

수리해석을 이용한 정수장내 혼화장치 설계 개선에 관한 연구

오석영*·현동수**·오정진***·이상훈*·이남영*

Numerical Study on Improvement of Mixing Equipment' Plan in a Water Treatment Plant

S. Y. Oh, D. S. Hyun, J. J. Oh, S. H. Lee, N. Y. Lee

Key Words: Chemical Mixing(약품혼화), In-line Orifice Mixer(관내오리피스믹서), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), $k-\epsilon$ model

Abstract

In this study, we used In-line orifice mixer for efficient chemicals mixing in water treatment. The method of using In-line orifice mixer has been already proved the improvement of water treatment efficiency. Numerical study was performed using FLUENT, a commercial code, to standard design and production of effective In-line orifice mixer. As variable for exactly standardizing, a proper ratio between an outer diameter of cone and a diameter of pipe, a distance between cone and orifice, a determination of orifice diameter for an optimal mixing, a distance between injection nozzle's position and cone, Numerical study has been performed for optimal standard and analyzed flow field on a basis of turbulent intensity in an orifice downstream.

기호설명

ν : kinematic viscosity
 ρ : density
 μ : dynamic viscosity
 ϕ : property of material
 u : x-axis velocity
 v : y-axis velocity
 U : velocity vector
 P : pressure
 S_s : source of material
 k : turbulent kinetic energy
 ϵ : dissipation rate of turbulent kinetic energy

G_k : 평균 속도 기울기(gradient)에 의한 난류 운동에너지의 생성
 G_b : 부력에 의한 난류 운동 에너지의 생성
 Y_M : 압축성 난류의 fluctuating dilatation 분포
 C_0 : orifice discharge coefficient
 A_0 : Area ($\pi D^2/4$)
 β : the Diameter ratio (d/D)

1. 서론

M댐 계통 및 P광역상수도 정수장의 약품혼화공정에 적용한 2단 혼화방식중 관내오리피스믹서(In Line Orifice Mixer)에 대한 정확한 설계자료가 미흡하여 제작사에서 제시한 설계계산 및 제작도면에 대한 약품혼화에 대한 효율의 검증이 안되므로 제작사가 제시한 대로 제작하였을 시

* 한국수자원공사 수자원연구소
 ** 한밭대학교 기계공학부
 *** 우송공업대학 기계공학부

최적의 약품 혼합 가능 여부를 판단기에 어려움이 있어 왔다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 유체 수류해석을 실시하여 응집제와 원수가 혼합되는 상태를 기준으로 설계치를 제시함으로써 관내오리피스믹서의 제작에 활용하고자 한다. 구체적으로는 방해판의 외경치수와 관경의 적정 비율, 방해판과 오리피스간의 간격, 최적의 혼화를 위한 오리피스 구경, 투입노즐의 위치와 방해판과의 적정거리를 변수로 하여 수치해석을 하였으며, 오리피스 하류에서의 난류강도(turbulence intensity)의 크기를 해석 기준으로 하여 유동장을 해석하였다. Fig. 1은 관내오리피스믹서의 내부구조로, 원수가 지나는 파이프의 중심축에 노즐의 끝단과 방해판이 위치함을 알 수 있다.

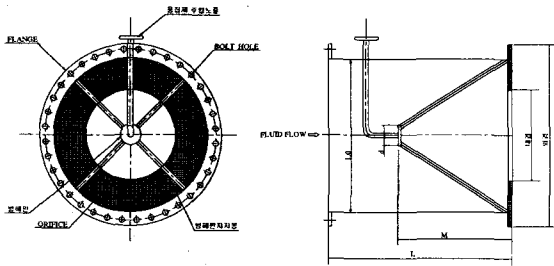


Fig. 1 Schematic diagram of In-Line Orifice Mixer

2. 수치해석방법 및 이론적 배경

2.1 수치해석 방법(Numerical method)

본 연구에서 유동장의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식이다. Navier-Stokes 방정식을 유한 체적법을 기본으로 공간 이산화는 Quick Scheme을 사용하였으며, 난류 모델은 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)을 기본으로, 와점성이론(Eddy-Viscosity concept)을 이용하여 레이놀즈 응력(Reynolds stress)항을 전산모사한 2 방정식 모델인 표준 k-ε model을 이용하여 해석하였다.

2.1.1 지배방정식(Governing equation)

본 연구에서 유동장의 지배 방정식은 식(1)로 Navier-Stokes 방정식이다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi U) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

3차원 유동장에 대한 연속방정식은 식(2), 모멘텀 방정식은 식(3)과 같다. $\phi = 1$ 이면 연속 방정식이요, $\phi = u, v, w$ 이면 모멘텀 방정식이 된다.

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (2)$$

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

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

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}w) + S_{Mz} \quad (3)$$

2.1.2 난류모델(Turbulence model)

본 연구에서는 난류를 풀기 위해서 Navier-Stokes 방정식을 속도와 압력을 시간 평균값을 취하여 식(4)와 같이 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 적용하였다.

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u_i u_j}) \quad (4)$$

식(4)에서 $\overline{u_i u_j}$ 는 Reynolds 응력항 또는 난류 응력항 이라고 한다. 난류 응력항은 3차원인 경우 총 9개의 응력항이 생기는데 대칭인 성질을 고려하면 모두 6 개의 독립적인 항이 생긴다. 이러한 난류 응력항은 미지수의 개수와 방정식의 수를 맞추기 위해 전산모사를 시행한다.

Boussinesq가 제안한 난류와점성계수(Turbulent eddy viscosity)를 도입하면 난류응력은 식(5)와 같다.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (5)$$

식(5)에서 난류동점성(ν_t)을 난류의 특성거리와 특성속도를 고려하여 구하게 되는데, 난류운동에너지(Turbulent kinetic energy)는 식(6)과 같이 특성 속도로 결정한다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (6)$$

특성길이 l 은 난류 운동에너지와 소산률과의 관계로부터 식(7)에 의하여 구한다.

$$l \approx \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

이와 같은 방법으로 특성거리와 특성속도를 이용하여 수송방정식을 구한다. 난류 운동에너지와 소산율(Dissipated rate)은 식(8), 식(9)의 수송방정식으로 표현할 수 있다.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i k - \frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = \rho (P_k + \Gamma_b - \epsilon) \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu_i \epsilon - \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] = \rho \frac{k}{\epsilon} (C_{\epsilon 1} P_k + C_{\epsilon 3} \Gamma_b - C_{\epsilon 2} \epsilon) \quad (9)$$

식(8), (9)에서

$$\nu_t = C_\mu C_d \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_\mu = 0.5478, \quad C_d = 0.1643, \quad \sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\epsilon = 1.314, \quad C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_{\epsilon 3} = 1.0$$

2.1.3 해석 유동장

원수가 지나가는 파이프의 중심축에 노즐의 끝단과 방해판을 위치시키고, 노즐의 끝단에서는 1.132 m/s의 약품이 분사되며, 오리피스 상류에서는 원수가 0.65 m/s로 유입된다. 방해판의 외경치수와 관경의 적정 비율, 방해판과 오리피스간의 간격, 최적혼화를 위한 오리피스 구경결정, 투입노즐의 위치와 방해판과의 적정거리를 바꾸어 가며 유동 해석을 하였으며, 주 유동장에 대한 방해판용 지지봉은 주 유동의 적은 영향을 미칠 것을 예상하여 유동장 전산모사에는 고려하지 않았으며, 계산 영역을 그림 2에 나타내었다.

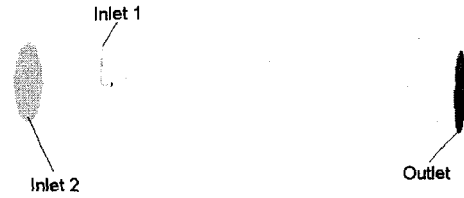


Fig. 2 Computational domain

2.2 이론적 배경

혼화공정은 화학적 반응단계와 물리적 반응 단계로 구분되며 그 중에서, 관내오리피스믹서를 사용한 혼화공정은 화학적 반응단계인 1단계 혼화공정에 해당된다. 이와 같이 수처리에서 관내믹서(In line mixer)와 관내오리피스(In line orifice)를 통하여 얻는 효과는 다음과 같다.

- 1) 응집제 사용량의 절감
- 2) 동력비의 절감
- 3) 건설비 절감
- 4) 잔류알루미늄의 감소로 인한 슬러지 발생량 저감

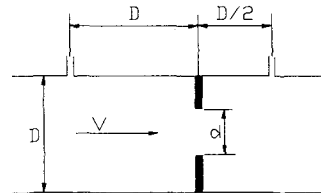


Fig. 3 Typical orifice meter construction

관내오리피스믹서의 기본설계에 사용되는 오리피스 통과유량은 식(10)을 이용하여 구할 수 있다.

$$Q = C_0 Q_{ideal} = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \beta^2)}} \quad (10)$$

단, 오리피스의 유출계수(Orifice discharge coefficient, C_0)가 너무 작으면 정수장의 전체 설계에 미치는 영향이 크므로 효율적인 혼화효과

를 얻을 수 있는 범위 내에서 직경크기를 조절할 수 있다.

3. 수치해석 결과

각부의 설계규격을 결정하기 위해서 Case별로 유체 수치해석을 실시하였으며, 수치해석 조건을 Table 1에 나타내었다. 난류 강도와 속도의 크기는 관 중심과 오리피스 하류의 0.5D 위치에서의 수직 방향을 비교로 하였다.

Table 1 Condition of Analysis

| Index Case | Dimension of Cone (mm) | Distance between nozzle and cone(mm) | Orifice- inner diameter (mm) | Distance between orifice and cone(mm) |
|---------------|------------------------------|---|---------------------------------------|--|
| Case 1 | 100 | 29 | 1000 | 400 |
| Case 2 | 100 | 29 | 800 | 400 |
| Case 3 | 100 | 29 | 600 | 400 |
| Case 4 | 160 | 40 | 900 | 200 |
| Case 5 | 160 | 40 | 850 | 200 |
| Case 6 | 160 | 40 | 800 | 200 |
| Case 7 | 240 | 29 | 800 | 400 |
| Case 8 | 200 | 29 | 800 | 400 |
| Case 9 | 160 | 29 | 800 | 400 |
| Case 10 | 100 | 87 | 800 | 400 |
| Case 11 | 100 | 58 | 800 | 400 |
| Case 12 | 100 | 40 | 750 | 400 |
| Case 13 | 100 | 40 | 750 | 200 |

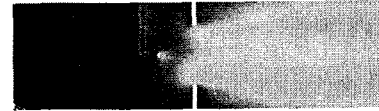
본 연구에서는 M댐의 관내오리피스믹서의 관경을 기준으로 하여 다양한 조건에 따른 관 내부의 유동형상을 분석하였다. 유입은 2 군데를 통해 들어오며 유속은 각각 Inlet 1에서는 1.132 m/s, Inlet 2에서는 0.65 m/s 이었다.

3.1 오리피스의 내경에 의한 영향

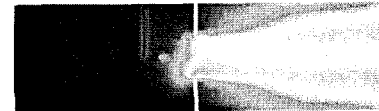
Fig. 4는 오리피스 내경변화에 따른 유체흐름을 해석하였다. 오리피스 내경이 작을수록 오리피스를 지나는 난류강도가 현저히 증가함을 알 수 있다. 그러나 오리피스의 내경을 감소시킴으로써 난류 강도와 유속은 증가하나, 관 유속이 증가하게 됨으로 상수도 설계 기준을 만족하지 못한다⁽⁶⁾. 상수도 설계 기준은 최대 관 유속이 6 m/s 이하이다.



a. case 1



b. case 2



c. case 3

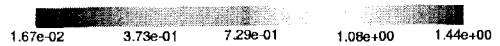


Fig. 4 Contour of case 1 ~ case 3

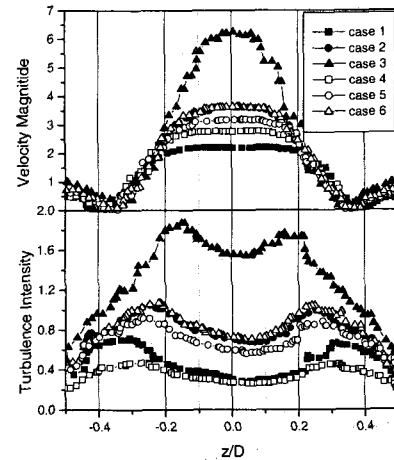


Fig. 5 Plotting of case 1 ~ case 6

Fig. 5는 오리피스에서 하류 방향으로 0.5D 위치에서 관 수직부의 난류강도와 속도의 크기를 도시한 그림이다. 오리피스 내경이 600 mm 이면 관 유속이 상수도 설계 기준을 만족하지 못함을 알 수 있다. 난류 강도는 오리피스의 내경과 접하는 부분에서 최대 난류강도가 나타나고, 속도

의 크기와 다른 형태로 나타난다. Fig. 6은 오리피스에서 하류방향으로 2D까지의 관 중심의 난류강도와 속도의 크기를 도시한 그림이다. 오리피스 내경이 600 mm 이상인 경우에 관 유속이 상수도 설계 기준을 만족하고, 오리피스 내경이 작을수록 유속이 증가하여 난류강도가 증가함을 알 수 있다.

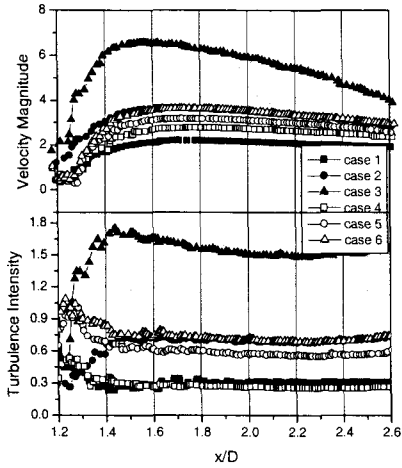


Fig. 6 Plotting of case 1 ~ case 6

3.2 방해판의 외경에 의한 영향

Fig. 7은 방해판의 외경에 의한 경우를 도시한 그림이다. Case 2와 Case 6에서 속도 크기나 난류 강도가 차이가 없으므로 방해판의 외경을 변화 주어 해석을 하였다.

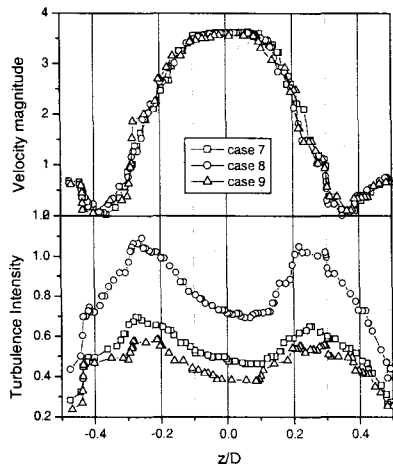


Fig. 7 Plotting of case 7 ~ case 9

방해판과 오리피스와의 거리가 400 mm일 경우, 방해판의 크기가 200 mm일 때, 난류강도가 가장 큰을 알 수 있다. Fig. 6, 8에서 난류 강도는 오리피스를 통과하는 지점에서 가장 크게 나타나고, 속도는 오리피스 하류의 0.5D에서 가장 크게 나타난다.

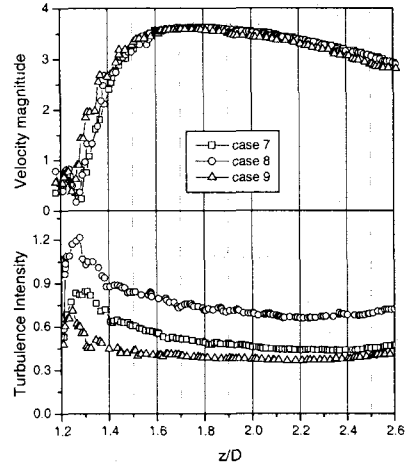


Fig. 8 Plotting of case 7 ~ case 9

3.3 노즐과 방해판과의 거리에 의한 영향

노즐과 방해판과의 거리를 87, 58, 29 mm 간격으로 해석하였다. 노즐과 방해판사이의 거리에 따라 난류강도는 거의 차이가 없었다.

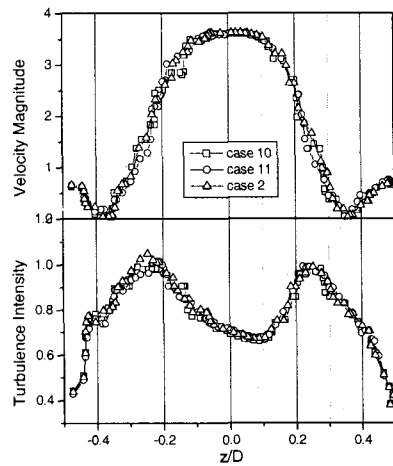


Fig. 9 Plotting of case 2, 10 and 11, respectively

방해판에서 이탈된 유동은 오리피스를 지나는 주 유동 방향의 속도의 크기에 비해 상대적으로 작기 때문에 오리피스를 지날 때, 이탈될때의 속도 성분이 주 유동 방향으로의 속도 성분으로 변하여, 노즐과 방해판과의 거리에 의한 영향은 거의 없다.

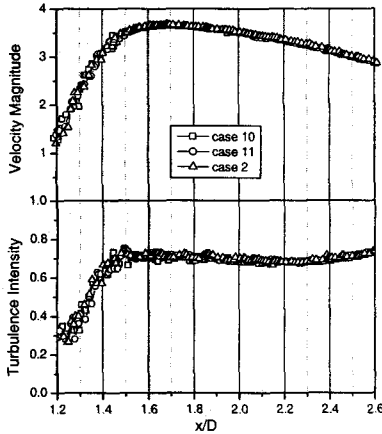


Fig. 10 Plotting of case 2, 10 and 11, respectively

3.4 방해판과 오리피스와의 거리에 의한 영향

위의 결과를 기준으로 방해판과 오리피스와의 거리에 의한 영향을 수치 해석하였다. Fig. 11 에서 방해판과 오리피스와의 거리가 400 mm일 때, 난류 강도가 크고, 오리피스 직경이 750 mm일 때, 상수도 설계 기준 및 최대 혼합 효율을 얻을 수 있었다.

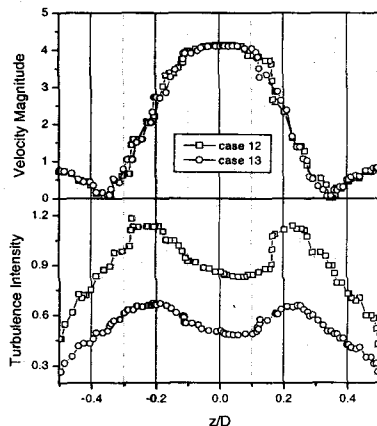


Fig. 11 Plotting of case12, case 13

4. 결론

정수장의 약품혼화공정에 적용한 2단 혼화방식 중 관내오리피스믹서(In line orifice mixer)에 대한 정확한 설계를 위하여 설계 기준내에서 설계 인자를 설정하여 수치계산을 하였다.

- 1) 오리피스 내경이 클수록 난류 강도가 크다.
(설계 기준 : 관내 평균 유속은 최대 6 m/s)
- 2) 방해판과 오리피스와의 거리가 400 mm, 방해판의 크기가 200 mm일 때, 가장 혼합 효과가 크다.
- 3) 노즐과 방해판사이의 거리는 난류강도에 큰 영향을 주지 못 한다.
- 4) 오리피스 직경이 750mm일 때($d/D=0.5$), 상수도 설계 기준을 만족하는 최대 혼합 효과를 기대할 수 있다.

참고문헌

- (1) H. S. Rew, 1997, "Turbulence Model Assessment in Complex Turbulent Flows using PHOENICS", PHOENICS Journal, Vol. 10, NO. 3, pp. 40~48.
- (2) 김찬중, 1998, "전산유체역학", 문운당, pp. 315~319.
- (3) H. K. Versteeg, W. Malalasekera, 1995, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method", LONGMAN, pp. 10~39.
- (4) Bruce R. Munson, Donald F. Young, Theodore H. Okishi, 1994, "Fundamentals of Fluid Mechanics", Jon Wiley & Sons Inc., pp. 484~533.
- (5) Appiah Amirtharajah, "Mixing in Coagulation and Flocculation", American Water Works Association, pp. 380~418.
- (6) 환경부, 1997, "상수도 시설 기준", 한국수도 협회, pp. 123~171.