

# 배플 형상에 따른 교반기 내부 고체입자 분포의 비정상상태 해석

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

## TRANSIENT SIMULATION OF SOLID PARTICLE DISTRIBUTION WITH VARIOUS DESIGN PARAMETERS OF THE BAFFLE IN A STIRRED TANK

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

*In the present study, numerical simulations were performed in a stirred solid/liquid system by using Eulerian multi-phase model. The transient flow field of liquid and distribution of solid particles were predicted in the stirred tank with pitched paddle impeller and baffles. The Frozen rotor method is adopted to consider the rotating motion of the impeller. The effects of number and width of baffles on the mixing time and the quality of solid suspension in the stirred tank are presented numerically. The result shows that the mixing time decreases as the width and number of baffles increase. The present numerical methodology can be applied to optimizing mixing condition of industrial mixer.*

**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 내부 고체와 액체의 균일한 혼합이 필요하다. 이때 배플은 교반기 내부에서 회전유동을 축방향 유동으로 변환 시켜 고체 입자의 효율적인 혼합을 유도하기 때문에 매우 중요하다. 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.

최근 PIV와 LDV 등을 이용한 고체/액체 교반 시스템에 대한 실험을 수행함에 따라 효율적인 교반을 위한 변수들과 교반 성능에 대한 평가가 이루어지고 있다. Armenante와 Nagamine[1]은 회전 속도와 임펠러의 간격에 따른 고체/액체 이상 교반에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. Sessicq 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 따른 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 높기와 경험식에 관련된 연구들이 진행되었지만 유동장에 대한 연구는 부족하였다.

최근 CFD의 발달로 복잡한 교반기 형상의 모델링 및 자세한 유동장과 고체 입자의 분산에 대한 연구가 진행되고 있다. Montante 등[6]은 고체입자의 분산과 유동장에 대하여 실험과 수치해석의 결과를 비교하였다. Bakker[7]는 Eulerian-granular 모델의 검증을 위하여 고체 입자의 분산을 수치해석 하였다.

접수일: 2009년 3월 9일, 수정일: 2009년 12월 30일,

계재확정일: 2009년 12월 30일.

1 정회원, 서강대학교 대학원

2 정회원, 서강대학교 기계공학과

3 종신회원, 서강대학교 기계공학과

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

Ochieng와 Lewis[8]는 실험과 수치해석을 이용하여 물과 니켈 입자의 교반에서 고체입자의 크기에 따른 영향을 연구하였다. 위와 같이 교반 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 필요하다.

본 연구를 수행하기에 앞서 교반기 유동 특성에 관한 연구로 임펠러의 형상 및 자유표면의 영향 등에 대해 수치해석을 수행하였다. 장재원과 허남건[9]은 45° Pitched paddle 임펠러를 갖는 교반기의 작동유체가 Newtonian 유체인 물의 경우에 대해 수치해석을 수행하여 교반기 내부의 유동특성을 연구하였으며, 안익진 등[10]은 임펠러 형상에 따른 교반기내 유동 특성을 임펠러 형상에 따른 자유표면 와류 거동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 그러나 이와 같은 교반기 형상에 따른 유동 특성 연구는 실제 산업 현장에서 많이 쓰이는 고체/액체 이상(two phase) 교반시 유동 특성을 잘 예측하지 못하는 단점이 있다. 그에 따라 김치겸 등[11]은 고체입자의 체적비율에 따른 임펠러의 최적화된 회전수를 연구하였다. 본 연구에서는 기존 선행 연구를 바탕으로 시간에 따른 고체 분산의 질과 교반 시간에 대한 배플 조건의 영향을 연구하였다.

## 2. 수치적 모델

### 2.1 수치해석 방법

본 연구에서는 Eulerian multi-phase method를 이용하여 배플이 달린 교반기 내부의 이상 유동을 해석하였다. Eulerian multi-phase method는 고체/액체, 기체/액체 등 서로 다른 상을 가진 물질이 같은 검사체적(control volume)에 있는 경우 체적분율(volume fraction)에 따라 각 상에 대하여 지배방정식을 계산한다. 상의 경계에서 발생하는 상호 작용에 의한 유체의 운동을 운동량 방정식에 추가항으로 넣어 계산하며, Eulerian multi-phase method의 지배 방정식은 다음과 같다[12].

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

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

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

여기서  $\alpha$ 는 각 상의 체적 분율을 나타내며,  $\rho$ 는 밀도,  $\mathbf{u}$ 는 평균 속도를 의미한다. 식 (2)에서  $\tau_k$ 와  $\tau_k'$ 은 각각 분자 및 난류 응력,  $\mathbf{g}$ 는 중력을 의미한다. 또한  $\mathbf{M}_k$ 는 단위 체적당 각 상 사이 상호 교환하는 운동량의 항이다. 지배방정식에 쓰인 하첨자  $k$ 대신  $c$ 와  $d$ 를 사용하여 각각 연속상(continuous phase)과 분산상(dispersed phase)을 나타낸다. 체적분율의 합은 식 (3)과 같이 항상 1을 만족한다. 각 상의 내부 힘(internal force)은  $(\mathbf{F}_{int})_k$ 는 분산되는 상의 입자 간에 작용하는 힘으로 다음과 같이 표현된다[13,14].

$$(\mathbf{F}_{int})_k = -e^{-600(\alpha_{d,max} - \alpha_d)} \nabla \alpha_d \quad (4)$$

본 연구에서는  $\alpha_{d,max} = 0.63$ 으로 설정하였는데, 이는 구형 강체 입자의 최대 체적 분율을 나타낸다.

$$\mathbf{M}_d = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{VM} + \mathbf{F}_L \quad (5)$$

각 상의 운동량은 서로 다른 상으로의 모든 영향력의 합과 같은 것으로 나타나며, 2상에서 연속상과 분산상의 운동량은 크기가 같고 부호가 반대이다( $\mathbf{M}_c = -\mathbf{M}_d$ ). 식 (5)와 같이 각 상이 교환하는 운동량은 항력( $F_D$ ), 가상력( $F_{VM}$ ), 양력( $F_L$ )으로 구성되는데, 분산상인 고체 입자의 밀도는 연속상인 유체의 밀도보다 높으므로 고체 입자의 항력 계수에 대한 모델링이 중요하며, 항력( $F_D$ )은 항력 계수( $C_D$ )가 정해진 후 완전히 정의된다. 유체 내부의 고체 입자의 분산을 해석하기 위하여 구형 입자의 항력 계수( $C_D$ )를 고려함에 있어 식 (6)과 같은 Schiller-Naumann 방법을 적용하였다[12].

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}) & ; 0 \leq Re_d \leq 1000 \\ 0.44 & ; Re_d > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

여기서, 입자의 레이놀즈 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_d = \frac{\rho_c |\mathbf{u}_r| d}{\mu_c} \quad (7)$$

$\mathbf{u}_r$ 은  $\mathbf{u}_c - \mathbf{u}_d$ 로 정의되며,  $d$ 는 입자의 직경을 의미하고,  $\mu_c$ 는 연속상의 점도를 의미한다.

### 2.2 해석모델과 경계조건

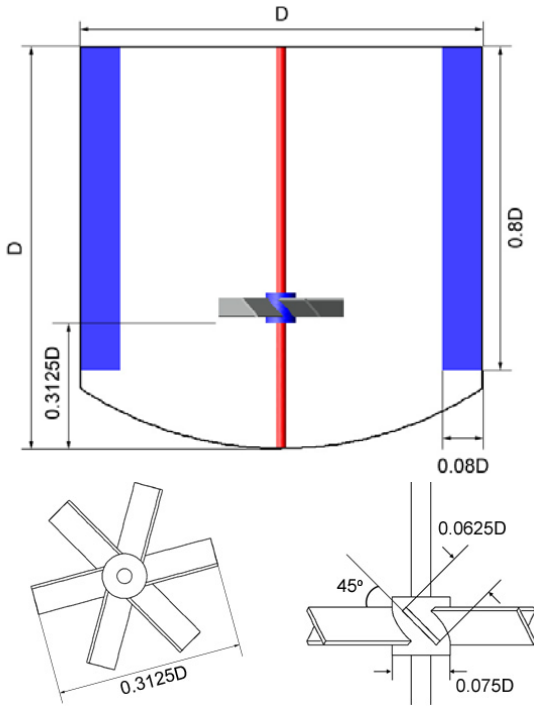


Fig. 1 Agitator geometry

본 연구에서는 Angst와 Kraume[4]의 연구에 사용한 실험조건을 이용하여 수치해석을 수행하고 비교하였다. CFD 수치해석은 Fig. 1과 같은 0.2 m 지름의 교반기에서 수행하였다. 6-blade pitched paddle 임펠러는 유체를 교반기 바닥으로 밀어내는 유동을 형성하며, 교반기내 액체의 높이는 교반기의 지름(D)과 같다. 위의 조건하에서 배플의 형상이 고체 입자의 분산과 교반 시간에 미치는 영향을 분석하기 위해 배플의 폭과 숫자를 변화시키며 연구를 수행하였다. 임펠러 회전속도는 419 rpm으로 고정되어 있다. 교반액체는 물로 하였고, 분산되는 고체입자는 직경이 200 μm이고 밀도가 2400 kg/m<sup>3</sup>의 유리 입자이다. 분산상의 체적비율은 전체 교반기의 체적의 5%이며, 초기에 고체 입자는 교반기의 바닥에 분포한다.

본 연구에서는 임펠러의 회전을 수치적으로 모사하기 위하여 고정 회전자 방법(Frozen Rotor Method)을 적용한 비정상상태 유동해석을 수행하였다. STAR-CD에서 제공하는 다중 회전상대 구조(Multiple rotating reference frame)방법 중 하나인 다중 회전 구조 음해법(Implicit multiple rotating frame)을 사용하여 유체의 운동량 보존식에 생성항을 더해줌으로써 임펠러가 회전하는 효과를 나타내었다. 이때 유동속도가 가장 빠를 것으로 예상되는 임펠러 팁영역의 속도를 고려하여, CFL 수를 1 미만으로 하기위해 time step을 0.00025초로 설정하여 해석을 수행하였다. 또한 교반기 내부의 유동이 충분한 정상상태로

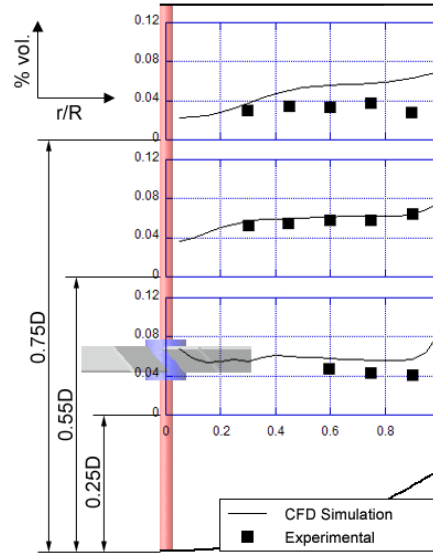


Fig. 2 Local solid volume fractions in a vessel

도달할 수 있는 시간인 12초까지 해석시간을 설정하였다.

교반기의 벽은 No-slip 벽의 경계조건이 적용되고, 액체표면은 대칭경계조건이 적용되었다. 419rpm의 회전속도에서 고체입자의 밀도가 2400 kg/m<sup>3</sup> 일 때의 입자의 분산정도를 실험결과와 비교하였고, 고체 입자의 밀도에 따른 교반기내 분포에 대하여 해석하고, Table 1과 같이 배플의 형상을 변화시키면서 수치해석을 수행하였다.

본 연구는 상용코드인 STAR-CD V3.24[12]를 이용하여 해석하였으며, 난류 모델로써 k-ε 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 Angst와 Kraume[4]의 실험 결과를 이용하였다. Fig. 2는 바닥에서부터 0.25D, 0.55D, 0.75D의 거리만큼 떨어진 위치에서

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

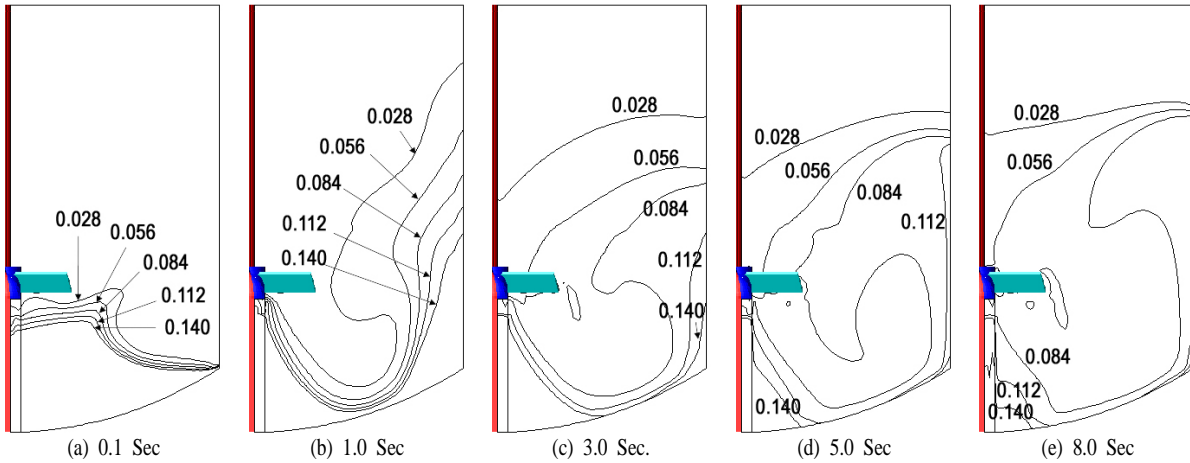


Fig. 3 Plot section of solid concentration distribution

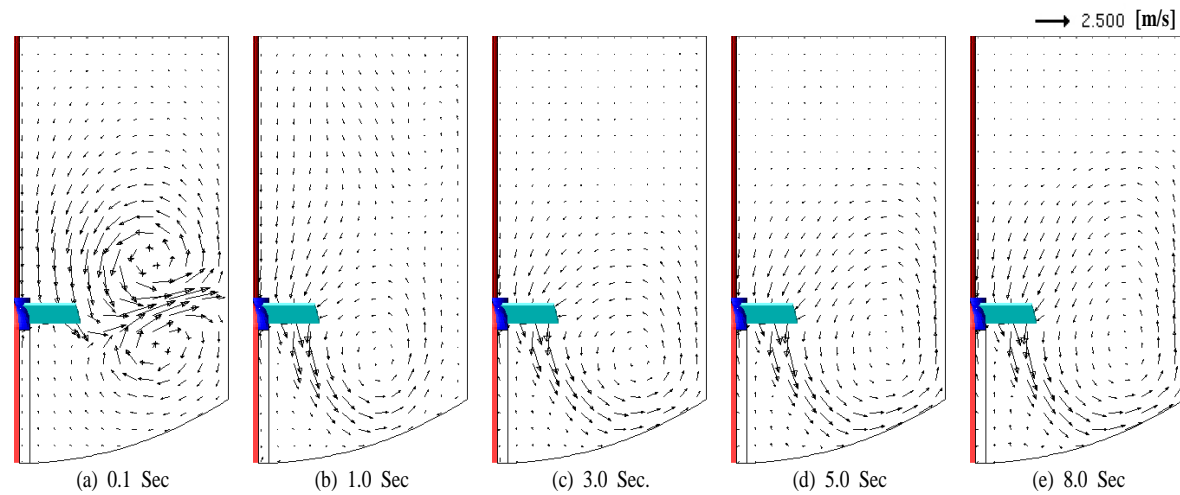


Fig. 4 Plot section of velocity vector of liquid phase

반경 방향으로 평균한 고체입자의 체적분율을 수치해석과 실험 결과로 비교한 그림이다. 0.25D와 0.55D의 거리에서 실험 결과는 수치해석의 예측값과 매우 유사하다. 0.75D의 거리에서의 실험과 수치해석의 결과는 전체적으로 수치해석을 통한 예측값은 실험 결과와 일치하며, 표면 근처에서 고체 입자 분포의 불규칙성에 기인하여 약간의 차이가 발생하는 점은 자유표면의 영향에 기인한 것으로 예측된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 고체입자 체적분율과 교반기 내부의 물의 속도장의 시간에 따른 변화를 나타낸다. Fig. 3 (a)는 교반이 시작되고 0.1초 후의 고체 입자의 분포를 나타낸다. 바닥에 침전되어 있는 고체 입자들이 교반기 전체에 아직 퍼지지 못하였기 때문에 연속상의 속도장은 Fig. 4 (a)와 같이 급격하게 변하고 불안정하다. 교반이 시작되고 1초 후에는 Fig. 3 (b)와 같이 고체 입자가 교반기의 벽을 타고 위로 솟아오르는 것을 예

측할 수 있다. Fig. 4 (b)는 pitched paddle impeller의 유동 특성이 축방향의 회전 유동이 형성되는 것을 보여준다. 그러나 연속상의 회전 유동은 교반탱크의 벽에 미치지 못한다. 3초 후에 Fig. 3 (c)에서 보이는 액체의 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.

Fig. 5는 높이에 따라 반경방향으로 평균한 고체 입자의 체적 분율의 분포를 시간에 따라 나타낸 그림이다. 교반 초기에는 바닥에 집중적으로 고체 입자가 분포 하면서 교반기 전체에 고르게 고체입자가 분포하지 않지만, 교반을 계속 하면서 교반기 내부의 고체 입자 분포가 정상상태로 안정화 되는 것을 확인 할 수 있으며, 정상상태까지 도달하는 데는 약 10초 가량의 교반 시간이 필요한 것을 그림을 통해 알 수 있다.

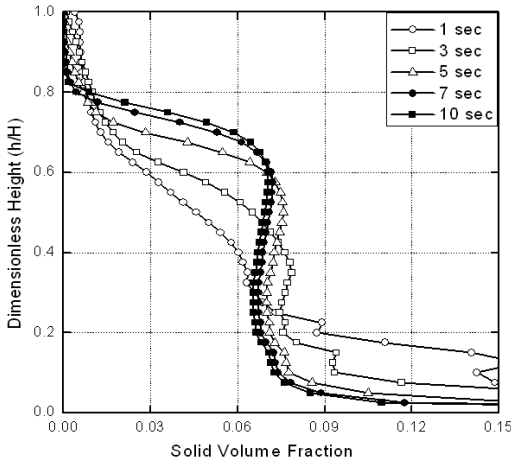


Fig. 5 Axial distribution of solid concentration in different time steps ( $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$ )

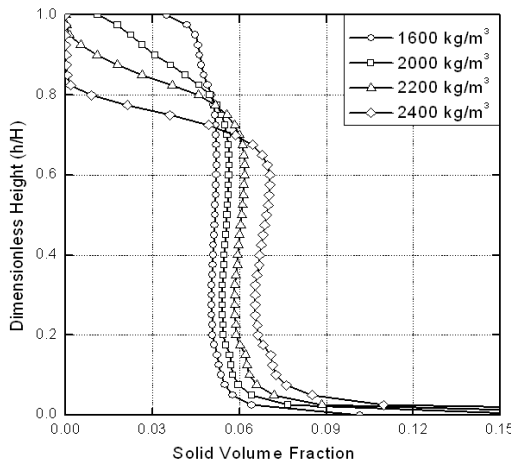


Fig. 6 Axial distribution of solid concentration with various density of solid particles

3.2 고체 입자의 밀도에 따른 분포 예측

동일한 회전속도(419 rpm)에서 고체 입자의 밀도(1600, 2000, 2200, 2400  $\text{kg/m}^3$ )에 따라 고체입자의 분포를 수치해석을 통해 예측하였다. 정상상태 교반에 이를 때까지 교반시간과 그 때의 입자의 분포는 수치해석을 통해 예측할 수 있다. Fig. 6은 정상상태에서 각 고체 입자의 밀도가 변할때 높이에 따라 반경방향으로 평균한 고체입자의 분포를 나타낸 그림이다. 각 밀도에서 정상상태에 도달하기까지의 시간은 입자밀도가 1600  $\text{kg/m}^3$ 일 때 8초, 2000  $\text{kg/m}^3$ 일 때 9초, 2200  $\text{kg/m}^3$ 일 때 10초, 2400  $\text{kg/m}^3$  일 때 11초가 소요되었다. 밀도가 커질수록 정상상태에 도달하는데 긴 시간이 소요되었고 밀도가 낮을수록 고체 입자의 체적분율은 각 높이에서 고르게 분포하

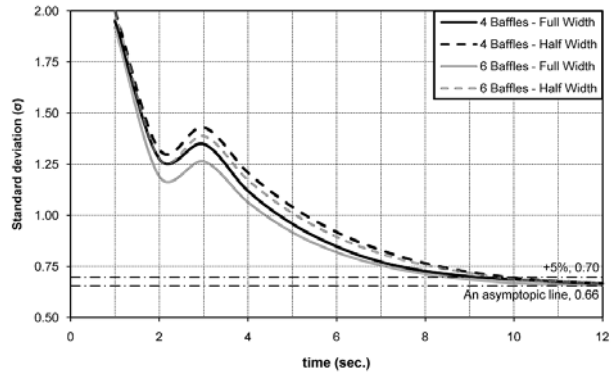


Fig. 7 Influence of baffle design on suspension quality

였다. 본 연구에서 알 수 있듯이 해석 case를 추가함에 따라 원하는 목적을 달성하기 위한 최적 교반 조건을 수치해석을 통해 예측할 수 있을 것이다.

3.3 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 2상 교반 유동을 수치해석 하였다. 수치해석 모델은 Table 1과 같은 모델들을 고려하였다. 수치해석 결과를 이용하여 Fig. 7과 같이 각 모델들 간의 시간에 따라 교반기 내부에 퍼져있는 고체입자의 표준편차를 비교하였다. 표준 편차는 교반기 내부의 고체 입자의 분산의 질을 예측하기 위하여 사용하였고, 계산 방법은 식 (8)를 따른다.

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

$\alpha_i$ 는 교반기 내부의  $i$ -번째 위치에서의 고체 입자의 체적 분율을 나타내고,  $\alpha_{avg}$ 는 고체 입자의 평균 체적 분율을 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 교반 초기에 고체 입자들은 바닥에 깔려 있다가 상승하기 때문에 3초 이내의 유동장은 변화가 매우 심한 불안정한 상태가 된다. 그러므로 Fig. 7에서 보이는 것처럼 3초 이내의 표준편차는 불안정하다. 3초 이후에 유동장은 축방향의 회전 유동을 유지하면서 고체입자가 고르게 퍼지기 때문에, 12초 까지 표준편차는 서서히 낮아진다. 12초 후에 각 배플 모델의 표준편차는 거의 같다. 같은 형상의 교반기에서 일단 준 정상상태에 도달하면, 그 후 교반의 질은 배플의 폭과 숫자에 의한 영향을 거의 받지 않는 것을 Fig. 7을 통해 알 수 있다.

반면에 준 정상상태에 도달하기까지의 교반 시간은 배플의 폭에 의해 영향을 받는다. Fig. 7의 배플의 폭이 0.04D(Half Width)인 모델의 표준편차 그래프를 보면 고체 입자의 표준편

차가 준 정상상태의 5% 이내로 도달하기 위하여 10초가량의 시간이 필요한 것을 알 수 있다. 배플의 폭이 0.08D(Full Width)인 경우에는 9초가량의 시간이 흐른 뒤의 표준편차가 0.04D의 폭 일 경우와 같은 범위에 접근한다. 배플의 폭이 절반으로 줄어들 때 교반시간은 1초가량 증가한다.

한편, 교반 초기에 고체 입자의 분산의 질은 배플의 숫자에 영향을 받는다. 균일한 교반 상태에 이르는 시간이 같더라도 균일상태에 이르기까지 6-배플 모델의 표준편차가 4-배플 모델의 표준 편차보다 작다. 균일한 교반 상태에 이르기 전에 동일 교반시간대에서의 표준 편차는 배플의 숫자가 많을수록 작아진다는 것을 보여주며, 이와 같은 경향은 실험을 통해 얻은 결과와 유사하다[15]. 배플의 폭이 같을 때 배플수에 따른 표준편차의 변화는 배플의 폭이 넓을수록 더 큰 양상을 보인다. 같은 교반 시간대에서 배플의 숫자와 폭이 증가함에 따라 표준편차는 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 표면 근처에서의 수치해석 결과는 실험결과와 약간의 차이가 있었지만, 그 아래 위치에서 수치해석의 고체 입자 체적분율의 예측은 문헌에 나온 실험 결과와 잘 일치하였다. 덧붙여서 배플의 숫자와 폭이 고체 입자의 분포가 준 정상상태에 이르게 될 때 고체 분산의 질에 미치는 영향이 없다는 것을 확인하였다. 그러나 배플의 폭이 넓어질수록 교반 시간은 감소한다. 또한 배플의 숫자가 증가할수록 같은 시간대에서 교반의 질을 나타내는 표준편차는 급격하게 감소한다.

## 후 기

본 연구는 중소기업청에서 시행한 중소기업선도형기술 혁신개발지원사업(과제번호 : S1029723)의 지원으로 수행된 결과입니다.

## 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 Courmil, 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., Godiwala, 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] 2000, 장재원, 허남건, "45° Pitched Paddle형 교반기 내부 유동 해석," 한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집.
- [10] 2006, 안익진, 송애경, 허남건, "자유표면을 고려한 교반기 내부의 비정상 유동해석," 한국전산유체공학회지, 제 11권, 제4호, pp.9-13.
- [11] 2007, 김치겸, 원찬식, 허남건, "전산유체역학을 이용한 교반기 내부의 고체/액체 다상유동 해석," 한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집.
- [12] 2004, *STAR-CD Methodology Version 3.24*, Computational Dynamics Ltd.
- [13] 1989, Bouillard, L.X., Lyczkowski, R.W. and Gidaspow, D., "Porosity distribution in a fluidised bed with an immersed obstacle," *AIChE Journal*, Vol.35(6), pp.908-922.
- [14] 1996, Witt, P.J. and Perry, J.H., "A study in multiphase modelling of fluidised beds," *Computational Techniques and Applications: World Scientific Publishing Company*.
- [15] 1997, Lu, W.-M., Wu, H.-Z. and Ju, M.-Y., "Effects of baffle design on the liquid mixing in an aerated stirred tank with standard Rushton turbine impellers," *Chemical Engineering Science*, Vol.52 pp.3843-3851.