대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 B pp. 680~685 KSME 00S267

교반혼합기 내의 거대유동에 대한 PIV 측정

김 상 기*· 김 경 천**

PIV Measurement of Bulk Flow in a Stirring Mixer

Sang Ki Kim and Kyung Chun Kim

Key Words: Stirring Mixer(교반혼합기), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Bulk Flow (거대유동), Ring Vortex(반지형 와), Blade Clearance(블레이드 위치)

Abstract

Liquid flow in a stirring mixer driven by a six-blade turbine has been investigated experimentally. The flows were quantified by measurements of velocity characteristics, obtained by a Particle Image Velocimetry(PIV), for a blade rotational speed of 100 r.p.m. and for two blade clearances from the bottom of the tank. The instantaneous flow fields show that the bulk flow consists of small scale vortices very complicately. However, the mean flow results show that the formation of ring vortices above and below the blade, which depend on the clearance.

기호설명

D	: 터빈직경
k	: 난류운동에너지
r, θ, z	: 원통형 좌표계
T	: 혼합용기의 직경 및 수위
u_r, u_z	: 반경방향 및 수직방향 평균속도
$\widehat{u_r}$, $\widehat{u_z}$	: 반경방향 및 수직방향 순간속도
$\overline{u_r u_z}$	: 레이놀즈 난류전단응력
V_{tip}	: 블레이드 팁의 속도
ε	: 소산율

1. 서 론

원통형 용기 속에 Rushton 터빈 블레이드의 회전으로 구성되는 교반혼합기는 산업현장에서 흔히 등장하는 시스템이다. 교반혼합기 내의 유동은 아직도 정확하게 규명되지 않고 있는 복잡한 와구조와 함께 강한 3차원적 유동 특성을 가지며, 특히 터빈 블레이드 근처에서는 난류특성이 국소적으로 매우 크게 나타나는 유동이다. 이러한 유동의 복잡성으로 인해 선행연구들은 이론적 접근 보다는 실험적 연구가 그 주류를 이루어 왔다.

많은 선행연구들은 주로 블레이드 근처의 복잡한 와구조의 규명에 그 관심을 가져왔다. Van't Riet과 Smith(1975)[1]는 photographic 유속측정을 이용하여 블레이드 팁(tip)에 발생되는 와류의 구조와 궤적(trajectory)을 분석하였으며, Costes와 Couderc(1988)[2], Stoots와 Calabrese(1995)[3], Rutherford 등(1996)[4]은 레이저 도플러 유속계(LDV)를 이용하여 그 구조를 연구하였다. 또한 유동 내의 소산(dissipation)의 측정은 혼합 메커니즘과 밀접한 관계가 있으므로 매우 중요하다. Cutter(1966)[5], Rao와 Brodkey(1972)[6], Wu와 Patterson(1989)[7] 등은 열필름, 레이저 도플러 유속계 등을 이용하여 소산율(ε)을 측정하였다. 특히 Sharp등(1998)[8]은 입자영상유속계(PIV)를 이용

* 부산대학교 대학원
** 부산대학교 기계공학부

하여 블레이드 근처 유동장에 대한 난류소산율을 측정하였다.

한편, 교반혼합기 내의 거대유동(bulk flow)은 전체유동장의 혼합 형태를 지배한다. 거대유동은 블레이드 팁으로부터 배출되는 반경방향의 제트(jet) 유동이 교반기 상하로 나뉘면서 거대한 반지형 와(ring vortex)를 이루어 형성된다. Yianneskis 등(1987)[9]은 유동가시화 및 레이저 도플러 유속계를 이용하여 혼합기 내의 평균유동, 거대유동 내의 반지형 와의 형성 및 팁으로부터 발생되는 와의 궤적을 측정하였다. 또한 Distelhoff와 Marquis(1998)[10]는 레이저유도형광(LIF) 기법을 이용하여 교반기 내의 농도장을 측정하였다.

본 연구에서는 기존의 한점 측정기법에서 탈피하여 입자영상유속계를 이용하여 혼합교반기 내의 전체 유동장을 측정하고 터빈블레이드의 깊이에 따른 거대유동장의 평균 및 난류유동특성을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 교반혼합기의 제원 및 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다. 터빈 직경(D)은 51mm이며 블레이드는 60° 간격으로 6개이다. 혼합용기의 직경(T)은 153mm(=3 D)이며 수면의 높이는 용기직경과 같도록 하였다.

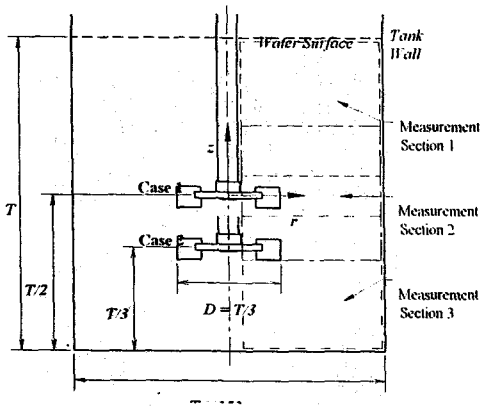


Fig. 1 Dimensional relationships between blade diameter, filled tank depth, turbine clearance, and tank diameter.

터빈 블레이드는 용기의 중심에 수직으로 위치하며 깊이방향의 위치는 실험조건에 따라 Case 1인 경우 바닥으로부터 $T/2$, Case 2의 경우 $T/3$인 지점에 위치한다. 모든 실험조건에 대해 임펠러의 회전속도는 100 r.p.m., V_{tip} = 266 mm/s으로 일정하게 유지시켰다. 이때 블레이드 팁의 측정영역은 블레이드 근처영역과 거대유동에서의 유속 차이가 크기 때문에 상, 중, 하의 세영역으로 분리하여 측정하였다. 이때 각 측정영역의 크기는 68 mm × 68 mm로 동일하다.

Fig. 2는 실험장치의 전체개략도를 나타낸다. 유동 내의 입자들의 조명을 위해 Nd:Yag 펄스 레이저가 사용되었으며, 원통형 렌즈를 통해 평면광으로 유동의 $r-z$ 평면에 조사된다. 이때 펄스 간의 시간간격은 각 측정영역에서의 입자의 out-of-plane을 고려하여 Section 1과 3에 대해 7,000μ s, Section 2는 4,000 μs를 적용하였다. $r-z$ 평면의 2 프레임 입자영상은 INSIGHT NT 프로그램을 통해 1K× 1K CCD 카메라에 획득되어 컴퓨터에 저장된다. 속도검출 알고리즘은 2 프레임 상호상관기법을 이용하였으며 추적구간의 크기는 32 pixel× 32 pixel을 사용하였다. 이것은 1.632 mm의 공간해상도에 해당된다.

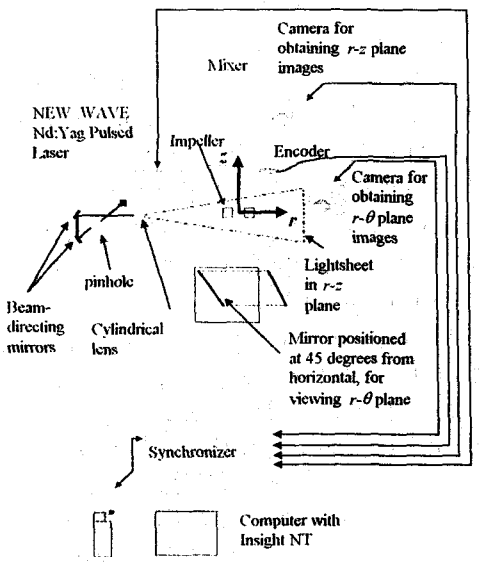


Fig. 2 Experimental set-up.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 3은 Case 1에 대해 각 측정영역에서의 순간속도장을 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 매우 복잡한 소규모와들이 서로 얽혀 거대유동구조를 형성하고 있음을 볼 수 있다. 특히 Section 2에서는 터빈 블레이드의 상하에서 유입된 유체가 반경방향으로 제트형태로 분출되고 있으며 변동이 크게 일어남을 알 수 있다.

교반혼합기 내의 평균유동장을 구하기 위해 600장의 속도장들이 앙상블 평균에 사용되었다. Fig. 4는 Case 1에 대한 평균유동장 및 유선을 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 블레이드 팁으로부터의 제트유동이 반경방향으로 배출되어 유동장의 상, 하부에서 거대한 반지형 와를 형성하고 있다. 두 개의 반지형 와는 터빈 블레이드의 낮은 회전수에 기인하여 상하로 길쭉한 형태를 보이고 있으며, 거의 대칭적인 구조를 보이고 있으나 상부가 하부에 비해 다소 크게 나타나고 있다. 또한 와의 중심도 반경방향은 약 60 mm (0.4 T) 지점에서 거의 동일하나 축방향 위치는 상부는 약 30 mm (0.2 T)인데 반해 하부는 약 23 mm (0.15 T)로 다소 작게 나타나고 있다. 이것은 상부경계면은 수면으로 자유유동면인데 반해 하부경계면으로 벽면이므로 유동이 저항을 받기때문으로 판단된다. 따라서 터빈 블레이드의 상하부에서 유입되는 속도도 상부는 약 5 mm/s (0.02 V_{tip})인데 반해 하부는 약 35 mm/s (0.13 V_{tip})로 크게 나타나고 있으며 이로인해 블레이드 팁에서의 제트유동의 형태도 초기에는 상부로 다소 치우치다가 유동이 발전하면서 다시 수평으로 유지하게 된다. 블레이드에서의 반경방향 최대속도는 약 55 mm/s (0.2 V_{tip})이다.

반면 Case 2인 경우에는 터빈 블레이드가 바닥에 가까워짐으로써 유동장 하부공간이 작아져 반지형 와의 형성 양상이 Case 1과 완전히 다르게 나타난다.(Fig. 5) 그림에서 보는바와 같이 블레이드 팁으로 부터의 제트유동이 하부의 압력이 낮아짐으로 인해 아래로 치우치고 있으며 상하 반지형 와 또한 아래로 치우치면서 Case 1에 비해 동심원의 형태를 띠고 있다.

Fig. 6과 7은 Case 1과 Case 2에 대한 레이놀즈 전단응력($\overline{u_r u_z}$) 및 난류운동에너지(k = 0.5($\widetilde{u_r}^2 + \widetilde{u_z}^2$))의 분포를 나타낸 것으로서, 교반혼합기 내부의 유동 전반에 걸친 혼합형태를 잘 보여준다.

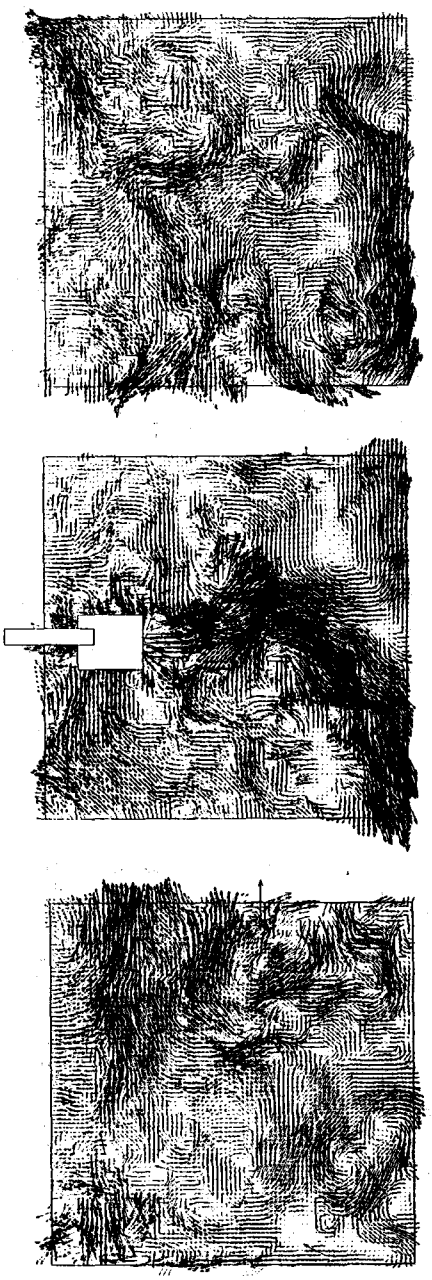


Fig. 3 Typical instantaneous velocity vector fields for Case 2.(upper: section1, middle: section2, lower: section3)

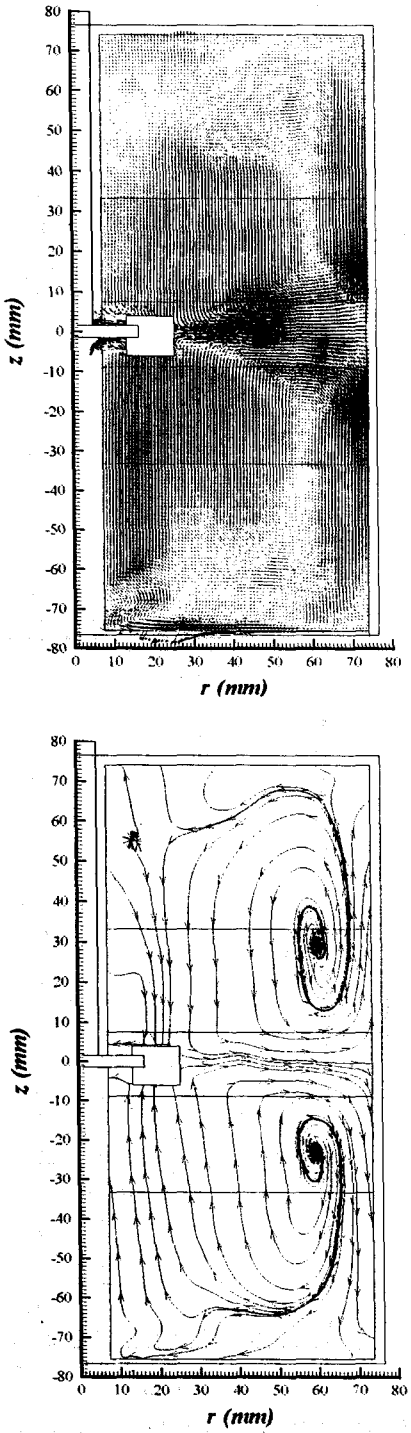


Fig. 4 Ensemble averaged velocity field for Case 1.(upper: vector field, lower: stream line)

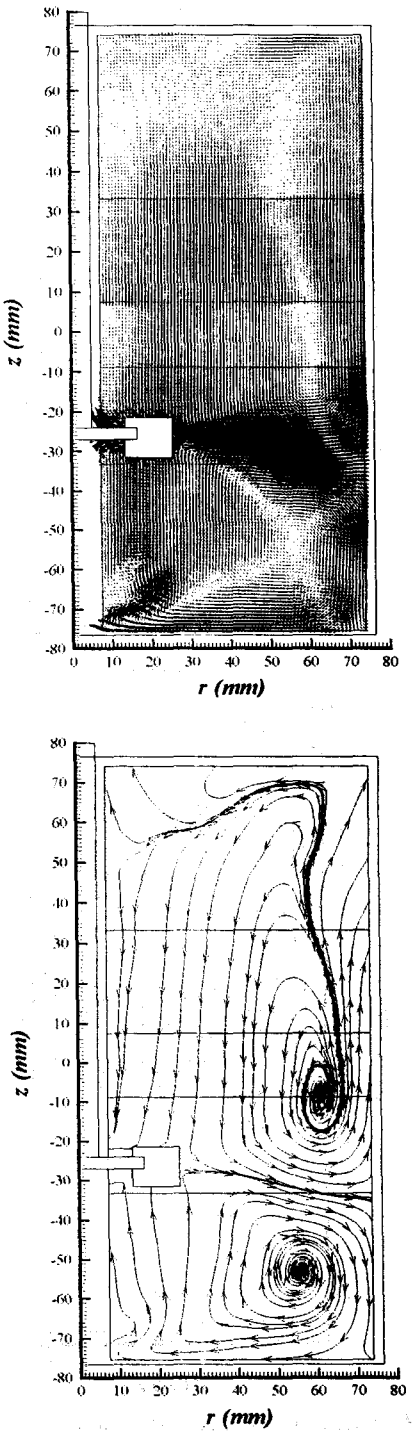
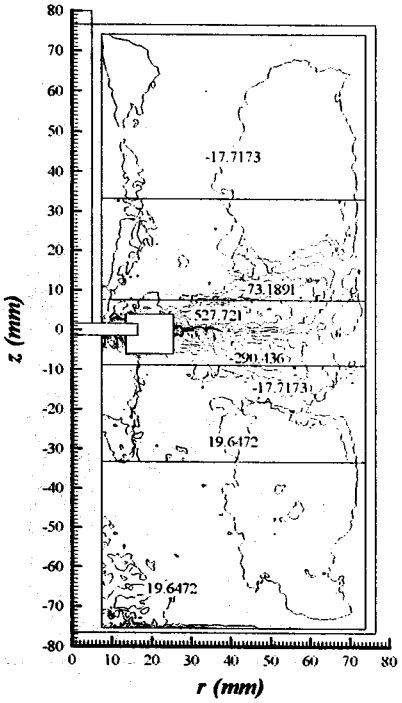


Fig. 5 Ensemble averaged velocity field for Case 2.(upper: vector field, lower: stream line)



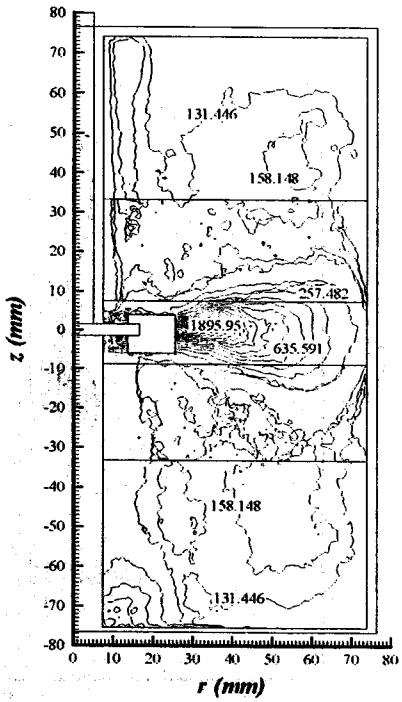
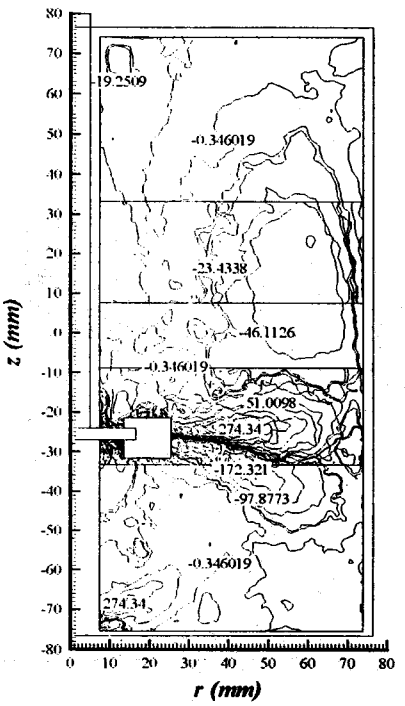


Fig. 6 Ensemble averaged Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy field for Case 1.(upper: $\overline{u_r u_z}$, lower: k)



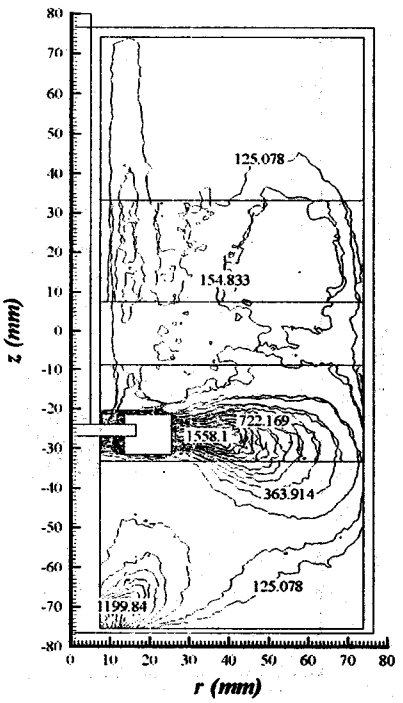


Fig. 7 Ensemble averaged Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy field for Case 2.(upper: $\overline{u_r u_z}$, lower: k)

레이놀즈 난류전단응력의 분포는 블레이드 팁으로부터의 제트유동의 전단층을 뚜렷이 보여주는데, 블레이드 근처의 속도구배가 큰 영역에서 최대값을 보이고 있으며 난류운동에너지의 구배가 큰 반지형 와의 방향으로 대류, 확산되고 있다. 이때 k의 최대값은 Case 1의 경우 약 1,800 m^2/s^2, Case 2의 경우는 약 1,500 m^2/s^2이며, 혼합기 바닥 중심에서도 큰 값을 보이고 있는데 이것은 블레이드의 아랫부분은 축이 없으므로 나선형 유동이 형성되어 블레이드 방향으로 감겨 올라가면서 나타나는 현상이다. Case 1, 2에 대해 이러한 현상은 공통적으로 나타나는데 상부의 수면, 하부의 벽면, 축의 유무에 따른 비대칭성을 잘 나타내 준다. 따라서 수치해석시 경계조건의 설정에 신중을 요하는 부분이다.

4. 결 론

입자영상유속계를 이용하여 교반혼합기 내의 전체 유동장에 대한 순간 및 평균유동장이 측정되었다.

순간유동장으로부터 작은 크기의 와들이 복잡하게 구성되어 거대유동이 형성됨을 알 수 있었다. 거대유동은 터빈 블레이드 팁으로 부터의 제트유동이 혼합기의 벽을 만나 아래, 위로 크게 나뉘면서 두 개의 큰 반지형 와(ring vortex)를 이룬다. 이러한 반지형 와의 형성은 블레이드의 깊이에 따라 매우 다른 양상을 보였다. Case 1의 경우 거대유동은 상·하 거의 대칭적으로 형성되었으며, Case 2의 경우는 제트유동이 아래로 편향되면서 완전히 비대칭적인 구조로 형성되었으며 혼합과정이 아래 영역에 편중되게 나타났다.

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) L. A. Cutter, 1966, "Flow and Turbulence in a Stirred Tank," *AIChE Journal*, Vol. 12, pp. 35-45.

(6) M. A. Rao and R. S. Brodkey, 1972, "Continuous Flow Stirred Tank Turbulence Parameters in the Impeller Stream," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 27, pp. 137-156.

(7) H. Wu and G. K. Patterson, 1989, "Laser-Doppler Measurements of Turbulent-Flow Parameters in a Stirred Mixer," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 44, No. 10, pp. 2207-2221.

(8) K. V. Sharp, K. C. Kim and R. J. Adrian, 1998, "Dissipation estimation around a Rushton turbine using Particle Image Velocimetry," *Proceedings of Ninth International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, pp. 14.1.1-14.1.10.

(9) M. Yianneskis, Z. Popiolek and J. H. Whitelaw, 1987, "An Experimental Study of the Steady and Unsteady Flow Characteristics of Stirred Reactors," *J. Fluid Mech.*, Vol. 175, pp. 537-555.

(10) M. T. W. Distelhoff and A. J. Marquis, 1998, "An LIF Line Scan System for the Measurement of Scalar Concentration in a Continuously Operated Stirred Tank," *Experiments in Fluids*, Vol. 25, pp. 77-88.