

## CFD모사 기법을 이용한 관내 혼화장치내 수두손실 발생 특성 평가

### Evaluation of Head Loss within In-Line Mixer for Water Treatment using CFD Technique

황영진<sup>1</sup>, 임성은<sup>1</sup>, 김성수<sup>1</sup>, 박노석<sup>1\*</sup>, 왕창근<sup>2</sup>

Young-Jin Hwang<sup>1</sup>, Sung-Eun Lim<sup>1</sup>, Seong-Su Kim<sup>1</sup>, No-Suk Park<sup>1\*</sup>, Chang-Keun Wang<sup>2</sup>

1 한국수자원공사, 2 충남대학교 환경공학과

(2008년 9월 22일 접수 ; 2008년 11월 28일 수정; 2009년 2월 16일채택)

#### Abstract

This study was conducted for verification and systematization of estimation method about the headloss using CFD(Computational Fluid Dynamics). Head loss which happens between the inlet and outlet of in-line mixer can be a major factor for the design and construction. Also, this Case studies about the sensitivity related to the velocity in the piping system. As result, program's default calculation function was used to get each side's total pressure and the differential of each total pressure could be defined as head loss from in-line mixer. In the case of adopting pipe surface friction factor and geometry loss, Calculation residual can be much more reduced. It was found that residual of value between CFD method and field test ranged about 3 through 18 percent.

**Key Words :** in-line mixer, CFD simulation, Total Pressure, function

#### 1. 서론

수처리 공정에서 혼화공정은 가장 규모가 작고 짧은 체류시간을 가지지만 입자성 물질을 제거하기 위한 가장 우선되는 공정이다. 따라서 후속공정 전체의 제거효율에 영향을 준다는 점에서 매우 중요한 공정이다(박영오 등, 2008). 그러므로 혼화공정을 최적화 시키면 후속공정의 효율을 향상시킬 수 있게 되어 결과적으로 전체적인 정수처리 효율을 향상시킬 수 있게 된다. 급속혼화공정에서 급속계 응집제의 확산은 이론적으로 1초 이내에 이루어지는 것을 권유하고 있지만, 실제 설계나 운전여건상에서는 1~2초 내에 이루어지는 것을 허용하고 있다(Hudson and Wolfner, 1967)(Vrale and Jordan, 1971). 그러나 기계적 혼화 방식을 사용하고 있는 많은 정수장에서는 2초

이내에 응집제를 공정수내에 골고루 확산시키는 것이 불가능하기 때문에 약 30~40%정도 과잉 투입하여 콜로이드와의 충돌기회를 증가시키고 있는 실정이다(Kawamura, 1991).

최근 응집제가 원수에 투입됨과 동시에 가능한 빠르게 수중에 확산시킬 수 있는 장치로서 펌프 디퓨전 혼화장치(PDM: Pump Diffusion Flash Mixer)와 같은 관내 혼화장치(In-Line mixer)의 적용성이 증가 추세에 있다. In-line mixer 경우 여러모로 기존의 기계식 혼화장치의 단점을 해결할 대안으로서 자리매김하고 있는데, 특히 기존 기계식 혼화공정이 필요로 한 긴 체류시간, 소음, 과도한 에너지의 소비 및 높은 유지관리 비용 등의 문제가 저감됨에 따라 수처리 공정에서 In-Line mixer의 사용이 권장되고 있다(Kim & Lee, 2006). 또한 Clark 등(1994)은 여러 혼화 장치의 혼화

\* Corresponding author Tel:+82-33-250-6241, Fax:+82-33-244-6239, E-mail:hyukjae68@hotmail.com(Kwon, H.J.)

효율을 추후공정인 침전성능으로 평가하였는데, 그 결과 기계식 혼화장치와 같은 효율을 얻는데 in-line mixer 또는 static mixer의 경우 더 작은 양의 응집제가 소요됨을 발표하였다. 박 등은 상용 PDM에서 중요한 운영인자로서 가압수/원수 유입속도의 비를 선정하였으며, 충분한 혼화효율을 생성시키기 위해서는 20~28(무차원)가 되어야 한다고 하였다(박영오 등, 2008a).

그러나 현재 도입되고 있는 관내 혼화장치의 경우에도 몇 가지의 단점이 나타나고 있는데, 첫째, 관내 혼화장치가 장착되어 있는 관의 재질이 대부분 불투명한 금속재질로 육안관찰이 어렵고, 둘째로 혼화강도(mixing intensity)의 산정 방법론이 기존 기계식 혼화장치와 상이하여 운전자에게 혼란을 주고 있다. 셋째로 관내 혼화장치의 경우 설계와 건설 과정에서 발생될 손실수두의 정량화 방법이 없어 기존 정수장의 혼화효율을 제고하기 위해 도입 시 이미 설계된 수리중단면도의 공정별 손실수두를 만족시키면서 효율을 낼 수 있는지가 항상 의심스러운 게 현실이다. 앞서 언급된 육안관찰이 어려운 문제와 혼화강도의 정량화 문제는 어느 정도 규모의 실험과 전산 유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics) 모사로 해결이 가능함을 박영오 등의 연구결과(박영오 등, 2008a)에서 제시하고 있다. 그러나, 발생될 손실수두의 문제는 관내 혼화 효율 자체의 문제이기보다는 장착된 관내 혼화장치의 전단과 후단 공정의 수두변화로 발생하는 수리거동의 변화로 연이어져 고액분리의 효율에 큰 영향을 미친다. 2008년 박 등(2008)은 침전 및 여과 공정 전단에서 발생하는 수두손실의 급격한 변화는 침전수 및 여과수의 탁질 누출에 큰 영향을 미침을 이미 규명하였다(박 등, 2008). Fig. 1에서 나타나듯이 통상적으로 관내 혼화장치의 전단은 착수정 또는 조절정(또는 pH조정제 또는 응집보조제를 투입하는 반응조)이며 후단은 분배수로, 응집지, 침전지 그리고 여과지로 구분된다. 이에 착수정과 분배수로 사이에 관내 혼화장치가 장착된다면 착수정과 침전지의 수위가 변하게 되며 수리거동의 변화가 초래되어 침전지내 침전효율이 상이하게 나타나게 된다.

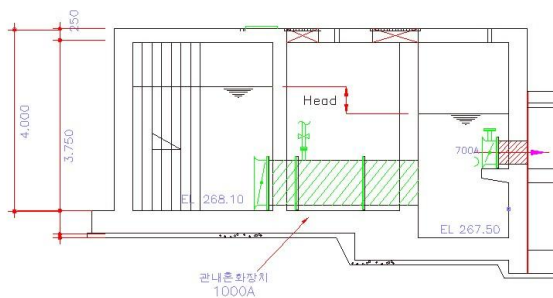


Fig. 1 관내 혼화장치로 발생되는 수두손실

따라서, 관내 혼화장치의 도입에 중요한 요소가 되는 전단과 후단의 손실수두발생 양상이 설계단계부터 예측되어야 전체적인 수처리 시스템의 성능에 영향을 평가할 수 있다. 이에 본 연구에서는 기존 기계식 혼화장치가 운영되던 정수장에 관내 혼화장치가 도입되는 경우 발생하는 수두손실을 전산유체역학으로 모사·예측하고 이를 검증하는 Wet test를 수행하였다. 또한 발생하는 수두손실에 영향을 미치는 인자 중에서 가장 중요한 요소로 판단되는 관내 유속에 대해 민간도 분석을 실시하여 유량 변동시 발생하는 관내 유속과의 관계를 규명하였다(식(1) 참조).

$$\Delta h = f(C, V, g, l, \dots) \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $\Delta h$ 는 관내 혼화장치를 중심으로 전단과 후단에 발생하는 수두손실,  $C$ 는 마찰, 관 축속, 관 확대 등의 관련 상수,  $V$ 는 관내 유속,  $g$ 는 중력가속도, 그리고  $l$ 은 관의 길이 등이다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 개선 PDM 수리 구조

Fig. 2는 D\_정수장에 도입된 관내 혼화장치를 도시한 것이다. 원수 및 가압수의 흐름방향 순으로 4개의 난류 발생 수리구조물을 설치하였다. 첫 번째는 급확대 오리피스 및 고정자(탄환 모양의 고정자), 두 번째로는 6개 원형 구멍이 천공된 다공 오리피스, 세 번째로는 오리피스 마지막으로는 다시 6개의 원형 구멍이 천공된 다공 오리피스 및 급축소 구조물을 장착하였다.

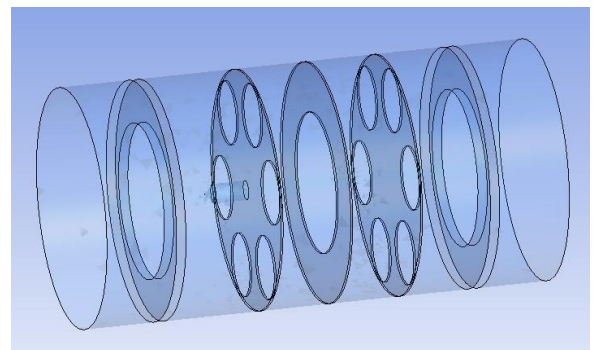


Fig. 2 관내 혼화장치 geometry

본 연구의 대상이 되는 관내 혼화장치는 1,000mm의 원수관에 연결되어  $\Phi 650$ mm의 오리피스,  $\Phi 265$ mm의 6개를 천공한 다공오리피스,  $\Phi 585$ mm의 오리피스,  $\Phi 265$ mm의 6개를

천공한 다공오리피스를 순차적으로 통과한 후  $\Phi 650\text{mm}$ 의 오리피스를 통과하여 1,000mm의 유출관으로 유출되는 구조로 구성되어 있다.

### 2.2 CFD 모사 방법론

본 연구에서 관내 혼화장치의 혼화효율에 영향을 미치는 혼화구역내의 흐름 특성을 가시화하기 위해 CFD 기법을 이용하여 원수의 유속이 각각 0.073m/sec, 0.145m/sec, 0.218m/sec, 0.264m/sec, 0.311m/sec, 0.358m/sec, 그리고 0.405 m/sec의 7개의 경우로 구분하여 모사하였다. CFD는 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FDM(Finite Difference Method)기법을 이용하여 작은 셀로 분할하여 각각의 경계 조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 본 연구에서는 대상으로 한 관내 혼화장치(Fig. 2 참조)에서 유체 거동과 발생하는 수두손실을 예측하기 위해 상용 전산유체 프로그램인 CFX 11.0을 사용하였다.

본 모델링에서 사용된 기본적인 지배 방정식은 다음 식(2)과 (3)로 나타낼 수 있다.

연속방정식

$$\nabla \cdot \rho \bar{V} = 0 \tag{2}$$

모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation)

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{V} + F \tag{3}$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $\bar{V}$ 는 속도(각 방향 속도성분),  $t$ 는 시간,  $P$ 는 압력 그리고  $\nu$ 는 동점성계수를 나타낸다.

식(2)과 (3)의 연속방정식과 모멘텀 방정식이 그리드(grid)로 분할된 관(pipe) 내의 약 20만개의 셀에서 해를 구하게 되는 것이다. 일반적으로 난류 상황에서 모멘텀 전달을 모델링하기 위해서는  $k-\epsilon$  모델이 대부분 사용되며, 본 연구에서는 난류가 등방성 방향으로 분포된다고 가정하는 Standard  $k-\epsilon$  모델의 발전형태인 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 모사 대상이 된 관에서는 자유 수면이 없는 만관이라 가정하였다. 관 벽면과 deflector는 No-Slip Condition을 적용하고,

잘 알려진 Prandtl 이론에 의해 유체의 점성에 의한 표면 박리현상이 발생한다는 가정을 적용하였다. 모사 조건은 앞서 언급한 바와 같이 추후 wet test 검증단계에서 실험할 원수 유입속도 유속 0.073~0.405 m/sec 범위내의 7개 경우로 모사하였다.

실제 치수대로의 형상 모델링 작업이 완료된 후 격자형성 작업을 수행하였으며, CFD해석을 위해 유입부분과 유출부분의 초기 경계조건의 설정이 필요하므로, 관내 혼화장치의 전단 및 후단에 걸리는 정수두압력의 차이를 상쇄시켜서 유출부분에서의 정수두(압력)를 0 Pa로, 유입부분의 관내 유속은 각각 7개의 경우에 따라 달리 적용하였다.

CFD모사를 완료한 뒤에는 관내혼화장치에 의한 마찰손실 수두를 구하기 위해 프로그램에서 Default로 정의된 Total Pressure function을 사용하여 유입부분과 유출부분의 Total Pressure(전압력)를 각각 계산한 후, 두 값의 차이를 구하여 손실수두(m)를 구하였다. 다음 식(4), (5)와 (6)은 손실수두계산에 이용된 수식들을 정의한 것이다.

$$TH_{Inlet} = \text{areaAve}(\text{Total Pressure})@Inlet / \rho g \tag{4}$$

$$TH_{Outlet} = \text{areaAve}(\text{Total Pressure})@Outlet / \rho g \tag{5}$$

$$H_{Loss} = TH_{Inlet} - TH_{Outlet} \text{ (m, 손실수두)} \tag{6}$$

여기서,  $TH_{Inlet}$ 은 유입부 단면 전압력수두(Total Pressure),  $TH_{Outlet}$ 은 유출부 단면 전압력수두,  $\text{areaAve}()$ 는 단면의 평균,  $@()$ 은 유입, 유출단면,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다.

### 2.3 Wet test

CFD 모사결과를 검증하기위해 본 연구에서는 실제 대상 정수장을 방문하여 wet test를 수행하였다. 실제 운영 중인 정수장에서 wet test 수행 시 조건별 유량변동이 필요하나, 실제 설비가동 및 정수가 생산중임을 감안하여 2개의 조건에 대해서 시행하였다.

시험 방법은 유입을 유량변동(0.264, 0.358 m/s)시킨 뒤 수위 및 유동의 안정화를 위해 20분 뒤, 관내혼화설비가 설치된 지점 전단인 착수정의 수위와 후단인 혼화지의 수위를 기준기(level)을 이용하여 2회 측량한 뒤 그 평균값을 취하여 수두차이를 계산하였다.

Table. 1 Simulation cases

Case No.		1	2	3	4	5	6	7	비고
Boundary condition	Inlet(m/s)	0.073	0.145	0.218	0.264	0.311	0.358	0.405	단면 평균 유속
	Outlet(Pa)	0							단면 평균 정수두

주) case 3과 6은 추후 Wet test를 통해 그 절대값을 검증하였음

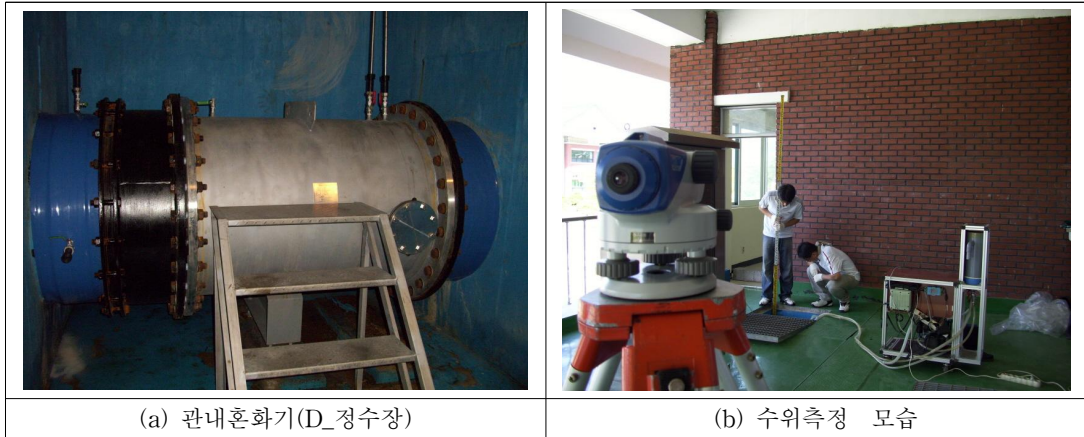


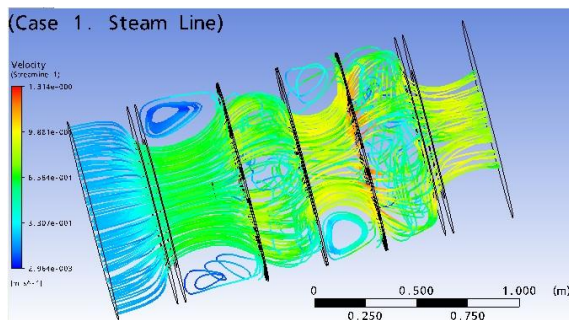
Fig. 3 D\_정수장 운전중인 관내 혼화장치 및 수위 측정 광경

### 3. 결과 및 고찰

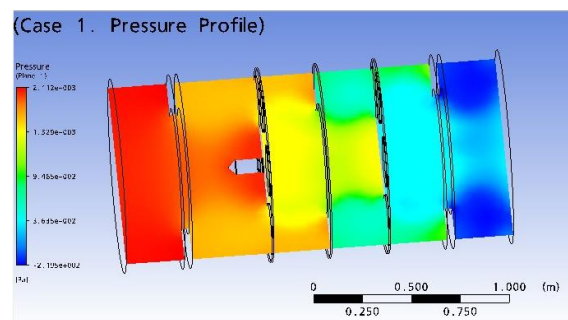
#### 3.1 CFD 모사 결과

아래 Fig. 4와 5는 D\_정수장에 설치되어 있는 관내 혼화장치에서 유입 유속이 0.218m/sec일 때와 0.358m/sec일 때 CFD 모사 결과를 도시한 것이다. 흐름의 특성은 본 연구에

초점이 되는 Streamline과 압력 분포(pressure profile)로 나타내었다. 유입 유속의 차이가 1.5배정도 남에도 불구하고 흐름 형태에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이러한 형태의 관내 혼화장치의 혼화효율 평가는 이미 박 등(2008)이 CFD해석과 실증실험으로 검증한 바 있다.(박대진 등, 2008) 기존 박 등(2008)연구 대상 관내 혼화장치와 크기와

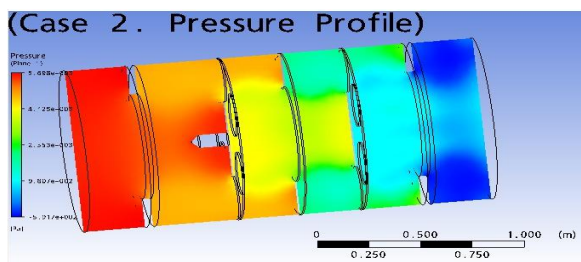


(a) Stream line (유입속도 = 0.218 m/s 조건)

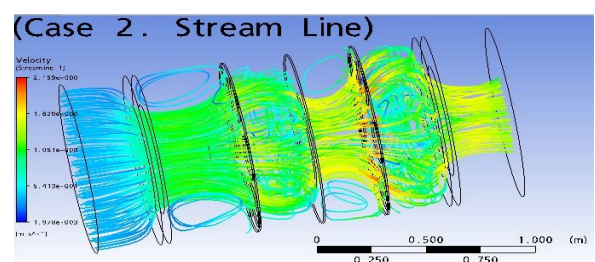


(b) Pressure profile (유입속도 = 0.218 m/s 조건)

Fig. 4 관내 혼화장치에서의 수리흐름 특성 (유입속도 = 0.218 m/s 조건)



(b) Pressure profile (유입속도 = 0.358 m/s 조건)



(a) Stream line (유입속도 = 0.358 m/s 조건)

Fig. 5 관내 혼화장치에서의 수리흐름 특성 (유입속도 = 0.358 m/s 조건)

유입유속은 상이하지만 각각의 오리피스가 혼화효율에 미치는 영향이 비슷한 것을 알 수 있다. 압력분포 및 streamline 거동을 통해 두 번째로 장착된 급속소확대 오리피스가 상대적으로 다른 오리피스의 역할에 비해 크다고 할 수 있지만 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

아래 Table 2는 상기에서 언급한 바와 같이 7개의 유입 유속 조건에 따라서 발생하는 손실 수두를 Fig. 4와 5와 같이 CFD모사 결과를 근거로 식(4), (5) 및 (6)과 같은 Total pressure function을 이용하여 정리한 것이다. 유입 유속이 증가함에 따라 손실수두는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며(Fig. 6참조), 현재 D\_정수장의 운영 유량조건(case 3)에서는 약 20cm의 손실수두가 발생하는 것으로 나타났으며, 설계 유량조건(case 6)에서는 약 54cm의 손실수두가 발생하는 것으로 예측되었다.

상기 Fig. 6에서 유입 유속과 발생하는 수두손실은 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 이론적으로 관내 유속과 발생하는 수두손실은  $C \frac{V^2}{2g}$  (V: 관내 유속)과 같은 관계이다. 지금 Fig. 6에서 나온 그래프로 fitting을 하는 경우 분자항에  $V^{1.42}$ 가 도출되고 차수는 1.42로 계산되었다.

### 3.2 Wet test 결과

아래의 Table 3은 관내 혼화장치가 운전되고 있는 D\_정수장의 운영유량과 설계유량조건에서 각각 실시된 Wet Test 결과를 정리한 것이다. 실험은 각각 2회씩 수행되었다. 결과에서 나타나듯이, 운영 유량(615m<sup>3</sup>/hr)조건에서 실측된 수

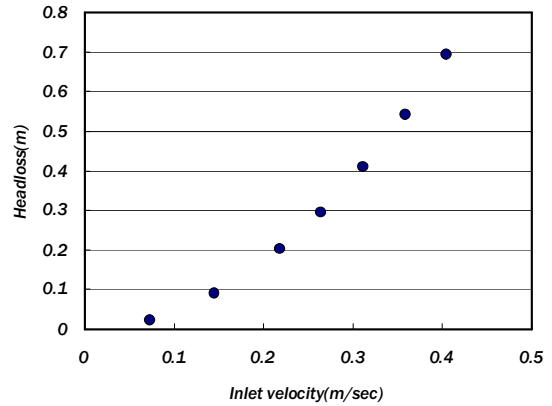


Fig. 6 유입유속 조건에 따른 관내혼화장치의 손실수두

두손실은 25cm, 설계 유량(1,020m<sup>3</sup>/hr)조건에서는 69cm로 측정되었다. 이는 Table 2와 Fig. 6에서 나타난 CFD 모사결과와 비교하면, 예측치가 실측치에 비해 다소 낮은 것으로 나타났다. 이는 CFD 모사 시 관벽을 "Smooth wall"로 처리해서 마찰 손실이 실제보다 작게 고려되었기 때문이다. 이는 시작품을 주물이나 사출로 제작한 것이 아니므로 정확한 관벽의 마찰계수를 구할 수 없어서 발생하였다. 마찰관련 상수는 손실수두에서 유속의 제곱에 곱하여지는 인자이므로 유속이 빠를수록 그 오차는 크게 나타난다. 그러나 이러한 오차는 설계 유속(1,020m<sup>3</sup>/hr)에서 약 18%정도로 나타나므로 보정값을 곱해 줌으로써 그 오차는 극복할 수 있다.

Table 2. The Results of CFD simulation

Case No.		1	2	3	4	5	6	7	비고
모사결과	유입부 전압력수두(m)	0.0242	0.095	0.215	0.315	0.437	0.579	0.741	
	유출부 전압력수두(m)	0.0016	0.006	0.014	0.020	0.028	0.037	0.048	
	손실수두(m)	0.0226	0.089	0.201	0.295	0.409	0.542	0.694	

Table 3. Wet test Results

구 분		구분	측량값(cm)				수두손실 (CFD) (cm)
			착수정	혼화지	수두손실		
					계산값	평균	
Case 3 (615m <sup>3</sup> /hr)	0.218 m/s	1차	384.6	412	27.4	25.2	20.1
		2차	233	256	23		
Case 6 (1,020m <sup>3</sup> /hr)	0.358 m/s	1차	331	401	70	69	54.2
		2차	180	248	68		

주) 노란색으로 highlighted된 부분은 추후 CFD모사결과와 Wet test결과로 비교 검증을 위한 조건임

#### 4. 결 론

본 연구는 최근 각 정수장에서 많이 도입되고 있는 관내 혼화장치의 중요한 설계 및 시공의 요소가 되는 전단과 후단의 손실수두발생 양상을 CFD모사 기법을 이용해 예측하는 방법론을 체계화하고 이를 검증하였다. 또한 발생하는 수두 손실에 영향을 미치는 인자 중에서 가장 중요한 요소로 판단되는 관내 유속에 대해 민간도 분석을 실시하여 유량 변동시 발생하는 관내 유속과의 관계를 규명하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 단위 공정 내에 유동해석에만 초점을 두었던 CFD를 이용하여 관내 혼화장치의 전단과 후단의 수두손실을 계산함으로써 도입·시공 전에 전단과 후단 반응조의 여유고를 확인하여 도입의 타당성을 검증할 수 있다. 본 연구의 대상이 된 D\_정수장의 경우 가동률이 낮아 전단 착수정에 여유고가 충분하기 때문에 본 관내 혼화장치의 적용이 타당한 것으로 판단된다. 그러나 전단 반응조의 여유고가 부족한 정수장의 경우 본 관내 혼화장치의 도입은 신중히 고려되어야 한다.

2) CFD로 관내 혼화장치의 도입시 발생하는 수두손실 계산의 방법론은 Total Pressure function을 사용하여 유입부분과 유출부분의 Total Pressure(전압력)를 각각 계산한 후, 두 값의 차이를 구하는 것으로 정의 내릴 수 있다. 정확한 관벽의 마찰관련 정보를 입력하는 경우 정확한 손실수두를 손쉽게 구할 수 있어 수계산에서 발생하는 오류를 제거할 수 있다. 본 연구에서는 CFD모사를 통해 발생하는 수두손실 예측치와 실측치간의 오차는 약 3~18%정도로 나타났다. 이는 정확한 관벽의 마찰관련 정보를 구하는 것이 불가능하므로 나타난 것이다.

3) 이제 CFD의 수처리 분야의 적용은 단위공정에 국한된 것이 아니라 공정과 공정이 연계된 시스템 최적화에 적용을 도모할 시기라 판단된다. 특히 관내에 장착되는 혼화장치의 경우 아무리 혼화효율이 뛰어나더라도 수두손실의 발생이 많은 경우 적용은 불가능하다. 정수처리공정은 발생하는 수두손실을 이용한 고액분리가 기초임을 감안할 때 이러한 적용의 확장성은 향후에도 그 유용성이 높지 평가되어야 한다.

#### 참고문헌

1. 박영오, 박노석, 김성수, 김기돈, 임경호 (2008) CFD모사 기법을 이용한 Pump Diffusion Mixer내의 응집제 확산 분포에 대한 평가, *상하수도학회지*, 22(1), pp.49-63.
2. 박노석, 임성은, 김성수, 황준식, 정남정 (2009) 일 유입유량 변동과 공정내 표면과 전파속도 상관성 분석, *상하수도학회지*, 22(2), pp.239-243.
3. Hudson, H. E. and Wolfner, J. P., (1967) Design of Mixing and Sedimentation Basins *Journal of AWWA* 59(10), pp. 1257~1268
4. Vrale, L. and Jorden R. M. (1971) Rapid Mixing in Water Treatment *Journal of AWWA* 63(1), pp. 52~58
5. Kawamura. S. (1991) Integrated Design of Water Treatment Facilities, *JOHN WILEY & SONS, INC.* New York
6. Hyun-Chul Kim and Seockheon Lee. (2006) Pump diffusion flash mixing for improving coagulation process in drinking water treatment, *Separation & Purification Technology*, 52, pp. 117~125
7. Clark M.M., Srivastava J.S., Lang R.R., Trussell L.J., McCollum D., Bailey, J.D. Christie, G. Stolarik (1994) Selection and Design of Mixing Processes for Coagulation, AWWA Research Foundation, Denver, USA.
8. 박영오, 김기돈, 박노석, 임재림, 임경호 (2008) Pump Diffusion Mixer에서 압력수량에 따른 응집제 확산분포 특성, *상하수도학회지*, 22(1), pp.65-71.
9. 건설교통부 (2005), 상수도시설기준
10. No-Suk Park and Heekyung Park, 2002, 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,
11. 박대진, 박영오, 박노석, 김성수, 왕창근 (2008) CFD모사 기법을 이용한 관내 혼화장치내 흐름 특성 평가, *상하수도학회지*, 22(3), pp.351-358.