

PIV/LIF 에 의한 교반혼합기 유동의 난류 속도/농도장 측정 및 POD 해석

정은호* · 윤상열* · 김경천†

Simultaneous Measurement of Velocity and Concentration Field in a Stirred Mixer Using PIV/LIF Technique and POD Analysis

Eun-Ho Jeong · Sang-Youl Yoon · Kyung-Chun Kim

Abstract

Simultaneous measurement of turbulent velocity and concentration field in a stirred mixer tank is carried out by using PIV/LIF technique. Instantaneous velocity fields are measured by a 1K×1K CCD camera adopting the frame straddle method while the concentration fields are obtained by measuring 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. It is found that the general features of the mixing pattern are quite dependent on the local flow characteristics during the rapid decay of mean concentration. However, the small scale mixing seems to be independent on the local turbulent velocity fluctuation.

Key Words : Simultaneous Measurement of Turbulent Velocity and Concentration Field(속도장/농도장 동시측정), Rushton Turbine(러쉬톤터어빈), Laser Induced Fluorescence(레이저형광여 기법), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계)

기호설명

- D : 임펠라 공칭 직경
 $C_{i,j}^*$: 무차원화 된 농도장
 $\langle C^*(x) \rangle$: 앙상블 평균 농도장
 $\langle C'^2(x) \rangle$: 분산장
 X_1, X_2 : 왜곡된 이미지상의 좌표
 x_1, x_2 : 실제 좌표

1. 서론

회전교반기 유동은 생명공학, 식품 및 하수처리 등 여러 가지 실제 공정에서 자주 등장하는 유동장이다. 본 연구에서는 산업체에서 가장 많이 사용되고 있는 러쉬톤 터어빈 교반기를 대상으로 난류 혼합 특성을 실험적으로 연구하였다.

최근 입자영상유속계 (PIV)의 등장으로 순간적인 속도장의 측정이 가능하여 회전교반기의 유동 특성인 벌크유동장과 임펠러 주위 유동장의 난류 구조가 규명되고 있으며(1), 이러한 성과는 보다 효율적인 교반기의 설계에 적용되고 있다.

또한, 난류유동장에서 순간 농도장을 측정함에

† 부산대학교 기계공학과
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

* 부산대학교 기계공학과

있어서 매우 유용한 방법인 레이저 형광여기법(LIF)의 적용으로 스칼라 혼합에 대한 실험도 소수 연구자에 의해 진행되었다. Guillard et al.(2000)(2)은 PLIF 기법을 이용하여 batch 형의 교반탱크에서 순간적인 농도장을 구하였다. 이들은 형광물질을 벌크유동장 및 임펠러 유동장에 주입하고 얻어진 순간 농도장들을 통계처리하여 거시적인 농도장 구조를 제시하였다.

본 연구에서는 PIV 기법과 PLIF 기법을 사용하여 생화학공정에 많이 사용되는 batch 형 Rushton turbine mixer의 속도장과 농도장을 동시에 측정하기 위한 시스템을 구축하고, 동시에 측정된 속도장 농도장에서 혼합 메커니즘의 특성 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 교반혼합기 실험장치

본 연구에서 사용된 교반혼합기의 제원 및 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다. 임펠러는 공칭 직경(D)이 64mm인 six-bladed symmetric Rushton turbine을 사용하였다. 블레이드의 두께는 2mm이고, 혼합용기의 내부직경(T)은 190mm(=3D)이며 수면의 높이(H)는 용기직경과 같도록 하였다. 터빈 블레이드의 수직중심과 탱크 바닥과의 거리(clearance, C)는 T/2로 고정시켰고, 임펠러의 회전속도는 100rpm, ($V_{tip} = 355\text{mm/s}$)으로 일정하게 유지하였다.

2.2 속도장, 농도장 동시측정 시스템

Fig. 2는 속도장, 농도장의 동시측정을 위해 사용된 실험장치도를 나타낸다. 순간 속도장의 측정을 위한 2-D PIV 시스템, 순간 농도장의 측정을 위한 PLIF 시스템, 두 시스템의 동기화를 위한 Pulse Generator(DG535)로 구성되어 있다. PIV 기법과

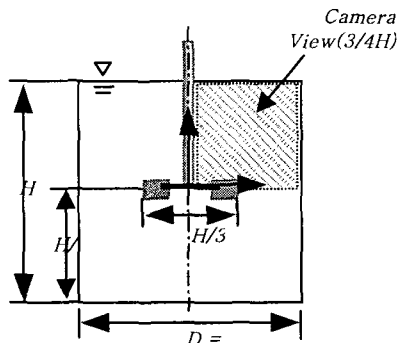


Fig. 1 Dimensional relationships between blade diameter, filled tank depth, turbine clearance and tank diameter

LIF 기법에 공통으로 사용된 광원으로는 이중 펄스방식의 Nd-Yag 레이저이며 532nm의 파장을 가지며, 4nsec 동안 250mJ의 펄스 레이저를 방출한다. 광원으로부터 나온 레이저는 원통형렌즈와 원구형 렌즈를 거치면서 측정부(Camera View)에 얇은 평면광을 형성한다.

탱크 내부에는 PIV 용 입자와 LIF 용 형광염료가 동시에 존재하게 된다. PIV 측정에 사용된 입자는 평균직경 8~12 μm , 비중이 1.5 이하인 hollow glass 이고, LIF 측정에 사용된 형광염료는 Rhodamine B 용해물이다.

측정부에 형성된 레이저 평면광에 의해 hollow glass 입자는 $\lambda_{\text{max}} = 532\text{nm}$ 의 녹색광으로 산란되고, 형광염료는 $\lambda_{\text{max}} = 575\text{nm}$ 의 오렌지색광으로 여기된다. 두가지 파장의 영상정보를 구분하여 카메라로 수광하기 위해서, PIV 용 카메라렌즈에는 $\lambda = 532\text{nm}$ 의 bandpass optic filter를 장착하여 입자에 의해 산란되는 빛만을 화상으로 획득하고, LIF 용 카메라에는 $\lambda = 550\text{nm}$ 의 highpass optic filter를 설치하므로써 레이저광 및 입자에 의해 산란되는 빛은 필터링 시킬 수 있다.

2.2 이미지의 보정

하나의 평면에 대해 2대의 카메라로 측정을 할 때에 두대의 카메라의 위치 및 렌즈의 배율의 차이 등으로 인해 이미지를 정확히 일치 시키는 것은 어려움이 있다. 때문에 이미지 보정기법을 이용하여 최소 하나의 이미지에 대한 보정이 필요하다. 2D PIV 용 카메라는 측정면과 수직으로 설치되어야 영상획득시에 발생할 수 있는 속도 벡터의 오차를 줄일 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이

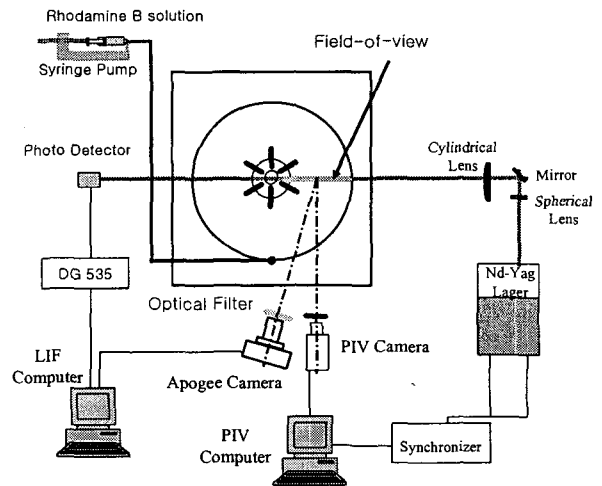


Fig. 2 Experimental Setup

PIV 용 카메라는 측정면과 공간적으로 수직으로 위치시켜 이미지 보정을 하지 않고 속도벡터를 추출하였다.

이미지 보정을 위해, 일정한 간격으로 배열된 그물모양(grid)의 점들이 표시된 보정판을 찍은 후, 왜곡된 이미지상의 점들의 위치와 실제 보정판의 점들의 위치와의 사상함수(mapping function)를 구하였다. 본 실험에서 획득한 LIF 용 카메라로 찍은 왜곡된 이미지의 각 픽셀 위치를 사상함수를 이용하여 왜곡이 수정된 이미지로 재 구성하였다. 이미지상의 점들의 위치와 실제 점들의 위치의 관계는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{F}_{1,1} & \hat{F}_{1,2} \\ \hat{F}_{2,1} & \hat{F}_{2,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서, X_1, X_2 는 각각 이미지상의 점들의 픽셀좌표값이고, x_1, x_2 는 실제 점들의 위치좌표를 나타낸다. \hat{F} 는 왜곡의 수정을 위한 사상함수를 나타내는데, 식 (5), (6)을 이용하여 사상함수의 계수(a_{ij}, b_{ij})를 구할 수 있다.

$$X_1 = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x_1^i x_2^j \quad (5)$$

$$X_2 = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 b_{ij} x_1^i x_2^j \quad (6)$$

여기서, 계수 a_{ij} 와 b_{ij} 는 실제 위치좌표와 왜곡된 이미지 좌표를 이용하여 최소자승법으로 구할 수 있다.

위의 방법으로 구한 보정계수를 이용하여 실제 점들의 위치($F(x_c)$)와 왜곡된 이미지를 보정한 점들의 위치($\hat{F}(x_c)$)들간의 오차를 식(7)을 통해 구한 결과 x 방향으로 0.139 pixel, y 방향으로 0.118 pixel 로 이미지의 보정과정이 상당히 정확하다는 것을 알 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{1}{N_c} \sum_{|x_c|} |F(x_c) - \hat{F}(x_c)|^2 \quad (7)$$

여기서, $\{x_c\}$ 는 보정판 위의 점들의 위치를 나타내고 N_c 는 보정판 위의 점들의 개수를 나타낸다.

3. 속도장 농도장 동시측정 결과

Fig. 4는 동시에 측정된 속도장과 농도장을 나타낸다.

순간 속도장에서 블레이드팁 끝단에서 생성되는 제트 유동에 의해 야기되는 복잡한 유동을 확인할 수 있는데, 용기의 벽면에 부딪힌 제트유동이 상하로 나뉘면서 더욱 복잡한 형상의 와를 형성하게 된다. 양상블 평균 속도장에서는 벽면근처에서 반지형 와가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 지속적으로 형성되는 유동장 속에서 주입된 염료의 스칼라 혼합은 난류혼합과는 다른 형태로 일어난다. 염료가 측정면의 3/4 바퀴 이전의 벽면에서 주입되면서 반지형 와속으로 유입되고, 블레이드 팁에 의해 생성되는 제트에 의해 혼합되는 과정을 확인할 수 있다. Fig. 3은 분산장을 면적평균한 그래프이다. 크게 두개의 세개의 구간으로 나눌 수 있다. (I)구간에서는 분산 값이 거의 일정하게 유지되는데, 염료의 주입이 끝났지만, 주입위치와 측정위치의 차이 등으로 인해 염료의 주입이 끝났지만, 일정한 분산값을 나타내는 구간이고, (II) 구간은 분산값이 급격히 작아지는 large scale mixing 구간에 해당하는데, 염료의 주입이 멈춘 후 주입된 염료의 대부분의 혼합이 일어나는 구간이다. (III) 구간은 분산값이 서서히 줄어드는 small scale mixing에 해당한다.

Fig. 3의 (I), (II), (III)구간별로 대표해서 순간 속도, 농도장을 Fig. 4의 (a), (b), (c)로 나타내었다. 순간 속도장들은 각 구간별로 상관없이 복잡한 형태로 나타나고, 농도장 또한 복잡한 형태이지만, (a), (b)에서와는 달리 (c)에서는 대부분의 혼합이 일어나서, 전체적으로 일정한 농도값을 보이고 있다. Fig. 4의 (d)는 양상블 평균한 속도장과 농도장을 동시에 나타낸 그림이다. 속도장을 통해 알 수 있는 반지형 와를 따라서 등 농도선이 분포한다는 것을 알 수 있다. 이는 수동적인 스칼라의 분포는 유동장의 특성과 밀접한 관계를 가짐을 의미한다.

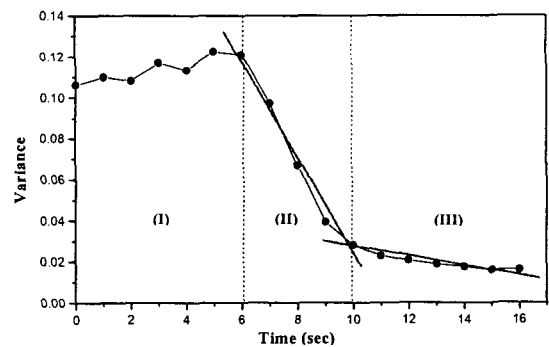


Fig. 3 Area average of variance fields

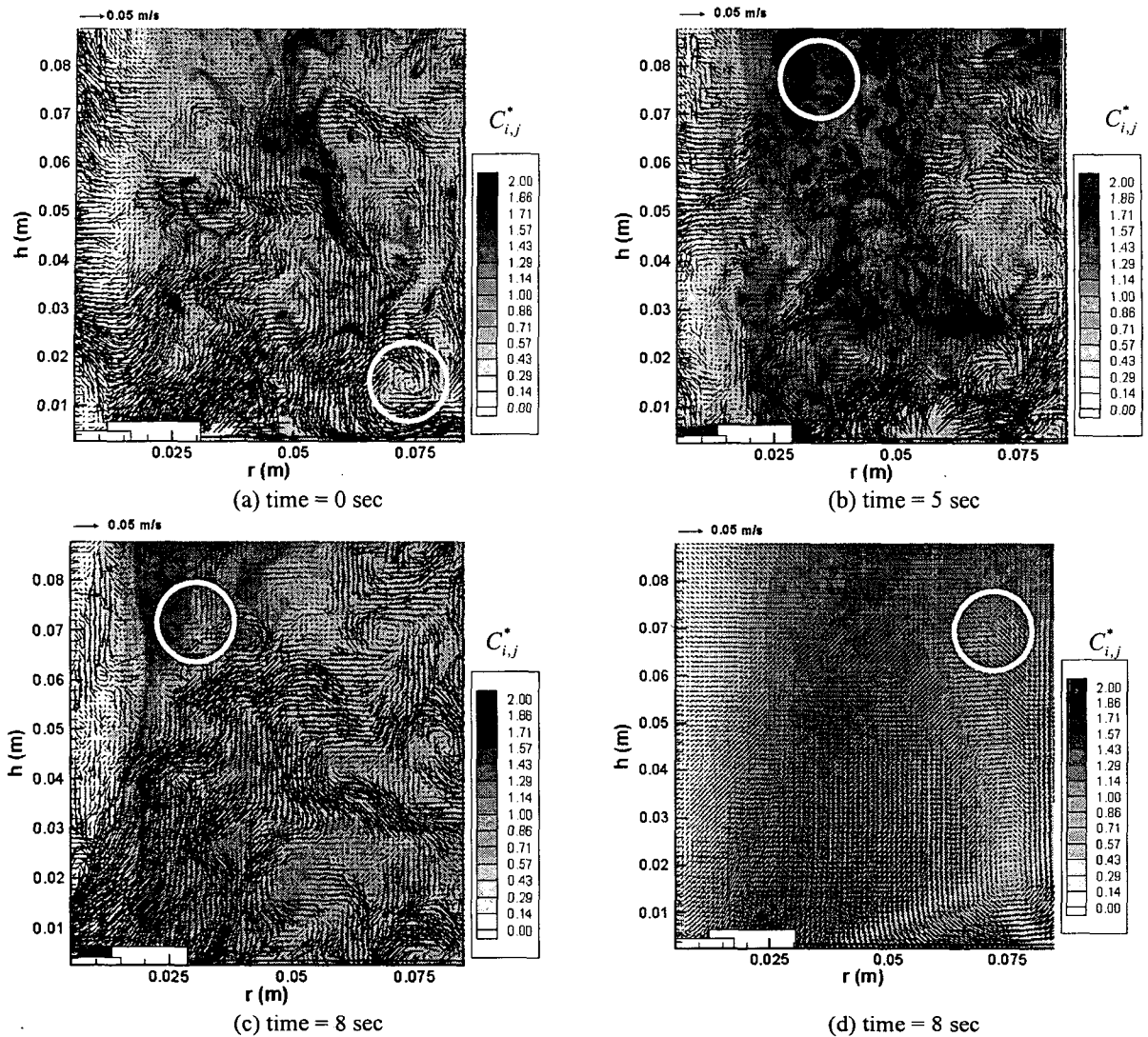


Fig. 4 Instantaneous Concentration and velocity field

4. 결 론

Rushton turbine 을 이용한 교반기 내의 혼합과정을 이해하기 위해서 속도장과 농도장을 동시에 측정하는 시스템을 구축하여 순간적인 속도장과 농도장을 측정하였다. 속도장의 통계처리를 통해 유동 구조를 확인하고, 농도장의 통계처리를 위해 혼합메카니즘의 time scale 을 구하였다. 또한, 속도장과 농도장을 동시에 나타냄으로써 혼합메카니즘³에서 수동적인 스칼라량이 난류혼합영역에서는 국소적인 유동과 큰 영향이 있음을 알 수 있었고, 분자혼합영역에서는 국소적인 유동과의 상관관계가 매우 적었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-01080-0)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Kim Sang Ki, Kim Kyung Chun, 2000, "PIV Measurement of Bulk Flow in a Stirring Mixer", Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting, pp.680-685
- (2) F. Guillard, C. Tragardh, L.Fuchs, 2000, "A Study of turbulent mixing in a turbine-agitated tank using a fluorescence technique", Exp. Fluids 28, pp.225-235