

Stereo-PIV/LIF의 속도장과 농도장 동시측정 기법을 이용한 러쉬톤 교반기내 난류특성에 관한 연구

민영욱* · 김윤기* · 김경천†
(2003년 12월 11일 접수, 2004년 2월 2일 심사완료)

A Study on the Turbulent Characteristics of Rushton Turbine Mixer by Simultaneous Measurement of Velocity and Concentration Field with Stereo-PIV/PLIF Technique

Young Uk Min, Yun Gi Kim and Kyung Chun Kim

Key Words: Rushton Turbine(러쉬톤 터빈), Concentration Field(농도장), Laser Induced Fluorescence(레이저형광여기법), Stereoscopic Particle Image Velocimetry(스테레오 입자영상유속계)

Abstract

Simultaneous measurement with PLIF(Planar Laser-Induced Fluorescence) and Stereo-PIV(Stereo Particle Image Velocimetry) was performed to investigate the structural characteristics of flow field in Rushton Turbine Mixer. Instantaneous 3D velocity fields are measured by two 2K x 2K CCD cameras focused on an object plane with the angular displacement methods while the concentration fields are obtained through the measurement of the fluorescence intensity of Rhodamine B tracer excited by the second pulse of Nd:Yag laser light. Image distortion due to the camera view-angle is compensated by a mapping function. Finally, the spatial structures of turbulent flow around Rushton turbine were identified by the calculation of synchronized data of the velocity field and concentration field.

기호설명

- D : 탱크 직경
- λ : 파장
- u' : 반경방향 속도섭동
- v' : 높이방향 속도섭동
- w' : θ 방향 속도섭동
- c' : 농도섭동

1. 서론

회전 교반기는 산업현장에서의 각종 혼합공정에 자주 등장하는 유용한 기구로써 촉매제를 첨가하거나 화합물의 반응속도를 조절하는 등의 생화학 프로세스에 널리 사용된다. 이같은 교반기의 유동은 다양한 길이 척도의 난류구조를 가지는 매우 복잡한 유동특성을 지니므로 실험적 수치적 해석에 어려움이 따랐으나 최근 레이저 도플러 유속계(LDV), 열필름, 입자영상유속계(PIV)를 이용한 다양한 측정기법의 발전에 따라 실험적 연구를 통한 회전교반기 내의 난류구조가 활발히 규명되고 있다.

많은 선행 연구들 중 유동장 구조의 규명과 관련하여 Van't Riet과 Smith⁽¹⁾는 photographic 유속

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2324 FAX : (051)515-7866
* 부산대학교 대학원 기계공학과

측정을 이용하여 블레이드 팁(tip)에서 발생하는 와류구조를 분석한 바 있으며, Yianneskis⁽²⁾ 등은 사진촬영 유속측정방법과 레이저 도플러 유속계를 이용하여 용기내의 평균유동장과 거대유동장 내에서 형성되는 반지형 와 메커니즘을 밝혀내었다. 김상기 등은 PIV를 이용하여 교반기 내의 전체유동장을 측정하고 터빈 블레이드의 깊이에 따라 변하는 거대유동장의 난류유동특성을 분석하였다.

상대적으로 수동적인 스칼라량의 혼합 메커니즘을 밝힌 연구는 매우 적으나 Houcine et al.⁽³⁾은 PLIF 기법을 이용하여 교반기내의 농도장 측정을 시도하고 혼합효율이 임펠러의 종류에 따라 달라짐을 보인 바 있다. Distelhoff 와 Marquis⁽⁴⁾는 레이저유도형광(LIF)기법을 이용하여 벌크유동장 및 임펠러 유동장에 대해 평균농도 분포 및 농도의 난류성분에 대한 rms값의 분포를 보였으며, Guillard et al.⁽⁵⁾은 PLIF기법을 이용하여 batch형의 교반탱크에서 순간적인 농도장을 구하고 거시적인 농도장구조를 제시하였다.

본 연구에서는 Stereo-PIV 기법과 PLIF 기법을 통하여 러쉬톤 터빈내의 3차원속도장과 농도장을 동시측정하고, 속도장과 농도장의 상호상관을 통해 혼합 메커니즘의 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 구성

본 연구에 사용된 실험장치는 Rushton Turbine Mixer로서 Fig. 1과 같으며 임펠러는 공칭직경(D)이 63.3mm인 six-bladed symmetric Rushton turbine을 사용하였다. 혼합탱크의 내부직경(T)은 3D이며 원통형 탱크속에는 입자조명을 위한 Hollow Glass를 용해시킨 3차 증류수를 T에 해당하는 깊이 만큼 채웠다. 곡면에 의한 광학적인 왜곡현상을 최소화시키기 위해 외부에는 사각형의 아크릴상자를 설치한 후 상자와 원통사이의 공간에는 3차 증류수를 채웠다. 터빈의 수직중심과 탱크 바닥과의 거리(clearance, C)는 T/2로 고정하였으며 임펠러의 회전 속도는 100 rpm으로 일정하게 유지하였다.

2.1.1 Stereoscopic PIV 기법에 의한 속도장 측정

Fig. 2에 3D 속도장을 측정하기 위한 시스템의 개념도를 나타내었다. 입자의 조명을 위해 두 개

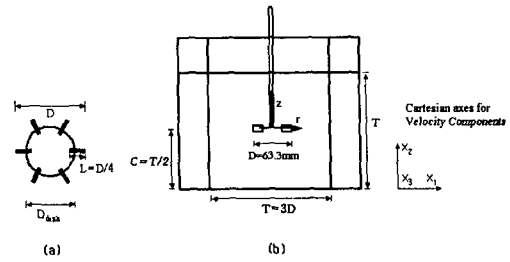


Fig. 1 Rushton turbine geometry and dimensional relationship between blade diameter, tank depth, clearance and tank diameter

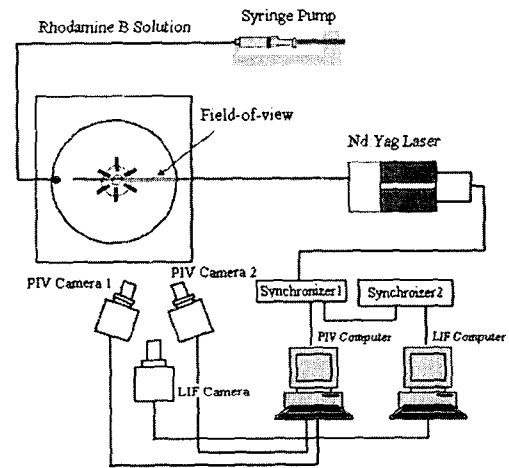


Fig. 2 Experimental setup

의 Nd:Yag 펄스레이저에서 방출된 빔이 구면렌즈와 원통형렌즈를 통해 두께 2mm의 평면광으로 측정부위에 조사되도록 하였으며, 산란된 입자의 영상 이미지는 0.4Hz 주기로 50초 동안 Angular displacement method에 따라 두 대의 카메라(2kx2k resolution)를 사용하여 취득하였다. 각각의 카메라에는 LIF용 형광염료에 의해 산란된 오렌지색광이 제외된 Nd:Yag 레이저 산란광만을 받아들이기 위해 $\lambda=532\text{nm}$ 의 bandpass optic filter를 장착하였다.

본 연구에서는 100번의 이상불 실험을 통해 얻어진 총 2000장의 영상으로부터 순간 및 평균속도장을 추출하기 위해 2화상 상호상관기법을 사용하였으며 탐색영역(interrogation window)의 크기는 64x64 픽셀로 50%의 겹침을 허용하여 후처리를 수행하였다.

2.1.2 LIF 기법을 이용한 농도장 측정

레이저에 의해 여기된 형광염료의 형광강도 이미지 자체가 농도로 환산되는 LIF기법은 카메라의 신호대잡음비(SNR)와 감도가 중요하다. 본 실험에서 사용된 카메라는 CCD표면이 열전대로 쿨링되는 12bit의 고해상도로서 1024x1280픽셀 화소를 가지며 실험을 통해 표준편차 1.7% 정도의 SNR을 가져 획득한 농도장이 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 농도장 영상획득을 위해 Mixer내에 주입되는 염료인 Rhodamine B는 Stereo-PIV와 동기되는 Nd:Yag레이저 펄스빔으로 자극되어 최대 방출 파장이 575nm인 빛을 여기하며 10-6~10-9 mol/l 까지 농도의 변화에 따른 여기형광강도가 선형성을 유지하는 특성을 지닌다. Nd:Yag 레이저 광을 제외한 염료의 형광을 검출하기 위해 카메라에는 $\lambda=550\text{nm}$ 의 highpass optic filter를 설치하였다. 형광염료의 주입을 위하여 Syringe pump를 사용하였으며 24초간 10cc/min의 속도로 염료가 탱크높이 의 3/4H지점, 측정영역의 1/3바퀴 앞쪽 벽면에서 염료를 주입하였다.

Stereo-PIV와 PLIF를 위한 두 개의 컴퓨터 시스템으로 운용되는 실험장치는 두 Synchronizer의 외부trigger단자를 통해 연결되어 동기된다. 시작 신호가 주어지면 염료주입이 시작되면서 Stereo-PIV와 PLIF 시스템은 0.4Hz의 주기로 각각 순간 속도장과 순간농도장이 동시에 측정된다.

3. 실험 결과

3.1 속도장 측정 결과 및 고찰

Fig. 3 은 염료의 주입이 완료되는 시점 직후의 2D 속도장을 나타낸다. 국부적 링 와의 발생으로 유동의 활발한 혼합양상을 확인할 수 있고 팁근처에서 발생하는 제트유동에 따른 반경방향 속도 성분의 증가와 속도요동을 확인할 수 있다. Fig. 4 와 Fig. 5 은 순간속도장의 3D 앙상블 평균속도장을 나타낸 것이다. 앙상블 평균 유동장에서는 용기 내에 놓인 Rushton turbine의 회전으로 인해 팁으로부터 배출되는 반경방향의 제트유동이 벽면에 부딪혀 교반기 상하로 나뉘면서 생성하는 반지형 와의 거대유동을 우선으로부터 확인할 수 있다. 특히 임펠러 축 주위에서 반경방향과 높이 방향의 속도성분에 비해 θ 방향의 속도성분이 우세한 양상을 띄는데 이는 거대유동과 임펠러축

주위의 유동이 서로 고립되어 있는 사실을 설명해주는 것으로, 앙상블 평균유동장에서의 분리된 유선을 통해서도 확인할 수 있다.

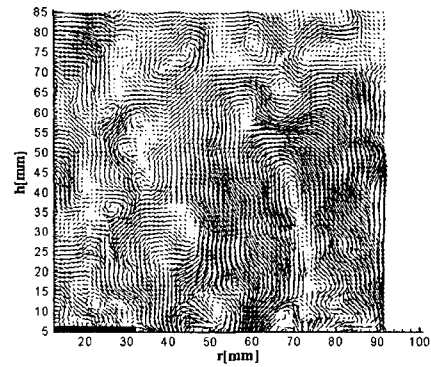


Fig. 3 Instantaneous 2D velocity field (t=25s)

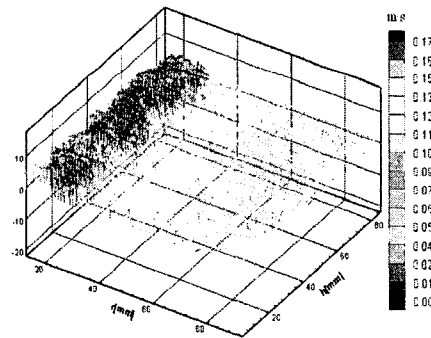


Fig. 4 Instantaneous 3D velocity field (t=25s)

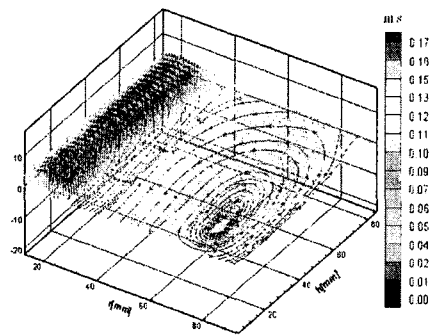


Fig. 5 Ensembled 3D velocity field

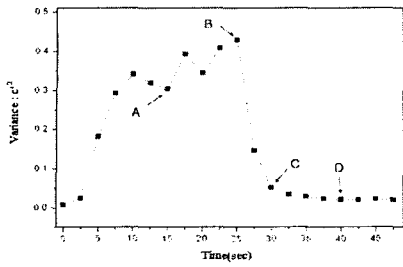
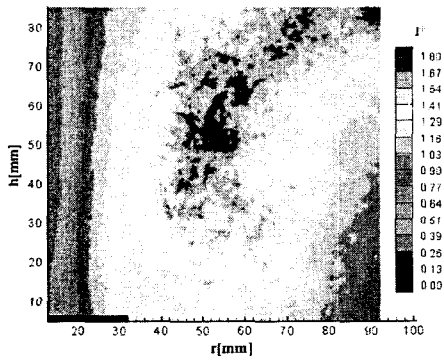
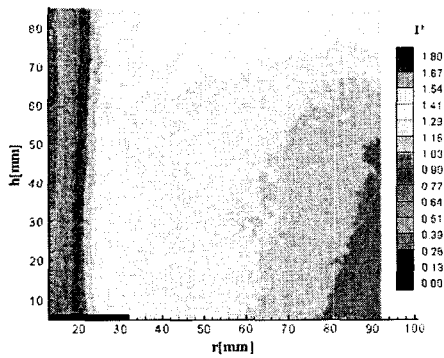


Fig. 6 Area average of variance fields



(a) t=25s



(b) t=30s

Fig. 7 Ensembled concentration field

3.2 농도장 측정 결과 및 고찰

유입염료의 농도와 형광강도의 관계가 선형인 사실을 통해 식(1), (2), (3)을 사용하여 Fig. 6에서 분산을 같은 시간별로 면적평균한 그래프를 나타내었다.

$$C_{i,j}^* = I_{i,j}^* = \frac{I_{i,j} - \overline{I_{BG(i,j)}}}{I_{ST(i,j)} - \overline{I_{BG(i,j)}}} \quad (1)$$

$$\langle C^*(x) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N C^*(x, t)_i \quad (2)$$

$$\langle C^2(x) \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (C^*(x, t) - \langle C^*(x) \rangle)^2_i \quad (3)$$

형광염료의 주입이 시작되는 구간 I(0~2.5)은 비정상 상태구간으로 측정위치가 염료의 주입위치로부터 1/2회전 후류영역에 있어 시간적으로 지연되는 구간이다. 구간II(2.5~25sec)에서는 주입되는 염료의 유량이 일정하여 분산 값이 거의 일정하게 유지되는 구간으로 활발한 염료의 혼합이 이루어진다. 구간 III (25~27.5sec)과 구간 IV (27.5sec ~)는 주입이 끝나고 진한 농도의 염료가 혼합되는 과정을 나타내는데, 각 구간에서의 기울기는 혼합과정의 scale을 반영한다. 주입이 끝난 후 짧은 시간동안 large scale mixing으로 대부분의 혼합이 일어난 후 small scale mixing으로, 전체적으로 농도가 균일해질 때까지 서서히 혼합되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7(a)는 염료주입이 끝난 직후인 시간(t=25)에 동시측정한 앙상블 평균 농도장으로서 측정면에서 1/2바퀴전의 벽면에서 유입된 염료가 거대 유동인 반지형으로 유입되면서 측정면의 중앙부에서 난류에 의해 활발히 혼합되는 양상을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 large scale mixing이 끝나고 small scale mixing이 시작되는 시점의 분산그래프로 대부분의 혼합구조가 사라졌으나 측근처에서는 여전히 혼합이 진행중인 격리 영역이 존재함을 확인할 수 있다.

3.3 속도장과 농도장의 동시측정 결과

동시측정된 순간 속도장과 순간 농도장의 위치를 일치시켜 나타낸 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 순간속도장은 시간대에 상관없이 복잡한 혼합 양상을 보이나 국부적인 와의 형태를 보이는 곳에서 농도장은 스칼라분포가 와의 형태를 띠는 것을 확인할 수 있다. 혼합이 가장 활발한 시점의 순간농도장은 속도장에서의 난류 Stretching에 의해 띠 형태로 변하는 경향이 보이며, 염료의 농도집중위치와 속도정체위치가 일치함을 확인할 수 있다.

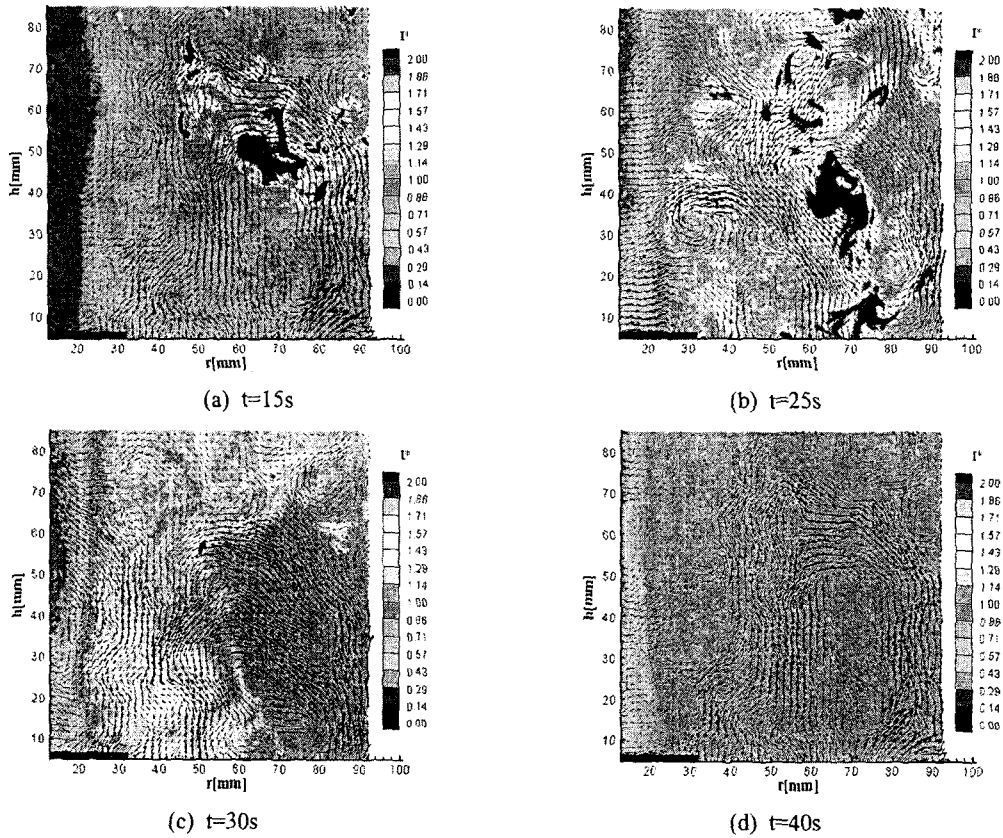


Fig. 8 Instantaneous concentration and velocity field

Fig. 9는 스칼라 유동혼합현상이 가장 활발하게 일어나는 시간 $t=25s$ 에서 식 (4), (5)을 통해 구한 속도장과 농도장의 접동성분을 서로 correlation하여 양상을 평균한 뒤 얻은 contour 그래프이다.

$$c' = \frac{\tilde{c}_{i,j} - \bar{c}_{i,j}}{\bar{c}_{i,j}} \quad (4)$$

$$u'_{i,j} = \frac{\tilde{u}_{i,j} - \bar{u}_{i,j}}{|V_{i,j}|} \quad v'_{i,j} = \frac{\tilde{v}_{i,j} - \bar{v}_{i,j}}{|V_{i,j}|} \quad w'_{i,j} = \frac{\tilde{w}_{i,j} - \bar{w}_{i,j}}{|V_{i,j}|} \quad (5)$$

Fig. 9(a)는 u방향 속도접동성분과 농도접동성분과의 상관관계를 나타낸 그래프로서 벽면 근접 지점에서 높은 값을 가지며, Fig. 9(b) 역시 부호만 반대이고 벽면 근접지점에서 높은 상관관계를 가

지는 것을 확인할 수 있다. 이는 벽면의 3/4H 높이에서 주입된 염료혼합이 블레이드팁에서 유출되어 벽에 부딪히며 상승하는 강한 난류성분의 속도접동성분이 스칼라 혼합과 상호관계가 높은 사실에 기인하는 결과로 여겨진다.

반면, Fig. 9(c)의 그래프에서는 $(\overline{u'c'})$, $(\overline{v'c'})$ 에 비해 전체유동장에 균일한 피크값이 존재함을 볼 수 있다. 단, 임펠러 축부근에서는 높은 w방향 속도접동성분에 의해 내부적인 활발한 혼합이 이루어짐을 확인할 수 있으나 벌크유동과의 상대적인 속도차에 의해 두 유동장간의 혼합현상이 확연히 분리되는 사실을 확인할 수 있다.

4. 결론

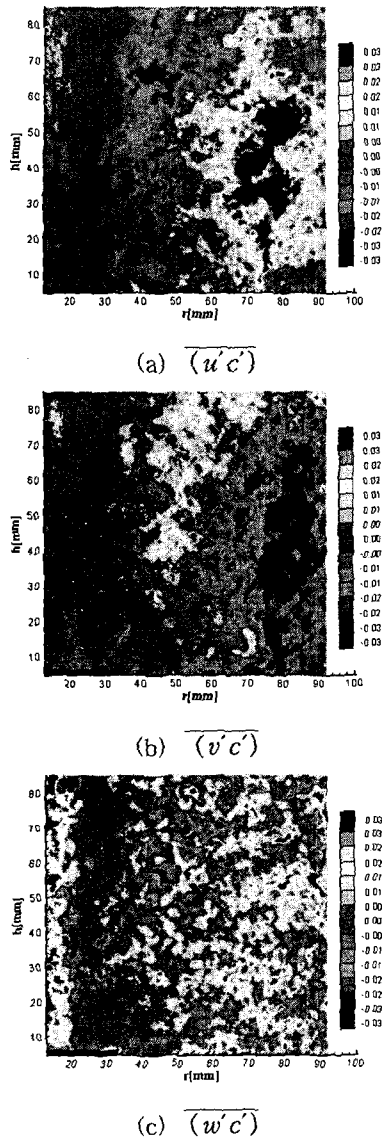


Fig. 9 Concentration/Velocity correlation field

러쉬톤 터빈 내부의 유동은 강한 3차원적 특성을 가지며, large scale mixing과 small scale mixing 과정을 통해 유동 혼합이 진행됨을 확인하였다. 특히 스칼라 믹싱과정에서 임펠러 수직 상부의 유동이 내부적으로는 활발한 혼합현상이 관찰되지만 벌크유동장과 격리되어 염료가 확산, 침투하지 못하고 회전축을 중심으로 낮은 농도를 유지하는 현상을 보인다. 이러한 임펠러축 근접부근의 격리유동의 이를 해결하기 위해서 임펠러

부근의 격리유동을 분산시키는데 최적화된 위치와 형상의 배플을 다는 것이 효과적일 것으로 생각된다. 한편, 3D속도장 전반에 걸쳐 교반기 측정면의 반경방향 및 높이방향 속도성분에 비해 θ 방향의 속도성분이 두드러지게 높은 것을 확인할 수 있었으며 속도섭동성분과 농도섭동성분의 상호상관기법을 통해 혼합기내의 혼합메카니즘이 난류성분이 강한 반지형와의 용기벽면부근에서 가장 활발히 이루어짐을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Van't Riet, K. and Smith, J. M., 1975, "The Trailing Vortex System Produced by Rushton Turbine Agitators," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 30, pp. 1093~1105.
- (2) Yianneskis, M., Popiolel, Z. and Whitelaw, J. H., 1987, "An Experimental Study of the Steady and Unsteady Flow Characteristics of Stirred Reactors," *Fluid Mech.*, Vol. 175, pp. 537~555.
- (3) Houncine, I., Vivier, H., Plasari, E. and Davic, R., 1996, Villermaux J "Planar Laser Induced Fluorescence Technique for Measurements of Concentration Fields in a Continuous Stirred Reactors," *Exp fluids*, Vol. 22, pp. 96~102.
- (4) Distelhoff, M. F. W. and Marquis, A. J., 1998, "An LIF Line System for the Measurement of Scalar Concentration in a Continuously Operated Stirred Tank," *Exp. Fluids*, Vol. 25, pp. 77~88.
- (5) Guillard, F., Tragardh, C. and Fuchs, L., 2000, "A Study of Turbulent Mixing in a Turbine-Agitated Tank Using a Fluorescence Technique," *Exp. Fluids*, Vol. 28, pp. 225~235.
- (6) Jeong, E. H., Yoon, S. Y. and Kim, K. C., 2003, "Simultaneous Measurement of Velocity and Concentration Field in a Stirred Mixer Using PIV/LIF Technique," *Trans. KSME (B)*, Vol. 27 No. 4, pp. 504~510.