

응집효율 향상을 위한 垂直形 攪拌機의 유동특성 연구

김진훈* · 박종호**

A Study on the Flow Characteristics of Vertical Impeller to Improve Flocculation Efficiency

Jin-Hoon Kim* and Jong-Ho Park**

Key Words: Flocculation(응집), Vertical impeller(수직교반기), Flow characteristics(유동특성)

ABSTRACT

The optimum condition is defined as one that best suits the purpose of flocculation; the number of small particles should decrease, while that of large particles should increase. The object of this research was to develop a new impeller and substitute for conventional flocculators. The flow characteristics of turbines and hydrofoil type flocculators in turbulent fluids were observed using a standard $k-\epsilon$ Model and a computational fluid dynamics (CFD) simulation program-FLUENT. The experiments were performed to compare PBT(Pitched Blade Turbine) flocculator with twisted hydrofoil type flocculators for velocity distribution, and floc formation at conventional water treatment plants in Korea. As a result of the CFD solution, twisted hydrofoil types are similar to hydrofoil flocculators for flow characteristics without regard to the twisted angle. On the other hand, it was established that turbine flocculators are greater than hydrofoil flocculators with flow unevenness and dead zone formation. Twisted hydrofoil type-II (Angle 15~20°) is the most proper impeller for water flocculation from this point of view with a decreasing the dead zone, maintaining of the equivalent energy distribution and a drawing up of the sedimentation substance from the bottom of the flocculation basin.

1. 서론

응집 공정은 전체 정수 및 하수처리 공정의 전 처리 공정으로서 후속 공정의 효율을 결정하는데 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 정수 및 하수처리 공정의 효율을 향상시키기 위해서는 응집 공정의 효율 향상이 우선적으로 필요하게 된다.

응집 (flocculation)이란, 콜로이드 모양으로 분산한 미립자가 콜로이드 상태가 파괴될 정도의 크기로 집합되는 것을 말하며 물을 매질로 하는 소수 콜로이드는 용액 속에서 양 또는 음으로 대전하고 각 입자의 주변에 전기 이중층을 형성하여 그 이중층 사이의 상호 작용에 의해 반발되며 졸(sol) 속에 안정되어 있다. 이 콜로이드 용액에 전해질을 가하면 전기 이중층이 압축되어 입자는 서로 접근할 수 있게 되어 입자의 반데르발스의 힘(van der waal's force)이 반발력보다 크게 되면 콜로이드 입자는 서로 집합하여 점차

* 한국수자원공사

** 충남대학교 기계공학과

책임저자 E-mail : jinhoon@kowaco.or.kr

커져서 침전한다⁽¹⁾.

응집 방식은 크게 수류 교반식과 기계 교반식으로 구분된다. 수류 교반식에는 Baffled Channel Flocculators, Hydraulic jet-action Flocculators 등의 종류가 있으나 손실수두가 크고 수량이나 수질 급변에 적용해서 교반강도의 조절 기능이 없으며 유량 변화에 대한 응집효율이 낮아지는 단점을 갖고 있어 최근에는 사용되는 곳이 제한적이다^{(2)~(4)}.

기계 교반식은 크게 패들형과 프로펠러형이 많이 사용되고 있으며, 프로펠러형에는 turbine type flocculator와 hydrofoil flocculator가 있다. turbine type flocculator로써 PBT(Pitched Blade Turbine), FBT(Flat Blade Turbine), rushton turbine type 등이 있으나 Impeller가 크고 무거워 많은 동력이 요구되고 응집 효율이 낮은 단점이 있어 최근에는 작은 shear rate (전단율), 양호한 축 방향 흐름 (axial flow) 토출량 (pumping capacity), 응집제 사용 최소화 및 유지관리가 용이한 hydrofoil flocculator가 많이 사용되고 있는 경향이 있다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 수처리 응집지에 사용되는 hydrofoil type (39. 절곡된 형태의 임펠러)의 성능 비교를 위해 turbine type flocculator의 각 형식별 유동특성과 상호 비교함으로써 hydrofoil flocculator의 특장을 분석하였다. 또한 hydrofoil type과 비교하여 동등 이상의 성능을 발휘 할 수 있는 응집기를 개발하기 위하여 절곡이 아닌 여러 각도의 비틀림 각을 준 임펠러에 대하여 수치해석 (상용 유동해석 프로그램 Fluent 사용)하고 기존의 hydrofoil type 및 turbine type flocculator에 대하여 비교 검토하였다^{(6)~(7)}.

2. 이론적 고찰

2.1 유체교반시스템의 차원해석

2.1.1 무차원 방정식

교반 시스템내의 유체 거동은 연속방정식, 모멘텀 보존 방정식을 만족해야 한다. 이러한 법칙은 유체내에 압력분포, 속도 분포로 표현되는 거동 방정식으로 쓰여질 수 있다. 국부적인 압력과 속도의 형태로 질량-운동량 보존에 대한 비 압축성 유체, 뉴턴 유체, 나비에-스톡스 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -g_c \nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (1)$$

무차원 압력은 길이, 시간, 질량, 그리고 중량 변환 인자 g_c 의 특성 양으로 파생된다.

$$p^* = \frac{(p-p_0)g_c}{\rho N^2 D^2} \quad (2)$$

$$\frac{Dv^*}{Dt^*} = -\nabla^* p^* + \left[\frac{\mu}{D^2 N \rho} \right] \nabla^{*2} v^* + \left[\frac{g}{DN^2} \right] \frac{g}{g} \quad (3)$$

탱크내에 액체가 가득 차 있고 버플을 가지고 있는 탱크에서의 교반기 유동은 중력의 효과를 무시할 수 있다. 그러면 속도와 압력분포는 단지 레이놀즈수의 크기에 의해 결정된다.

$$v^*(x^*, y^*, z^*, t^*) = f(N_{Re}) \quad (4)$$

$$p^*(x^*, y^*, z^*, t^*) = f(N_{Re}) \quad (5)$$

2.1.2 특정조건의 차원해석

교반기의 제한조건은 독립 변수나 레이놀즈수의 크기가 너무 크거나 작은 경우이다. 레이놀즈수가 큰 경우는 관성력이 점성력보다 지배적인 곳에서의 난류 교반을 지칭한다. 식 (1)의 Navier-Stokes 방정식에서 점성과 중력을 무시하면 아래와 같이 무차원 형태로 쓰여질 수 있다.

$$\frac{Dv^*}{Dt^*} = -\nabla^* p^* \quad (6)$$

레이놀즈수는 더 이상 변수가 아니므로 압력과 속도는 이러한 제한된 경우에는 고정된다. 임펠러 날개를 따라 고정된 무차원 압력분포는 동력수가 높은 레이놀즈수에서는 상수라는 것을 의미한다.

$$\frac{Pg_c}{\rho N^3 D^5} = constant \quad (7)$$

식 (7)의 동력수로부터 모든 레이놀즈수에 대하여 Fig. 1(a)와 같이 로그 좌표계에서의 압력과 레이놀즈수의 일반적인 관계를 그릴 수 있다.

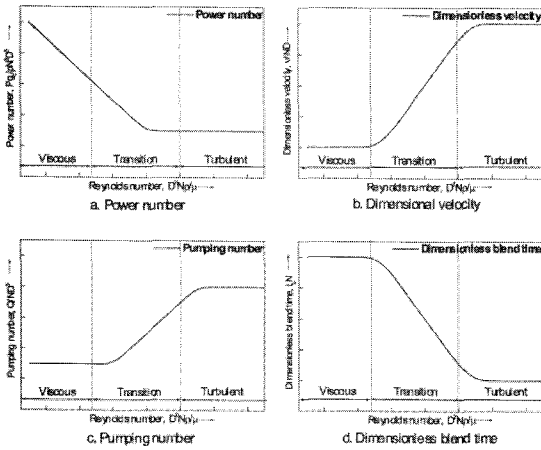


Fig. 1 Reynolds number correlates dimensionless parameters for the analysis of turbine-agitator systems

2.1.3 Agitator power and correlation

교반용기 내의 압력분포는 설계에 바로 적용할 수 없으나 임펠라 날개 표면에서의 압력 분포는 교반기에 요구되는 동력과 연관 지을 수 있다. 토크는 임펠라 날개 표면 압력분포의 합으로 결정된다. 그러므로 날개와 인접한 유체 압력과 동력과의 관계는 식 (8)으로 표현된다.

$$(p - p_0)_{blade} \propto P / ND^3 \quad (8)$$

$$p^* \propto \left(\frac{P}{ND^3} \right) \frac{g_c}{\rho N^2 D^2} = \frac{Pg_c}{\rho N^3 D^5} \quad (9)$$

식 (9)의 오른쪽 항은 동력 number 이고 이 동력 number을 식 (5)로 대체하면 레이놀즈와 프루드수의 함수가 될 것이다.

$$\frac{Pg_c}{\rho N^3 D^5} = f(N_{Re}, N_{Fr}) \quad (10)$$

$$\frac{Pg_c}{\rho N^3 D^5} = f(N_{Re}) \quad (11)$$

식 (11)는 보통 교반기 동력에 연관되는 데이터의 기본으로써 사용되어진다.

동력수는 임펠라 날개에 작용하는 압력 분포에 대한 식 (8)로부터 발전해 왔고 상관관계는 주로 임펠

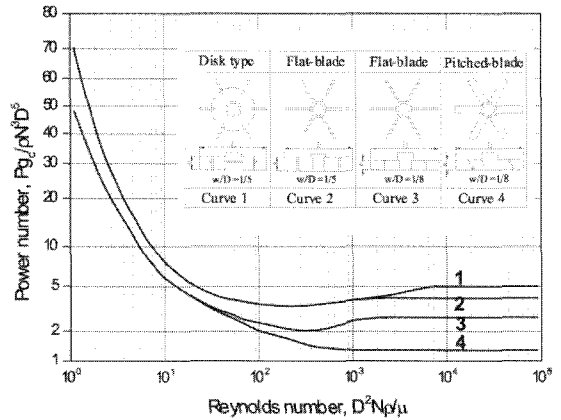


Fig. 2 Turbine design affects power requirements for agitated systems

라 형상에 의존한다. 네 개의 임펠라에 대한 실험 결과와의 상관관계가 Fig. 2에 나타나 있다. 터빈은 날개가 축에 장착되는 방법, 날개의 각, 날개폭의 비 (W), 임펠라 직경(D)에 따라 다르다.

2.1.4 Flow velocity and pumping

혼합용기내의 유체 입자들의 속도 분포를 이해하는 것은 동력을 이해하는 것만큼 중요하다. 왜냐하면 임펠라 회전이 유체 거동을 야기하기 때문이다. 동력의 이용 또는 단위 체적당 동력 소비는 교반기의 등급을 결정하는데 종종 이용한다.

$$v_{avg}^* = v_{avg} / ND = f(N_{Re}) \quad (12)$$

$$v_{avg} = \frac{Q}{A} \propto \frac{Q}{D^2} \quad (13)$$

$$\left(\frac{Q/D^2}{ND} \right) = \frac{Q}{ND^3} = f(N_{Re}) \quad (14)$$

낮고 높은 레이놀즈수의 제한된 경우를 포함하여 전 레이놀즈수에 대하여 펌핑수의 거동 Q/ND^3 은 속도 거동과 비슷한 형태를 나타낸다는 것이 Fig. 1(c)에 나타나 있다. 저 레이놀즈 영역에서 펌핑 수와 무차원 속도의 형태는 난류 혼합 용기에는 덜 실용적이지만 천이영역과 난류영역에서는 곡선의 특성이 교반기의 혼합능력과 속도 거동을 고려한 기초적인 설계 데이터를 제공한다.

3. CFD 모사 방법

3.1 유동형태 및 지배방정식

응집 과정에서 유동의 속도분포 뿐만 아니라 유동 방향도 중요하다. 유동 방향은 Fig. 3과 같이 크게 두 가지 형태로 분류할 수 있다. 임펠라의 기계에너지가 수류에너지로 전달되는 방향을 축류 방향과 반경류 방향으로 구분 지을 수 있다.

유동장의 지배 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 식 (15)와 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi U) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (15)$$

식 (15)에서 $\Phi = 1$ 이면 연속 방정식, $\Phi = u, v, w$ 이면 모멘텀 방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx} \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My} \quad (18)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{Mz} \quad (19)$$

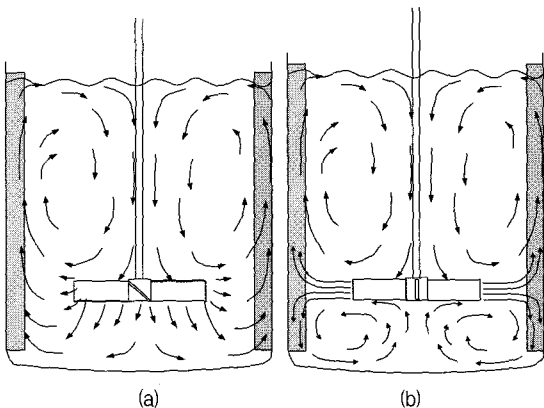


Fig. 3 Flow pattern : (a) axial-flow pattern and (b) radial-flow pattern being determined by blade pitch

3.2 난류모델 및 해석방법^{(8)~(10)}

난류 모델링에는 속도와 압력에 대하여 시간 평균 값을 취한 식 (20)에 나타난 바와 같이 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 이용하였다. (Fluent Inc. 1998)

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i u_j}) \quad (20)$$

난류모델로서 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였으며 난류확산계수 ν_t , 특성길이 l 은 (21), (22)에서 구한다.

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (21)$$

$$l \approx \frac{3}{\epsilon} k^2 \quad (22)$$

수치해석에서는 난류 운동에너지 k 와 소산율 (Dissipated rate) ϵ 을 식 (22), 식 (23)의 수송방정식을 적용하여 전산해석을 실시하였다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\nu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m \quad (22)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\nu}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (23)$$

3.3 형식별 임펠라 격자

임펠라 형상에 따른 특성 비교를 중점적으로 해석하기 위해 지(池)의 입구와 출구가 없는 밀폐형으로 임펠라에 의한 유동의 영향만을 고려하였다. 수치 해석 대상의 임펠라는 Flat Blade Type (FBT), Pitch Blade type (PBT), hydrofoil type과 이들을 비교 대상으로 하여 비틀림 각 (Twist Angle)을 준 이른바 twisted hydrofoil type이다.

FBT는 회전축과 동일한 각이고, PBT는 회전축에 대해 45°, hydrofoil type은 임펠라 적정 지점에서

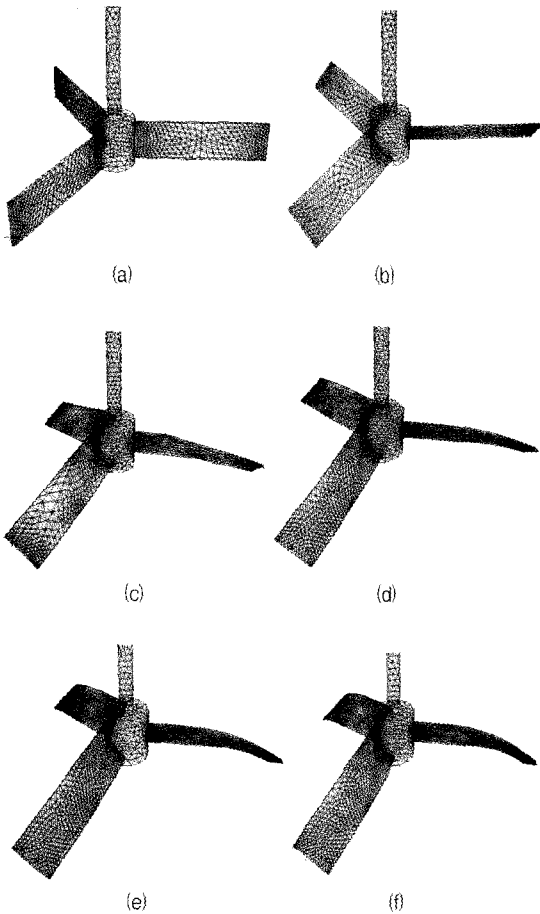


Fig. 4 Grids for impeller shape (tetrahedral mesh) : (a) flat blade type, (b) pitch blade type, (c) hydrofoil type, (d) twist hydrofoil type-I, (e) twist hydrofoil type-II and (f) twist hydrofoil type-III

부터 10° 간격으로 절곡을 하였다. Twisted Hydrofoil type은 비틀림 각을 세 가지(10 ~ 15°, 15 ~ 20°, 20 ~ 25°)경우로 두고 해석하여 적정 비틀림 각을 조사하였다. Hydrofoil type의 임펠라 각은 현재 가장 많이 사용되고 있는 39°로 하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 임펠라 형태이며 격자로 나타낸 것이다.

4. 유동 해석

4.1 Flat blade type 유동 분포

반경류 흐름의 대표적인 flat blade type은 동

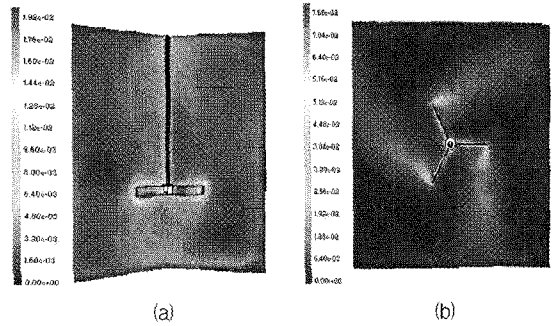


Fig. 5 Contour of velocity magnitude (a) vertical section and (b) horizontal section (flat blade type)

일한 조건하에서 P.B.T, Hydrofoil Type 등 다른 임펠라 형식에 비하여 유동력이 현격이 작게 나타나고 있으며 반경류 유동이 주류를 형성하고 있다. Fig. 5(a) vertical section에서 보듯이 임펠라 날개를 기준으로 좌우의 유동흐름이 분리되지 않은 흐름을 보이고 있으며 일정한 유동형태를 나타내지 못했다. 또한 Fig. 5(b) horizontal section와 같이 지(池) 전체의 유속편차가 크며 또한 임펠라 날개면과 날개 끝단 tip에서의 유속편차가 과대로 인한 사구역(dead zone) 발생으로 플록형성에 효과적이지 못하다.

Flat blade type은 Fig. 6과 같이 임펠라 전반부 및 날개 끝(Tip) 부근에서 속도벡터 성분은 반경류 흐름을 나타내고 있으며 다른 임펠라 형식에 비하여 동일조건 하에서 지(池)내의 벽 또는 바닥으로 빠른 흐름의 속도 에너지를 보내지 못하고 유동장 내의 흐름형성을 임펠라 tip선단 속도가 과다하게 주도하므로 난류발생 정도가 심하다.

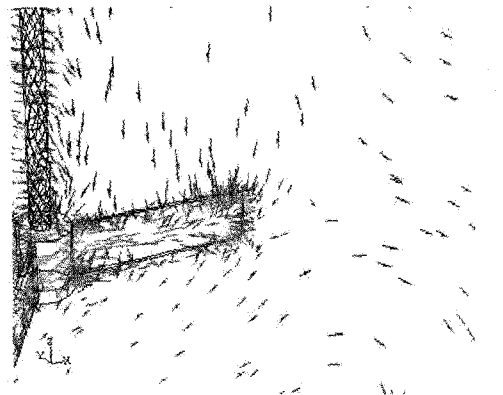


Fig. 6 Velocity vectors of flat blade type

4.2 Pitch blade type 유동 분포

Pitch blade type은 flat blade type에 비하여 유동력은 크게 증가되었고 축방향 흐름이 유동의 주류를 형성하고 있으나 Fig. 7(a) vertical section에서 보듯이 지(池)의 중간부분에서 사구역 발생이 심하고 임펠라 끝단과 주변의 속도차가 더 크다는 것을 알 수 있으며 임펠라의 최대속도와 최저속도에 의한 전단력이 임펠라 tip부근에서 발생되며 유체입자가 이탈될 때 플록이 깨짐이 증가한다. Fig. 7(b) horizontal section와 같이 각(corner) 부분에서 사구역이 발생하며 임펠라 근접부분과 지(池)벽쪽의 유속편차가 지(池)내의 유동에너지 불균형을 발생하게 했다.

4.3 Hydrofoil type 유동 분포

Fig. 9의 (a) vertical section에서 보듯이 축방향으로의 빠른 속도에너지를 인하여 비중이 무거운

바닥의 침전물을 부유시켜 큰 플록을 형성하는데 적절한 메카니즘이라고 볼 수 있으며 임펠라 상단 좌·우에서 발생하는 사구역이 P.B.T 형식에 비해 상당히 감소했다. 또한 지(池)내의 유동속도가 높으며 균일하게 형성되고 있으나 축 직하부에는 대유동과 격리된 작은 순환영역의 사구역이 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 9(b) horizontal section에서 보면 축중심으로부터 임펠라 tip 선단으로 발달되어 생성된 유동력이 동일한 조건 하에서 F.B.T, P.B.T 형식에 비하여 확연히 크고 넓게 나타내고 있으며 지(池)벽까지 빠르게 전달됨을 알 수 있다. 이러한 흐름은 교반강도 G (Sec^{-1})을 크게함으로써 입자간 접촉시간을 증가시켜 보다 큰 플록형성에 효과적이다.

Fig. 10은 임펠라로 유입되는 축류유동은 임펠라를 지나면서 반경류 유동으로 바뀌고 날개 끝(Tip)을 지나 지(池)벽 쪽으로 흐르면서 다시 축류유동이 되어 지(池)내의 커다란 라인유동을 형성하게 된다. 결국 날개에서 가속되어 이탈되는 유체가 지(池)의 바닥면을 쓸어 올리고 유동장내의 최대 및 최소 속도차

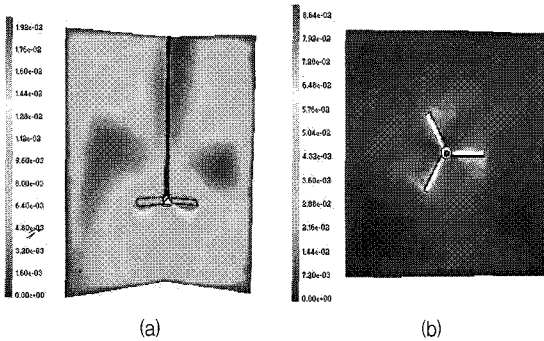


Fig. 7 Contour of velocity magnitude (a) vertical section and (b) horizontal section (pitch blade type)

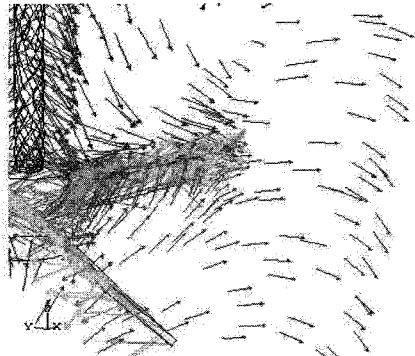


Fig. 8 Velocity vectors of pitch blade type

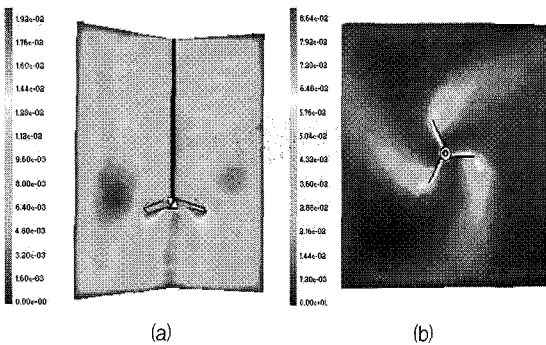


Fig. 9 Contour of velocity magnitude (a) vertical section and (b) horizontal section (hydrofoil type)

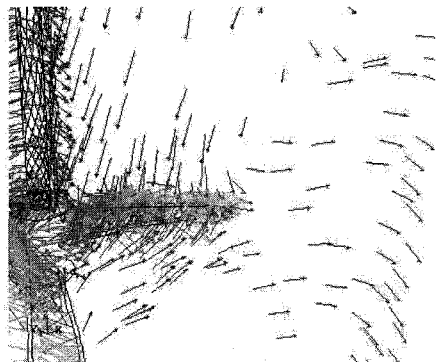


Fig. 10 Velocity vectors of hydrofoil type

가 작음을 알 수 있다.

4.4 Twisted hydrofoil type 유동분포

4.4.1 임펠라 각도별 유동분포

Twisted hydrofoil type 형상은 비틀림을 준 Bending type으로 비틀림 각도에 따라 twisted hydrofoil type - I 은 10 ~ 15°, type - II 15 ~ 20°, type - III 20~25°로 설정하여 비교·분석하였고 Fig. 11은 세 가지 경우의 속도 contour를 나타낸 것이다.

비틀림 각도별 twisted hydrofoil type을 분석한 결과 축방향 유동 대칭성, 사구역 발생정도, 유동력 전달능력 및 지(池)내의 유속 균일도를 검토한 결과 비틀림각이 15~20°인 type - II가 가장 우수하였다.

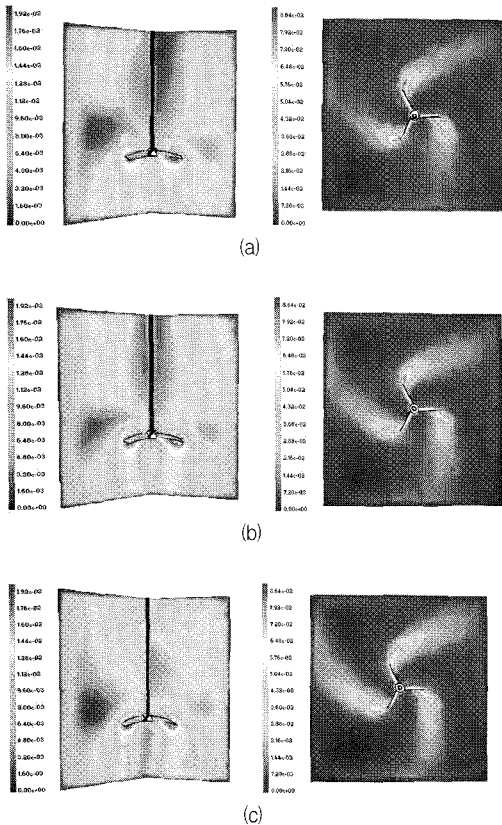


Fig. 11 Contour of velocity magnitude for each cases (twisted hydrofoil type) : (a) twisted hydrofoil type - I, (b) twisted hydrofoil type - II and (c) twisted hydrofoil type - III

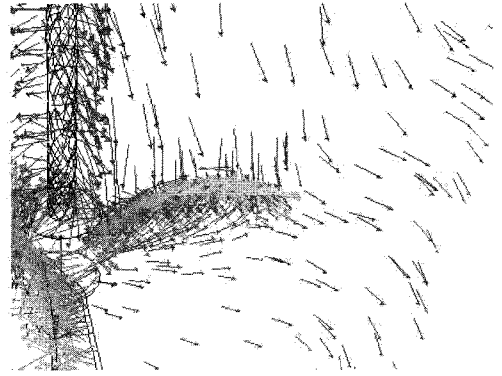


Fig. 12 Velocity vectors of impeller (type - II)

Fig. 12는 type - II (twisted angle : 15 ~ 20°)의 임펠라 속도 벡터를 나타낸 것이다. 비틀림 각을 주어 고안된 임펠라는 회전축에서부터 반경 방향으로 갈수록 단면의 변화를 주어 축 방향과 거의 평행하게 유체를 가속시켜 바닥에 침전된 약품을 끌어 올려 더 큰 플러를 형성할 수 있게 한다. 전반적으로 축 방향으로 유체가 가속됨으로써 임펠라를 기점으로 하여 좌우로 큰 순환 영역이 형성됨을 알 수 있다.

4.4.2 회전수별 유동분포

Fig. 13은 twisted hydrofoil type - II에 대하여 3열 3단에서 응집 단계(段階)별로 각기 다른 임펠라 회전수 (1단 40 rpm ~ 3단 10 rpm)를 부여하여 유동분포를 분석하였다. Fig. 13의 각 열에 대하여 축방향 유동 대칭성, 사구역 발생정도, 유동력 전달능력 및 지(池)내의 유동분포 균일 등을 검토한 결과 (b)열이 가장 양호하게 나타났으나 (b)열 2단의 회전수에 비하여 유동력이 부족하였다.

4.4.3 임펠라 표면의 압력분포

Fig. 14는 회전축에서부터 속도가 가속되어 임펠라 끝단부의 속도가 가장 크다는 것을 보여주고 있으며 Fig. 15에서는 type - II 임펠라 정압과 동압의 합인 전압은 항상 일정하다는 이론을 보여주고 있다. 임펠라 표면의 정압과 동압의 분포 및 비틀림 각을 전후하여 압력 대칭(평형)이 이루어지기 때문에 지(池)내의 균일한 유동분포를 형성할 수 있다. 비틀림이 없는 영역의 반경류 유동과 비틀림 날개에서 받

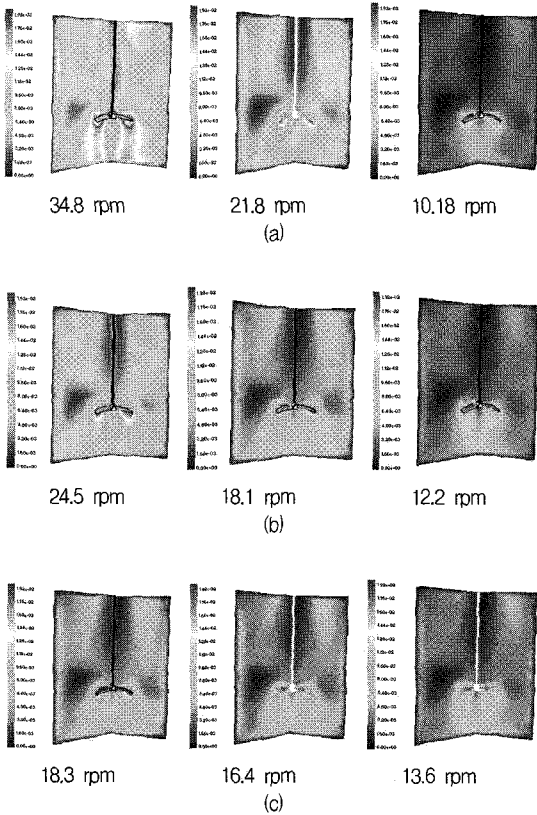


Fig. 13 Contour of velocity magnitude for rpm : (a) flocculator of the first row, (b) flocculator of the second row and (c) flocculator of the third row

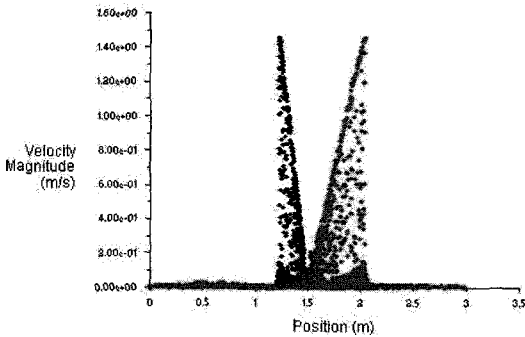


Fig. 14 Plotting of velocity magnitude for x-axial

생하는 축류 유동의 적절한 조화 및 평형으로 유체 입자간 접촉기회를 늘림으로써 최적응집에 필요한 이상적인 유동을 형성하고 날개 끝의 최대유속과 최저유속의 편차가 작아 유동 불평형 발생이 최소화 되어 사구역이 감소된다.

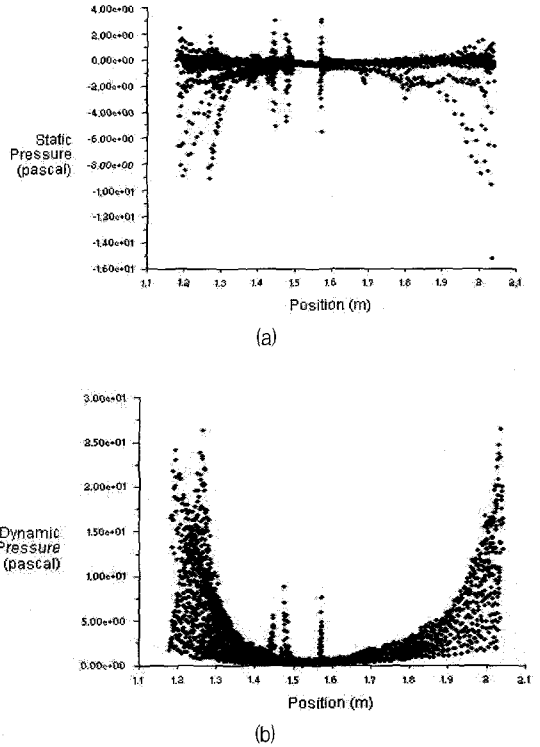


Fig. 15 Plotting of pressure distribution for impeller surface (type - II) : (a) static pressure distribution of impeller surface and (b) dynamic pressure distribution of impeller surface

5. 결론

Hydrofoil type을 대체할 수 있는 응집기를 개발하기 위하여 turbine type flocculator와 twisted hydrofoil type의 유동특성을 수치해석 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수치해석 결과 twisted hydrofoil type은 비틀림 각도에 관계없이 hydrofoil type과 유사한 유동분포를 나타냈으나 turbine type flocculator는 유동 불균일 및 사구역 발생이 크게 나타났다.
2. Twisted hydrofoil type 중에서 사구역 (dead zone)을 줄이고 침전물을 끌어올려 더욱 더 큰 플러를 형성하며 지(池)내의 에너지 분포를 고르게 할 수 있는 형식으로 비틀림 각 (twist angle)이 15~20°인 type - II가 응집용으로 가장 효과적이다.
3. Twisted hydrofoil type 임펠라도 수치리 응

집용으로 양호한 것으로 확인 되었다.

참고문헌

- (1) Amirtharajah A. and O'Melia, C. R., 1990, "Coagulation process : destabilization, mixing and flocculation in Water Quality and Treatment", 4th Ed., McGraw-Hill, NY
- (2) 한국수자원공사, 1998, "제1회 수도설계 전문가 Workshop : 혼화 및 응집분야"
- (3) Kawamura. S., 1991, "Integrated Design of Water Treatment Facilities. John Wiley & Sons", INC
- (4) Kawamura, S., 1996, "Optimisation of basic water-treatment processes design and operation : coagulation and flocculation", J.Water SRT, 45(1), pp. 35~47
- (5) 최영석, 이재환, 김상일, 2000, "날개 형상이 프로펠러형 수중믹서의 성능에 미치는 영향에 관한 수치적 연구"
- (6) 한국수자원공사, "정수장 자동화 및 정수 관련 기자재의 개발"
- (7) 송길섭, 오석영, 오정진, 2002, "혼합탱크내의 임펠라 형태에 따른 유동 특성에 관한 수치해석"
- (8) FLUENT 5 User's Guide Vol. 2-Vol. 3, 1998
- (9) ATES, FLUENT Basic Training I
- (10) M. Yasuhara & H.Daiguji, 2002, "수치유체역학 기초와 응용", 원기술