

관내 혼화장치의 오리피스 형상과 개수에 따른 혼화 및 유동특성

정선용¹, 정원식¹, 이석호¹, 이계복^{*}, 이대규²
¹충북대학교 기계공학부, ²주위터하이테크

Effect of Orifice Type and Number on the Mixing and Flow Characteristics in In-line Mixer

Jeong, Seon Yong¹, Chung, Won Sik¹, Rhi, Seok Ho¹, Lee, Kye Bock^{*},
Lee, Dae Gyu²

¹School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, ²Water Hightech

요약 본 연구에서는 혼화기의 혼화성능과 압력손실을 개선하기 위해 오리피스의 형상과 개수에 따른 영향을 해석하였다. 물의 정수에서 중요한 과정은 물속의 이물질을 포집하는 응집 과정이고 응집체가 얼마나 물속에 고른 분포를 가지고 물속에 혼화되어 있는 지가 정수에 큰 영향을 미친다. 기계식 혼화방식이 갖는 정수과정에서의 긴 체류시간, 기계 소음, 과다한 에너지의 소비 및 높은 유지관리 비용 등의 단점을 보완하기 위해서 최근에는 응집체가 원수에 주입됨과 동시에 가능한 한 빠르게 수중에 확산시킬 수 있는 장치로서 관내혼화장치의 도입이 증가추세에 있다. 본 연구에서는 관내 혼화기의 혼화성능과 압력손실을 개선하기 위해 오리피스의 유무, 형상과 개수에 따른 약품의 체적분률, 관내 압력손실 등 유동특성과 체적분률이 수치해석에 의해 계산된다. 관내 혼화장치에 장착된 오리피스는 혼화정도를 향상시키나 압력손실이 증가되므로 오리피스의 개수를 제한하여야 한다. 주요 인자에 대한 민감도 분석을 통해 가이드 베인을 장착한 오리피스 1개를 사용하여 약품의 체적분률과 압력손실이 개선된 관내 혼화장치를 제안하였다.

Abstract This study examines the effect of the type and number of orifices in an in-line mixer to improve the mixing performance and pressure loss. Recently, in-line non-power-consuming mixers have been increasingly used to complement mechanical mixers, which have a long dwell time, noise, excessive energy consumption, and high maintenance costs. An in-line mixer with an orifice for efficient mixing in water treatment was examined by numerical analysis using the commercial code FLUENT. The flow characteristics of pressure loss and velocity distribution within the mixer and the mixing efficiency were compared with and without the orifices. The CFD results show that the mixing efficiency was improved, but the pressure loss was increased by the in-line mixer with an orifice. A sensitivity study was also done on the principal parameters.

Keywords : CFD Simulation, Coagulant Dispersion, In-line Mixer, Mixing, Orifice

1. 서론

현대 사회에서 정수된 물의 사용은 그 범위가 점점 증가하고 있다. 물의 정수에서 중요한 과정은 물속의 이물질을 포집하는 응집 과정이다. 정확하게 응집제란 액체

속에 현탁되어 있는 고체입자를 몇 개씩 모아 덩어리로 만들기 위해 액체에 첨가하는 약품이다. 응집되면 액체 속의 입자는 일반적으로 침강속도가 빨라지므로 응집체는 침강을 촉진시키는 데 이용된다[1]. 응집제의 종류에 따라서도 물의 정수 작용을 증가할 수 있지만 여기에 사

본 논문은 교육부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Kye Bock, Lee(Chungbuk National University)

Tel: +82-43-261-3232 email: kblee@chungbuk.ac.kr

Received October 13, 2016

Revised November 10, 2016

Accepted February 3, 2017

Published February 28, 2017

용된 응집제가 얼마나 물속에 고른 분포를 가지고 물속에 혼화되어 있는지에 따라서도 정수에 큰 작용을 한다. 즉, 약품의 혼화 정도에 따라서도 정수 처리에 영향을 미치게 된다[2-3].

서로 다른 유체를 혼화시키는 방법으로는 일반적으로 기계적인 혼화방법인 교반기의 날개(impeller)를 회전시켜 혼합하는 방법, 두 유체의 압력 차이를 이용하여 혼합시키는 ejector에 의한 방법, orifice, throttled valves, swirl chamber 등을 사용하여 관로 내의 유체를 혼합시키는 방법이다. 이들 방법 중에서 교반기에 의한 두 유체의 혼합방식은 가장 확실하게 상이 다른 유체를 혼합시킬 수 있다. 그러나 유체가 유동에너지를 지니고 있는 경우, 유체 스스로가 지니고 있는 유동에너지를 이용하여 무동력으로 두 유체를 외부에너지의 부가 없이 혼화시킨다면 동력비는 물론 설비의 유지보수비 등의 절감 효과가 증가하게 된다. 기존의 기계식 혼화방식의 단점을 보완하기 위해서 최근에는 응집제가 원수에 주입됨과 동시에 가능한 한 빠르게 수중에 확산시킬 수 있는 장치로서 펌프 분사식 혼화장치(pump diffusion mixer :PDM) 및 In-line orifice mixer 등 관내혼화장치(In-line mixer)의 도입이 증가추세에 있다. 특히 기계식 혼화장치의 긴 체류시간, 기계 소음, 과다한 에너지의 소비 및 높은 유지관리 비용 등의 문제를 어느 정도 저감시킬 수 있어 권장되고 있다[4-7].

펌프 분사식 혼화장치는 유입 액체의 앞에 위치한 편향판(deflector)에 의해 확산되는 방식이다[8]. 하지만 이러한 혼화 방식은 관내에서 모두 혼화되지 않고 부분적으로 혼화되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 균일한 분포를 위한 혼화를 위해 오리피스 등을 관내에 설치하여 수리구조를 변형시킴으로써 보다 균등하고 신속하게 응집제를 확산시키는 개선된 관내 혼화장치를 제안하고 유동특성을 실험과 CFD 기법을 이용하여 확인하는 연구가 수행되었다[9-10]. 그러나 혼화 향상을 위해 설치한 수리 구조물로 인해 수두손실이 증가하므로 통수불량의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 혼화는 향상시키고 수두손실은 최소화 할 수 있는 최적의 혼화장치를 설계하여야 한다.

혼화기 내부의 유동을 실험적인 방법으로 분석한다는 것은 시간과 비용이 많이 소모된다. 그러나 컴퓨터를 이용한 수치 해석적 방법을 이용하면 내부의 유동특성인 수두차이, 압력 분포, 속도 형상 등을 쉽게 예측할 수 있

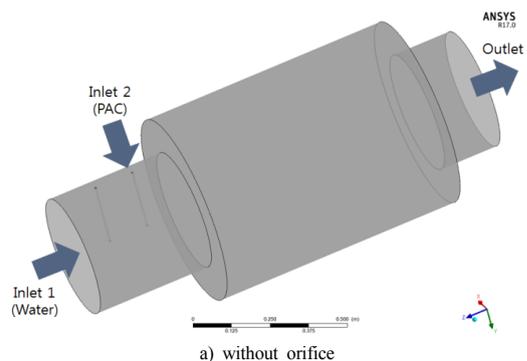
다. 본 연구에서는 전산 수치해석을 이용하여 관내에 설치하는 오리피스의 모양과 개수에 따른 혼화정도와 수두손실 등의 유동특성을 해석하였다.

2. 이론적 해석

2.1 무동력 혼화장치

펌프 분사식 혼화장치는 노즐에서 원수의 흐름 방향으로 분사하여 편향판에 의해 확산되는 방식이다. 그러나 이러한 혼화 방식은 실험을 통하여 약품의 분포를 확인한 결과 관내에서 모두 혼화되지 않고 부분적으로 혼화 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 혼화를 향상시키기 위해 관내에 급확대관이 장착되고 그 내부에 구멍의 크기와 개수가 다른 오리피스를 장착하여 혼화를 향상시키고 있다. 그러나 혼화 향상을 위해 설치한 수리 구조물로 인해 수두손실이 증가하므로 혼화정도와 압력손실을 개선하는 최적의 혼화장치를 설계하여야 한다.

Fig. 1은 입구직경 400 mm인 관내에 연결된 급확대관에 오리피스를 장착하지 않은 경우, 오리피스 3개를 장착한 경우로 첫 번째 오리피스와 세 번째 오리피스는 같은 오리피스 구조이며 가운데 오리피스는 가운데 원형 구멍이 뚫린 구조이고 나머지 오리피스는 구멍 개수에 따른 해석을 통해 혼화정도가 가장 우수한 6개의 구멍을 가장자리에 대칭으로 분포시켰다. 각 오리피스의 구멍 면적은 입구관의 유동면적과 동일하다. 세 번째 경우는 가이드 베인(guide vane)을 장착한 오리피스 1개를 사용한 경우를 나타낸다. 모든 경우 두 개의 입구와 하나의 출구를 통하여 다른 입구를 통해 들어온 두 유체가 급확대관 내부에서 혼화되어 출구로 나가는 구조로 되어 있다.



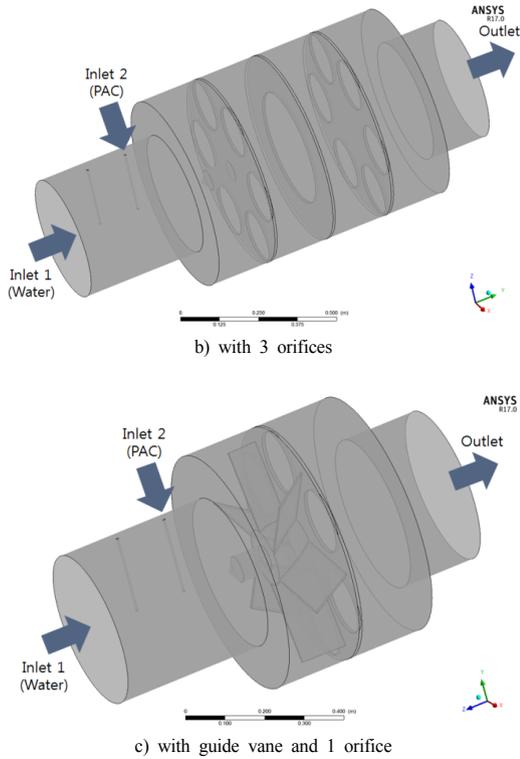


Fig. 1. Model of In-line mixer

2.2 수치해석

혼화기 내부의 유동을 실험적인 방법으로 분석한다는 것은 시간적으로도 경제적으로도 비용이 많이 든다. 하지만 컴퓨터를 이용한 전산유체역학 해석적 방법을 이용하면 내부의 유동상태, 수두차이, 모멘트, 압력분포, 속도 벡터 등을 쉽게 계산할 수 있고 최근 들어 컴퓨터의 성능의 급속한 발전으로 전산유체역학의 사용이 확대되는 추세이다. 이에 따라 본 연구에서는 수치 해석적 기법을 이용하여 CFD 상용코드인 ANSYS FLUENT 17.1과 내부 유동장의 격자구조는 ANSYS Meshing을 사용하였다[11].

2.2.1 지배방정식

3차원 모델 비정상 유동에 대한 연속방정식, 운동방정식 (Navier-Stokes equation) 들은 다음과 같다.

연속 방정식,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \quad (1)$$

운동방정식,

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j}) + g_i + F_i \quad (2)$$

ρ 는 밀도, t 는 시간, u_i 는 속도성분을 각각 나타내며, p 는 정압을 g_i 와 F_i 는 각각 중력과 외부 힘에 의한 체적력을 나타낸다.

본 연구에서는 난류 유동의 해석을 위해 현재까지 가장 범용적인 난류모델 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

*난류운동에너지(k) 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_m \rho_m k_m) + \nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \overline{U_m k_m}) = \\ & \nabla \cdot (\alpha_m \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_m} \nabla k_m) + (\alpha_m G_{k,m} - \alpha_m \rho_m \epsilon_m) \\ & + \sum_{k=1}^n K_{kq} (C_{kq} K_p - C_{kp} k_q) \\ & - \sum_{k=1}^n K_{kq} (\overline{U_k} - \overline{U_q}) \frac{\mu_{t,k}}{\alpha_k \sigma_k} \nabla \alpha_k \end{aligned} \quad (3)$$

*난류 소멸률(ϵ) 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \epsilon_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \overline{U_q \epsilon_q}) = \\ & \nabla \cdot (\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_q} \nabla \epsilon_q) + \frac{\epsilon_q}{k_q} C_{1\epsilon} \alpha_q G_{k,q} \\ & - C_{2\epsilon} \alpha_q \rho_q \epsilon_q + C_{3\epsilon} (\sum_{p=1}^n K_{pq} (C_{pq} K_p \\ & - C_{qp} k_q) - \sum_{p=1}^n K_{pq} (\overline{U_p} - \overline{U_q}) \frac{\mu_{t,p}}{\alpha_p \sigma_p} \nabla \alpha_p \\ & + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\overline{U_p} - \overline{U_q}) \frac{\mu_{t,p}}{\alpha_q \sigma_q} \nabla \alpha_q)) \end{aligned} \quad (4)$$

α_m , $\mu_{t,m}$ 는 상 m 에 대한 체적분률과 난류점성계수 (turbulent eddy viscosity)라고 한다. 이 난류점성계수는 유체의 물성치가 아니라 난류의 상태에 의해 존재하기 때문에 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_u \frac{k_m^2}{\epsilon_m} \quad (5)$$

2.2.2 경계조건

혼화기의 내부 유동을 해석하기 위해서 혼화기의 입구와 출구, 투입되는 약품이 들어가는 입구 그리고 벽에서 경계조건을 사용하였다. 혼화기 출구의 경계조건은 압력경계조건(대기압), 입구에서는 유량 경계조건(물 125.73 kg/s, 약품 7.523 kg/s)을 적용하였다. 유입되는 액체는 물이다. 그리고 투입되는 액체(응집제 약품)는 일정한 비율인 5×10^{-5} PVF(PAC volume fraction)의 고정비율로 물의 속도에 비례하여 투입된다. 또한 혼화기 내부의 벽의 경계조건은 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다.

2.3 모델링 및 격자생성

전산 수치해석에서 격자의 모양과 격자의 개수, 격자의 질 등이 유동 해석의 신뢰도에 영향을 준다. 본 연구에서는 비정렬 방식을 이용하여 격자를 처리하였고 격자의 개수를 최소 220만개에서 420만개로 4가지 경우의 cell 개수를 가지고 민감도 분석을 오리피스 없는 경우에 대해 해석을 수행하였다. Fig 2는 민감도 분석 결과로 격자 개수가 상대적으로 작은 220만개의 경우, 손실수두의 값의 차이가 약 2cm 정도 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 격자의 개수를 최소 300만개 이상으로 결정하였다.

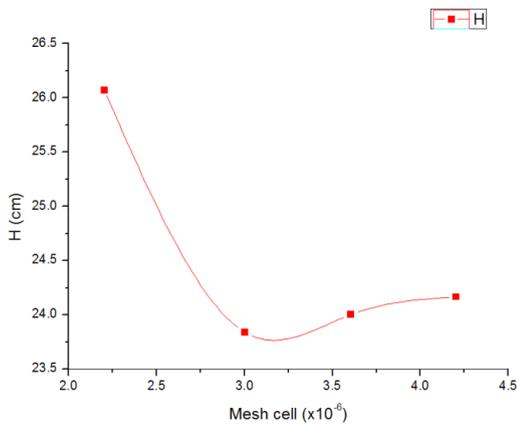


Fig. 2. Grid dependency test on different mesh number

Fig. 3는 베인을 장착한 오리피스를 사용한 혼화기에 대한 격자구조로 주로 육각격자의 구조를 가지고 있다. 벽 근처의 경계층 y+를 만족하기 위해 벽 근처의 격자에 prism 격자를 주어서 좀 더 조밀하게 구성하였다. Table

1은 실제 각 경우에 사용에 격자수를 나타낸다.

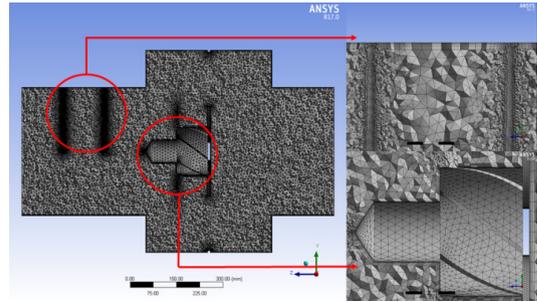


Fig. 3. Computational mesh of in-line mixer

Table 1. Number of elements and nodes

Model	Elements	Nodes
In-line mixer without orifice	3,044,477	757,512
In-line mixer with 3 orifices	3,404,054	729,163
In-line mixer with vane and 1 orifice	4,368,318	1,048,199

3. 해석결과 및 고찰

관 내에 설치된 오리피스의 유무, 형상에 따른 무동력 혼화기의 혼화정도와 유동특성(속도분포, 압력 손실)을 수치해석을 수행하여 분석하였다.

3.1 혼화

Fig. 4는 입구 직경이 400 mm인 관내 혼합기의 오리피스의 형상과 개수에 따른 각 모델별 체적분율(volume fraction)을 나타낸다. 오리피스를 사용하지 않은 경우는 혼화기 내의 단면에서 체적분율이 불균일하고 중앙부에 약품이 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 오리피스를 사용한 경우는 사용하지 않은 경우에 비해 유동이 진행될수록 내부 단면에서 물과 약품과의 섞임이 잘 되어 혼화정도를 나타내는 체적분율이 균일한 것을 알 수 있고 오리피스 3개를 사용한 경우가 혼화정도가 가장 균일한 것을 알 수 있다.

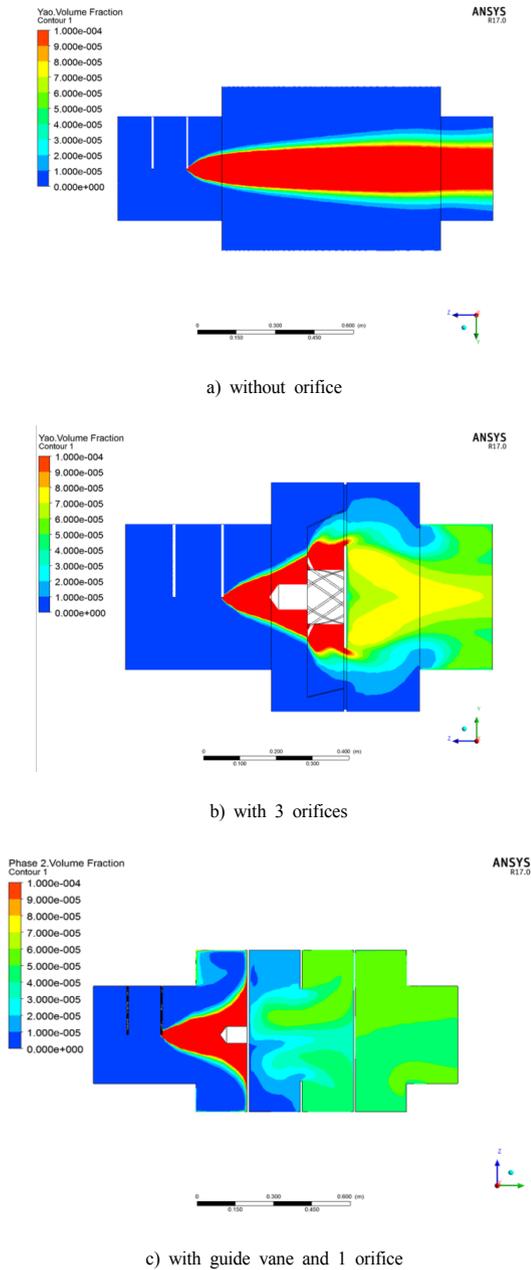


Fig. 4. Volume fraction along in-line mixer

Fig. 5는 출구 단면에서의 체적분률을 나타낸다. 오리피스 없는 경우는 혼화기의 출구에서 약품의 체적분률은 $5.9 \times 10^{-7} \sim 2.1 \times 10^{-4}$ 의 분포를 가진 것으로 나타났다. 특히 약품이 전체에 균등하게 분포되지 않고 중심부분에 집중적으로 분포되어 있는 것을 알 수 있다.

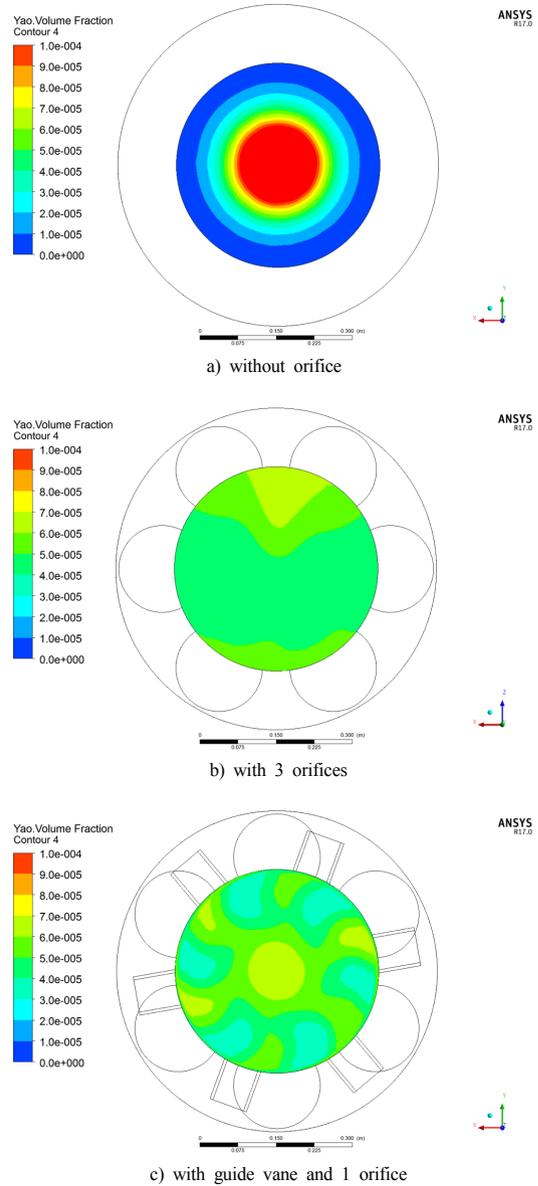


Fig. 5. Volume fraction in the exit section

3.2 유동특성

Fig. 6은 각 모델별 혼화기의 속도분포를 나타낸다. 오리피스가 설치된 경우는 오리피스를 지나면서 와류가 발생하고 이러한 이차유동이 약품을 잘 섞이게 하는 역할을 하게 되어 혼화가 향상되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 오리피스를 3개 사용한 경우의 압력분포를 나타내며 오리피스를 지나면서 압력 강하량이 커지는 것을 알 수 있다.

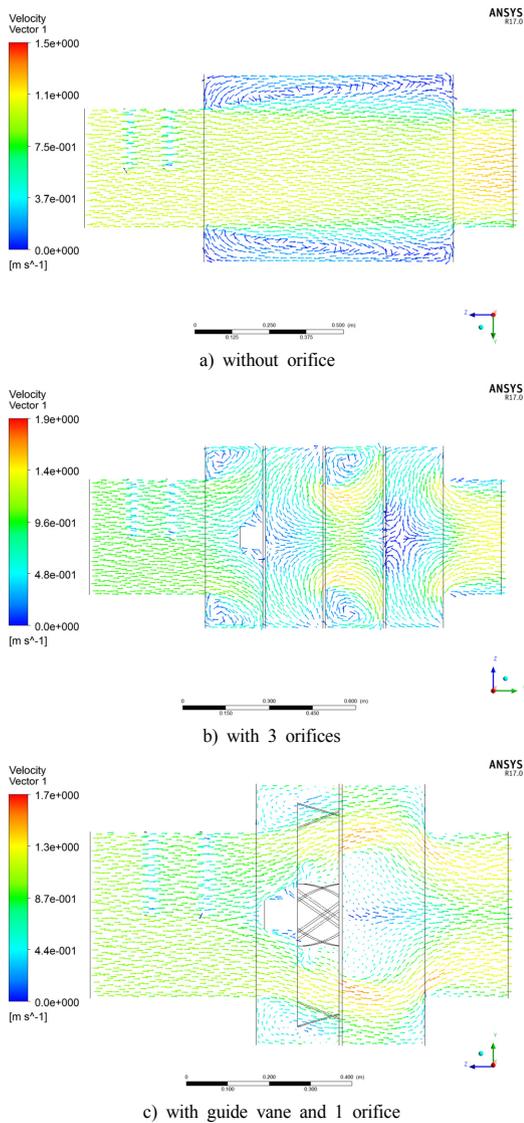


Fig. 6. Velocity vector in the in-line mixer

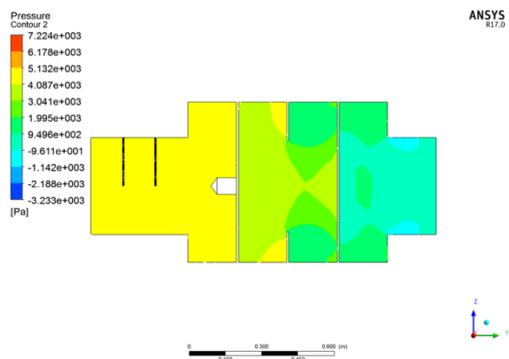


Fig. 7. Pressure distribution of in-line mixer

Table 2는 각 모델별 입 출구 구간에서의 압력 손실량을 나타낸다. 오리피스를 사용하면 혼화는 향상되지만 압력 손실량이 크게 커지는 것을 알 수 있다. 또한 3개의 오리피스를 사용한 경우가 1개의 오리피스를 사용한 경우에 비해 큰 압력손실이 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 2. Pressure loss between the entrance and exit

Model	Pressure (Pa)
In-line mixer without orifice	283.458
In-line mixer with vane & 3 orifices	4439.15
In-line mixer with 1 orifice	1493.75

4. 결론

무동력 혼화기의 혼화도와 압력손실을 개선하기 위해 오리피스의 유무, 오리피스의 형상과 개수에 따른 약품의 체적분률과 유동특성에 대해 CFD 기법을 이용하여 분석하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 혼화기의 내의 유동 특성을 구하기 위해 필요한 격자수는 격자 의존성 시험(test)을 통하여 최소 300만개 이상으로 결정하였다.
2. 오리피스의 유무에 따라서 두 가지의 혼화기를 비교한 결과 오리피스를 사용한 경우가 출구 단면에서 체적분률이 균일한 분포를 갖는 것으로 나타났다. 반면에 오리피스가 없는 경우는 출구 단면에서의 체적분률이 중심에서 큰 값을 갖고 전체적으로 균일하지 않은 것을 확인할 수 있다.
3. 오리피스를 사용한 경우 혼화정도는 크게 향상되어 출구에서 체적분률이 균일한 분포를 보이지만 압력손실이 크게 증가한다. 오리피스의 개수가 많아질수록 압력손실이 증가하므로 베인을 설치한 1개의 오리피스를 사용하여 혼화도와 압력손실이 개선된 결과를 확인하였다.

References

[1] S. Kawamura, Integrated Design of Water Treatment Facilities, JOHN WILEY & SONS, INC. New York, 1991.

- [2] M. M. Clark, J. S. Srivastava, R. R. Lang, L. J. Trussell, D. McCollum, J. D. Bailey, G. Christie, G. Stolarik, Selection and Design of Mixing Processes for Coagulation, *AWWA Research Foundation*, Denver, USA. 1994.
- [3] A. Amirtharajah and P. Mills, "Rapid-Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation", *Journal of AWWA*, vol. 74, no. 5, pp. 210-216, 1992.
- [4] Y. O. Park, N. S. Park, S. S. Kim, K. D. Kim, K. H. Lim, "Evaluation of coagulants dispersion in pump diffusion mixer for water treatment using CFD technique", *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, vol. 22, no. 1, pp. 49-63, 2008.
- [5] H. E. Hudson, and J. P. Wolfner, "Design of Mixing and Sedimentation Basins", *Journal of AWWA*, vol. 59, no. 10, pp. 1257-1268, 1967.
- [6] H. C. Kim and S. H. Lee, "Pump diffusion flash mixing for improving coagulation process in drinking water treatment", *Separation & Purification Technology*, vol. 52, pp. 117-125, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.03.022>
- [7] S. L. Dixon, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, *Butterworth Heinemann*, 1998.
- [8] Y. O. Park, K. D. Kim, N. S. Park, J. L. Lim, K. H. Lim, "Characteristics of coagulants distribution by the pumping rate in pump diffusion mixer", *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, vol. 22, no. 1, pp. 65-71, 2008.
- [9] N. S. Park and H. Park, "Analysis of local velocity gradients in rapid mixer using particle image velocimetry technique", *Water Science and Technology, Water Supply*, vol. 2, no. 5-6, pp. 47-55, 2002.
- [10] D. J. Park, Y. O. Park, N. S. Park, S. S. Kim, C. K. Wang, "Evaluation of flow characteristics within in-line mixer for water treatment using CFD technique", *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, vol. 22, no. 3, pp. 351-358, 2008.
- [11] FLUENT, Fluent 17.1 User's Guide, 2016.

정 선 용(Kye-Bock Lee)

[준회원]



- 2015년 2월 : 충북대학교 기계공학부 (공학사)
- 2015년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학과 대학원 석사과정

<관심분야>
유체기계, 전산유체

정 원 식(Won Sik Chung)

[준회원]



- 2016년 2월 : 충북대학교 공과대학 기계공학과 (기계공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학과 대학원 석사과정

<관심분야>
기계공학, 열전달, 응용열공학

이 석 호(Seok-Ho Rhi)

[정회원]



- 1996년 3월 : 캐나다 오타와대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2000년 10월 : 캐나다 오타와대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
열교환기, 히트파이프, 열전발전, 열공학

이 계 복(Kye-Bock Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
난류유동, 유체기계, 전산유체

이 대 규(Dae Gyu Lee)

[정회원]



- 1987년 2월 : 한밭대학교 기계공학과 (학사)
- 2008년 12월 ~ 현재 : ㈜위터하이테크 대표

<관심분야>

무동력 약품 혼화기술, 정량 펌프기술