

# 혼합탱크 내의 임펠라 형태에 따른 유동 특성에 관한 수치해석

송길섭\* · 오석영\*\* · 오정진\*\*\*

## Numerical Study on Flow Patterns in a Stirred Tank with Impeller Types

Gil-Sub Song\*, Sueg-Young Oh\*\*, Jeong-Jin Oh\*\*\*

*Key Words:* Axial Flow Impeller(축류유동 임펠라), Radial Flow Impeller(반경방향유동 임펠라), Stirred Tank(혼합 탱크), RNG k-ε Model, MRF, Sliding Method, Unsteady Flow(비정상 유동)

### ABSTRACT

The present study is concerned with the flow patterns induced by various impellers in a rectangular tank. Impellers are FBT (Flat blade turbine), PBT (Pitched blade turbine), Shroud turbine, Rushton turbine, and Helical ribbon turbine types. The solutions of flows in moving reference frames require the use of "moving" cell zone. The moving zone approaches are based on MRF (Multiple reference frame), which is a steady-state approximation and sliding method, which is an unsteady-state approximation. Numerical results using two moving zone approaches are compared with experiments by Ranade & Joshi, which have done extensive LDA measurements of the flow generated by a standard six-bladed Rushton turbine in a cylindrical baffled vessel. In this paper, we simulated the flow patterns with above-mentioned moving zone approaches and impellers. Turbulence model used is RNG k-ε model. Sliding-mesh method is more effective than MRF for simulating the rectangular tank with inlet and outlet. RNG k-ε model strongly underestimates the velocity of experimental data and velocity by Chen & Kim's model, but it seems to be correctly predicted in overall distribuion.

### 1. 서 론

“일반적인 정수처리공정”이란 필요한 공정제어와 계장설비가 갖추어진 혼화, 플록형성, 침전, 여과 그리고 소독공정을 결합한 시스템을 일컫는다. 특히, 혼화공정에서 급속 혼화공정은 응집체를 급속히 분산시켜 입자

의 충돌속도를 가속시킴으로써 전기적으로 불안정화된 콜로이드 입자를 침전성 또는 여과성이 있는 크기의 입자로 뭉치게 하는 것으로, 본 연구는 기계적 혼화 방식에 이용되는 급속 혼화장치의 임펠라에 관한 연구로써, 임펠라가 응집지 내에서 응집체의 빠른 혼화와 입자간의 충돌속도를 증가시키는데 목적이 있다. 기계적 혼화 방식에서 프록규레이터(Floculator)를 선택할 때의 특징<sup>(1)</sup>으로는 첫째, 플록형성지 각 단계 설계된  $G(=속도경사[sec^{-1}])$ 값이 전달되어야 하며, 둘째, 충분한 소용돌이와 난류를 발생하여 요구되는 속도 경사를

\* 수자원연구소 연구원

\*\* 수자원연구소 선임 연구원

\*\*\* 우송공업대학 컴퓨터응용기계계열 교수

E-mail : kssong113@daum.net

얻을 수 있어야 한다. 셋째, 혼화 날개 끝단에서 낮은 전단력을 발생하여야 한다. 이러한 특징중 본 연구는 날개 끝단에서 낮은 전단력과 지내의 고른 에너지 분포를 지닐수 있는 임펠라의 선정에 대해 각 형태별 임펠라의 유동 특성을 파악하는데 있다. James와 Rhodes<sup>(2)</sup>은 혼화를 위한 임펠라의 설계에 대한 기본 개념을 정의하고, 각 임펠라 형태에 따른 G값을 실험에 의하여 구하였다. 윤운영<sup>(3)</sup>은 임펠라의 형태에 따른 고점도 혼화에서의 기계적 특징들을 실험에 의하여 구하였고, Niels와 BjØm<sup>(4)</sup>은 rushton turbine의 유동을 PIV를 이용하여 유동장을 측정하였다. Paal<sup>(5)</sup>은 rushton turbine의 3차원 모델링을 단상(single phase)과 다상(multiphase)유동에 대하여 수행하였고, 이를 Ranade와 Joshi<sup>(6)</sup>의 실험과 비교하였다.

본 연구의 목적은 각 형태별 임펠라의 유동 특성을 파악하기 위하여 3차원 모델링을 수행하고, 이러한 모델링 기법중에서 유동특성을 잘 예측할 수 있는 모델을 선정함과 동시에 임펠라에 따른 지내의 유동 특성을 파악하는데 있다. 임펠라의 형태는 축류형 임펠라와 방사류형의 임펠라에 대하여 MRF와 Sliding mesh 방법<sup>(7)</sup>을 이용하여 유동해석을 하였다.

## 2. 수치해석 방법

유동장의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식이다. Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 이산화 하였고, 운동량 방정식의 대류항 이산화는 Quick scheme을 사용하였다. 난류 운동 에너지와 소산율은 2차 Upwind scheme을 사용하였다. 난류 모델은 빠르게 신장하는 유동에 적합한 RNG k-ε model을 이용하여 해석하였다. 본 임펠라 수치해석에서는 약품이 투입되어 형성된 비유체입자(floc)를 포함하고 있으나, 유동장을 뉴턴유체로 가정하여 상용코드인 FLUENT를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

### 2.1. MRF와 Sliding Mesh 방법

MRF 방법은 정적인 계산해를 구하는 방식으로, 혼합 탱크 내에서 벽과 임펠라, 버플과 임펠라와의 상호작용이 약할 때, 또는 버플이 설치되지 않은 원형 조에서 거시 유동을 구하기 위한 효과적인 방법이다. 그러나 버플이 설치된 조에서는 임펠라의 위치에 따라서 다른 결과를 나타내므로 두개 이상의 임펠라 위

치를 선정하여 해석한 후 평균을 취하는 것이 바람직한 방법이다. 회전체를 포함하는 격자 영역은 정적인 격자 영역에 대하여 일정한 각속도를 가지지만, 격자는 회전하지 않고, 회전 영역 내에서의 회전체의 속도는 이웃하는 격자에 대하여 상대 속도가 0이다.

Sliding mesh 방법은 계산동안 회전 요소를 둘러싸고 있는 격자가 물리적으로 돌고 있는 시간 종속 해이다. 혼합 탱크 내에서 벽과 임펠라, 버플과 임펠라와의 상호 작용이 활발하고, 시간에 대하여 유동장 내의 유동 특성을 파악할 때 사용되는 방법으로, 혼합 탱크에 대하여 가장 견고하고 유익한 해법이다. 움직이는 mesh 영역에서는 축과 임펠라의 속도는 0이다. 초기 위치에서, 움직이는 영역과 정적인 영역 사이의 경계는 두개의 면이 맞대어져, 하나의 경계로 이루어지고, 수치 해석 동안 한 표면은 회전체의 mesh 영역에 남아있고, 다른 하나는 정적인 mesh 영역에 위치한다. 움직이는 영역과 정지된 영역 사이의 정보 교환은 Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 1에서 접촉면사이에서의 flux를 계산하기 위하여 각각의 새로운 time step에서 접촉면사이의 교차점을 구한다. 두 접촉 zone의 교차점으로부터 생기는 face를 이용하여 접촉면을 지나는 flux를 구하게 된다. IV의 격자로 들어오는 flux를 계산하기 위해서는 face D-E를 무시하고, 새로운 time step에서 계산된 교차점 d-b, b-e를 이용하여 I, III으로부터 들어오는 flux를 구하게 된다. 이러한 유동 정보를 교환하고, 새로운 시간에서의 해를 구하기 위하여 회전축을 중심으로 움직이는 영역이 일정한 각속도에 대하여 회전하게 되고, 접촉면에서 새로운 교차점을 구한다.

MRF 및 Sliding mesh 방법에서 유동 영역을 분할하는 경계는 벽과 임펠라의 중간에서 분할하였다. 이는 혼합 탱크의 실험치와의 비교에서 가장 잘 실험과 일치하는 위치로 나타나 있다.

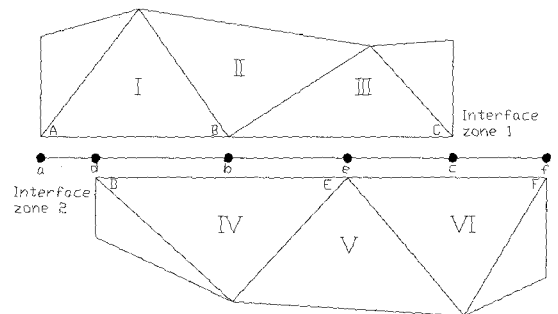


Fig. 1 Two-dimensional grid interface

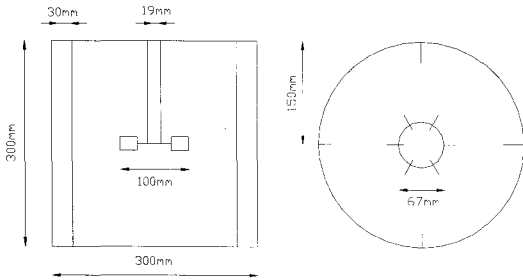


Fig. 2 Schematic diagram for validation

## 2.2. Validation

Ranade와 Joshi는 Fig. 2의 형상에서 LDA를 이용하여 유동장의 속도를 측정하였고, Paal은 동일 형상에서 Sliding mesh 방법과 난류모델인 Chen & Kim(C&K)을 이용하여 이를 3차원 수치해석을 하였다. 본 연구는 코드검증을 위하여 실험결과와 비교하고, 난류모델은 Paal의 수치해석 결과와 비교하였다. 임펠라의 회전 속도는 300 rpm이다.

## 2.3. 해석유동장

혼화지의 규격은  $T \times T \times H.W.L = 200 \times 200 \times 230 \text{mm}$ 이다. 수면의 높이를 230mm로 하고, 임펠라의 위치는  $C = T/4$ 이고, 임펠라의 직경은  $D_i = T/2.8571$ 이다. 허브의 직경은  $D_h = T/10$ 이고, 허브의 높이는  $W_h = T/13.33$ 이다. 축의 직경은  $D_s = T/16.67$ 이다. 수두를 일정하게 유지하기 위해 혼화지의 끝단에 V자형 노치를 위치시켰고, 모양은 이등변 삼각형으로 높이가  $h_{\text{outlet}} = T/6.67$ 이고, 면적은  $450 \text{mm}^2$ 이다. yz평면상에서 입구의 중심 높이는  $h_{\text{inlet}} = T/2.8571$ 이고,  $D_{\text{inlet}} = T/7.4074$ 인 원형 입구로 원수가  $0.00015 \text{m}^3/\text{sec}$ 로 유입된다. 임펠라 지름을 근거로 한 레이놀즈수( $Re = D^2 N \rho / \mu$ )는  $1.8 \times 10^6$ 이다. 임펠라의 회전수는 413rpm이다. Fig. 3은 해석 영역을 도시한 그림이다.

Fig. 4는 해석에 사용된 임펠라 형태이며, 수치해석을 위한 격자를 나타낸 것이다. 수치 해석 대상 임펠라는 FBT (Flat Blade Turbine), PBT (Pitched Blade Turbine), Shroud Turbine, Rushton Turbine, Helical Ribbon Turbine을 사용하였다. FBT 날개의 높이는 10.5mm이고, 깃 수는 4개이다. PBT 날개는 14.8mm이고, 회전축에 대하여  $45^\circ$ 로 기울어져 있고, 깃 수는 4개이다. Rushton Turbine 날개는 가로×세로= $22 \times 18 \text{mm}$ 이고, 날개를 지지하기 위하여 허브에 부착된 판의 지름은 46mm이고, 깃

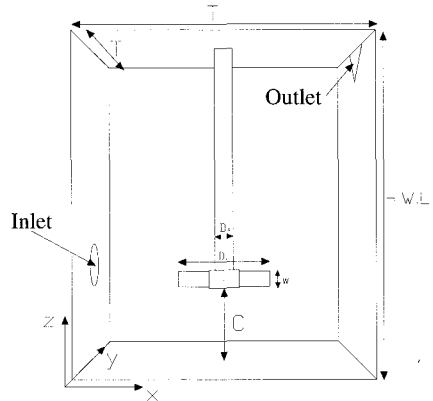


Fig. 3 Schematic diagram for computational domain

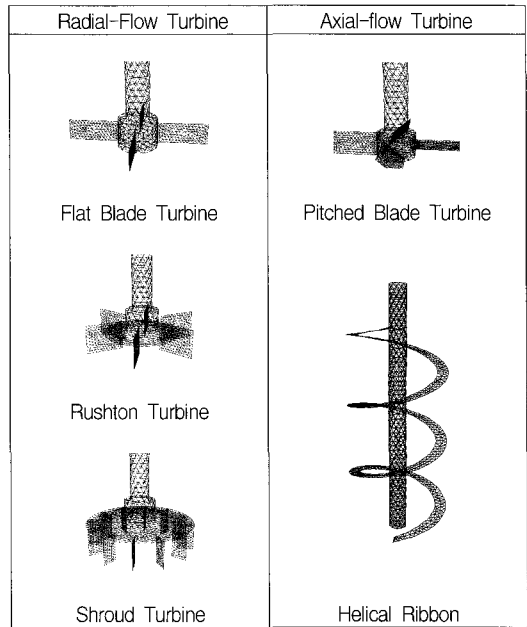


Fig. 4 Grids of mixing impeller

수는 6개이다. Shroud Turbine 날개는 가로×세로= $10 \times 17.5 \text{mm}$ 이고, 깃 수는 12이고, 축을 중심으로  $30^\circ$  간격으로 나열되어 있다. Helical Ribbon 날개는 폭이 7.5mm이고, 피치가 50mm이고, 높이가 150mm이다. 날개의 지지대는 수치해석에서 고려하지 않았다. 격자의 수는 8만개에서 9만개 사이이고, 사면체 격자를 사용하였다.

## 3. 수치해석결과

Ranade와 Joshi의 실험결과와 비교하고, 난류모델은

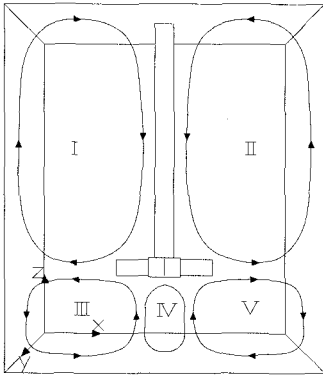


Fig. 5 The partition of flow field

Paal의 수치해석 결과와 비교하였다. 이러한 검증을 통하여 축류형 임펠라와 방사류형의 임펠라에 대하여 MRF와 Sliding mesh 방법을 이용하여 유동해석을 하였다. 임펠라 타입에 따라 유동장내의 순환 영역은 다르나, 유동장을 Fig. 5와 같이 분할하였다. I, II 영역은 임펠라 날개의 반경 방향을 중심으로 III, IV, V로 분할되고, III, IV, V 영역은 임펠라 축 아래 부분의 국부적인 교란 영역으로 분할된다.

### 3.1. 검증결과

Fig. 6은 임펠라 위쪽으로 140mm의 위치에서의 Radial velocity이다. MRF 방법은 실험치와 많은 차이를 보이고 있으며, Sliding mesh 방법을 이용한 해석 결과는 임펠라 축 부분에서는 과도하게 속도를 예측하였으며, C&K 난류모델보다 유동장 전반적으로는 과소예측(underestimate)하였다.

Fig. 7은 임펠라 위쪽으로 30mm와 125mm의 위치에서의 축방향 속도분포이다. MRF 방법은 실험결과를 과대

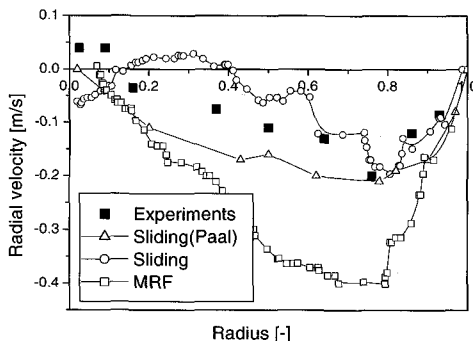
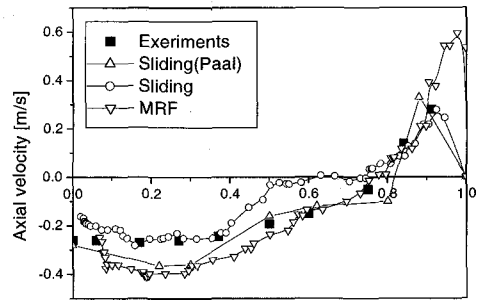
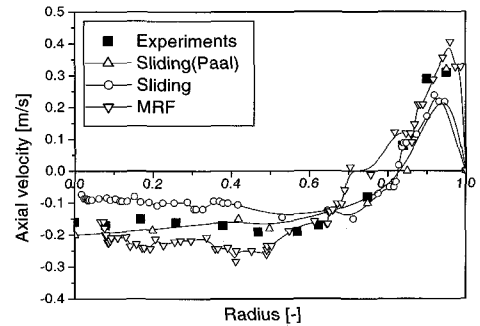


Fig. 6 Radial distributions of radial velocities at Z/R=0.2



(a)  $z/r=0.2$



(b)  $z/r=0.83$

Fig. 7 Radial distributions of axial velocities at four different levels

예측하였고, Sliding mesh 방법을 이용한 해석 결과는 전반적으로 과소예측 하였다. 그러나 전체적으로는 Sliding mesh 방법은 실험결과와 일치함을 알 수 있다. 본 연구에서의 난류 모델이 전반적으로 C&K 모델보다 과소예측 하는 경향이 있다.

### 3.2. 임펠라 형상에 따른 유동장

수치 해석 대상 임펠라는 FBT, PBT, Shroud Turbine, Rushton Turbine, Helical Ribbon Turbine을 사용하였다. MRF 방법은 정적인 계산해로, 혼합 탱크 내에서 임펠라의 상호 작용이 약할 때나 버플이 설치되지 않은 원형 조에서 거시 유동을 구하기 위한 효과적인 방법이다. 그러나 본 연구와 같이 사각조인 경우, 그리고 입구와 출구를 가지는 경우에는 적합하지 않은 방법이지만, 거시 유동을 관찰하고, Sliding mesh 방법과 비교하기 위하여 수치해석 방법으로 채택하였다.

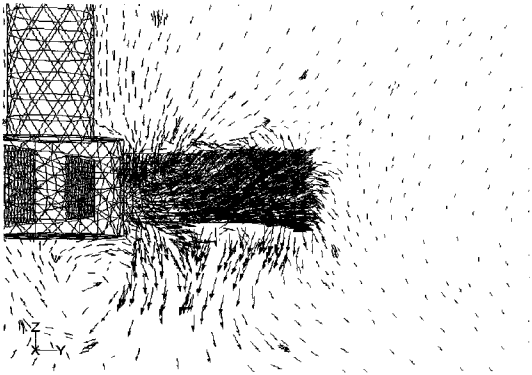
FBT는 반경 방향 임펠라이다. 그러나 Fig. 8(a)에서 임펠라 날개의 속도벡터는 반경 방향으로 유동이 진행되나, 날개의 아랫부분은 축류쪽으로 유동이 진행된다.

그래서 Fig. 8(a)처럼 유동의 순환영역이 I-III, II-V로 분리되지 않고, 합쳐져서 반경 방향의 임펠라 특성을 예측하지 못하였다. 축 중심 아랫부분의 유동 영역인 IV는 매우 심하게 교란되어 일정한 유동 형태를 취하지 못한다.

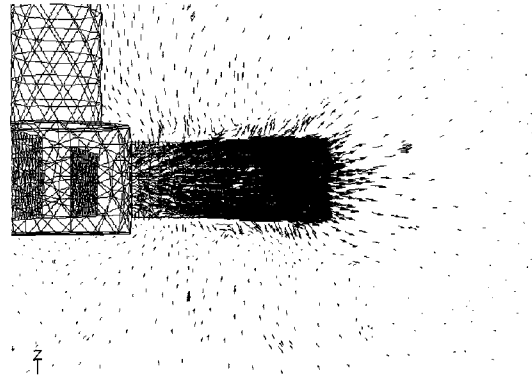
Fig. 8(b)은 FBT의 속도 벡터로 반경 방향 임펠라

의 특성이 잘 나타나 있고, 유동의 순환영역이 I-III, II-V로 분리되고, 축 중심 아랫부분의 유동 영역 IV는 영역 III, V와의 상호 작용으로 좌·우로 움직이면서 확장·축소를 반복하면서 심하게 교란된다.

Fig. 9는 Sliding mesh 방법을 이용한 속도벡터를 도시한 그림이다. Fig. 9(a)는 45° 받음각을 가지는 PBT로

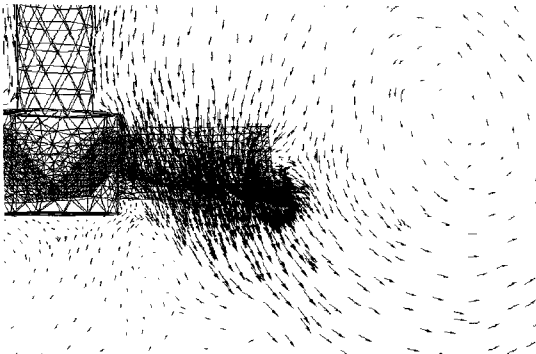


(a) MRF method

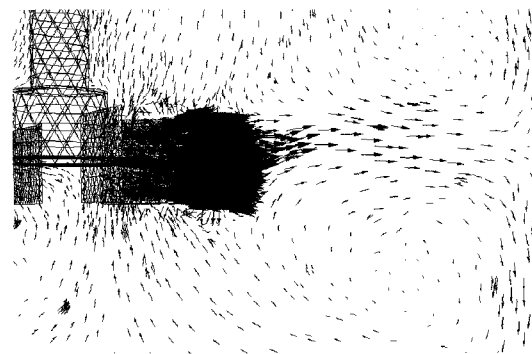


(b) Sliding mesh method

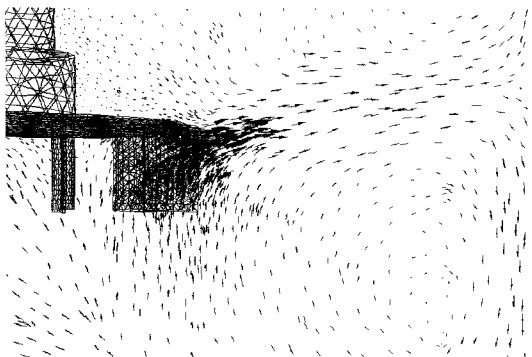
Fig. 8 Velocity vector plotting around FBT



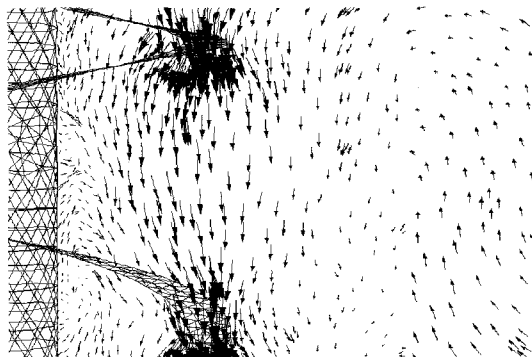
(a) Pitched blade turbine



(b) Rushton turbine



(c) Shroud turbine



(d) Helical ribbon turbine

Fig. 9 Velocity vectors of various impeller types using sliding mesh

날개의 속도벡터이다. 속도 벡터는 반경 방향과 아래 쪽으로 45°를 이루면서 축류 방향으로 진행되고, 유동의 순환영역이 I-III, II-V로 합쳐져서 축류 방향의 임펠라 특성을 잘 나타내고 있다. 축 아랫부분에서는 영역 IV와 같은 순환 영역이 형성되고, 이 영역은 주위의 영역과의 상호 작용으로 교란이 심하다. Fig. 9(b)는 Rushton Turbine의 해석 결과이다. 임펠라 날개의 속도벡터는 반경방향으로 진행되고, 유동의 순환영역이 I-III, II-V로 나누어져, 반경 방향흐름의 임펠라 특성을 나타내고 있다. 축 중심 아랫부분의 유동영역 IV는 III, V 영역과 비교하여 상대적으로 작은 영역이 생기고, 영역 III, V와의 상호작용으로 좌·우로 움직이면서 확장·축소를 반복한다. Shroud Turbine의 해석은 반경 방향 흐름을 잘 예측하고 있다. Fig. 9(c)에서 임펠라 날개 끝단에서 반경 방향으로 유동이 진행되고, 이러한 유동은 I-III, II-V로 영역을 분리시키고, I 과 II영역에서 순환되어 내려오는 유동은 허브에 부착된 판에 의해 III, V 영역과 분할된 형태를 띠고 있다. 영역 IV는 영역 III, V의 유동 교환으로 축의 바로 아래 영역에서 아주 작게 형성된다.

Fig. 9(d)는 Helical Ribbon Turbine의 수치해석 결과로 날개의 피치사이에 순환영역이 형성되고, 축 중심의 유동은 모두 아래쪽으로 이끌려 국부적 혼합영역이 강하게 형성된다. 이는 점성이 강한 물질을 혼합하기 좋은 형태로 피치사이에 형성된 순환영역들과의 접촉 면적이 크다. 날개의 끝부분에서 이탈되는 속도가 다른 형태의 임펠라에 비해 상대적으로 낮고, 유동장 전체는 낮은 속도 크기로 교란된다.

MRF를 이용한 해석결과는 날개 끝 부분에서의 각 임펠라 형태별 흐름을 잘 예측하지 못하였다. 이는 사

각조에서 임펠라에 의해서 발달된 유동이 벽과의 상호 작용으로 불규칙적인 흐름을 발생하기 때문이라고 판단되며, 이러한 흐름은 MRF 방법이 효과적이지 않음을 알 수 있다.

### 3.2. MRF와 Sliding mesh 방법과의 비교

Fig. 10은 조내의 평균속도, 최대속도, 최소속도, 속도의 표준 편차를 나타내었다. MRF와 Sliding mesh 방법은 속도의 크기나 편차에서 큰 차이는 없으나, Sliding method을 이용한 비정상 해의 한 주기 평균값이 MRF 방법의 값보다는 약간 나타났다. Fig. 10에서 Helical Ribbon Turbine은 유동장에서 고른 속도분포를 나타낼 수 있고, 고 점성의 물질을 혼합하는데 효과적임을 알 수 있다. 반경 방향 흐름 터빈은 날개에서 유체가 박리되어 날개의 뒷부분에서 재부착영역이 형성되는데, 이 위치에서 최대 유속이 나타난다. 그러나 축류 방향 흐름 터빈은 날개표면에서 유체가 받음각을 따라 가속되다가 날개에서 이탈되는 지점에서 최대 유속이 나타난다. 동일 회전 속도로 회전하고 있는 임펠라에 대해 가장 큰 속도를 가지는 임펠라 형태는 PBT이고, 지내의 평균속도가 가장 큰 형태는 Rushton Turbine이다. 그러나 유동장 내의 속도 편차가 가장 큰 형태도 Rushton Turbine이므로 플록 형성을 위한 혼합지의 임펠라 형태로는 적합하지 않음을 알 수 있다.

### 4. 결 론

반경 방향 흐름 터빈 (FBT, Rushton, Shroud)과 축류 방향 흐름 터빈 (PBT, Helical Ribbon)에 대하여 유

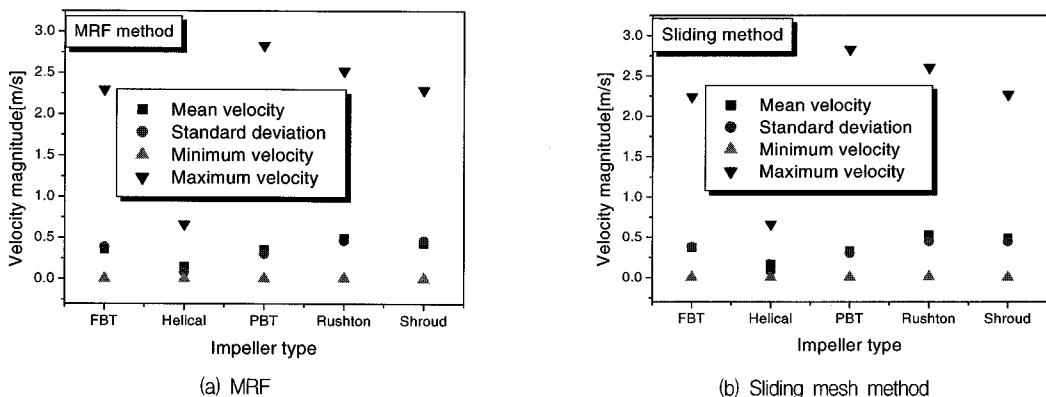


Fig. 10 Maximum, minimum, mean velocity on various impellers

동 흐름 특성을 파악하였다.

- 1) 입·출구를 가지는 사각조 유동해석에서 Sliding mesh 방법이 효과적임을 알 수 있었다.
- 2) RNG  $k-\epsilon$  모델은 실험결과와 C&K모델보다 과소 예측(underestimate) 하였으나, 유동장내의 속도분포를 잘 예측하였다.
- 3) 반경 방향 흐름 터빈은 최대속도가 날개 뒤의 재부착 영역에서 생기고, 축류 방향 흐름 터빈은 최대속도가 날개 끝 부분에 생긴다.
- 4) 동일 회전 속도로 회전하고 있는 임펠라에 대해 가장 큰 속도를 가지는 임펠라 형태는 PBT이고, 지내의 평균속도가 가장 큰 형태는 Rushton Turbine이다.

### 참고문헌

- (1) Kawamura, S., 1997, Integrated Design of Water Treatment Facilities. John Wiley & Sons, INC., New York. pp. 97~129.
- (2) Amirtharajah, A., Clack, M.M. & Trussell, R.,R., 1991, Mixing in Coagulation and Flocculation, American Water Works Association, pp. 282~342.
- (3) 尹雲榮, 1993, 임펠라의 類型이 高粘度 液體의 混合에 미치는 影響, 成均館大學敎, 碩士學位論文.
- (4) Deen, N.G., Hjertager, B.H. 1999, Multiphase Particle Image Velocimetry Measurements in an Aerated Stirred Tank, Aalborg University Esbjerg, pp. 1~15.
- (5) Friberg, P.C., 1998, Three-Dimensional Modeling of Gas/Liquid Flow Processes in Bioreactors, Group for Industrial Fluid Flow Processes, Telemark University College, Norway, pp. 1~100.
- (6) Ranade, V.V., Joshi. J.B., 1990, "Flow Generated by a Disc Turbine: Part I," Experimental Trans. IChemE, pp. 19~33.
- (7) Fluent 5-User's Guide, 1998, Fluent Inc., Lebanon, Vol. 3, pp. 16.1~16.52.
- (8) Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995, An Introduction to Computational Fluid Dynamics-The Finite Volume Method, LONGMAN, London, pp. 10~39.
- (9) Drury, S.F., Gates, L.E., Sharpe, P.E., 1999, The Application of Mixing and Agitation to Fluid Processes, Sharpe Mixer Q1 Technology, pp. 1~57.