

전산유체역학을 이용한 교반 탱크 내에서의 회전유동에 대한 해석 모델의 제안 및 검증

황승식* · 조환용 · 최규홍* · 신동훈* · 정태용*†

국민대학교 대학원 기계공학과, *국민대학교 기계공학과

(2013년 1월 15일 접수, 2013년 2월 27일 수정, 2013년 2월 27일 채택)

Suggestion of the Analysis Model and Verification on Rotating Flow in Stirred Tanks Using CFD

Seung Sik Hwang* · Cho Hwan Yong · Gyuhong Choi* · Dohghoon Shin* · Tae Yong Chung*†

Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Kookmin University,

*Dept. of Mechanical Engineering, Kookmin University.

(Received 15 January 2013, Revised 27 February 2013, Accepted 27 February 2013)

요 약

교반 탱크(stirred tank)는 회전하는 임펠러(impeller)를 이용하여 단상 또는 다상의 유체를 지속적으로 유동시키는 장치로 여러 산업분야에 활용되고 있다. 우수한 성능의 교반기를 설계하기 위해서는 교반 성능에 영향을 미치는 다양한 내부유동특성의 정량적 데이터의 확보가 반드시 필요하지만, 복잡한 구조의 내부유동에 관한 정량적 해석은 현재까지 어려운 문제로 인식되고 있다. 본 연구에서는 전산유체 해석을 통해 교반 탱크에 적합한 기법을 제안하기 위해 Fluent 6.3의 두 가지 모델을 사용하였다. mixture model을 이용하여 교반 탱크 혼합을 해석하였으며, standard, k-ε model을 이용하여 교반 탱크 내의 유동을 해석하였다. 해석 기법으로는 다중 좌표계(Multiple Reference Frame)와 이동 격자(Sliding Mesh) 기법을 이용하였다. 전산유체해석 결과를 가시화 실험 결과와 비교하여 교반 탱크의 내부 유동 및 혼합 특성을 파악하고, 교반 탱크 내부 유동 해석 시 적절한 해석기법 선정의 기초자료를 제시하였다.

주요어 : 교반 탱크, 임펠러, 다중 좌표계 기법(MRF), 이동 격자 기법(SM), 전산유체역학, 난류운동에너지, 가시화

Abstract - Stirred tank is widely used in various industries for mixing operations and chemical reactions for single- or multi-phase fluid systems. For designing agitator of high performance, quantity data of internal flow characteristics influenced by mixing performance are definitely confirmed but quantity analysis about the transient flow characteristics of complicate structure is recognized as difficult problem in the present. In this study, two models of commercial CFD code Fluent 6.3 used to propose suitable for the tank analysis. Agitation of Stirred tank is analyzed using a mixed model and the flow in the stirred tank is analyzed using a standard k-ε model. Multiple reference frame(MRF) and Sliding mesh(SM), the analysis techniques were used For compare a result of CFD with a visualization experiment result, to grasp internal flow and mixing characteristic in stirred tank and to present fundamental analysis method.

Key words : Stirred tank, impeller, MFR, SM, CFD, turbulent kinetic energy, visualization

†To whom corresponding should be addressed.

Kookmin Univ., Jeongneung 3-dong, Seongbuk-gu, Seoul
Tel : 02-910-4674 E-mail : tychung@kookmin.ac.kr

1. 서 론

교반 탱크는 회전하는 임펠러를 이용하여 단상 또는 다상의 유체를 지속적으로 유동시켜 균질하게 혼합시키는 장치이다. 성능이 우수한 교반기를 설계하기 위해서는 교반성능에 영향을 미치는 다양한 내부 유동특성의 정량적 데이터의 확보가 필요하나, 3차원 비정상 유동특성을 나타내는 복잡한 구조의 내부유동에 관한 정량적 해석은 현재까지 어려운 문제로 인식되고 있다. 실제 교반 탱크의 형상에 비례하는 모델을 제작 한 후 PIV와 LDV와 같은 장비를 이용하여 분석하는 실험적 연구는 시간 및 비용적인 측면에서 제약이 많으며, 실제 크기에 대한 연구는 더욱 어렵다.⁽¹⁻⁵⁾ 반면 해석적 연구는 실험적 연구에 비해 비용 절감 및 결과 획득시간을 단축할 수 있으며, 일단 해석 모델에 대한 격자가 완성되면 실제 상황에 맞는 해석기법을 이용해 다양한 운전조건에 따른 결과를 쉽게 얻을 수 있다. 교반기의 임펠러 형상 및 회전속도별 전산유체역학 해석에 관한 연구를 수행한 이⁶⁾ 등은 CFD 해석을 위한 상용 코드로 ANSYS CFX 11.0을 사용하였다.

본 연구에서는 교반 탱크의 혼합 성능과 유동 속도 분포에 대한 CFD 해석을 위해 Fluent 6.3¹¹⁾을 사용하였으며, 교반 탱크의 혼합 성능 해석에는 mixed model을 사용하였고, 유동 속도 분포 해석에는 standard, k-e model을 사용하였다. 각 모델을 통해 적절한 해석 결과를 얻기 위한 해석 기법으로 다중 좌표계(MRF:Multiple Reference Frame, 이하 MRF라 함)와 이동 격자(SM:Sliding Mesh, 이하 SM이라 함) 기법을 이용하였다. 이러한 해석과 가시화 실험결과와의 비교를 통해 교반 탱크의 내부 유동 및 혼합 특성을 파악하고, 교반 탱크 내부 유동 해석 시 적절한 해석기법 선정의 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

본 연구에 사용한 실험장치는 Harvey III⁷⁾, Al-Rashed⁸⁾, Pnerselvam R⁹⁾, Kanimoyama M¹⁰⁾ 등의 기존의 연구에서 다루어진 기하학적 형상을 참조하여 교반 탱크를 소형화하였다. Fig. 1은 해석 결과와의 비교를 위한 가시화 실험 장치에 대한 구성을 나타낸 것이다. Fig. 2는 실제 실험 장치 요소 부

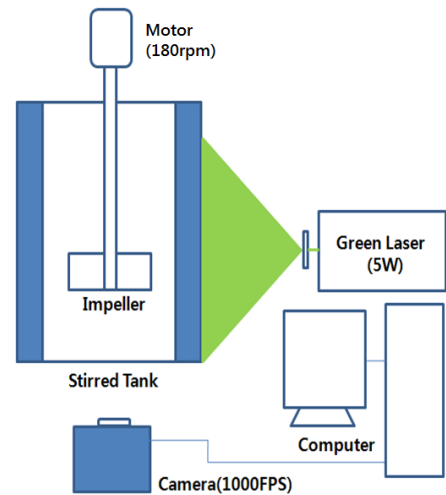


Fig. 1. Configuration of PIV

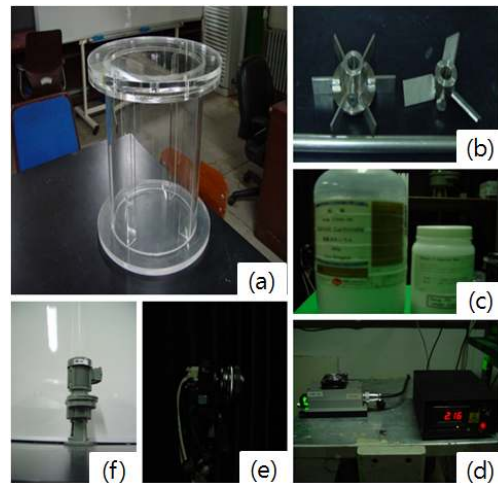


Fig. 2. Experimental equipments - (a) tank, (b) impeller, (c) particle, (d) laser, (e) camera, (f) motor

품을 나타낸 사진이다. Table 1은 가시화 실험에 사용된 교반 탱크와 각 임펠러의 제원을 나타낸 것이다.

실험에 사용된 교반기의 회전속도는 180 rpm으로 고정하였으며, 임펠러의 형태는 pitched paddle type과 rushton turbine type을 이용하였다(Fig 2. (b) 참조). 가시화를 위한 추적입자로는 탄산칼슘(CaCO₃)을 사용하였다(Fig 2. (c) 참조). Table 2는 실험의 종류와 실험과 비교하기 위해 사용한 CFD 모델 및 기법을 정리한 것이다.

가시화 실험은 교반 탱크 내의 유체가 임펠러의 회전에 의해 완전히 혼합된 이후에 진행하여야 하므로 선행 실험으로 교반 탱크 내의 유체가 임펠러의 회전에 의해 완전히 혼합되는 시간을 파악하기 위한

Table 1. Specification of stirred tank and impeller

규격	교반 탱크	임펠러	
		pitched paddle type	rushton turbine type
탱크 지름[mm]	300	150	150
탱크 높이[mm]	400	-	-
익의 높이[mm]	-	30	21
익수[EA]	-	3 (각도 45°)	6

Table 2. Experimental and CFD model

실험	교반 탱크 혼합 실험		가시화 실험	
CFD 적용 모델 및 기법	다상 모델		standard, k-ε 모델	
	다중 좌표계 (MFR) 기법	이동 격자 (SM) 기법	다중 좌표계 (MFR) 기법	이동 격자 (SM) 기법

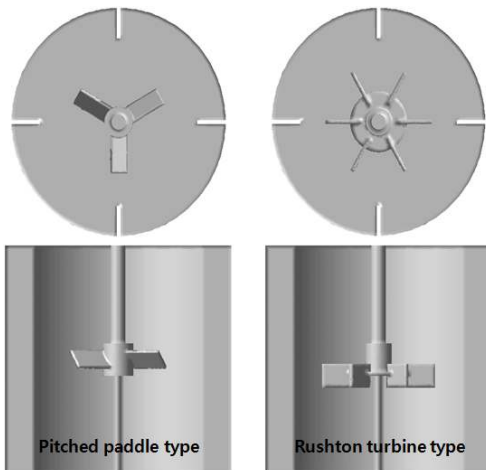


Fig. 3. Geometry of the stirred tank considered in this study

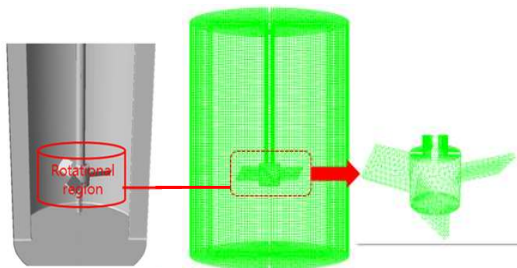


Fig. 4. Calculation grid for pitched paddle type stirred tank.

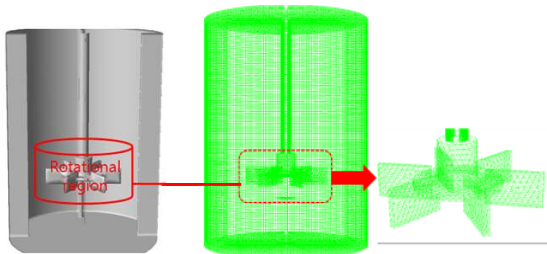


Fig. 5. Calculation grid for rushton turbine type stirred tank.

실험을 진행하였다. 첫 번째 실험은 먼저 교반 탱크 내에 수치해석에서 가정한 탄산칼슘과 동일한 양물의 높이의 5%, 체적분율 60%의 탄산칼슘을 넣어 침전 시킨 후 각각의 임펠러를 180 rpm으로 구동하면서 완전히 혼합되는 시간을 25 FPS(frame/sec)로 촬영하여 측정하였다.

두 번째는 가시화 실험의 추적 입자로서 탄산칼슘 소량을 물에 넣은 후 각각의 임펠러를 180 rpm으로 구동하면서 1,000 FPS로 촬영하였다.

3. 전산 해석

3-1 형상 및 격자 구성

Fig. 3은 실험에 사용된 교반 탱크와 임펠러의 형상을 나타낸 것이다. 임펠러 하부에서 교반 탱크 바닥면까지의 거리는 0.12 m이다.

Fig. 4와 5는 본 연구에서 고려된 교반 탱크 시스템의 전체적인 격자 형상을 나타낸 것이다. 격자 구성 시 고속으로 회전하는 임펠러 주위의 격자는 T-Grid를 이용하여 interval size 0.5 mm로 격자를 구성하였고, 그 외의 영역은 edge 성분의 interval size를 0.5 mm로 설정하여 Hex와 Hex copper 격자로 구성하였다. Table 3은 교반 탱크의 운전 조건과 물과 추적 입자의 물성을 나타낸 것이다.

3-2 해석 기법 및 모델

교반 탱크 혼합 실험을 확인하기 위해 Fluent 6.3⁽¹¹⁾의 mixture model을 사용하였으며, 유동 해석을 위해 standard, k-ε 모델을 사용하였다. 각각의 모델에서 임펠러의 회전이 미치는 영향을 해석하기 위한 기법으로 MRF와 SM을 이용하여 그 결과를 비교하였다.

Table. 3. Fluid & solid properties and operation conditions (mixture model)

Property	Parameter
Density (kg/m ³)	998.2(water)/2800(CaCO ₃)
Viscosity (kg/m·s)	0.001003
Temperature (K)	298.15
Rotational speed (rpm)	180
Reference pressure (bar)	1

3-2-1 Navier-stokes 방정식

교반 탱크 내부 유동 해석에 있어서 기본이 되는 Navier-stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

위 식 (1)을 벡터를 이용하여 정리하면 아래 식 (2)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u \quad (2)$$

Navier-stokes 방정식은 뉴턴의 운동방정식 ($F = ma$)에 기반하고 있으며, 좌변이 가속도항을 나타내며, 우변이 유체에 작용하는 단위 질량 당 힘을 나타낸다.

3-2-2 $k-\epsilon$ 난류 모델

교반 탱크의 회전에 의한 유동현상을 해석하기 위해서 상용 CFD 코드인 Fluent 6.3⁽¹¹⁾에 사용된 $k-\epsilon$ 난류모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(u + \frac{u}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_K \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_{3\epsilon} G_b) + C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

3-2-3 Mixture model

Mixture model에서 사용된 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (5)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (7)$$

Mixture model에 사용되는 기본 지배방정식은 식 (5)을 토대로 평균 질량유속 식 (6)과 혼합물의 밀도 식 (7)를 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) \\ &= -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \end{aligned} \quad (8)$$

4. 유동 가시화 실험 결과

4-1 탄산칼슘 분포

Fig. 6과 7은 각각 pitched paddle type 임펠러와 rushton turbine type 임펠러를 장착한 실험장치에 탄산칼슘을 넣어 물의 하부에 침전된 이후에 180 rpm으로 회전하기 시작하면서부터 촬영한 영상 결과이다.

실험 결과 거시적으로 투명하던 교반 탱크 내부에 탄산칼슘이 골고루 분포할 때까지의 시간을 측정한 결과, pitched paddle type은 약 25 s, rushton turbine type은 약 12 s가 소요되었다. 유동 패턴은 두 임펠러 모두 침전되어 있던 탄산칼슘이 임펠러의 회전에 의해 임펠러 쪽으로 솟아오르는 움직임을 보이면서 벽면 전체로 토출되는 과정을 보였으며, 어느 일정시간이 지난 이후에는 교반 탱크 내의 전 영역으로 혼합되어 가는 모습을 볼 수 있었다.

실험 결과 rushton turbine type이 pitched paddle type보다 벽면의 회전유동이 발생되기까지 소요되는 시간 및 임펠러로 흡입 후 벽면 전체로 퍼지는데 소요되는 시간이 짧은 것을 확인할 수 있었다.

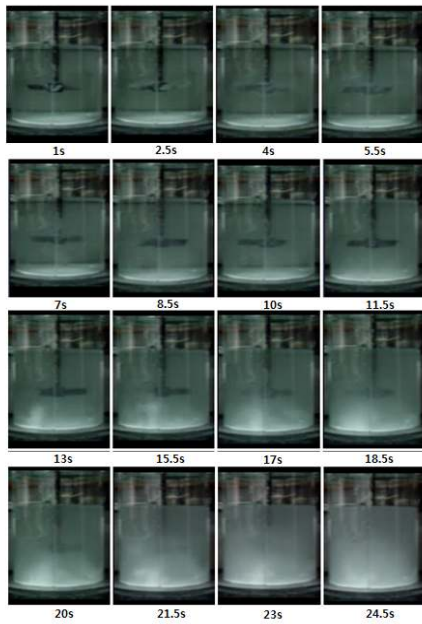


Fig. 6. Rotation flow pattern of the pitched paddle type

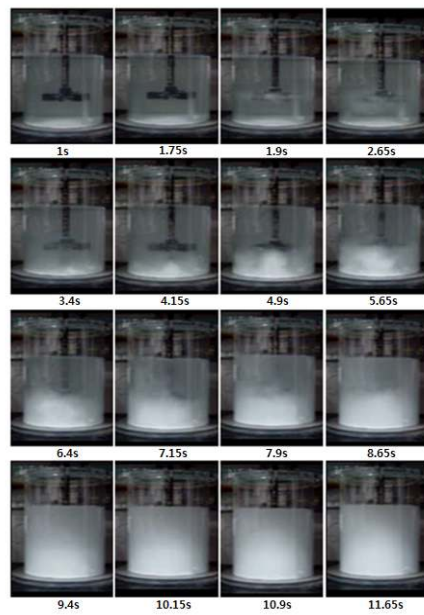


Fig. 7. Rotation flow pattern of the rushton turbine type

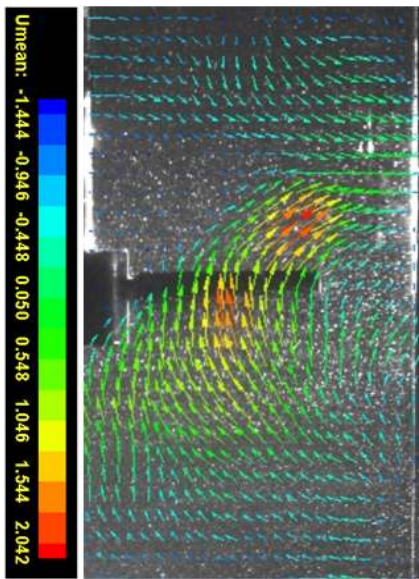


Fig. 8. Fluid velocity distribution of the pitched paddle type : PIV

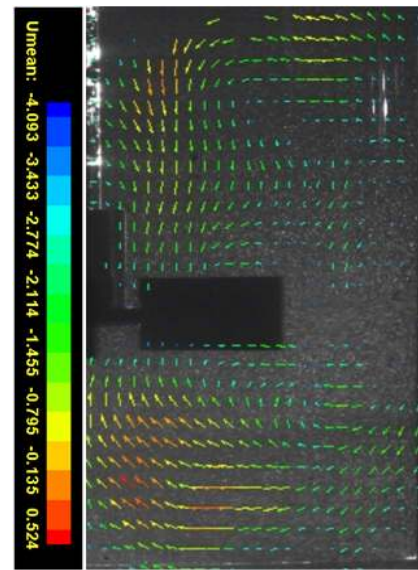


Fig. 9. Fluid velocity distribution of the rushton turbine type : PIV

4-2 단면에서 유동 분포

Fig. 8과 9는 각각 pitched paddle type과 rushton turbine type의 임펠러가 회전할 때의 단면 영상을 촬영하여 분석한 가시화 실험의 결과이다. Pitched paddle type에서 최대 유동 속도는 2.04 m/s로 임펠러 주위에서 나타났으며, 임펠러의 상, 하부 모두에서 임펠러 방향으로 흡입되어, 교반 탱크 내부 벽으로

토출되는 경향을 보이고 있다. Paddle의 설치 각도로 인하여 하부로 유입되는 높은 유속의 유동에 상부에서 흡입되는 유동의 일부가 유입되어 벽면 쪽으로 토출되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 유동에 의해 상부의 유동이 하부로 가지 못하고 상부 쪽에서 회전하고 있으며 벽면으로 토출되는 유속이 임펠러 주위의 유속보다 느린 것을 확인할 수 있었다.

Rushton turbine type에서 최대 유동 속도는 4 m/s로 임펠러 주위 및 임펠러와 교반 탱크 벽면에서 나타났으며, 임펠러의 상, 하부 모두 임펠러 방향으로 흡입되어, 교반 탱크 내부 벽으로 토출되는 경향을 보이고 있다. 토출되는 유속은 임펠러 근처에서의 최대 유속과 동일함을 확인할 수 있다.

이러한 현상은 하부에서 흡입되는 유동이 상부의 유동과 만나 유속이 느려지는 pitched paddle type과는 달리 상하부의 유동이 거의 독립적으로 평행하게 토출됨으로 인해 생기는 것으로 보이며 이 유동 차이로 인해 rushton turbine type의 교반 시간이 pitched paddle type 보다 더 짧아진 것으로 사료된다.

5. 전산 해석 결과

5-1 시간별 탄산칼슘 분포

교반 탱크의 혼합 성능을 예측하기 위하여 일반적인 다상 모델인 mixture model을 사용하여 시간별 탄산칼슘의 체적분율을 해석하였다. 탄산칼슘의 양은 전체 물의 높이의 5% 높이에 탄산칼슘의 체적분율을 0.6이라고 가정하였다.

Fig. 10과 11은 각각 MRF 기법과 SM 기법을 사용하여 pitched paddle type의 교반 탱크 내에서의 시간별 탄산칼슘의 체적분율을 나타낸 그림이며, Fig. 12와 13은 각각 MRF 기법과 SM 기법을 사용하여 rushton turbine type의 교반 탱크 내에서의 시간별 탄산칼슘의 체적분율을 나타낸 그림이다.

Pitched paddle type의 교반 탱크 내 전 체적에 탄산칼슘이 퍼지는 시간은 MRF 기법과 SM 기법이 동일한 시간 (31 s)이 걸렸으나, 시간별 탄산칼슘의 체적분율은 다른 현상을 보이고 있다. 탄산칼슘이 탱크의 바닥에 침전되어 있는 상태에서부터 180 rpm으로 운전하기 시작할 때 MRF 기법의 경우 임펠러의 회전에 의해 탄산칼슘이 중앙부분으로 볼록하게 솟아 오른 후, 임펠러 하부에서 퍼진 뒤 교반 탱크 내에서의 벽면으로 토출되면서 임펠러 상부로 탄산칼슘이 퍼지는 것을 관찰할 수 있으며, SM 기법의 경우 운전이 시작되면서 임펠러 하부에서 서서히 퍼진 탄산칼슘이 벽면쪽에서 임펠러의 상부로 퍼지는 현상을 관찰할 수 있었다. 전산 해석결과와 가시화 실험결과와의 비교 결과 MRF 기법보다 SM 기법이 더 유사한 것으로 나타났다.

Rushton turbine type의 교반 탱크 내 전 체적에

탄산칼슘이 퍼지는 시간은 MRF 기법과 SM 기법이 동일한 시간(12 s)이 걸렸으나, 시간별 탄산칼슘의 체적분율은 다른 현상을 보이고 있다. 탄산칼슘이 물의 바닥에 침전되어 있는 상태에서부터 180 rpm으로 운전하기 시작할 때 MRF 기법의 경우 임펠러의 회전에 의해 탄산칼슘이 중앙부분으로 볼록하게 솟아 오른 후, 임펠러 하부에서 퍼진 뒤 교반 탱크 내에서의 벽면으로 토출되면서 임펠러 상부로 탄산칼슘이 퍼지는 것을 관찰할 수 있으며, SM 기법의 경우 운전이 시작되면서 임펠러 하부에서 서서히 퍼진 탄산칼슘이 벽면쪽에서 임펠러의 상부로 퍼지는 현상을 관찰할 수 있었다. 전산 해석결과와 실험결과와의 비교 결과 MRF 기법보다 SM 기법이 더 유사한 것으로 나타났다.

5-2 단면에서의 유동 분포

Fig. 14와 15는 각각 MRF 기법과 SM 기법으로 pitched paddle type의 교반 탱크 내 단면에서의 속도 분포에 대한 해석결과를 나타낸다.

가시화 실험 결과 최대 속도는 2.04 m/s로 나타났으나 해석 결과 최대 속도는 1.8 m/s로 나타났다. 임펠러 상부에서 임펠러에 의해 토출되는 유동과 임펠러 하부에서 임펠러에 의해 토출되는 유동은 비슷한 경향을 보이고 있으나, 상하부에서 임펠러로 흡입되고 순환하는 SM 기법과는 달리 MRF 기법은 상부로는 토출되는 유동을 나타내고 있으며, 하부에서는 흡입되는 주된 유동만 관찰되고 있다.

Fig. 16과 17은 전산해석으로 얻어진 난류운동의 분포를 Y축 중앙 단면, Z축에서의 임펠러 중앙 단면 및 임펠러와 근접한 상하부 단면으로 나타낸 것이다. 각 단면에서의 최대 난류 운동 에너지는 MRF 기법의 경우 임펠러 하단의 중앙부분에서 약 0.25 m²/s²로 나타났으며, SM 기법의 경우 임펠러 하부쪽에 0.00908 m²/s²로 나타났다.

Fig. 18과 19는 rushton turbine type의 교반 탱크 내 단면에서의 속도 분포에 대한 MRF 기법과 SM 기법의 해석결과를 나타낸 것이다. 가시화 실험 결과 최대 속도는 4.0 m/s로 나타났으나 해석 결과 최대 속도는 3.0 m/s로 나타났다.

전체적인 속도분포와 임펠러 상하부의 속도분포는 MRF 기법과 SM 기법이 거의 유사하게 나타났다. 하지만 탱크 벽면을 따라 회전하는 유동은 MRF 기법에 비해 SM 기법으로 해석한 결과가 가시화 결과

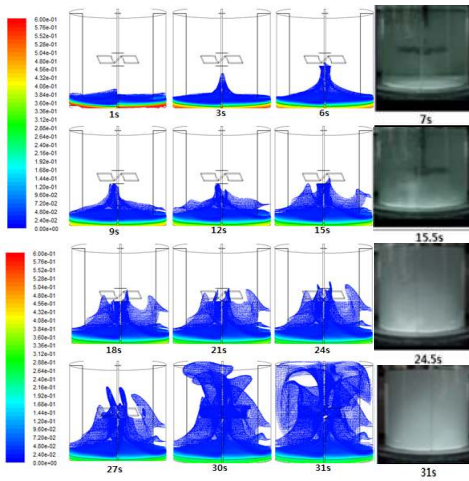


Fig. 10. Contour of volume fraction CaCO₃ of the pitched paddle type : mixture model, MRF

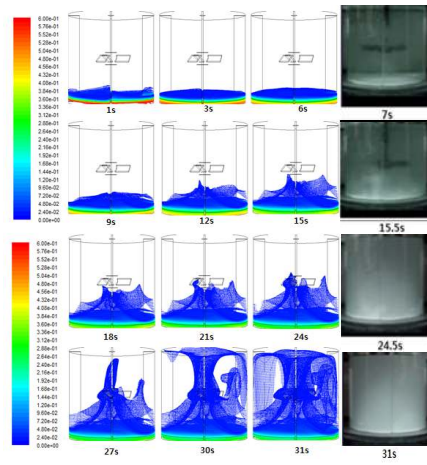


Fig. 11. Contour of volume fraction CaCO₃ of the pitched paddle type : mixture model, SM

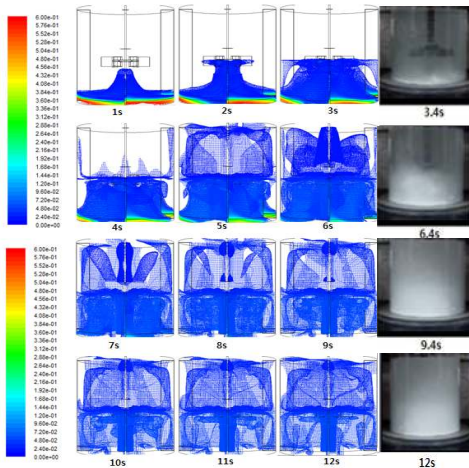


Fig. 12. Contour of volume fraction CaCO₃ of the rushton turbine type : mixture model, MRF

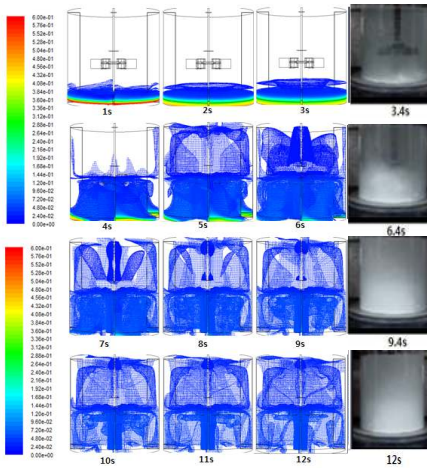


Fig. 13. Contour of volume fraction CaCO₃ of the rushton turbine type : mixture model, SM

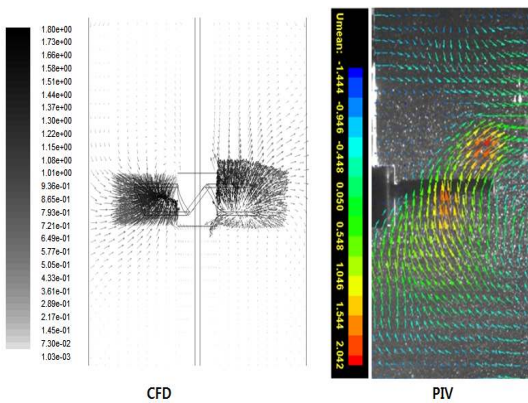


Fig. 14. Fluid velocity distribution compared with PIV of the pitched paddle type : mixture model, MRF(Y=0)

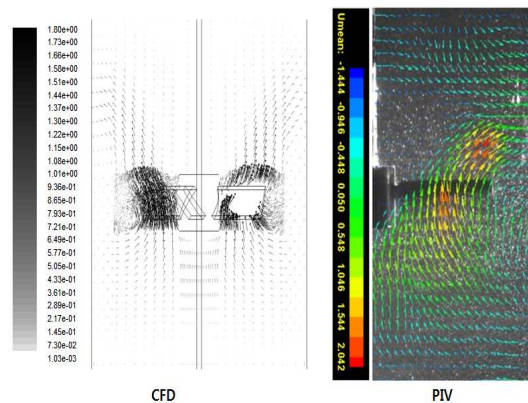


Fig. 15. Fluid velocity distribution compared with PIV of the pitched paddle type : mixture model, SM(Y=0)

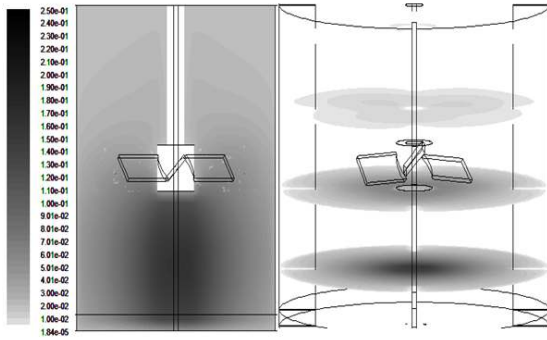


Fig. 16. Turbulent kinetic energy distribution of the pitched paddle type : mixture model, MRF (Y=0, Z surface)

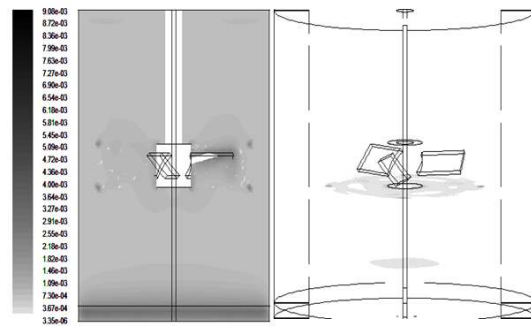


Fig. 17. Turbulent kinetic energy distribution of the pitched paddle type : mixture model, SM (Y=0, Z surface)

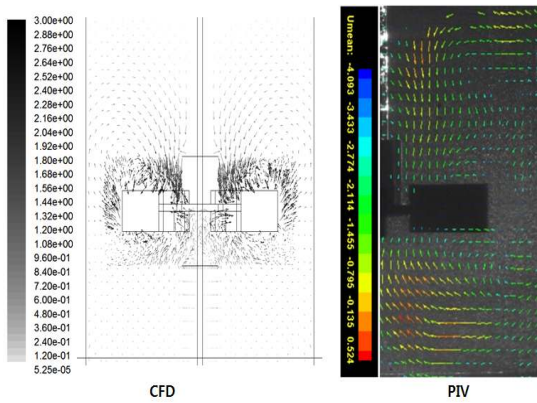


Fig. 18. Fluid velocity distribution compared with PIV of the rushton turbine type : mixture model, MRF(Y=0)

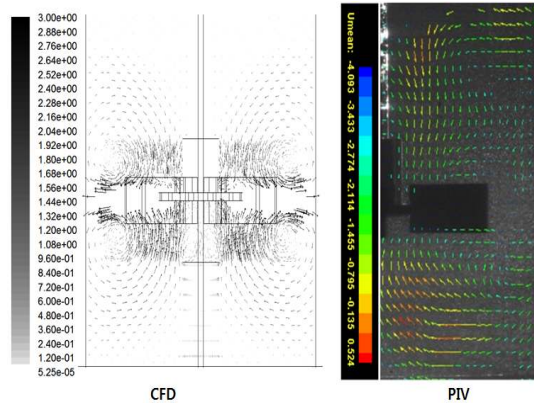


Fig. 19. Fluid velocity distribution compared with PIV of the rushton turbine type : mixture model, SM(Y=0)

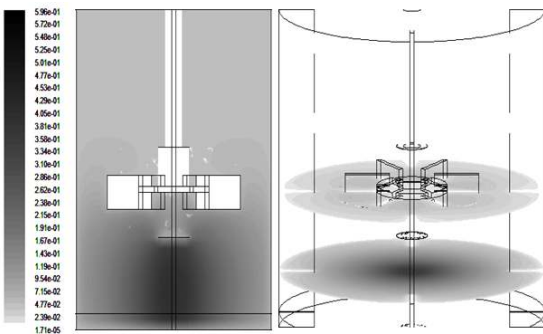


Fig. 20. Turbulent kinetic energy distribution in the Rushton turbine stirred tank : mixture model, MRF (Y=0, Z surface)

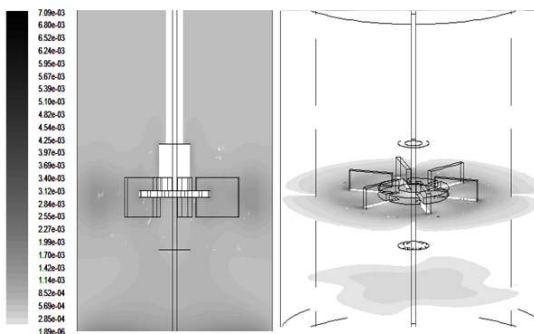


Fig. 21. Turbulent kinetic energy distribution in the Rushton turbine stirred tank : mixture model, SM (Y=0, Z surface)

와 비슷하게 나타났다.

Fig. 20과 21은 전산해석으로 얻어진 난류운동의 분포를 Y축 중앙 단면, Z축에서의 임펠러 중앙 단면 및 임펠러와 근접한 상하부 단면으로 나타낸 것이다. 각 단면에서의 최대 난류 운동 에너지는 MRF 기법의 경우 임펠러 하단의 중앙부분에서 약 $0.596 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 로 나타났으며, SM 기법의 경우 임펠러 하부쪽에 $0.00709 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 로 나타났다.

교반 탱크 내부의 유동 해석 및 가시화 실험의 비교를 통해 MRF 기법과 SM 기법 모두 유체가 임펠러로 흡입되어 벽면으로 토출되는 전체적인 순환 패턴 및 임펠러 회전날개 끝단에서의 유체속도를 유사하게 예측하였다.

그러나 회전영역 내부의 유적선을 볼 때 임펠러 상부의 소용돌이 형상의 흡입유동을 예측하는 기법은 SM 기법이며 이는 격자계가 고정되어 있는 것보다 격자계의 이동을 고려한 결과의 차이로 생각된다. 따라서, MRF 기법은 회전체 형상 효과가 중요하지 않은 유동에 대한 해석에 적절할 것이라 판단된다. 즉, 형상 효과가 무시되는 경우 특정 시점의 유동장을 나타내는 MRF 기법의 해석결과를 정상상태의 유동장으로 간주하여도 무방할 것으로 사료된다.

반면에 특정 형상을 갖는 회전체의 회전이 전체 유동장에 미치는 영향을 무시할 수 없을 경우에는 회전체의 회전에 의한 형상 효과를 고려할 수 있는 SM 기법이 사용되어야 한다. 그러므로 임펠러의 형상 효과에 따라 내부 유동형태가 변화하는 교반 탱크의 경우 MRF 기법에 비해 SM 기법이 더 적절함을 알 수 있다. 또한 해석결과와 실험 결과를 비교한 결과 시간에 따른 교반 탱크 내부 비정상 유동 패턴의 파악 및 탄산칼슘 분포를 통해서 SM 기법이 MRF 기법에 비해 내부 유동 형태에 대한 정확한 예측이 가능할 것으로 파악되었다.

6. 결론

- 1) 다상 모델 중 mixture model을 이용하여 시간별 탄산칼슘의 분포를 전산 유체해석한 결과 임펠러의 종류가 같으면 해석 기법에 관계없이 교반 탱크 전체에 탄산칼슘이 분포하게 되는 시간은 동일하게 나타났으며, rushton turbine type이 pitched paddle type 보다 교반이 더 빠르게 이루어짐을 확인할 수 있었다.
- 2) 교반 성능에 대하여 mixture model이 교반 형태를 예측하는 적절한 방법인 것을 알 수 있었다.
- 3) Standard, k-ε 모델을 이용하여 교반 탱크 내의 유동 속도를 해석한 결과 임펠러의 종류에 관계없이 MRF 기법보다 SM 기법이 가시화 실험의 결과와 유사함을 보였다.
- 4) 전산 유체해석 및 가시화 실험을 비교한 결과 교반 탱크 내의 유동처럼 움직이는 물체를 위한 전산 유체해석 기법에는 물리적 현상을 더 유사하게 표현하는 SM 기법이 적절함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국민대학교 교내연구 지원사업(2012년) 및 한산업통상자원부의 재원으로 한 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20119010100070)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Harvey III, A. D., and Rogers, S. E. "Steady and unsteady computation of impeller-stirred reactors", *AIChE J.*, 1996, Vol. 42, pp. 2701-2712
2. Fentiman K. Ng, J. N., Lee K. C., and Yianneskis, M., "Assessment of sliding mesh CFD predictions and LDA measurements of the flow in a tank stirred by a Rushton impeller", *Chem. Eng. Res. Des.*, 1998, Vol. 76, pp. 737-747
3. Al-Rashed, M. H., and Jones, A. G., "CFD modelling of gas-liquid reactive precipitation", *Chem. Eng. Sci.*, 1999, Vol. 54, pp. 4779-4784
4. Panneerselvam, R., Savithri, S., and Surender, G. D., "CFD modeling of gas-liquid-solid mechanically agitated contactor", *Chem. Eng. Res. Des.*, 2008, Vol. 86, pp. 1331-1344
5. Hirata, Y. and Y. Aoshima, "Formation and growth of cavern in yield stress fluids agitated under baffled and non-baffled conditions", *Chem. Eng. Res. Des.*, 1996, Vol. 74a, pp. 438-444
6. 이승엽, 전현태, 남청도, 이영호, "교반기의 임펠러 형상 및 회전속도별 CFD 해석", 대한기계학회 부산지부, 2007년도 춘계학술대회 논문집, pp.

- 29-34.
7. Harvey III. A.D., Rogers S.E, “Steady and unsteady computation of impeller-stirred reactors”, *AICHE, Journal*, 1996, Vol. 42, pp. 2701-2712
 8. Al-Rashed M.H., Jones A.G., “CFD modelling of gas}liquid reactive precipitation”, *Chemical Engineering Science*, 1999, Vol. 54, pp. 4779-4784
 9. Pnerselvam R., Savithri S., Surender G.D, “CFD modeling of gas-liquid-solid mechanically agitated contactor”, *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, Vol. 86, pp. 1331-1344
 10. Kaminoyama M., Nishi K., Misumi. R, Inue. T, "Numerical analysis of the mixing process of heterogeneously viscous system with high concentration slurry liquids in s stirred vessel", *Journal of chemical engineering of Japan*, 2007, Vol 80, No. 8, pp. 645-651
 11. *Fluent 6.3 User Guide*, Fluent Inc., 2006.