

교반 탱크 내 회전 유동의 CFD 해석 연구

조 찬 영, 남 진 현^{*†}, 신 동 훈^{*}, 정 태 용

국민대 기계공학과 대학원, ^{*}국민대 기계자동차공학부

A Study on CFD Simulation of Rotational Flow in Stirred Tanks

Chan Young Cho, Jin Hyun Nam^{*†}, Donghoon Shin^{*}, Tae-Yong Chung

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kookmin University

^{*}School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University

ABSTRACT: Stirred tanks are widely used in various industries for mixing operations and chemical reactions for single- or multi-phase fluid systems. In this study, a numerical study was conducted to predict the mixing characteristics in a simple stirred tank. The flow in the model stirred tank was calculated utilizing the multiple reference frame (MRF) and the sliding mesh (SM) capabilities of a commercial CFD code (Fluent 6.2). The results of the flow simulation were analyzed in terms of the mixing efficiency, and the applicability of MRF and SM methods was also discussed.

Key words: Stirred tank(교반 탱크), CFD(전산유체역학), Multiple reference frame(다중좌표계), Sliding mesh(이동 격자)

기 호 설 명

k : 난류 운동에너지 (m^2/s^2)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 ϵ : 난류 운동에너지 소산율

1. 서 론

교반 탱크(stirred tank)는 회전하는 임펠러(impeller)를 이용하여 단상 또는 다상의 유체를 지속적으로 유동시키는 장치로, 유체의 혼합이나 고상, 기상, 액상 간의 상호작용이 중요한 화학반응, 폐수처리, 콜로이드 분산 등 다양한 산업분야

에서 많이 적용되는 공정이다. 실제 교반 탱크의 형상에 비례하는 모델을 제작하고 고가의 장비를 이용하여 분석하는 실험적 연구는 시간 및 비용적인 측면에서 제약이 크며, 실제 크기에 대한 연구는 매우 어렵다.⁽¹⁾

전산유체역학(CFD)을 이용한 교반 탱크 내 유동 특성에 대한 해석적 연구는 위에서 기술한 실험적 연구의 단점을 보완할 수 있어 현재 연구가 활발히 이루어지고 있다. 해석적 연구는 실험에 비해 비용 절감 및 결과 획득시간을 단축할 수 있으며, 일단 해석 모델에 대한 격자가 완성되면 다양한 운전조건에 따른 결과를 쉽게 얻을 수 있다. 또한 교반 탱크 내 유동상황에 대한 실험에 비해 상세한 결과를 얻을 수 있다.

일반적으로 교반 탱크 내의 회전 유동의 해석은 두 가지 기법에 의해 처리된다. 첫 번째는 여러 개의 서로 다른 좌표계를 혼용하여 임펠러의 회전을 고려하는 다중좌표계(MRF: multiple

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4818; fax: +82-2-910-5179

E-mail address: akko2@kookmin.ac.kr

reference frame) 기법이다. MRF는 비교적 간단한 해석모델의 설정을 통해 교반 탱크 내 회전 유동을 해석할 수 있다. 그러나 MRF를 통해 얻어진 해석 결과는 특정 시점에서의 유동장으로 이해되어야 한다.

두 번째는 격자의 이동을 통해 임펠러의 회전 효과를 처리하는 이동 격자(SM: sliding mesh) 기법이다. SM 기법은 서로 독립적인 두 개 이상의 격자공간이 상대속도를 가지고 이동하는 상황을 해석할 수 있어 정확한 비정상 상태의 해석이 가능하다. 그러나 SM 기법은 격자생성 및 모델 설정에 MRF 기법보다 많은 노력과 시간이 필요하다.^(1,4)

본 논문에서는 MRF 및 SM 기법을 적용하여 교반 탱크 내 회전 유동의 해석을 수행하였다. 해석에는 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2⁽⁵⁾를 사용하였으며, 속도, 유동선, 난류강도 분포 등을 통해 교반 탱크 내부 유동 및 혼합특성 파악하였다.

2. 해 석

2.1 격자구성

전산유체역학 해석에는 기본적인 교반 탱크(stirred tank) 및 임펠러(impeller) 형상이 고려되었다. 즉, Fig. 1과 같이 기존의 연구⁽¹⁻⁴⁾에서 다루어진 기하학적 형상을 참조하여 교반 탱크 모델을 생성하였다. 임펠러 형상은 6개의 회전날(blade)을 갖는 표준적인 디스크 타입의 Rushton 터빈 형태를 갖는 것으로 가정하였다. 또한 교반 탱크 내 회전유동을 조절하기 위한 배플(baffle plate)도 탱크 내벽의 옆면 각각 90° 위치에 생성하였다.

Fig. 2는 본 연구에서 고려된 교반 탱크 시스템의 전체적인 격자를 보여주고 있다. 이러한 형상 모델을 통해 다양한 해석 기법을 검토하고 격자 생성 시 문제점 및 해석의 정확도와 계산시간에 있어서 효율적인 해석 기법의 선정에 대해 언급한다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 고속으로 회전하는 임펠러 주위의 격자는 매우 조밀하게 구성되었다. 이 영역은 교반 탱크 내에서 유동장의 형태가 가장 복잡한 영역이며, 따라서 해석의 정확도를 확보하기 위하여 격자밀도를 높게 설정하는

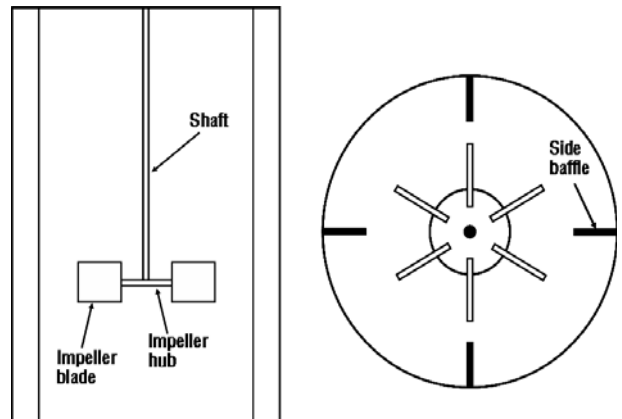


Fig. 1 Geometry of the stirred tank considered in this study.

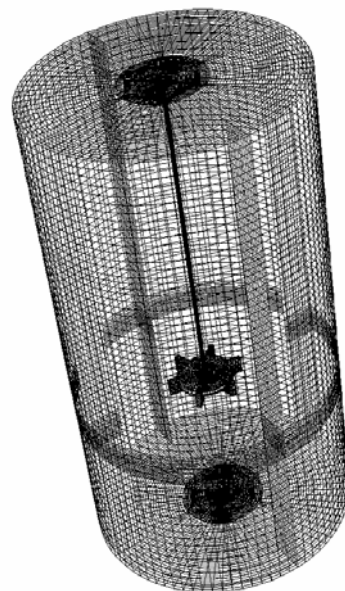


Fig. 2 Calculation grid for the stirred tank.

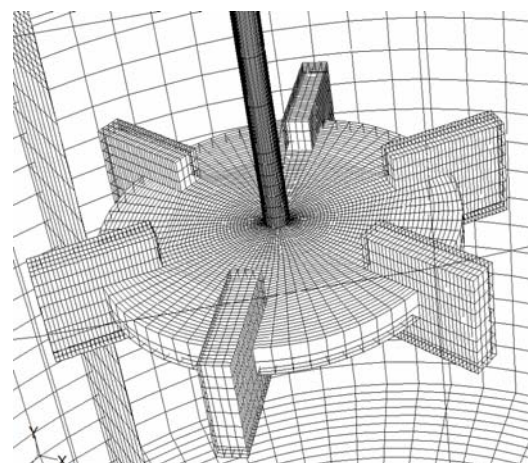


Fig. 3 Calculation grid for the impeller.

것이 필요하다. 실제 해석 모델의 설정 시에도 임펠러 부분의 격자생성이 가장 오랜 시간을 필요로 하는 작업이었다. 교반탱크의 나머지 영역에서는 해석 시간의 최적화를 위하여 밀도를 줄여 격자를 생성하였다. 형상모델 및 생성된 격자의 정보는 Table 1에 정리하였다.

2.2 해석모델

교반탱크의 해석에는 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2⁽⁵⁾를 사용하였다. 고속의 회전에 의한 유동현상을 해석하기 위해서 다음과 같은 식의 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \quad (1)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \quad (2)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) + C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

위 식 (1) 과 (2)는 각각 난류운동에너지(k) 및 난류 운동에너지 소산율(ϵ)의 지배방정식이다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 MRF 및 SM 기법을 이용하여 교반탱크 내부의 회전유동의 해석결과를 제시한다. 이를 위하여 Fig. 4처럼 임펠러 주위의 고속으로 회전하는 영역과 외부의 고정된 영역을 구별하여 해석을 수행하였다. MRF 기법에서는 회전영역에 일정한 각속도의 회전(rotational) 좌표계를 설정하여 임펠러 회전에 의한 운동량 전달을 고려하게 된다. SM 기법에서는 일정한 각속도로 회전영역의 격자를 이동시키며 고정영역과의 경계에서는 보간을 통해 압력 및 유동장을 매칭시킨다.

가장 기본적인 물이 교반탱크 내부에 존재한다고 가정하여 해석을 수행하였으며 그 물성은 Table 2에 정리되어있다. Table 2의 운전조건에서 임펠러의 회전 속도는 1200 rpm(125.66 rad/s)으로 가정되었으며, 이는 중심으로부터 약 10 cm 떨어진 회전날 끝단에서의 12 m/s 정도의 고속에 해당한다. 본 연구에서는 임펠러 의한 교반

Table 1 Geometry and mesh information for stirred tank simulation.

	Parameter (H×W×L)	Grid no. (EA)	Mesh type
MRF	1.366 × 0.683	250,000	HEX. Cooper
SM	0.683 × 0.683	635,000	HEX

Table 2 Fluid properties (liquid water) and operation conditions.

Property	Parameter
Density (kg/m ³)	998.2
Viscosity (kg · m/s)	0.001003
Temperature (K)	298.15
Rotational speed (rpm)	1200
Reference pressure (bar)	1

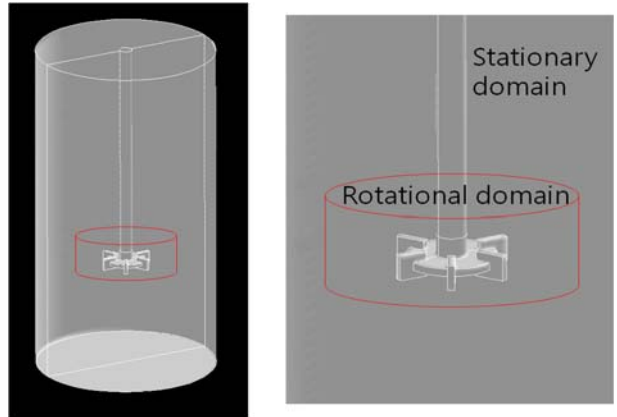


Fig. 4 Definition of stationary and rotational domains for simulation of the stirred tank.

탱크 내 유체의 회전유동을 해석하고 이를 통해 혼합특성을 파악한다. 또한 회전유동을 처리하는 MRF 및 SM 기법을 비교하여 유동 해석에 대한 활용성을 살펴본다.

3. 해석결과

3.1 MRF를 이용한 결과

MRF 기법을 이용하여 해석한 교반탱크 내부의 속도분포가 Figs. 5와 6에 나타내어져 있다. Fig. 5는 전체적인 속도분포를 나타내며, Fig. 6은 여섯 개의 내부 수평면에서의 속도분포를 보

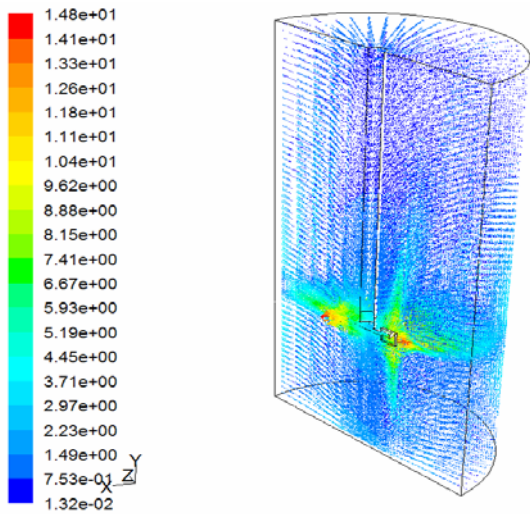


Fig. 5 Fluid velocity distribution in the stirred tank: MRF simulation.

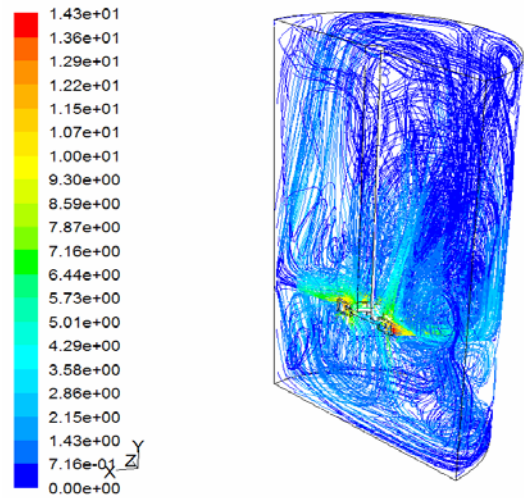


Fig. 7 Path-line distribution in the stirred tank: MRF simulation.

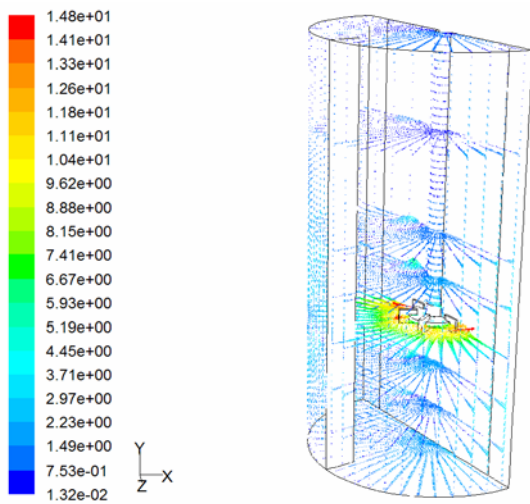


Fig. 6 Fluid velocity distribution in horizontal planes of the stirred tank: MRF simulation.

여준다. 해석결과 회전날 끝단에서의 속도가 약 14.8 m/s로 가장 크게 나타났으며, 이 값은 임펠러 회전속도와 유사하다. 전체적인 유동은 교반 탱크의 상부와 하부에서 임펠러 방향으로 흡입되며, 회전 모멘텀을 받아 탱크 벽면 방향으로 고속으로 토출되어 이후 벽면에 부딪혀 대순환하는 구조를 갖는다. Fig. 6에서 임펠러의 회전에 의해 상, 하부 모두 반시계 방향으로 회전하는 유동이 관찰되며 임펠러와의 거리에 따라 속도는 점차 감소하였다.

유동패턴을 보다 자세하게 관찰하기 위해 Fig. 7에서 유적선(path line)을 가시화하였다. Figs. 5와 6에서 관찰된, 상, 하부 모두에서 임펠러 방향

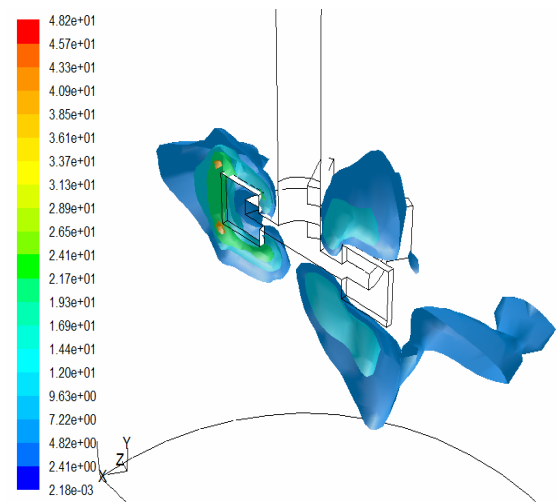


Fig. 8 Turbulent kinetic energy distribution in the stirred tank: MRF simulation.

으로 흡입된 후 벽면 방향으로 고속으로 토출되는 형상은 Fig. 7의 유적선에서도 잘 관찰된다. 정체영역이 거의 없이 유적선이 고르게 분포하고 있어 유체의 혼합 측면에서는 혼합에 잘 이루어지는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 전산해석으로 얻어진 임펠러 주위의 난류강도의 분포로, 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)가 5, 10, 20, 40 m^2/s^2 인 등에너지 표면(iso-surface)을 나타낸다. 이러한 난류 운동에너지는 주유동 성분과 독립적인 섭동성분의 크기와 관련되며, 즉 유체 혼합의 지표가 된다. 따라서 Fig. 8에서처럼 가장 높은 난류 에너지가 관찰되는 회전날 부근에서 가장 활발한 혼합이 기대된다, 유체의 혼합이 중요한 공정에서는 회

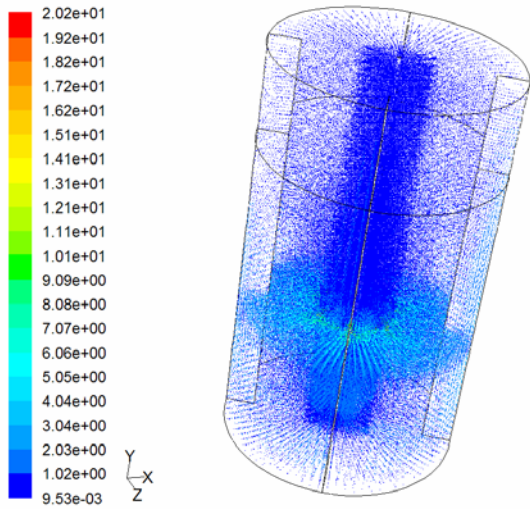


Fig. 9 Fluid velocity distribution in the stirred tank: SM simulation.

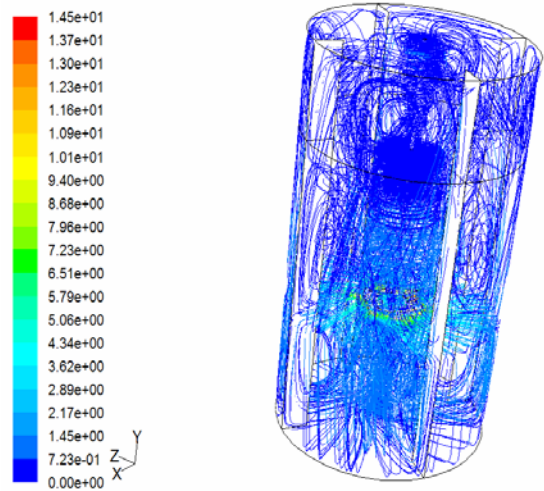


Fig. 11 Path-line distribution in the stirred tank: SM simulation.

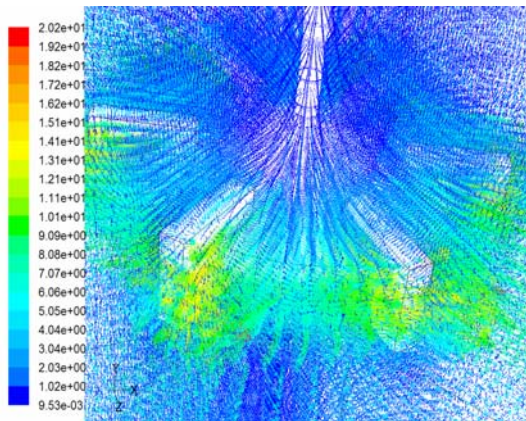


Fig. 10 Fluid velocity distribution near the impeller in the stirred tank: SM simulation.

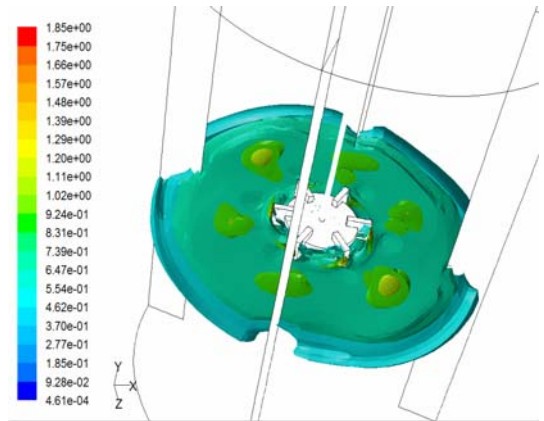


Fig. 12 Turbulent kinetic energy distribution in the stirred tank: SM simulation.

전날 부근과 같은 혼합이 활발한 영역의 격자를 조밀하게 생성하여한다.

3.2 SM을 이용한 결과

SM 기법을 이용하여 해석한 교반 탱크 내부의 속도분포를 Figs. 9과 10에 나타내었다. 대칭적인 형상을 고려한 MRF 기법과는 다르게 SM에서는 교반 탱크의 전 영역에 대해 격자를 구성하여 해석을 수행하였다. 해석 결과 회전날 끝단에서의 속도가 약 14.5 m/s로 나타났으며 전체적인 유동은 MRF를 이용한 결과와 유사하게 임펠러 방향으로 흡입된 후 임펠러의 회전에 의해 탱크 벽면으로 토출 순환되는 구조를 갖는다.

Fig. 11은 SM 기법으로 얻어진 유적선(path line)으로 MRF 해석결과와 마찬가지로 교반 탱

크 내부에 고르게 분포되는 것으로 판단된다. 유체 혼합은 대체적으로 잘 이루어지는 것으로 판단되어진다. 그러나 MRF 기법에 비해 SM 기법의 결과는 보다 강화된 회전유동을 예측하고 있으며 특히 임펠러의 상부에서는 소용돌이 형태의 유동이 크게 나타난다.

Fig. 12는 교반 탱크 내 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)가 8, 10, 12, 14, 16, 18 m^2/s^2 인 등에너지 표면을 나타낸 것이다. SM 기법을 이용한 해석에서 난류 운동에너지의 최대값은 약 $18.46 m^2/s^2$ 로 MRF 기법보다 작게 나타났지만, 전체적으로는 난류에너지가 높은 영역이 더 넓게 분포하는 것으로 예측되었다. 특히 이러한 영역이 임펠러 위치 수평면에 고르게 분포되어 있는 것으로 관찰된다.

4. 토 의

이상의 교반 탱크 내부의 유동 해석에서 MRF와 SM 기법 모두 전체적인 유동장을 유사하게 예측하는 것으로 나타났다. 즉 두 가지 기법 모두 유체가 임펠러로 흡입되어 벽면으로 토출되는 전체적인 순환 패턴 및 약 15 m/s 정도의 임펠러 회전날 끝단에서의 유체속도를 유사하게 예측하였다. 그러나 MRF와 SM 기법이 예측한 유적선 및 난류 운동에너지의 분포는 상당한 차이를 보였다.

본 연구에 사용한 Fluent 6.2에서는 다양한 설비에서 나타나는 회전유동의 해석을 위해 MRF와 SM 기법을 제공한다. 앞서 언급한 대로 MRF 기법은 회전유동을 유도하는 임펠러와 같은 회전체 형상의 효과가 중요하지 않은 유동에 대해 추천된다. 즉, 형상효과가 무시되는 경우 특정 시점의 유동장을 나타내는 MRF의 해석결과를 정상상태에서의 유동장으로 간주하여도 무방하다.

반면에 회전에 따른 회전체의 형상이 전체 유동장에 미치는 영향을 무시할 수 없을 경우에는 SM 기법이 사용되어야 한다. 즉, 격자계의 이동을 통해 회전체의 회전에 의한 형상효과를 정확하게 고려할 수 있다. 따라서 교반 탱크와 같이 임펠러의 형상효과가 중요한 문제에서는 MRF에 비해 SM 기법이 더 적절하며, 이는 본 해석결과에서도 확인할 수 있다.

MRF 기법과는 다르게 SM 기법으로 얻어진 유적선 분포는 임펠러 상부에서 소용돌이 형상의 흡입유동을 예측하고 있다. 또한 난류 운동에너지가 MRF 기법에서는 임펠러 회전날 주위의 국한되어 높게 예측되는 것에 비하여, SM 기법에서는 유체가 토출되는 수평면에서 더욱 고르게 분포되는 것으로 예측되었다. 따라서 SM 기법의 해석결과가 실제 교반탱크에서 관찰되는 유동패턴과 더욱 좋은 일치성을 보이는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2의 MRF와 SM 기법을 이용해 교반 탱크 내 회전유동을 해석하였다. 또한 효율적인 회전유동 해석 기법을 제시하기 위해 두 기법의 내부 속도 분

포, 유적선 및 난류 운동에너지의 해석결과를 비교하였다.

MRF 기법은 SM 기법에 비해 내부의 격자 구성 및 해석 속도에 대한 장점을 나타냈다. 그러나 회전체의 형상 효과가 중요시 되는 교반 탱크 내 유동 해석 시 격자계의 이동을 통해 회전체의 회전에 의한 형상효과를 정확하게 고려하는 SM 기법의 사용이 더욱 적절할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 에너지 관리공단 에너지 자원기술개발사업 중 “고농도 슬러리 분산 시스템 운영 및 시제품 생산을 위한 전산해석 연구(과제번호: 2007-M-CC-12-P-03-3-020-2008)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Harvey III, A. D., and Rogers, S. E. 1996, Steady and unsteady computation of impeller-stirred reactors, *AIChE J.*, Vol. 42, pp. 2701-2712.
2. Ng, K., Fentiman, N. J., Lee, K. C., and Yianneskis, M., 1998, Assessment of sliding mesh CFD predictions and LDA measurements of the flow in a tank stirred by a Rushton impeller, *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 76, pp. 737-747.
3. Al-Rashed, M. H., and Jones, A. G., 1999, CFD modelling of gas-liquid reactive precipitation, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 54, pp. 4779-4784.
4. Panneerselvam, R., Savithri, S., and Surender, G. D., 2008, CFD modeling of gas-liquid-solid mechanically agitated contactor, *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 86, pp. 1331-1344.
5. *Fluent 6.2 User Guide*, Fluent Inc., 2005.