

## 레이저 형광여기법(LIF)를 이용한 러쉬톤 터빈 교반기의 혼합특성에 관한 연구

정은 호\* · 김경 천†  
(2002년 1월 24일 접수, 2002년 6월 27일 심사완료)

### A Study on the Mixing Characteristics in a Rushton Turbine Reactor by a Laser Induced Fluorescence Method

Eun Ho Jeong and Kyung Chun Kim

**Key Words:** Rushton Turbine Reactor(러쉬톤 터빈 교반기), Bulk Flow(거대유동), Complex Turbulent Flow(복합 난류 유동), Concentration Field(농도장), Laser Induced Fluorescence(레이저 형광여기법)

#### Abstract

A non-intrusive Planar Laser-Induced Fluorescence(PLIF) technique was applied to study the turbulent mixing process in a Rushton turbine reactor. Instantaneous and ensemble averaged concentration fields was obtained by measuring the fluorescence intensity of Rhodamine B tracer excited by a thin Nd:Yag laser sheet illuminating the whole center plane of the stirred tank. The gray level images captured by a 14-bit cooled CCD camera could be transformed to the local concentration values using a calibration matrix. The dye injection point was selected at the tank wall with three quarter height (3/4H) from the tank bottom to observe the mixing characteristics in upper bulk flow region. There exist distinct two time scales: the rapid decay of mean concentration after the dye infusion reflects the large scale turbulent mixing while the followed slow decay reveals the small scale molecular mixing. The temporal change of concentration variance field conjectures the two sequential processes for the batch type mixing. An inactive column of water is existed above the impeller disk, in which the fluid rotates with the shaft but is isolated from the mean bulk flow.

#### 기호설명

$D$  : 용기 직경  
 $C^*$  : 무차원화된 농도장  
 $\langle C^2(x) \rangle$  : 농도장의 분산  
 $\overline{I_{BG}(i,j)}$  : 초기 평균배경영상  
 $\overline{I_{ST}(i,j)}$  : 정상상태 평균배경영상

#### 1. 서론

최근 생명공학관련 산업이 발전하면서 각종 생화학 프로세스에 사용되는 정밀한 회전 교반기의 설계 및 제어가 요구되고 있다. 산업체 및 연구실에서 가장 많이 사용되는 회전 교반기는 매우 복잡한 난류유동 특성을 가지므로 실험적, 수치적 해석에 어려움이 따른다. 최근 입자영상유속계(PIV)의 등장으로 순간적인 속도장의 측정이 가능하여 회전교반기의 유동특성인 벌크유동장과 임펠러 주위 유동장의 난류구조가 규명되고 있으며,<sup>(1)</sup> 이러한 성과는 보다 효율적인 교반기의 설계에 적용되고 있다. 그러나, 이러한 난류혼합과정에서 수동적인 스칼라량(passive scalars)이 어떠

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

한 메카니즘으로 혼합이 일어나는가에 대한 연구는 유동특성에 관한 연구에 비해 매우 적다.

회전 교반기 유동에 대한 농도장 측정은 최근에 와서 소수의 연구자에 의해 시도되고 있다. Houcine et al.<sup>(2)</sup>은 PLIF기법을 이용하여 연속적인 교반기에 대해 농도장 측정을 시도하고 혼합효율이 임펠러의 종류에 따라 달라짐을 보였다. Distelhoff and Marquis<sup>(3)</sup>는 역시 연속적으로 운전되는 교반기의 농도장을 LIF line scan system으로 측정하였다. 벌크유동장 및 임펠러 유동장에 대해 평균농도 분포 및 농도의 난류성분에 대한 rms 값의 분포를 보였으나, 전체유동장의 순간적인 난류분포는 구하지 못하였다. Guillard et al.<sup>(4)</sup>은 PLIF기법을 이용하여 batch형의 교반탱크에서 순간적인 농도장을 구하였다. 이들은 형광물질을 벌크유동장 및 임펠러 유동장에 주입하고 얻어진 순간 농도장들을 통계처리하여 거시적인 농도장 구조를 제시하였다.

본 연구에서는 PLIF기법을 사용하여 생화학공정에 많이 사용되는 batch형 Rushton turbine mixer의 혼합과정으로 야기되는 복잡한 난류 유동장에서의 농도장 변화를 규명하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 교반혼합기의 제원 및 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다. 임펠러는 공칭 직경(D)이 51 mm인 six-bladed symmetric Rushton turbine을 사용하였다. 혼합탱크의 내부직경(T)은

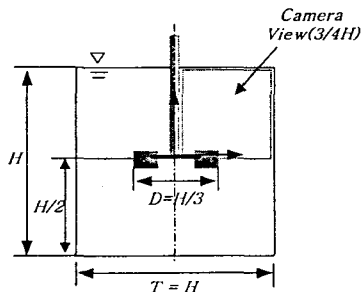


Fig. 1 Dimensional relationships between blade diameter, filled tank depth, turbine clearance and tank diameter

153 mm (=3D)이며, 수면의 높이(H)는 용기직경과 같도록 하였다. 터빈 블레이드의 수직중심과 탱크 바닥과의 거리(clearance, C)는 1/2H로 고정시켰다. 임펠러의 회전속도는 100 rpm,  $V_{tip} = 266$  mm/s로 일정하게 유지하였다. 염료의 주입은 유동에 교란을 주지 않는 1 mm 직경의 주사바늘을 원통벽면에 부착하여 주입하였고, 높이는 바닥으로부터 3/4H에 위치시켰다. 형광염료의 주입은 일정한 주입속도를 유지해야 하므로 주사기펌프(Harvard PHD 2000)를 사용하였고, 24초 동안 10 cc/min ( $V_{jet} = 0.212$  m/s)의 유량으로 총 4 cc를 주입하였다.

염료 주입이 시작됨과 동시에 1초 간격으로 36장의 영상을 획득하였다. 염료의 주입이 끝나는 시점이 24초이므로, 초기 24초 동안은 염료 주입 과정에서 얻은 영상이고, 이후 12초 동안은 염료의 주입이 끝나고 염료가 혼합되는 과정의 영상이다. 농도장의 측정은 매우 약한 형광의 강도를 측정해야 하므로 빛에 매우 민감한 cooled CCD 카메라(Apogee KX85)를 이용였고, 실험장치 전체는 간이적인 암실 내부에 위치시켜, 레이저에 의해 여기된 형광만 획득하였다.

### 2.2 평면 레이저 형광여기법(PLIF)에 의한 농도 측정 방법

평면 레이저 형광여기법(PLIF)은 난류유동장에서 순간 농도장을 측정함에 있어서 매우 유용한 방법이다. 종래의 기법인 전기전극에 의한 커패시터 프로브에 비해 PLIF 기법은 유동에 교

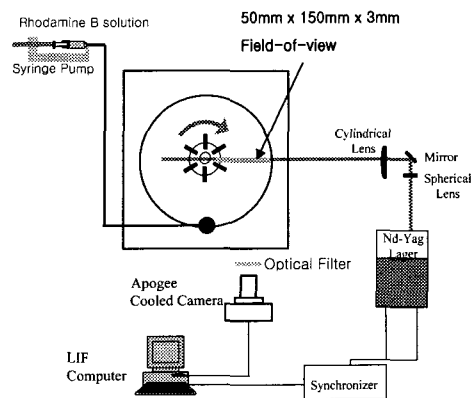


Fig. 2 Experimental setup

란을 주지 않을 뿐 아니라, 순간적으로 평면내부의 정보를 얻을 수 있는 획기적인 방법으로 난류 스칼라 확산 연구에 많은 진전을 가져올 수 있는 새로운 측정기술이다. 이 기술은 어떤 특정한 염료 분자가 빛을 흡수하면 형광을 발산하는 성질을 이용한다. 특히 매우 낮은 농도의 염료 용액인 경우( $10^{-9} \sim 10^{-6}$  mol/l), 형광의 강도  $I_f$ 는 물 농도  $c$ 와 다음 식과 같은 선형관계를 갖는다.

$$I_f = \Phi I_0 \epsilon b c \quad (1)$$

여기서  $\Phi$ 는 양자효율(quantum efficiency) 이고,  $I_0$ 는 입사광의 강도,  $\epsilon$ 는 분자의 흡수율,  $b$ 는 광로 길이(absorption path length)이다. 염료가 방사하는 형광의 파장은 흡수하는 파장 보다 길다. 따라서 형광 염료는 최대흡수 파장이 레이저광의 여기 파장과 가깝게 선택해야 하며, 적절한 필터를 사용하여 방사광만 CCD 카메라에 입사되도록 해야 한다. 형광 강도  $I_f$ 는 농도 측정의 동적 범위(dynamic range) 즉, 신호대 잡음비(signal to noise ratio)가 커지도록 최대한 크게 잡을수록 좋다. 이 경우 입사광이나 농도를 높여주면 되지만, 너무 농도를 높혀 주면, 상당한 양의 빛이 흡수됨으로 인하여 방사광과 농도의 선형성이 깨어지게 된다. 입사광의 강도를 너무 높혀주면 광화학적 분해(photochemical decomposition)가 일어나서 형광 분자가 파괴되고 방사 에너지가 줄어들게 된다. 그리고,  $\Phi$  와  $\epsilon$  은 형광 물질의 물성치이고  $b$  는 농도장 측정 체적과 광학적 배치와 관련된 문제이므로 교정 실험시 상수로 취급될 수 있다.

앞서 논한 기본적인 상황을 모두 고려하여 농도장 측정 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 사용된 광원은 Nd:Yag 레이저(New Wave Research)로서 532 nm의 파장을 가지며, 4 ns 동안 12 mJ의 펄스 레이저를 방출한다. 암실에서 실험이 이루어질 때, 펄스 레이저를 사용하므로써 카메라의 셔터속도와 상관없이 4 ns의 짧은 노출시간을 가지므로, 블레이드 팁(blade tip) 주변의 복합 난류유동에 의한 순간 농도장의 측정이 가능하다

Rhodamine B는 물 속에서 화학적 안전성과 스펙트럼 특성이 매우 우수하기 때문에 본 실험에

서 형광물질로 사용하였다. Nd:Yag레이저에서 방출된 빛은 원통형 렌즈와 구형 렌즈를 통과하면서 측정 영역에 1 mm 두께의 레이저 평면광을 형성하고, 이 평면상의 Rhodamine B에서는 557 nm의 오렌지색 형광 빛을 방출하게 된다. 형광 빛은 Cooled CCD 카메라로 촬영하였고, TSI Laser Pulse Synchronizer를 이용하여 Nd:Yag 펄스 레이저와 카메라를 동기화시켰다. 카메라 앞에는 입사광이나 광학적 잡음을 제거하기 위해 OG-550 (Melles Griot) 칼라 필터를 장착하여 Rhodamine B에 의해 여기 되는 빛( $\lambda_{\max} = 575$  nm)만 받아들일게 하였다.

Cooled CCD는 열전방식(thermoelectric)으로 CCD를 냉각시켜 매우 작은 량의 광자(photon)도 받아들일수 있도록 설계된 카메라로 LIF 실험에 적합한 카메라이다. 또한, 14 bit의 해상도를 가지므로, 충분한 신호대 잡음비를 확보 할 수 있다. 또한, 1300× 1000 픽셀의 화소를 가지는데, 본 실험에서는 공간해상도가 0.157 mm/pixel로 작은 스케일의 난류 구조를 규명하기에 충분한 공간 분해능이다.

### 2.3 교정실험 및 영상 처리

농도를 측정하기 위해서는 먼저, 형광강도와 농도와의 관계를 규명하기 위한 교정실험이 이루어져야한다.  $7.57 \times 10^{-9}$  mol/l의 염료 용해물을 용기에 5 ml씩 단계적으로 주입하고, 각각 20 장의 순간 영상을 획득하였다.

교정 실험 시, 각각의 농도마다 획득한 영상에서 평균배경복사(background emission)를 측정한 평균배경영상( $\overline{I_{BG(i,j)}}$ )를 빼줌으로 수정된 초기 형광강도를 구할 수 있다. 평균배경영상은 20 장의 영상을 획득하여 평균한 영상을 사용하였다.

$$\widehat{I}_{i,j}(t) = I_{i,j}(t) - \overline{I_{BG(i,j)}} \quad (2)$$

Fig. 3 에서와 같이 수정된 형광강도는 농도에 따라 선형적으로 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이런 선형성에 근거하여 수정된 형광강도는 식 (3)과 같이 무차원화 시킬 수 있는데, 무차원화된 수정된 형광강도( $I_{i,j}^*$ )는 무차원화된 농도장( $C_{i,j}^*$ )을 의미한다.

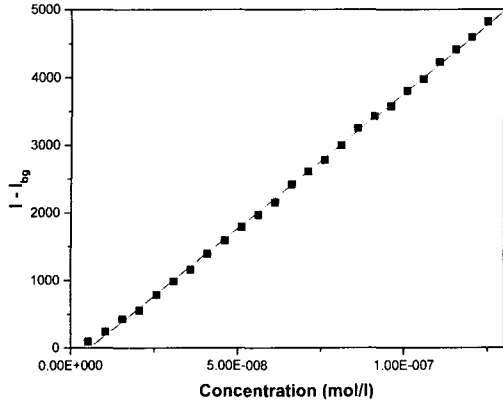


Fig. 4 Calibration curve

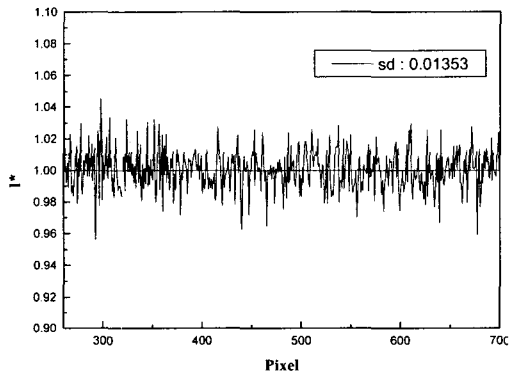


Fig. 5 Signal to noise ratio

$$C_{i,j}^* = I_{i,j}^* = \frac{I_{i,j} - \overline{I_{BG(i,j)}}}{I_{ST(i,j)} - \overline{I_{BG(i,j)}}} \quad (3)$$

여기서,  $\overline{I_{BG(i,j)}}$  는 염료 주입 전의 배경 영상 강도의 평균값이고,  $\overline{I_{ST(i,j)}}$  는 염료 주입 후 정상상태에 도달했을 때의 영상의 평균값이다.

Fig. 4 는 임의의 정상상태 영상  $\widehat{I_{ST}}$  를 무차원화하여  $I_{i,j}^*$  을 구한 후, 일정 높이에서의 형광강도를 나타낸 그림인데, 무차원화된 형광강도  $I_{i,j}^*$  의 값이 거의 1에 해당하고, 표준편차가 1.5 % 미만으로 신호대 잡음비가 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 염료의 주입이 끝나는 시점에서의 순간 농도장을 나타낸다. 벽면에서 주입된 염료가 3/4 바퀴를 회전한 후에 영상획득영역으로 들어

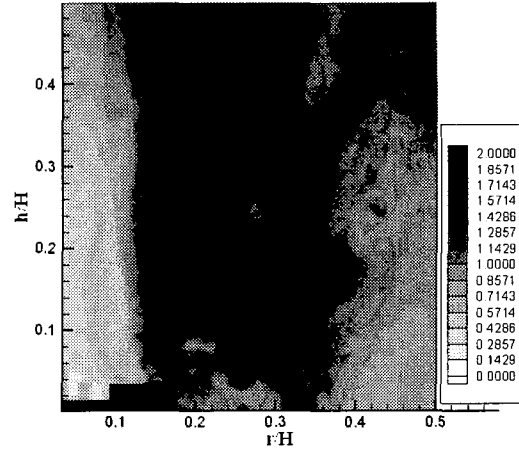


Fig. 5 Instantaneous concentration field (24sec)

오게 되는데, 그 과정에서 거대유동(bulk flow)에 의해 충분히 혼합된다. Mixer 내에서의 혼합과정은 매우 복잡한 유동에 의해 진행된다. Fig. 5에서와 같이 순간 농도장을 통해서도 그 경향을 파악하기 어렵기 때문에 100 장의 영상을 통해 앙상블 데이터를 획득하여 아래와 같이 통계처리하였다.

각각의 시간대별로 식 (4)를 통해 앙상블 평균 농도장을 구하였고, 식 (5)를 사용하여 분산장을 구하였다.

$$\langle C^*(x) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N C^*(x, t)_i \quad (4)$$

$$\langle C^2(x) \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (C^*(x, t) - \langle C^*(x) \rangle)_i^2 \quad (5)$$

### 3. 실험 결과

#### 3.1 시간에 따른 농도 변화

Fig. 6은 앙상블 평균한 무차원 농도장을 시간별로 각각 전체 면적에 대해 평균한 그래프이다. 염료의 주입 전에는  $C^*$ 는 0이 되어야 하고, 혼합이 완료된 후에는 1이 되어야 한다. Batch형 교반 혼합기의 혼합과정은 4 개의 구간으로 나눌 수 있다. 형광염료의 주입이 시작되는 구간 I (0초 ~ 5초)은 비정상상태 구간으로 영상획득영역이 염

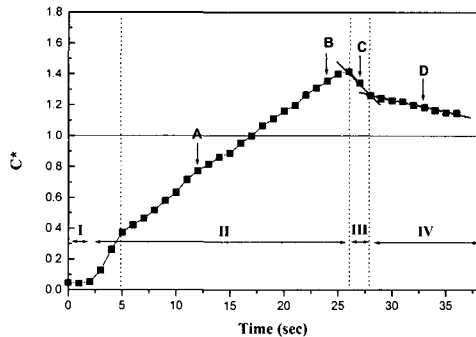


Fig. 7 Area average of ensembled concentration fields

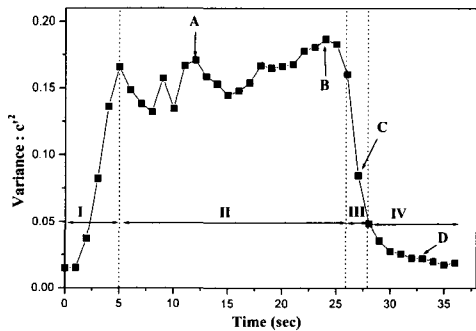


Fig. 7 Area average of concentration variance

료의 주입위치로부터 3/4 회전 하류에 있기 때문에 선형성이 시간적으로 지연되는 구간이다. 주입이 끝나는 시점인 24초(B지점) 후에도 약 2초 동안 농도가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것도 같은 이유 때문이다. 구간 II (5초~26초)에서는 염료의 주입량이 일정하기 때문에 면적 평균 농도가 선형적으로 증가하게 된다. 구간 III (26초~28초)과 구간 IV (28초~)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 일어나고, 그 후 small scale mixing으로, 전체적으로 농도가 균일해 질 때까지 서서히 혼합되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 분산장을 전체 면적에 대해 평균한 그래프이다. 분산장의 특성도 평균 농도장과 같이 4개의 구간으로 나뉜다. 구간 I에서 염료가 주입되기 시작하면서 분산값이 증가한 후, 평균 농도

장의 면적 평균 그래프(Fig. 6)에서는 선형적으로 증가하는 구간에 해당하는 구간 II에서는 거의 일정한 값으로 유지된다. 이는 염료의 주입량이 일정하게 유지될 때, 난류에 의한 혼합 메커니즘 또한 일정하다는 것을 나타낸다. 염료의 주입이 끝나는 시점(B)에서 2 초간의 지연이 있는 후, 더 이상의 염료의 유입이 없는 구간 III에서는 분산값이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 평균 농도장의 그래프에서도 농도값이 감소하는데, 주입된 염료가 영상 측정영역의 아래영역에서 혼합이 일어나기 때문이다.

Small scale mixing 과정에 해당하는 구간 IV에서 낮은 분산값이 서서히 감소하여 결국 정상 상태의 값에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

교반 혼합기내의 임펠러에 의해 야기되는 유동 형태가 일정하게 유지되더라도, 염료의 유입에 의한 scalar mixing은 유동특성과는 다른 특성으로 일어난다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 혼합과정의 공간적 구조

Fig. 8은 공간적인 농도장 구조를 나타낸다. 전체 측정 구간 중 A(12초), B(24초), C(27초), D(33초) 시간대의 농도장을 선택하여 구간별 대표적인 평균 농도장 결과를 Fig. 8의 (a),(b),(c),(d)에 나타내었다.

용기의 벽면에서 주입된 염료가 3/4 회전을 하면서 거대유동(bulk flow)을 통해 영상의 가운데 부분으로 유입되면서 난류 혼합이 일어난다. 염료가 일정하게 주입되는 구간인 II 구간에 해당되는 Fig. 8(a),(b)에서는 등 농도선도의 형태가 거의 일정하면서 농도값만 증가된 것을 확인할 수 있다.

Large scale mixing 구간에 해당하는 구간 III으로 진행되면서 Fig. 8(c)에서 보는 바와 같이, 이전(Fig. 8(a),(b))과는 달리 중앙부분의 짙은 농도의 구조가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 염료 주입이 더 이상 없으므로, scalar 혼합에 의해 중앙부의 짙은 농도부분부터 혼합이 이루어져 농도가 열어지기 때문이다. 구간 III (2초) 동안 Fig. 8(c)와 급격하게 혼합이 이루어져서, 회전축 근처와 영상의 하부인 블레이드 팁 오른쪽 부분에서만 농도차이가 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(d)는 small scale mixing 구간으로 진행되는데, 대부분의 혼합구조가 없어지고, 축근처에서만 약

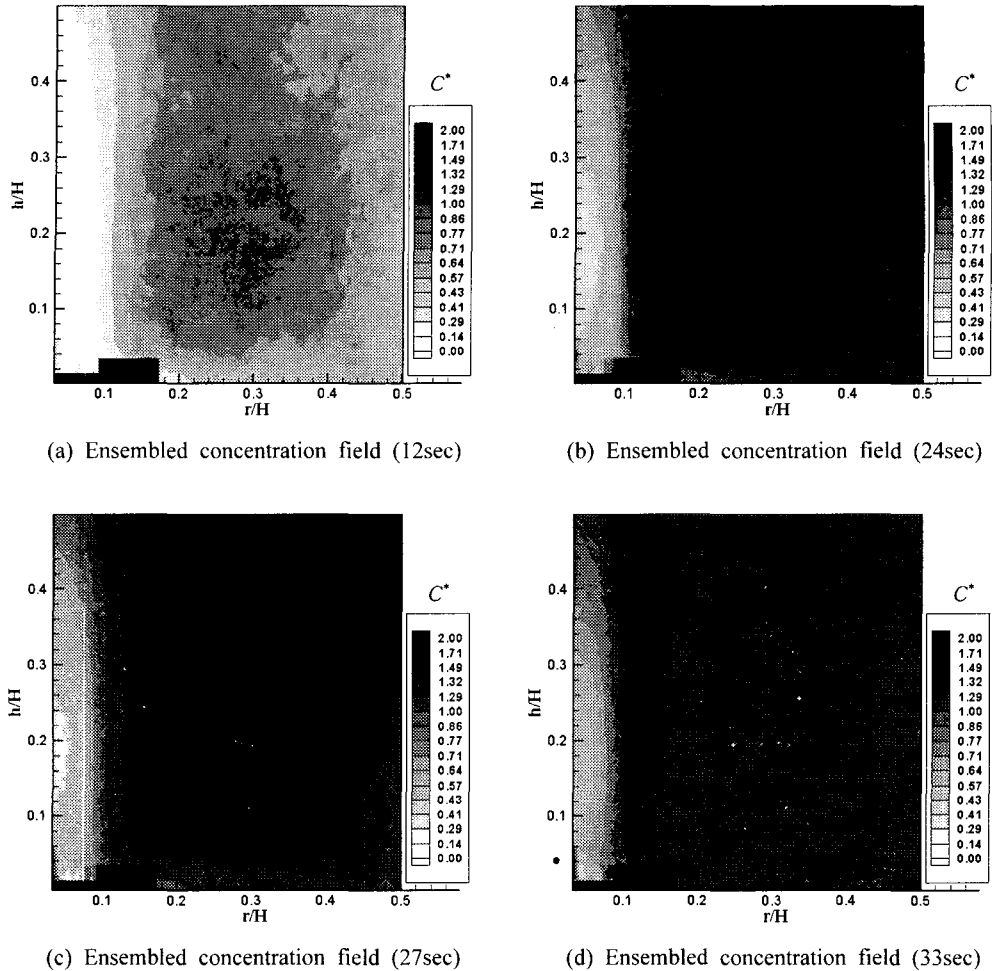


Fig. 8 Ensembled concentration fields

간의 농도차이가 있다. Fig. 8의 4 장의 농도장 모두 축근처에서는 농도가 낮게 나타난다.

Fig. 9은 순간 농도장으로부터 얻은 순간 분산 영상을 시간대 별로 앙상블 평균한 분산장을 나타낸다. Fig. 9의 (a),(b),(c),(d)의 분산장은 Fig. 8의 4장의 평균 농도장과 일치하는 시간이다.

Fig. 9(a),(b)에서 분산장은 아주 복잡한 모양을 보여주고 있는데, 이것은 소산 과정이 공간적으로 아주 작은 scale에서 일어나기 때문이다. 또한, 염료가 일정하게 주입되는 구간에서 평균 농도장의 경우 Fig. 8(b)의 농도값이 Fig. 8(a)에 비해 두 배정도로 크며 비슷한 구조를 나타내지만, 분산장은 시간에 상관없이 거의 일정하다는 것을 알

수 있는데, 이는 입력이 일정할 때 난류 혼합 메카니즘 일정하다는 것을 나타낸다.

Fig. 9(c)는 염료의 주입이 없는 large scale mixing 구간인데, Fig. 9(a),(b)와 비교하여 분산값이 높은 부분이 가장자리 부분에서부터 없어져서 분산장 구조가 달라지지만, 여전히 활발한 난류 혼합이 일어나고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9(d)는 small scale mixing 구간의 분산장이다. large scale mixing 과정에서 대부분의 난류혼합이 이루어지므로 높은 분산 값들은 급격하게 사라지고, 전체적으로 아주 낮은 분산값을 나타낸다. 단지 축 근처에서 분산값이 조금 크다는 것을 알 수 있다.

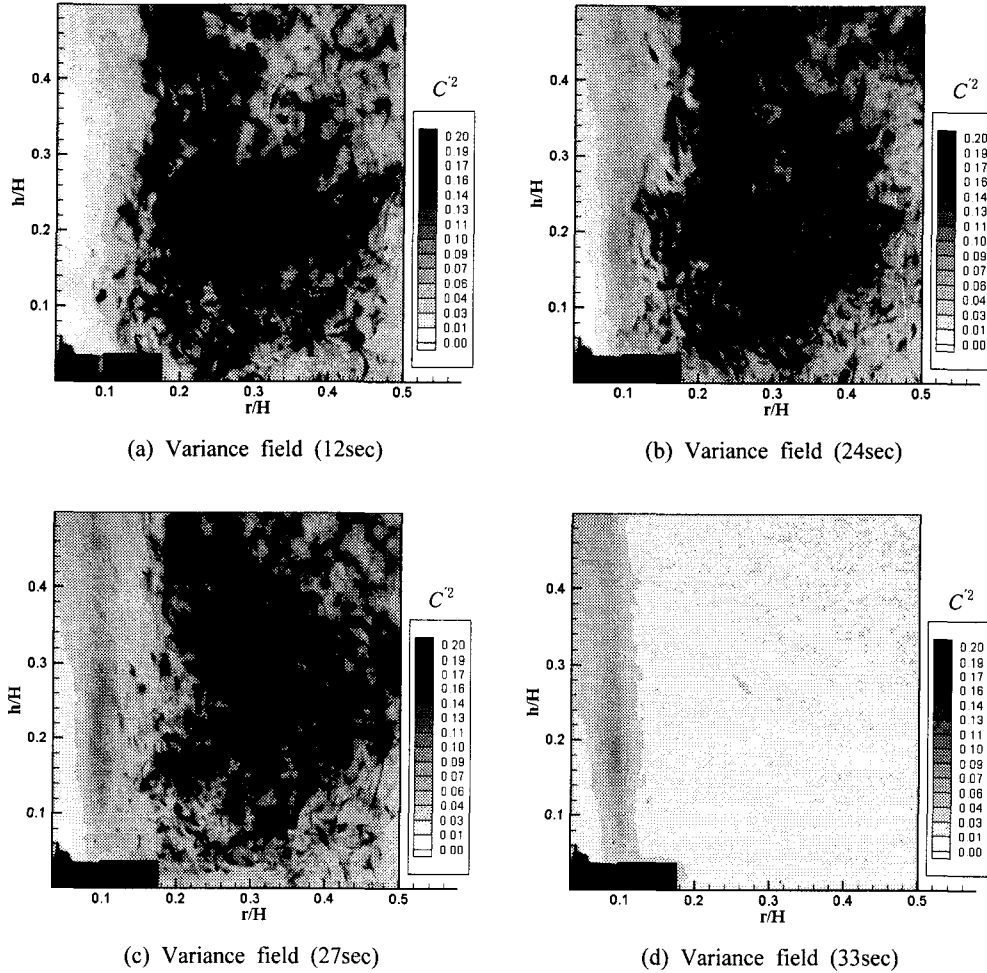


Fig. 9 Variance fields

### 3.3 혼합이 매우 더디게 진행되는 영역(Inactive Region)

본 실험을 통해 발견한 새로운 사실로는 회전 교반기 유동에 혼합이 매우 느리게 진행되는 혼합이 매우 더디게 진행되는 영역(inactive region) 영역이 존재한다는 사실이다. Fig. 5의 순간 농도장에서도 관찰할 수 있듯이 임펠러 수직상부로부터 회전축을 둘러싼 영역에는 염료가 침투하지 못하고 계속 낮은 농도를 유지하고 있는 영역이 보인다. 앙상블 평균한 농도장에서도 측정시간이 끝나도록 회전축 주위에 저농도 영역은 존재하고 있으며, 최종 측정시기(Fig. 8(d))에서도 반경방향으로 농도구배가 존재하면서 저농도 영역을 유지

하고 있다. 앙상블 평균한 농도분산 그림에서도 inactive region의 경계인 농도구배 부분에서 뚜렷한 분산의 피크 영역이 존재하며, 농도의 확산은 분자의 확산 메카니즘으로 진행되고 있다는 사실을 알 수 있다. 이를 확인하기 위해 임펠러 축부근의 inactive region에 염료를 주입한 후 혼합과정을 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10의 (a),(b)는 각각 주입 시작 후 27초, 33초에서의 순간 농도장을 나타낸다. Inactive region에 주입된 염료는 고농도로 내부에 고립되어 있다. 이처럼 inactive region이 존재하는 이유는 벌크 유동장측정 결과에서도 알 수 있듯이 임펠러의 회전으로 인한 deadwater zone이 마치 wake처럼 회전축에

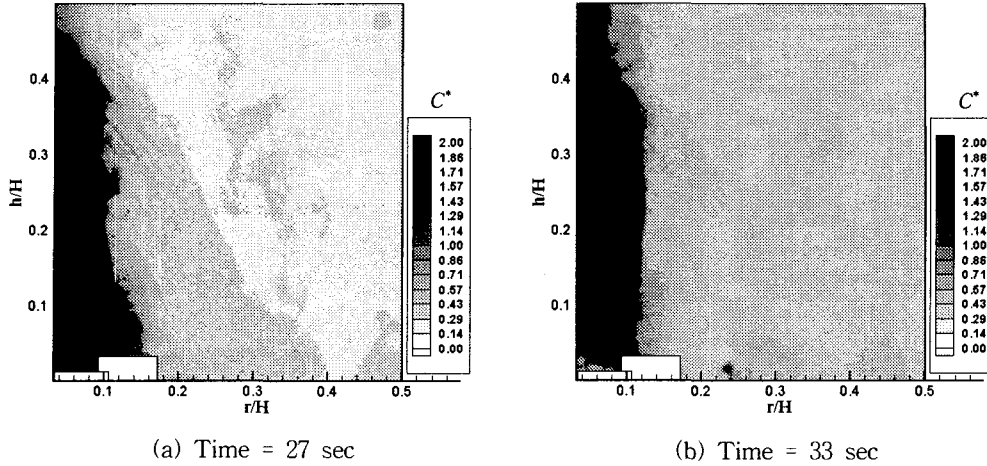


Fig. 10 Inactive region

부착되어 있고, 반지형 와(ring vortex)의 유동장과는 분리유선이 형성되어 있다.<sup>(1)</sup> 일반적으로 스칼라 혼합과정에서 분리유선을 따라 밀도구배의 최대치가 나타나는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서, Rushton 혼합기의 혼합효율을 높여주기 위해서는 baffle 등을 설치하여 inactive region을 제거해주는 것이 바람직하다고 사료된다.

#### 4. 결론

이상과 같이 Rushton turbine을 이용한 회전 교반기 내부에서의 혼합과정은 매우 복잡한 유동에 의해 진행되는데, 크게 두 가지 mixing scale이 존재한다는 것을 확인할 수 있었다. Large scale mixing을 통해 짧은 시간동안 진행된다. 이 과정에서 거대유동(bulk flow)을 통해 대부분의 혼합과정이 진행된다. Large scale mixing이 일어나는 동안에도 small scale mixing은 계속 진행되며, large scale mixing이 끝난 후에 전체 농도가 균일해질 때까지 지속적으로 혼합이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 회전축 근처의 임펠러 상부에는 박리된 회전유동의 존재로 인하여 혼합이 매우 더디게 진행되는 비활성 영역(inactive region)이 존재함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2001-1-30400-004-2) 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- (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) Houcine, I., Vivier, H., Plasari, E. and David, R., 1996, "Villermaux J Planar Laser Induced Fluorescence Technique for Measurements of Concentration Fields in Continuous Stirred Reactors," *Exp Fluids* 22, pp. 96~102.
- (3) 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* 25, pp. 77~88.
- (4) Guillard, F., Tragardh, C. and Fuchs, L., 2000, "A Study of Turbulent Mixing in a Turbine-Agitated Tank Using a Fluorescence Technique," *Exp. Fluids* 28, pp. 225~235.