

급속 분사식 교반기의 유동 특성 연구

윤경종* · 안병재** · 김윤제***

A Study on the Flow Characteristics of a Quick Injection Agitator

K.-J. Youn*, B.-J. Ahn**, Youn J. Kim***

Key Words : Agitator (교반기), CFD (Computational Fluid Dynamics; 전산유체역학), Velocity gradient (속도구배), Throw length (도달길이)

ABSTRACT

A quick injection agitator is used to mix working fluids. In this study, numerical analyses are carried out to investigate the performance of a quick injection agitator with different gaps between the impeller and vacuum enhancer. A commercial CFD code is used to compute the 3-D viscous flow field within the impeller of agitator. Numerical results are graphically depicted with different gaps. Special attention is paid to the following topics: pressure distribution, velocity gradient, volume fraction.

1. 서론

정수처리공정은 크게 혼화, 응집, 침전, 여과, 살균공정으로 분류할 수 있다. 이 중 혼화공정은 전체 정수처리공정에서 가장 규모가 작고 짧은 체류시간을 가지고 있지만 미세오염물질을 제거하기 위한 첫 번째 공정으로 정수처리 효율을 결정하는 중요한 과정이다. 또한 일반적으로 지금까지의 혼화공정은 응집제를 원수에 고르게 분산시키는 기능만을 고려하여 운전하고 있는 경우가 대부분이다.⁽¹⁾

혼화공정에 사용되는 혼화장치는 일반적으로 2종류 이상의 물질에 외력을 가해 교반하고 균질의 혼합물을 얻거나 반응을 촉진하는 장치이다. 이러한 혼화장치는 교반축의 형태에 따라 수직형과 수평형 혼화장치로 크게 나눌 수 있는데, 수평형 혼화장치는 수직형에 비해

단위용적당 전열면적이 크며, 연속프로세스 및 체류시간 분포를 균일화 할 수 있는 장점이 있다.

수평형 혼화장치의 하나인 급속 분사식 교반기는 정수처리공정에 사용되는 여러 종류의 가스 또는 액체 약품을 사전에 희석하지 않고, 원액 상태로 처리수중에 직접 흡인 유도하여 순간적으로 분사·교반하기 위한 장치이다. 급속 분사식 교반기의 분사·교반 기능은 고속으로 회전하는 임펠러의 전면에서 형성되는 분사력을 이용한다. 즉, 외부로부터 흡입된 약품과 프로펠러 후면에서 전면으로 이동하는 유체를 처리수중을 향하여 일정이상의 원주 속도로서 분사하게 된다. 이때 분사되는 약품과 유체는 프로펠러로부터 일정거리에 도달하여 분사영역을 형성하게 되는데, 분사 영역 안으로 모든 처리수가 통과하도록 설치하여 수 초내에 완벽하고 순간적인 분사·교반을 수행하게 된다.

Rhodes 등⁽²⁾은 혼화를 위한 임펠러의 설계에 대한 기본 개념을 정의하였고, 각 임펠러 형태에 따른 속도구배 (velocity gradient) 값을 실험에 의하여 구하였다. 김경천과 박경현⁽³⁾은 플랫 (flat) 터빈형 임펠러를 가지

* 성균관대학교 대학원

** 현대모비스

*** 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@skku.edu

는 교반기의 유동특성을 PIV(입자영상유속계)를 이용하여 측정하였다. 최근에는 고도로 발달한 수치적 방법을 이용하여 Pall⁽⁴⁾은 Rushton 터빈의 3차원 모델링을 단상과 다상유동에 대하여 수행하였고, 장재원과 허남건⁽⁵⁾은 산업용 교반기 내부의 정상/비정상 유동특성을 수치적으로 해석하였다.

본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 임펠러 형상을 가진 급속 분사식 교반기의 교반강도에 대한 연구로서 임펠러와 진공발생기 사이 간극변화에 따른 진공도 차이와 이에 따른 유동 특성에 대해 알아보고자 한다.

2. 관련이론

급속교반 장치의 설계 매개변수는 속도구배(G)와 교반시간(t)이다. 속도구배는 단위부피당 동력소모를 나타낸 것으로 모터 축으로부터 유체로 동력이 전달되는 속도로 표현할 수 있다. 교반을 위한 속도구배식은 다음과 같다.

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}} = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad (1)$$

위 식에서 G는 속도구배 (s^{-1}), W는 반응조 단위체적당 물에 가해지는 동력 ($N/s \cdot m^2$), P는 물에 가해지는 동력 ($N \cdot m/s$), V는 반응조 체적 (m^3), 그리고 μ 는 물의 절대점성계수 ($N \cdot s/m^2$)를 나타낸다.

급속 분사식 교반기의 경우, 반응조 체적은 다음 식에 의해 구할 수 있다(Fig. 2 참조).

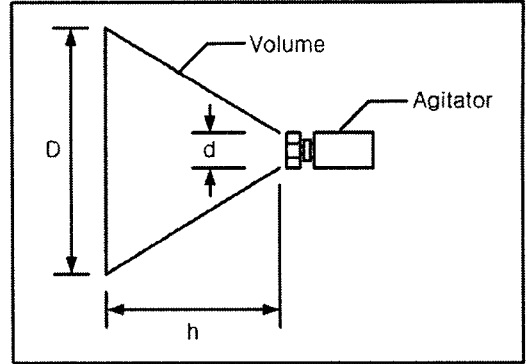


Fig. 2 Diagram for the calculation of velocity gradient

$$V = \frac{\pi}{12} \frac{h}{D} (D^3 - d^3) \quad (2)$$

위 식에서 h는 임펠러 전면으로의 약품 최대도달거리(throw length), D는 교반영역 직경, 그리고 d는 임펠러 직경을 나타낸다. 일반적으로, 급속 분사식 교반기에 의한 약품 교반시간은 0.5~1초이다.

가장 보편적인 기계식 혼화장치의 효과적인 속도구배와 혼합시간은 $G \times t = 300 \sim 1,600$ 이고, 펌프 분사기의 경우에는 $G \times t = 400 \sim 1,600$ 이다. 또한, 관내 고정식 혼합장치(in-line static agitator)의 경우 $G \times t = 350 \sim 1,700$ 이다. 혼화지 조건에 따라 차이가 있지만, 일반적으로 적합한 혼화지의 속도구배는 $700 \sim 1000 s^{-1}$ 이며, 혼화조건에 따른 적절한 교반강도 값을 가져야 한다.

3. 수치해석 방법

3.1. 지배방정식

교반기 임펠러 주위의 유동특성을 분석하기 위한 정상상태 난류의 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (3)$$

운동량 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right] \quad (4)$$

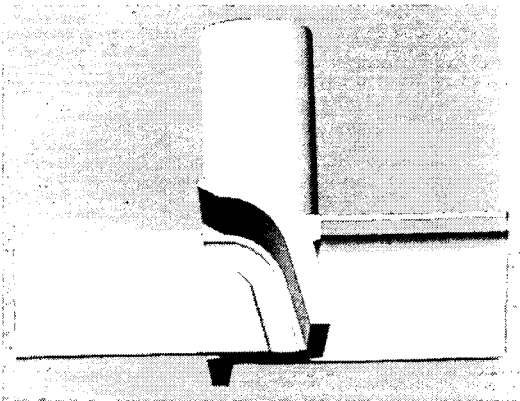


Fig. 1 Configuration of the modeled impeller

또한, 본 연구에서는 박리현상(flow separation)이 예상되는 임펠러 주위의 난류장 해석을 위해서 일반적인 $k-\epsilon$ 기법보다 벽면에서의 박리현상을 비교적 쉽게 예측할 수 있는 $k-\omega$ 기법을 기본으로 한 전단응력수송(Shear Stress Transport, SST) 기법을 사용하였다.⁽⁶⁾

3.2. 격자계 및 경계조건

해석에 사용된 모델은 실제 교반기의 임펠러 형상을 기초로 하여 3차원 형상을 만들었고, 유체기계의 수치해석에 많이 이용되고 있는 상용 프로그램인 CFX를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 또한 주기조건과 MFR(multi-frame reference)조건을 이용하여 격자계를 구성하였다.

전체 격자수는 비정열격자(unstructured grid)로 300,000개를 사용하였으며, 임펠러와 벽면주위에는 프리즘 격자를 이용하여 해석의 정확도를 높였다. 임펠러와 진공발생기 사이 간극에는 다른 부분에 비하여 상대적으로 압력과 속도구배가 클 것으로 예상되어 조밀격자(enhanced grid)를 사용하였다(Fig. 3 참조).

임펠러의 길이는 33mm이며, 회전수는 3450 rpm, 임펠러 개수는 총 4개이다. 교반기가 관내 유동 교반에 사용되는 것으로 가정하여 전체 유동장을 직경 2m, 길이 3m로 구성하였다. 분사방향은 일반적으로 같은 조건에서 정방향 분사보다 속도구배가 큰 역분사가 가정하였다. 입구에서 임펠러까지의 거리를 1m로 하고, 후류에 의한 교반영역을 2m로 구성하였다. 또한, 0.5m/s, 20℃의 물이 관으로 유입되고 있다고 가정하였다. 실제 혼합과정에서는 다양한 화학약품이 주입되는데 본 연구에서는 1m/s의 공기가 유입된다고 가정

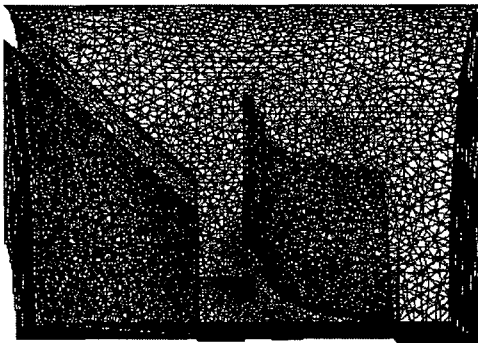


Fig. 3 Grid systems of the modeled agitator

하였다. 또한, 진공발생기와 임펠러의 간극 (h_g)을 3mm에서 7mm까지 2mm 간격으로 변화시켜며 수치해석을 수행하였다.

4. 수치해석 결과

교반기의 진공발생기는 임펠러와의 간극을 조절함으로써 간극에서의 압력을 변화시킨다. 임펠러와 진공발생기의 중간지점인 A-A'(Fig. 4 참조)에서의 압력분포를 Figs. 5~7에 도시하였다. 결과를 살펴보면 간극이 작을수록 유로 감소에 의해 높은 진공압력이 얻어짐을 알 수 있다.

간극(h_g) 변화에 따른 속도구배(G) 값의 변화를 살펴보기 위해 유입구에서부터 공기의 유선을 Figs. 8~10에 도시하였다. 결과를 살펴보면 간극(h_g) 변화에 따라 진공압력이 증가하면서 공기의 유입속도가 증가함을 알 수 있다. 이로 인해 임펠러 후면에서 전면으로 속도가 증가하여 h의 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 가상 반응조 체적의 중앙부근에서 도달거리(h) 값이 작게 나타나는 것은 임펠러가 정육면체에 붙어있는 형상에서 기인한 것으로 판단된다. 이를 방지하고자 임펠러 아래쪽에 우회로를 만들었으나 그 효과가 미미한 것으로 판단된다.

간극(h_g) 변화에 따른 도달거리(h)의 증가량을 Fig. 11에 정량적으로 나타내었다. 간극(h_g)이 감소하면서 도달거리는 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 임펠러와 진공발생기 사이에서 발생하는 진공압력 발생량의 차이로 인하여 임펠러통과 속도가 달라지기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 여기서 구한 h 값을 이용하여 식 (1)과 (2)로부터 속도구배(G) 값을 구하여, 이를 Fig. 12에 도시하였다. 속도구배(G)는 도달거리(h)가 증가

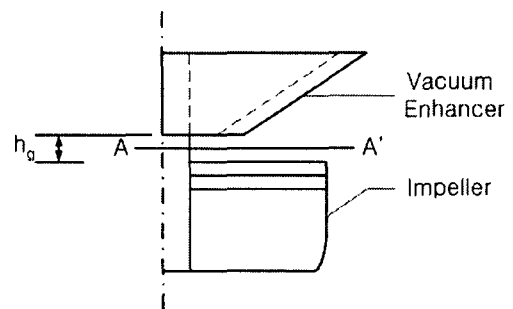


Fig. 4 Centerline A-A' between the impeller and vacuum enhancer

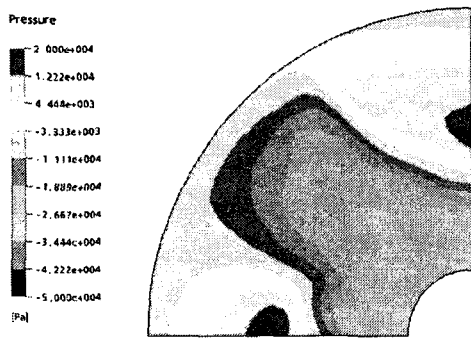


Fig. 5 Pressure distribution along the centerline A-A' for $h_0 = 7$ mm

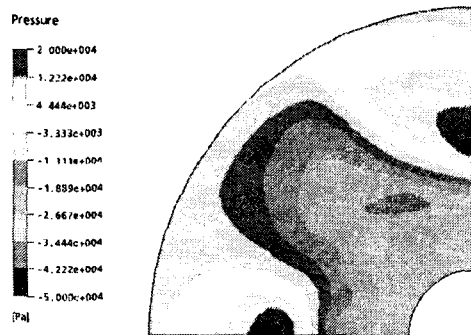


Fig. 6 Pressure distribution along the centerline A-A' for $h_0 = 5$ mm

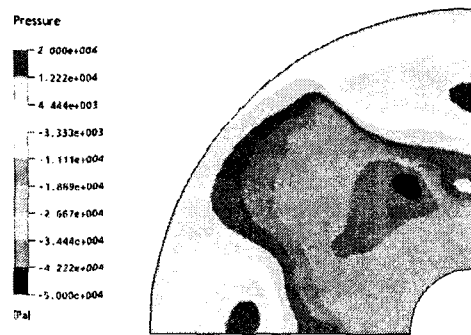


Fig. 7 Pressure distribution along the centerline A-A' for $h_0 = 3$ mm

함에 따라 체적 증가 및 속도구배 (G) 값의 감소를 가져왔다.

간극 (h_g) 변화에 따른 출구에서의 공기 체적분율을

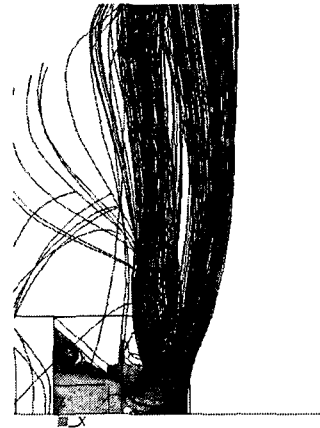


Fig. 8 Streamline around a impeller for $h_0 = 7$ mm

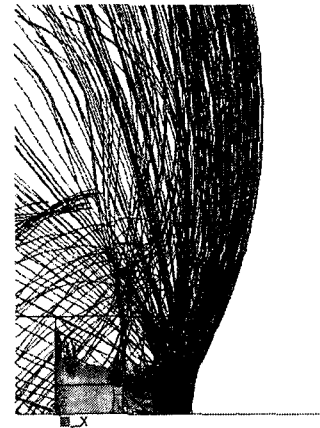


Fig. 9 Streamline around a impeller for $h_0 = 5$ mm

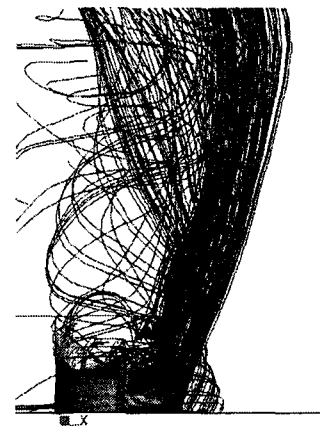


Fig. 10 Streamline around a impeller for $h_0 = 3$ mm

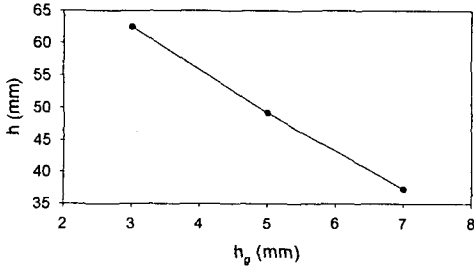


Fig. 11 Effects of various gaps (h_g) on the throw length around the impeller

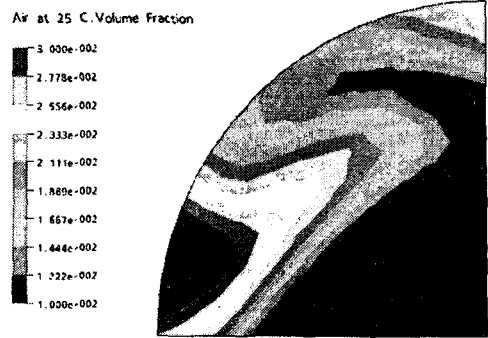


Fig. 13 Volume fraction along the outlet for $h_g = 7$ mm

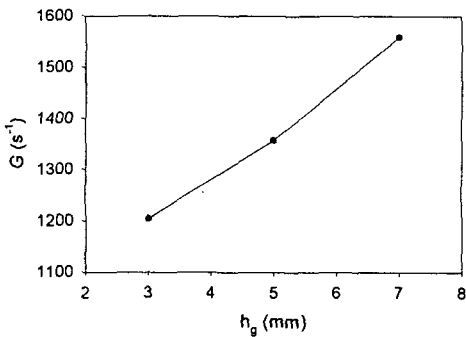


Fig. 12 Effects of various gaps (h_g) on the velocity gradient

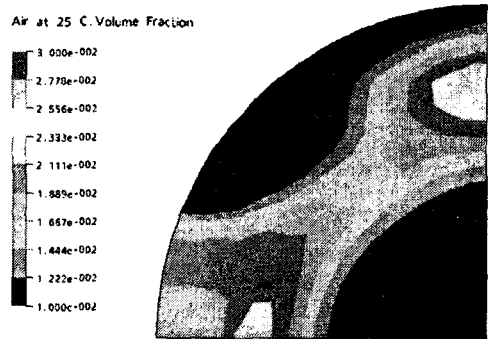


Fig. 14 Volume fraction along the outlet for $h_g = 5$ mm

Figs. 13~15에 도시하였다. 수치해석 결과를 살펴보면 $h_g = 7$ mm에서는 공기가 전체영역에 골고루 분산되지 못하고 일부지역에 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있다. $h_g = 3$ mm의 경우에는 전 영역에 걸쳐 거의 균일한 체적분율을 보임을 알 수 있다. 간극 (h_g)이 증가할수록 속도구배 값도 증가하지만 출구에서의 공기 체적분율을 살펴보면 속도구배의 증가가 균일한 교반효과를 준다고 볼 수 없다. 따라서 교반조건에 따라 적절한 속도구배 값의 선정이 필수적이다.

5. 결론

본 연구에서는 임펠러와 진공발생기 사이의 간극 변화에 따라 발생하는 진공압력의 크기와 그에 따른 분사형태의 변화를 수치적으로 분석하였다. 또한, 간극 변화에 따른 교반기 내의 유동 특성을 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 간극이 작아질수록 유로 감소로 인하여 높은 진

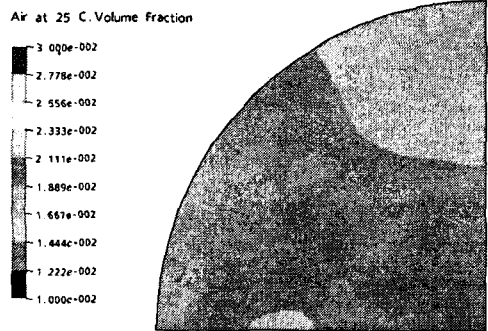


Fig. 15 Volume fraction along the outlet for $h_g = 3$ mm

공압력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

2) 간극 조절을 통해 직접적으로 속도구배 (G)를 조절할 수 있으며, 그에 따른 진공압력 변화로 인해 임펠러 전면과 측면으로의 분사력이 변함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Water Champ 실험 보고서, 1997, 수도기술연구소
- (2) Trussell, R. R., Amirtharajah, A., and Clark, M. M., 1991, Mixing in Coagulation and Flocculation, American Water Works Association, pp. 282-342
- (3) 김경천, 박경현, 2000, 고분해능 Cinematic PIV 시스템의 개발과 비정상 복잡 난류유동측정에의 응용, 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회 논문집E, pp. 536-541
- (4) Friberg, P. C., 1998, Three-dimensional Modeling of Gas/Liquid Flow Processes in Bioreactors, Dr. Ing. thesis, pp. 1-100
- (5) 장재원, 허남건, 2000, 45° Pitched Paddle 형 교반기 내부의 유동해석, 한국전산유체공학회 2000년도 추계학술대회 논문집, pp. 109-114
- (6) Menter, F. R., 1994, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application, AIAA-Journal, 32(8)