

익형 변화에 따른 유도공기부상기 성능특성 연구

송유준* · 이지구* · 김윤제**†

Effects of Blade Configuration on the Performance of Induced Gas Flotation Machine

You-Joon Song*, Ji-Gu Lee*, Youn-Jea Kim**†

Key Words : Induced Gas Flotation(유도공기부상법), Multiphase Flow(다상유동), Microbubble(미세기포), Dorr-Oliver Flotation Cell(Dorr-Oliver 부상기)

ABSTRACT

The flotation performance of the induced gas flotation (IGF) machine is considerably influenced by geometric configurations of rotor and stator. The interaction of rotor and stator, which are the most important components in IGF, serves to mix the air bubbles. Thus, the understanding of flow characteristics and consequential analysis on the machine are essential for the optimal design of IGF. In this study, two-phase (water and air) flow characteristics in the forced-air mechanically stirred Dorr-Oliver flotation cell was investigated using ANSYS CFX. In addition, the void fraction and the velocity distributions are determined and presented with different blade configurations.

1. 서 론

부상분리(floating separation)란 미세기포(microbubble)의 부상 특성을 이용하여 수중의 미립자(오일 또는 고체)들을 분리하는 수처리 방법이다.⁽¹⁾ 그 중에서 유도공기부상기(Induced Gas Flotation, IGF)는 기포를 배플(baffle)내로 직접 주입하여 수중의 미립자를 수면으로 부상시켜 미립자를 제거하는 장치로써 오일샌드 플랜트, 화학 플랜트 등에 널리 사용된다.⁽²⁾ IGF 형상에 따라 다상 물질을 포함하는 다양한 유동장이 형성될 수 있으므로 동익(rotor)과 같은 형상 변수와 작동조건 등을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 특히, 동익과 정익(stator) 형상은 부유 성능에 영향을 미치는 중요한 변수이므로 익형에 따른 유동형태를 정확히 이해한다는 것은 최적 설계의 바탕이 된다고 할 수 있다.

최근 컴퓨터 성능이 향상되면서 내부 유동장을 예측하기 위한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 방법이 사용되고 있다.⁽³⁾ 초기설계시 유도공기 부상기의 유동 특성을 알아보기 위해서 단상유동 해석이 유용하지만, 기공율(void fraction),

난류 소산 등을 정의하기 위해서는 이상유동이 더욱 적절하다.⁽⁴⁾ 특히, 기포가 포함되어 있는 이상유동에서는 RANS 방정식(Reynolds-averaged Navier Stokes equation)보다 Euler-Euler 방정식을 사용하여 수치해석을 수행하는 것이 적절한 것으로 알려져있다.⁽⁵⁾ 위의 식과 CFD를 이용한 다양한 연구가 수행된 바 있다. Salem-Said 등⁽⁵⁾은 lab-scale 부상기에 대하여 기포 직경이 부상기 성능에 미치는 영향을 단상 및 다상유동으로 분석하였으며, Shi 등⁽⁶⁾은 동익 형상에 따른 성능평가를 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법과 CFD를 통해 분석하였다. Xia 등⁽⁷⁾은 난류모델에 의한 유동장 변화를 확인하였으며, CFD를 통해 동익의 회전속도가 성능에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. Liu 등⁽⁸⁾은 입자와 기포의 충돌을 CFD로 구현하여 유동 특성을 분석하였다. 하지만 동익의 형상변화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 반면, 정익 형상변화에 따른 영향을 이상유동으로 분석한 연구는 미미한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 블레이드 형상 변화가 IGF 성능에 미치는 영향에 대하여 수치적으로 고찰하였다. 특히, 정익의 각도에 따른 영향을 반경방향 속도(radial

* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

** 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

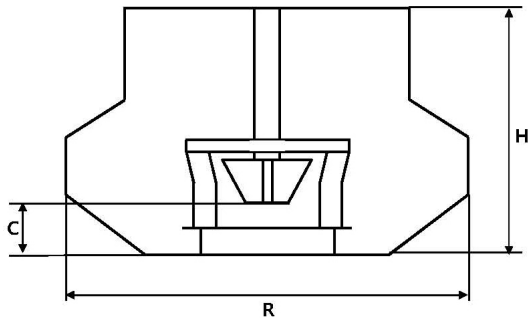


Fig. 1 Schematic of IGF

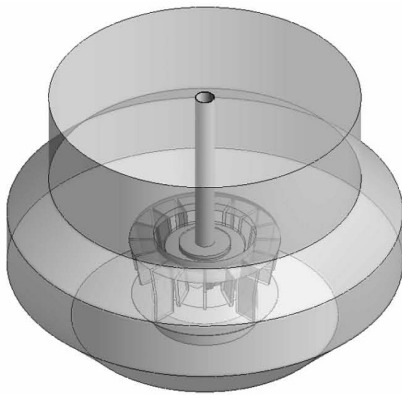


Fig. 2 3-D modeling of IGF

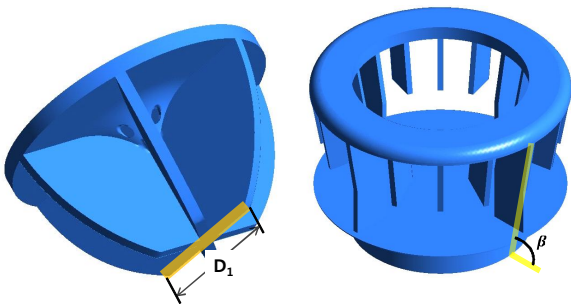


Fig. 3 Design parameters of IGF

velocity), 축방향 속도(axial velocity), 기공율(void fraction), 파워수(power number)와 같은 무차원수(dimensionless number)를 통해 각각의 형상에 따른 부상성능을 평가하였다.

2. 본 문

2.1 해석모델 및 경계조건

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 IGF의 개략도이다. IGF 내 복잡한 유동장을 예측하기 위한 IGF를 3-D 모델링하기 위하여 기계적인 교반을 통한 기포와 미립자를 부상시키는 6 m³급 크기의 Dorr-Oliver 부상기(Dorr-Oliver flotation cell)를 선정하였으며, 물과 공기를 작동유체로 하는 이상유동으로 수치해석을 수행하였다(Fig. 2 참조). IGF는 회전축,

Table 1 Parameters of the modeled IGF

Cases	Description	
	D ₁	β
	Bottom length of rotor (mm)	Stator blade angle (°)
1	100	80
2	120	
3	140	
4 (Ref.)	160	
5	180	
6	160	76
7		78
8		82
9		84

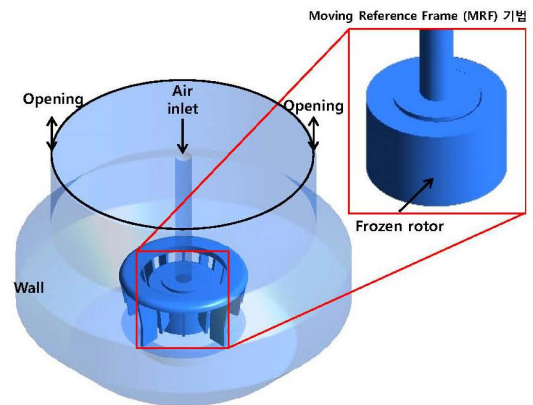


Fig. 4 Boundary conditions

동익, 정익으로 이루어져있으며, 6개의 블레이드로 구성된 동익을 16개의 블레이드로 구성된 정익이 둘러싸고 있는 형태이다. IGF 배플 직경(R)과 높이(H)는 각각 2430 mm, 1632 mm이다. 동익과 배플 바닥 사이의 거리(C)는 237 mm이며, 블레이드의 두께는 20 mm이다. Fig. 3에 본 연구에서 사용된 동익과 정익의 각도에 따라 분류한 형상 변수를 나타내었다(Table 1 참조).

공기는 각각의 동익 허브(hub)에 위치해있는 유로를 통해 배플 내로 주입되며, 이때 발생한 기포의 직경은 평균 값으로 설정하였다. 기포의 직경을 0.075 mm부터 0.175 mm까지 0.025 mm씩 증가시켜가며 기포의 크기가 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

IGF 내벽과 배플에서는 점착조건을 사용하였으며, 경계면(interface)에서는 각각의 격자에 대한 정보를 모두 고려하기 위하여 frozen rotor 모델을 사용하였다. 유동영역은 회전영역과 비회전영역으로 구분하였으며, MRF(Moving Reference Frame) 기법을 적용하여 회전영역에 동익의 회전효과를 고려하였다(Fig. 4 참조). MRF 기법으로 동익 회전에 의해 작용하는 힘을 계산하기 위해 코리올리 힘(Coriolis force)과

Table 2 Boundary conditions applied in this study

Rotational speed		250 rpm
Working Fluid		Water at 25°C, ideal gas
Number of blades	Rotor	6
	Stator	16
Rotational domain		Moving reference frame
Turbulence model		Shear stress transport
Convergence criteria		1e-4
Interface		Frozen rotor

원심력을 적용하였다.

수치해석은 CFD 상용코드인 ANSYS CFX 16.1을 사용하였으며, IGF 내 순환유동과 난류효과를 고려하고 벽면 주위에서의 해석의 정확도를 높이기 위하여 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다. 수렴조건은 1e-4 이하로 설정하였으며, 자세한 경계조건은 Table 2에 나타내었다.

2.2 지배 방정식

일반적인 이상유동 해석방법으로는 Euler-Lagrange 접근법과 Euler-Euler 접근법 두 가지로 나눌 수 있다. Euler-Lagrange 접근법의 경우 연속적인 유체 내에 분산된 secondary phase의 체적분율(volume fraction)이 작은 경우에 사용가능하지만 체적분율이 높은 경우에는 부적절하다. 반면, Euler-Euler 접근법에서는 서로 다른 두 상(phase)을 완전히 섞인 연속체로 취급하여 체적분율이라는 개념이 사용된다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 기포의 수가 많아서 체적분율이 높기 때문에 Euler-Euler 접근법을 적용하였으며, 다음과 같은 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하였다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{V}_i) = 0 \quad (1)$$

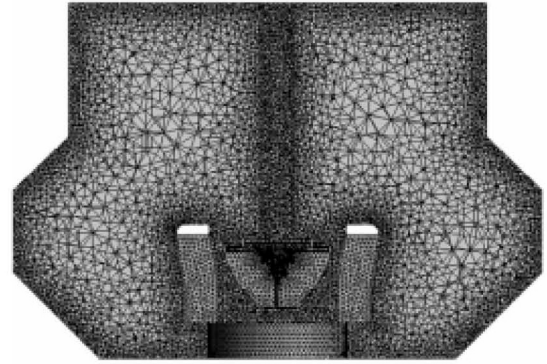
- 운동량 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i \vec{V}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{V}_i \vec{V}_i) \\ = \alpha_i \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_i \mu_i (\nabla \vec{V}_i + (\nabla \vec{V}_i)^T)) + S_i + M_i \end{aligned} \quad (2)$$

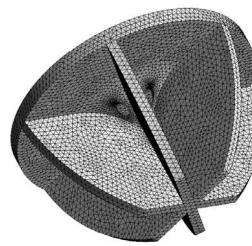
위 식에서 i 는 상(phase), α 는 체적분율, ρ 는 밀도, μ 는 동점성계수를 나타내며, ∇p 는 중력의 영향을 고려한 압력, \vec{V} 는 속도 벡터, S 는 외부 운동량, M 은 계면접착력을 나타낸다.

2.3 격자생성

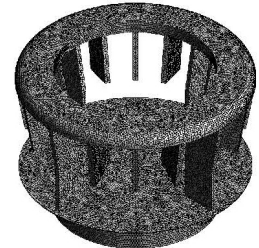
격자는 사면체(tetrahedrons)를 적용하였으며(Fig. 5 참조), 격자의존성(grid dependency)을 판단하기 위하여 기본모델



(a) Baffle



(b) Rotor



(c) Stator

Fig. 5 Grid systems

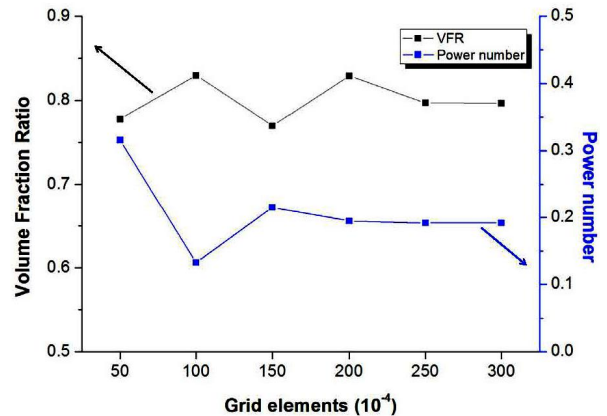


Fig. 6 Grid dependency

의 격자를 50만개부터 300만개로 늘려가며 파워수, 표면에 서의 기포 체적분율의 변화를 고찰하였다. Fig. 6에 도시한 바와 같이 250만개보다 많은 경우에는 일정한 경향을 나타내어 본 연구에서는 IGF 격자계를 250만개로 구성하였다.

2.4 부상성능

부상성능은 IGF 내 유동형태에 의해 결정되므로 익형변화에 따른 부상성능을 평가하기 위해서 수면에서 기포가 갖는 체적분율의 비(Void Fraction Ratio, VFR), 파워수(P_0)와 같은 지표를 이용하였다. VFR은 주입된 공기와 수면 위로 떠오른 기포의 체적분율의 비를 나타내는 지표로써 다음과 같이 표현된다.

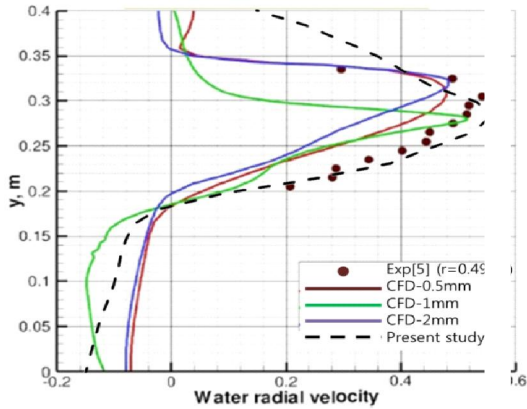
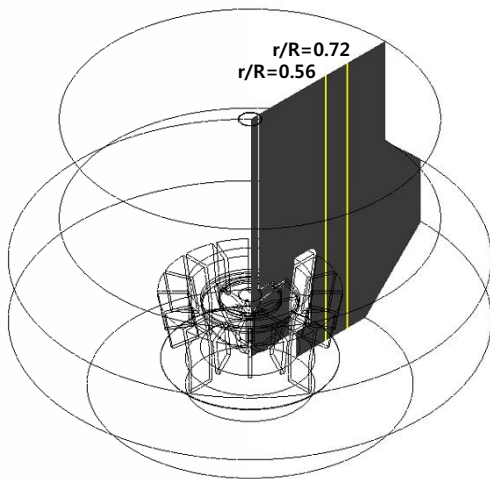


Fig. 6 Comparison results of the water radial velocity between the present study and existing experimental data⁽⁵⁾



(a) Longitudinal section of reference model

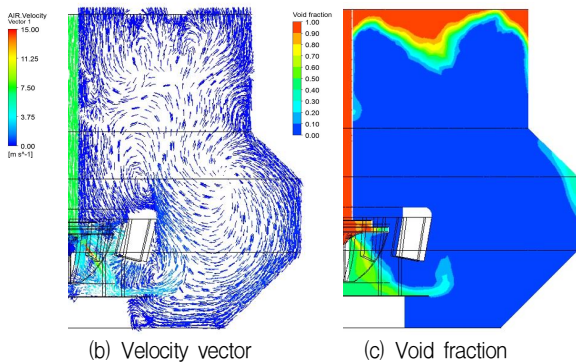


Fig. 7 Calculated flow fields in the reference model

$$VFR = \frac{V_{sur\ face}}{V_{injected}} \quad (3)$$

회전하는 동익에는 작동유체에 의한 저항력이 작용하는데, 이를 파워수로 정의할 수 있다. 저항력은 동익 형상에 따라 변하는데 이는 동익을 회전시키기 위한 소비전력의 변화를 의미하며, 다음과 같은 무차원수로 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$P_0 = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (4)$$

여기서 P 는 소비전력, ρ 는 유체 밀도, N 은 회전속도, D 는 동익의 직경을 각각 나타낸다.

2.5 신뢰성 평가

IGF의 수치해석과 Dorr-Oliver flotation cell의 실험결과를 비교하여 수치해석의 신뢰성을 평가하였다⁽⁵⁾ (Fig. 6 참조). $Y=0.28$ m 높이에서 물의 공탐속도는 0.6 m/s 이며, $Y=0.2$ m~ 0.33 m에서 실험값과 유사한 경향성을 갖는 것을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

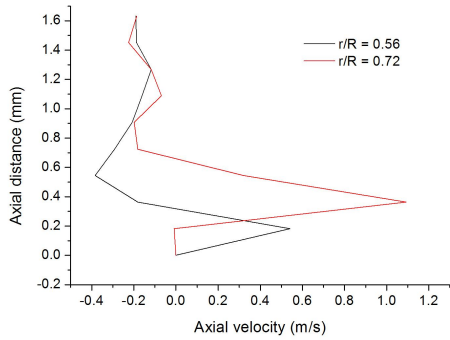
3.1 유동장 및 기공율

회전하는 동익에 의해 형성되는 기본모델의 유동장을 종단면에서의 벡터장과 기공율을 통해 나타내었다. 속도는 $r/R=0.56$, $r/R=0.72$ 위치에서 측정하였으며, R 은 배플의 직경, r 은 동익 축에서 측정위치까지의 반경방향 거리를 나타낸다(Fig. 7(a) 참조).

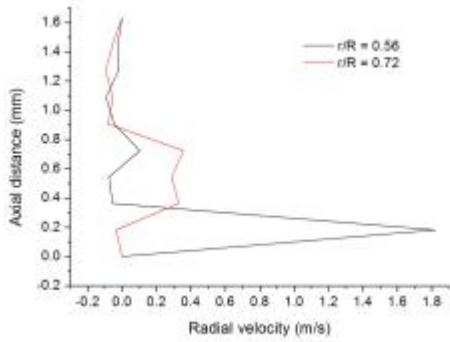
동익의 축을 통해 주입된 공기가 유로를 통해 배플 내로 주입되는 것을 확인할 수 있다. 정익을 통과하여 배플 내로 균일하게 확산되면서 정익 주위에서 와류장을 형성하였으며, IGF 중심으로 돌아오는 순환구조를 나타내었다. 하지만 배플 상단부에서 형성된 와류장이 부상하는 유동을 방해하는 경향을 보였다. 기공율은 Fig. 7(c)에 도시한 바와 같이 기포가 부상하여 수면 위로 떠오른 것을 확인할 수 있지만 배플 벽면에 부딪혀 부상하지 못하고 손실되는 기포가 있음을 알 수 있다. 따라서 배플의 형상변화를 통해 손실되는 기포를 감소시키는 설계가 부상성능을 높이는 하나의 대안이 될 수 있음을 알 수 있다.

3.2 속도분포

축방향속도와 반경방향속도 분포를 Fig. 8에 도시하였다. 축방향속도는 $r/R=0.72$ 인 경우가 더 크며, 이러한 현상은 동익을 통해 고속으로 주입되는 기포의 유동방향이 부상방향과 반대이기 때문에 동익과 상대적으로 먼곳에 위치한 기포의 부상속도가 빠르다는 것을 유추할 수 있다. 또한, 축방향속도는 모두 동익과 정익이 위치하고 있는 지점에서 한 번의 peak 점을 갖는 것을 볼 수 있다. 반경방향 속도는 Fig. 8(b)에 도시한 바와 같이 $r/R=0.72$ 의 경우 두 번의 peak 점이 존재하는 것을 확인할 수 있는데, 배플 직경이 작아지는 지점에서 발생하는 순환유동에 의해 반경방향속도가 감소함을 알 수 있다.

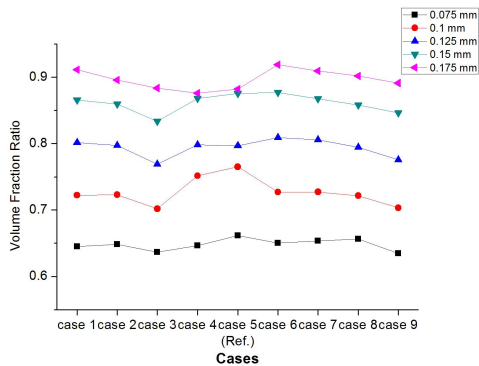


(a) Axial velocity

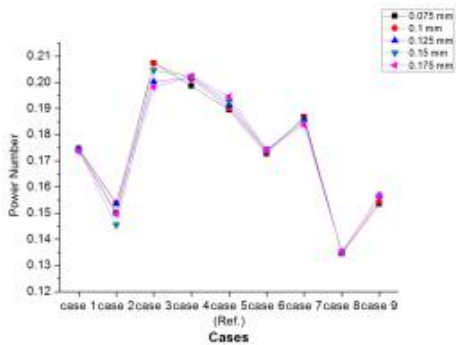


(b) Radial velocity

Fig. 8 Results of the reference model



(a) Void fraction ratio

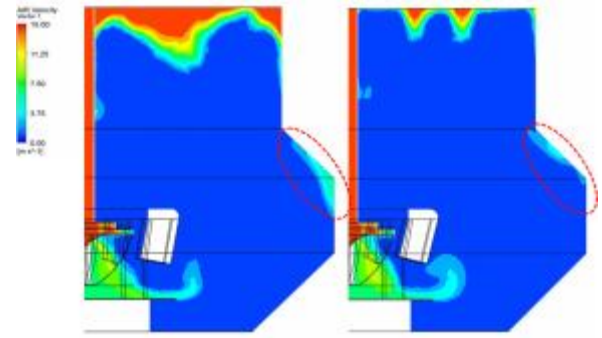


(b) Power number

Fig. 9 Variation of VFR and Power number

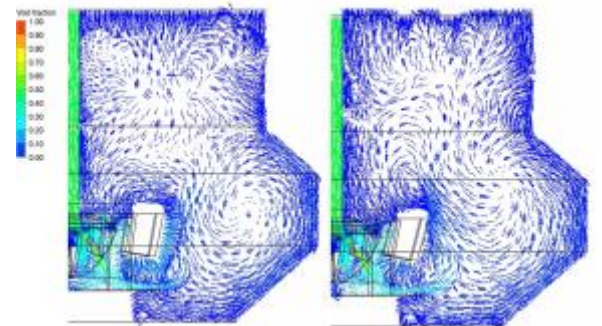
3.3 부상성능

익형 변화에 따른 부상성능을 비교하기 위하여 기포의 직



i) Reference model ii) Case 6

a) Void fraction



i) Reference model ii) Case 6

b) Velocity vector

Fig. 10 Comparison the results between the reference model and case 6

경에 따른 VFR, 파워수를 Fig. 9에 나타내었다. 본 연구에서 고려한 여러 경우 중 case 6이 가장 높은 VFR과 파워수를 나타내었다. 특히, 기포 직경이 클수록 VFR이 증가하는 것을 볼 수 있다. 기포 직경과 VFR의 관계는 다음 식으로 정의되는 Stokes 법칙으로 나타낼 수 있다.

$$V_{axial} = \frac{d^2 g (\rho_w - \rho_o)}{18 \mu_w} \quad (5)$$

여기서 하첨자 w 와 o 는 각각 물과 공기를 의미하며, d 는 기포의 직경, g 는 중력가속도를 나타낸다.

기포 직경이 클수록 case 6의 VFR이 기본모델에 비하여 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 파워수는 case 8에서 최소값을 보였으며, case 2와 case 3를 제외한 모든 경우 기본모델에 비하여 낮은 값을 나타내었다. 이는 동익의 회전에 의해 발생하는 전단력(shear force)에 의해 요구되는 동력이 더 작기 때문이다. 이를 통해 case 6이 기본모델과 비교하여 VFR은 높고, 파워수는 작기 때문에 부상성능을 가장 향상시킨 것임을 유추할 수 있다.

기본모델과 case 6의 기공율과 백터장 분포를 Fig. 10에 도시하였다. Case 6이 배플 벽면에서 소실되는 기포가 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있으며, 정익 주위에서의 와류

장이 감소하여, 상층부에서의 기포 부상을 방해하는 하강유동이 감소됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 MRF 기법을 이용하여 기포 직경 및 블레이드 형상이 IGF 성능 및 유동에 미치는 영향을 고찰하였다. 기포 크기가 증가할수록 부상하는 기포의 수가 많아지고, 파워수가 상대적으로 큰 것을 확인하였다. Case 6의 경우 배플 벽면에 부딪혀 손실되는 기포가 적었으며, 상층부에서 하강유동이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 부상성능을 평가하기 위해 수면 위 기포의 체적분율 및 파워수를 성능지표로 설정하였으며, case 6이 가장 높은 VFR과 낮은 파워수를 갖는 것으로 나타났다. 기본모델보다 익형 변화에 따른 부상성능을 평가한 결과로부터 파워수가 약 10% 감소한 형상을 도출하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(15FIP-B089065-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Yiantos, J. B., 2007, "Fluid Flow and Kinetic Modeling in Flotation Related Process: Columns and Mechanically Agitated Cells," *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 85, No. 12, pp. 1591~1603.
- (2) Zhou, J. W., Song, T., and Shen, Z. C., 2010, "CFD Simulation of Gas-Liquid Flow in a Large Scale Flotation Cell," *J. of Computational Multiphase Flow*, Vol. 2, No. 3, pp. 143~150.
- (3) Shi, S. X., Yu, Y., Yang, W. W., and Zhou, H. X., 2013, "Flow Filed Test and Analysis of KYF Flotation Cell by PIV," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 331, pp. 200~204.
- (4) Malhorta, D., Taylor, P. R., Spiller, E., and LeVier M., 2009, "Recent Advances in Mineral Processing Plant Design, Society for Mining, Metallurgy," and Exploration (SME), New York, pp. 220~252.
- (5) Salem-Said, A., Fayed, H., and Ragab, S., 2013, "Numerical Simulations of Two-Phase Flow in a Dorr-Oliver Flotation Cell Model," *Advances in Mineral Analytical Techniques*, Vol. 3, No. 3, pp. 258~336.
- (6) Shi, S., Zhang, Ming., and Chen D., 2015, "Experimental and Computational Analysis of the Impeller Angle in a Flotation Cell by PIV and CFD," *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 142, pp. 2~9.
- (7) Xia, J., Rinne, A., and Gronstand, S., 2009, "Effect of Turbulence Models on Prediction of Fluid Flow in an Outotec Flotation Cell," *Minerals Engineering*, Vol. 22, No. 11, pp. 880~885.
- (8) Liu, T. Y. and Schwarz, M. P., 2009, "CFD-Based Multiscale Modelling of Bubble-Particle Collision Efficiency in a Turbulent Flotation Cell," *Chemical Engineering Science*, Vol. 64, No. 24, pp. 5287~5301.
- (9) Lim, K. H. and Jo, Y. J., 2015, Review of Boiling Heat Transfer Models in Computational Fluid Dynamics Codes, KINS/RR-1369 (in Korean).
- (10) Chapple, D. and Kresta, S. M., 2002, "The Effect of Impeller and Tank Geometry on Power Number for a Pitched Blade Turbine," *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 80, No. 4, pp. 364~372.