

PIV/LIF 기법에 의한 교반혼합기 내의 속도장과 농도장 동시 측정

정은호* · 윤상열* · 김경천†

(2002년 10월 31일 접수, 2003년 2월 21일 심사완료)

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

Eun Ho Jeong , Sang Youl Yoon and Kyung Chun Kim

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)

Abstract

Simultaneous measurements of turbulent velocity and concentration field in a stirred mixer tank are carried out by using PIV/LIF technique. Instantaneous velocity fields are measured with 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.

기호설명

- D : 임펠라 공칭 직경
- $\bar{I}_{BG(i,j)}$: 초기 평균배경영상
- $\bar{I}_{ST(i,j)}$: 정상상태 평균배경영상
- $C_{i,j}^*$: 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
- λ_{max} : 최대 방출파장

1. 서론

회전교반기 유동은 생명공학, 식품 및 하수처리 등 여러 가지 실제 공정에서 자주 등장하는 유동장이다. 6 개의 판으로 이루어진 러쉬톤 터빈이 원통형 탱크 내부에서 회전함으로써 발생하는 유동은 기하학적인 복잡성 이외에도 다양한 길이 척도의 난류구조를 가지는 매우 복잡한 난류 유동이다. 이러한 유동의 복잡성으로 인해 선행 연구들은 이론적 접근보다는 실험적 연구가 그 주류를 이루어 왔다.

많은 선행 연구들은 주로 블레이드 근처의 복잡한 와 구조의 규명에 그 관심을 가져왔다. Van't Riet 과 Smith⁽¹⁾는 photographic 유속 측정을 이용하여 블레이드 팁(tip)에 발생하는 와류의 구조와 궤적(trajecory)을 분석하였으며, Costes 와 Couderc,⁽²⁾ Stoots 와 Calabrese,⁽³⁾ 그리고 Rutherford at al.⁽⁴⁾은

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2324 FAX : (051)512-9835

* 부산대학교 대학원 기계공학과

이지 도플러 유속계(LDV)를 이용하여 그 구조를 연구하였다. 또한 유동 내의 소산(dissipation)의 측정은 혼합 메커니즘과 밀접한 관계가 있으므로 매우 중요하다.

최근 입자영상유속계 (PIV)의 등장으로 순간적인 속도장의 측정이 가능하여 회전교반기의 유동 특성인 벌크유동장과 임펠러 주위 유동장의 난류 구조가 규명되고 있으며,⁽⁵⁾ 이러한 성과는 보다 효율적인 교반기의 설계에 적용되고 있다.

또한, 난류유동장에서 순간 농도장을 측정함에 있어서 매우 유용한 방법인 레이저 형광여기법(LIF)의 적용으로 스칼라 혼합에 대한 실험도 소수 연구자에 의해 진행되었다. Guillard et al.⁽⁶⁾은 PLIF 기법을 이용하여 회분(batch)형의 교반탱크에서 순간적인 농도장을 구하였다. 이들은 형광물질을 벌크유동장 및 임펠러 유동장에 주입하고 얻어진 순간 농도장들을 통계처리하여 거시적인 농도장 구조를 제시하였다.

교반혼합기에서의 혼합과정을 살펴보면, 터빈 블레이드의 회전운동에 의해 투입되는 운동에너지에 의해 유동장은 지속적인 난류 유동을 형성하고 있지만, 실제로 염료의 농도구배가 존재하는 영역에서만 일어난다. 또한, 농도구배가 존재하는 영역이라 할 지라도 난류혼합이 발생하지 않으면 혼합이 활발하게 일어나지 않는다. 따라서, 난류혼합과정을 잘 이해하기 위해서는 속도장과 농도장을 동시에 고려해야 한다.

본 연구에서는 PIV 기법과 PLIF 기법을 사용하여 생화학공정에 많이 사용되는 회분형 러쉬톤 터빈(Rushton turbine) 교반기내의 속도장과 농도장을 동시에 측정하기 위한 시스템을 구축하고, 동시에

측정된 속도장과 농도장에서 혼합 메커니즘의 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 교반 혼합 실험장치

본 연구에서 사용된 교반혼합기의 제원 및 좌표계를 Fig. 1 에 나타내었다. 임펠러는 공칭 직경(D)이 64 mm 이고, 6 개의 블레이드를 가진 대칭형 러쉬톤 터빈을 사용하였다. 블레이드의 두께는 2 mm 이고, 혼합용기의 내부직경(T)은 190 mm (=3D)이며 수면의 높이(H)는 용기직경과 같도록 하였다. 터빈 블레이드의 수직중심과 탱크 바닥과의 간격(clearance, C)은 T/2 로 고정시켰고, 임펠러의 회전속도는 100 rpm ($V_{tip} = 35$ mm/s)으로 일정하게 유지하였다.

2.2 속도장, 농도장 동시측정 시스템

Fig. 2 는 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 펄스 지연장치(pulse delay generator: DG535)로 구성되어 있다. PIV 기법과 LIF 기법에 공통으로 사용된 광원으로는 이중 펄스방식의 Nd-Yag pulse 레이저(Continuum)이며 532 nm 의 파장으로, 4 nsec 동안 250 mJ 의 펄스 레이저를 방출한다. 광원으로부터 나온 레이저는 원통형렌즈와 원구형 렌즈를 거치면서 측정부(field of view)에 얇은 평면광을 형성한다. 탱크 내부에는 PIV 용 입자와 LIF 용 형광염료

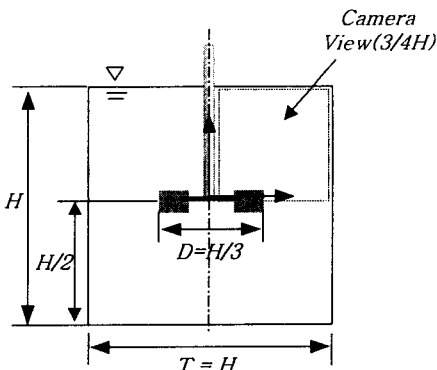


Fig. 1 Dimensional relationships between blade diameter, filled tank depth, turbine clearance and tank diameter

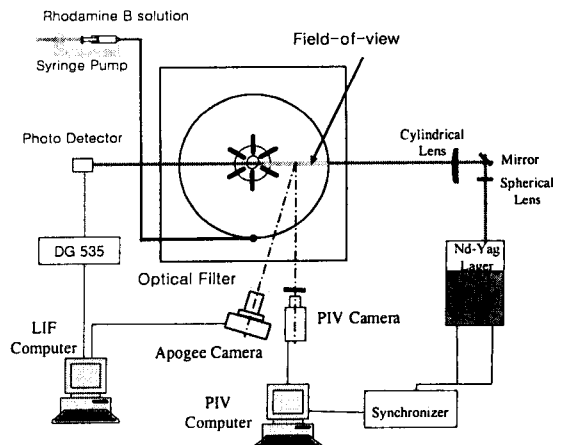


Fig. 2 Experimental setup

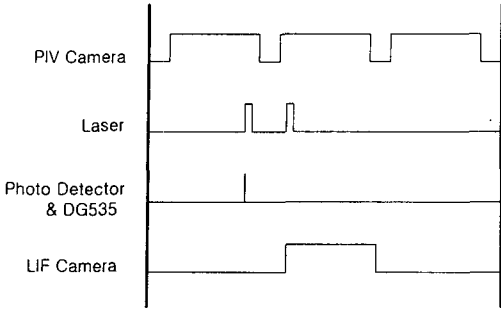


Fig. 3 Pulse signals for simultaneous measurement

가 동시에 존재하게 된다. PIV 측정에 사용된 입자는 평균직경 8~12 μm , 비중이 1.05 이하인 중공 글라스(hollow glass)를 사용하여 레이저 평면에서 산란이 일어나도록 하였다. LIF 측정에 사용된 형광 염료는 Rhodamine B 이며, 증류수(deionized water)에 용해시켜 사용하였다.

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 카메라 렌즈 앞에는 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 의 bandpass optic filter 를 장착하여 입자에 의해 산란되는 빛만을 화상으로 획득하였고, LIF 용 카메라 렌즈 앞에는 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 의 highpass optic filter 를 설치하여 레이저광 및 입자에 의해 산란되는 빛은 제거하고, 형광염료에 의한 형광만을 수광하게 된다.

Fig. 3 은 레이저의 펄스 신호와 두대의 카메라를 동기화시키기 위한 신호체계를 나타낸다. PIV 측정시 첫번째 레이저 광을 수광기(photo detector)로 직접 수광하여 신호 지연장치를 통해 LIF 카메라의 노출시점을 제어한다.

레이저 펄스 신호는 1Hz 주기로 세팅을 하여 Fig. 3 의 동기화 과정이 16 초동안 반복되면서 순간 속도장과 순간 농도장의 동시측정을 위한 이미지 획득이 이루어진다.

2.3 PIV 기법을 이용한 속도장 측정 방법

속도장의 측정시 화상획득을 위해 사용된 카메라는 1024× 1024 픽셀의 해상도를 가진 PIVCAM 10-15 CCD 카메라를 사용하였고, 2 프레임(frame) 간의 시간간격은 최소 35 μs 이다.

속도벡터의 추출 알고리즘은 2 화상 상호상관 기법을 이용하였다. PIV 측정 영역의 크기는 87

Table 1 Characteristics of Rhodamine B

Dye	Molecular Weight	λ_{abs} [nm]	λ_{em} [nm]	ϕ	$\epsilon_{\lambda=488}$ [m2g-1]
RhB	479.02	554	575	0.31	4.4

mm× 87 mm 이다. 속도를 계산하기 위한 탐색영역(interrogation window)의 크기는 24× 24 픽셀이고, 50 %의 겹침이 허용되었다. 속도벡터의 격자수는 모두 6889 개이고 벡터간의 공간해상도는 1.03 mm 이다. 동적 평균값비교(Dynamic mean value operator)의 기준값(threshold)을 적절히 조절하여 오류벡터를 제거하였고, Gaussian peak fit 에 의한 방법으로 sub-pixel 을 추적하였다.

본 연구에서 속도장의 추출을 위한 화상 획득은 형광염료의 주입이 끝나는 시점부터 LIF 측정용 카메라와 동기화 되어 두 프레임씩 1 초간격으로 32 장의 이미지를 얻었는데, 100 번의 앙상블 실험을 수행함으로써 총 3200 장(속도장 1600 장)을 획득하여 후처리하였다.

2.4 LIF 기법을 이용한 농도장 측정 방법

레이저 형광여기법(LIF)은 레이저에 의해 여기된 형광염료의 형광강도를 측정하기 때문에 측정 이미지 자체가 농도로 환산된다. 이러한 이유로 배경 복사 자체가 농도값에 직접 영향을 미치기 때문에 측정은 간이적인 암실에서 이루어지며 카메라의 선택에도 SNR 을 고려하여 고감도의 카메라로 측정이 이루어져야 한다. 본 실험에서 사용된 Apogee cooled CCD 카메라는 CCD 표면이 영하 30 도에서 작동되고 14 bit 의 해상도를 가지고 있으며, 1300× 1030 픽셀의 화소를 가지므로 충분한 신호대 잡음비를 확보할 수 있으며 작은 스케일의 난류 구조를 규명하기에 충분한 공간분해능을 가지고 있다. LIF 측정시 각 픽셀의 강도값이 직접 농도로 환산되기 때문에 속도장에 비해 공간해상도가 상당히 양호하다. 따라서, 농도장은 속도장 추출을 위한 PIV 카메라의 화상획득 영역보다 넓게 측정하여 속도장과 직접 겹치는 영역만 추출하였다. 이미지의 획득 영역은 90 mm× 121 mm 이고, 공간해상도는 0.174 mm/pix 이다.

Table 1. 은 형광염료로 쓰인 로다민 B (Rhodamine B)의 특성을 나타낸다. 로다민 B 는 물속에서 열적, 화학적 특성이 우수하고, 최대 흡수파장은 554 nm 이며, 형광여기된 빛의 최대방출파장은 575 nm 이다. 형광염료의 주입은 일정한 주입속도를 유지해야 하므로 주사기(Syringe pump)를 사용하였고,

염료의 주입구는 유동에 교란을 주지 않는 1 mm 직경의 주사바늘을 원통벽면에 부착하였다. 염료의 주입위치는 탱크 높이의 3/4 H 지점이고, 측정 영역의 3/4 바퀴 앞쪽 벽면이다.

본 연구에서는 형광염료의 주입이 끝나는 시점부터 PIV 측정용 카메라와 동기화 되어 1 초간격으로 16 장의 이미지를 획득하였는데, 100 번의 양상불 실험을 수행함으로써, 스칼라 혼합메카니즘을 파악하기 위한 통계적인 계산을 수행하였다.

LIF 에 관한 이전 연구에서 형광염료의 이기광의 강도는 임계 농도이하까지는 선형적으로 증가한다고 알려져 있다.⁽⁷⁾ 그래서, 순간 농도장은 아래와 같이 무차원화시킬 수 있다.

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

여기서, \bar{I}_{BG} 는 염료 주입 전의 배경이미지의 평균값, \bar{I}_{ST} 는 염료 주입 후 정상상태에 도달했을 때 이미지의 평균값이다.

또한, 아래의 식을 통해 양상불 평균 농도장 및 분산장을 구하였다.

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

$$\langle C^{i2}(x) \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (C^{i2}(x, t) - \langle C^*(x) \rangle)^2 \quad (3)$$

2.5 LIF 이미지의 보정

하나의 평면에 대해 2 대의 카메라로 측정을 할 때에 두 대의 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. 2 에서 보는 바와 같이 PIV 용 카메라는 측정면과 공간적으로 수직으로 위치시켜 이미지 보정을 하지 않고 속도벡터를 추출하였다.

LIF 용 카메라는 PIV 용 카메라와 같은 높이에서 약간 비스듬하게 위치시켜 이미지를 획득하고, 농도값 추출시 왜곡된 이미지의 보정을 수행하였다.

이미지 보정을 위해, 일정한 간격으로 배열된

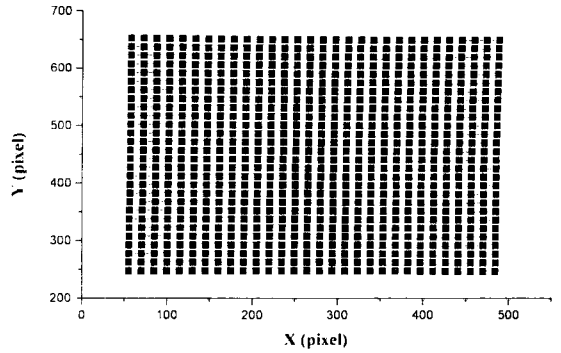


Fig. 4 Point data for mapping function

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.⁽⁸⁾

Fig. 4 는 사상함수를 구하기 위해 보정판을 찍은 왜곡된 이미지에 표시된 점들의 위치를 나타낸다. 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.

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

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

여기서, 계수 a_{ij} 와 b_{ij} 는 실제 위치좌표와 왜곡된 이미지 좌표를 이용하여 최소사승법으로 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 방향으로는 0.139 pixel, y방향으로는 0.118 pixel로 이미지의 보정과정이 상당히 정확하다는 것을 알 수 있다.

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

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

3. 실험 결과

3.1 속도장의 측정 결과 및 고찰

원통형 용기 속에 놓인 Rushton turbine 의 회전으로 형성되는 혼합교반기의 거대 유동은 블레이드 팁으로부터 배출되는 반경방향의 제트유동이 벽면에 부딪혀 교반기 상하로 나뉘면서 거대한 반지형 와를 이루어 형성된다고 알려져 있다.

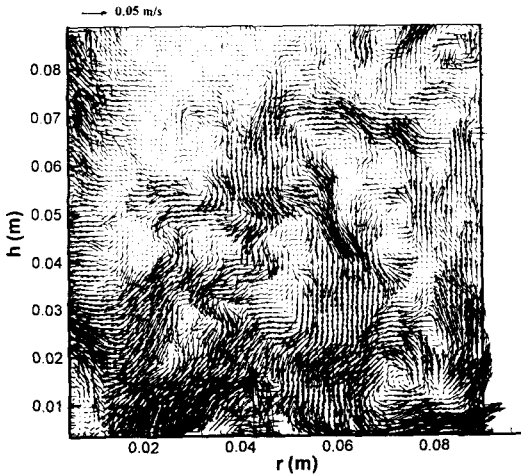


Fig. 5 Instantaneous velocity field (t=20s)

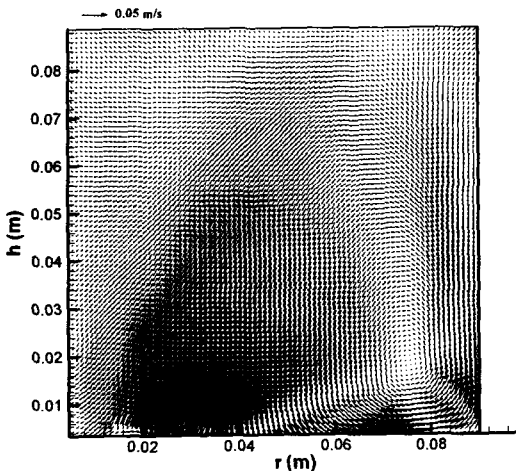


Fig. 6 Ensemble averaged velocity field (t=20s)

Fig. 5 와 6 은 염료의 주입이 끝나는 시점(t=20)에 서의 순간 속도장과 앙상블 평균 속도장을 나타낸 다. 순간 속도장에서 블레이드팁 끝단에서 생성되 는 제트 유동에 의해 야기되는 복잡한 유동을 확 인할 수 있는데, 용기의 벽면에 부딪힌 제트유동 이 상하로 나뉘면서 더욱 복잡한 형상의 와를 형 성하게 된다. 앙상블 평균 속도장에서는 벽면근처 에서 반지형 와가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 지속적으로 형성되는 유동장 속에서 주입된 염료 의 스칼라 혼합은 난류혼합과는 다른 형태로 일어 난다.

3.2 농도장의 측정 결과 및 고찰

Fig. 7 은 Fig. 5 와 같은 시간(t=20s)에 동시 측정 된 순간 농도장을 나타낸다.

염료가 측정면의 3/4 바퀴 이전의 벽면에서 주

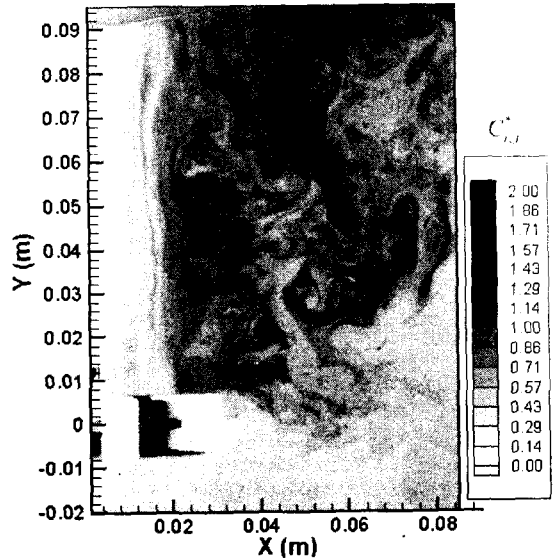


Fig. 7 Instantaneous concentration field.

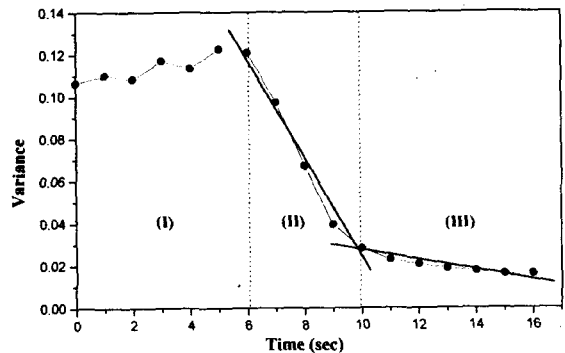


Fig. 8 Area average of variance fields

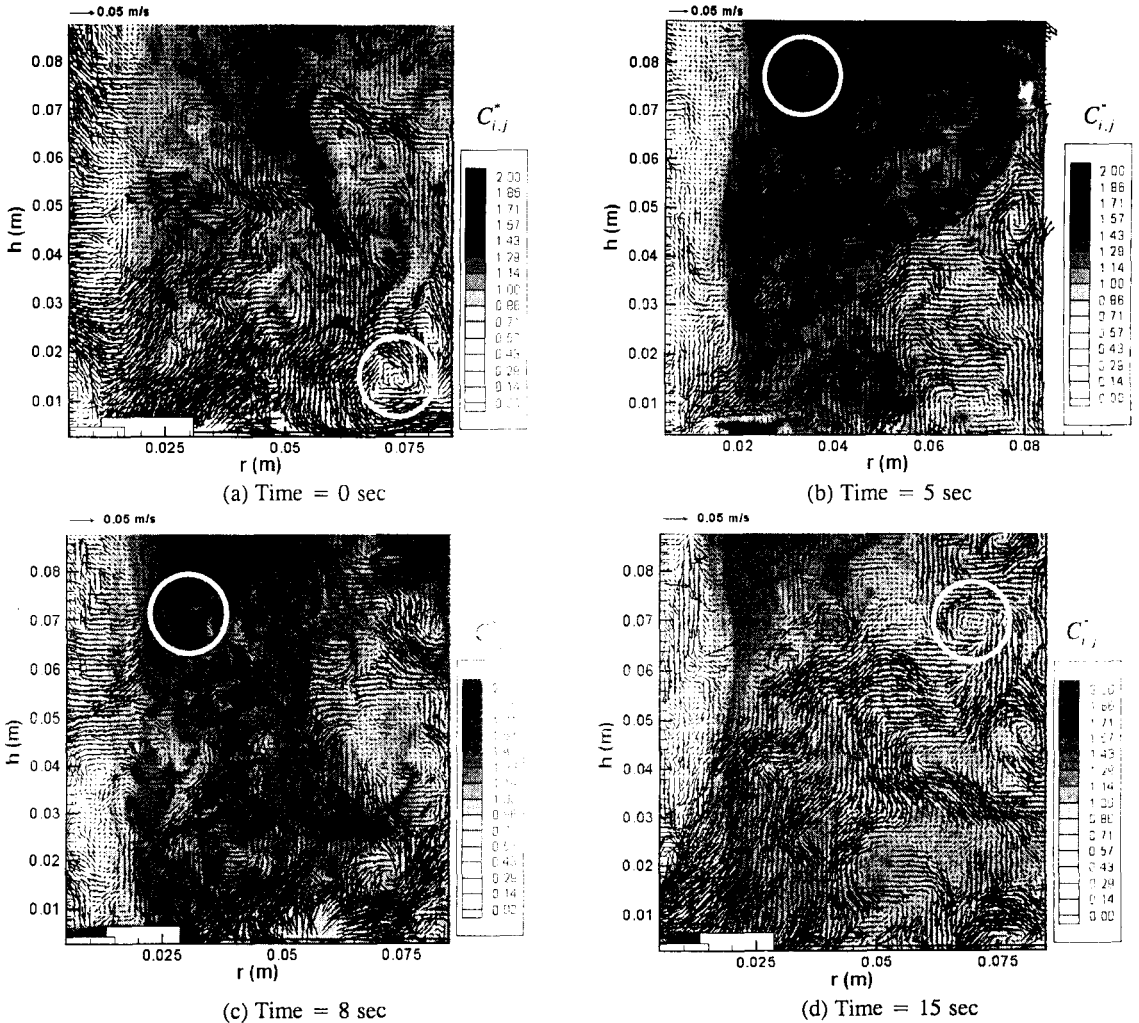


Fig. 9 Instantaneous concentration and velocity field

입되면서 블레이드 팁에서 생성되는 제트에 의해 반지형 와속으로 유입 되고, 난류 혼합에 의해 염료가 혼합되는 과정을 확인할 수 있다. Fig. 8 은 분산장을 면적평균한 그래프이다. 스칼라 혼합메카니즘에 따라 크게 세개의 구간으로 나눌 수 있다. (I)구간에서는 분산 값이 거의 일정하게 유지되는데, 주입위치가 측정위치로부터 3/4 바퀴 앞에 위치함에 따라, 염료의 주입은 끝났지만 측정면으로 계속 염료가 주입되고 있기 때문에 분산값이 일정하게 유지되는 구간이고, (II) 구간에서부터는 측정위치와 주입위치의 차이에 의한 시간지연이 끝나고, 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 mixing 에 해당하는데, 대부분 혼합구조가 없

어지고, 축근처에서만 약간의 농도구배가 존재한다.

3.3 속도장과 농도장의 동시 측정 결과 및 고찰
고정된 블레이드 팁의 영상을 획득한 후, 팁 블레이드 끝점의 위치를 서로 일치시킴으로써 속도장과 농도장을 동시에 도시화 할 수 있다.

Fig. 9 는 순간 속도장과 순간 농도장을 동시에 나타낸 그림이다. Fig. 8 의 (I), (II), (III)구간별로 대표해서 순간 속도, 농도장을 나타내었다. (a)와 (b)는 구간 (I), (c)는 구간(II) 그리고 (d)는 구간 (III)에 해당한다. 순간 속도장들은 각 구간별로 상관없이 복잡한 형태로 나타나고, 농도장 또한 복잡한 형태이지만, (a), (b), (c)에서와는 달리 (d)에서는 대부분의 혼합이 일어나서, 전체적으로 일정한 농도값을 보이고 있다. 하얀 원으로 표시된 부분은 국부

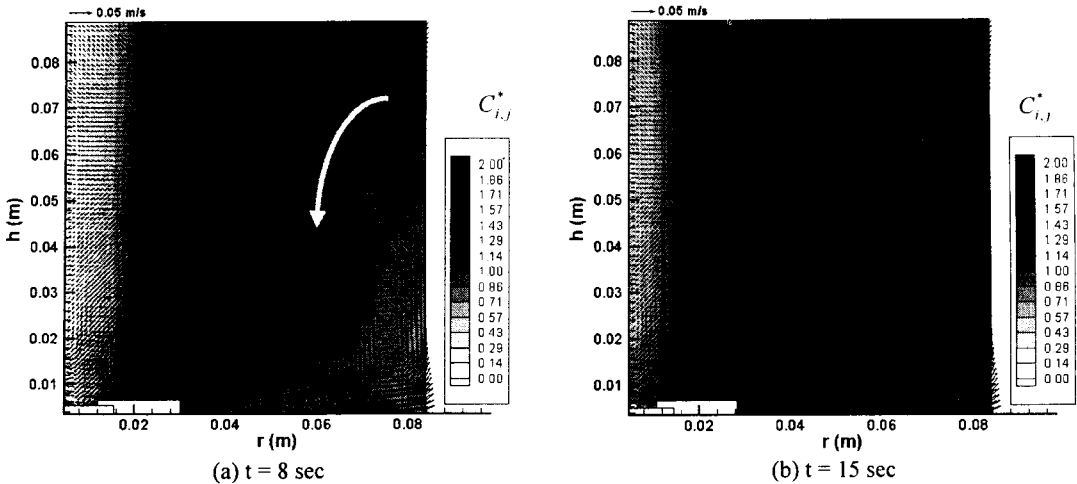


Fig. 10 Ensemble averaged concentration and velocity fields

적으로 속도장에서 국부적으로 와가 형성되는 곳에서 스칼라의 분포 또한 와 형태를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 순간 농도장은 순간 속도장의 Stretching 에 의해 띠 형태로 변하는 경향이 있으며, 속도구배의 최대위치에 농도가 집중되어 있는 형태를 볼 수 있다. 또한 박리유선이 형성되는 임펠러 축 주위의 유동에는 농도의 확산이 매우 느리게 나타나고 있다. Fig. 10 의 (a), (b)는 각각 $t = 8, 15$ 초에서 앙상블 평균한 속도장과 농도장을 동시에 나타낸 그림이다. 속도장을 통해 알 수 있는 반지형 와를 따라서 등농도선이 분포한다. 이는 수동적인 스칼라의 분포는 유동장의 특성과 밀접한 관계를 가짐을 의미한다. 그러나, 시간이 지나가면 속도장은 변화가 없으나 농도장은 난류 운동 에너지의 공간적 분포와는 무관하게 나타나므로 속도, 농도 동시측정에서 구해지는 상관계수가 혼합도의 시간척도에 중요한 역할을 하리라고 생각된다.

4. 결론

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 시간척도(time scale)를 구하였다. 또한, 속도장과 농도장을 동시에 나타냄으로써 혼합메카니즘에서 수동적인 스칼라량이 난류혼합영역에서는 국소적인 유동과 큰 영향이 있음을 알 수 있었고, 분자혼합영역에서는 국소적인 유동과의 상관관계가 매우 작음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-01080-0)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) J. Costes and J. P. Couderc, 1988, "Study by Laser Doppler Anemometry of the Turbulent Flow Induced by a Rushton Turbine in a Stirred Tank: Influence of the Size of the Units - I. Mean Flow and Turbulence," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 43, No. 10, pp. 2751~2764.
- (3) C. M. Stoots and R. V. Calabrese, 1995, "Mean Velocity Field Relative to a Rushton Turbine Blade," *AIChE Journal*, Vol. 41, No. 1, pp. 1~11.
- (4) K. Rutherford, K. C. Lee, S. M. S. Mahmoudi and M. Yianneskis, 1996, "Hydrodynamic Characteristics of Dual Rushton Impeller Stirred Vessels," *AIChE Journal*, Vol. 42, No. 2, pp. 332~346.
- (5) 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
- (6) 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
- (7) Jeong Eun Ho and Kim Kyung Chun, 2002, "A Study on the Mixing Characteristics in a Rushton Turbine Reactor by a Laser Induced Fluorescence Method," *KSME*, pp. 1145~1152
- (8) Solof, S., Adrian, R.J., Liu, Z., 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci Tech.*