정수장내 수류에너지를 이용한 액체약품의 효율적인 혼화를 위한 수리해석

Numerical Study on effective Mixing Chemical Liquid using Hydraulic Energy in a Water Treatment Plant

송 길 섭[*1], 오 석 영[*2]
K. S. Song and S. Y. Oh

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. Code of computational fluid dynamics for numerical analysis was performed using FLUENT, a commercial code. As variable for exactly standardizing, a proper ratio between an outer diameter of deflector and a diameter of pipe, the distance between deflector 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.

Key Words: 인 라인 오리피스(In-line Orifice), 박리 유동(Separation flow), 혼화(Mixing), 재순환 영역(Recirculation region), 방해판(Deflector)

기호설명

D : 관 지름
d : 오리피스 내경
β : 관경을 기준으로 오리피스의 내경비($=d/D$) ($=0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$)
d' : 방해판(deflector)의 외경 ($d'/D = 0.04 \sim 0.2$)
l' : 오리피스와 방해판과의 거리 ($l'/D = 0.15 \sim 0.5$)
l : 노즐과 방해판과의 거리

1. 서론

일반적으로 서로 다른 異狀의 유체를 혼합시키는 방법으로 교반기의 날개(Impeller)에 의한 방법, 두 유체의 압력 차이를 이용하여 희석 혹은 혼합시키는 Ejector에 의한 방법 이외에도 V-notch weir, Parshall flume, Orifice, Throttled valves, Swirl Chamber 등을 사용하여 관로내의 속도에 의해서 형성되는 단순 난류를 이용하여 유체를 혼합시킬 수 있다[1,2]. 그러나, 이들 방법 중에서 교반기에 의한 두 유체의 혼합방식은 가장 확실하게 異狀의 유체를 혼합시킬 수 있는 방법의 하나이다. 그러나, 유체가 수류에너지를 지니고 있는 경우에는 유체 스스로가 지니고 있는 유체 수류에너지를 이용하여 무 동력으로 두 유체를 외부에너지의 부가 없이 혼합시킨다면 동력비 절감은 물론 설비의 유지보수비 등의 절감 등의 효과로 인하여 산업현장에서 크게 고려할 가치가 있는 것으로 알려져 있다. 그래서 본 연구는 관내에서 노즐을 통한 약품투입과, 투입된 약품이 방해판(deflector)을 지나면서 주위로의 확산으로 인한 1차 혼화와 1차 혼화과정을 지난 원수와 약품이 오리피스를 지나면서 전 유동장으로의 확산을 유도하는 In-Line Orifice을 연구하였다. 오리피스는 유체가 통과하는 단면적의 변화

[*1] 비회원, 한국수자원공사 수자원연구소 연구원
[*2] 비회원, 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

로 유속의 변화와 차압이 발생하는데, 압력손실량을 계량적으로 이용하여 유체의 유량을 측정하는 유량측적용 오리피스[3]와 압력손실량을 유체흐름에 직접 이용하는 제한용 오리피스가 있다. 혼화를 위한 제한용 오리피스[4]는 국내의 정수장에서 사용되고 있으며 뚜렷한 설계 기준이 제시되지 않아 설계시 많은 어려움이 있다. 이에 본 연구는 국내의 정수장에서 사용할 수 있는 혼화용 오리피스 제작 기준을 마련코자 무차원 해석을 하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 계산 영역

본 연구에서 인라인 오리피스의 혼합 효과에 영향을 주는 인자들의 도시는 Fig. 1과 같다. 국내에서 운영되고 있는 정수장은 최대 시설 용량을 기준으로 관 직경에 대한 레이놀즈($Re= VD/\nu$) 수는 5.0×10^5 ~ 4.5×10^6 이다. 오리피스의 내경비($\beta=d/D$)는 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8로 하였고, 방해판의 외경비(d'/D)는 0.04 ~ 0.2 이고, 오리피스와 방해판과의 거리비(l'/D)는 0.15 ~ 0.5 이다.

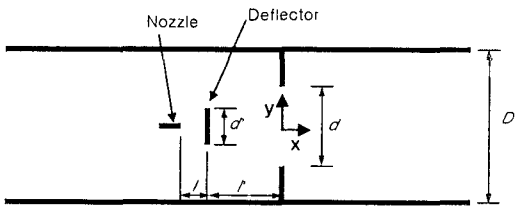

Fig. 1 The schematic diagram

노즐과 방해판의 거리비(l/D)는 혼화 효과에 영향이 없어 0.015D로 하였고, 이러한 요소들의 영향으로 오리피스를 통과하는 관 중심에서의 난류 강도의 변화를 해석기준으로 하였다.

Fig. 2는 관내의 오리피스, 방해판, 노즐의 형상으로 삼각 격자를 이용하였다. 각각의 요소는 관과 동축을 이루며, 오리피스는 고정시키고, 오리피스와 방해판과의 거리(l')는 오리피스를 중심으로 방해판을 상류로 이동시키면서 수치해석을 하였다.

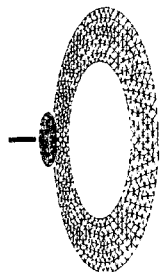

Fig. 2 Grid of orifice, deflector and nozzle

2.2 지배 방정식

본 연구에서 유동장의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식이다. 유한체적법을 기본으로 압력과 속도 보정은 PISO 알고리즘을 이용하였고, 공간 이산화는 Quick Scheme을 사용하였으며, 난류 모델은 2 방정식 모델인 표준 k-ε model을 이용하여 해석하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i$$

난류운동에너지 방정식

$$\rho\frac{Dk}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k-\rho\varepsilon$$

난류에너지소산율 방정식

$$\rho\frac{\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

이식에 관련된 변수들은 다음과 같다.

$$G_k = \frac{1}{2}\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)^2$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},\ C_\mu = 0.09,\ \sigma_k = 1.0,\ \sigma_\varepsilon = 1.3$$
$$C_{\varepsilon 1} = 1.44,\ C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

2.3 경계조건

해석 영역은 입구의 영향을 고려하여 오리피스 상류로 3D만큼 위치시켰고, 출구의 위치는 오리피스 하류 방향으로 5D만큼 위치 시켰다. 오리피스와 방해판(deflector)은 두께가 없는 판으로 가정하여 유동장내에 위치시키고, 방해판의 지지대나 약품 투입을 위한 노즐의 투입관은 주 유동장에 미치는 영향이 작을것으로 예상하여 이를 고려하지 않았다. 원수의 유입속도는 정해진 레이놀즈수에 의해 결정되고, 약품의 투입속도는 원수 속도의 2배로 하였다. 노즐의 관경을 0.02D로하고, 노즐과 원수의 난류강도는 유입속도의 10%로 가정하였고, 약품과 원수의 유량비는 8.0 $\times 10^{-4}$이고, 약품의 투입 물질은 원수와 같은 물성치를 사용하여 해석 영역을 단순화 하였다. 출구의 조건은 입구의 유량과 출구의 유량이 변하지 않는다는 조건으로 해석하였다. 혼합 효과는 관 중심에서의 난류강도를 해석 기준으로 사용하였다.

3. 수치해석 결과

난류 유동은 속도의 섭동에 의해 특성화 되어진다. 규모가 큰 순환 영역의 혼합에는 평균속도($\overline{u}$)에 의해 영향을 받고, 작은 영역의 혼합에는 섭동 속도(u')에 의해 영향을 받는다. 두 개의 속도 성분 $\overline{u}$, u'는 혼합과정을 이끄는 장비의 형태에 의존한다. 혼합 효과에 영향을 주는 난류강도(I)는 식 (1)과 같다.

$$I = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\overline{u}} = \frac{\left[\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T}(u')^2 dt\right]^{1/2}}{\overline{u}} \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i u_i} = \frac{1}{2}(\overline{u'u'}+\overline{v'v'}+\overline{w'w'}) = \frac{3}{2}\overline{u'^2} \quad (2)$$

난류점성에너지를 식 (2)와 같이 정의되고, 속도의 섭동성분을 등방성으로 가정하면, 난류강도는 식 (3)와 같이 정의된다.

$$I = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{\overline{u}} \quad (3)$$

3.1 Reynolds number와 β의 영향

Fig. 3는 교축부(Vena contracta) 부근의 관 수직 단면의 평균속도를 도시한 그림이다. 도수관의 경우 관 내면이 마모되지 않도록 하기 위하여 평균 유속의 최대 한도를 규정하고 있다. 모르터 또는 콘크리트 관은 3.0m/s, 모르터라이닝 쉬일드도장은 5.0m/s, 강관, 닥타일주철, 경질염화비닐은 6.0m/s을 최대 한도 평균 유속으로 규정하고 있다[6].

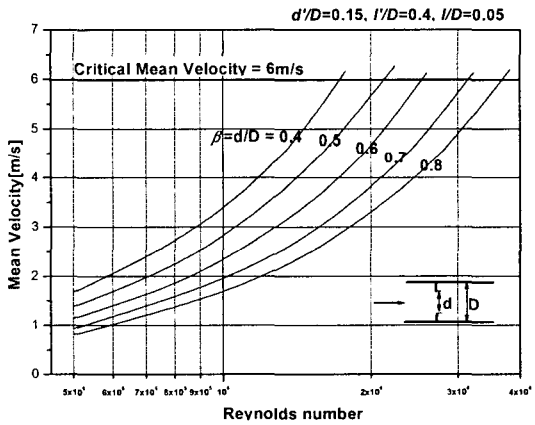

Fig. 3 Mean velocity on the position of maximum velocity magnitude (d'/D=0.15, l'/D=0.4, l/D=0.05)

Fig. 3에서 임계 평균 속도를 6.0m/s로 한 이유는 강관, 닥타일주철관이 현재 국내의 도·송수관의 경우 점유율이 약 90%을 차지하고 있기 때문이다. 관경을 기준으로 오리피스의 내경비(β)는 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8로 하였고, 같은 레이놀즈수에서 β 값이 커질수록 오리피스 하류의 관 평균 유속이 감소한다. 관경에 대한 오리피스 내경의 비(β)가 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8인 임계 속도에서의 레이놀즈수는 각각 1.7, 2.1, 2.5, 3.1, 3.6 $\times 10^6$이다.

Fig. 4은 β가 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, d'/D는 0.15, l'/D는 0.4 l/D는 0.05에서 레이놀즈수와 β가 변함에 따른 수두손실을 도시한 그림이다. β값이 클수록 같은 레이놀즈수에서 손실수두가 급격히 작아짐을 볼 수 있다. β가 0.4일 때, 레이놀즈수가 8.6×10^5이상이면 수두 손실이 급격히 증가하고, 관 평균 임계 속도의 레이놀즈수에서는 수두손실이 6.15m가 되었다.

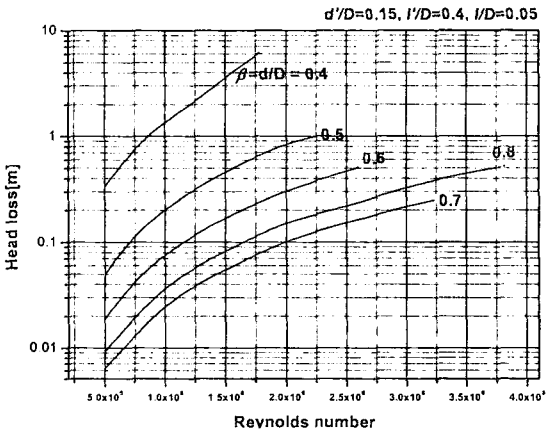

Fig. 4 Head loss of In-Line Orifice (d'/D=0.15, l'/D=0.4, l/D=0.05)

또한 β가 0.5, 0.6, 0.7, 0.8에서는 관 평균 임계 속도의 레이놀즈수에서 수두 손실이 1m를 넘지 않음을 알 수 있다. β가 0.4에서 0.7로 증가하면 같은 레이놀즈수에서는 수두 손실이 감소하다가 β가 0.8이면 수두 손실이 증가함을 보인다. 이는 β가 0.8일 때, ISO 5167[7]에서나 ASME에서도 오리피스 설계시 β가 0.75까지를 규정하고 있는 이유와 같은 것으로 반복 실험에서 손실계수의 측정값이 산란된 형태로 나타나고, 본 연구에서는 오리피스 하류의 재순환 영역이 벽과의 강한 상호 작용으로 인하여 오리피스 하류에서 비대칭 형태의 유동이 발달되는데 원인이 있는 것 같다.

Fig. 5는 오리피스 상류 방향으로 0.5D, 하류 방향으로 5D까지의 관 중심에서의 난류강도(I)를 도시했다. 레이놀즈수가 5.0×10^5~2.6×10^6까지변함에 따라 평균 속도가 증가하고, 이에 따라 속도의 섭동량도 증가하여 난류강도가 거의 변화가 없다. 난류강도는 혼합 효과를 이끄는 혼합 장치의 형태에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

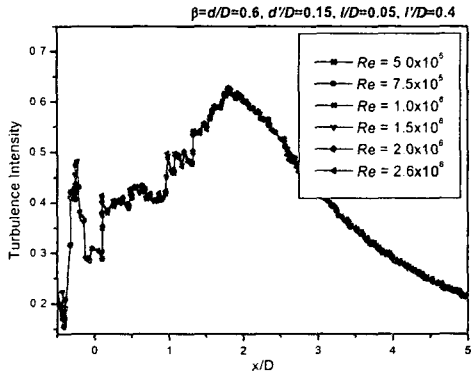

Fig. 5 Turbulence intensity on the center line of pipe with different Reynolds number (β=0.6, d'/D=0.15, l'/D=0.4, l/D=0.05)

Fig. 6는 레이놀즈수가 1.5×10^6에서 관경과 오리피스 내경과의 비(β)에 따른 난류강도(I)를 도시했다. 내경비가 감소함에 따라 오리피스를 통과하는 유속이 증가하고 이에 따라 속도의 섭동량이 오리피스 지나면서 내경비가 작을수록 급격히 증가한다. 이는 순환 영역의 속도의 크기와 관 중심의 유속과의 차이, 오리피스 벽면과 오리피스를 통과하는 유체의 점성에 의한 난류점성에너지(k)의 급격한 생성이 관 중심으로의 전파에 의해 기인된다. 그래서 오리피스의 중심에서보다는 하류 쪽으로 0.1D에서 난류강도 급격히 변하는 이유는 난류점성에너지가 오리피스 통과 유체를 따라 전파되고 있음을 알 수 있다. 내경비(β)가 0.6보다 작은 경우에는 방해판의 영향보다 오리피스의 영향으로 인한 난류강도의 증가가 더 크다는 것을 알 수 있다.

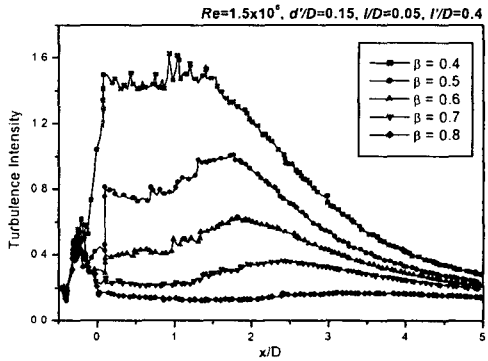

Fig. 6 Turbulence intensity on the center line of pipe with β (Re=1.5×10^6, d'/D=0.15, l'/D=0.4, l/D=0.05)

3.2 Deflector의 외경에 의한 영향(d')

Fig. 7, 8, 9은 defelctor의 외경에 의한 영향(d')을 직경비가 0.4, 0.6, 0.8에 대하여 도시하였다. 직경비가 0.4인 Fig. 7에서 오리피스를 통과하는 유동이 방해판에서 박리된 유동 보다 강한 관성력 때문에 방해판의 영향이 거의 없다. 그러나 직경비가 0.6인 Fig. 8에서는 방해판을 지나는 유동이 오리피스 통과 유동에 영향을 미쳐 오리피스 전단에서 높은 혼합 효과를 나타내고 있다.

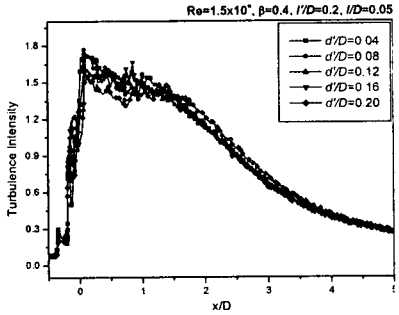

Fig. 7 Turbulence intensity on the center line of pipe with d'
(Re=1.5×10^6, β=0.4, l'/D=0.2, l/D=0.05)

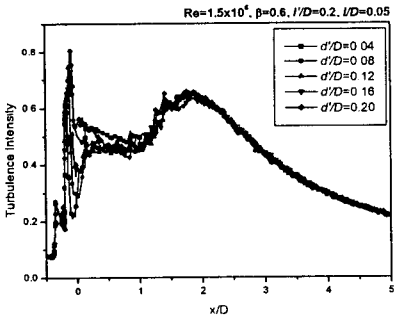

Fig. 8 Turbulence intensity on the center line of pipe with d'
(Re=1.5×10^6, β=0.6, l'/D=0.2, l/D=0.05)

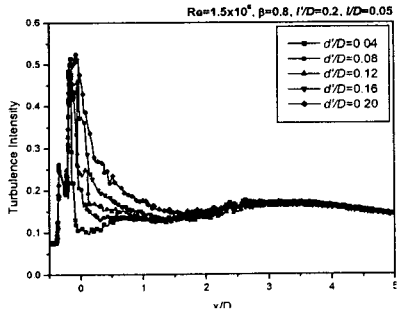

Fig. 9 Turbulence intensity on the center line of pipe with d'
(Re=1.5×10^6, β=0.8, l'/D=0.2, l/D=0.05)

직경비가 0.8인 Fig. 9에서는 방해판을 통과하는 유동이 오리피스의 통과 유동에 영향을 미쳐 방해판의 외경이 증가할수록, 오리피스 하류 방향으로 난류강도가 멀리 전파됨을 보이고, 오리피스의 전단에서의 난류강도의 크기에는 방해판의 외경의 크기가 별 영향을 주지 못한다. 그러나 전반적으로 방해판의 외경이 커질수록 방해판을 지나는 유동이 높은 난류강도를 가져 혼합 효과가 높은 것으로 나타났다.

3.3 방해판과 오리피스와의 거리에 의한 영향(l')

Fig. 10, 11은 외경비(d'/D)가 일정한 방해판과 오리피스와의 거리에 의한 영향(l')을 직경비가 0.6, 0.8에 대하여 도시하였다. 직경비가 0.4일 때, 방해판에서 박리된 유동은 오리피스를 통과하는 유동보다 낮은 관성력 때문에 방해판의 영향이 거의 없다.

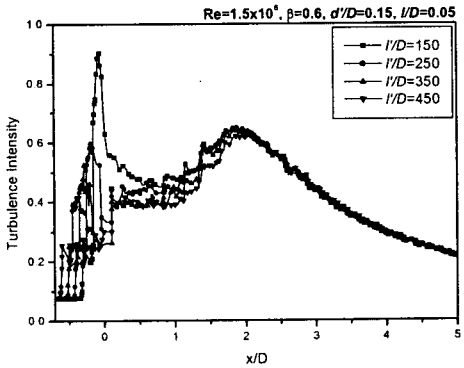

Fig. 10 Turbulence intensity on the center line of pipe with l'
(Re=1.5×10^6, β=0.6, d'/D=0.15, l/D=0.05)

직경비가 0.6인 Fig. 10에서 방해판과 오리피스와의 거리가 가까울수록 오리피스 전단에서 높은 혼합 효과를 나타내고 있다. 직경비가 0.8인 Fig. 11에서는 방해판을 통과하는 유동이 오리피스의 통과 유량에 영향을 미쳐 방해판과 오리피스의 거리가 가까울수록, 오리피스 하류 방향으로 난류강도가 멀리 전파됨을 보이고, 오리피스를 통과하면서 난류강도는 급격히 감소한다

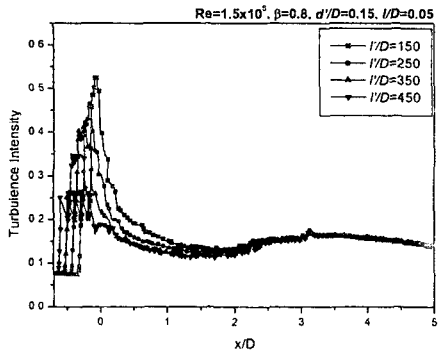

Fig. 11 Turbulence intensity on the center line of pipe with l' (Re=1.5×10^6, β=0.8, d'/D=0.15, l/D=0.05)

4. 결론

인라인 오리피스의 혼합 효과에 영향을 주는 레이놀즈(Re= VD/ν)수와 오리피스의 내경비(β=d/D), 방해판의 외경비(d'/D), 오리피스와 방해판와의 거리비(l'/D)에 대하여 수치해석을 수행하였다.

1. 동일형상에서, 레이놀즈수가 증가할수록 관 중심의 난류 강도는 거의 변화가 없다.
2. 오리피스의 직경비(β)가 감소할수록 난류 강도는 급격히 증가하나, 교축부의 속도가 경제적인 유속 범위를 넘어선다. 또한 손실 수두가 급격히 커지게 된다.
3. 방해판의 외경이 커질수록 방해판을 지나는 유동이 높은 난류강도를 가져와 1차 혼화 효과를 기대할 수 있다
4. 방해판과 오리피스와의 거리비가 가까울수록 오리피스 전단에서 높은 혼합 효과를 나타내고 있다.

참고문헌

[1] Appiah Amirtharajah, Mark M. Clacl and R. Rhodes Trussell, Mixing in Coagulation and Flocculation, AWWA, (1991), p.35.
[2] Mark M. Clack, 외 7인, Selection and Design of Mixing Processes for Coagulation, AWWA, Denver, (1994), p.9.
[3] Howard S. Bean, Fluid Meters - Sixth edition, ASME, (1971), p.47.
[4] 코오롱엔지니어링, 정수장시설 개선 방안 보고서, 코오롱엔지니어링, (1998), p.p.25.
[5] 오석영, 외 4인, "수리해석을 이용한 정수장 내 혼화장치 설계 개선에 관한 연구", KSME 춘계학술대회 논문집 E, 제주대학교, (2001), p.777.
[6] 환경부, "상수도 시설 기준", 한국수도협회, (1997), p. 123.
[7] International Organization for Standardization, Measurement of Fluid Flow by means of Pressure Differential device(Part I), (1998), p. 23.