

산업용 교반기의 고체-액체 혼합에 대한 Eulerian Two-Phase 유동해석

송애경* · 허남건** · 원찬식***, 안익진****

Eulerian Two-Phase Flow Analysis for Solid-Liquid Mixing in a Industrial Mixer

Aekyung Song*, Nahmkeon Hur**, Chan-Shik Won***, Ickjin Ahn****

Keywords : Computational Fluid Dynamics(전산유체), Industrial Mixer(산업용 교반기), Eulerian Two-Phase (오일러언 이상유동), Multiple Rotating Frames Method(다중 회전 좌표계 방법)

Abstract

The Mixer is apparatus that help precipitation or an inhomogeneous distribution of various phases to be mixed and that user makes necessary material mixing one or the other. Mainly the mixer which is used from chemical and food industry is very important system in engineering that mixes the material. The inside flow of the mixer under the actual states which put a basis in flow of the fluid is formed rotation of the impeller. The inside flow of impeller will be caused by various reasons change with shape of impeller, number of rotation, mixing material and flow pattern of free surface etc. Also mixer study depended in single-phase flow and experimental research. So the numerical analysis of flow mixing solid-fluid particle is simulated. It is become known, that the case where agitator inside working fluid includes the solid particle the sinkage reverse which the solid particle has decreases an agitation efficiency. From the research which it sees the hazard solid which examines the effect where the change of the sinkage territory which it follows agitation number of revolution and diameter of the particle goes mad to an agitator inside flow distribution - numerical analysis the inside flow distribution of liquid state with Eulerian Two-Phase Method.

1. 서론

교반기는 침전 또는 이종 물질의 혼합 작용을 돕는 장치로 사용자가 하나 혹은 그 이상의 물질을 혼합하여 원하는 물질을 만드는데 사용된다. 주로 화학공업 및 식품산업에서 사용되는 교반기는 물질을 혼합하는데 있어 공학적으로 매우 중요한 장치이다. 교반기의 내부유동은 임펠러의 회전으로 인해 형성되는데 이는 임펠러의 형태, 교반 회전수, 교반 물질 및 자유표면의 거동양상 등의 다양한 이유로 인해 변할 수 있다.

많은 산업분야에서 고체 입자 혹은 액적이 부상된 다상 난류 유동을 많이 볼 수 있으나 대부분의 연구에서는 단상유동과 실험이 주로 실행되었다. 하지만 최근 전산유체역학 (C.F.D)을 이용한 수치해석이 활발하게 진행 중이다. Kumaresan[1] 등의 경우 임펠러와 교반기가 유동형상에 미치는 영향을 연구하였고, Derksen[2] 등은 교반기 내부에 고체 부유물이 교반에 미치는 영향을 수치 해석하였다. 안익진[3] 등은 자유표면에서의 와류현상을 V.O.F Method를 이용하여 연구하였다. 차효숙[4] 등은 고분자 반응기내 입자 부유의 입자 분포가 교반기의 형상, 입자 크기,

교반 속도 등에 따른 변화를 수치 해석하였다. 또한 Paul[5]은 산업용 교반기에 관한 기본적인 자료를 제시하였다.

교반기 내부 작동 유체가 고체 입자를 포함하는 경우 이 고체 입자가 갖는 침강 영역이 교반 성능을 저하시킨다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 작동유체 내부에 고체 입자가 존재하는 교반의 경우에 대하여 정상상태 수치해석을 통해 임펠러의 유동 특성에 따라 입자의 유동 분포와 정체되는 영역을 연구하였다. 교반 회전수, 입자의 지름 및 임펠러의 형상에 따른 침강 영역의 변화가 교반기 내부 유동 분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 고체-액체 상태의 내부 유동 분포를 Eulerian Two-Phase Method로 수치해석을 수행하였다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 격자

본 연구에서는 반경방향의 유동특성을 강하게 생성시키는 Flat-paddle, Flat-turbine impeller와 축 방향의 유동특성을 주 유동

Table 1 Data for geometries four impellers

Tank diameter	0.18	Impeller diameter	0.3
Tank height	0.18	Shaft diameter	0.04
Liquid height	0.18	Blade width	0.04
boss diameter	0.05	Height of impeller from bottom	0.06

* 서강대학교 대학원, lshsl@sogang.ac.kr

** 서강대학교 기계공학과, nhur@sogang.ac.kr

*** 서강대학교 산업기술연구소, ace@sogang.ac.kr

**** (주)하도, an0245@hanmail.net

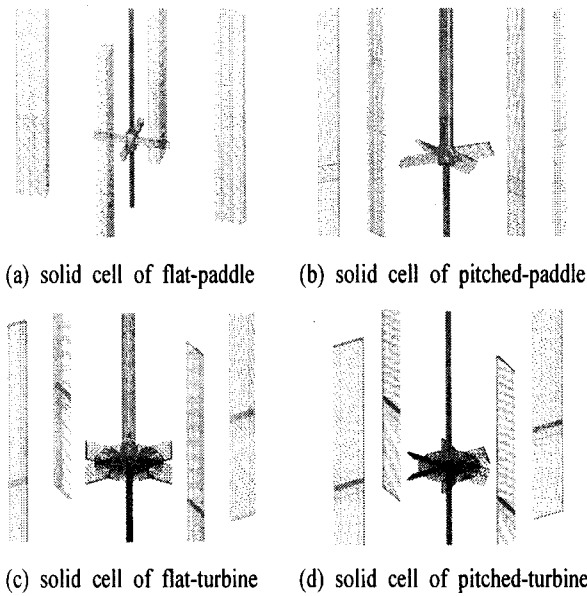


Fig. 1 Computational mesh for mixer with baffles

으로 발생시키는 45° 기울어진 Pitched-paddle, Pitched-turbine impeller에 대하여 교반기의 내부 유동을 수치 해석하였다. 계산 격자는 본 연구실에서 개발 중인 산업용 교반기 전처리 프로그램을 사용하여 생성하였으며 impeller의 형상은 Fig.1에 나타내었다. 또한 각 교반기에 대한 형상 치수는 Table 1에 나타내었다. 임펠러는 전 연구에서 확인된^[1] 위치인 교반 성능이 가장 좋은 교반기의 1/3인 지점에 위치시켰다. 경계 조건으로는 공기면의 전단 응력이 다른 면에 비해 아주 작고, 입출입이 없으므로 대칭경계조건을 적용하여 계산하였다. 또한 Eulerian two-phase Flow를 수치해석하기 위하여 Phase 1에 해당하는 유체는 교반기 내부에서의 유동 형태 변화만을 고려하기 때문에 293K의 물을 사용하였고 Phase 2에 해당하는 입자는 일정한 지름을 갖는 모래로 가정하였다. 교반기 내부에 4개의 베플을 생성하여 베플이 내부 유동에 미치는 영향을 계산하였다. 또한 volume-fraction 은 0.022로 설정하고, 난류계산은 $k-\epsilon$ high Reynolds 모델을 사용하여 유동을 고려하였다.

2.2 수치해석 방법 및 지배 방정식

교반기내에 회전의 유동현상은 M.R.F(Multiple Rotating Frames) Method 방법을 이용하여 계산하였다. M.R.F 방법은 회전에 의한 영향을 정상상태로 해석하고자 할 때 사용하는 방법으로 실제로 물체를 회전 시키지 않고 실제 회전에 영향을 받는 유체격자에 회전을 주어 계산하는 방법으로 교반기와 같이 임펠러를 가진 경우에는 임펠러와 임펠러사의 유체격자에 회전을 주어 계산하는 방법이다. 본 연구에서는 이 M.R.F의 영역을 각 임펠러 주위의 유체 셀 부분에 설정하여 정상상태 수치해석을 수행하였다.

또한 산업용 교반기 내부의 다상 상태에서의 혼합 교반을 수행하는 경우 즉 교반기 내부 작동유체의 물질 상이 고체-액체의 혼합 다상 난류 유동을 수치해석하기 위하여 다상 유동 해석 방법인 Eulerian two-phase 모델을 사용하였다. Eulerian two-phase 모델은 두 개 이상의 유체에서 상호 침투하는 유체의 유동과 특성을 해석 대상의 유체를 Phase1과 Phase2로 나누어 해석하는 방법이다. 여기서 Phase1은 해석 격자의 전체를 지배하는 유체이고 Phase2는 그 유체의 유동과 특성에 따라 분산되어 분포하는 물질의 Volume fraction으로 나타낸다. Eulerian two-phase 모델은 각

Phase의 유동 특성과 분포를 해석하기 위하여 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 각 상에 대하여 동시에 풀어준다. Eulerian two-phase 모델에서의 해석 격자의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k u_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k u_k) = -\alpha_k \nabla p + \alpha_k \rho_k g + \nabla \cdot [\alpha_k (\tau_k + \tau_k^t)] + M_k + (F_{int})_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k u_k h_k) - \nabla \cdot \left(\alpha_k \left(\lambda_k \nabla T_k + \frac{\mu_k^t}{\sigma_h} \nabla h_k \right) \right) = -\alpha_k \frac{D_p}{D_t} + \alpha_k (\tau_k + \tau_k^t) : \nabla u_k + Q_k \quad (3)$$

이 때 각 상의 Volume fraction의 상태를 나타내는 함수 α_k 를 정의하고 각 상의 밀도 항에 곱하여 밀도 변화에 대한 각 상이 차지하고 있는 Volume fraction을 모사할 수 있다.

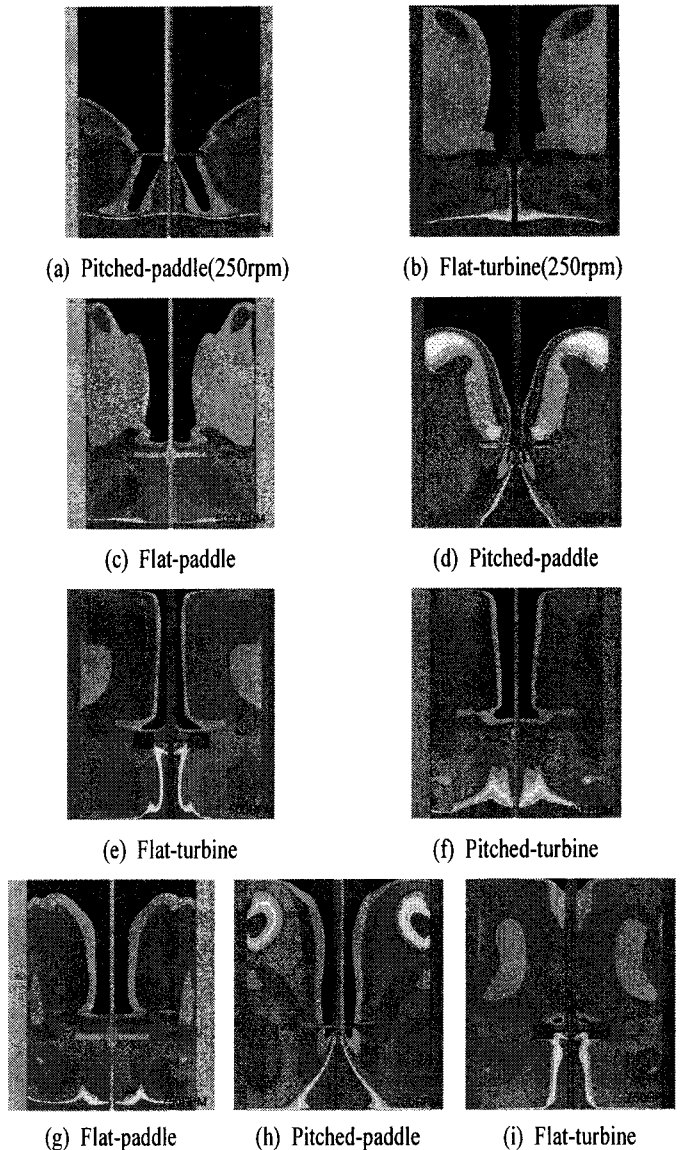


Fig. 2 Volume Fraction fields from each rpm in the impeller

3. 수치해석 결과

3.1 교반회전수 변화에 따른 유동해석

본 연구에서는 각 임펠러의 교반회전수 250rpm, 500rpm, 750rpm일 때의 입자 분포 변화에 대한 결과를 비교하였다. 입자의 평균 지름은 모두 0.0003m로 동일하게 설정하였다. Fig.2는 각 임펠러의 회전속도별 Volume fraction 분포를 나타낸 그림이다. 교반회전수가 250rpm인 경우 교반기 내부의 입자는 임펠러 하단 부분에 집중적으로 넓게 분포되어 있다. 이는 중력장의 영향으로 침강된 입자를 교반 회전력의 감소 때문에 임펠러 상단 영역까지 교반 시키지 못하고 임펠러 하단 영역에서 교반이 이루어지기 때문이다. 반면 속도가 커질수록 Volume fraction 0.1인 영역이 감소한다. 이는 임펠러 중심으로 흡입되는 유량이 많아지고 유동속도가 증가하기 때문이다. 따라서 교반회전수 750rpm인 경우의 입자 분포는 다른 교반 회전수에 비하여 입자 분포가 탱크 하단 부분에서 임펠러의 중심으로 갈수록 교반기 전체 영역에 걸쳐 고루 분포한다.

Flat-turbine 임펠러의 중심을 종단면으로 자른 (b), (e), (i) 그림을 보면 Phase 2의 분포는 이 임펠러의 유동 특성에 맞게 임펠러 위아래 고루 분포하는 것을 알 수 있다. 또한 고체 입자의 분포 영역이 임펠러 회전력에 의해 발생하는 유동 흐름이기 때문에 임펠러 블레이드에서 분출되어 다시 임펠러의 중심으로 흡입되는 입자의 유동형태를 나타낸다. 따라서 임펠러 상단 영역보다 하단에서의 입자 교반 분포가 원활하게 이루어진다. 반면 Pitched-paddle 임펠러의 유동 정체영역은 교반 회전수가 증가할수록 임펠러 축에서 탱크의 벽 방향으로 유동이 편향하는 경향성이 증가하기 때문에 이 부분의 정체 영역이 증가하는 알 수 있다. 또한 탱크 바닥에서 입자 분포는 임펠러 블레이드에서 편향되어 토출되는 유동 때문에 탱크 중심으로 정체되는 유동의 영향으로 인하여 바닥의 중심부에서 입자의 분포가 집중되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 입자의 Volume-fraction 분포는 탱크 바닥에서 임펠러 중심으로 갈수록 임펠러와 탱크 벽면 사이 공간에 고루 분포하며 교반 회전수가 증가할수록 교반기에 고루 분포하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 입자 지름 변화에 따른 유동해석

교반회전수가 500rpm일 때 고체의 입자가 각각 0.0001m, 0.0003m, 0.0009m의 지름을 갖는 경우 유동의 특징을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 입자 평균 지름이 0.0001m, 0.0003m인 경우 수치해석 결과를 보면 입자 분포가 임펠러 유동의 영향으로 임펠러 하단부터 상단까지 교반되어 분포하고 있다. 그리고 임펠러 하단 영역에서 입자의 정체 영역 또한 감소한다. 그러나 입자 평균 지름이 0.0009m인 경우 임펠러에 의해 생성되는 유동이 발달하지 못하고 임펠러 하단 영역에 큰 정체 영역을 형성하는 것을 볼 수 있다. 이는 입자의 지름이 커지면서 임펠러의 유동이 입자를 교반기 내부에서 상승시키지 못하고 입자에 미치는 중력장의 영향으로 입자가 침강하여 임펠러에 의해 생성되는 유동의 발달을 억제시키기 때문이다. 따라서 큰 지름을 갖는 입자보다 작은 지름을 갖는 입자의 경우 교반 성능이 향상됨을 알 수 있다.

Flat-turbine 임펠러 내부에서의 입자 분포를 입자 평균 지름 변화에 대한 수치해석의 결과인 (c), (f), (i)를 보면 임펠러 상단과 하단 영역에 걸쳐 입자가 교반되어 분포하는 것을 알 수 있다. 입자의 평균 지름이 0.0001m인 경우와 0.0003m인 경우의 수치해석 결과를 비교해 보면 같은 교반 회전수에 대하여 비교적 고루 분포하지만 입자의 평균 지름이 0.0009m인 경우 입자 분포

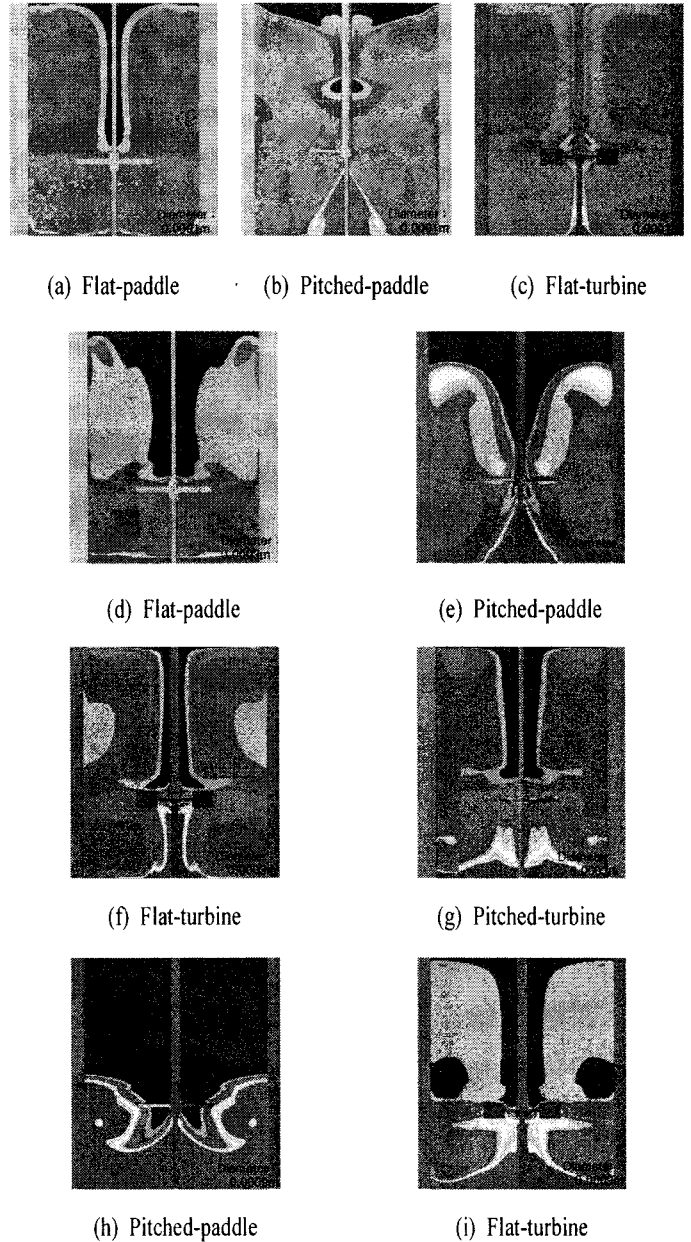


Fig. 3 Volume Fraction fields from each impeller in 500RPM

가 임펠러 하단 영역에만 교반되어 분포한다. Pitched-paddle 임펠러의 경우도 입자의 평균 지름이 커질수록 임펠러 하단 영역에 집중적으로 입자가 분포된다. 이는 입자의 크기가 증가할수록 임펠러 하단 영역으로 입자가 침강하여 정체영역을 형성하기 때문에 교반기 내부에서 임펠러 회전에 의해 생성되는 유동의 발달을 억제하기 때문이다.

3.3 해석 격자에 따른 유동해석

본 연구에서는 교반 회전수 500rpm이고 입자의 지름이 0.0003m일 때 Flat-paddle, Pitched-paddle, Flat-turbine, Pitched-turbine impeller에 의해 생성되는 교반기 내부의 유동 특징에 대하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 4는 각 임펠러의 속도 벡터에 대하여 나타낸 것이다. Pitched-paddle 임펠러에 의해 생성되는 교반기 내부 유동 특징은 임펠러 회전을 블레이드 기하학적 형상 때문에 블레이드에서 분출되는 유동의 방향은 반경 방향이 아닌 임펠러의 축에 편향된 유동을 생성시킨다. 이렇게 생성된 유동은 교반 탱크의 하단부분까지 발달하여 다시 임펠러 중심으

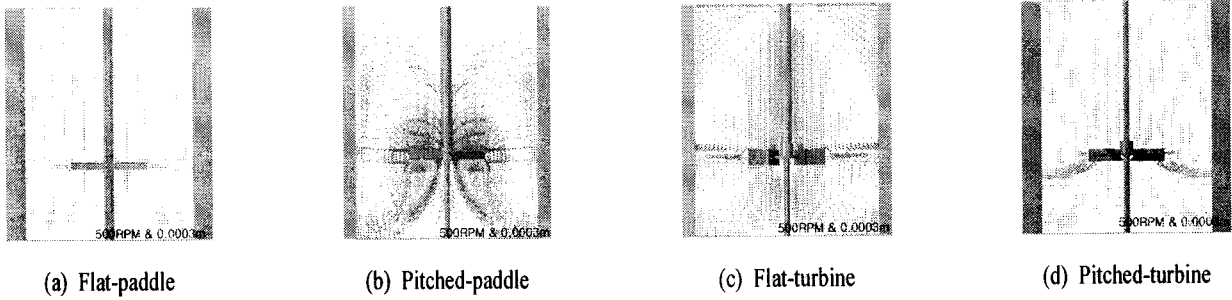


Fig. 4 Velocity fields from each impeller

로 흡입되는 교반기 내부에 하나의 큰 순환영역 유동을 형성시키는 특징을 갖고 있다. flat-turbine의 임펠러에 의해 생성되는 교반기 내부의 유동의 특징을 보면 임펠러 블레이드 팁부분에서 강한 와류를 형성시키며, 이로 인하여 반경방향으로 강한 유동을 분출하는 특징을 확인할 수 있다. 이 유동은 교반 탱크의 벽에서 상하의 두 개의 유동으로 나누어지며 시간 증가에 따라 임펠러 중심으로 위아래 두 개의 순환영역을 형성하는 특징이 있다.

Paddle type의 임펠러는 반경방향으로 유동을 강하게 발생시키는 flat type의 임펠러보다 축 방향으로 유동을 주로 발생시키는 pitched type의 임펠러가 교반 성능이 좋다. 반면 turbine type의 임펠러 경우 turbine의 특성으로 인해 임펠러 중심부분으로 정체영역이 집중하기 때문에 전체적으로 paddle type보다 유동이 충분히 퍼져 움직임이 활발하기 때문에 임펠러 하단의 정체영역은 적다.

4. 결론

본 연구에서는 산업 전반에 걸쳐 사용되는 교반기 중 배플을 갖는 flat-paddle, pitched-paddle, flat-turbine, pitched-turbine 임펠러의 다상유동에 대하여 연구하였다. 교반기 내의 작동 유체에 침강성을 지닌 입자가 존재하는 상태, 즉 작동 유체가 고-액체 상태에서의 다상유동을 Eulerian Two-Phase 방법을 이용하여 정상 상태 유동해석을 수행하여 임펠러의 유동 특성과 교반 회전수의 변화, 입자 지름의 변화 및 해석 격자의 변화가 교반기 내부에 존재하는 입자의 유동 분포에 미치는 영향을 확인하였다.

수치해석 결과 입자의 분포는 임펠러의 유동 특성의 영향을 받아 반경방향을 주 유동으로 받는 flat type의 임펠러보다 축 방

향으로 유동을 발생시키는 pitched typed의 임펠러에서의 정체 영역이 줄어든다. 교반 회전수가 증가 할수록 교반기 내부의 입자 분포는 탱크 하단 부분에서 임펠러의 중심으로 갈수록 교반기 전 영역에 고루 분포한다. 또한 입자의 지름이 0.0001m, 0.0003m 인 경우 입자가 갖는 중력장보다 임펠러에 의해 생성되는 유체의 유동이 더 활발하여 영향을 많이 받지 않는 반면 입자의 지름이 0.0009m는 입자에 미치는 중력장의 영향으로 인해 임펠러의 유동이 입자를 교반기 내부에서 상승시키지 못하기 때문에 입자 침강 영역이 많아진다.

후 기

본 연구는 (주)하도의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Kumaresan, T. and Joshi, J.B., 2006, "Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks," *Chemical Engineering Journal*, Vol.115, pp.173-193.
- [2] Derksen, J.J., 2003, "Numerical simulation of Solids suspension in a Stirred Tank," *AIChE J.*, Vol.49-11, pp.2700-2714.
- [3] 안익진, 허남건, 2004, "자유표면을 고려한 교반기 내부의 비정상 유동해석," *한국유체공학회*, 제3회, pp.247-250.
- [4] 차효숙, 송현섭, 한상필, 2005, "CFD를 이용한 고분자 반응기 내 입자 부유에 관한 연구," *한국전산유체공학회*, pp.31-34.
- [5] Paul, E.L., *Handbook of industrial mixing science and practice*