

전산유체역학을 이용한 교반기 내부의 고체/액체 다상유동 해석

김치겸,¹ 원찬식,² 허남건^{*3}

CFD SIMULATIONS OF SOLID/LIQUID TWO-PHASE FLOW IN AN AGITATOR

Chi Gyeom Kim,¹ Chan-Shik Won² and Nahmkeon Hur^{*3}

Glans particle distribution in a stirred solid/liquid systems was investigated using computational fluid dynamics(CFD). The numerical results were compared to experimental data from the available literature which investigated the local dispersed phase volume fraction by means of an endoscope technique. Eulerian multi-phase model and applications considered high loading of solid particle was used to investigate the influence of the particle concentration and mixing tank size on the solid distribution. A good agreement was obtained between the experimental data and simulation results. The results showed different solid particle distribution in an agitator by particle concentration and mixer size.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 이상 유동(Two-Phase Flow), 교반기(Agitator), 고체 입자 분산(Solid Particle Suspension)

1. 서 론

산업용 교반기는 산업전반에 걸쳐 널리 사용되는 기계장치로서 단일 혹은 두 개 이상의 물질을 혼합하여 사용자가 원하는 물질을 만들어 주는 장치를 말한다. 산업이 발달하면서 교반 장치는 화학공업, 식품공업 폐수 처리와 같은 환경 공업 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 따라서 교반 장치에 의해 발생하는 유동특성에 대한 연구의 중요성이 부각되고 있다. 산업 현장에서 사용되는 교반기는 다양한 형상의 임펠러 회전으로 형성되는 내부 유동을 다양한 계측장비를 이용한 실험과 전산 유체 역학의 이론을 이용한 수치해석으로 교반 특성에 대한 연구를 통해 교반 성능을 개선하고 있다.

다양한 교반공정 가운데 고체/액체의 이상(2-phase) 교반은 콘크리트나 도료, 식품 발효 등의 분야에서 이용된다. 고체/액체의 이상 교반은 고체와 액체의 경계(interface)에서 각 상의 상호 운동에 의해 유동장의 특성이 결정된다. 집중되어 있는 고체 입자의 유동층의 표면에서 임펠러 회전에 의해 형성된 액체의 유동 고체 입자를 고르게 분산시키는 역할을 한다. 고체와 액체 간의 큰 물성의 차이로 인하여 유동장 내부에 때

우 복잡한 유동장을 형성하는데 고체 입자의 분포에 따라 유동의 와류 구조가 달라지기 때문에 단상(1-phase) 교반의 유동 해석과는 달리 유동장의 예측이 어려운 일이다. Angst et al.[1]는 물과 유리 입자의 이상 유동 교반장치 내에 69개의 내시경(endoscope) 촬영 장비를 이용한 실험에서 고체 입자의 체적 비율과 교반 탱크의 크기에 따른 고체 입자의 분산을 분석하였고, Ochieng et al.[2]는 물과 니켈 입자의 교반을 LDV(laser doppler velocimetry) 실험과 CFD를 이용한 수치해석에서 고체 입자의 크기에 따른 고체입자의 분석을 연구한 바가 있다.

고체/액체 이상 유동해석의 연구는 지속적으로 진행되고 있지만, 이상 유동의 교반은 교반기 형상에 대해 강한 연관성을 갖고 있기 때문에 실제 산업 현장에서의 적용에 많은 어려움이 있다. Angst et al.[1]의 연구는 실험을 통해 교반기의 크기에 따라 유리 입자가 고르게 분포하는 교반 임펠러의 회전수와 고체 입자의 체적 비율에 따른 소비 동력의 관계를 밝혀낸 바가 있다. 하지만 실험을 통한 연구는 모델의 제작에 따르는 비용과 시간이 큰 문제점이 따르기 때문에 전산유체 역학을 이용한 수치해석 방법에 대한 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 교반기 내에 고체/액체 이상 유동의 교반기 크기와 고체입자의 체적 비율에 따른 수치해석과 Angst et al.[1]의 실험의 비교를 통해 전산유체역학을 이용한 이상 유동 해석을 검증하고자 한다.

1 서강대학교 대학원

2 정회원, 서강대학교 기계공학과

3 종신회원, 서강대학교 기계공학과

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

2. 수학적 모델

본 연구에서는 eulrian multi-phase method를 이용하여 이상 유동을 해석하였다. eulerian multi-phase method는 고체/액체, 기체/액체 등 서로 다른 상을 가진 물질이 같은 검사 체적(control volume)에 있는 경우 체적 분율(volume fraction)에 따라 각 상에 대하여 지배방정식을 계산한다. 상의 경계에서 발생하는 상호작용에 의한 유체의 운동을 운동량 방정식에 추가 항으로 넣어 계산하며, 상의 종류와 운동의 특성에 따라 다양한 모델링이 알려져 있다[3].

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k) = -\alpha_k \nabla p + \alpha_k \rho_k \mathbf{g} + \nabla \cdot [\alpha_k (\boldsymbol{\tau}_k + \boldsymbol{\tau}'_k)] + M_k + (F_{int})_k \quad (2)$$

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

$$M_d = F_D + F_{VM} + F_L \quad (4)$$

식 (1)은 연속 방정식이고 식 (2)는 운동량 방정식을 나타낸다. α_k 는 각 상의 체적 분율을 나타내는 함수이다. 식 (3)과 각 상의 체적 분율의 합은 1을 만족해야 한다. 여기서 첨자로 쓰인 c는 연속적인 상(continuous phase), d는 분산되는 상(dispersed phase)로 나타낸다. 식 (2)에서 M_k 는 각 상 상호 교환하는 운동량의 항이며 $M_c = -M_d$ 를 만족하여야 한다. $(F_{int})_k$ 는 분산되는 상의 입자 간에 작용하는 힘이다.

각 상이 교환하는 운동량에는 항력과 양력, 가상력이 있으며 세 가지 힘의 합이 식 (4)와 같이 운동량 방정식에 이용된다. 고체 입자가 분산이 되는 유동해석의 경우에 연속되는 상인 유체에 비하여 밀도가 상대적으로 매우 높다. 고체입자가 집중되어 있다가 분산되는 유동 해석의 경우 다음의 식으로 항력을 모델링 한다.

$$F_D = \begin{cases} \left[150 \frac{\alpha_d^2 \mu_c}{\alpha_d d^2} + 1.75 \frac{\alpha_d \rho_c |u_r|}{d} \right] \mathbf{u}_r & ; \alpha_d > \alpha_{tr} \\ \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_d \rho_c |u_r|}{d} \mathbf{u}_r \alpha_c^n & ; \alpha_d \leq \alpha_{tr} \end{cases} \quad (5)$$

α_d 가 α_{tr} 보다 작은 경우에는 입자 간에 작용하는 힘은 입자 속도에 영향을 받는다. 본 연구에서는 $\alpha_{tr} = 0.2$, $n = -1.7$ 로 모델링 한 상용코드의 모델을 적용하였다. 식 (5)에서 계산에 이용되는 항력계수 C_D 는 식 (6)의 관계식을 이용하여 결정한다.

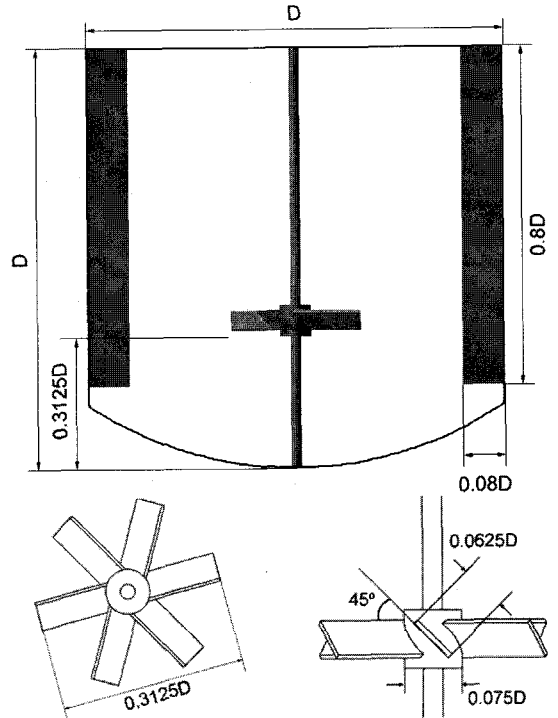


Fig. 1 Agitator geometry.

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

$$Re_d = \frac{\rho_c u_r d}{\mu_c} \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_c - \mathbf{u}_d \quad (8)$$

3. 수치해석 방법

수치해석은 Angst et al.[1]의 실험에서 사용한 교반기의 형상과 같은 조건에 의해 수행되었다. 6개 blade가 달린 pitched paddle 임펠러를 장착한 바닥이 둥글고 4개의 방해판(baffle)이 있는 교반 탱크가 해석 대상이다. 탱크의 지름(D)은 200, 400, 900mm이며, 형상의 크기와 형태는 Fig. 1과 같다. 교반 액체는 물로 하였고 분산되는 고체입자는 직경이 200 μ m이고 밀도가 2600kg/m³의 유리 입자이다. 임펠러의 회전에 의하여 고체 입자가 분산되는데 교반기 높이의 90% 까지 고체입자가 분산되었을 때 완전히 고체 입자가 분산된 것으로 하여 실험에 검증된 회전수[1]를 해석에 이용하였다. 각 해석 케이스의 회전수는 Table 1에 나타내었다. 고체 입자의 체적 비율에 따라 초기 조건으로 교반 탱크 바닥에 일정 높이까지 깔려 있는 상태에서 해석을 시작하였다. Fig. 2는 수치해석에 사용한 해

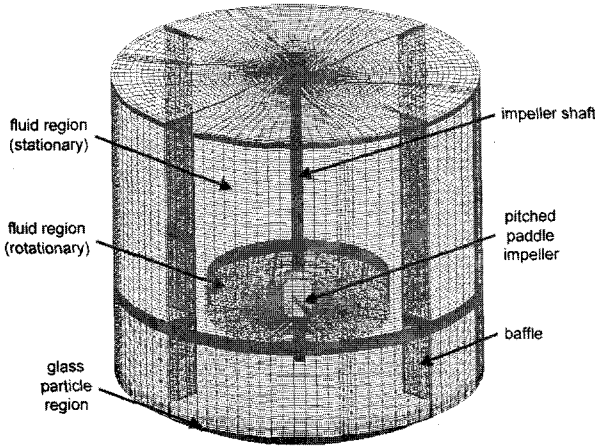


Fig. 2 The computational grid.

석 격자의 모습이다. 임펠러의 회전은 MRF(multiple reference frame)으로 적용하였고 Fig. 2에 정지부와 회전부의 유체 영역을 표시하였다. 교반기의 외벽은 no-slip wall 경계조건을 적용하였고 교반기 작동유체의 표면은 대칭 조건을 적용하였다. 임펠러 축 방향과 중력 가속도의 방향을 z축으로 하여 고체 입자의 운동량에 의한 부력을 계산하였다.

본 연구의 계산은 상용코드인 STAR-CD V.3.24를 이용하여 정상상태 비 압축성 난류 유동으로 해석하였으며, 난류 모델은 $k-\epsilon$, 해석 알고리즘은 격자 구조가 비틀어져 있거나 왜곡이 심한 경우에도 수렴성이 좋은 SIMPISO 방법을 이용하였다. 총 해석 격자의 수는 780,000개 이고 본 연구실에서 보유하고 있는 AMD Opteron 2.4GHz 4CPU 리눅스 클러스터를 사용하여 18시간이 소요되었다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 교반기 크기와 고체 입자의 체적 비율에 대해 고체/액체 이상 유동에 대한 수치해석을 수행하였다. Table

Table 1 Configuration of simulation cases.

Diameter (D, mm)	Solid %vol.	Impeller Speed (RPM)
200	2	877
	4	877
	5	678
	6	877
	8	877
	10	877
400	5	419
	10	538
900	5	275

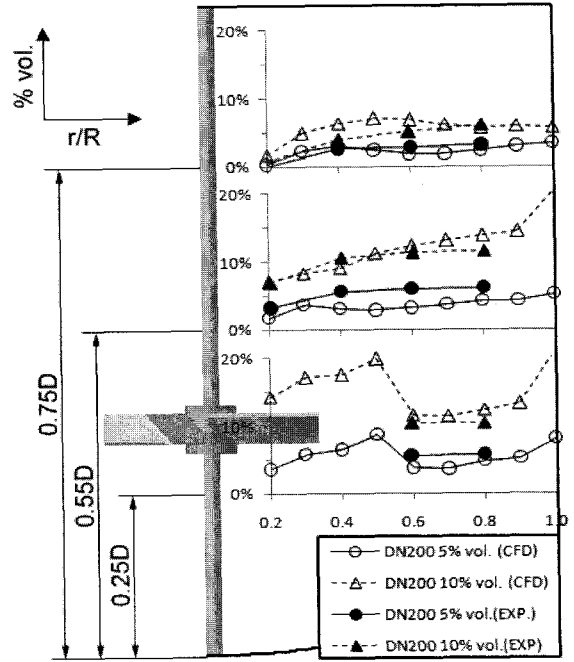


Fig. 3 Local particle volume fraction compared with numerical analysis and experiments in vessel diameter on 200mm with 5% and 10% mean dispersed phase volume fraction.

1과 같은 해석 조건을 적용하여 수치해석이 실험과 비교하여 타당한 결과를 보이는 실패보고, 교반 탱크의 크기 변화에 따른 고체 입자의 분산과 고체 입자의 체적 비율에 따른 고체 입자의 분산정도를 살펴보았다.

4.1 수치해석과 실험의 검증

Fig. 3은 직경 200mm 탱크의 경우 고체 입자의 체적 비율이 5%인 경우와 10%인 경우 축 방향의 높이 별 실험과 수치해석의 비교이다. 가로축은 무차원화 된 반경 방향의 길이이고, 세로축은 고체 입자의 체적 분율을 나타낸다. 5% 체적 비율의 경우 수치해석의 결과가 실험에 비해 체적 분율이 약간 낮고, 10% 체적 비율의 경우 수치해석이 실험보다 약간 낮지만 각 높이에서 전반적으로 3%에서 10% 사이의 고른 고체 입자의 분포를 확인 할 수 있고, 실험과 수치해석의 결과에 큰 차이가 없는 것을 확인 할 수 있다. 실험에서는 관측 하지 않은 위치 이지만 임펠러 아래의 높이인 0.25D 위치에서는 축 주변으로 많은 고체 입자가 모여 있는 것을 예측 하였고, 0.55D 이하의 높이에서 벽 주변으로 갈수록 고체 입자의 체적 분율이 높게 예측 되었다. Fig. 4와 Fig. 5는 직경이 400mm, 900mm인 경우 0.55D의 높이에서 수치해석에 의해 예측한 반경 방향의 고체 입자 체적 분율을 실험과 비교하여

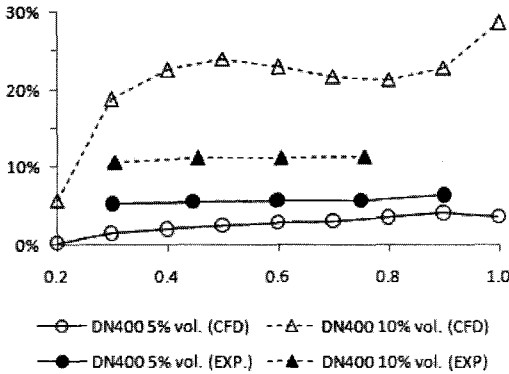


Fig. 4 Local particle volume fraction compared with numerical analysis and experiments in vessel diameter on 400mm with 5% and 10% mean dispersed phase volume fraction.

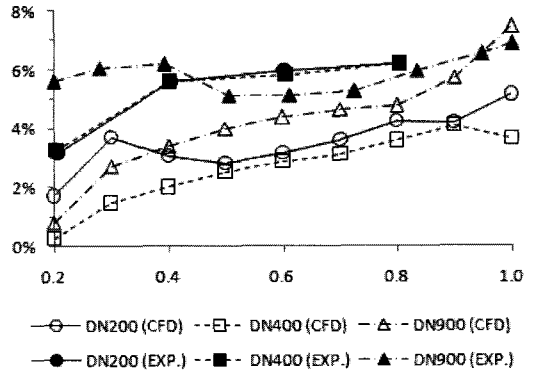


Fig. 6 Local particle volume fraction compared with numerical analysis and experiments in vessel diameter on 200, 400, 900 mm with 5% mean dispersed phase volume fraction.

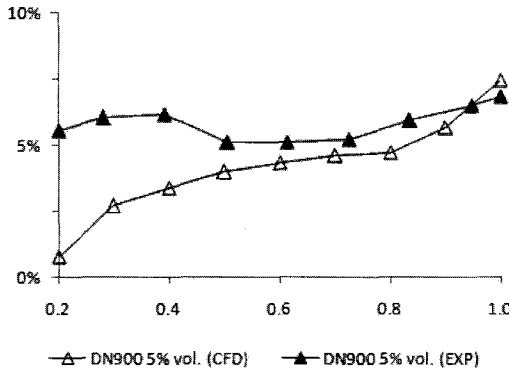


Fig. 5 Local particle volume fraction compared with numerical analysis and experiments in vessel diameter on 900mm with 5% mean dispersed phase volume fraction.

나타낸 그림이다. 고체 입자의 체적 비율이 5%인 경우 실험과 비슷한 경향의 분포를 보이지만 체적 비율이 10%로 큰 경우에는 실험과 수치해석에 큰 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이는 고체/액체 이상 해석의 수학적인 모델에서 고체 입자간의 상호작용에 의한 힘 성분이 수치해석에서 제대로 반영되지 않아서 생기는 경우로 보인다.

4.2 교반 탱크의 크기 변화에 따른 고체입자의 분산

Fig. 6은 0.55D의 높이에서 고체 입자의 체적 비율이 5%일 때 직경 길이(200mm, 400mm, 900mm) 별 반경 방향에 따른 고체 입자의 체적 분율을 나타낸 그림이다. 직경 길이가 200mm와 400mm 인 경우 실험과 수치해석의 고체 입자 체적 분율의 차이가 3% 정도 발생하지만 반경 방향의 위치에 따른 체적 분율의 변화가 교반기의 크기에 관계없이 동일하게 예측 되었다. 하지만 직경이 900mm인 경우에는 수치해석의 결과에서 다른 직경일 때와 달리 동일한 고체 입자의 체적 분

율 분포가 나타나지 않고, 다른 직경의 경우보다 체적 분율이 높게 예측되었다. 실험의 경우에는 직경이 900mm의 경우에 다른 직경일 때 보다 체적 분율이 낮게 나타났지만 그 차이가 1% 미만으로 큰 차이는 보이지 않았다.

4.3 고체 입자의 체적 비율에 따른 고체 입자의 분산

Fig. 7과 Fig. 8은 직경 200mm의 교반기에서 877rpm으로 임펠러가 회전하는 경우 고체 입자의 체적 비율이 2, 4, 6, 8, 10%인 경우 반경 방향과 높이에 따른 고체 입자의 체적 분율을 수치해석과 실험의 경우에 대해 각각 나타낸 그림이다.

전반적으로 실험과 수치해석의 높이와 반경 방향에 따른 체적 분율 결과가 비슷한 경향으로 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 고체 입자의 체적 분율은 교반기 내에 고체입자가 많을 수록 대부분의 영역에서 높게 나타나지만 고체 입자가 많은 경우에 축 방향으로 높은 위치에서 축 주변에서 낮은 체적 분율이 나타나고 벽에 가까이 갈수록 체적 분율이 높아지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 고체입자가 많은 경우 임펠러 위에서 원심력에 의한 고체 입자의 공동 현상을 보이는 것이라고 볼 수 있다. 실험에서는 고체 입자가 6% 이하인 경우 교반기 전체에서 고르게 체적 분율이 분포하는 것을 확인 할 수 있지만, 수치해석에서는 반경방향으로 체적 분율의 분포가 변화하였다. 고체 입자가 적은 경우에는 그 변화의 폭이 적지만 고체 입자가 많아질 수록 그 변화의 폭이 크게 나타났다. 이는 고체 입자가 많아지는 경우 고체 입자 상호간의 작용하는 힘의 영향력이 커져서 수치해석과 실험에 차이가 발생한 것으로 보인다. 수치해석의 오차를 줄이기 위하여 고체 입자 상호간에 발생하는 힘에 대한 수학적인 모델링과 원심력이 크게 작용하는 경우 자유표면을 고려하여 자유 표면의 변화에 의한 유동장의 특징을 살펴보는 과정을 수치해석에서 예측해야 할 필요가 있다.

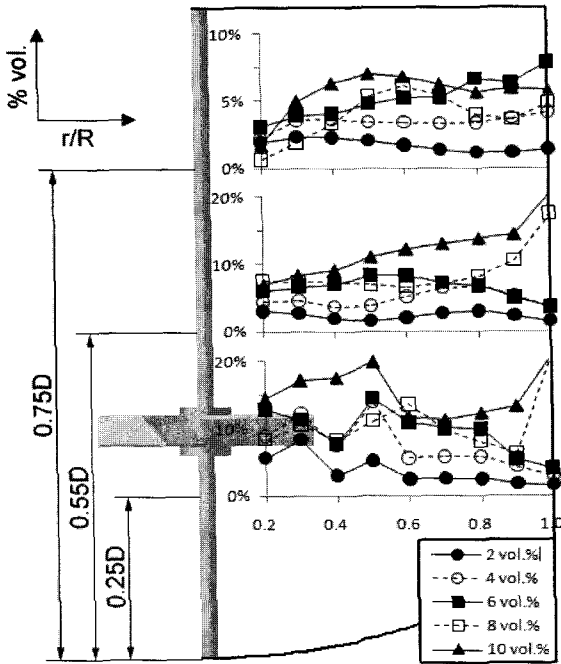


Fig. 7 Local particle volume fractions predicted in a veddel with D=200mm, mean particle volume fractions of 2-10 vol% and a stirred speed of 877rpm.

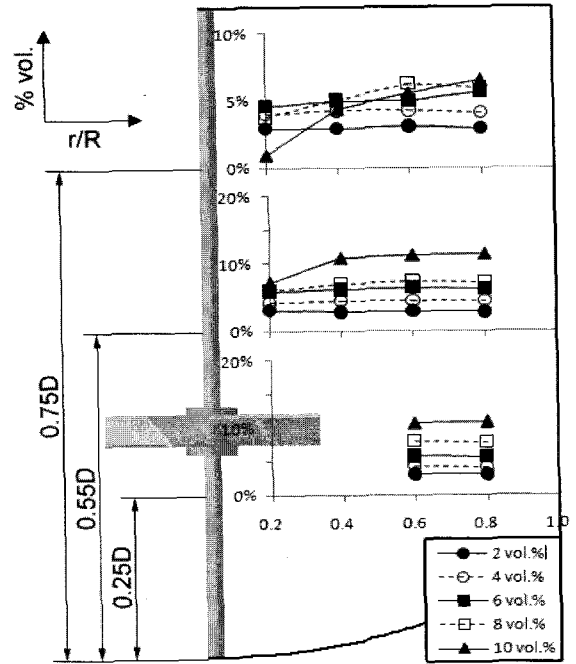


Fig. 8 Local particle volume fractions measured in a veddel with D=200mm, mean particle volume fractions of 2-10 vol% and a stirred speed of 877rpm[1].

5. 결 론

고체/액체 이상 유동의 교반 유동을 실험에서 90% 이상의 고체 입자가 분산되는 회전수를 알아내어 수치해석에 해당 회전수를 그대로 적용한 수치해석의 결과와 실험의 결과와 비교하였다. 그 결과 직경이 작고 고체 입자의 체적 비율이 낮은 경우 실험의 결과와 일치하는 경향을 확인하였다. 하지만 직경이 커지고 고체 입자의 체적 비율이 높을수록 실험과 수치해석 결과의 오차가 다소 크게 관측 되었다. 이는 고체/액체 이상 교반 유동의 해석시 고체 입자가 많을수록 고체 입자 간에 상호작용하는 힘이 유동장에 미치는 영향이 커지는 것을 확인 시켜 주며 수치해석 시 입자간의 관계를 정확하게 모델링 하는 것이 중요하다는 것을 알려준다.

수치해석의 결과와 실험의 결과에서 고체 입자의 수가 늘어 남에 따라 축 주변의 높은 위치에서는 효과적인 교반이 이루어지지 않는 것을 확인하였으며 이는 자유표면을 고려하여 유동해석을 한다면 원심력에 의한 자유표면의 변형을 확

인 하여 현상의 원인을 명확하게 할 것으로 보인다.

추후 고체 입자간의 상호 작용력과 원심력에 의한 자유표면의 변형을 고려한 해석을 한다면 고체/액체 이상 교반 유동의 수치해석이 더욱 현실성 있는 연구로 발전 할 것이다.

참고문헌

- [1] 2006, Angst, R., Kraume, M., "Experimental investigations of stirred solid/liquid systems in three different scales: Particle distribution and power consumption," *Chemical Engineering Science*, Vol.61, pp.2864-2870.
- [2] 2006, Aoyi Ochieng, Alison E. Lewis, "Nickel solids concentration distribution in a stirred tank," *Minerals Engineering*, Vol.19, pp.180-189.
- [3] 2004, STAR-CD Methodology Version 3.24, *Computational Dynamics Ltd.*