

레이저 형광여기법(LIF)를 이용한 복잡난류유동장의 혼합특성에 관한 연구

김 경 천* · 정 은 호**

A Study on the Mixing Characteristics in Complex Turbulent Flow by a Laser Induced Fluorescence Method

Kyung Chun Kim and Eun Ho Jeong

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

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 are 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 can 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 in each region after the dye infusion reflects the large scale mixing while the followed slow decay reveals the small scale mixing. The temporal change of concentration probability functions conjectures the two sequential processes in the batch type mixing. An inactive column of water existed above the impeller disk, in which the fluid rotates with the shaft but is isolated from the mean bulk flow.

1. 서론

기호설명

- D : 용기 직경
- C^* : 무차원화된 농도장
- $\langle C^2(\underline{x}) \rangle$: 농도장의 분산
- I_{BC} : 혼합 전 배경 이미지 강도
- I_{ST} : 혼합 후 정상상태 이미지 강도

최근 생명공학관련산업이 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⁽¹⁾, 이러한 성과는 보다 효율적인 교반기의 설계에 적용되고 있다. 그러나, 이러한 난류혼합과정에서 수동적인 스칼라량(passive scalars)이 어떠

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 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(1996)⁽²⁾은 PLIF기법을 이용하여 연속적인 교반기 반응기에 대해 농도장 측정을 시도하고 혼합효율이 임펠러의 종류에 따라 달라짐을 보였다. Distelhoff and Marquis(1998)⁽³⁾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.(2000)⁽⁴⁾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 복잡 난류 유동장에서의 농도장의 변화를 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 교반혼합기의 제원 및 좌표계를 Fig. 1 에 나타내었다. 임펠러는 공칭 직

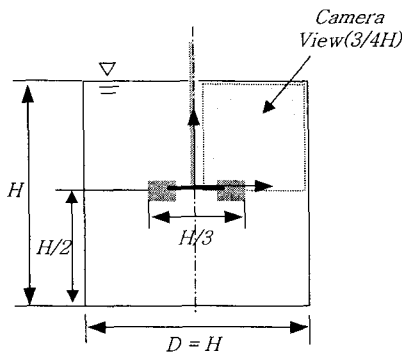


Fig. 1 Dimensional relationships between blade diameter, filled tank depth, turbine clearance and tank diameter

경(D)이 51mm인 six-bladed symmetric Rushton turbine을 사용하였다. 혼합탱크의 내부직경(T)은 153mm(=3D)이며 수면의 높이(H)는 용기직경과 같도록 하였다. 터빈 블레이드의 수직중심과 탱크 바닥과의 거리(clearance, C)는 T/2로 고정시켰다. 모든 실험조건에 대해 임펠러의 회전속도는 100rpm, $V_{tip}=266\text{mm/s}$ 으로 일정하게 유지하였다. 형광염료의 주입은 일정한 주입속도를 유지해야 하므로 syringe pump를 사용하였고, 24초 동안 10cc/min 의 유량으로 총 4cc를 주입하였다. 염료의 주입구는 유동에 교란을 주지 않는 직경의 주사바늘을 원통벽면에 부착하였다. 주입위치는 3/4H에서 1초 간격으로 36장의 이미지를 획득하였는데, 100번의 앙상블 실험을 수행하여 얻은 순간 농도장들을 통계처리 하였다. 염료의 주입을 시작하면서 24초 동안 이미지를 얻고 염료 주입이 끝나는 시점부터 12초 동안 염료가 섞이는 과정의 이미지를 얻었다. 농도장의 측정은 형광의 강도를 측정해야 하므로 주변의 빛에 매우 민감한 cooled CCD 카메라를 이용한다. 그래서, 실험장치 전체는 간이적인 암실 내부에 위치시켜 주변의 교란을 방지한다.

2.2 PLIF에 의한 농도측정 방법

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

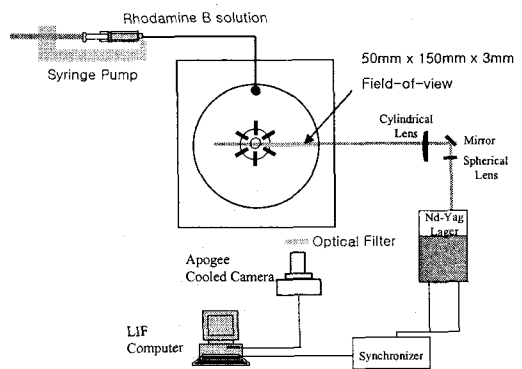


Fig. 2 Experimental set-up

을 주지 않을 뿐 아니라, 순간적으로 평면의 정보를 얻을 수 있는 획기적인 방법으로 난류 스칼라 확산 연구에 획기적인 진전을 가져올 수 있는 새로운 측정기술이다. 이 기술은 어떤 특정한 염료 분자가 빛을 흡수 하면 형광을 발산하는 성질을 이용한다. 특히 매우 낮은 농도의 염료 용액인 경우($10^{-9} \sim 10^{-6}$ mol/l), 형광의 강도 I_f 는 몰 농도 c 와 다음식과 같은 선형 관계를 갖는다.

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

여기서 Φ 는 quantum efficiency 이고, I_0 는 입사광의 강도, ϵ 는 분자의 흡수율, b 는 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 dynamic range 즉, signal to noise ratio 가 커지도록 최대한 크게 잡을수록 좋다. 이 경우 입사광이나 농도를 높혀주면 되지만, 너무 농도를 높혀 주었을 때, 상당한 양의 빛이 흡수됨으로 인하여 방사광과 농도의 선형성이 깨어지게 된다. 입사광 역시 너무 높혀주면 광화학적 분해(photochemical decomposition)이 일어나서 형광 분자가 파괴되고 방사 에너지가 줄어들게 된다. 그리고 Φ 와 ϵ 은 형광 물질의 물성이고 b 는 농도장 측정 체적과 광학적 배치와 관련된 문제이므로 교정 실험시 상수로 취급될 수 있다.

앞서 논한 기본적인 상황을 모두 고려하여 농도장 측정 시스템은 Fig. 2와 같이 구성하였다. 사용된 레이저는 Nd:Yag 레이저로서 532 nm의 파장을 가지며, 4 nsec 동안 12 mJ의 펄스 레이저를 방출한다. Rhodamine B는 물 속에서 화학적 안전성과 스펙트럼 특성이 매우 우수하기 때문에 본 실험에서 형광물질로 사용하였다. Rhodamine B에서 나온 형광 빛은 Cooled CCD 카메라(KX-85)로 촬영하였다. 카메라 앞에는 입사광이나 광학적 잡음을 제거하기 위해 OG-550 (Melles Griot) 칼라 필터를 장착하였다. Cooled CCD는 thermoelectric 방식으로 CCD를 냉각시켜 매우 작

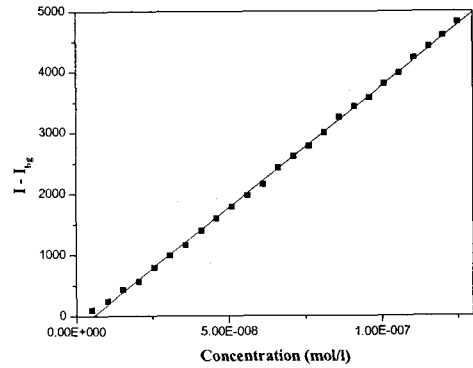


Fig. 3 Calibration Curve

은 량의 photon도 받아들일 수 있도록 설계된 카메라로 LIF 실험에 적합한 카메라이다. KX-85 Cooled CCD 카메라는 14bit의 해상도를 가지고 있으며, 1300×1000 픽셀의 화소를 가지므로 충분한 신호대 잡음비를 확보 할 수 있으며, 작은 스케일의 난류 구조를 규명하기에 충분한 공간 분해능이다.

교정 실험 시 평균배경복사(background emission), $\overline{I_{BG(i,j)}}$ 를 측정하여 각각의 단계에서 배경복사를 빼줌으로 수정된 형광강도를 구할 수 있다.

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

Fig. 3에서와 같이 수정된 형광강도가 농도에 따라 선형적으로 변한다는 것을 확인할 수 있다. 그래서, 순간 농도장은 아래와 같이 무차원화 시킬 수 있다.

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

여기서, I_{back} 는 염료 주입 전의 배경이미지의 평균값이고, I_{steady} 는 염료 주입 후 정상상태에 도달했을 때의 이미지의 평균값이다.

3. 실험 결과

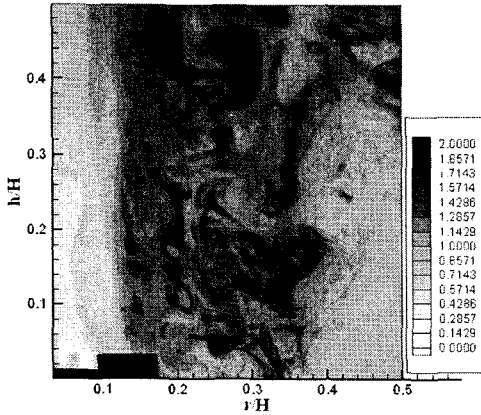


Fig. 4 Instantaneous Concentration Field (24sec)

Fig. 4는 염료의 주입이 끝나는 시점에서의 순간 농도장을 나타낸다. 벽면에서 주입된 염료가 3/4바퀴를 회전한 후에 camera view로 들어오게 되는데, 그 과정에서 거대유동(bulk flow)에 의해 충분히 혼합된다. mixer 내에서의 혼합과정은 매우 복잡한 유동에 의해 진행된다. Fig. 4 에서와 같이 순간 농도장을 통해서도 그 경향을 파악하기 어렵기 때문에 양상불 실험을 수행하여 아래와 같은 식으로 통계처리 하였다.

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

Fig. 5는 양상불 된 이미지를 시간 별로 각각 면적 평균한 그래프이다. 형광염료의 주입이 시작되는 구간 I (0초~2초)은 비정상상태 구간으로 camera view가 염료의 주입위치로부터 3/4회전 후 류영역에 있기 때문에 시간적으로 지연되는 구간이다. 주입이 끝나는 시점인 24초(B지점) 후에도 약 2초동안 농도가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것도 같은 이유 때문이다. 구간 II (2초~26초)에서는 염료의 주입량이 일정하기 때문에 면적 평균한 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,

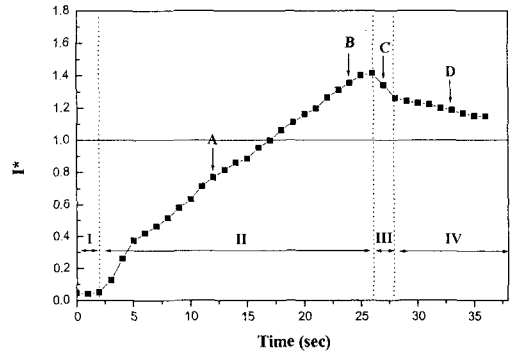


Fig. 5 Area Average of Ensembled Concentration Field

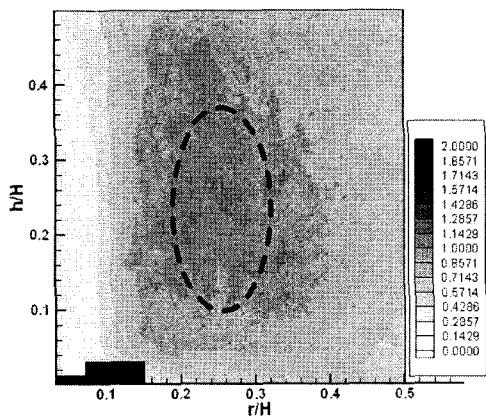
그 후 small scale mixing으로, 전체적으로 농도가 균일해 질 때까지 서서히 혼합되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 구간별로 공간적인 농도장 구조를 각각 나타낸다. 용기의 벽면에서 주입된 염료가 3/4회전을 하면서 거대유동(bulk flow)을 통해 image의 가운데 부분으로 유입되면서 혼합이 일어나게 된다(Fig. 6-(a), Fig. 6-(b)). 구간 III의 large scale mixing 부분에 해당하는 Fig. 6-(c)에서는 대부분의 혼합과정이 진행되면서, 회전축 근처와 팁 중심축 근처에서만 농도차이가 있는 것을 확인할 수 있다. small scale mixing의 경우, 축근처에서만 약간의 농도차이가 있다. Fig. 5의 4장의 농도장 모두 축근처에서는 농도가 낮게 나타난다.

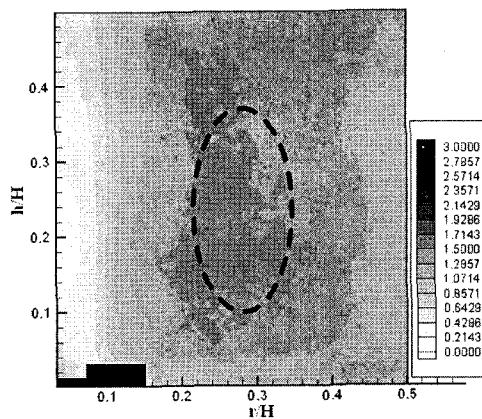
두가지 mixing scale은 농도장의 분산(C^2) 이미지를 통해 확인할 수 있다. 여러장의 순간 농도장으로부터 다음의 식을 통해 분산을 구할 수 있다.

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

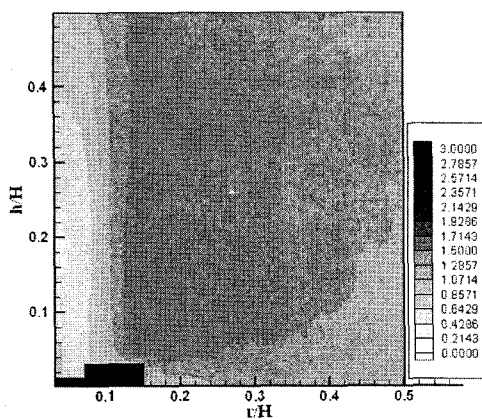
Fig. 7은 순간 농도장으로부터 얻은 순간 분산 이미지를 시간대 별로 양상불 평균하여 분산 이미지를 나타낸다. Fig. 7의 (a), (b)는 Fig. 6의 (c), (d)와 일치하는 시간이므로 평균 농도장과 분산 이미지를 비교해 볼 수 있다. Fig. 7-(a)인 27초(C지점)에서는 large scale mixing 과정에 있기 때문에



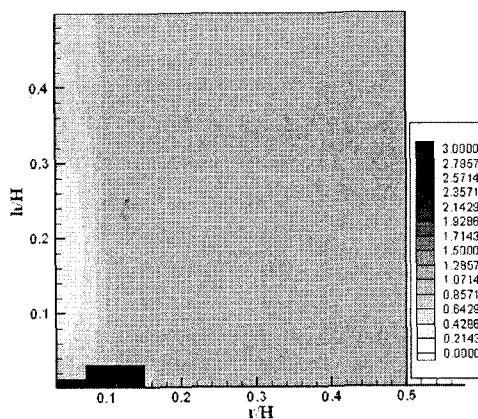
(a) Ensembled Concentration Field (12sec)



(b) Ensembled Concentration Field (24sec)

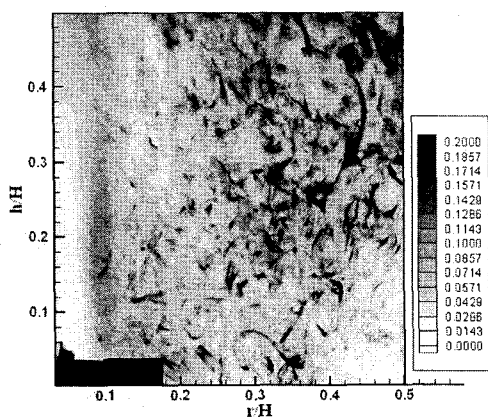


(c) Ensembled Concentration Field (27sec)

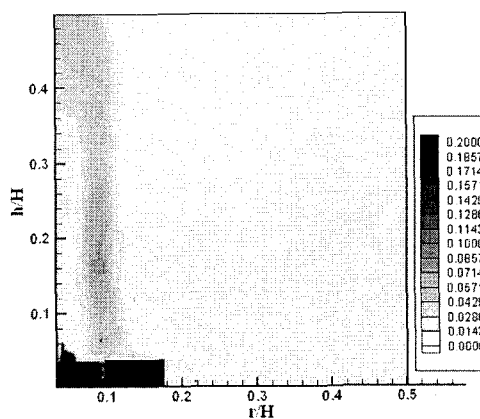


(d) Ensembled Concentration Field (33sec)

Fig. 6 Ensembled concentration field



(a) Ensembled Variance Field (27sec)



(b) Ensembled Variance Field (33sec)

Fig. 7 Ensembled variance field

전체적으로 높은 분산값들을 나타낸다. 같은 시간에서 평균 농도장은 어느 정도 균일해 보이지만, 분산은 아주 복잡한 모양을 형성하고 있다. 이는 소산 과정은 공간적으로 아주 작은 scale에서 일어나기 때문이다. Fig. 7-(b)인 33초(D지점)에서는 large scale mixing과정의 높은 분산 값들은 대부분 사라지고, 축 근처에서 small scale mixing만 일어나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7-(a)의 large scale mixing 이 나타나는 구간에서도 Fig. 7-(b)의 small scale mixing이 축 근처에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것을 통해 염료 주입이 끝나는 시점부터 두가지 mixing scale이 동시에 존재하게 하며, 짧은 시간동안 large scale mixing이 일어나는 과정에서도 small scale mixing은 계속 진행되고 있다는 것을 확인할 수 있다. 본 실험을 통해 발견한 새로운 사실로는 회전교반기 유동에 혼합이 매우 느리게 진행되는 Inactive 영역이 존재한다는 사실이다. Fig. 4의 순간 농도장에서도 관찰할 수 있듯이 임펠러 수직 상부로부터 회전축을 둘러싼 영역에는 염료가 침투하지 못하고 계속 낮은 농도를 유지하고 있는 영역이 보인다. 이상불 평형한 농도장에서도 측정시간이 끝나도록 저농도 영역은 존재하고 있으며, 최종 측정시기(Fig. 6-(d))에서도 반경방향의 농도구배가 존재하면서 저농도 영역을 유지하고 있다. 이상불 평균한 농도분산 그림에서도 Inactive 영역의 경계인 농도구배 부분에서 뚜렷한 분산의 피크 영역이 존재하며, 농도의 확산은 분자의 확산 매카니즘으로 진행되고 있다는 사실을 알 수 있다. 이처럼 Inactive 영역이 존재하는 이유는 벌크 유동장측정⁽¹⁾ 결과에서도 알 수 있듯이 임펠러의 회전으로 인한 deadwater zone이 마치 wake처럼 회전축에 부착되어 있고 반지형 외의 유동장과는 분리유선이 형성되어 있다. 일반적으로 스칼라 혼합과정에서 분리유선을 따라 밀도구배의 피크가 나타나는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서, Rushton 혼합기의 혼합효율을 높혀주기 위해서는 baffle 등을 설치하여 Inactive 영역을 제거해주는 것이 바람직하다고 사료된다.

4. 결론

이상과 같이 Rushton turbine을 이용한 회전 교반기 내부에서 혼합과정은 매우 복잡한 유동에 의해 진행되는데, 크게 두가지 mixing scale이 존재한다는 것을 확인 할 수 있었다. large scale mixing을 통해 짧은 시간동안 진행된다. 이 과정에서 거대유동(bulk flow)을 통해 대부분의 혼합 과정이 진행된다. large scale mixing 이 일어나는 동안에도 small scale mixing 은 계속 진행되며, large scale mixing이 끝난 후에 전체 농도가 균일해 질 때까지 지속적으로 혼합이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 회전축 근처의 임펠러 상부에는 박리된 회전유동의 존재로 인하여 혼합이 매우 더디게 진행되는 영역 (Inactive) 이 존재함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 두뇌한국21 핵심과제의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김상기, 김경천, 2000, "교반혼합기내의 거대 유동에 대한 PIV측정", *대한기계학회 춘계학술대회 초록집 B*, pp.680-685
- (2) Houcine I, Vivier H, Plasari E, 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) M. F. W. Distelhoff, A. J. Marquis, 1998, "An LIF line system for the measurement of scalar concentration in a continuously operated stirred tank", *Exp. Fluids* 25, pp.77-88
- (4) 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