

접촉 반응조 혼합효율 향상을 위한 전산 유체역학적 연구

신미수 · 김혜숙 · 조진영 · 최준호 · 장동순[†]

충남대학교 환경공학과

(2006년 3월 16일 접수, 2006년 8월 31일 채택)

Numerical Fluid Dynamic Study for Improvement of Mixing Efficiency in the Contactor

Mi-Soo Shin · Hey-Suk Kim · Jing-Young Joh · Jun-Ho Choi · Dong-Soon Jang[†]

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT : The characteristics of flow field and turbulent mixing efficiency of SS in non-aerated contacting reactor are critical design parameters directly affecting on the efficiency of the overall process of wastewater treatment system. To this end, in this study numerical fluid dynamic calculation has been made to investigate the flow field and concentration distribution of SS in terms of specification(shape and dimension) of impeller and other operating conditions. As the first step, the performance of the computer program developed was successfully evaluated by the comparison of the typical flow field with the type of impeller with that appeared in open literature. Further, a series of parametric investigations are made in terms of interesting parameters such as the type and dimension of impeller, location, and number of impeller, etc. A number of useful conclusions obtained by numerical calculation are the superiority of mixing efficiency of pitched type than the flat one together with the visible increase of the overall mixing effect by the employment of the larger impeller and increase of the impeller number, etc.

Key Words : Contactor, Impeller Type, Mixing Efficiency, Numerical Simulation

요약 : 비폭기 혐기상태에서 접촉 반응조내에서 임펠러의 종류와 운전조건에 따른 유동특성 및 SS의 효율적인 혼합은 오·폐수 반응조 전 공정효율에 직접적인 영향을 미치는 중요한 설계인자이다. 이를 위하여 본 연구에서는 수치해석적인 방법에 의하여 임펠러의 제원(형상및 크기)과 운전조건에 따른 반응조 내의 유동장과 SS농도분포를 계산하였다. 일차적으로 본 논문에서는 접촉 반응조 내부의 유동 및 농도를 수치 모사하여 임펠러 형상에 따른 전형적인 유동특성과 비교 검토함으로써 프로그램의 성능을 확인하였다. 또한 임펠러의 종류와 크기 그리고 위치 등에 따른 조직적인 변수연구를 수행함으로써 설계와 최적인 운전조건의 결정을 위한 임펠러 특성에 대한 유용한 자료를 도출하고자 하였다. 그 결과 임펠러 타입이 pitched-type 인 경우 flat-type에 비해 혼합 효율이 크게 향상됨을 알 수 있었으며 임펠러의 크기가 클수록, 다단으로 설치할수록 효율적인 혼합이 이루어짐을 확인하였다.

주제어 : 접촉 반응조, 임펠러, 혼합효율, 전산수치해석

1. 서론

비폭기 혐기상태에서 SS의 반응조 내 균일혼합 상태유지는 오·폐수 반응조 전 공정효율에 직접적인 영향을 미치는 기술로써 이를 달성하기 위해서는 접촉 반응조의 최적 설계 및 운전조건 설정이 매우 중요하다. 그러나 SS의 유체내 거동은 유체와 SS의 고-액 난류유동으로 임펠러, 배플, 반응조 내 운전조건, SS 농도, 반응조의 형상, 반응 특성시간 등 여러 가지 변수에 의해 접촉반응조 내부의 균일 혼합정도가 크게 달라진다.^{1,2)} 이와 같이 전반적인 폐수처리 시스템에 대해 단순한 해석적 연구나 좁은 영역에서 성립하는 경험식의 적용으로는 적절한 해석이 가능하지 않으며 이러한 목적을 달성하기 위해서는 실험적인 연구와 병행하여 전산유체공학

적인 방법에 의한 수치 해석이 절대적으로 요구된다. 이러한 수치해석적인 방법에 의해 폐수처리장치를 구성하는 각각의 반응조에 대한 컴퓨터 코드가 개발되면 유사한 반응조의 설계에 유용한 설계도구로서 뿐만 아니라 일/이차 침전조의 다양한 설계 및 운전조건설정, 호소내의 수체 열유동 해석에 따른 오염물질 생성 및 소멸에 대한 메카니즘 연구 등에 다양하게 응용될 수 있다.³⁾

접촉 반응조에 대한 수치 해석적 연구는 1972년 Thiele에 의해 처음으로 stream function-velocity 방법에 의해 수치해석이 이루어진 후 많은 연구자들에 의해 배플이 있는 반응조 내의 impeller에 의해 유도된 고도 유동해석과 그에 따른 최적 운전 설계가 이루어졌으며 미국 AIChE Journal 등에 주요 주제중의 하나도 대두되고 있다.⁴⁾

접촉 반응조에 임펠러를 사용할 경우, 반응조 내 난류혼합에서 'bulking circulating flow'에 의한 혼합은 임펠러의 종류에 따라 특성이 좌우된다. 임펠러의 종류에는 직경방향 유동

[†] Corresponding author

E-mail: p_dsjang@cun.ac.kr

Tel: 042-821-6677

Fax: 042-823-8362

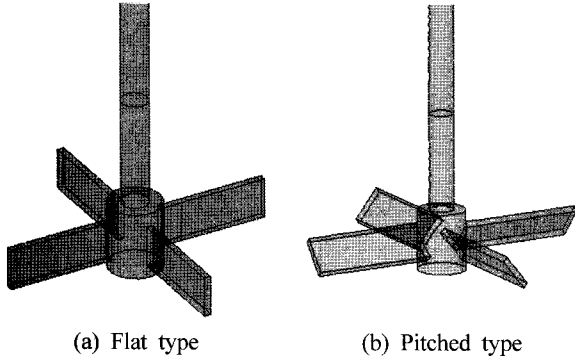


Fig. 1. Type of impeller.

(radial flow)을 야기시키는 flat type과 축방향 유동(axial flow)을 야기시키는 pitched type 등이 있으며 Fig. 1에 나타내었다.^{5~7)}

2. 수치해석적 연구 방법

반응조내 임펠러의 회전에 따른 유동장 특성과 부유고형 물질의 농도분포의 수치해석은 3차원 축대칭 원통좌표계를 사용하여 수행되었다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 단위질량당 일반속변수로서 z, r, θ 방향의 속도를 나타내며 Γ 는 확산계수, S_ϕ 는 생성항을 나타낸다. 각 속속변수별 확산계수와 생성항은 Table 1에 나타내었다.⁸⁾

먼저 3차원 축대칭 컴퓨터 프로그램을 사용하여 임펠러회 효과를 검증한 프로그램의 경우 임펠러의 회전에 의한 수체 유동을 계산하기 위하여 임펠러가 쓸고간 수체 영역(swept volume)에 단위체적당 동력이 해당하는 힘을 접선방향의 운동량에 해당하는 속도 성분에 할당 하였다. Flat impeller type

을 사용한 경우는 단위체적당 힘을 접선방향의 운동성분에 할당함으로써 모델링하였으며 pitched impeller type의 경우는 임펠러의 단위체적당 힘을 접선방향과 직경방향의 운동성분에 할당하는 방법으로 수치모사를 실시하였다. 이 경우 임펠러의 단위체적당 동력을 $P[\frac{W}{m^3}]$ 이라 하면 단위 체적당 접선방향으로 작용하는 힘은 아래와 같이 주어진다.

$$\frac{P}{V} = \frac{Force \times \text{접선방향속도}}{V} = \frac{Force \times D \times rps}{V}$$

$$\therefore \frac{Force}{V} = \frac{Power}{V} \times \frac{1}{D \cdot rps} \quad (2)$$

보통 생물학적 처리장치에서 필요 동력이 $10^3 m^3$ 당 10~30 KW이고 빠른 혼합조의 경우 동력요구량이 50~200 $\frac{KW}{10^3 m^3}$ 이므로 본 논문에서는 단위체적당 임펠러에 가해지는

힘의 크기를 $50[\frac{W}{m^3}]$ 를 기준으로 하였다.

난류 유동장을 해석하기 위해서 속도 성분 u, v에 대해 순간 운동 방정식을 시간 평균한 값을 이용하였고, k- ϵ 모델을 적용하였으며 난류 점성계수 μ_t 는 식 (3)와 같은 Prandtl-Kolmogorov 관계식에 의해 단위 질량당의 난류에너지 k와 난류에너지 소산율 ϵ 을 이용하여 표현하였다.^{8,9)}

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

식 (1)과 같이 표현된 2차 편미분 지배방정식은 검사체적에 기초한 Patankar의 유한차분방법을 사용하여 이산화 하였으며 운동량 방정식에 나타나는 속도와 압력의 연계는 SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent) 알고리즘을 사용하였다.

Table 1. Diffusion coefficient and source term expression for 3-D rectangular coordinate

Name	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Axial Velocity	\bar{u}	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x}$
Vertical Velocity	\bar{v}	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y}$
Horizontal Velocity	\bar{w}	μ_{eff}	$\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z}$
Turbulent Kinetic Energy	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$G_{k1} - \rho \epsilon$
Dissipation Rate of k	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k}(C_1 G_{k1} - C_2 \rho \epsilon)$ for Standard k- ϵ $\frac{\epsilon}{k}(C_1 G_{k1} - C_2 \rho \epsilon) - \rho R$ for RNG k- ϵ

$$G_{k1} = 2\mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 \right]$$

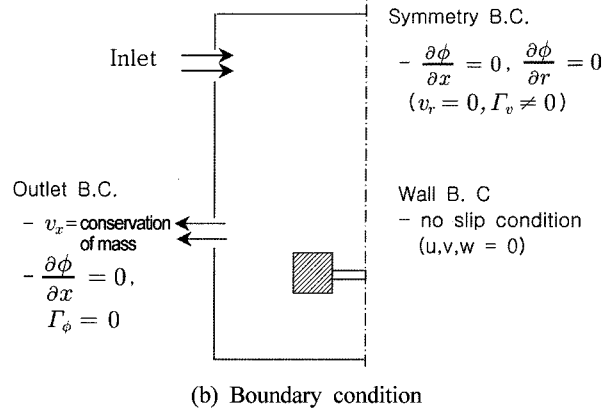
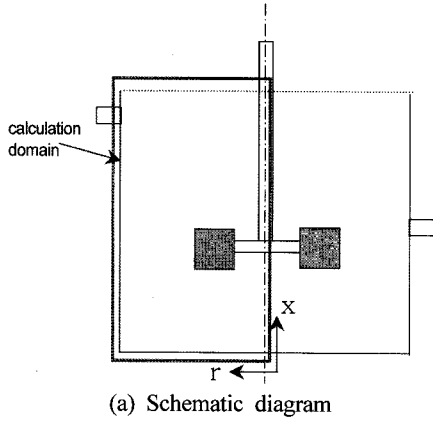


Fig. 2. Schematic diagram and boundary condition of 2-D contacting reactor.

3. 연구결과 및 토론

본 연구는 폐수처리 시스템의 최적설계를 위한 기초 연구로써 시스템 구성요소 중 하나인 접촉 반응조 내부의 유동을 수치모사 하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 입구와 출구를 고려하였고, 하루 6.76톤의 폐수를 처리하는 실험실 규모의 접촉반응조로 제원은 높이 0.65 m, 길이와 폭은 0.5 m 인 장방형이다. 본 연구에서는 임펠러의 각속도를 고려하고 정성적인 검증을 하고자 축대칭 형태로 가정하여 프로그램을 개발하여 변수연구를 수행하였으며 반응조 내부의 유동을 좀 더 다각적으로 확인하고자 상용코드를 활용하여 반응조의 정확한 형상과 임펠러의 위치 및 개수, 각속도 변화에 따른 유동해석을 병행하였다.

Fig. 2는 접촉 반응조의 도식도 및 경계조건을 나타낸 것이다. 폐수처리 시스템 공정에서는 반응조 각각의 효율보다는 시스템 전체의 총괄적인 처리효율이 중요하므로, 접촉 반응조 내부의 유속이나 농도분포 실험 데이터를 얻기는 어려운 실정이다. 그러므로 프로그램 검증을 위하여 문헌에 나와 있는 자료와 정성적인 비교를 통해 프로그램을 검증하였다. Fig. 3에 flat type과 pitched type에 대한 유동분포 결과를 나타내었다. 결과에 나타나 있듯이 flat type의 전형적인 유동장 특성인 double-circulation loop과 pitched type의 전형적인 유

동장 특성인 single-circulation loop를 확인함으로써 개발된 프로그램을 정성적으로 확인하였다.

3.1. 접선방향/축방향의 속도 변화

Fig. 3은 접선방향의 힘 $F_w = 50 \text{ N/m}^3$ 에 대하여 (a)는 축방향의 유동이 존재하지 않는 flat-type의 유동 결과이고 (b), (c), (d)는 pitched type의 경우 축방향의 힘 F_A 를 접선방향의 힘에 0.5, 1.0, 2.0배로 변화시켜 수치해석을 수행한 결과이다. 결과에 나타나 있듯이 축방향의 힘이 증가함에 따라 2개의 유동이 하나의 유동으로 결합되어 나타났다. 축방향의 힘이 접선방향의 힘의 2배가 되는 (d) $F_A = 2.0 \text{ FW}$ 의 경우에 나타난 유동장은 문헌에 나타난 바와 같이 single-circulation loop를 보여주고 있다. 또한 같은 pitched type의 경우 축방향의 힘이 증가할수록, 즉 회전속도가 증가할수록 유동강도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 유입수에 SS농도가 3,000 ppm으로 유입되고, 반응조 내부 초기 SS농도는 200 ppm으로 가정한 경우 임펠러 형태별로 가운데 단면에서 임펠러를 중심으로 반응조의 폭(직경)방향으로의 농도분포를 나타낸 것이다. Fig. 4에 나타낸 임펠러 타입별 농도분포는 flat type에 비해 pitched type이 출구로 빠져나가는 농도비(출구농도/입구농도)가 높게 나타나 혼합효율이 좋은 것으로 나타났다.

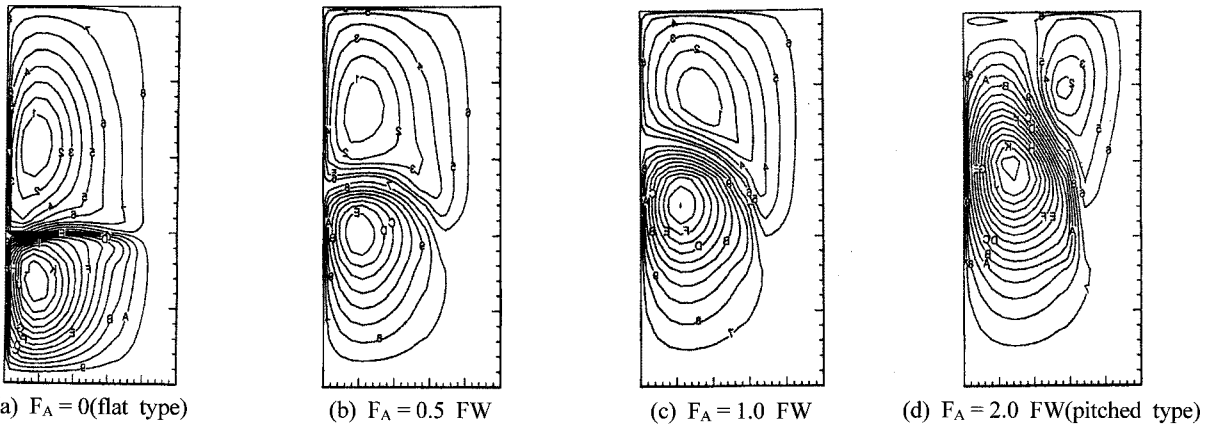


Fig. 3. Streamline contour plots with the increase of axial force.

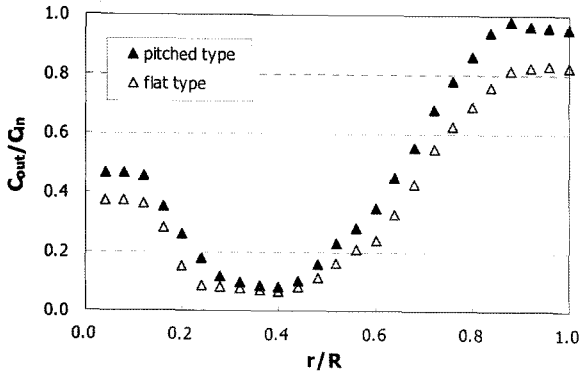


Fig. 4. SS concentration distributions with different impeller types.

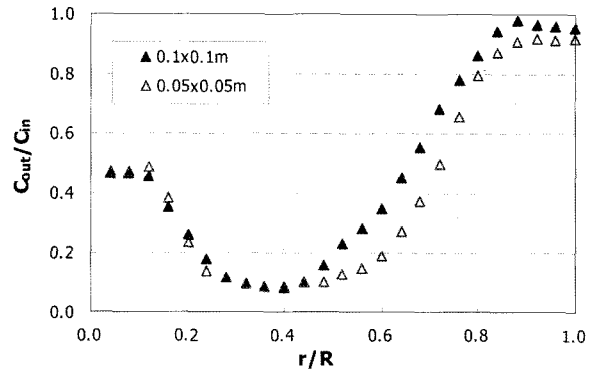


Fig. 6. SS concentration distributions with different impeller sizes.

3.2. 임펠러 크기에 따른 변화

Fig. 5와 Fig. 6은 임펠러 크기를 각각 0.05×0.05 m, 0.1×0.1 m로 변화시켜 계산한 수치해석 결과이다. Fig. 5는 유동 분포를 나타낸 것으로 임펠러의 크기가 클수록 유동강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 임펠러 크기가 클수록 출구로 빠져나가는 농도비(출구농도/입구농도)는 약간 증가하였으며, 반응조 내부 전체적 농도분포도 좀 더 높게 고른 분포를 나타냈다. 즉 임펠러의 크기가 클수록 혼합이 좀 더 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

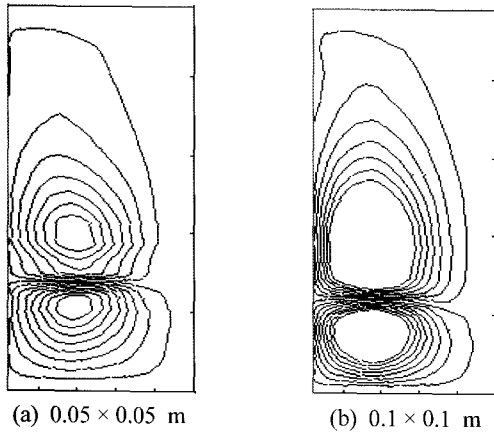


Fig. 5. Streamline contour plots with different impeller sizes.

3.3. 임펠러 특성 변화에 따른 3차원 유동 결과

앞에서 설명한 바와 같이 반응조 내부의 혼합은 임펠러의 종류에 따라 좌우된다. Fig. 7은 본 연구에서 수행한 3차원 반응조 및 임펠러의 종류에 대한 도식도를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 Fig. 7에 나타낸 임펠러 종류 변화 및 다단 설치에 따른 반응조 내부의 유동해석 결과이다. 임펠러의 회전속도는 50 rpm을 가정하였으며, pitched-type의 경우 임펠러의 경사각을 45° 로 가정하였다. Fig. 8은 정면에서 중앙단면의 유동분포를 나타낸 것이다. 결과에 나타나 있듯이 (a) flat-type의 경우 가장 혼합효율이 저조했으며, flat-type에 비해서 축방향 유동이 강화된 (b) pitched-type의 경우 반응조 직경방향 뿐만 아니라 상하로의 혼합이 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 예상한 바와 같이 (c)의 double-pitched type의 경우 세 가지 경우 중 가장 혼합효율이 좋게 나타났다.

Fig. 9는 임펠러 근처에서 유동패턴을 비교해보기 위해 flat-type과 pitched-type의 임펠러 주변의 유동을 확대해서 나타낸 결과이다. Fig. 9의 (a)는 flat-type의 임펠러 날개 앞쪽으로 크게 뿜어나가는 유동만 주로 발생하여 접촉 반응조 상·하부로의 혼합이 원활하게 이루어지지 않는 반면, (b)에 나타난 pitched-type의 경우 임펠러의 경사각(45°)에 의해 강력한 상향류의 발생이 유도되어 접촉 반응조 상·하부로의 혼합이 원활하게 일어나는 것을 볼 수 있다.

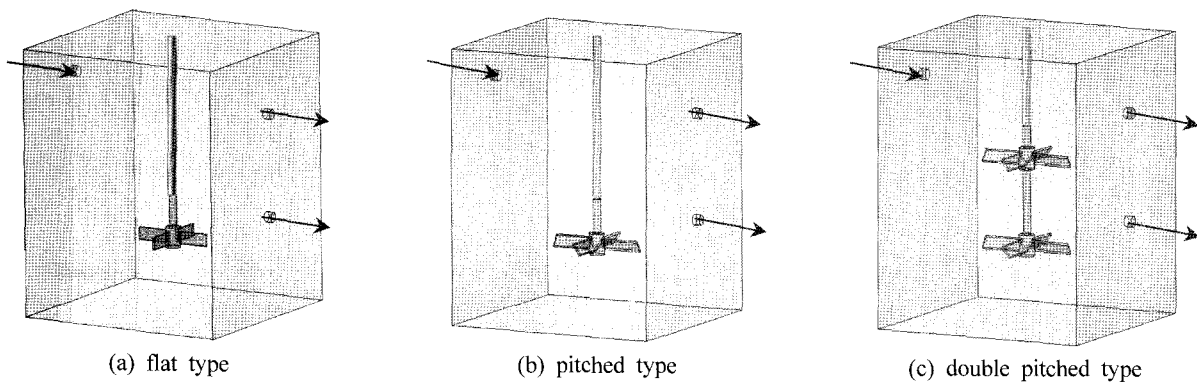


Fig. 7. Schematic diagram of 3-D contacting reactor with different impeller types.

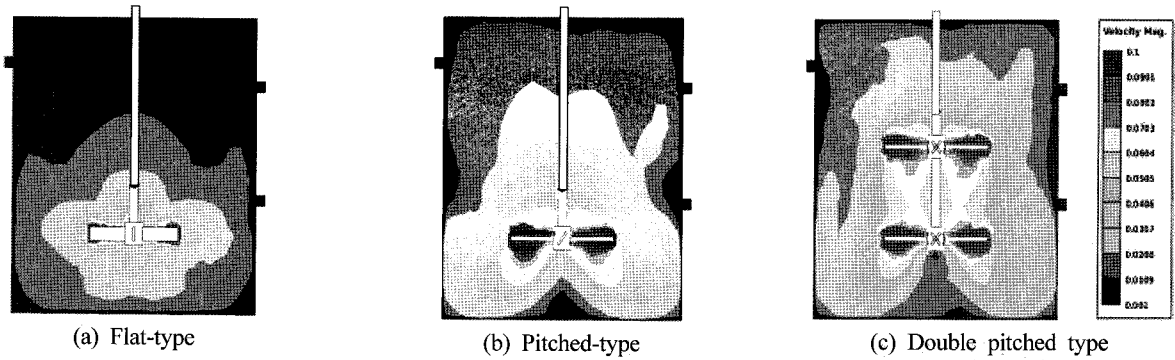
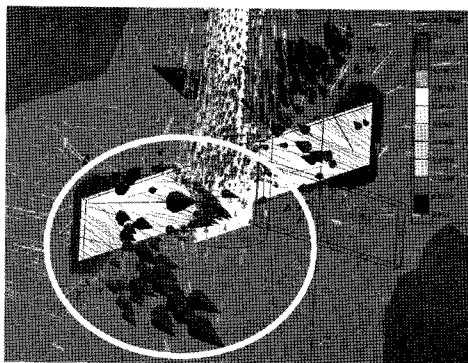
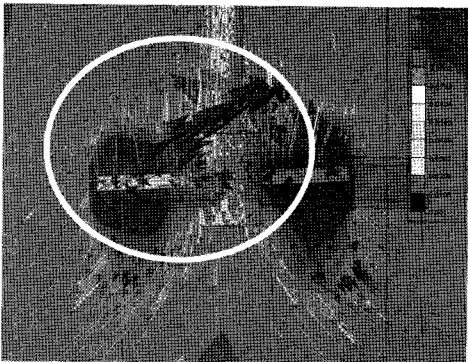


Fig. 8. Velocity distribution of contactor with different impeller types.



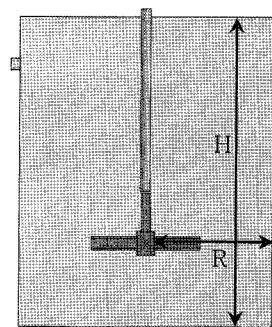
(a) Flat-type



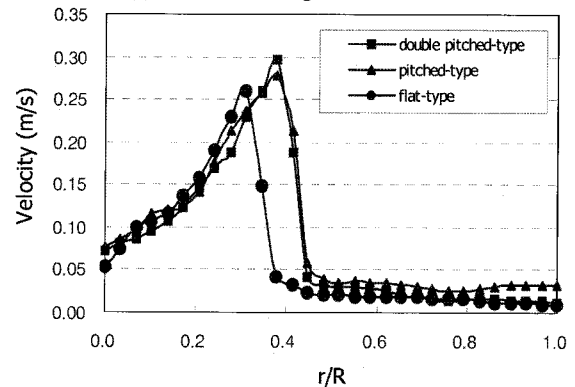
(b) Pitched-type

Fig. 9. Velocity vector plots around impeller.

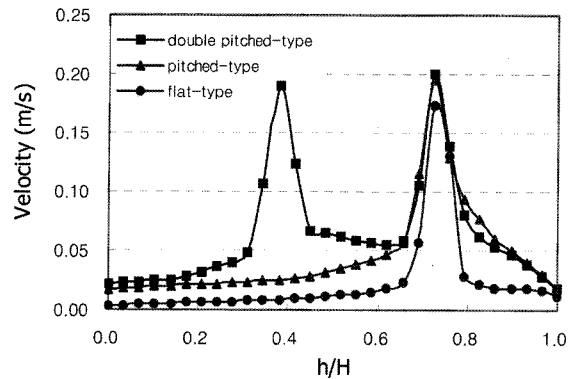
임펠러가 위치한 부분에서의 속도가 높게 나타나는 것을 가시적으로 확인할 수 있었다. 이 결과 반응조 상하로의 혼합도 강화되는 것을 알 수 있다.



(a) Schematic diagram of reactor



(b) Radial velocity distribution



(c) Axial velocity distribution

Fig. 10. Velocity distributions with impeller types.

Fig. 10은 위의 결과들을 가시적으로 확인하기 위하여 임펠러의 형상 및 개수 변화에 따른 가운데 단면에서의 속도 분포 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 10의 (a)는 반응조 내부 가운데 단면에서 속도표시 영역에 대한 상세도식도를 나타낸 것이다. Fig. 10의 (b)는 가운데 단면에서 임펠러를 중심으로 반응조의 폭(직경)방향으로의 속도분포를 나타낸 것인데 임펠러가 flat-type일 때 최고 속도가 가장 작게 나타났으며 임펠러가 pitched-type인 경우 최고속도도 flat-type에 비해 높게 나타났으며 전체적인 속도의 증가에 따라 혼합효율이 향상되는 것으로 나타났다. pitched-type 임펠러를 2단으로 설치한 경우 속도가 가장 크게 나타나서 혼합효율도 가장 좋게 나타날 것으로 사료된다. 축방향의 속도분포를 나타낸 Fig. 10의 (c)는 pitched-type을 2단으로 설치한 경우 반응조 전체에 걸쳐 속도 증가가 더욱 뚜렷하게 나타났으며,

4. 결론

본 연구에서는 폐수처리 시스템에서 중요한 역할을 하는 접촉 반응조의 혼합효율 향상을 위해서 다양한 운전변수에 대한 수치해석을 수행하였다. 개발된 프로그램은 문헌과의 비교를 통해 검증하였다. 또한 반응조 내부 다양한 설계 변수에 따른 결과 일반적으로 임펠러 타입은 flat type에 비해서 pitched type의 혼합효율이 우수하게 나타났으며, 임펠러의 크기가 클수록, 임펠러를 다단으로 설치한 경우 혼합 효율이 우수하게 나타났다. 이러한 전산수치해석적인 방법은 향후 신뢰성 있는 실험 자료와의 비교검토를 통하여 실증 설비 설계와 최적 운전조건을 위한 정량적인 설정에 일조할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국환경기술진흥원에서 시행된 차세대 핵심 환경기술개발사업(2006-07001-0069-0)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Amirthara, A. and Tambo, N., "Mixing in coagulation and flocculation," *American Water Works Association*, pp. 1~35(1991).
2. Zweitering, T. N., "Suspending solid particles in liquid by agitation," *Chem. Engr. Sci.*, **8**(3/4), pp. 244(1958).
3. 한운우, "조정지 방류의 농도 예측," 대전대학교 산업기술연구소 논문집, **3**(1), pp. 109~121(1992).
4. Placek, J., Tavlarides. L. L., Smith, G. W., and Fort, I., "Turbulent flow in stirred tank II," *AIChE Journal*, **32**, pp. 1771~1785(1986).
5. Nienow, A. W., "Mixing in the process industries," Butterworths, London(1985).
6. Holland, F. A. and Chapman, F. S., "Liquid mixing and processing in stirred tank," Reinhold Publishing Corporation, New York(1966).
7. Oldshue, J. Y., "Fluid mixing technology," McGraw Hill Book Company, New York(1983).
8. Patanker, S. V., "Numerical heat transfer and fluid flow," McGraw-hill book company(1980).
9. Hinze, J. O., "Turbulence," McGraw Hill Book Company, New York(1956).