

## 임펠러 형상에 따른 교반기의 유동특성에 관한 연구

양창조† · 최민선\* · 이영호\*\*

(원고접수일 : 2003년 6월 10일, 심사완료일 : 2003년 10월 30일)

### A Study on the Flow Characteristics of Mixer by Impeller Types

Chang-Jo Yang† · Min-Seon Choi\* · Young-Ho Lee\*\*

**Key words** : PIV(입자영상유속계), PBT(Pitched Blade Turbine), RT(Rushton Turbine), Sheared Mixing Phenomena(전단혼합현상), Velocity Gradient(속도구배)

#### Abstract

Mixers are used in several industrial applications where it is necessary to strongly mix two reactants in a short period of time (eg. reaction injection molding, ceramics manufacturing, crystallization). However, despite their widespread use, mixing flow characteristics in these systems have not been rigorously investigated. Influence of blade shapes on the mixing time and the power consumption per unit volume in two kinds of impeller including the mixing effects are studied by PIV experiment. A series of the experiments were carried out to achieve a better mixing effect in simple baffle arrangement and tall vessel with modified impellers(two kinds of blades : pitched blade turbine and rushton turbine). Results show that periodic vortex from the mixing layer is predominant and related unsteady flow characteristics prevail over the entire region.

#### 기호설명

D : Impeller Diameter

G : Velocity Gradient

H : Total Liquid Depth

h : Distance above the Vessel Base

N : Agitation Speed(RPM)

P : Power

R : Vessel Radius

Re : Agitation Reynolds Number

t : Times

V : Volume

w : Impeller Blade Width

#### 그리스 문자

$\rho$  : Density

$\mu$  : Dynamic Viscosity

† 책임저자(일본큐슈공업대 정보공학연구과) E-mail : yang@vortex.mse.kyutech.ac.jp), T : 81-948-29-7773

\* 목포해양대학교 기관시스템공학부, E-mail : cwscms@mmu.ac.kr

\*\* 한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail : lyh@pivlab.net

## 1. 서 론

우리 주변에는 유체의 유동현상과 관련한 회전식 기계들이 사용되고 있으며, 이러한 기계들에서 발생하는 여러 가지 현상들이 연구되고 있다. 그 중에서도 교반장치(mixer)는 아직까지 규명되지 않는 복잡한 유동특성을 보이고 있다.

기계적으로 교반장치는 화학공업, 식품공업, 생화학공업, 제지공업, 금속공업, 수처리 및 환경관련공정 등 산업분야에서 널리 사용되고 있고 그 응용분야가 대단히 넓다. 한편 교반장치의 설계는 최근까지 주로 과거의 경험에 의존해 왔으나 컴퓨터 기술의 발달과 실험적인 기법의 유효성에 힘입어 교반기 성능에 대한 해석이 보다 용이해지고 있다. 교반탱크에서 전체를 균일하게 섞고 부유입자가 적절히 접촉하도록 하기 위한 격렬한 혼합을 필요로 하는 교반작용은 메카니즘이 복잡하여 체계적인 연구가 요구되고 있다.

과거의 연구동향을 살펴보면 교반장치의 내부 유동특성을 정량적으로 파악하기 위하여 다양한 계측기법이 제시되어 왔고 여러 종류의 임펠러 모델에 수치해석적 연구<sup>(1)</sup>가 행해져 왔지만 교반 성능에 영향을 미치는 임펠러의 회전속도, 형상 등의 변화에 따른 유동현상에 대한 수치해석적 연구와 실험적 연구<sup>(2)~(4)</sup>가 부족하여 체계적인 비교·검토는 제시되지 못하고 있다.

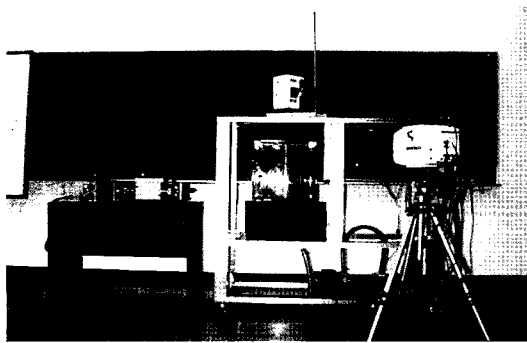


Fig. 1 Experimental apparatus.

이러한 배경으로 본 연구에서는 교반장치의 내부 유동장에 관심을 갖고 그 유동특성을 알아보기

위하여 전형적인 교반장치 내부의 유동장을 대상으로 하여 임펠러의 형상, 회전수, 위치 및 배플(baffle)의 크기 등에 따른 교반장치 내부의 다양한 유체역학적 현상을 PIV계측기법으로 임의의 순간에 동시다점으로 계측하여 제반 순간 및 평균 유동특성을 분석하여 교반기 내부의 유동특성을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

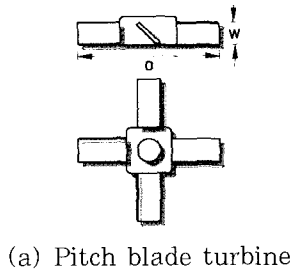
### 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 구성도이다. 가로, 세로, 높이가 각각 400mm, 두께 10mm인 입방체의 형상을 갖는 외통을 투명 아크릴로 제작하여 물을 채우고, 그 안에 직경  $\Phi 300$ mm, 높이 400mm의 크기로 만든 내통을 외통 안에 배치하여 원통형인 내통에서 시트라이트에 의한 만곡 및 구면수차(optical distortion) 등의 광학적 문제를 최소화하였다. 조명으로 300mW 출력의 Argon-Ion 레이저(Ion Laser Technology사)와 원통형렌즈를 사용하였고, 검은색 칼라시트를 부착하여 산란광으로 인한 계측영역(280mm $\times$ 280mm)에 나타날 수 있는 잡음성분을 최소화하였다. 유동장의 기록을 위하여 고속도카메라(Sony사, Rabbit-II), Hi-8mm Camcorder, 모니터, 프린터 등의 관련 시스템을 배치하였다.

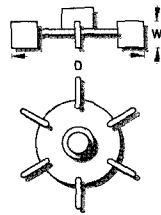
실험 작동유체로는 상온의 수도수를 이용하였으며, 유동장의 유체입자의 거동을 가시화하기 위해 추종성(traceability)이 우수한 Polyvinyl chloride ((-CH<sub>2</sub>CH(Cl)-)<sub>n</sub>) 입자를 사용하였다. 유동장이 충분히 발달하면 직경 120 $\mu$ m 전후의 입자를 선별하고 계면 활성제를 소량 혼합한 다음 교반수조 상부에서 투입하여 계측 유동장의 공간 스케일을 충분히 재현할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 2가지의 임펠러 형상을 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 Pitched blade turbine(PBT, 이하 임펠러 A)로 4개의 블레이드가 45도 각도를 이루고 있고, 직경(D) 50mm, 폭(W) 20mm인 피치 블레이드 터빈이다. Fig. 2(b)는 Rushton turbine P-6(RT, 이하 임펠러 B)로서, 블레이드

는 60도 간격으로 직경(D) 50mm, 폭(W) 20mm이다. 교반기는 단상, AC 220V, 최고 RPM이 550인 Agitator(LIGHTNIN사, Labmaster SI mixer)로 교반기는 자체의 회전으로 생긴 진동을 최소화하기 위해 축을 300mm로 유지하고 지지대에 고정시켜 회전속도를 60, 100, 200 및 300RPM으로 변환하였다.



(a) Pitch blade turbine



(b) Rushton turbine

Fig. 2 View of impellers.

90도 간격으로 배플을 설치한 수조의 내통 상단에 교반기의 본체를 설치하고 좌측에서 레이저 광원으로 시트라이트를 형성한 다음 교반조의 측면 및 하면의 계측영역에서 고속도카메라 및 캠코더로 촬영을 하기 위한 배치를 행하였다.

2.2 실험방법

Fig. 3은 교반수조의 자세한 계측영역의 위치 및 크기를 나타내고 있다. 수위는 경계면의 영향을 고려하여 수조의 직경과 같게 하였다. 계측단면인 수조의 수직면(r-z section)은 배플의 시트라이트의 영향으로 중앙단면보다 약간 앞쪽(2mm)을 계측단면으로 선택하였고, 수평면(r-θ단면)은 1h, 2h, 3h에서 임펠러의 하단(2mm)에서 계측하였다.

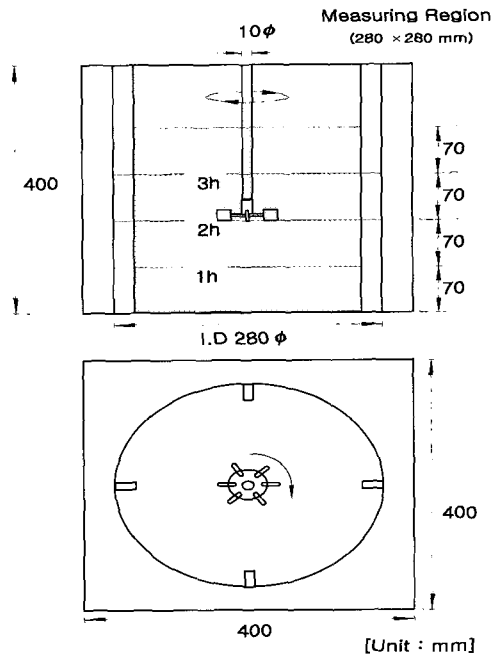


Fig. 3 Definition of measuring region.

레이놀즈수는 임펠러의 회전속도를 대표속도로 정하고 임펠러의 길이를 대표길이로 하여 계산하였으며 수온 25℃에 대한 동점성계수 값을 적용하였다. 고속도카메라로 촬영된 영상은 1/60초의 시간간격을 갖는 기수피일드와 우수피일드에 각각 입력된다. 속도벡터 추출 알고리즘으로서 본 연구에 적용한 계조치상호상관법<sup>(5)</sup>은 입자의 최대 이동거리가 PC 모니터 상에서 7~10pixel 전후일 때 가장 정도가 높고 계산시간이 적게 소요되기 때문에 고속도카메라의 프레임레이트(frame rate)를 조절하였다.

영상처리는 개인용 컴퓨터에 내장형 이미지보드(DT3155, Data-Translation사)를 구성하여 Data Translation사에서 제공되는 소프트웨어의 자체 명령어에 따라 영상처리를 실시하였다. 본 시스템에서는 이미지보드에서 영상을 입력받아 임의의 프레임을 연속 또는 랜덤으로 각 pixel의 256단계의 계조치(gray level)를 가진 프레임단위의 이진화일로 연속적으로 변환한 후, 영상처리 전용의 소프트웨어로서 (CACTUS 2000) PC의 하드디스크에 저장된 원시영상들을 동일입자 검출

알고리즘에 적용하여 원시의 속도벡터를 검출한 후 다양한 후처리를 하였다. Table 1은 제반 실험 조건을 나타내고 있다.

**Table 1 Experimental conditions.**

Article	Item	Specification
Visualization equipment	Image board	DT3155(640×480pixel, B&W)
	Light source	300mW Argon-Ion laser
	Sheet light	Cylindrical lens (width:2mm)
Measuring condition	Working fluids	Water
	Particle	Poly Vinyl Chloride(120μm)
	Time resolution	60fps(high speed camera)
Image processing	Host computer	Pentium PC(CPU speed : 200MHz)
	Calculation time	3min/frame
	Image record	Hi-8mm, VTR
	Number of data for time-mean	100frames(random acquire)
	Identification	Two-frame gray-level cross correlation algorithm Calculation grid : 40×40
	Ratio of error vector(%)	Under 2.4% /frame

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 교반작용과 속도구배

교반이란 어떤 것을 섞거나 부수거나 또는 열을 골고루 전달시키기 위하여 뒤섞는 것으로 이러한 교반작용은 혼합 및 분산 균일화 작용, 파괴·세분화 작용 및 응집작용, 이동운반작용 및 계면이동현상 촉진 작용 등으로 세분화할 수 있다<sup>[6]</sup>. 교반의 메카니즘은 복잡하고 다양한 파라미터가 작용하며 혼합정도는 물에 가해지는 동력에 기초를 두고 있으며, 이는 속도구배(velocity gradient)에 의해 측정할 수 있다. 기계식 교반(mixing)을 위한 속도구배식<sup>[7]</sup>은 식(1)과 같다.

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}} = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (1)$$

단,  $W$  = 반응조 단위체적당 물에 가해지는 동력  
 $P$  = 물에 가해지는 동력

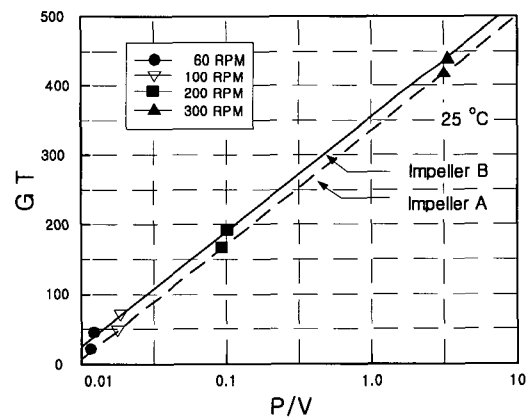
또한 입자의 충돌율은 속도구배  $G$ 에 비례한다. 그러므로 속도구배는 입자간의 충돌율을 얻기에 충분해야 한다. 속도구배는 또한 유체에서의 전단력과 관계가 있으며 속도구배가 크면 상당한 전단력이 발생하게 된다. 한편, 임펠러가 액체에 가하는 동력은 Rushton의 관계식<sup>[8]</sup>으로 구해지며, 그 식은 다음과 같다.

$$P = \frac{K_r N^3 D_i^5 \rho}{g} \quad (2)$$

단,  $K_r$  = 난류에 있어서의 임펠러 상수

총 입자 충돌수는 교반기의 속도구배( $G$ )와 체류시간( $T$ )의 곱에 비례한다. 따라서  $GT$ 값이 설계시 중요한 인자이다.

Fig. 4는 본 실험에서 사용된 교반장치의 동력원으로 사용한 교반기의 속도구배와 체류시간의 곱  $GT$  그리고 단위체적당 물에 가해지는 동력  $P/V$ 와의 관계를 나타내고 있다.



**Fig. 4 Power for agitation.**

#### 3.2 유동장의 속도분포

각 회전수에 대한 레이놀즈 수(Stirring Reynolds Number,  $R_e = \rho ND^2 / \mu$ )는 임펠러의 회전수 60~300RPM에 대해 약 2,800~14,000에 해당된다. PIV계측을 통한 교반장치의 내부 유동장의 각 계측영역에 대하여 임펠러의 위치별로 1h, 2h, 3h에서 100RPM에 대해 각각의 유동특

성을 고찰하기 위하여 속도벡터분포를 임펠러의 축을 중심으로 왼쪽의 유동장만을 Fig. 5에 도시하였다. 임펠러 A에서는 축방향의 구동류가 벽면, 배플 및 수조하부와 충돌하여 내부를 순환하는 순환류를 형성하다가 임펠러의 상부로 유입(entrainment)해서 다시 내부를 순환하는 유동 패턴을 나타내며, 임펠러가 하부로 이동함에 따라 전함혼합층도 이동함을 관찰할 수 있다. 임펠러 B에서는 A의 경우와는 달리 반경방향의 구동류가 벽면 및 배플과 충돌하여 상하로 순환하는 순환류를 형성하다가 임펠러의 상부와 하부 양쪽으로 유입해서 반경방향으로 구동류를 형성하여 순환하는 유동특성이 나타나고 있으며, 전단혼합층도 임펠러 A의 경우와는 달리 반경방향으로 형성되어 있음을 관찰할 수 있다.

### 3.3 전단혼합 유동특성

Fig. 6은 교반장치 내에서 임펠러의 축을 중심으로 오른쪽 유동장만의 단위질량당의 순간운동에너지 분포를 동일 입자치리에 의하여 계산된 각 계산 격자점 상에서 3차원적으로 나타낸 것이다. 운동에너지 분포는 순간 속도분포에서 알 수 있는 바와 같이 임펠러 주변에서 크게 나타나고 있지만, 전체적으로 계측영역의 관점에서 살펴볼 때 임펠러의 축을 중심으로 좌우 대칭적인 구조를 이루고 있으며, 임펠러 A는 하부에 그리고 임펠러 B는 반경방향으로 운동에너지가 집중되어 있고, 임펠러의 회전수가 증가함에 따라 즉 구동류가 발달함에 따라 운동에너지가 증가하며, 상·하부 쪽으로 갈수록 완만한 곡선으로 접근하고 있다.

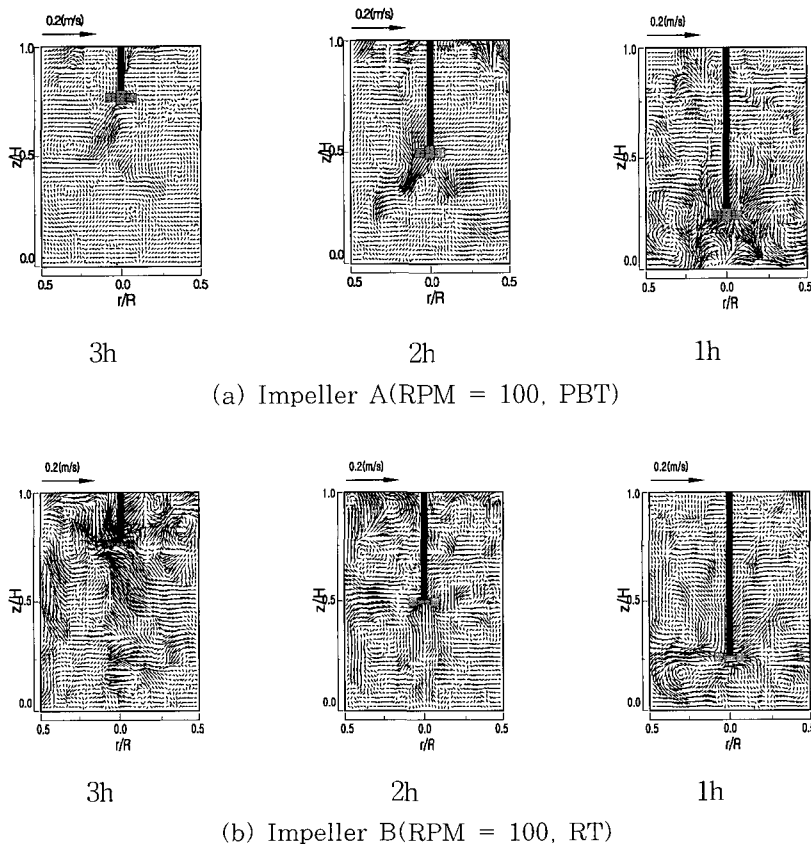
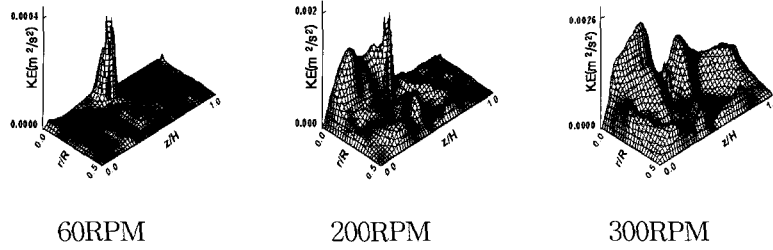
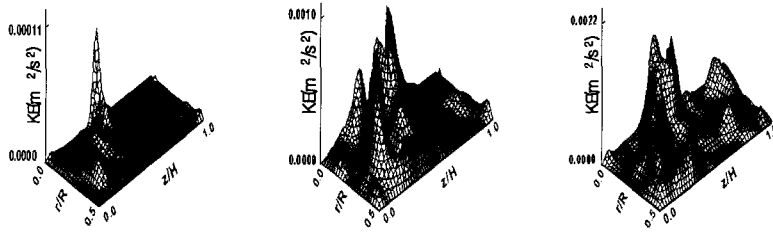


Fig. 5 Distribution of velocity vectors.



60RPM                      200RPM                      300RPM

(a) Impeller A(RPM = 60, 200, 300, PBT)



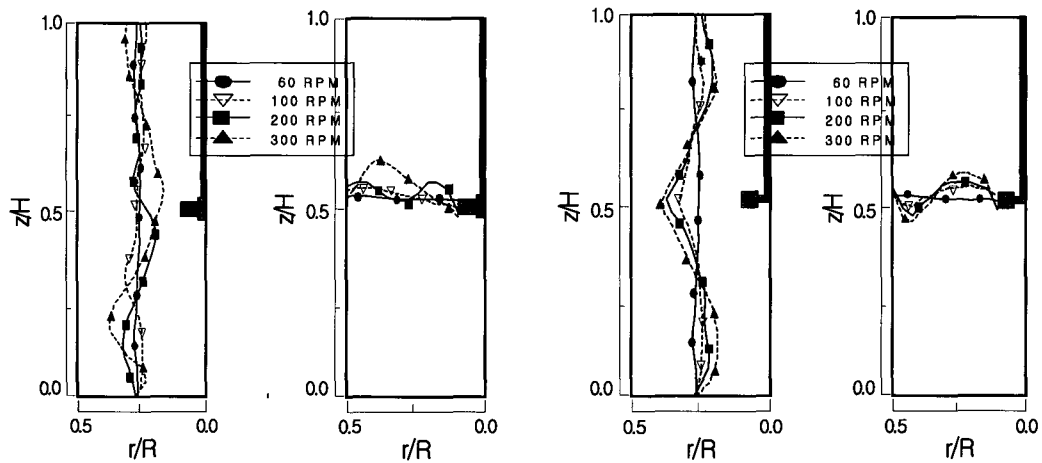
60RPM                      200RPM                      300RPM

(b) Impeller B(RPM = 60, 200, 300, RT)

**Fig. 6 Instantaneous kinetic energy distribution.**

Fig. 7은 임펠러를 기준으로 중앙의 축방향 및 반경방향의 속도분포를 나타내며, 임펠러의 회전수에 따른 유동특성을 파악하기 위해 시간평균 속

도분포를 구하여 수평 및 수직속도 성분을 대상 유동장에 표시한 결과를 보이고 있다. 유동장의 축방향 및 반경방향 속도성분에 대한 등속도 분포가



(a) Impeller A(PBT) (b) Impeller B(RT)

**Fig. 7 Time-mean velocity profiles at various RPM.**

회전수의 증가에 따라 임펠러의 형상에 따른 유동 패턴이 잘 나타나 있다.

#### 4. 결 론

PIV를 이용하여 두 종류의 임펠러를 사용한 교반기의 내부유동을 계측하였다. 그 결과, 임펠러에서 발생한 구동류에 의해 전단혼합유동영역의 규모가 유동방향으로 점점 커지고 교반장치 내부로 유동영역이 점점 확산되는 것을 확인할 수 있었다.

임펠러 A, B의 두가지 경우에서 시간평균 속도 분포는 두 임펠러의 축을 중심으로 전반적으로 좌우대칭인 형태를 확인할 수 있었다. 특히, 임펠러 A(Pitched blade turbine)의 경우는 전반적인 유동패턴이 임펠러의 회전수가 증가함에 따라 반경방향에서 점차 축방향으로 변하는 것을 알 수 있었다. 또 임펠러 B(Rushton turbine)의 경우는 회전속도가 증가함에 따라 구동류의 크기가 커지고 배플과 벽면의 영향으로 인한 큰 압력구배를 유발함으로써 반경방향으로 회전류의 크기가 점차 커지는 전단혼합 유동특성을 강하게 나타내고 있으며 이러한 현상은 교반성능의 영향에 미치고, 특히 교반기의 회전수가 증가함에 따라 동력의 크기가 커져서 속도구배가 커짐으로 교반성능을 증가시킬 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

[1] R. King, "Fluid Mechanics of Mixing : Modelling, Operations and Experimental Techniques", Kluwer Academic Publishers, 1991.  
 [2] A. Bakker, V. D. Akker, H. E. A., "Single-Phase Flow in stirred Reactors", Trans. IChemE, Vol. 72, Part A, pp.583-593, 1994.  
 [3] K. J. Myers, R. W. Ward, A. Bakker, "A Digital Particle Image Velocimetry Investigation of Flow Field Instabilities of Axial Flow Impellers", ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol.

119, No. 1, pp.623-632, 1997.

[4] A. Kemoun, F. Lusseyran, J. Mallet, M. Mahouast, "Experimental scanning for simplifying the model of a stirred-take flow, Experiments in Fluids", Experiments in Fluids, Vol. 25, No.1 , pp.23-36, 1998.  
 [5] 최장운, 이영호, "PIV에서의 계조치상호상관법의 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 제2권, pp.396-400, 1995.  
 [6] 山本 一夫, 西野 宏, "攪拌技術", 佐林化學機械工業株式會社, 1992.  
 [7] 양승수, "용수 및 폐수처리", 동화기술, pp.225-263, 1988.  
 [8] Rushton, J. H., "Mixing of Liquids in Chemical Processin". Ind. and Eng. Chem., Vol. 44, No. 12, pp.2931~2943, 1952.

#### 저 자 소 개



##### 양창조 (梁昌照)

1970년 8월 26일생, 1993년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1999년 한국해양대학교 대학원 냉동공조공학 졸업(석사), 현재 큐슈공업대학교 대학원 정보공학연구과 박사과정



##### 최민선 (崔民善)

1959년 1월 28일생, 1982년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1995년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 현재 목포해양대학교 부교수, 당학회 종신회원



##### 이영호 (李英浩)

1958년 2월생, 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1986~1989년 일본동경대학 기계공학과(공학박사), 1980~현재, 한국해양대학교근무(기계·정보공학부 교수), 2003. 3~현재, 조선·해양기자재 연구센터 소장, 2001. 5~현재, (재)부산테크노파크 분소장(운영위원), 관심분야 : PIV, CFD, 환경에너지, 유체기계