넓어지며, 외부 유체의 유입과 혼합이 확실해짐에 의해 제트 중심축을 따라 온도가 점차 감소하고 있음을 보여주고 있다. 그리고, 임의의 하류 위치 단면에서 보면 제트 중심축에서 가장 높은 온도값을 가지며, 중심에서 반경 방향으로 멀어질수록 온도가 감소하고 있다. 부력제트는 중심축을 기준으로 좌우 대칭인 온도장 결과를 보여주고 있다. 본 그림에서 일정온도를 유지하고 있는 저장탱크 내부 온도를 보면 제트 중심축에 대해서 왼편이 작지만 다소 높은 온도 값을 가지는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 얇은 레이저 평면광이 난류 부력 제트를 지나

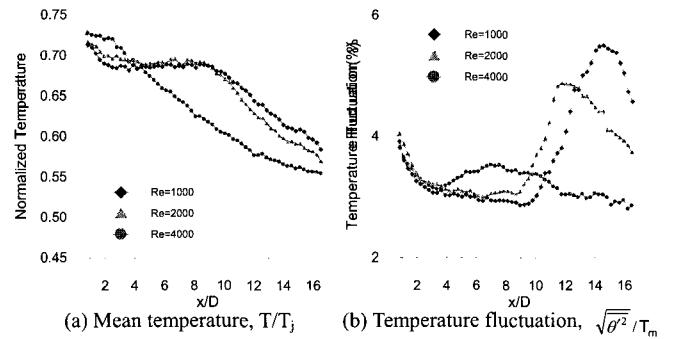


Fig. 6 Mean temperature and temperature fluctuation profiles along the jet axis ($r/D=0$)

면서 심하게 굴절되기 때문이다. 이러한 레이저 평면광의 불균일성 혹은 난류유동의 에디(eddy)거동에 기인한 굴절율 차이 등이 난류유동의 LIF온도장 측정에 있어서 어려움을 유발하는 요인이 된다.

3.4 제트 중심축에서의 온도특성

Fig. 6은 온도장 결과로부터 제트 중심축($r/D=0$)을 따른 평균 온도 및 온도변동성분의 변화를 추출하여 나타낸 그래프이다. $Re=1\times 10^3$ 의 경우, $x/D=9$ 위치까지 평균온도의 감소가 크지 않다가 $x/D>9$ 구간에서 온도가 거의 선형적으로 감소하고 있다. 온도변동성분 변화를 나타낸 Fig. 5(b)를 보면 $Re=1\times 10^3$ 의 경우, $x/D=10$ 인 위치에서부터 온도변동성분이 증가하다가 $x/D=14.5$ 에서 최대값을 가진 후 다시 감소하고 있다. $Re=2\times 10^3$ 의 경우에는 약 $x/D=8$ 인 위치 영역부터 평균온도의 감소가 거의 선형적으로 이루어지고 있으며, 온도변동성분은 약 $x/D=9$ 에서부터 증가하다가 $x/D=11.5$ 근처에서 최대값을 가진 다음 감소하고 있다. $Re=4\times 10^3$ 의 조건에서는 약 $x/D=3$ 인 위치에서부터 평균 온도 감소가 발생하였다. 온도변동성분의 초기 감소 경향은 다른 두 경우의 경향과 거의 유사하지만 $x/D=3$ 에서 최소값을 가지고 점차 증가하여 $x/D=7$ 에서 약 3.5%의 국소 최대값을 가진다. 이 값은 제트 중심에서의 온도변동성분보다 작다. 제트 노즐에서의 초기 유동조건이 충류에서 천이, 난류 유동으로 변화함에 따라 제트중심 영역에서 온도가 감소하기 시작하는 지점이 점점 제트 출구 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 이것은 제트 유속이 증가함에 따라 포텐셜 코어의 길이가 짧아지고 있음과 밀접한 관련이 있으며, 제트 노즐로부터 발달한 전단층이 제트 중심축과 교차하는 하류영역에서 외부 유체와의 혼합이 증가하고 열전달이 증가하기 때문이다. 또한 온도변동성분 결과에서도 제트 노즐로부터 발달한 온도전단층이 제트 중심부와 cross할 때까지 제트 중심부에서 온도변동성분이 감소하였다가 다시 증가하기 시작하는 지점이 서로 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

3.4 Turbulent heat flux

난류 열유속 (turbulent heat flux) $\overline{u'\theta'}$ 를 Fig. 7에 나타내었다. $Re=4\times 10^3$ 의 경우, 난류 열유속의 분포 형상은 축 방향 난류강도 분포와 유사하다. 레이놀즈 수에 관계없이 열유속 분포는 $x/D=1$ 과 3 위치의 전단층에서 이중 정점을 갖는다. 최대값의 위치는 속도구배가 최대인 지점과 거의 일치함을 볼 수 있다. 하류로 나아감에 따라 이중 정점은 점차 사라져가고 정규분포 형태로 변해간다. 레이놀즈 수가 $Re=1\times 10^3$ 일 때, 이와 같은 이중 정점 특징은 포텐셜 코어의 길이가 길어서 하류까지 그 영향이 지속되고 있음을 볼 수 있다.

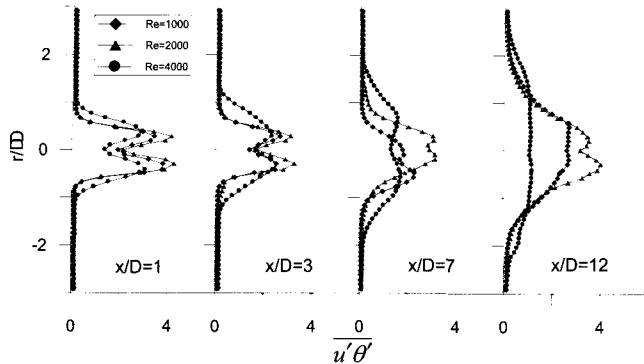


Fig. 7 Variation of streamwise turbulent heat flux

4. 결 론

2-frame PIV 속도장 측정기법과 LIF 온도장 측정기법을 동시에 적용하여 비등온 수직 부력제트의 유동구조와 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 평균 속도장과 온도장, 그리고 난류 통계치의 공간 분포는 순간 속도장과 온도장을 양상을 평균하여 구하였다. 초기 운동량 풀럭스가 같고, 온도차가 $\Delta T=20.2^{\circ}\text{C}$ 인 부력제트의 경우 온도차가 제트 근접영역의 평균속도에 미치는 영향은 크지 않았다. 파이프 출구 조건이 층류에서 천이, 난류영역으로 변화함에 따라 제트 근접영역에서 유체 유입이 증가하였으며, 하류로 나아감에 따라 제트폭이 증가하고 온도감소가 크게 나타났다. LIF 기법으로 측정된 온도변동성분은 등온제트의 전단응력분포와 유사한 결과를 보였다. 본 실험의 결과로부터 부력제트의 근접영역에서 발달하는 전단층에서 유동구조와 열전달 특성을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국가자정연구실(NRL)사업의 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Liepmann, H. W. and Laufer, J., "Investigation of free turbulent mixing," NACA TECH. Note (1947).
- [2] Hussein, H. J., Capp, S. P. and George, W. K., "Velocity measurements in a high-Reynolds number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet," J. Fluid Mech., Vol. 258 (1994), pp.31-75.
- [3] Rodi, W., "Turbulent buoyant jets and plumes," Pergamon Press (1982), New York.
- [4] Inoue, M., Masuda, M., "Diagnosis of three-dimensional transonic flow fields with laser induced iodine fluorescence," FED-Vol.218 (1995), pp.163-170.
- [5] Sakakibara J., Hishida K. and Maeda M., "Measurement of thermally stratified pipe flow using image-processing techniques," Experiment in Fluids, Vol.16 (1993), pp.82-96.
- [6] Sakakibara J. and Adrian R. J., "Whole field measurement of temperature in water using two-color laser induced fluorescence." Experiment in Fluids, Vol.26 (1999), pp.7-15.
- [7] Weisgraber T.H. and Liepmann D., "Turbulent structure during transition to self-similarity in a round jet," Experiment in Fluids, Vol.24 (1998), pp.210-224.
- [8] Hishida K. and Sakakibara J., "Combined planar laser-induced fluorescence-particle image velocimetry technique for velocity and temperature fields," Experiment in Fluids, Vol.29 (2000), pp.129-140.