

## 전산유체역학을 이용한 교반탱크 내 유체흐름 해석

김미진 · 이경미 · 박균영<sup>†</sup>

공주대학교 화학공학부  
314-701 충남 공주시 신관동 182  
(2010년 1월 15일 접수, 2010년 3월 10일 채택)

### Analysis of Fluid Flows in a Stirred Tank Using Computational Fluid Dynamics

Mi Jin Kim, Kyung Mi Lee and Kyun Young Park<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Kongju National University, 182 Singwan-dong, Gongju-si, Chungnam 314-701, Korea  
(Received 15 January 2010; accepted 10 March 2010)

#### 요 약

직경 1 m, 높이 1 m의 교반탱크 내 유체흐름 패턴을 상용 전산유체역학 프로그램의 하나인 CFX를 사용하여 해석함으로써 교반속도, 임펠러 회전날개의 경사각, 방해판의 존재 유무, 탱크바닥 형태가 흐름패턴에 미치는 영향을 알아 보았다. 방해판이 없을 경우 탱크 중심에서 와류가 관찰되었으며 교반속도가 증가함에 따라 탱크 중심의 와류 현상이 증가하였으나, 방해판 설치에 의해 와류가 감소하였다. 임펠러 날개의 경사각을 증가시키므로써 교반탱크 상하로의 유체흐름이 증가하였고 와류도 감소하였다. 탱크바닥을 수평으로 하는 것 보다 둥글게 함으로써 탱크 바닥 구석에서 유체흐름이 원활하게 변화하였다.

**Abstract** – The flow patterns in a stirred tank, 1m in diameter and 1 m in height, were studied using CFX, a commercial computational fluid dynamics program, with the impeller rotation speed, the impeller blade angle and the tank-bottom shape varied and the baffles included or excluded. A vortex was observed in the center of the tank in the absence of the baffles, and the intensity of the vortex increased with increasing the rotation speed. The vortex was considerably reduced in the presence of the baffles. An increase in the blade angle increased the vertical flow and decreased the vortex intensity. The flow in the corners of the tank bottom turned smoother as the tank bottom was varied in shape from flat to round.

Key words: Stirred Tank, Flow Pattern, Numerical Analysis, Computational Fluid Dynamics

#### 1. 서 론

교반탱크는 실린더 형태의 탱크에 임펠러가 설치되어 있는 장치로서 액체의 혼합, 액상 반응에 사용되며 전통적인 화학공업은 물론 제약, 화장품, 식품, 생물, 환경 산업 분야에 걸쳐 광범위하게 활용되고 있다. 교반탱크 내 액체의 흐름패턴은 혼합효율과 밀접한 관계를 가지게 되며, 임펠러의 모양, 크기, 회전속도, 방해판(baffle)의 존재 유무 등에 의해 영향을 받는다. 최근 전산유체역학(computational fluid dynamics) 프로그램의 상용화에 따라 교반탱크 내 유체의 흐름 거동을 유체 지배방정식의 수치해석을 통해 알아보고자 하는 연구들이 수행되었다[1-5]. 현재 전산유체역학계산 상용 프로그램으로는 Fluent, CFX, STAR-CD 등이 알려져 있다.

지금까지 발표된 논문들에서 다루어진 대부분의 교반탱크들은 바닥이 수평이고 4개의 방해판이 설치되어 있으며 직경은 30 cm 미만이고 사용된 프로그램은 Fluent가 주를 이루고 있다. 특히하게, 안 등

[6]은 방해판이 없는 직경 18 cm의 교반탱크에서 flat-paddle과 45°-pitched paddle 에 대하여 STAR-CD 프로그램을 이용하여 탱크 내 물의 흐름패턴을 계산한 바 있다.

본 연구에서는 교반탱크의 직경을 1 m로 확대하였고, CFX 프로그램을 사용하였으며, 탱크 바닥이 수평인 것과 아래로 볼록한 것, 방해판이 있을 때와 없을 때, 임펠러 날개의 각도 변화가 탱크 내 물의 정상상태 흐름패턴에 미치는 영향을 해석하였다. 분무건조기 해석[7] 또는 시멘트 킬른 버너 해석[8]에 CFX를 응용한 사례는 있으나 교반탱크 해석에 적용한 예는 아직 찾아 볼 수 없다.

#### 2. 유체 지배방정식과 수치해석

##### 2-1. 연속 방정식

$$\nabla \cdot (\alpha_i \rho_i U_i) = 0 \tag{1}$$

$\alpha_i, \rho_i, U_i$ 는  $i$  상(기상 또는 액상)의 부피분율, 밀도, 속도 벡터를 나타낸다. 교반 탱크 내 물의 표면이 공기와 접해 있으므로 물과 공

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kypark@kongju.ac.kr

기의 2 가지 상을 고려하였다[9].

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \tag{2}$$

$\alpha_L, \alpha_G$ 는 액상과 기상의 부피 분율을 나타낸다.

**2-2. 운동량 보존 방정식**

$$\nabla \cdot (\alpha_i \rho_i U_i U_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot \tau + R_i + F_i + \alpha_i \rho_i g \tag{3}$$

$p$ 는 압력,  $\tau$ 는 stress tensor,  $R_i$ 는 2 상간의 운동량 교환 항,  $F_i$ 는 임펠러 회전에 따라 발생하는 원심력,  $g$ 는 중력 가속도 벡터이다.

$$\tau = \mu_{eff} (\nabla U_i + (\nabla U_i)^T) \tag{4}$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_T \tag{5}$$

$\mu_{eff}$ 는 유효점도,  $\mu_T$ 는 난류점도를 나타낸다.

$$F_i = -2\alpha_i \rho_i \omega \times U_i - \alpha_i \omega \times \omega \times r \tag{6}$$

$\omega$ 는 각속도 벡터,  $r$ 은 회전축으로부터의 위치를 나타내는 벡터이다. 보다 자세한 내용은 CFX 매뉴얼[10]에 나와 있다.

**2-3. 수치해석 방법**

본 연구에서 사용된 CFX 프로그램은 상기 미분방정식의 이산화(discretization) 방법으로 유한체적법을 채택하고 있다. 교반탱크, 임펠러, 방해판의 형상을 Fig. 1에 나타내었고, 각각의 치수를 Table 1에 표시하였다. 임펠러의 날개는 4 개이고 방해판도 4 개로서 등 간격으로 설치되어 있다. 상기 유체 지배방정식을 수치해석방법으로 풀기 위해 교반탱크 내 공간을 여러 개의 격자(mesh)로 나누었는데 임펠러가 회전하는 영역에는 tetragonal 형태의 격자 530,000개, 그 밖의 영역에는 hexagonal 형태의 격자 340,000개를 사용하였다. Fig. 2에 교반탱크의 격자 구조를 나타내었다. 격자수를 증가시키면 정확도가 증가하나 계산시간이 오래 걸리기 때문에 본 연구에서는 예비 과정을 거쳐 수렴판정 기준  $10^{-3}$ 을 만족시키도록 격자수를 결정하였다. 수렴기준은 모든 셀의 유체방정식 질량 잔류 값(residual)의 합을

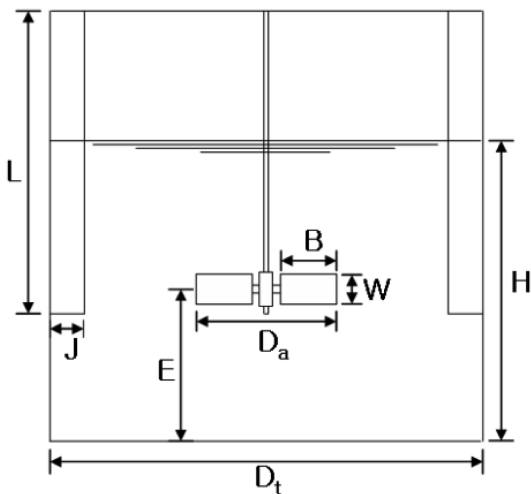
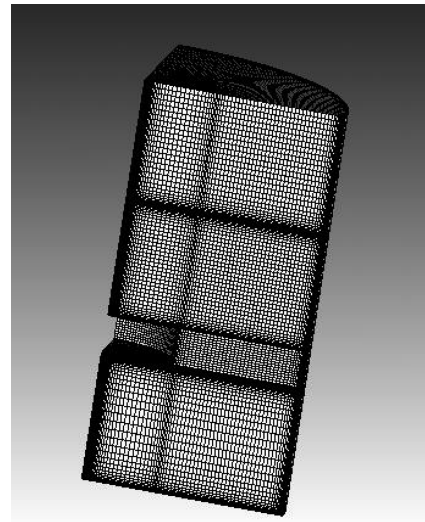


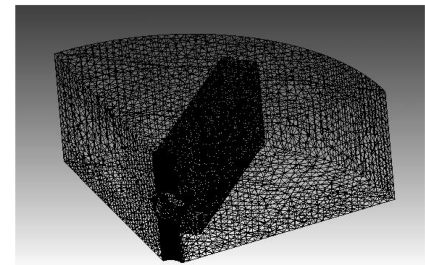
Fig. 1. Schematic drawing of stirred tank.

Table 1. Dimensions of tank components (unit: m)

B	D <sub>a</sub>	D <sub>t</sub>	E	H	J	L	W
0.14	0.33	1.0	0.33	0.7	0.08	0.7	0.067



(tank region)



(rotating vane region)

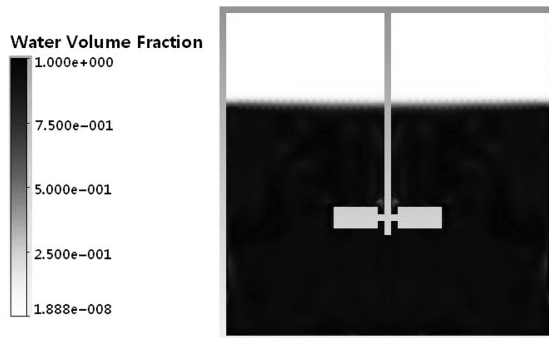
Fig. 2. Computational grid for stirred tank.

유체의 총 질량으로 나눈 값으로 정의한다. 이전의 연구에서도 동일한 수렴판정기준을 사용한 바 있다[11]. 교반기의 벽, 바닥에서 유체의 속도는 0으로 지정하였고, 물과 공기에 의해 형성되는 경계면은 자유표면으로 설정하였다. 식 (5)의 난류 점도는 k-ε 모델 [12]을 사용하여 구하였다.

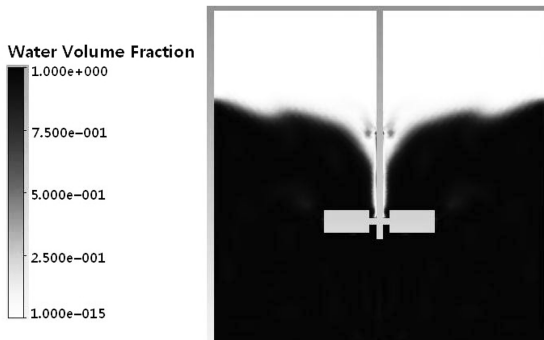
**3. 결과 및 고찰**

**3-1. 임펠러 회전속도의 영향**

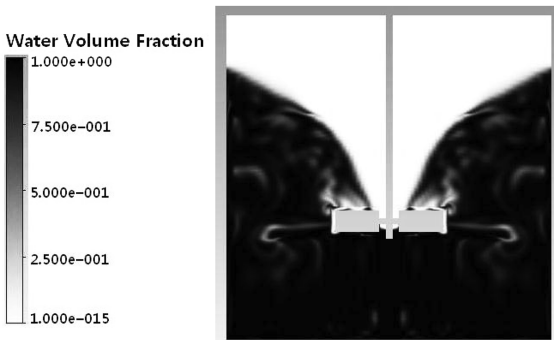
방해판이 없는 교반탱크에 대하여 임펠러 회전날개의 경사각을 0°로 하고 임펠러 회전속도를 90, 300, 500 rpm으로 변화시켰을 때의 공기와 물의 경계면 형태, 위치별 물의 부피 분율 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 흑색이 물, 백색이 공기를 표시한다. 90 rpm의 경우 물과 공기의 경계면은 거의 수평을 이루고 물에 포함된 공기의 양은 무시할 정도이다. 경사각 0°의 8 개 paddle을 72 rpm으로 회전 시 미세하게 액면이 아래로 파이는 안 등[6]의 결과와 일치한다고 볼 수 있다. 300 rpm에서는 물-공기 경계면이 탱크 중심부에서 아래로 파이는 와류(vortex) 현상이 나타났고, 500 rpm에서는 와류현상이 심화되었을 뿐만 아니라 물 속에 빨려 들어간 공기의 양이 상당함을 알 수 있다. 방해판이 없는 교반탱크에서 임펠러 회전속도가 증가하면서 탱크 중심부에서 와류가 발생하는 현상은 실험적으로 이미 잘 알려진 현상이나, 유체방정식의 수치해석을 통하여 예측할 수 있음을 보여 주었다. 교반속도 300 rpm 이상에서의 와류발생 현상을 보여준 이전의 계산결과는 찾아볼 수



(a) 90 rpm



(b) 300 rpm



(c) 500 rpm

Fig. 3. Effect of impeller rotation speed on volumetric fraction of water.

없었다. CPU 3.4 GHz 컴퓨터를 사용하여 하나의 조건에 대한 계산에 대략 30시간이 소요되었다.

### 3-2. 임펠러 회전날개 경사각도의 영향

500 rpm의 회전속도에서 임펠러 회전날개의 경사각을 30°로 변화시켰을 경우 물-공기 경계면 형태를 Fig. 4에 나타내었다. 경사각 0°인 경우(Fig. 3c)와 비교해 볼 때 중심부의 파임 현상이 완화되었음을 볼 수 있는데 이 것은 임펠러가 경사짐에 따라 수직 방향으로의 유체 흐름이 증가하였기 때문으로 판단된다. Fig. 5에 임펠러 경사각 변화에 따른 교반탱크 내 유체흐름 패턴을 화살표로 나타내었다. 경사각이 0°인 경우 탱크 벽 쪽으로, 30°인 경우 상하로의 흐름이 상대적으로 더 발달하였음을 볼 수 있다.

### 3-3. 방해판의 영향

임펠러 회전속도 500 rpm에서 교반탱크의 벽에 방해판 4개를 등간격으로 설치하였을 경우, 방해판이 설치되지 않았을 경우의 유체

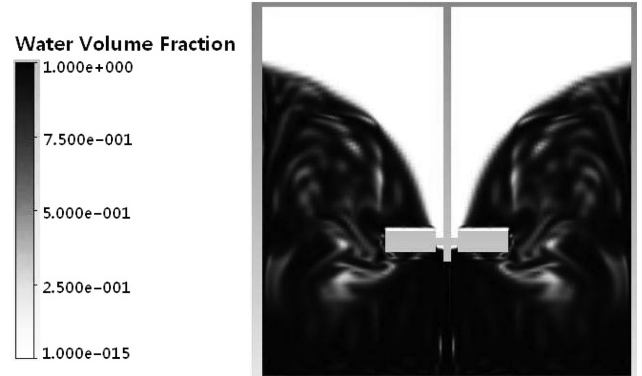
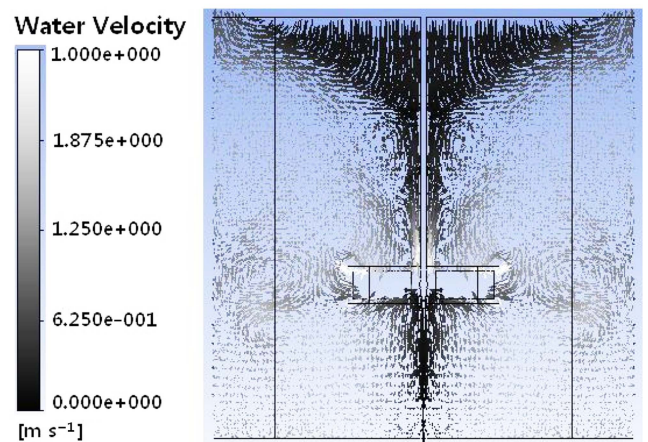
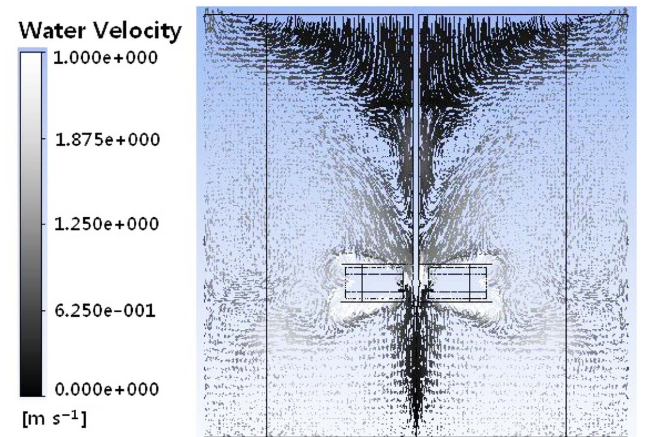


Fig. 4. Air-water interface with the blade angle at 30 degree in the absence of baffles, holding the rotation speed at 500 rpm.



(a) blade angle = 0 degree



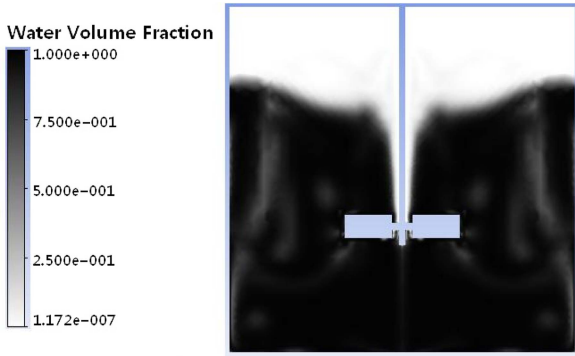
(b) blade angle = 30 degree

Fig. 5. Effect of impeller blade angle on air-water interface.

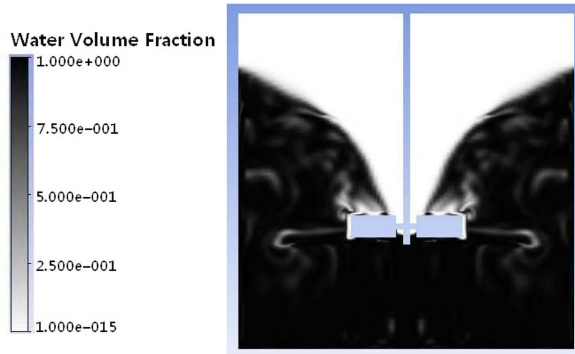
흐름 패턴을 Fig. 6에 나타내었다. 방해판의 설치에 의해 탱크 중심에서의 vortex가 현저하게 줄어들었음을 알 수 있다. 방해판의 vortex 감소효과는 이미 실험적으로 잘 알려져 있지만 본 연구에서는 유체 지배방정식의 수치해석을 통하여 그 효과를 재현해 보았다는데 의의가 있다고 할 수 있다.

### 3-4. 교반탱크 바닥 형태의 영향

이전의 연구들에서는 교반탱크의 바닥이 평평한 형태를 대상으로

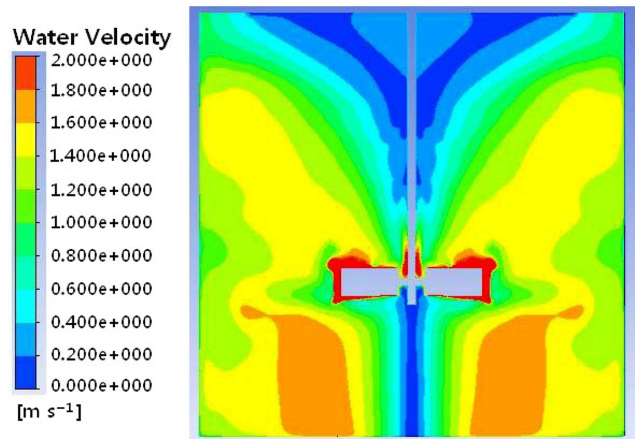


(a) with baffles

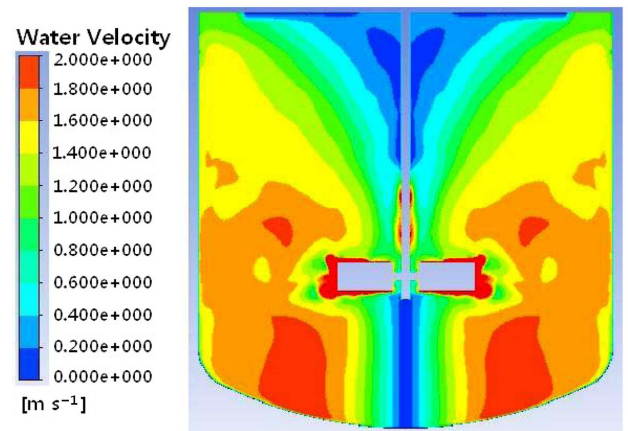


(b) without baffles

Fig. 6. Influence of the baffles on air-water interface.

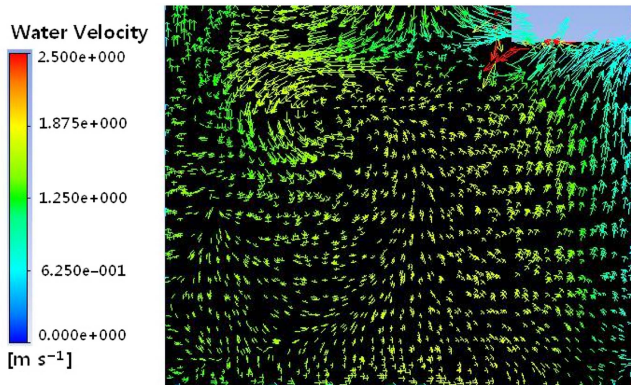


(a) flat bottom

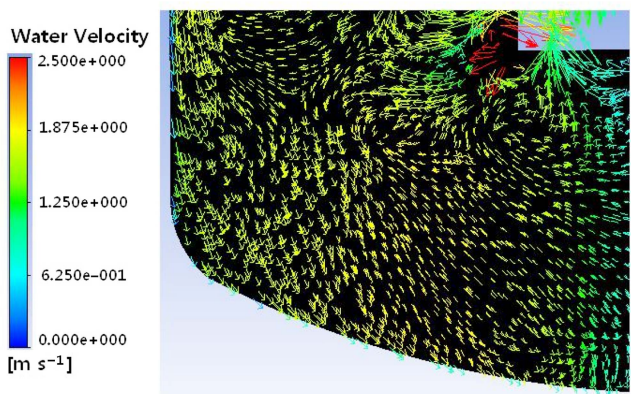


(b) round bottom

Fig. 8. Comparison in flow velocity between flat and convex tank bottoms.



(a) flat bottom



(b) round bottom

Fig. 7. Comparison in flow vectors in tank bottom corners between flat and convex bottoms.

선정하였으나, 본 연구에서는 탱크의 바닥을 접시 형태로 아래로 둥글게 했을 경우 유체흐름 패턴에 미치는 영향을 조사해 보았다. 임펠러 회전속도를 500 rpm으로 하였을 때 방해판 존재 유무에 따른 탱크 바닥 구석에서의 유체흐름 패턴을 비교해 보았다. 바닥을 평평하게 했을 때와 비교해 볼 때 접시 형태로 했을 경우 구석에서의 유체흐름이 훨씬 활발한 것을 볼 수 있다(Fig. 7). 이러한 결과는 탱크 바닥 구석에서 흐름의 사각지대가 형성되는 것을 방지하기 위해서는 탱크 바닥을 접시형태로 설계하는 것이 바람직하다는 것을 뒷받침한다.

탱크 바닥 형태에 따른 탱크 내 유체의 유속 분포를 Fig. 8에 색깔로 나타내었다. 적색, 갈색, 황색, 녹색, 청색으로 갈수록 유속이 점점 떨어지는 것을 표시한다. 바닥이 둥글 경우 탱크 중심에서의 vortex가 줄어들었고, 바닥 구석진 곳과 탱크 벽 쪽에서의 유속이 증가하였다. 임펠러 날개 바로 아래에서 두 경우 모두 흐름이 거의 없는 청색 띠가 존재하고 있는데 이러한 현상은 타 연구자들의 해석결과에서도 동일하게 나타났다[2].

#### 4. 결 론

CFX 전산유체역학 프로그램을 이용하여 교반속도, 임펠러 날개의 경사각, 방해판의 존재 유무, 탱크 바닥의 형태가 직경 1 m, 높이 1

m의 교반탱크 내 유체흐름패턴에 미치는 영향을 관찰, 분석하였다. 방해판이 없을 경우 교반속도가 증가함에 따라 탱크 중심의 와류 현상이 증가하였으나, 방해판 설치에 의해 와류 현상이 감소하였다. 임펠러 날개의 경사각을 증가시킴으로써 교반탱크 상하로의 유체흐름이 증가하였고 와류도 감소하였다. 탱크바닥을 수평으로 하는 것보다 둥글게 함으로써 탱크 바닥 구석에서 유체흐름이 원활하게 변화하였다. 앞으로 기체, 액체뿐만 아니라 고체 입자를 포함하는 3 상계 교반탱크 수치해석으로의 확장이 기대된다.

## 사용기호

F	: 임펠러 회전에 따른 원심력 벡터
g	: 중력 가속도 벡터
p	: 압력
R	: 기체-액체 상 사이의 운동량 교환 벡터
U	: 유체의 속도 벡터

## 그리스 문자

$\alpha$	: 부피 분율
$\rho$	: 밀도
$\tau$	: stress tensor

## 하첨자

G	: 기체(공기)
L	: 액체(물)

## 참고문헌

- Choi, B. S., Wan, B., Philyaw, S., Dhanasekharan, K. and Ring, T. A., "Residence Time Distributions in a Stirred Tank: Comparison of CFD Predictions with Experiment," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**(20), 6548-6556(2004).
- Rudniak, L., Machniewski, P. M., Milewska, A. and Molga, E., "CFD Modelling of Stirred Tank Chemical Reactors: Homogeneous and Heterogeneous Reaction Systems," *Chem. Eng. Sci.*, **59**(22-23), 5233-5239(2004).
- Vakili, M. H. and Nasr Esfahany, M., "CFD Analysis of Turbulence in a Baffled Stirred Tank, a Three-Compartment Model," *Chem. Eng. Sci.*, **64**, 351-362(2009).
- Deglon, D. A. and Meyer, C. J., "CFD Modelling of Stirred Tanks: Numerical Considerations," *Miner. Eng.*, **19**(10), 1059-1068(2006).
- Magnico, P. and Fongarland, P., "CFD Simulations of Two Stirred Tank Reactors with Stationary Catalytic Basket," *Chem. Eng. Sci.*, **61**(2), 1217-1236(2006).
- Ahn, I., Song, A. and Hur, N., "Transient Flow Simulation of a Mixer with Free Surface," *Korean Soc. Comput. Fluids Eng.*, **11**(4), 9-13(2006).
- Park, K., Park, K. Y., Ju, J. and Park, J. T., "Calculation of Spray Drying Using Computational Fluid Dynamics," *Korean Chem. Eng. Res.*, **40**(4), 507-515(2002).
- Ju, J. S., Shin, S. B., Lee, H. S., Lee, M. W. and Hong, C. S., "Analysis of Cement Kiln Burners by Using Computational Fluid Dynamics," *Korean Chem. Eng. Res.*, **37**(6), 850-856(1999).
- Kerdouss, F., Bannari, A. and Proulx, P., "CFD Modeling of Gas Dispersion and Bubble Size in a Double Turbine Stirred Tank," *Chem. Eng. Sci.*, **61**(10), 3313-3322(2006).
- CFX4 Solver Manual, AEA Technology(1997).
- Rahimi, M. and Pavareh, A., "Experimental and CFD Investigation on Mixing by a Jet in a Semi-Industrial Stirred Tank," *Chem. Eng. J.*, **115**(1-2), 85-92(2005).
- Lauder, B. E. and Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, **3**(2), 269-289(1974).