



## 배플 형상에 따른 교반기 내부 고체입자 분포의 비정상상태 해석

김치겸,<sup>1</sup> 원찬식,<sup>2</sup> 허남건<sup>\*3</sup>

### TRANSIENT SIMULATION OF SOLID PARTICLE DISTRIBUTION WITH BAFFLES DESIGN PARAMETERS IN A STIRRED TANK

Chi Gyeom Kim,<sup>1</sup> Chan-Shik Won<sup>2</sup> and Nahmkeon Hur<sup>\*3</sup>

*In the present study, a numerical simulations are investigated in a stirred solid/liquid system by using Eulerian multi-phase model. The transient flow field of liquid phase and distribution of solid particles are predicted in stirred tanks consisting of 4-pitched paddles impeller and baffles. The effects of number and width of baffles on the mixing time and the quality of solid suspension in a stirred tank are presented numerically. The result shows that the mixing time decreases as the width and number of baffles increase.*

**Key Words :** 이상 유동(Two-Phase Flow), 고체 입자 분산(Solid Particle Suspended), 방해판(Baffle), 교반기(Stirred Tank)

#### 1. 서 론

여러 가지 교반 시스템 중에서 고체/액체 교반은 폴리머합성, 도료합성, 식품산업 등 여러 가지 산업에 이용된다. 고체/액체 시스템의 효율적인 교반을 위하여 교반기 내부의 고체와 액체 상이 균일한 혼합이 필요하다. 배플은 액체보다 무거운 고체입자가 포함된 혼합과정에 반드시 필요하다. 배플들은 교반기 내부에서 축방향의 유동을 회전유동으로 변환 시켜 고체 입자의 혼합을 유도한다. 임펠러의 회전은 고체상과 액체상 사이의 경계에서 복잡한 와류와 운동량 전달을 야기한다. 고체/액체 시스템은 상대운동, 액체 유동, 입자간의 전달력과 난류 소산 등 다양한 힘의 영향을 받기 때문에 교반기 내부 유동은 매우 복잡한 3차원 유동 특성을 갖는다. 고체입자의 균일한 혼합을 위한 동력과 회전속도의 예측을 위하여 고체/액체 교반 시스템에서의 유체 역학과 효율적인 교반에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 목적을 위하여 PIV와 LDV 등을 이용한 고체/액체 교반 시스템에 대한 실험적인 연구가 많이 진행되고 있다.

Armenante 와 Nagamine[1]은 회전 속도와 임펠러의 간격 따른 고체/액체 이상 교반에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. Sessieq 등[2]은 고체 입자의 분산에 고체 입자의 밀도와 회전 속도가 미치는 영향을 연구하였다. Wu 등[3]은 여러 가지 임펠러 형상에 따른 실험을 수행하였다. 그들의 결과는 고체입자의 분산과 유동장에 대해서 임펠러의 형상에 대한 영향들을 보여준다. Angst와 Kraume[4]는 내시경 카메라를 이용한 실험에서 물과 유리 입자의 교반 탱크의 크기를 다르게 할 때 입자의 분포를 분석하였다. Biswas 등[5]은 모래와 물의 교반에서 배플의 영향을 조사하였다. 그러나 대부분의 실험에서 고체입자의 분산 높이와 경험식에 관련된 연구들이 진행되었지만 유동장에 대한 연구는 부족하였다. 최근 CFD의 발달로 복잡한 교반기 형상의 모델링과 자세한 유동장과 고체입자의 분산에 대한 연구가 진행되고 있다. Montante 등[6]은 고체입자의 분산과 유동장에 대하여 실험과 수치해석의 결과를 비교하였다. Bakker[7]은 Eulerian-granular 모델의 검증을 위하여 고체 입자의 분산을 수치해석을 하였다. Ochieng와 Lewis[8]는 실험과 수치해석을 이용하여 물과 니켈입자의 교반을 고체입자의 크기에 따른 영향을 연구하였다. 고체 입자의 분산에 대한 많은 연구들이 수행되었지만 다양한 형상의 교반탱크와 임펠러에 의한 복잡한 유동 현상을 산업현장에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 그래서 다양한 조건에서의 교반 유동의 특성과 고체입자의 분산에 대한 연구가 필

1 서강대학교 대학원

2 정회원, 서강대학교 기계공학과

3 종신회원, 서강대학교 기계공학과

\* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

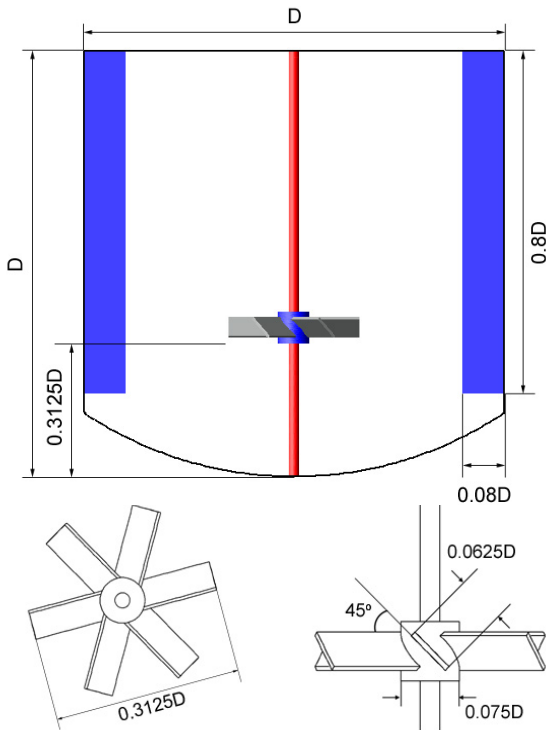


Fig. 1 Agitator geometry

요하다. 본 연구에서는 고체/액체 교반 시스템에서 다양한 작동조건의 수치해석을 수행하고자, 고체 분산의 질과 교반 시간에 대한 배플 조건의 영향을 시간에 따라 연구하였다.

## 2. 수치적 모델

### 2.1 수치해석 방법

Eulerian multi-phase 방법을 이용하여 배플이 달린 교반기 내부의 고체 입자의 분산을 수치해석 하였다. Eulerian multi-phase 방법은 유동 영역에 공존하는 각 상이 서로의 상에 침투하는 것으로 취급하여 수치해석 하는 방법이다. 각 상에 대하여 질량과 운동량 보존방정식을 풀이한다. 각 상에 의하여 채워진 유동 영역의 부분은 체적분율로 주어지고 각 상은 각각의 속도와 압력, 물리적인 성질을 갖는다. Eulerian multi-phase 방법의 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k) = \\ -\alpha_k \rho_k \mathbf{g} + \nabla \cdot [\alpha_k (\boldsymbol{\tau}_k + \boldsymbol{\tau}_k')] + \mathbf{M}_k + (\mathbf{F}_{int})_k \end{aligned} \quad (2)$$

$$\sum_{k=c}^d \alpha_k = 1 \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_d = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{VM} + \mathbf{F}_L \quad (4)$$

여기서 ' $\alpha_k$ '는 각 상의 체적 분율을 나타낸다. 하첨자 ' $c$ '와 ' $d$ '는 각각 분산 상과 연속 상을 참조한다. 각 상의 운동량은 서로 다른 상의 모든 힘의 합과 같은 것으로 나타난다. 각 상이 교환하는 운동량은 항력, 가상력, 양력으로 구성된다. 각 상이 포함하는 내부 힘은  $(\mathbf{F}_{int})_k$ 로 나타내어 진다. 현재 릴리스에서 내부 힘은 분산 상의 입자간의 서로 작용하는 힘으로 정해진다. 고체 입자의 분산 유동의 분석에서 고체 입자의 밀도는 연속 상인 유체의 밀도보다 높다. 그래서 고체 입자의 항력 계수에 대한 모델링은 중요하다. 고체 입자의 분산에서 고체 고체 입자의 밀도는 연속상인 유체의 밀도보다 높다. 유체 내부의 고체 입자의 분산을 해석하기 위하여 식 (5)과 같은 Schiller-Naumann 방법을 고려하였다.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}) ; 0 \leq Re_d \leq 1000 \\ 0.44 ; Re_d > 1000 \end{cases} \quad (5)$$

$|u_r|$ 은 유체와 고체 입자사이의 상대속도를 나타낸다. 고체 입자의 피집과 고체 입자 사이의 충돌 때문에 생기는 전단력을 고려하였다. 그리고, 식 (2)의 내부 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$(\mathbf{F}_{int})_k = -e^{-600(\alpha_{d,max} - \alpha_d)} \nabla \alpha_d \quad (6)$$

$$\alpha_{d,max} = 0.63 \quad (7)$$

식 (7)에 표현은 각 단위 격자의 최고 체적분율이 0.63으로 제한되는 것을 의미한다. 고체 입자간의 충돌과 누적으로 인하여 단위 격자에서의 입자 체적분율은 제한된다.

### 2.2 해석격자와 경계조건

본 연구에서는 Angst 등[4]의 연구에 사용한 실험조건을 이용하여 수치해석을 수행하고 비교하였다. CFD 수치해석은



Fig. 1과 같은 0.2m 지름의 교반기에서 수행하였다. 등근 바다의 교반기 4개 또는 6개의 pitched blade 터빈은 아래방향으로 펌핑한다. 교반기의 액체 높이는 교반기의 지름과 같다. 고체 입자의 분산과 교반 시간에 배플의 형상이 미치는 영향은 배플의 폭과 숫자에 따라 연구를 수행하였다. 수치해석은 419 rpm의 임펠러 회전속도에서 수행하였다. 평균적으로 200  $\mu\text{m}$ 의 지름과 2400  $\text{kg/m}^3$ 의 밀도에서 분산상으로 사용된다. 평균적인 분산상의 체적비율은 전체 교반기의 5%를 차지한다. 고체 입자는 교반기의 바닥에 깔려있다. 본 연구의 수치해석은 MRF를 사용하여 계산하였다. MRF 방법에서 격자는 두 개의 영역으로 나뉜다. 임펠러와 함께 회전하는 영역과 교반 탱크와 붙어있는 배플이 있는 정지된 영역으로 나뉜다. 교반기의 벽은 No-slip 벽의 경계조건이 적용되고, 액체표면은 대칭경계조건이 적용된다. 본 연구는 CFD 소프트웨어인 STAR-CD V3.24[9]를 이용하여 비정상상태, 비압축 유동으로 수행되었다. 난류 모델로써 k-e 모델을 사용하였다. AMD Opteron 64 bit processor 2.4 GHz 8 CPU 리눅스 클러스터를 이용하여 병렬계산 하였다. 유동의 주기성을 이용하여 교반기의 1/2을 모델링 하였고 390,000개의 계산격자를 수치해석에 이용하였다.

### 3. 수치 해석 결과

#### 3.1 시간에 따른 유동장과 고체입자 분포의 변화

수치해석의 방법에 따른 결과와 실험을 비교하기 위하여 Angst 등[4]의 실험 결과를 이용하였다. Fig. 2는 바닥에서부터 0.25D, 0.55D, 0.75D의 거리만큼 떨어진 위치에서 반경 방향으로 평균한 고체입자의 체적분율을 수치해석과 실험 결과로 비교한 그림이다. 0.25D와 0.55D의 거리에서 실험결과는 수치해석의 예측값과 매우 유사하다. 0.75D의 거리에서의 실험과 수치해석의 결과는 수표면 근처의 벽에서 고체 입자 분포의 불규칙성에 기인하여 약간의 차이가 있지만, 전체적으로 수치해석의 해석을 통한 예측값은 실험결과와 일치한다. Fig. 3과 Fig. 4는 교반기 내부의 연속상인 물의 유동장과 고체입자 분포를 나타내는 체적분율의 시간에 따른 변화를 나타낸다. Fig. 3(a)는 교반기 시작되고 0.1초 후의 고체 입자의 분포를 나타낸다. 바닥에 침전되어 있는 고체 입자들이 교반기 전

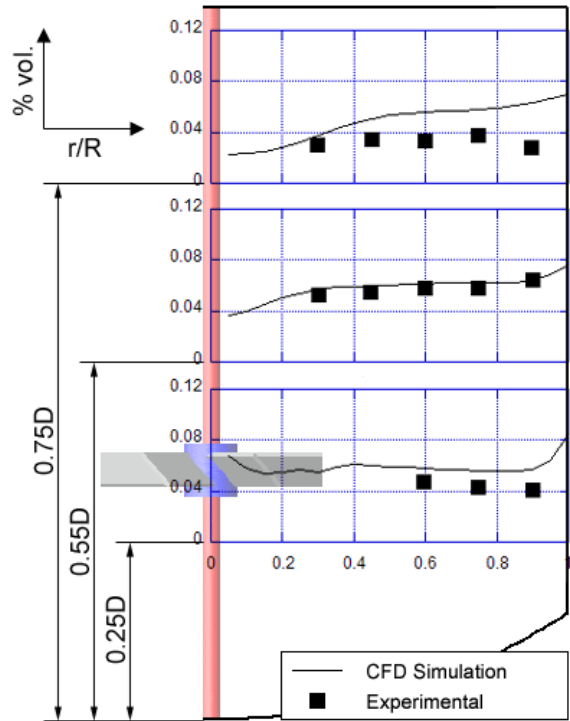


Fig. 2 Local solid volume fractions in a vessel

체에 아직 퍼지지 못하였기 때문에 연속상의 속도장은 급격하게 변하고 불안정하다. 교반기 시작되고 1초 후에는 Fig. 3(b)과 같이 고체 입자가 교반기의 벽을 타고 위로 솟아오르는 것을 예측할 수 있다. Fig. 4(b)는 pitched paddle impeller의 유동 특성인 축방향의 회전 유동이 형성되는 것을 보여준다. 그러나, 연속 상의 회전 유동은 교반탱크의 벽에 미치지 못한다. 3초 후에 Fig. 3(c)에서 보이는 액체 상의 속도장은 교반기 내부에서 규칙적인 축방향 회전 유동을 나타내게 된다. 고체 입자의 분포가 변하더라도 입자가 퍼지는 높이는 계속 유지된다. 3초 후부터 고체 입자는 유동이 순환하는 영역에서 지속적으로 분산된다. 교반기 내부의 입자 분포와 유동장은 8초 후에는 거의 변하지 않게 되어 고체/액체 시스템은 준 정상상태를 유지하게 된다.

Table 1 Different baffle models

Model No.	The number of baffles	The width of baffles
1	4 (90° intervals)	0.08D
2	4 (90° intervals)	0.04D
3	6 (60° intervals)	0.08D
4	6 (60° intervals)	0.04D

#### 3.2 배플의 형상에 따른 고체 입자의 분포

배플의 개수와 폭에 따른 교반기 내부 고체입자 분포의 변화를 예측하기 위하여 네 개의 서로 다른 배플 모델에서 고체/액체 이상 교반 유동을 수치해석 하였다. 수치해석 모델은 Table 1과 같은 모델들을 고려하였다. 수치해석 결과를 이용하여 Fig. 5와 같이 각 모델들 간의 시간에 따라 교반기 내부에 퍼져있는 고체입자의 표준편차를 비교하였다. 표준 편차

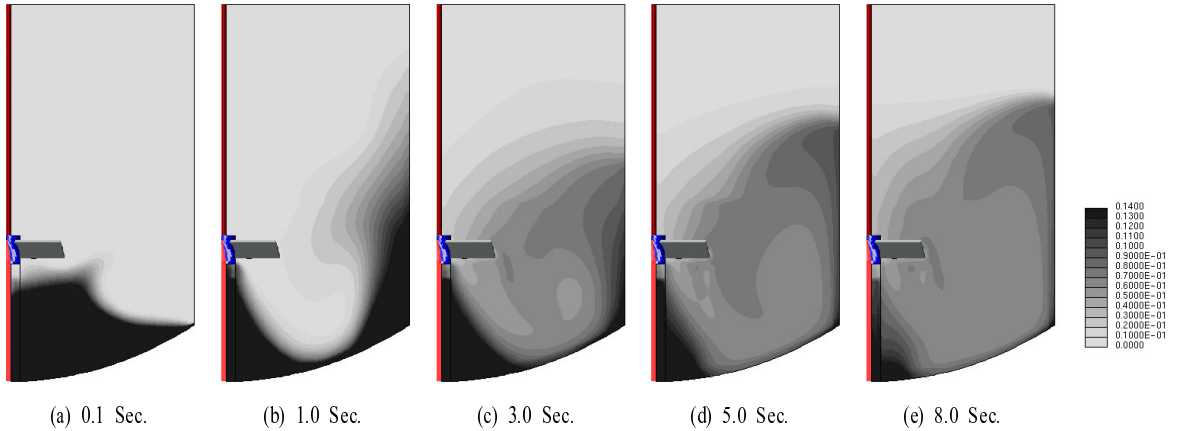


Fig. 3 Solid concentration distribution

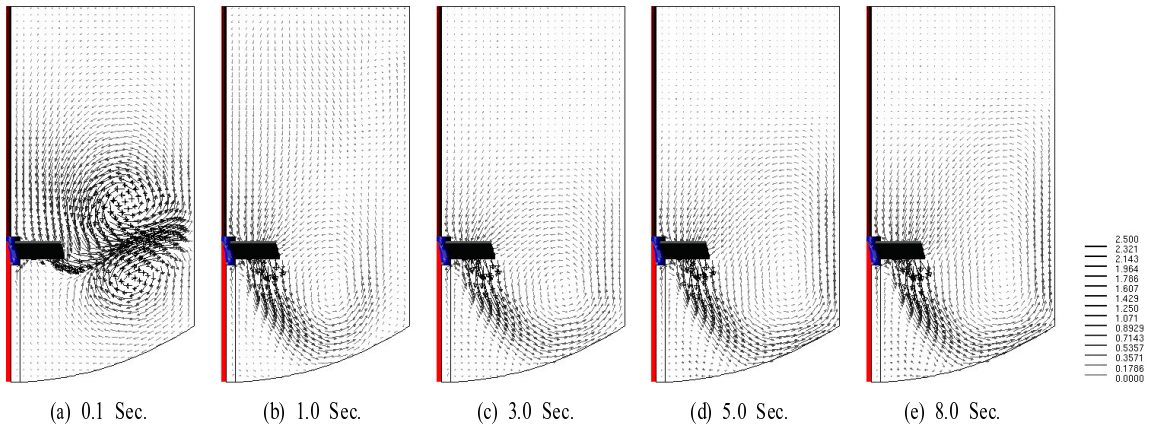


Fig. 4 Velocity vector of Liquid phase

는 교반기 내부의 고체 입자의 분산의 질을 예측하기 위하여 사용하였고, 반경 방향으로 평균된 체적분율을 균일한 간격의 측정 위치에서 측정하여 계산하였다. 표준편차의 계산 방법은 식 (8)를 따른다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\alpha_i}{\alpha_{avg}} - 1 \right)^2} \quad (8)$$

‘ $\alpha_i$ ’는 교반기 내부의 i-번째 위치에서의 고체 입자의 체적 분율을 나타내고, ‘ $\alpha_{avg}$ ’는 고체 입자의 평균 체적 분율을 나타낸다. 전 단락에서 언급한 바와 같이 교반 초기에 고체 입자들은 바닥에 깔려 있다가 상승하기 때문에 3초 이내의 유동장은 변화가 매우 심한 불안정한 상태가 된다. 그러므로 Fig. 5에서 보이는 것처럼 3초 이내의 표준편차는 불안정하다.

3초 이후에 유동장은 축방향의 회전 유동을 유지하면서 고체 입자가 고르게 퍼지기 때문에, 12초 까지 표준편차는 서서히 낮아진다. 12초 후에 각 배플 모델의 표준편차는 거의 같다. 고체 입자의 분포는 준 정상상태에 이르게 될 때 같은 형상의 교반기에서 배플의 폭과 숫자는 교반의 질에 거의 영향을 주지 않는 것을 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 반면에 교반 시간은 배플의 폭과 숫자에 영향을 받는다. 배플의 폭은 교반 시간에 영향을 준다. Fig. 5의 배플의 폭이 0.04D인 모델의 표준편차 그래프를 보면 고체 입자의 표준편차가 준 정상상태의 5% 이내로 도달하는 위하여 10초 가량의 시간이 필요한 것을 알 수 있다. 배플의 폭이 0.08D인 경우에는 9초 가량의 시간이 흐른 뒤의 표준편차가 0.04D의 폭 일 경우와 같은 범위에 접근한다. 배플의 폭이 절반일 줄어들 때 교반시간은 1초 가량 감소한다.

방해판의 숫자는 교반 초기에 고체 입자의 분산의 질에 영



후 기

본 연구는 중소기업청의 선도형 기술혁신 전략과제 지원사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 1998, Armenante, P.M. and Nagamine, E.U., "Effect of low off-bottom impeller clearance on the minimum agitation speed for complete suspension of solids in stirred tanks," *Chemical Engineering Science*, Vol.53, No.9, pp.1757-1775.
- [2] 1999, Sessieq, P., Mier P., Gruy, F. and Cournil, M., "Solid Particles Concentration Profiles In An Agitated Vessel," *Trans IChemE*, Vol.77, Part A, pp.741-746.
- [3] 2001, Wu, J., Zhu, Y. and Pullum, L., "Impeller Geometry Effect on Velocity and Solids Suspension," *Trans IChemE*, Vol.79, Part A, pp.989-997.
- [4] 2006, Angst, R. and Kraume, M., "Experimental investigations of stirred solid/liquid systems in three different scales: Particle distribution and power consumption," *Chemical Engineering Science*, Vol.61, No.9, pp.2864-2870.
- [5] 1999, Biswas, P.K., Dev, S.C., Godiwalla, K.M. and Sivaramakrishnan, C.S., "Effect of some design parameters on the suspension characteristics of a mechanically agitated sand-water slurry system," *Materials and design*, Vol.20, pp.253-265.
- [6] 2001, Montante, G., Micale, G., Magelli, F. and Brucato, A., "Experiments and CFD Predictions of Solid Particle Distribution in a Vessel Agitated with Four Pitched Blade Turbines," *Trans IChemE*, Vol.79, Part A, pp.1005-1010.
- [7] 2004, Bakker, A., *Technical Note 253*, Fluent Inc.
- [8] 2006, Ochieng, A. and Lewis, A.E., "CFD simulation of solids off-bottom suspension and cloud height," *Minerals Engineering*, Vol.19, No.2, pp.180-189.
- [9] 2004, *STAR-CD Methodology Version 3.24*, Computational Dynamics Ltd.

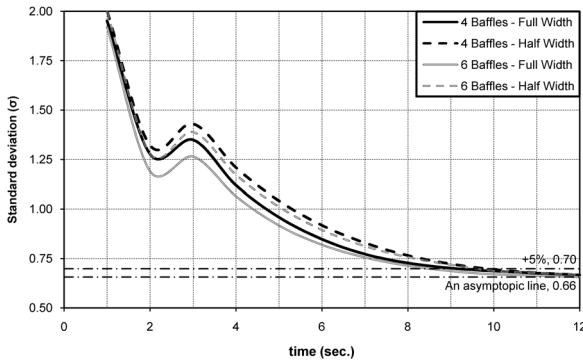


Fig. 5 Influence of baffle design on suspension quality

향을 준다. 균일한 교반 상태에 이르는 시간이 같더라도 6-배플 모델의 표준편차가 4-배플 모델의 표준 편차보다 작다. 균일한 교반 상태에 이르기 전에 표준 편차는 배플의 폭과 관계 없이 배플의 숫자가 많을수록 작아진다는 것을 보여준다. 4개의 0.08D 폭의 모델과 6개의 0.08D 폭의 모델에서의 표준 편차의 차이는 배플의 폭을 다르게 했을 경우의 차이보다 크다. 표준편차는 배플의 숫자와 폭에 따라 급격하게 감소한다.

5. 결 론

본 연구에서는 Eulerian multi-phase 방법을 이용하여 고체 입자 분포의 시간에 따른 변화를 수치해석을 통해 연구하였다. 임펠러의 회전에 의해 발생하는 축 방향의 유동은 가라앉아 있는 고체 입자의 분산을 유도한다. 그 동안에 고체 입자의 분포는 준 정상상태에 이르게 된다. 준 정상상태에서 고체 입자의 체적분율은 실험 결과와 비교되었다. 교반기의 수 표면 근처에서의 수치해석 결과는 실험결과와 약간의 차이가 있었지만, 교반기의 표면 아래에서 수치해석의 고체 입자 체적분율의 예측은 문헌에 나온 실험 결과와 잘 일치하였다. 덧붙여서 고체 입자의 분포가 준 정상상태에서 이르게 될 때 배플의 숫자와 폭이 고체 분상의 질에 미치는 영향이 없다는 것을 확인하였다. 그러나 배플의 폭이 넓어질수록 교반 시간은 감소한다. 배플의 숫자가 증가할수록 교반의 질을 나타내는 표준편차는 급격하게 감소한다.