

간이상수도에서의 혼합유동에 대한 수치해석

유영현 · 기 현 · 최종욱^{†,*} · 김성초* · 김용선** · 이용호***

순천대학교 대학원 기계공학과 · *순천대학교 기계우주항공공학부 · **석성기업(주) · ***전남대학교 기계자동차공학부

(2008년 12월 31일 접수, 2009년 6월 29일 채택)

Numerical Analysis of Mixing Flow in a Small-Scale Water Supply System

Younghyun Yoo · Hyun Ki · Jongwook Choi^{†,*} · Sungcho Kim* · Yongseon Kim** · Yongho Lee***

Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Suncheon National University

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon National University · **Suck sung Co., LTD

***Department of Mechanical-Automotive Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT : The mixing method of water and chemicals is significant in a small-scale water supply system because drinking water should be supplied with a certain quantity of remaining chemicals maintained. In the present study, the concentration distribution and the mixing index were obtained from four models, which were to find out the optimal mixing method of water and chemicals. The two models brought the good mixing effects out of the four, one for providing chemicals from the center of water supply pipe and the other for setting up the semicircle block at the downstream of the chemicals-providing pipe. As a result, the mixing effect was found out to be increased due to the diffusion and the disturbance of flows. In conclusion, these numerical results are expected to contribute to designing the optimal mixing system.

Key Words : Concentration Distribution, Mixing Index, Flow Analysis, Small-Scale Water Supply System

요약 : 간이상수도 시스템에서 공급하는 식수는 일정한 잔류 약품(염소)량을 유지해야 하기 때문에 물과 약품의 혼합방법은 매우 중요하다. 본 연구에서는 물과 약품의 혼합방법을 최적화하기 위하여, 4가지 모델에 대한 농도분포 및 혼합지수를 구하였다. 그 중 2가지 모델에 대해서는 혼합효과가 높게 나타났다. 하나는 지하수 공급 파이프 중앙에 약품을 공급하는 모델이고, 또 다른 하나는 약품공급 파이프 하류에 반원형태의 블록을 설치한 모델이다. 이러한 모델들은 유동의 확산 및 교란을 야기시켜 혼합효과를 증가시키는 결과를 가져왔다. 이와 같은 수치해석 결과는 최적의 혼합효과를 얻기 위한 시스템을 설계하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

주제어 : 농도분포, 혼합지수, 유동해석, 간이상수도

1. 서론

요즘 환경오염으로 인한 식수 문제가 날로 심각해지고 있다. 여러 가지 여건상 상수도 설치가 어려운 지역에서는 간이상수도를 이용하고 있다. 일반적으로 간이상수도의 경우 지하수나 계곡수를 정화 및 소독하여 수용가에 공급하고 있다. 물을 소독하는 방법에는 크게 물리적 처리방법과 화학적 처리방법이 있는데, 물리적 처리방법에는 자외선 소독법, 전기장 소독법, 초음파 소독법, 플라즈마 소독법 등이 있으며, 이러한 경우 고가의 시스템이 필요하기 때문에 간이상수에 적용하기에는 경제적으로 적합하지 않다. 화학적 처리방법에는 차아염소산칼슘(Ca(ClO)₂; 고체)이나 차아염소산나트륨(NaClO; 액체)을 물에 주입(차아염소산칼슘의 경우 물에 미리 용해시켜 사용)하여 소독하는 일반적인 방법이 있으며, 물리적 처리방법과는 달리 단순

시스템으로 장치를 제작할 수 있어 유지비용이 저렴하여 간이상수에 많이 사용되고 있다. 약품을 투입하였을 때 대장균과 일반세균의 제거 효과는 특정 모델 하수처리장을 기준으로 측정된 연구결과를 보면 약간의 계절적인 영향은 있으나 대부분 효과적으로 제거되고 있다.¹⁾ 간이상수도에서 액체상태의 약품(차아염소산칼슘, 차아염소산나트륨)공급은 일반적으로 지하수관정에서 물탱크로 연결된 관에 비례제어식 정량펌프를 이용한다. 이때 식수로 사용하기 위해서는 간이상수도관내 잔류염소량이 0.1 mg/L 이상 유지되어야 한다. 그러나 수용가에서 물의 사용량이 급격히 증가하는 경우 물과 약품이 미처 혼합되기 전에 공급될 수 있으며, 특히 이러한 경우 세균번식이 우려되는 여름철에 물과 약품의 혼합은 매우 중요하다.

한편, 이와 관련된 선행연구로는 교반혼합기내의 속도장과 농도분포를 획득하기 위하여 PIV/LIF기법을 이용한 실험적 연구가 수행되었으며,²⁾ 상수도 시스템의 불규칙한 흐름에 대하여 확산효과를 고려한 수치해석적 연구도 수행되었다.³⁾ 두 물질의 혼합에 관한 연구는 크게 실험적 방

[†] Corresponding author

E-mail: choijw99@sunchon.ac.kr

Tel: 061-750-3826

Fax: 061-750-3820

법⁴⁻⁶⁾과 수치해석적 방법⁷⁻¹¹⁾으로 구분된다. 수치해석을 이용한 농도 분포 해석의 경우 혼합정도를 정량적으로 판별하기 위하여 일반적으로 표준편차의 개념을 도입한 혼합지수(mixing index)를 이용한다. 혼합의 효과를 높이기 위한 방식에는 교반기를 이용하여 혼합하는 능동형방식과 형상변화를 통하여 유체흐름을 변화시켜 혼합하는 수동형방식이 있다. 능동형방식의 경우 큰 혼합효과를 기대할 수는 있지만, 교반기를 설치하기 위한 공간확보 및 추가비용이 필요하다. 수동형방식의 경우 혼합효과는 능동형방식보다 낮지만 비교적 설치 및 유지관리가 용이하다.

본 연구의 목적은 간이상수도 약품공급 장치에서 물과 약품의 혼합을 향상시키기 위한 수동형 방식의 약품공급 파이프의 형상모델을 설계하는데 있다. 효과적인 약품공급 방법을 제시하기 위하여 기본 형상을 포함한 4가지 모델에 대한 형상을 설계한 후, 유동해석 프로그램인 Ansys CFX를 이용하여 유동 및 농도 분포를 구한다. 그리고, 혼합정도를 판별하기 위한 혼합지수를 구한다.

2. 형상모델설계 및 농도분포해석

2.1. 간이상수도 약품 공급 장치

실제 현장에 설치되어 있는 간이상수도 약품공급 장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 약품은 비례제어식 정량펌프에 의해 지하수공급량에 비례하여 주입된다. 지하수 펌프의 사양은 최대양정 80 m, 유량 220 L/min이고, 정량펌프의 약품공급은 25 mL/min이다. 물과 약품은 점선으로 표시된 구간에서 혼합되며, 이 구간은 혼합효과를 극대화하기 위한 유동 및 농도해석 구간으로, Fig. 2에 3차원 형상으로 나타내었다.

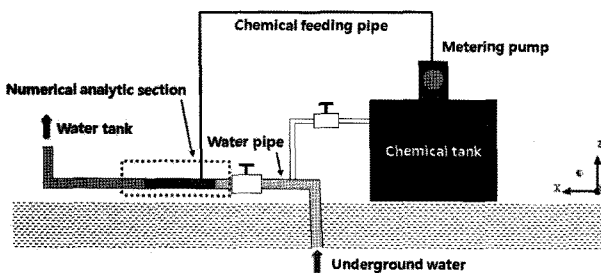


Fig. 1. Chemical feeding system.

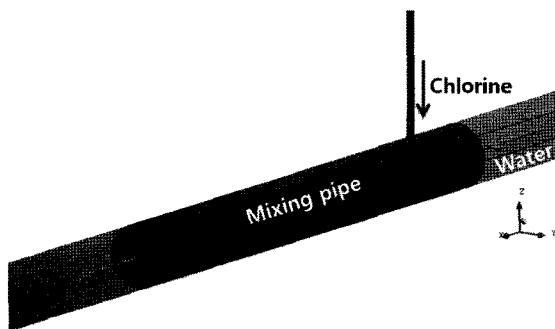


Fig. 2. 3-D geometry of mixing section.

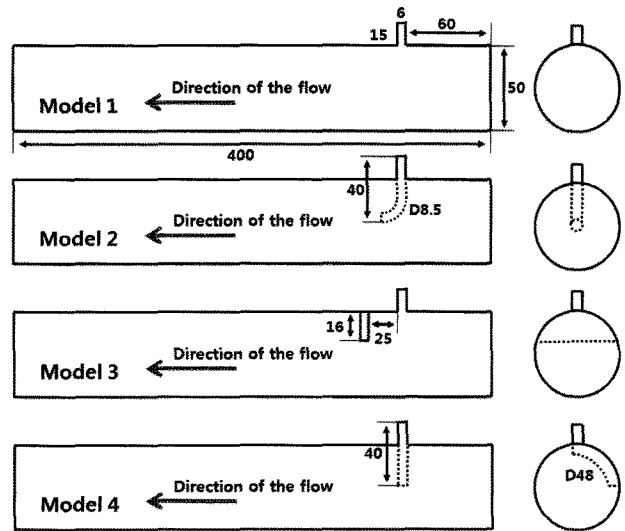


Fig. 3. Four models in mixing section of water and chemicals (unit : mm).

2.2. 형상모델

물과 약품이 혼합되는 구간에서 유동 및 농도해석을 통한 혼합효과를 알아보기 위하여 Fig. 3과 같은 4가지 모델에 대한 형상설계를 수행하였다.

지하수 파이프에 약품공급 파이프를 연결하는 일반적인 형상은 Model 1과 같다. Model 2의 경우는 Model 1에서 약품공급 파이프를 지하수 파이프 중앙까지 확장하여 약품을 공급하는 형상이다. Model 3의 경우는 Model 1에서 약품공급 파이프는 그대로 유지시키고, 지하수 파이프에 반원형태의 블록(block)을 설치한 형상이다. 블록의 위치는 약품공급파이프 출구로부터 25 mm 후류에 설치하였으며, 블록의 높이는 직경의 약 1/3의 크기이다. Model 4의 경우는 Model 1에서 약품공급파이프의 형상을 지하수 파이프의 원주방향으로 90°회전시켜 확장하였으며, 출구는 지하수 파이프 가장자리에 위치시켰다.

2.3. 격자생성

수치해석으로 4가지 형상 변화에 따른 물과 약품의 유동 및 농도 분포를 구하기 위하여 격자생성을 수행하였다. 격자는 비정렬 사면체 격자를 이용하였으며, 수치계산의 수렴성과 정확성을 확보하기 위하여 벽 근처에서는 프리즘(prism)격자를 사용하였다. 형상설계 및 격자생성은 Ansys CFX에서 제공하고 있는 Design Modeler와 CFX-Mesh Program을 이용하였다.

2.4. 지배방정식 및 계산조건

파이프내의 유동 및 농도 해석은 3차원, 비정상상태(unsteady-state), 비압축성(incompressible), 난류유동으로 가정하여 수행하였다. 이때 사용된 지배방정식¹²⁾은 식 (1)~(4)와 같으며, 연속방정식, 운동량방정식, 난류방정식($k-\epsilon$ model), 농도방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) \\ = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) \\ = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) \\ = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (U \Phi) \right) \\ = \nabla \cdot \left(\left(\rho D_\Phi + \frac{\mu_t}{S_{C_i}} \right) \nabla \cdot \left(\frac{\Phi}{\rho} \right) \right) + S_\Phi \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, p' , μ_{eff} , μ_t , P_k 에 대한 식은 식 (5)~(8)과 같다.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \tag{5}$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \tag{6}$$

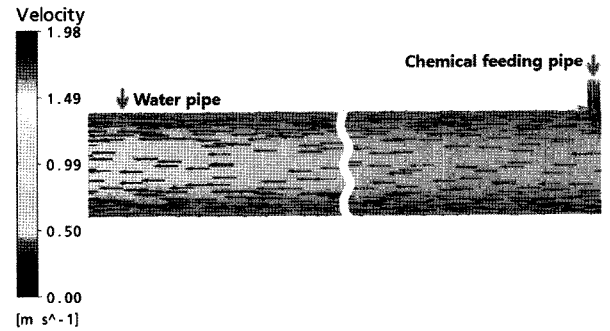
$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) \\ - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \end{aligned} \tag{8}$$

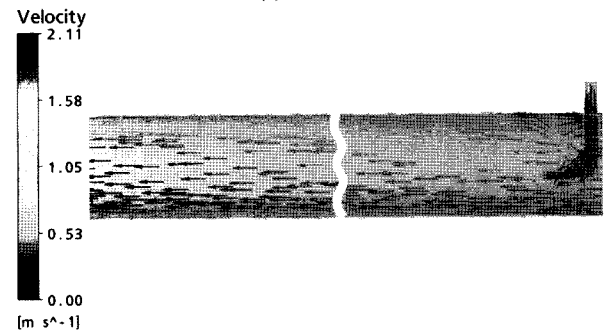
위의 식에서 ρ , t , U , B 는 밀도(density), 시간(time), 속도(vector of velocity $U_{x,y,z}$), 체력의 합(sum of body forces)을 나타낸다. k - ϵ 난류모델에서 사용된 ϵ , μ , κ 는 난류 소산률(turbulence dissipation rate), 점성계수(viscosity), 폰 카르만 상수(Von Karman constant)를 나타내며, 사용된 폰 카르만 상수 값은 0.41이다. 난류 모델에 사용된 난류 상수 C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k , σ_ϵ 는 각각 0.09, 1.44, 1.92, 1.0, 1.3이다. 농도방정식에서 사용된 Φ , S_Φ , D_Φ , S_{C_i} 는 각각 농도(concentration), 체적항(volumetric source term), 동적 열확산을(kinematic diffusivity), 난류 슈미트 수(turbulence Schmidt number)를 나타낸다. 수치 계산시 사용된 물과 약품의 물성치는 일정하며, 화학반응은 일어나지 않는다고 가정하였다. 지배방정식의 해는 유동해석 프로그램인 Ansys CFX¹³⁾를 이용하여 구하였다. 초기조건 및 경계조건은 Table 1과 같으며, 물의 농도를 0.0, 약품의 농도를 1.0으로 설정하여 유동 및 농도 계산을 수행하였다. 수치계산은 비정상

Table 1. Initial and boundary conditions

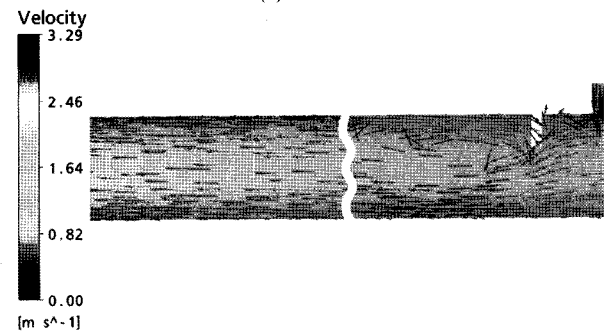
		velocity(m/s)			concentration
		U	V	W	
initial condition		0.0	0.0	0.0	0.0
boundary condition	inlet at water pipe	1.8	0.0	0.0	0.0
	outlet at water pipe	relative pressure = 0(pa)			
	inlet at chemical feeding pipe	0.0	0.1	0.0	1.0
	wall at pipes	0.0	0.0	0.0	0.0



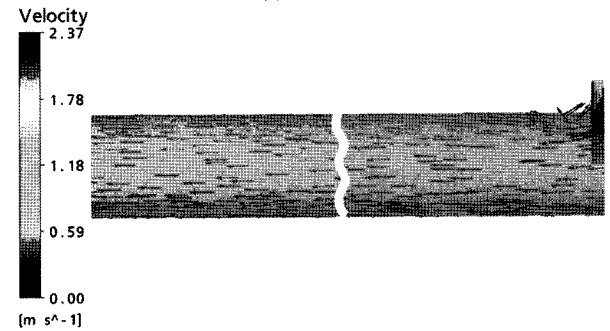
(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3



(d) Model 4

Fig. 4. Velocity distributions for mixing flow.

상태(0초에서 5초까지)와 정상상태로 각각 나누어서 수행하였으며, 비정상 상태에서 경향을 파악한 후 정상상태의 최종결과를 얻었다. 수렴조건은 속도와 농도 변화량에 대해 10^{-4} 으로 설정하였다.

2.5. 혼합지수

일반적으로 농도분포의 윤곽선(contour line)은 농도분포의 가시화는 가능하지만 혼합의 정도를 판별하기에는 적합하지 않다. 이러한 이유로 많은 연구에서 표준편차의 개념을 도입한 혼합지수 식⁷⁻¹⁰⁾을 사용하고 있으나, 이와 같은 식들은 대부분 균일한 격자계에 대해서만 적용이 가능하다. 본 연구에서 사용된 비정렬 사면체 격자는 격자의 부피가 일정하지 않은 관계로 기존의 수식을 바로 적용할 수 없어, 격자의 부피비를 고려한 식 (9)를 이용하였다.

$$\text{Mixing index} = \sum_{i=1}^N W |\phi_i - \bar{\phi}| \quad (9)$$

여기서, N 은 전체격자수를 나타내며, 부피 가중치 $W(=V_i/V)$ 는 전체 격자 부피에 대한 i 번째 격자 부피의 비를 나타낸다. 또한 ϕ_i 는 i 번째 격자의 농도를 나타내며, 평균농도 $\bar{\phi}$ 는 식(10)과 같이 구한다.

$$\bar{\phi} = \frac{\phi_1 Q_1 + \phi_2 Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (10)$$

여기서, ϕ_1 은 약품의 농도, ϕ_2 는 물의 농도, Q_1 은 약품의 공급유량, Q_2 는 물의 공급유량이다.

2.6. 결과 및 고찰

2.6.1. 형상변화에 따른 속도분포

4가지 형상모델에 대한 속도 및 유선 분포는 Fig. 4~5와 같다. Model 1은 지하수 파이프의 유량이 상대적으로 크기 때문에 약품공급 파이프에서 나오는 약품의 유량은 전반적인 속도분포에 거의 영향을 주지 못하였다. 반면, Model 2는 지하수 파이프내에 있는 약품공급 파이프에 의해 흐름의 교란(disturbance)이 발생하였으며, 전체적인 속도분포에 영향을 주는 것으로 나타났다. Model 3은 지하수 파이프내에 설치된 블록에 의하여 하류에서 커다란 와류(vortex)가 발생하였으며, 전체적인 속도분포에도 상당한 영향을 주는 것으로 판단된다. Model 4는 상대적으로 큰 속도를 갖는 지하수에 의해 원주 방향으로의 약품공급을 위한 회전효과는 미비하게 나타났으며, 전체적인 속도분포에서도 Model 2 및 Model 3보다 비교적 작은 유동의 교란이 발생하였다.

2.6.2. 형상변화에 따른 압력변화

4가지 형상변화에 따른 지하수 파이프 중앙단면과 지하수 파이프 끝단으로부터 10 cm 단면에서의 압력분포는 Fig. 6과 같다. Model 1은 지하수 파이프내의 흐름이 약품공급 파이프의 흐름에 비하여 매우 크기 때문에 약품공급에 의한 압력변화는 미약하게 나타났으며, 일반적인 단일 파이프내의 유동흐름과 비슷한 유동방향으로의 압력강하 현상만 나타났다. Model 2는 약품공급 파이프가 지하수 파이프 중앙에 위치한 관계로 약품공급 파이프 근처에서 낮은 압력분포가 나타났으며, 후류부분에서는 다시 압력이 회복됨을 알 수 있다. 이와 같은 압력분포는 약품이

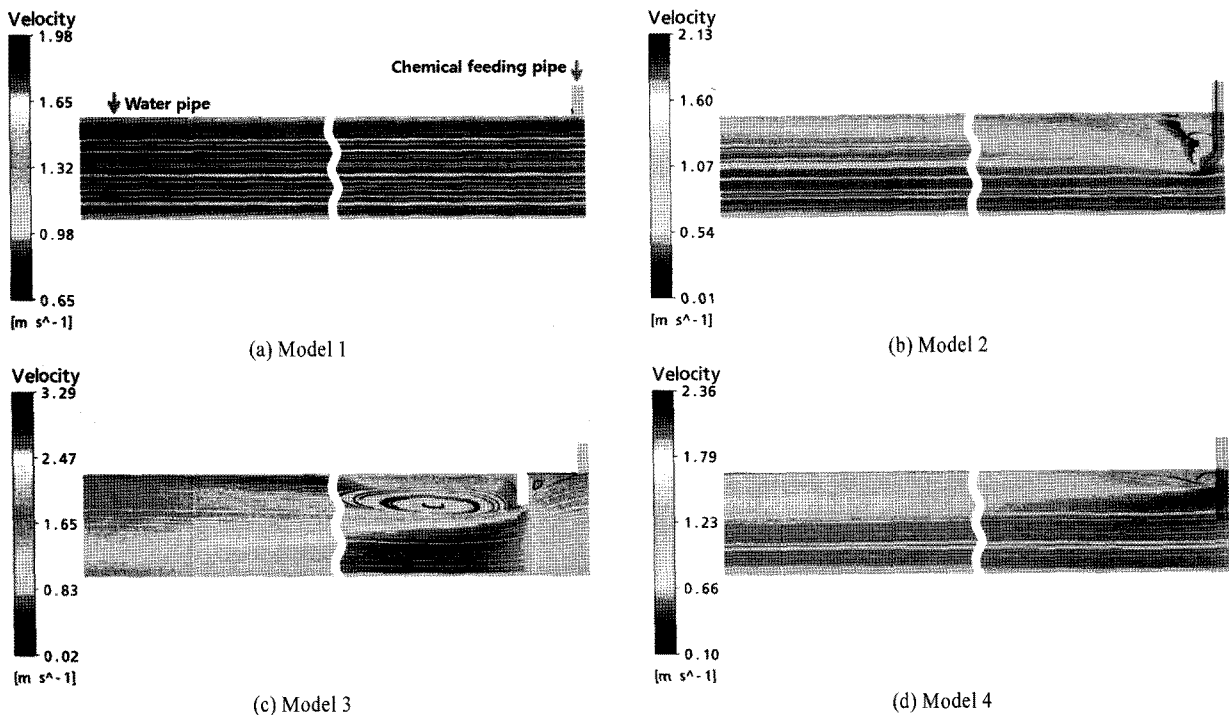


Fig. 5. Streamline distributions for mixing flow.

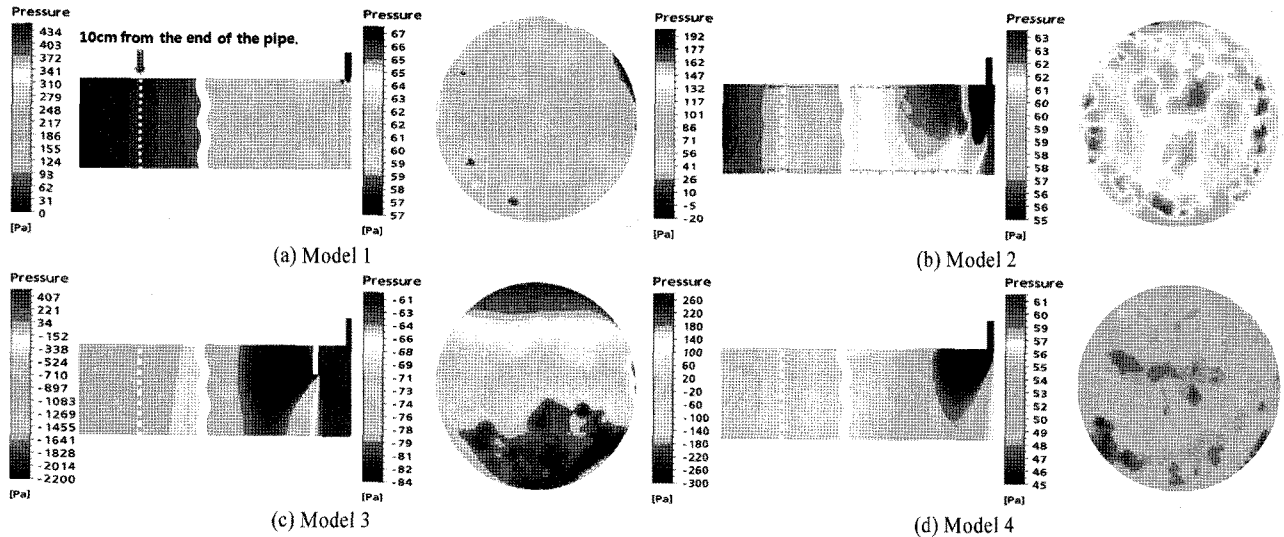


Fig. 6. Pressure distributions for mixing flow.

물에 혼합과정에서 효과적인 것으로 판단된다. Model 3은 지하수 파이프내의 상단부 블록에 의하여 커다란 압력차이가 블록을 사이에 두고 발생하였으며, 우측의 압력분포에서도 상단부와 하단부의 압력차이를 확인할 수 있었다. 또한, 하류로 갈수록 압력분포가 높게 나타났다. 이와 같은 압력분포는 파이프 벽면의 점착조건(no slip condition)에 의하여 파이프내의 주요 유동의 운동에너지가 감소할 때, 박리(separation)현상을 일으키며, 와류(vortex)를 발생시킨다. 발생한 와류는 물과 약품을 혼합시키는데 긍정적인 효과로 작용한다. Model 4는 지하수 파이프내의 원주 방향으로의 약품공급 파이프가 있어 국부적으로 압력변화가 있으나, Model 2 및 Model 3에 비하여 혼합효과를 나타낼 만한 압력분포를 나타내지 못하였다.

2.6.3. 형상변화에 따른 농도분포

4가지 형상 변화에 따른 농도 분포를 지하수 파이프 중

양 단면과 지하수 파이프 끝단으로부터 10 cm 단면에 대하여 Fig. 7에 나타내었다. Model 1은 약품공급 파이프의 유량에 비하여 지하수 파이프내의 유량이 상대적으로 큰 관계로 약품이 물에 미처 혼합되지 못한 상태로 흐름이 지속됨을 볼 수 있다. 전체적인 농도분포를 보더라도 지하수 파이프 상단부에서만 약품의 농도가 높게 나타나 물과 약품이 잘 혼합되지 않은 모델로 판단된다. Model 2는 약품공급 파이프를 지하수 파이프 중앙에 위치시켜 약품이 물에 확산될 수 있는 공간을 확보하였다. 이러한 이유로 지하수 파이프내 약품의 농도는 Model 1보다 넓게 분포됨을 알 수 있었다. Model 3은 지하수 파이프 상단에 블록을 설치함으로써 블록 하류 부분에 와류가 발생함을 앞서 살펴보았다. 이러한 와류의 영향으로 블록의 하류부에서 약품의 농도가 넓게 분포되었으며, 우측의 농도분포를 보더라도 전반적으로 물과 약품의 혼합이 잘 이루어짐을 알 수 있었다. Model 4는 약품공급 파이프를 지하

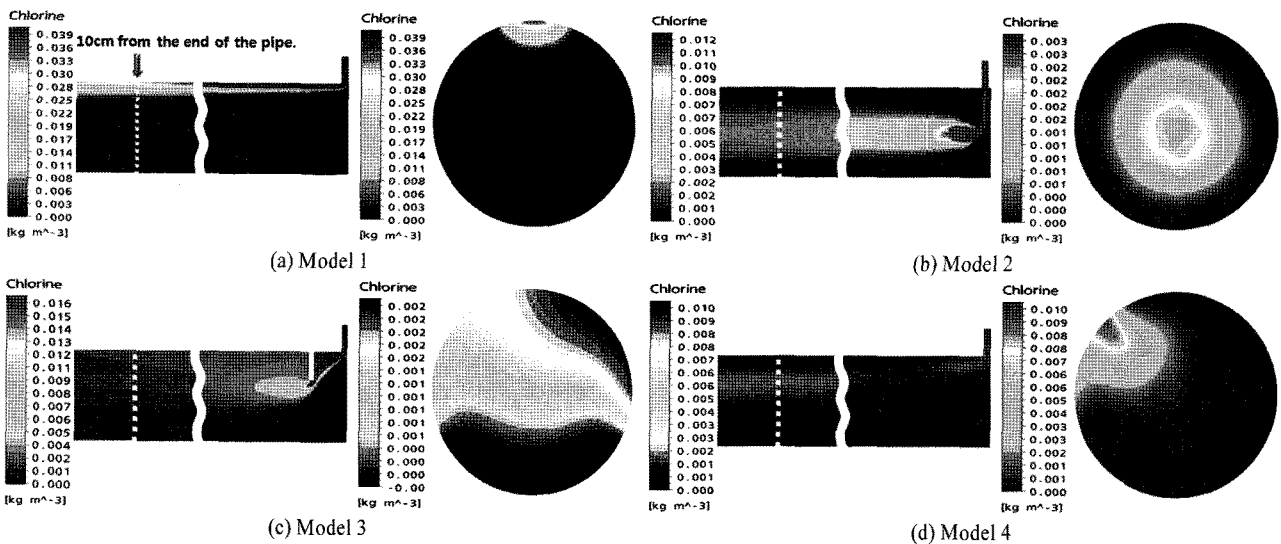


Fig. 7. Concentration distributions for mixing flow.

수 파이프내 원주방향으로 설치함으로써 약품공급에 있어서 원주방향으로의 회전효과를 기대를 하였다. 그러나 지하수 파이프내의 유량이 상대적으로 큰 관계로 이러한 원주방향으로의 회전효과는 약품의 농도분포에는 별 영향을 주지 못한 것으로 나타났다.

2.6.4. 형상변화에 따른 혼합지수 분포

지금까지 지하수 파이프내의 속도, 압력, 농도분포에 대한 결과를 고찰하였으나, Model 2와 Model 3에 대해서는 약품의 혼합정도를 정량적으로 판단하기 어려운 실정이다. 이를 해결하기 위하여 앞에서 언급한 식 (9)를 이용하여 각각의 모델에 대한 혼합지수(mixing index)를 구하여 Fig. 8에 나타내었다. 이때 혼합지수를 구하는 구간은 지하수 파이프 끝단으로부터 10 cm 단면이다. 시간에 따른 혼합지수의 변화를 살펴보면 초기 약 1.5초 동안은 약품이 지하수 파이프 끝단에 처음으로 도달되기 때문에 혼합지수의 변동이 있으나, 그 이후에는 일정한 값으로 수렴되는 형태를 보이고 있다. 혼합지수는 각 격자의 농도 값과 평균 농도 값의 차이를 합한 값으로 0에 가까울수록 혼합이 잘 이루어짐을 의미한다. 이상적인 경우로 혼합지수의 값이 0이 되면 모든 점에서 평균 농도 값에 도달함을 의미하며, 완전 혼합이 이루어 졌음을 나타낸다. 이러한 관점에서 5초의 시간이 경과된 후의 결과는 Model 3이 다른 모델과 비교하였을 때 혼합지수가 가장 작아 혼합효과가 좋은 모델로 판단된다. 한편, 시간에 따른 농도 변화 계산을 정상상태까지 수행하기에는 많은 계산시간이 소요되므로, 바로 정상상태의 지배방정식을 이용하여 유동 해석을 수행하였으며 이에 대한 혼합지수도 구하였다. 그 결과 정상상태에서는 Model 2의 경우가 Model 3보다 혼합지수가 0에 근접하여 더 좋은 모델로 판단된다. 즉, 짧은 시간 동안에 혼합정도는 Model 3이 우수하였으나, 장시간 동안 간이상수도가 작동된다면 Model 2가 더 적합한 모델임을 알 수 있다. Model 4의 경우 초기 5초 동안에는 Model 1보다 혼합지수가 낮아 혼합효과가 더 좋은 것으로 판단되었으나, 정상상태의 결과에서는 Model 1의 혼합지수와 거의 동일한 값을 나타내 혼합효과가 거의 없는 것으로 판단된다.

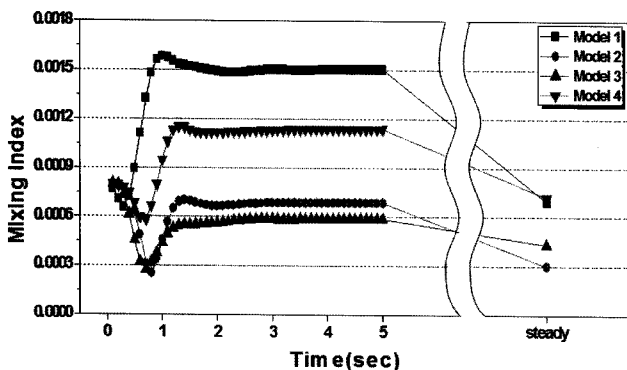


Fig. 8. Variations of mixing indexes with time.

3. 결론

간이상수도에서 물과 약품의 혼합은 매우 중요하다. 즉, 지하수 파이프에 약품공급을 어떻게 하느냐에 따라 수질이 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 물과 약품의 혼합 효율을 높이는 방안으로 4가지 모델에 대하여 수치해석을 통한 농도분포해석을 수행하였다. 4가지 모델 중 약품공급 파이프 출구를 지하수 파이프 중앙에 설치한 Model 2와 약품공급 파이프 후류에 반원형태의 블록을 설치한 Model 3의 혼합효과가 높음을 알 수 있었다. Model 2의 경우는 적절한 약품공급위치를 확보하여 혼합효과를 크게 한 결과이고, Model 3의 경우는 유로의 구조를 변경하여 유체 교란에 의한 혼합효과를 크게 한 결과라고 볼 수 있다. 이러한 방법 모두 교반기를 사용하지 않고 혼합효과를 높이는 방법으로 기존 장치에 적용이 용이하며, 별도의 설치 공간이나 비용이 소요되지 않는다는 장점이 있다. 향후 추가적인 혼합방식에 관한 연구를 수행하여 최적의 혼합효과를 얻을 수 있는 모델을 확보할 계획이다.

사사

본 과제는 교육인적자원부·산업자원부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과이며, 부분적으로 2008년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

참고문헌

1. Song, H. S., Kim, J. W., and Bae, B. W., "Chlorine Disinfection for Inactivating Indicator Microorganisms for Wastewater Treatment," Proceedings of the Korean Society of Environmental Engineers, Korean Society of Environmental Engineers, Daejeon, pp. 527~530(2003).
2. Jeong, E. H., Yoon, S. Y., and Kim, K. C., "Simultaneous Measurement of Velocity and Concentration Field in a Stirred Mixer using PIV/LIF Technique," *Trans. of the KSME(B)*, **27**(4), 504~510(2003).
3. Cho, I. Y., Kim, B. K., Lee, J. P., Lee, H. D., and Kim, S. H., "Comparison of the Dynamic Inverse Chlorine Models Considering the Diffusion Effect," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **25**(6), 716~722(2003).
4. Kim, D. K., Bae, S. T., Kim, J. H., Kim, O. K., and Lee, Y. H., "A Study about Choice of Industrial Mixer's Impeller Type for Concentration Measurement Method and PIV," *J. Kor. Soc. Marine Eng.*, **30**(3), 413~419 (2006).
5. Costin, D. C. and Synovec, E. R., "Measuring the transverse concentration gradient between adjacent laminar flows in a microfluidic device by a laser-based refractive index gradient detector," *Talanta*, **58**(3), 551~560

- (2002).
6. Beebe, J. D., Adrian, J. R., Olsen, G. M, Stremler, A. M., Aref, H., and Jo, B., "Passive mixing in micro-channels: Fabrication and flow experiments," *Mec. Ind.*, **2**, 343~348(2001).
 7. Suh, Y. K., "On the Problem of Using Mixing Index Based on the Concentration Dispersion," *Trans. of the KSME(B)*, **30**(8), 796~805(2006).
 8. Kim, Y., An, S., and Maeng, J., "The Effect of Karman Vortex for Mixing in a Micro-channel with an Oscillating Micro-stirrer," *Trans. of the KSME(B)*, **30**(2), 144~152(2006).
 9. Lee, D. S., Kim, H. G., Ha, M. Y., Park, Y. H., and Park, I. M., "Mixing Effect by the Geometry of Static Mixer with Turbulent In-Situ Mixing," *Trans. of the KSME(B)*, **29**(12), 1307~1312(2005).
 10. Maeng, J., Cho, I., and Kim, B., "Prediction of Degree of Mixing for Insoluble Solution with Vortex Index in a Passive Micromixer," *Trans. of the KSME(B)*, **29**(2), 232~238(2005).
 11. Shin, M. S., Kim, H. S., Jang, D. S., Lee, S. N., and Lee, Y. S., "A Numerical and Experimental Study on the Mixing Characteristics of Stratified Thermal Storage," *Environ. Eng. Res.*, **8**(1), 41~47(2003).
 12. Ansys CFX-Solver, Release 10.0 : Theory(2005).
 13. Ansys CFX-Solver, Release 10.0 : modeling(2005).