

혼화 및 유동특성에 미치는 라인믹서 내 혼합요소의 영향

유대겸, 이계복*
충북대학교 기계공학부

Effect of Mixing Elements in Line Mixer on Mixing and Flow Characteristics

Dae-Gyeom Yu, Kye-Bock Lee*

School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

요 약 본 연구에서는 라인믹서 내의 압력손실과 혼화성능에 대한 혼합요소의 영향을 해석하였다. 기체와 액체가 혼합된 고농도 오존수 장치는 단체급식시설의 살균 및 소독, 양식장의 수질관리 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그러나 기존에 사용되는 장치는 가압방식을 사용하여 부피가 매우 크다. 최근에는 기후 변화로 강수량이 감소하여 지하수 및 지표수의 오염으로 음용수의 살균은 매우 중요하다. 따라서 기존의 장치와 대비하여 작은 공간을 사용하면서도 정수기능을 갖는 라인믹서형 기체-액체 혼합장치의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 라인믹서 장치 내에 삽입한 혼합요소인 static mixer의 개수, 오리피스 형태와 개수, 오리피스에 부착된 베인의 모양에 따른 유입유체의 혼화상태와 유동특성을 전산유체역학 모사를 통해 해석하고 혼화상태에 미치는 영향을 평가하였다. 곡면의 베인을 부착한 오리피스를 라인믹서에 사용한 경우 static mixer를 사용한 경우와 비교하여 비슷한 혼화정도를 나타내면서 압력손실량은 50% 이상 감소하는 것을 확인하였다.

Abstract This study investigates the effect of the mixing elements on the pressure loss and mixing performance in line mixer. The high density ozone water devices mixed with gas and liquid are used in various fields such as sterilizing of group feeding facilities and water quality management at a fish farm. Due to the decrease in rainfall due to climate change, pasteurization of drinking water from ground water and surface water is extremely important. Therefore, it is intended to develop a line-mixed gas liquid mixer with a small amount of space. In this study, the effects of the number of static mixers and the types and the number of the orifice used in line mixer on the volume fraction and the pressure loss were studied by CFD simulation. The pressure drops of line mixer with orifice which curved vanes were attached to were down to more than 50 percent of that of line mixer with static mixer whereas the mixing performance of the former was similar to that of the latter.

Keywords : Mixing Element, Orifice, Pressure Drop, Static Mixer, Volume Fraction

1. 서론

서로 다른 유체를 혼화시키기 위해서 일반적으로 기계적인 혼합방법인 교반기의 날개(impeller)를 회전시켜 혼합이 이루어지도록 하는 방법, 두 유체의 압력 차이를 이용하여 희석 혹은 혼합시키는 방법, 오리피스나 static mixer 등을 사용하여 관로 내의 속도에 의해서 형성되는

난류를 이용하여 유체를 혼합시키는 방법이 사용된다. 이들 혼화방법 중 동력을 요하지 않는 무동력 혼화기술은 혼화효과는 물론 에너지 및 유지보수비 절감 차원에서 주로 선택되는 방법이다[1-2].

기체와 액체가 혼합된 고농도 오존수 장치는 단체급식시설의 살균 및 소독, 양식장의 수질관리 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 그러나 기존의 사용되는 장치는

*Corresponding Author : Kye-Bock Lee(Chungbuk National Univ.)

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

Received August 30, 2018

Revised September 19, 2018

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

가압방식을 사용하여 부피가 매우 크다[3]. 가압용해 방식은 용해조를 통해 기체-액체 접촉을 늘리는 방식으로 고농도, 고용량의 미세기포 발생에 적합하여 산업현장에 많이 적용되고 있으나 고용량의 고농도 미세기포를 발생하기 위해서는 용해조가 반드시 필요하다. 미세기포 발생 용량이 늘어날수록 용해조의 크기도 커지게 되며, 설비 또한 복잡하다. 이러한 문제로 용해조를 사용한 가압용해 방식을 산업현장에 적용할 경우 공간협소 등의 문제가 발생할 우려가 있다. 최근에는 기후변화로 강수량이 감소하여 지하수 및 지표수의 오염으로 음용수의 살균은 매우 중요하다. 따라서 기존의 장치와 대비하여 작은 공간을 사용하면서도 정수기능을 갖는 라인믹서형 기체액체 혼합장치의 개발이 필요하다. 가압용해 방식에서는 물에 압력을 가해 공기를 용해시킨 후 감압하는 방식을 이용한다. 이때 미세기포는 압력차에 따라서 과포화된 용존 공기가 가스 상으로 변환하면서 발생한다. 기포 직경이 10 μm ~수십 μm 인 미세기포는 일반 통상의 기포와는 달리 미세한 기포가 연속으로 수중에서 터지면서 축소해 소멸(완전 용해)한다.

라인믹서는 관로 내에 고정된 혼합 요소(mixing element)를 사용하여 혼합될 두 유체가 관로를 통과할 때 연속적으로 유동방향 전환의 과정을 반복하여 혼합시키는 장치이다. 라인 믹서는 1950년대부터 개발되기 시작하여 초기에는 수처리 공정에서 응집, 살균 등과 관련된 압력손실, 혼합율, 물질전달 등의 설계 변수의 측정과 상관관계식을 유도하는 연구가 수행되었다[4-8]. 특히 라인믹서 출구에서의 압력손실에 대한 예측은 라인믹서 입구에 동력을 공급할 펌프나, 압출기 등의 용량을 결정하기 위해 반드시 필요하다. 혼화기 내부의 유동을 실험적인 방법으로 분석한다는 것은 시간적으로도 물질적으로도 소모가 많이 된다. 하지만 컴퓨터를 이용한 수치 해석적 방법을 이용하면 내부의 유동상태, 속도차이, 압력 분포, 속도 벡터 등을 쉽게 계산이 가능하고 최근 많이 사용되고 있다.

본 연구에서는 현재 현장에서 사용하고 있는 static mixer는 압력손실이 크기 때문에 같은 혼화정도를 나타내면서 압력손실을 감소시킬 수 있는 혼합요소(mixing element)를 제안하기 위해 전산유체해석을 통해 라인믹서에 사용된 혼합요소인 오리피스스의 형태와 개수, 오리피스에 부착된 베인의 모양에 따른 유입유체의 혼화상태와 압력손실을 포함한 유동특성을 해석하고 혼화상태에

미치는 혼합요소의 영향을 평가하였다.

2. 이론해석

Fig. 1은 본 연구에서 개발하려는 혼화장치의 구조를 나타낸다. 오존과 원수가 혼합된 관에 static mixer나 오리피스스를 부착한 라인믹서의 구조를 보여준다. 두 개의 입구와 하나의 출구로 구성되며 다른 입구를 통해 들어온 두 유체가 관 내부와 확대관에 설치한 라인믹서에서 혼합되어 출구로 나가는 구조로 되어 있다. 라인믹서 내에 static mixer나 오리피스스를 설치하여 별도의 동력 없이 서로 다른 유체를 혼합시키게 된다.

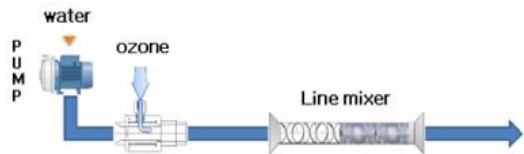


Fig. 1. Schematic of gas-liquid mixer

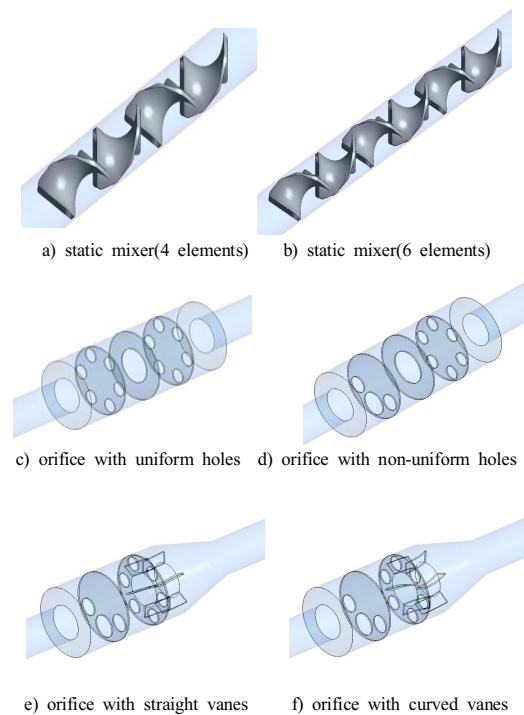


Fig. 2. Shape of static mixer and orifice

Fig. 2는 혼화를 위해 사용된 혼합요소인 static mixer와 오리피스들의 형상을 나타낸다. 현장에서 많이 사용되는 element수가 4개인 static mixer를 대조군(기본 경우)으로 선정하고 element의 개수를 늘린 경우(6개)와 압력손실을 줄이기 위해 오리피스들의 형태와 오리피스들의 개수를 변경시키고 오리피스에 베인을 부착한 경우와 혼화정도와 압력손실을 수치해석을 통해 비교하였다. 오리피스들을 사용한 경우는 관에 연결된 급 확대관 안에 오리피스 3개가 들어 있는 구조로 첫 번째 오리피스와 세 번째 오리피스는 같은 구조이며 가운데 오리피스만 가운데 구멍이 뚫린 구조로 되어 있다. 모든 오리피스에서 유동면적은 확대관 이전 관의 유동면적과 동일하다. 부력의 영향으로 오존이 부상하는 것을 고려하여 오리피스들의 구멍을 아래 부분에 집중시킨 구조와 압력손실을 줄이기 위해 오리피스들의 개수를 줄이고 오리피스에 베인을 부착한 모델을 제안하여 혼화와 유동특성을 해석하였다.

2.1 지배방정식

서로 다른 두 유체의 유동을 해석하기 위해 이상 유동을 묘사하는 방법으로 두 상은 서로 다른 속도를 가지며 두 상의 미소길이의 공간상에는 서로 평형을 이룬다고 가정한다. 본 연구에서는 CFD 상용코드인 CFX 17.2를, 유동장의 격자 생성은 ANSYS Meshing을 사용하였다 [9]. 3차원 비정상 유동에 대한 연속방정식, 운동방정식(Navier-Stokes equation) 들은 직교 좌표계(Cartesian coordinates, x, y, z)에서 다음과 같은 형태를 갖는다. 체적 수송 방정식

$$\frac{\partial \gamma_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \vec{v}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_\alpha \gamma_\alpha) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \gamma_\alpha \vec{v}_\alpha) = 0 \quad (2)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_\alpha \gamma_\alpha \vec{v}_\alpha) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \gamma_\alpha \vec{v}_\alpha \vec{v}_\alpha) = -\gamma_\alpha \nabla p + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \mu_\alpha (\nabla \vec{v}_\alpha + [\vec{v}_\alpha]^T)) + \sum_{\beta=1}^{N_p} F_{\alpha\beta} \quad (3)$$

본 수치해석에서 사용한 다상유동 모델은 Eulerian-Eulerian, inhomogeneous 모델이고 [10-12], 분산상(dispersed phase)의 평균 직경은 0.1mm로 가정하였다. 온도는 등온조건이므로 에너지 방정식은 고려하지

않았고, 상변화 역시 없다고 가정하였다.

$$\gamma_\alpha = \frac{V_\alpha}{V} \text{인 체적분율(volume fraction)은 격자 하나}$$

의 부피 안에 포함된 α 상의 부피이다. $\sum_{i=1}^{N_p} \gamma_i = 1$ 모든 체적분의 합은 1이다. N_p 은 상의 개수를 의미한다. p 는 상간에 공유되는 평균압력을 말한다. $\rho_\alpha, \gamma_\alpha, \vec{v}_\alpha, \mu_\alpha$ 는 각각 α 상의 밀도, 체적분율, 속도, 점성계수를 의미한다.

$F_{\alpha\beta}$ 는 β 상에 의해 계면을 통해 α 상에 작용하는 총 힘의 합을 의미한다.

$$F_{\alpha\beta} = F_{\alpha\beta}^D + F_{\alpha\beta}^L \quad (4)$$

D는 상간의 항력, L은 양력을 나타낸다.

라인믹서 내 연속상(물)의 Reynolds 수는 16,000 정도로 난류모델은 연속상(continuous phase)의 경우 SST Model을 사용하였다.

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \nabla \omega \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \nabla k \nabla \omega + \alpha_1 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (6)$$

k 는 난류 운동에너지(turbulence kinetic energy)를 말하며, ω 는 시간의 역수 차원을 갖는 비소산률(specific dissipation rate)을 나타낸다. P_k 는 난류운동에너지 생성항을 F_1, F_2 는 벽 영향을 고려한 보정함수이다.

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (7)$$

$\beta', \alpha_1, \beta_1, \sigma_k, \sigma_{\omega 1}, \sigma_{\omega 2}$ 는 난류모델 상수, S 는 변형률(strain rate)이다.

분산상(Dispersed phase)의 난류 와점성계수는 다음 식을 사용하였다.

$$\nu_{td} = \frac{\nu_{tc}}{\sigma} \quad (8)$$

σ 는 난류 프란틀수이다.

2.2 격자생성 및 경계조건

Fig. 3 (a)는 혼화장치 내 관과 오리피스나 static mixer의 혼합요소가 들어 있는 확대관(라인믹서)의 구조를 나타내며 물과 오존이 흡입되고 라인믹서 내에서 혼합되어 나가는 출구까지의 전체거리와 라인믹서의 길이는 200, 13.2cm 이다. Fig. 3 (b), (c)는 라인믹서 내에 static mixer와 오리피스가 포함된 경우의 입구부분과 라인믹서 내의 격자구조를 나타내며 오존 입구부분과 구조물과 벽이 존재하는 부분은 조밀한 격자를 구성하고 나머지 부분은 상대적으로 덜 조밀한 격자를 구성하였다. 격자의 모양은 주로 육각격자(polygonal cell)의 격자구조를 가지고 있다. 격자는 곡관이 들어가 있는 곳의 격자를 우수하게 만드는 curvature 방법과 좁은 공간에서는 조밀하게 넣는 proximity 방법을 적용하여 구성하였다. 그리고 전체 모델의 Cell 크기를 조절하여 혼화실 내부의 한부분에서 격자크기가 커지는 것을 방지 하였다. 그리고 오존 입구에서의 격자를 조밀하게 구성하여 격자의 질이 안 좋아지는 것을 방지하였다. 벽 경계면에서의 y+는 20에서 30 사이가 되도록 prism 격자를 도입하였다. 격자 종류는 tetra와 prism 격자만 선택하였다. 격자의 개수를 최소 50만개에서 400만개로 바꿔가며 민감도 분석을 수행하였다.

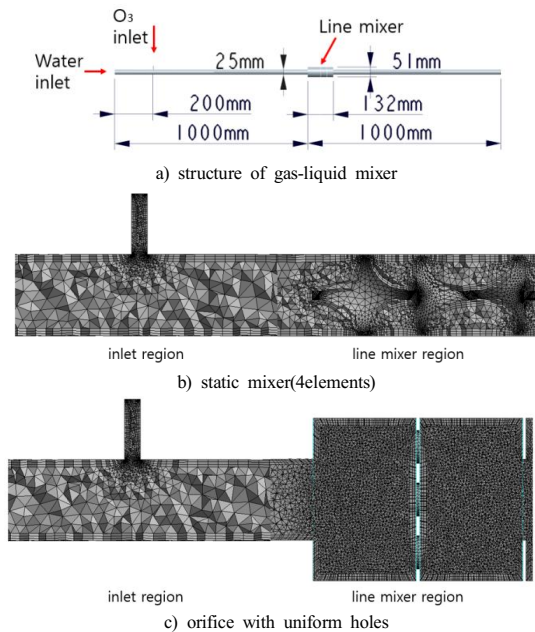


Fig. 3. Mesh structure of mixer with static mixer and orifice

Fig. 4는 오리피스를 사용한 경우에 대한 격자 민감도 분석 결과값으로 세로축은 압력손실, 가로축은 격자 개수를 나타낸다. 격자 개수가 상대적으로 작은 50만개의 경우, 압력손실의 값 차이가 약 7% (120 Pa) 정도 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 격자의 개수를 최소 300만개 이상으로 결정하였다.

혼화기의 내부 유동해석을 수행하기 위해서는 검사체적의 경계면에서의 조건을 입력해야 한다. 출구 경계조건은 압력경계조건(대기압)을 적용하였으며 2가지의 입구에서는 질량유량을 입력하였다. 물 입구의 질량유량은 1ton/h이며, 오존 입구의 질량유량은 물의 질량유량의 1ppm을 적용하여 물과 오존의 질량유입량의 비를 1ppm의 비율로 맞추었다. 혼화기 내부의 벽의 경계조건은 비활조건(no-slip condition)을 적용하였다.

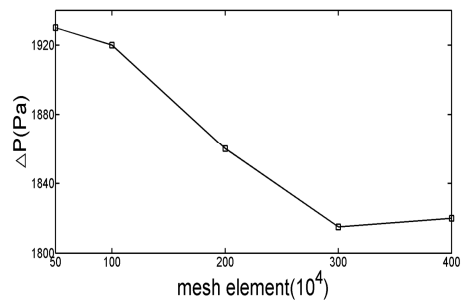


Fig. 4. Grid dependency test on different mesh number

3. 해석결과 및 고찰

현재 현장에서 사용되고 있는 라인믹서 내에 설치한 static mixer와 같은 혼화정도를 나타내면서 압력손실을 감소시킬 수 있는 혼합요소(mixing element)를 제안하기 위해 현장에서 많이 사용되는 element수가 4개인 static mixer를 대조군(기본 경우)으로 선정하고 element의 개수를 늘린 경우(6개)와 압력손실을 줄이기 위해 오리피스의 형태와 개수를 변경시키고 오리피스에 베인을 부착한 경우의 혼화상태와 유동특성을 해석하고 혼화상태에 미치는 영향을 평가하였다.

Fig. 5는 각 경우에 대한 출구에서의 체적분률(volume fraction)을 나타낸다. 라인믹서 내에 static mixer나 오리피스가 없는 경우(case a) 혼화기의 출구에서 물과 오존이 잘 혼화되지 않고 상부에 오존이 집중되어 있는 것을

알 수 있다. Static mixer를 삽입한 경우(case b, c) 출구에서 오존의 체적분률이 균일하게 분포하는 것을 알 수 있고 static mixer의 개수가 4개와 6개인 경우 거의 비슷한 혼화정도를 보여준다. 오리피스를 사용한 경우는 구멍이 균일하게 분포되면(case d) 오존이 상부에 집중되어 불균일한 분포를 나타내고 하단에 구멍을 집중시키면(case e) 혼화정도가 개선되는 것을 알 수 있다. 곡면의 배인을 부착한 오리피스를 사용한 경우(case g) static mixer를 사용한 경우와 비교해 적은 공간을 차지하면서 혼화정도는 비슷한 것을 알 수 있다.

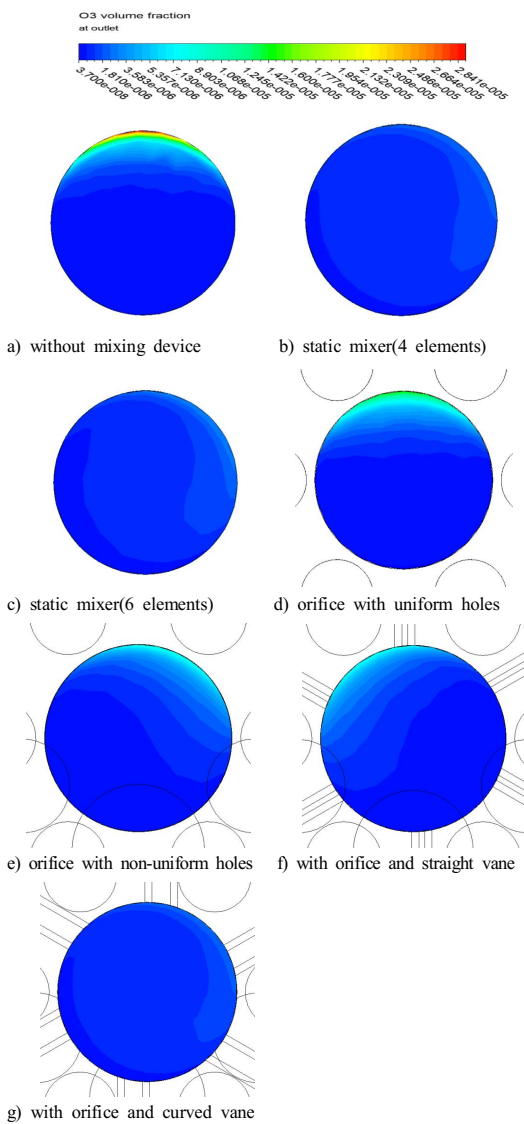


Fig. 5. Volume fraction at the exit of gas-liquid mixer

Fig. 6은 각 경우에 대해 혼화장치 내의 유선을 나타낸다. Static mixer를 사용한 경우의 유선을 보면 static mixer를 지나면서 소용돌이(swirl)가 지속적으로 유지되면서 물과 오존이 출구까지 잘 혼화되는 것을 알 수 있다. 그러나 오리피스를 사용한 경우 소용돌이가 지속되지 못하고 오리피스를 지나면 소멸하면서 Fig. 5(d,e)와 같이 오존이 상부에 많이 분포하는 것을 알 수 있다. 오리피스에 곡면의 배인을 부착한 경우는 부착되지 않은 경우에 비해 소용돌이가 출구까지 지속적으로 유지되기 때문에 Fig. 5(g)에 나타난 것처럼 잘 혼화되는 것을 알 수 있다.

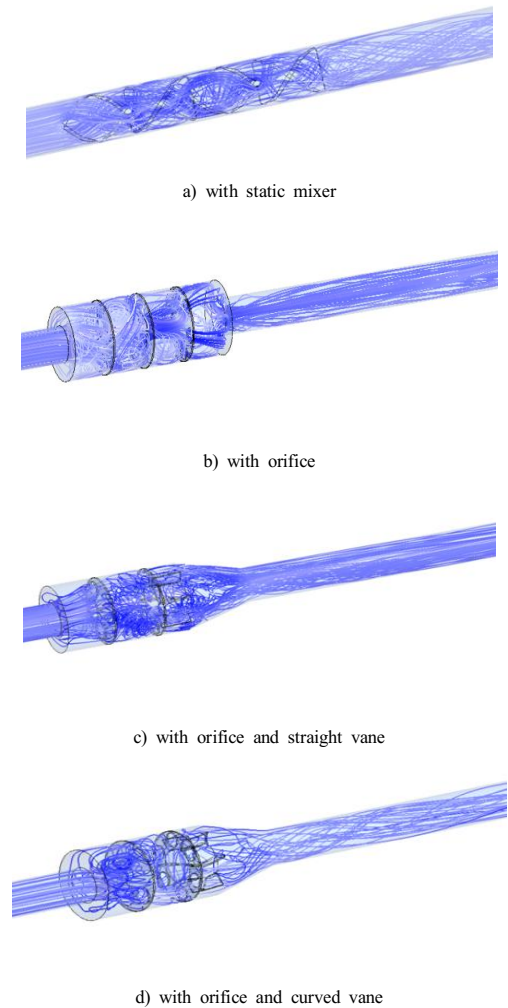


Fig. 6. Streamline in the gas-liquid mixer

Table 1. Standard deviation of volume fraction and pressure loss from inlet to exit

Mixer type	Standard deviation of volume fraction at exit	Pressure loss between entrance and exit (Pa)
1.No mixing device	6.14	300
2.Static mixer (4 elements)	0.52	2010
3.Static mixer (6 elements)	0.72	2940
4.Orifice with uniform holes	3.56	1820
5.Orifice with non-uniform holes	2.38	1470
6.Orifice with straight vane	1.88	880
7.Orifice with curved vane	0.53	910

Table 1과 Fig. 7은 라인믹서 내에 사용된 혼합요소에 따른 출구에서 체적분률의 표준편차와 입구와 출구사이의 압력손실을 나타낸다. Static mixer를 사용한 경우는 출구에서 체적분률의 표준편차가 작으므로 오존분포가 균일하다고 예측할 수 있으나 입구와 출구사이의 압력손실이 사용하지 않은 경우에 비교해 6배 이상으로 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 곡면의 베인을 부착한 오리피스를 사용한 경우는 표준편차 크기로부터 현재 많이 사용되는 static mixer를 사용한 경우와 거의 비슷하게 오존이 균일한 분포를 보여주는 것을 알 수 있고 압력 손실량은 static mixer를 사용한 경우에 비해 50% 넘게 감소하는 것을 알 수 있다.

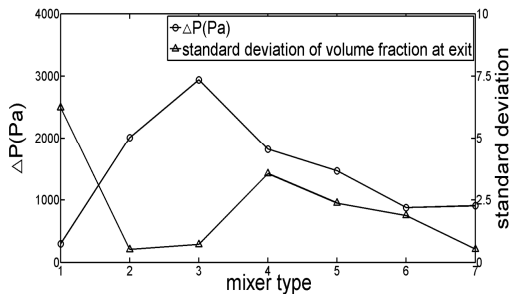


Fig. 7. Volume fraction standard deviation at the exit and pressure loss in the gas-liquid mixer

4. 결론

전산유체해석을 통해 라인믹서 내 혼합요소(static mixer, 오리피스와 베인)에 따른 유입된 기체와 액체의 혼화상태와 유동특성을 해석하고 혼화상태에 미치는 영향을 평가하여 다음의 결론을 얻었다.

1. Static mixer를 사용한 경우 4개의 element를 사용한 경우 균일한 분포(표준편차 0.52)를 갖는 혼화상태를 얻을 수 있었지만 6개를 사용한 경우에 혼화상태는 향상되지는 않았고 압력손실은 46% 증가하였다.
2. 오리피스를 사용한 경우 오리피스에서 멀어짐에 따라 밀도 차에 의한 부력으로 기체가 부상하므로 오리피스의 구멍을 하단부에 설치하는 것이 혼화에 유리하게 작용하는 것을 확인하였다.
3. 곡면의 베인을 부착한 오리피스를 사용한 경우가 static mixer를 사용한 경우와 비교해서 비슷한 혼화상태를 나타내면서 압력손실은 50% 넘게 감소하였다.

References

- [1] L. Vrale, R. M. Jorden, "Rapid Mixing in Water Treatment", *Journal of American Water Works Association*, Vol. 63, No.1, pp.52-58, 1971. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/j.1551-8833.1971.tb04027.x>
- [2] S. L. Dixon, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, Butterworth Heinemann, 1998.
- [3] H. C. Kim, S. Lee, "Pump diffusion flash mixing (PDFM) for improving coagulation process in drinking water treatment", *Separation and Purification Technology*, Vol.52, No.1, pp.117-125, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2006.03.022>
- [4] M. Stec, P. M. Synowiec, "Numerical method effect on pressure drop estimation in the Koflo® static mixer", *INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA*, Vol.54, No.2, pp.48-50, 2015.
- [5] O. S. Galaktionov, P. D. Anderson, G. W. M. Peters, H. E. H. Meijer, "Analysis and optimization of Kenics Static Mixers", *International Polymer Processing*, Vol.18, No.2, pp.138-150, 2003. DOI: <https://dx.doi.org/10.3139/217.1732>
- [6] D. M. Hobbs, "Characterization of a Kenics Static Mixer Under Laminar Flow Condition", Ph.D Thesis, The State University of Newjersy, 1997.
- [7] C. Kim, N. Park, M. Y. Kim, "Numerical Investigation of the Flow and Mixing Characteristics with the Static Mixer in a Catalytic Combustor for the MCFC Power Plant System", *Transactions of the KSME, B*, Vol.33,

No.3, pp.149-155, 2009.

DOI: <https://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2009.33.3.149>

- [8] D. S. Lee, H. G. Kim, M. Y. Ha, Y. H. Park, I. M. Pak, "Mixing Effect by the Geometry of Static Mixer with Turbulent In-Situ Mixing Process", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, Vol.29, No.12, pp.1307-1312, 2005.
DOI: <https://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2005.29.12.1307>
- [9] ANSYS CFX-17.2, ANSYS Inc., 2016.
- [10] E. Lang, P. Drtina, F. Strieiff, M. Fleischli, "Numerical simulation of the fluid flow and the mixing process in a static mixer", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.38, No.12, pp.2239-2250, 1995.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)00351-U](https://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(94)00351-U)
- [11] Z. Shang, J. Lou, H. Li, "A novel Lagrangian algebraic slip mixture model for two-phase flow", *Chemical Engineering Science*, Vol.102, pp.315-323, 2013.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2013.08.017>
- [12] K. Gonda, K. Kadota, Y. Deki, Y. Tozuka, A. Shimosaka, Y. Shirakawa, J. Hidaka, "Fabrication of composite particles by liquid-liquid interfacial crystallization using an ultrasonic spray nozzle", *Powder Technology*, Vol.269, pp.401-408, 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.042>

유 대 검(Dae-Gyeom Yu)

[준회원]



- 2018년 2월 : 충북대학교 기계공학부 (공학사)
- 2018년 3월 : 충북대학교 기계공학과 대학원 석사과정

<관심분야>

난류유동, 전산유체

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