

# 레이저형광여기(LIF)를 이용한 비등은 제트유동의 온도장 측정

윤정환\*.이상준\*\*  
(2000년 4월 6일 접수)

## Temperature Field Measurement of Non-Isothermal Jet Flow Using LIF Technique

Jong-Hwan Yoon and Sang-Joon Lee

**Key Words :** LIF (레이저형광여기), Non-Isothermal Jet (비등은 제트), Temperature Field (온도장)

### Abstract

A 2-dimensional temperature field measurement technique using PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) was developed and it was applied to an axisymmetric buoyant jet. Rhodamine B was used as a fluorescent dye. Laser light sheet illuminated a two-dimensional cross section of the jet. The intensity variations of LIF signal from Rhodamine B molecules scattered by the laser light were captured with an optical filter and a CCD camera. The spatial variations of temperature field of buoyant jet were derived using the calibration data between the LIF signal and real temperature. The measured results show that the turbulent jet is more efficient in mixing compared to the transition and laminar jet flows. As the initial flow condition varies from laminar to turbulent flow, the entrainment from ambient fluid increases and temperature decay along the jet center axis becomes larger. In addition to the mean temperature field, the spatial distributions of temperature fluctuations were measured by the PLIF technique and the result shows the shear layer development from the jet nozzle exit.

### 1. 서론

자연현상이나 산업현장에서 관찰되는 유동의 대부분은 비정상(unsteady), 비등온(non-isothermal) 난류유동으로 분류할 수 있다. 난류유동은 층류유동에 비해 상대적으로 큰 운동량, 열 및 물질 전달을 수반하고 있으며, 시간에 따라 변화하는 불규칙적이고 복잡한 유동구조를 가진다. 이와 같은 난류 열유동을 제대로 해석하기 위해서는 몇 지점에서의 속도 및 온도 측정이 아니라, 속도장 및 온도장의 공간 변화를 계측하는 것이 필요하다.<sup>(1)</sup> 특히 난류 열유동의 경우, 속도장과 온도장이 유기적인 관계를 가지고 있기 때문에, 속도장 정보

뿐만 아니라 온도장의 시간에 따른 변화까지 동시에 측정할 수 있다면, 열 및 운동량 전달 등의 열유동 현상들을 보다 정확하게 해석할 수 있을 것이다.<sup>(2)</sup> 그런데, 기존의 계측기술로는 난류 온도장과 속도장의 시간에 따른 변화를 정확하게 측정하기에는 많은 어려움이 따른다. 그러므로, 난류 열유동의 온도장과 속도장의 2 차원 계측기술의 개발은 열유동 현상을 제대로 해석하기 위해 반드시 필요하다.

본 연구에서는 PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence) 온도장 측정기법을 개발하고, 이를 중력가속도와 반대방향으로 분사되는 비등은 제트에 적용하여 순간 온도장 및 평균 온도장을 측정하였다. PLIF를 이용한 온도장 측정법은 밀도나 온도, pH 농도 등을 측정할 수 있는 광학식 계측기법으로서 유동을 교란시키지 않고, 2 차원 유동 단면 내부의 온도장 변화를 측정할 수 있다.<sup>(3-6)</sup> 또한, PIV(Particle Image Velocimetry), PTV(Particle

\* 포항공과대학교 대학원

\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

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

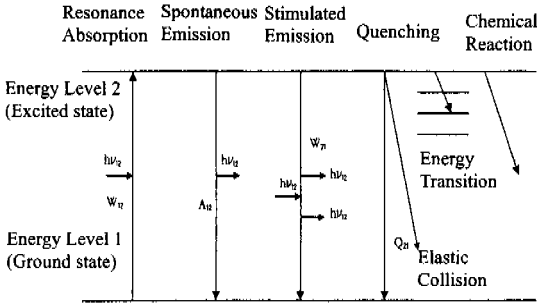


Fig. 1 Basic theory of LIF

Tracking Velocimetry) 등의 속도장 측정기법 들과 함께 적용하여 열유동의 온도장과 속도장을 동시에 측정할 수도 있다.<sup>(7)</sup>

LIF(Laser Induced Fluorescence)의 기본원리를 Fig. 1에 나타내었다. 기저 상태에 있던 분자들이 레이저 빛을 흡수하여 여기 상태로 올라간 다음, 자발방출에 의해 광자를 방출함으로써 다시 기저 상태로 돌아오게 된다. 이때 자발방출 되는 빛의 세기는 분자의 특성에 따라 온도, 밀도, pH, 압력 등의 함수이다. 이러한 성질을 이용하면 분자 주위 유동의 물성치를 측정할 수 있다. LIF는 측정원리가 비교적 간단하고 측정된 신호의 해석이 쉬우며, 낮은 농도까지 측정이 가능하여 연소진단에 널리 응용되어 왔다. 최근에는 유체유동의 밀도와 온도 등을 가시화 하는 데까지 활용되고 있다.

PLIF의 기본원리는 LIF와 기본적으로 동일하며, CCD 카메라를 이용하여 측정영역을 2 차원으로 확장한 것이다. 최근 Sakakibara 와 Adrian<sup>(8)</sup>은 두 종류의 색소를 사용하여, 레이저 빛을 스캐닝시켜 3 차원 온도분포를 측정하였다. 두 가지 분자에서 나오는 LIF 신호를 분광기, 광학 필터, 두 대의 CCD 카메라를 이용하여 취득하고 LIF 신호의 비를 온도값으로 보정한 결과를 이용하여 실제 온도분포를 측정하였다. 그런데, 현재까지의 문헌조사에 의하면 감온성 액정(TLC)이나 LIF 기법을 이용하여 난류 열유동의 온도변동성분의 공간분포를 측정하는 결과는 발표된 것이 없다.

공장이나 발전소 등에서 온배수(heated discharge water)나 오염 물질들을 대기과 해양으로 배출시킬 때 관찰되는 비등은 제트유동은 제트출구에서의 속도와 난류강도 및 온도, 주위 유체의 속도 및 온도, 노즐형상 등의 영향을 받는다.<sup>(9)</sup> 그 동안 비등은 열유동의 난류 열확산 현상에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다.

Taylor<sup>(10)</sup>는 제트 내부로 유입한 외부유동의 평

균속도는 제트의 특성속도에 비례한다는 가설을 제시하였으며, 시간 평균한 최대속도를 특성속도로 사용하였다. Morton 등<sup>(11)</sup>은 제트 중심축을 기준으로 속도 및 밀도분포가 Gaussian 분포를 가진다고 가정하였으며, 국부적으로 가열된 제트의 중심속도와 제트의 반폭(half width)이 유입률에 비례함을 밝혔다. 유입률에 관한 관계식은 아직 정확히 규명되지 않았지만, 완전히 발달된 난류영역 뿐만 아니라, 초기 유동영역과 천이영역에서도 온도차에 의한 부력이 주위 유체의 유입을 촉진시킨다고 알려져 있다. 이것으로부터 압력차에 의해 발생하는 운동량 전달보다 부력에 기인한 유입이 제트유동에서 보다 효과적임을 알 수 있다. Bhat 등<sup>(12)</sup>은 수직으로 상승하는 제트유동에 전기장을 가했을 때 나타나는 외부 유체와의 혼합과 제트의 발달에 관하여 연구하였다. Drobnik 등<sup>(13)</sup>은 온도차  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ 인 공기 유동장에서 열선유속계로 제트 근접영역에서 발생하는 조직적 와구조와 열전달 사이의 관계를 실험적으로 연구하여, 온도와 속도의 섭동성분들의 상호작용으로 인해 반경방향으로 열전달이 향상되는 결과를 보여주었다.

현재까지의 비등은 제트유동에 관한 실험적 연구는 대부분 열선유속계와 냉선온도계, 열전대 등의 점측정 계측장비를 이용하여 측정된 온도정보를 통계처리 하거나, 유동가시화를 이용하여 거시적인 변화를 정성적으로 관찰해왔다. 따라서, 본 연구에서 난류 열유동의 평균온도와 온도변동성분의 공간 변화를 측정할 수 있는 PLIF 측정기법을 개발하고, 이를 이용하여 초기유동조건 변화에 따른 비등은 제트의 온도장 변화를 해석하고자 한다.

## 2. LIF를 이용한 온도측정

LIF의 기본적인 지배식은 다음과 같다.

$$S = \eta h \nu \frac{\Omega}{4\pi} V \frac{A}{A+Q} \frac{B}{c} I f N$$

위 식에서  $S$ 는 LIF 신호의 강도,  $\eta$ 은 집광효율,  $h$ 는 플랑크 상수,  $\nu$ 는 LIF 주파수,  $\Omega$ 는 LIF 집광각도,  $V$ 는 측정 체적,  $A$ 는 자발방출 상수,  $B$ 는 유도방출 상수,  $Q$ 는 퀘칭(quenching)률,  $c$  광속,  $I$  레이저 빛의 강도,  $f$  population 분율(fraction),  $N$  분자수밀도(number density)를 의미한다. 압력이 대기압으로 거의 일정하고, 자발방출 상수  $A$ 가 퀘칭률  $Q$ 보다 아주 작은 경우, 위의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$S = C \frac{1}{Q} f(T) N$$

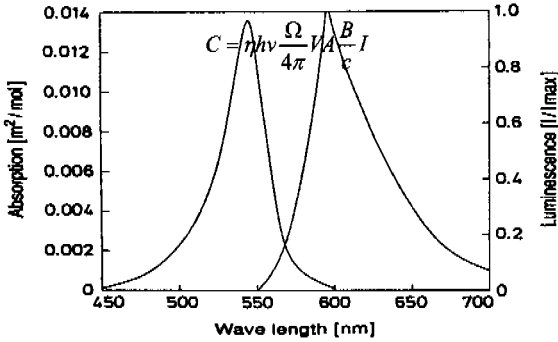


Fig. 2 Absorption and emission spectrum of Rhodamine B

이때, 상수  $C$ 는

$f$ 는 온도만의 함수이고, 펄칭률  $Q$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = C' \frac{p}{\sqrt{T}}$$

여기서  $p$ 는 압력을 나타내며,  $C'$ 은 또 다른 상수이다. 측정하고자 하는 분자의 부분압력은  $P_{i2} = NkT$ 로 표현된다. 여기서,  $k$ 는 볼츠만 상수이며, 측정체적에서 입자분포를 균일하게 유지한다고 가정하면 부분압은 압력에 비례한다. 따라서, 결과적으로  $S$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$S = C_0 \frac{f(T)}{\sqrt{T}}$$

그러므로, LIF 신호는 온도만의 함수로 표현된다. 보정실험을 통해 미리 구한 온도와 LIF 강도 사이의 관계식을 이용하게 되면, 측정된 LIF 값들로부터 유동의 온도분포를 구할 수 있다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 형광 dye Rhodamine B의 흡수 및 방출 스펙트럼을 나타낸 것이다.<sup>(5)</sup> Rhodamine B는 액체유동의 온도 측정에 널리 쓰이며, 약 540nm, 585nm에서 흡수 스펙트럼과 방출 스펙트럼의 최대치를 가진다. 레이저에 의해 여기된 다음, 여기 상태의 분자들이 주위의 용매로 진동에너지를 잃어버리기 때문에, 일반적으로 방출 파장은 흡수 파장보다 큰 영역에서 발생한다. Rhodamine B의 경우 Fig. 3에서 보는 바와 같이 유체의 온도가 증가함에 따라 방출되는 빛의 강도(emission intensity)가 감소한다. 형광 dye를 바꾸게 되면 빛의 강도와 온도사이의 비례상수  $C_0$ 가 바뀌게 된다. 예를 들어 Fluorescein의 경우 온도 증가에 따라 LIF 신호강도는 증가한다.

Rhodamine B는 약 2%/°C 이상의 높은 감도를

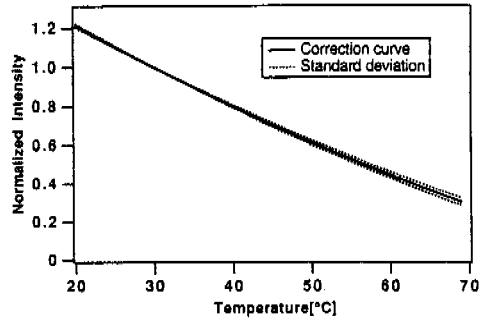


Fig. 3 Relationship between temperature and normalized emission intensity

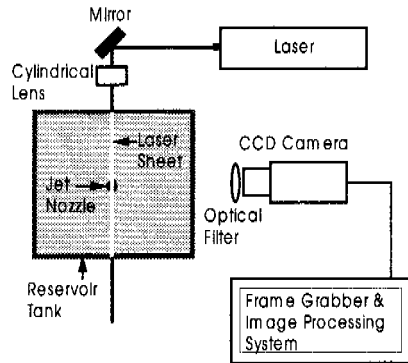


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

가지고 있으며, 흡수 스펙트럼이 가시화용으로 널리 사용되고 있는 Ar-ion 레이저의 파장영역(488 nm, 514.5 nm)을 포함하고 있기 때문에 실용성이 높다.<sup>(5)</sup>

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에서는 2차원 온도장 측정을 위한 PLIF 측정시스템을 구축하고, 이를 비등은 제트유동에 적용하여 온도장을 측정하였다. Fig. 4은 본 연구에서 사용한 PLIF 측정시스템을 나타낸 것으로 영상 취득용 CCD 카메라와 Ar-ion 레이저, 2차원 평면 조사를 위한 광학장치, 취득한 영상을 처리하는 영상처리장치로 구성되어 있다. 배경 노이즈의 영향을 제거하고 방출된 빛을 선택적으로 취득하기 위해 광학필터를 사용하였다. 일반적으로 흡수 스펙트럼이 방출 스펙트럼보다 크다. 일정영역에

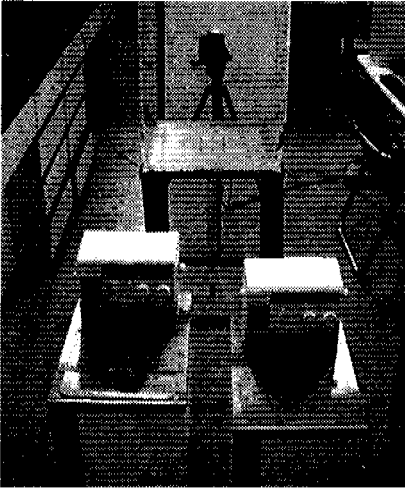


Fig. 5 Photograph of buoyant jet experimental apparatus

서 이들이 접치는 경우, 방출 되는 LIF 신호를 정확하게 측정하기 위해서는 사용하는 레이저의 흡수 파장을 방출 스펙트럼 바깥 주파수 영역으로 설정해야 한다. 또한, LIF 신호를 측정할 때 레이저 파장을 포함한 흡수 파장영역의 신호를 제거할 수 있는 광학 필터( $\lambda > 600\text{nm}$ )를 사용하여 방출 스펙트럼 신호만을 취득하여 측정오차를 최소화하였다. LIF 신호가 약한 경우, CCD 카메라 앞에 영상강화장치 (image intensifier)를 설치하여야 하지만, 본 실험의 경우 카메라의 게인(gain)을 조절하여 충분한 크기의 LIF 신호를 취득할 수 있었다. 영상 취득시간을 조절하기 위하여 셔터 속도를 1/500 초로 노출하였다. 측정하고자 하는 2 차원 단면은 Ar-ion 레이저 빔을 거울과 원통형 렌즈들을 통과시켜 만든 0.5 mm 두께의 평면광으로 조명하였다. 측정단면은 제트 노즐의 중심을 지나며, 제트의 진행 방향과 평행한 2 차원 단면이다.

광학 필터를 통과한 Rhodamine B의 LIF 신호를 CCD 카메라를 이용하여 전기신호로 변환시킨 다음, A/D 변환을 통해 컴퓨터의 영상메모리에 저장하였다. CCD 카메라로 취득한 영상은 해상도 640X480의 RS170 형식으로 저장되며, 한 프레임의 영상을 해상도 640X240인 even와 odd 필드의 두 영상으로 분리하였다. 분리한 두 영상을 보간(interpolation)을 통해 다시 640X480의 영상으로 복원하였으며, 평균 온도와 온도의 변동성분 측정을 위해 약 초당 10 프레임의 비율로 500 프레임의 LIF 영상을 취득하였다. 500 장의 LIF 영상을 취득하는데 걸린 시간은 약 50 초이다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 부력제트 실험장

치를 찍은 사진이다. 실험장치는 수조, 입구 파이프, 유량계, 펌프, 항온조, 백색광 조명장치, 광케이블 및 원통형 렌즈 등으로 구성되어 있다. 수조(400WX400BX600H mm)는 아크릴로 제작되어 CCD 카메라를 이용한 LIF 신호영상 취득과 외부에서의 레이저를 이용한 조명이 용이하도록 설계되었다. 수조 내부의 온도변화를 관찰하기 위하여 수조 내부 벽면에 열전대를 설치하였으며, 파이프 노즐 출구에도 출구온도를 측정하기 위하여 T형 열전대를 설치 하였다. 실험하는 동안, 수조내부의 수위를 일정하게 유지하기 위하여 수조 내 벽면에 출구를 동일한 높이로 설치하였다. CCD 카메라가 설치된 반대편 수조 벽면은 배경 노이즈를 감소시키기 위하여 무광택 검정 스프레이로 칠하였으며, 레이저 빛이 입사하는 반대쪽 수조 벽 또한 레이저 빛을 흡수하고 난반사를 방지하기 위하여 검정색으로 칠하였다. 완전히 발달한 파이프 노즐 형태의 제트유동을 생성하기 위하여 내경  $D=6.35\text{mm}$ , 길이  $L=510\text{mm}$ 인 아크릴 파이프를 수조 바닥면 중앙에 설치하였으며, 중력 가속도와 반대방향으로 비등온 제트를 분사하였다. 유동에 기인한 파이프 진동을 방지하기 위하여 직경  $D_{\text{out}}=30\text{mm}$ 의 아크릴 파이프를 안쪽 파이프 바깥에 설치하여 안쪽 파이프를 견고하게 지지하였고, 두 파이프 사이의 공간을 밀폐하여 파이프 내부의 작동유체와 대기 사이의 열전달을 최소화 시켰다.

### 3.2 실험방법

제트의 온도장 측정에 앞서 증류수에 Rhodamine B를 0.2 mg/liter 첨가한 수용액을 가지고 LIF 신호와 온도와의 상관관계를 구하기 위한 보정실험을 수행하였다. LIF 신호와 온도사이의 관계는 카메라와 레이저의 광학적 조건에 따라 변화한다. 따라서 카메라 및 레이저 광량, 조명 조건 등을 실제 온도장 측정과 동일한 조건에서 보정실험을 수행하였다. 수조를 항온조와 연결하여 수조 내부의 작동유체를 일정 온도로 유지시킨 후, 열전대를 이용하여 작동유체의 온도를 측정하고 동시에 LIF 신호를 측정하였다. 보정실험 시 작동유체의 온도를 증가 시키면서 온도 변화에 따른 LIF 영상을 취득하였다. 레이저 광원의 불균일성 효과를 제거하기 위하여 유동이 정지된 상태에서 LIF 영상을 얻었다.

비등온 제트 유동의 온도장 측정에서는 수조를 항온조와 연결하여 원하는 온도( $T_0$ )로 수조 내부의 온도를 일정하게 유지시킨 다음, 항온조의 펌프를 이용하여 일정온도( $T_i$ )의 제트를 분사하였다.

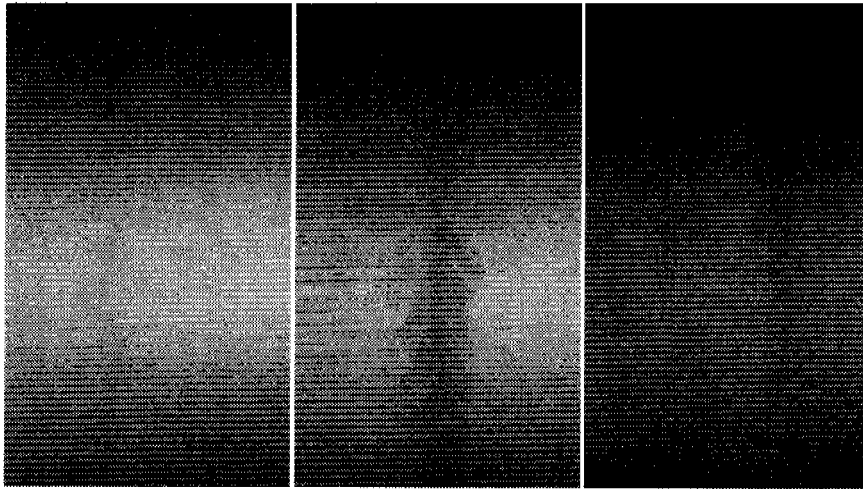
(a)  $T_{\infty}=20.2^{\circ}\text{C}$ (b)  $T_{\infty}=20.2^{\circ}\text{C}$ ,  $T_j=39.0^{\circ}\text{C}$ (c)  $T_{\infty}=39.0^{\circ}\text{C}$ 

Fig. 6 LIF intensity variations with temperature

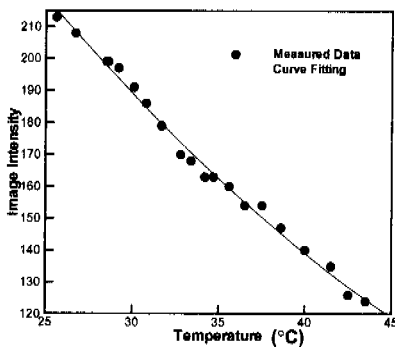


Fig. 7 LIF image intensity versus temperature

파이프 입구에 열전대를 설치하여 파이프를 통과하는 작동유체의 온도를 측정하였으며, 제트 온도가 정상상태에 이르는 것을 열전대로 확인한 후 LIF 영상을 취득하였다. 실험을 수행하는 동안, 레이저 출력이 1W 로 일정하게 유지되도록 포토 센서로 관찰하였으며, CCD 카메라의 게인과 렌즈의 조리개는 12dB 과 f1.4 의 조건으로 고정하였다.

#### 4. 측정 결과

##### 4.1 온도변화에 따른 LIF 영상

Fig. 6 은 수조 내부의 유체온도를  $20.2^{\circ}\text{C}$ ,  $39.0^{\circ}\text{C}$  로 균일하게 유지한 상태에서 취득한 LIF 영상 (Fig. 6 (a),(c))과 부력제트 유동의 LIF 영상(Fig. 6 (b))을 각각 보여주고 있다. 온도가 높은  $39.0^{\circ}\text{C}$ 의 경우  $20.2^{\circ}\text{C}$ 영상에 비해 LIF 신호(빛의 강도)가 작기 때문에 어둡게 보인다. 일반적으로 렌즈를 이용하여 레이저 빔을 평면광으로 만들 때 중심부에

서는 밝고 중심에서 멀어질수록 점점 어두워지는 정규(Gaussian)분포 형태를 가진다. 레이저 평면광은 오른쪽으로부터 입사하여 왼쪽으로 진행하며, 작동유체를 통과하는 동안 흡수되기 때문에 점점 어두워지고 있음을 관찰할 수 있다. 또한, 레이저 빛이 수조 벽면을 통과하면서 발생한 어둡고 밝은 선들을 볼 수 있다. 유체유동이 없는 경우 생기는 평면광의 강도분포 변화는 보정실험에서 미리 반영되므로 온도측정 결과에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 반면, 실험하는 동안 유동에 기인하여 발생하는 굴절이나 산란등에 의한 레이저 빛의 불균일성은 온도 측정에 오차를 유발할 수 있다. 수조의 온도( $T_{\infty}$ )보다 높은 온도( $T_j$ )의 제트를 분출시켰기 때문에, Fig. 6(b)와 같이 제트내부에서의 LIF 신호가 어둡게 분포하고 제트 외부에서 밝게 나타나고 있다.

Fig. 7 은 한 픽셀에서 측정한 LIF 신호의 크기와 온도사이의 관계를 나타낸 그래프이다. 측정구간인 약  $25^{\circ}\text{C}$ 에서  $45^{\circ}\text{C}$  사이에서 픽셀의 강도(intensity)가 온도 증가에 따라 선형적으로 감소하고 있다. Fig. 3 에서 나타난 바와 같이, 온도 증가에 따라 보정곡선에 대한 표준편차(deviation)가 조금씩 증가하게 된다. 본 연구에서 다룬 측정범위 내에서 최대 측정오차는 약  $1.0^{\circ}\text{C}$  이다.

각각의 픽셀에서 온도 증가율과 LIF 신호 강도 감소율의 비를 계산한 다음, 이를 이용하여 제트 유동의 LIF 영상으로부터 온도분포를 구할 수 있다. Rhodamine B 는 온도가 증가함에 따라 quantum 효율이 감소하여 방출 스펙트럼이 변화하기 때문에

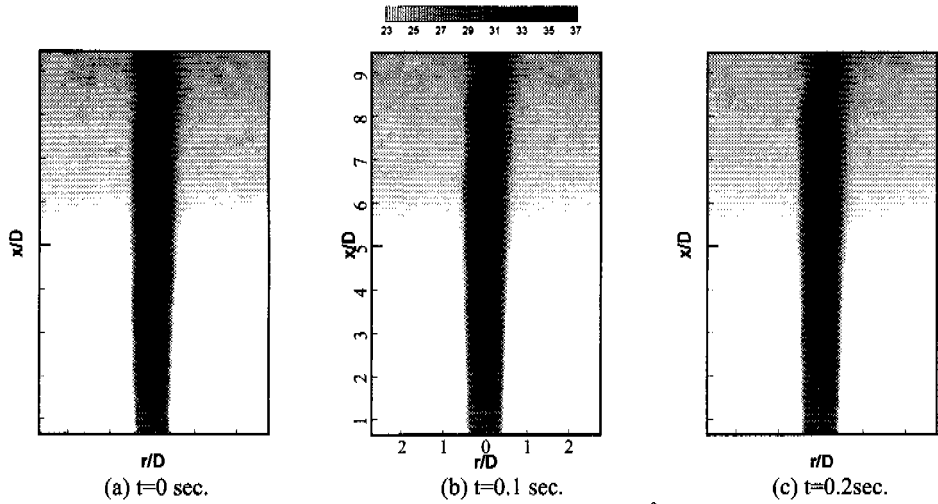


Fig. 8 Instantaneous temperature field variations,  $Re=1 \times 10^3$ ,  $T_j=37.0^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=22.0^\circ\text{C}$

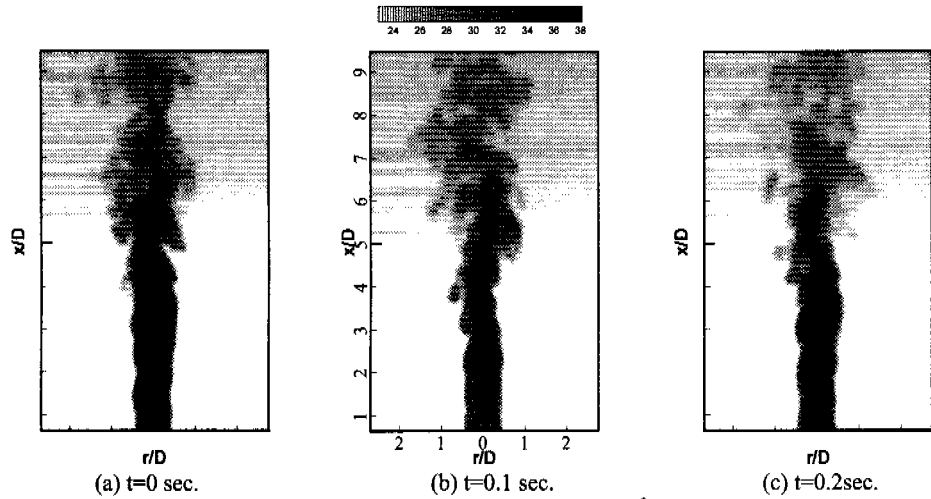


Fig. 9 Instantaneous temperature field variations,  $Re=2 \times 10^3$ ,  $T_j=38.5^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=21.0^\circ\text{C}$

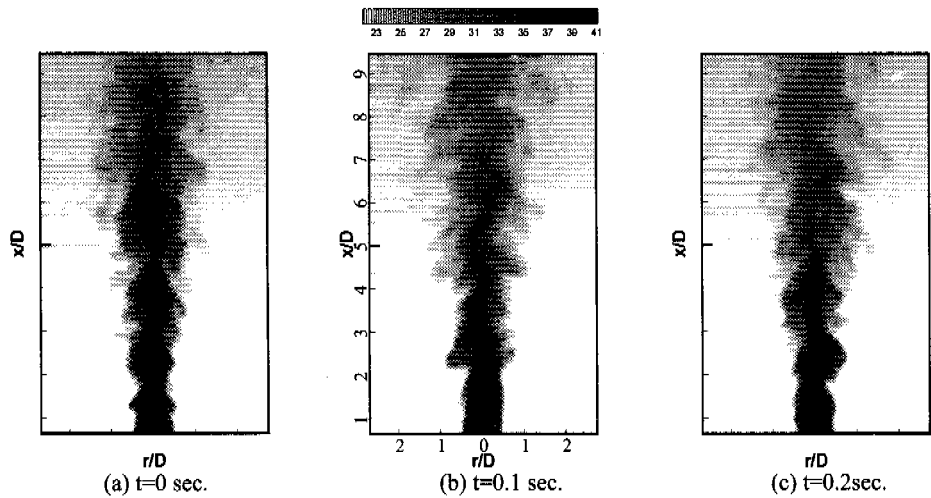


Fig. 10 Instantaneous temperature field variations,  $Re=4 \times 10^3$ ,  $T_j=41.2^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=20.2^\circ\text{C}$

LIF 신호의 크기가 감소한다. 반면 온도 증가에 따른 흡수 스펙트럼의 변화는 상대적으로 크지 않은 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 온도 정보가 없는 입자 사이의 배경처리와 노이즈 제거를 위하여 8X8픽셀 Gaussian 필터를 이용하였다.

#### 4.2 순간 온도장

Fig. 8 은  $Re=1 \times 10^3$ ,  $T_j=37.0^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=22.0^\circ\text{C}$  조건에서 측정된 순간 온도장 결과를 나타낸 것이다. 파이프 직경과 파이프 길이의 비( $L/D$ )가 약 80 이며, 파이프 출구에서는 거의 완전히 발달한 층류 유동이 형성된다. 따라서 파이프 출구에서부터  $x/D < 7.5$  인 영역까지는 제트 유동과 외부 유동사이의 혼합이 거의 나타나지 않는다. 하류영역을 제외한 구간에서는 온도분포의 큰 변화는 관찰할 수 없었다. 제트폭의 증가는  $x/D < 7.5$  에서는 거의 없으며,  $x/D > 7.5$  인 하류 영역에서 외부 유동과의 혼합의 영향으로 외부 유체가 유입되어 제트폭이 조금 넓어짐을 관찰할 수 있다. 하류로 보다 나아감에 따라 불안정성 때문에 정원과 형태의 구부러짐 현상이 나타나고 있다.

Fig. 9 는  $Re=2 \times 10^3$ ,  $T_j=38.5^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=21^\circ\text{C}$  조건에서 연속적으로 측정된 순간 온도장 분포를 나타낸 것이다. 제트가 분출되기 전 파이프 내부에서의 유동조건은 층류에서 난류로 변화되는 천이영역에 해당한다. 층류조건에서는 제트폭의 증가가 거의 관찰되지 않고 축방향으로 거의 평행한 유동형태를 유지하는데 반해,  $Re=2 \times 10^3$  인 경우에는 유동이 하류로 나아감에 따라 제트폭이 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 제트가 하류로 진행함에 따라 외부 유체의 유입이 증가하기 때문이며, 제트폭의 증가와 함께 주위 유동과의 활발한 혼합으로 온도가 하류로 갈수록 감소하고 있음을 관찰할 수 있다. 그러나, 제트 출구로부터 약  $x/D < 2.5$  인 영역까지는 제트폭이 크게 증가하지 않다가,  $x/D=2.5$  이후 영역에서 제트폭의 증가가 뚜렷해지고 있다.

Fig. 10 은  $Re=4 \times 10^3$ ,  $T_j=41.2^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=20.2^\circ\text{C}$  인 조건에서 시간에 따라 변화하는 순간 온도장 결과를 보여주고 있다. 이 경우, 파이프 내부 유동은 완전히 발달된 난류 유동에 해당하며 제트 출구 부근 ( $x/D=1$ )으로부터 제트폭이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 층류 및 천이 유동조건에 경우에 비해 제트폭의 증가가 상대적으로 크고, 제트 출구로부터 거의 선형적으로 이루어지고 있다. Kelvin-Helmholtz 불안정성에 의해 발생한 큰 와동은 하류로 진행함에 따라 2 차적인 불안정성에 의

해 작은 크기의 와동들로 변환되어 진다. 이 과정에서 외부 유동과의 혼합이 활발해져서 큰 에너지를 가지는 와동들이 생성되게 된다. 이러한 와동들이 빨리 생성될수록 제트 출구에서의 혼합을 증가시킬 수 있다. 천이 조건에 비해 난류 조건에서 이러한 작은 와동의 발생이 제트 근처에서 빨리 일어남을 관찰할 수 있다. 이는 외부 유체의 유입이 제트 출구로부터 활발히 이루어지고 있음을 나타내며, 외부 유체의 유입이 활발함에 따라 제트 중심축을 따른 온도의 감소가 층류 및 천이 초기 조건의 경우에 비해, 보다 급격하게 발생함을 예상할 수 있다. 수직 부력 제트유동은 분출 직후, 등온 제트와 거의 유사한 형태를 갖지만, 유동이 상승함에 따라 운동량 전달이 충분히 이루어지고 나면 plume 형태에 가까워진다고 알려져 있다. 본 연구에서는 제트 출구의 근접영역에서 온도장을 측정하였기 때문에 초기 운동량이 크게 영향을 미치며, 온도차에 의한 유동의 변화는 크게 나타나지 않았다. 반면, 동일한 온도조건에서 제트 초기 속도를 낮추게 되면 부력의 영향이 크게 증가할 것으로 예상된다.

#### 4.3 평균 온도장 측정 결과

Fig. 11 은  $Re=2 \times 10^3$ ,  $T_j=52.2^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=26.7^\circ\text{C}$  조건에서 500 장의 순간 LIF 화상을 평균하여 구한 평균 온도장 결과를 나타낸 것이다. 이를 보면 제트 출구에서 원뿔형태의 포텐셜 코어 영역을 관찰할 수 있다. 이 코어 영역에서는 외부유체와의 혼합이

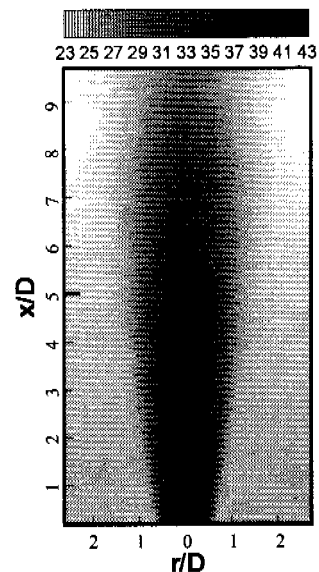


Fig. 11 Mean temperature field,  $Re=2 \times 10^3$ ,  $T_j=52.2^\circ\text{C}$ ,  $T_\infty=26.7^\circ\text{C}$

거의 이루어지지 못해 제트출구 온도가 거의 그대로 유지되고 있다. 제트가 하류로 나아감에 따라 점점 제트폭이 넓어지고 있으며, 제트 중심축을 따른 온도가 점차 감소하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 12은 Fig. 11의 평균 온도장 결과로부터 추출한 온도분포 곡선이다. 제트 중심축에서 가장 높은 온도값을 가지며, 중심에서 멀어질수록 온도가 감소하고 있다. 제트 중심을 기준으로 좌우 대칭구조를 보여주고 있으며, 파이프 출구에서 하류로 나아감에 따라 외부 유체의 유입과 혼합 열전달에 의해 제트 중심축에서의 온도가 점점 감소하고 있다. 또한, 하류로 더욱 나아감에 따라 보다 완만한 Gaussian 형태로 근접해 감을 보여주고 있다.

4.4 온도 변동성분

Fig. 13은 500장의 LIF 영상으로부터 계산한 온도변동성분( $T'/T$ )결과를 나타낸 것이다. 여기서 보면 제트 노즐 양쪽 끝단에서 발생한 전단층 영역에서 온도변동성분이 큰 값을 가짐을 알 수 있으며, 하류로 갈수록 점점 전단층의 폭이 넓게 발달해가고 있음도 관찰할 수 있다.  $x/D$ 가 약 4보다 작은 포텐셜 코어 영역에서는 온도변동성분이 아주 작으며, 제트 노즐로부터 발달한 전단층이 제트 중심축과 만나게 되는  $x/D=4$  이후 영역에서는 제트 중심부에서 온도변동성분이 큰 값을 가진다. 반면, 전단층 내부에서는 하류로 나아감에 따라 온도변동성분은 점차 감소하게 된다. 이러한 결과를 볼 때, 온도 변동성분이 큰 영역은 제트유동의 속도구배에 의해 발생한 전단층 영역과 거의 일치하고 있다.  $x/D > 4$ 인 하류영역에서는 온도변동성분이 제트 중심까지 전달되고 있음을 확인

할 수 있으며, 제트 중심에서 온도변동성분이 크게 나타난 것은 외부 유체와의 혼합과 유입효과가 제트 중심까지 이르러 열 및 물질 전달이 제트 중심영역까지 활발하다는 것을 의미한다.

Fig. 14는 Fig. 13의 온도변동성분 결과로부터 추출한 온도변동성분 분포변화를 보여주고 있다. 전반적으로 속도장 측정결과에서 나타나는 전단층 분포와 비슷한 분포형태를 가지며, 제트 중심축을 기준으로 거의 대칭적인 분포형태를 보여주고 있다.<sup>(14)</sup> 초기에는 제트 노즐의 양 끝단에서 생성된 전단층 내에서 최대값을 가진다. 하류로 나아감에 따라 전단층의 넓이는 증가하고 온도변동값의 크기는 감소하고 있다. 제트 좌측 외부 영역에서의 변동성분이 우측보다 상대적으로 큰 값을 가

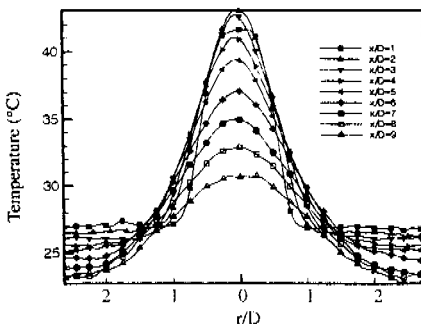


Fig.12 Variations of mean temperature profile,  $Re=2 \times 10^3$ ,  $T_j=52.2^\circ C$ ,  $T_\infty=26.7^\circ C$

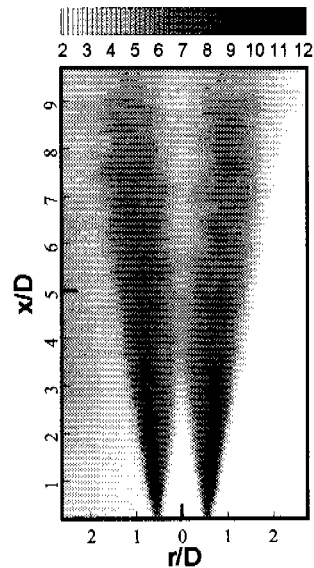


Fig. 13 Spatial distribution of temperature fluctuation  $Re=2 \times 10^3$ ,  $T_j=52.2^\circ C$ ,  $T_\infty=26.7^\circ C$

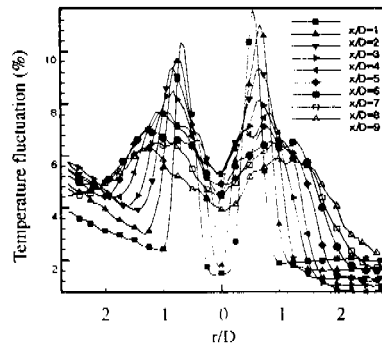


Fig. 14 Temperature fluctuation profile,  $Re=2 \times 10^3$ ,  $T_j=52.2^\circ C$ ,  $T_\infty=26.7^\circ C$



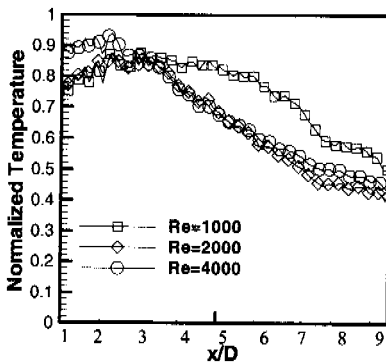


Fig. 15 Mean temperature along the jet axis ( $r/D=0$ )

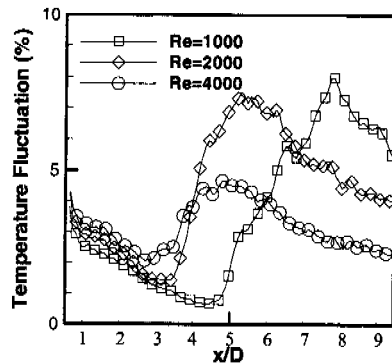


Fig. 16 Temperature fluctuation along the jet axis ( $r/D=0$ )

지는 것은 난류제트유동에 기인하여 레이저 빛이 불균일하게 산란하는 현상에 기인한 것으로 보인다. PLIF 온도장 측정에서는 레이저로 조명한 평면광 강도의 불균일성과 난류유동에 기인하여 산란된 레이저광에 의하여 오차가 발생하기 쉽다. 레이저 광의 불균일성에 기인한 측정오차를 줄이기 위한 대책의 하나로 최근 미국 Illinois 대학의 Adrian 교수팀은 두 가지 dye를 이용한 이중 방출 방식의 LIF 기법을 개발하였다.<sup>(8)</sup> 난류 유동에 기인한 레이저광의 산란에 의한 오차는 random error의 일종이기 때문에 여러 장의 LIF 영상을 취득하여 평균을 구함으로써 해결할 수 있으나, 온도 변동성분의 측정결과에는 영향을 미치므로 주의물 요한다. PLIF 기법을 이용하여 온도변동성분을 측정 한 기존 연구는 전혀 없으며, 향후 측정오차를 줄이기 위하여 이 부분에 대한 보다 자세한 연구 개발이 필요하다.

평균 온도장 측정의 경우 레이저 평면광의 두께나 CCD 카메라의 셔터 속도에 크게 영향을 받지 않으나, 온도변동성분의 측정에 있어서는 이들이 측정결과에 다소 영향을 미친다. Rhodamine B의 자발방출 시간은 수 nano second 정도로 충분히 짧기 때문에 온도변동성분은 카메라 셔터 속도에 대한 의존성이 크다. 셔터 속도를 너무 길게 설정하게 되면 온도장의 변동성분이 무더지고 평균화된 온도장 정보만을 취득하게 된다. 반면, 레이저 조명 단면의 폭을 넓히게 되면 공간해상도의 저하를 가져올 수 있다. 따라서, 정확한 온도변동성분을 측정하기 위해서는 유동의 특성시간에 근접하는 충분히 짧은 셔터 속도와 가능한 얇은 레이저 평면광의 조사가 필수적임을 알 수 있다.

#### 4.5 제트 중심축에서의 온도특성

Fig. 15 과 Fig. 16 은 온도장 결과로부터 추출한 제트 중심축( $r/D=0$ )을 따른 평균온도 및 온도변동성분의 변화를 나타낸 것이다.  $Re=1 \times 10^3$ 의 경우  $x/D=6$  위치까지 평균온도의 감소가 크지 않다가  $x/D > 6$  구간에서 온도가 거의 선형적으로 감소하고 있다. 온도변동성분 변화를 나타낸 Fig.16 을 보면  $Re=1 \times 10^3$ 의 경우,  $x/D=5$  위치에서부터 온도 변동성분이 증가하다가  $x/D=7.5$  에서 최대값을 가진 후 다시 감소하고 있다.  $Re=2 \times 10^3$ 의 경우에는 약  $x/D=3$  인 위치 영역부터 평균온도의 감소가 거의 선형적으로 이루어지고 있으며, 온도 변동성분은 약  $x/D=3$  부터 증가하다가  $x/D=5$  근처에서 최대값을 가진 다음 감소하고 있다.  $Re=4 \times 10^3$  조건에서는 약  $x/D=2.5$  위치로부터 온도감소가 발생하였다. 제트 노즐에서의 초기 유동조건이 층류에서 천이, 난류 유동으로 변화함에 따라 제트중심 영역에서 온도가 감소하기 시작하는 지점이 점점 제트 출구쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 이것은 제트 유속이 증가함에 따라 포텐셜 코어의 길이가 점점 짧아지고 있음과 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 제트노즐로부터 발달한 전단층이 제트 중심축과 교차되는 지점 하류영역에서 외부 유체와의 혼합이 증가하고 열전달이 증가하기 때문이다. 또한, 온도변동성분 결과에서 제트 노즐로부터 발달한 전단층이 제트 중심부와 만날 때까지 제트 중심부에서 온도변동성분이 감소했다 증가하기 시작하는 구간과 제트 중심축을 따라 평균온도가 감소하기 시작하는 지점이 서로 밀접한 관계를 가지고 있음도 알 수 있다.

## 5. 결론

PLIF 온도장 측정기법을 개발하여, 비등은 수직 부력 제트유동에 적용하여 레이놀즈 수 증가에 따른 온도장 변화를 측정하였다. 500 장의 LIF 영상을 평균하여 평균 온도장을 구하였으며, 온도장의 변동성분을 최초로 측정하였다. 측정 결과, 파이프 초기 출구조건이 층류에서 천이, 난류영역으로 변화함에 따라 제트 근접영역에서 유체 유입이 증가하였으며, 하류로 나아감에 따라 제트폭이 증가하고 온도감소가 크게 나타났다. LIF 기법으로 측정된 온도장 변동성분은 난류유동에 기인한 측정오차를 일부 가지고 있기는 하나 수직 제트의 전단 응력분포와 유사한 결과를 보였다. 본 연구에서 개발된 PLIF 측정기법은 유동가시화 뿐 아니라, 평균 온도장과 온도변동성분의 공간분포 측정에 유용하였다.

## 후 기

이 논문은 1998 년도 한국학술진흥재단의 학술연구비(기계공학과제)에 의하여 지원되었음

## 참고문헌

- (1) Lee, S. J. and Yoon, J. H., 1998, "Temperature Field Measurement of Heated Ventilation Flow in a Vehicle Interior," *Int. J. of Vehicle Design*, Vol. 19, No. 2, pp. 228~242.
- (2) 이상준, 백승조, 윤정환, 도덕희, 1996, "화상처리기법을 이용한 온도장 및 속도장 동시 측정 기법 개발," 대한기계학회 논문집(B), Vol. 20 (10), pp. 3334~3343.
- (3) Chang, A. Y., Battle, B. E. and Handerson, R. K., 1990, "Simultaneous Measurement of Velocity, Temperature, and Pressure Using Rapid CW Wavelength-Modulation Laser-Induced Fluorescence of OH," *Optics Letters*, Vol. 15, No. 12, pp. 706~708.
- (4) Inoue, M. and Masuda, M., 1995, "Diagnosis of Three-Dimensional Transonic Flow Fields with Laser-Induced Iodine Fluorescence," *FED-Vol. 218*, pp. 163~170.
- (5) Sakakibara, J., Hishida, K. and Maeda, M., 1993, "Measurement of Thermally Stratified Pipe Flow Using Image-Processing Techniques," *Exp. in Fluid*, Vol. 16, pp. 82~96.
- (6) Coppeta, J., Rogers, C., 1998, "Dual Emission Laser Induced Fluorescence for Direct Planar Scalar Behavior Measurements," *Exp. in Fluid*, Vol. 25, pp. 1~15.
- (7) Hui, H., Kobayshi, T., Saga, T., Taniguchi, N. and Segawa, S., 1998, "Investigation on The Tabbeds Jet Mixing Flows by Using LIF and PIV," *8<sup>th</sup> International Symposium on Flow Visualization*, pp. 4.1~4.11.
- (8) Sakakibara, J. and Adrian, R. J., 1999, "Whole Field Measurement of Temperature in Water Using Two-Color Laser Induced Fluorescence," *Exp. in Fluid*, Vol. 26, pp. 7~15.
- (9) Rodi, W., 1982, "Turbulent Buoyant Jets and Plumes," Pergamon Press, New York.
- (10) Taylor, G. I., 1958, "Flow Induced by Jets," *J. of Aero. Science*, Vol. 25, pp. 464~465
- (11) Morton, B. R., Taylor, G. I. and Turner, J. S., 1956, "Turbulent Gravitational Convection from Maintained Instantaneous Sources," *Proc. Royal Soc., London*, A234, pp. 1~23.
- (12) Bhat, G. S. and Narasimha, R., 1996, "A Volumetrically Heated Jet: Large-Eddy Structure and Entrainment Characteristics," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 325, pp. 303~330.
- (13) Drobnik, 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.
- (14) 신대식, 윤정환, 이상준, 2000, "PIV 기법을 이용한 온도변화에 따른 부력제트의 난류특성연구," 대한기계학회 논문집(B), 심사중.