

유공벽을 이용한 우류식 염소접촉조 사류 저감 방안 연구

Study on Methodology for Reducing Dead Zone Flow within Chlorine Contactor Installing Porous Baffles

박현오¹ · 박노석^{1*} · 차민환² · 김사동² · 원찬희³

Hyun-Ho Park¹ · No-Suk Park^{1*} · Min-Wan Cha² · Sa-Dong Kim² · Chan-Hee Won³

1 한국수자원공사, 2 (주)젠트로, 3 전북대학교 환경공학과

(2010년 7월 28일 접수 ; 2010년 10월 6일 수정 ; 2010년 10월 8일 채택)

Abstract

From the results of tracer test for the existing chlorine contactor in Y water treatment plant, T_{10} and T_{10}/T were calculated as 130 min and 0.16, respectively. Therefore it required the modification schemes for improving hydraulic efficiency, surrogated by T_{10} and T_{10}/T , and disinfection performance. In this study, in order to reduce dead zone within contactor, the installation of porous baffles in the near of each corner was suggested and verified using transient CFD(Computational Fluid Dynamics) simulation technique and tracer tests on dynamic condition. From the results of simulation and tracer tests, it was revealed that porous baffles installed have been effective to reduce dead zone within contactor, and increase plug flow fraction.

Key words : Chlorine contactor, transient CFD(Computational Fluid Dynamics), Dead zone, Porous baffles

주제어 : 염소접촉조, transient CFD 모사, 사류지역, 유공 정류벽

1. 서론

소독은 수처리 공정의 가장 마지막 단계로써 미생물을 제거하는 가장 기본적이고 효율적인 수단이다. 그러나 소독의 효율을 높이기위해서 과량의 소독제를 사용하는 경우 소독 부산물의 생성이 증가되는 문제가 발생되기도 한다(신은희 등, 2008a; 신은희 등, 2008b; 이승재, 2007; 신은희 등, 2005) 일반적으로 소독의 정도는 CT값, 즉 소독능으로 평가하는데, 이 때 C는 잔류 소독제의 농도를 의미하며, T는 정수지에서 10%의 유체가 유출되는 시간 T_{10} 값을 나타낸다. 염소 접촉조에서 수리학적 거동 및 효율을 평가하는 지표로는 T_{90}/T_{10} (Morril index, T_{10}/T , dispersion

number 등이 있으나, 일반적으로 T_{10}/T 값으로써 나타내고 있다.

이미 이제까지 많은 연구자들은 염소 접촉조의 소독능에 영향을 미치는 인자들을 조사 연구하였는데, 그 중 Hannoun (1997, 1998)은 지의 형상, 도류벽의 유무, 유입 및 유출부의 위치와 속도, 유입부 근처의 정류벽 유무 등이 T_{10}/T 값에 영향을 미친다고 하였으며, Shilton과 Harrison(2003)과 Clark 등(1999)은 유입 및 유출부의 위치가 단락류에 영향을 주지만, 도류벽이 설치된 경우에는 그 영향이 작다고 발표하였다(Shilton et al., 2003; Clark et al., 1999). 또한 신은희 등(2005)의 연구에서는 장방형 정수지에서 형상비(Shapr factor, 정수지의 가로 길이/세로 길이)를 정의하여 이 값이 증가할수록 T_{10}/T 값이 증가

* Corresponding author Tel:+82-42-870-7525, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: nspark@kwater.or.kr(Park N.)

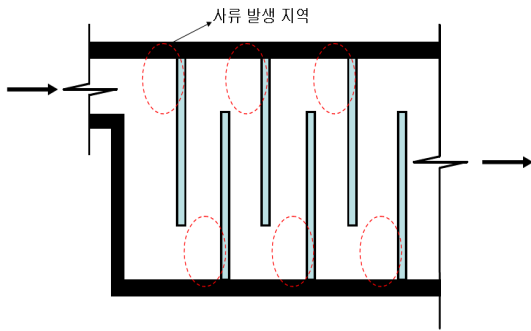


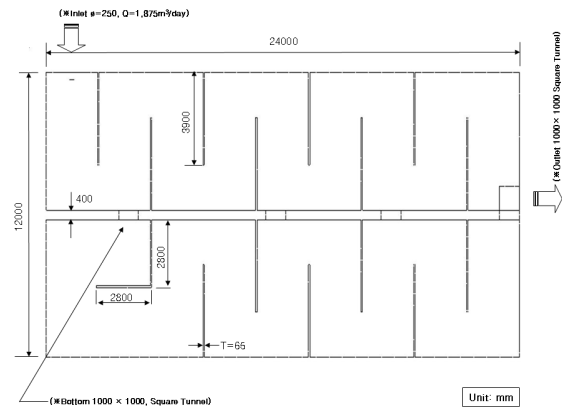
Fig. 1 Hydraulic Serpentine reactor

함을 발표하였다. 다른 연구자들은 정류벽 및 내부 도류벽의 설치로 T_{10}/T 값이 증가하는 경향(Hannoun et al., 1998; Lee et al., 2006)을 나타내었으며, 도류벽을 추가로 설치하거나 장폭비를 증가시키는 것은 수리학적 효율을 향상시키는데 도움이 된다는 연구결과를 T_{10}/T 의 증가로 증명하였다. (Clark et al., 1999; Bishop et al., 1993)

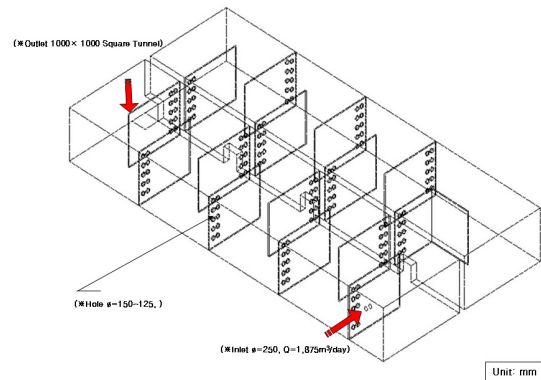
현재 전 세계적으로 통상 염소 접촉조는 수리학적 우류식 (serpentine channel) 반응조로 설계 및 시공되고 있다. 직육면체의 반응조에 장폭비를 증가시키기 위해 도류벽을 측면 벽에 수직으로 설치하여 plug flow 흐름을 유도하고, 물 흐름의 경로(pathway)를 제고시키는 방안이 일반적이다. 이러한 반응조 대부분의 도류벽은 측면 벽에 수직으로 설치됨에 따라 면과 면이 만나는 구석은 흐름에 의한 사류 지역(dead zone) 및 정체구역이 발생한다(Fig. 1참조). 이제까지 도류벽이 설치된 우류식 반응조에서 발생하는 사류의 특성 분포에 관한 연구는 몇몇 연구자에 의해 수행되어 왔다(이승재, 2007; Wang & Roger 1998; Hannoun et al., 1998). 그 중에서 Hannoun 등(1998)은 사류지역을 흐름의 반대 방향으로 흐르는 흐름으로 정의하였고 이승재(2007)는 이러한 정의에 따라 실제 우류식 정수지내의 사류지역을 추적자 실험을 통해 측정하고 CFD를 이용하여 분석하였다.

이제까지 우류식 염소 접촉조의 경우 도류벽 설치의 최적화(갯수 및 장폭비의 증가) 및 T_{10}/T 값의 제고에 관한 연구는 연구자들에 의해 수행되어 왔으나, 근본적으로 수직면의 구석에서 발생하는 사류의 저감 방안에 대한 고려는 전무한 실정이다. 단지 시공시 구석면을 곡면으로 시공하거나 45° 방향으로 평면을 두어 사류지역이 발생하는 공간을 없애는 방안을 마련해왔다. 그러나 이러한 수리구조의 변경은 궁극적으로 체류시간의 감소를 유발하여 염소 접촉시간을 감소시키는 결과를 초래하게 된다.

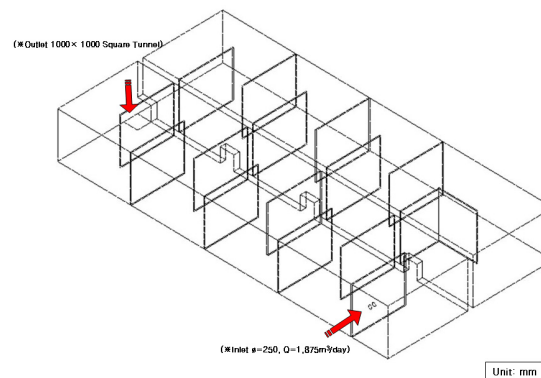
이에 본 연구에서는 염소 접촉조내 도류벽과 측면 벽이



(a) Top-view



(b) Baffles with Porous Baffle



(c) Baffles without Porous Baffle

Fig. 2 Geometry of the Chlorine Contactor

만나는 구석공간에 유공벽을 설치하여 정체되는 사류지역의 흐름을 저감시키면서도 염소접촉시간의 감소를 초래하지 않는 방안을 제안하고 현장 추적자 실험과 CFD 모사를 통해 이를 검증하고자 하였다. 또한 동일한 수리 구조를 가지는 염소 접촉조를 대상으로 사류 저감을 목적으로 하는 유공벽의 유무에 따라 T_{10}/T 값을 비교함으로써 향후 수리 구조 변경 안의 적용 타당성을 조사하였다.

2. 대상 시설 현황 및 실험방법

2.1 염소 접촉조 현황

본 연구에서 대상으로 삼은 정수장은 경북 예천에 있는 Y정수장이다. 다음 Fig. 2는 Y정수장내에 위치한 염소 접촉조의 geometry 도면이다. 염소 접촉조의 총 용적(V)는 1,071 m³이며, 추적자 실험을 수행하는 동안의 유입유량(Q)은 1,875 m³/day이었다. Fig. 2(a)에서와 같이 지내에는 현재 15개의 도류벽이 설치되어 있으며, 이에 따른 장폭비는 21:1, 상수도시설기준에 따라 이 장폭비에 상응하는 T₁₀/T값은 0.6으로 도출된다. 그러나 본 연구의 대상이 되는 염소 접촉조의 경우, 중간 도류벽이 설치되어 있고 도류벽 아랫 부분에 4개의 사각 구멍이 설치되어 있어 상기 도출된 장폭비의 기준을 적용하기에는 의문점이 있다. Fig. 2(b)는 구석에서 발생하는 사류 저감을 위해 측면 벽과 수직으로 만나는 도류벽의 너비 1m에 직경 125~150mm 구멍 10개를 뚫은 유공벽을 설치한 것이고, Fig. 2(c)는 통상 유공벽의 설치 없이 도류벽을 시공한 것이다. 기존에는 Fig. 2(c)와 같이 유공이 없는 도류벽이 설치되어 있다가, Fig. 2(b)와 같이 수리 구조를 변경하였다. Fig. 2(a)에서 나타나듯이 물의 유입은 상부 측벽에서 250mm 유입 파이프를 통해서 유출은 우측 바닥 정사각형 모양의 홀을 통해서 나간다. 염소 접촉조 중간에는 콘크리트 소재로 된 내력벽이 기존에 설치되어 있으며, 내력벽 아래 부분에 물이 소통될 수 있는 1,000mm×1,000mm의 정사각형 구멍이 4개 나있다.

2.2 추적자 실험

추적자 실험을 수행하기 위하여 적절한 추적자를 선정해야 하는데, 추적자는 실험하는 동안 물속에 있는 다른 물질과 반응을 하지 않는 비반응성 물질, 즉 보존성 물질이어야 한다. 일반적으로 추적자는 불소(fluoride, F), Rhodamine WT, 리튬(lithium, Li), 나트륨(sodium, Na), 염소(chloride, Cl), 그리고 칼슘(calcium, Ca) 등이 사용된다(Teefy, 1996). 본 연구에서는 분석의 용이성 및 안정성의 이유로 불소를 추적자로 이용하여 실험을 수행하였다. 실험은 Fig. 2에 나타난 유입관로 불소 원액(NaF, 함량 24%) 4L를 정수지 유입관로 pulse input 방법으로 투입한 후, 1분 간격으로 유출배관에서 불소농도를 측정하였다(Kawamura, 2000; Hudson, 1981). 불소농도는 DR2010(Hach, USA)을 이용하여 발색법으로 측정하였으며, 시료채취 간격과 실험시간을 수리학적 체류시간의 0.1배 이하 및 2배 정도로 각각 선정하였다. 추적자 실험 수행 동안 Y정수장 염소 접촉조의 수리학적 체류시간(T)은 822분이었다.

2.3 Transient CFD 모사 기법

전산유체해석(CFD)은 수작업으로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 수치해석(Numerical Method)기법을 이용하여 작은 셀로 분할하여 각각의 경계조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 본 연구에서는 Y정수장 내 염소 접촉조를 대상으로 추적자 실험을 해석하기 위해 상용 전산유체 프로그램인 CFX 11.0을 사용하였다.

본 연구에서는 대상 염소 접촉조의 흐름 및 추적자 실험을 모사하기위해 전산유체역학(CFD) 기법을 이용하여 조내의 수리거동을 모사하였다. Transient 모사 시 유출관로를 통해 유출되는 불소(추적자)의 농도는 유출관로 단면의 시간대별 평균농도를 관측하였으며, 총 모사시간은 15시간을 할당하였다. Pre-processing에 있어서 1초마다의 불소 유출농도가 저장되도록 하였다.

2.3.1 지배방정식

유입수가 염소 접촉조 내로 유입되어 유출구를 통해서 유출되는 과정에서 유체의 물리적인 성질의 변화는 아래 연속방정식과, 운동량 방정식 등의 지배방정식에 의해 설명될 수 있다.

본 모델링에서 사용되는 기본적인 식은 아래의 두 식이다. 연속방정식

$$\nabla \cdot \rho \bar{V} = 0 \quad \text{식 (1)}$$

모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation)

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

여기서, ρ 는 밀도, \bar{V} 는 속도(각 방향 속도 성분), t 는 시간, P 는 압력 그리고 ν 는 동점성 계수를 나타낸다.

2.3.2 난류 모델링

일반적으로 난류 상황에서 모멘텀의 전달을 모델링하기 위해서는 k- ϵ 모델이 대부분 사용되며, 본 연구에서는 난류가 등방성 방향으로 분포된다고 가정하는 Standard k- ϵ 모델을 사용하였다.

2.3.3 경계 조건

본 연구에서는 염소 접촉조의 자유수면은 평면적이며 마찰이 없다고 가정하였다. 그 이유는 공기과 접촉하고 있는 자유 수면에서의 마찰력은 무시할 정도로 작기 때문이다. 그리고 측벽면과 바닥면 그리고 내부 도류벽의 표면은 No-Slip Condition을 적용하고, 잘 알려진 Prandtl 이론에 의해 유체의 점성에 의한 표면 박리현상이 발생한다는 가정을 적용하였다(Currie, 1993).

2.3.4 추적자 주입 조건

본 연구에서 추적자 실험을 CFD로 모사하기 위해 추적자의 주입은 'step function'으로 주입됨을 가정하였다. 물리적으로 4L의 불소를 유입관로에 주입하는 데에 있어서 t=0 시점부터 불소가 유입관로를 통해 주입되고 나서 물이 유입됨을 가정하는 방법이다. 이를 위해서는 4L의 불소가 유입관로의 통수단면적을 모두 지나가는 시간을 계산하여야 하는데 그 시간은 4.3 초가 도출되었다. 이에 아래 식(3)과 같이 염소가 주입되는 식을 수립하였다.

$$\frac{dC}{dt} = step(4.3 - t/1(sec))(kg/m^3) \quad \text{식 (3)}$$

여기서, C는 무차원의 불소 농도를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 추적자 실험

다음 Fig. 3은 Y정수장 염소 접촉조(Fig. 2(b)); 유공벽이 있는 경우를 대상으로 유입유량(Q)이 1,875m³/day이 있을 당시 추적자 실험을 한 결과(C-curve)와 그러한 상황을 Transient로 CFD모사한 결과이다. 여기서 현장에서 실험한 추적자 회수율은 77.2%로 계산되어 본 추적자 실험의 의미가 있음을 알 수 있었다. Teefy와 Singer(1990)는 일

반적으로 염소 접촉조를 대상으로 추적자 실험을 수행하는 경우 회수율이 70% 이상이 되어야 의미 있는 실험으로 간주하였다.

Fig. 3에서 y축은 염소 접촉조 유출부에서 측정된 추적자(불소)의 농도를 무차원으로 나타낸 것이고, x축은 측정시간을 나타낸 것이다. 본 C-curve에서 추적자 실험을 통한 실측값으로부터 T₁₀/T값은 0.15, CFD모사 결과로부터 도출된 T₁₀/T값은 0.16이 계산되었다. 두 그래프의 모양과 peak치의 농도 및 T₁₀/T값(오차 2.6%)을 비교하였을 때 CFD모사가 실험값과 거의 일치하는 양상을 보이고 있다.

3.2 CFD 모사 결과

다음 Fig. 4와 5는 기존 Y정수장 염소 접촉조를 대상으로 Fig. 2(b)와 (c)에서 도시한 바와 같이 기존 유공벽이 없는 경우와 유공벽이 있는 경우의 CFD모사 결과를 도시한 것이다. Fig. 4와 5에서 도시한 CFD모사 결과는 정상상태(steady state)로 모사한 결과이다.

상기 Fig. 4와 5의 비교시 CFD를 이용하여 정상상태로 모사하였을 경우, 유공벽이 설치된 접촉조와 유공벽이 설치되지 않은 접촉조의 흐름 특성에 있어서 뚜렷한 차이점을 발견할 수 없었다.

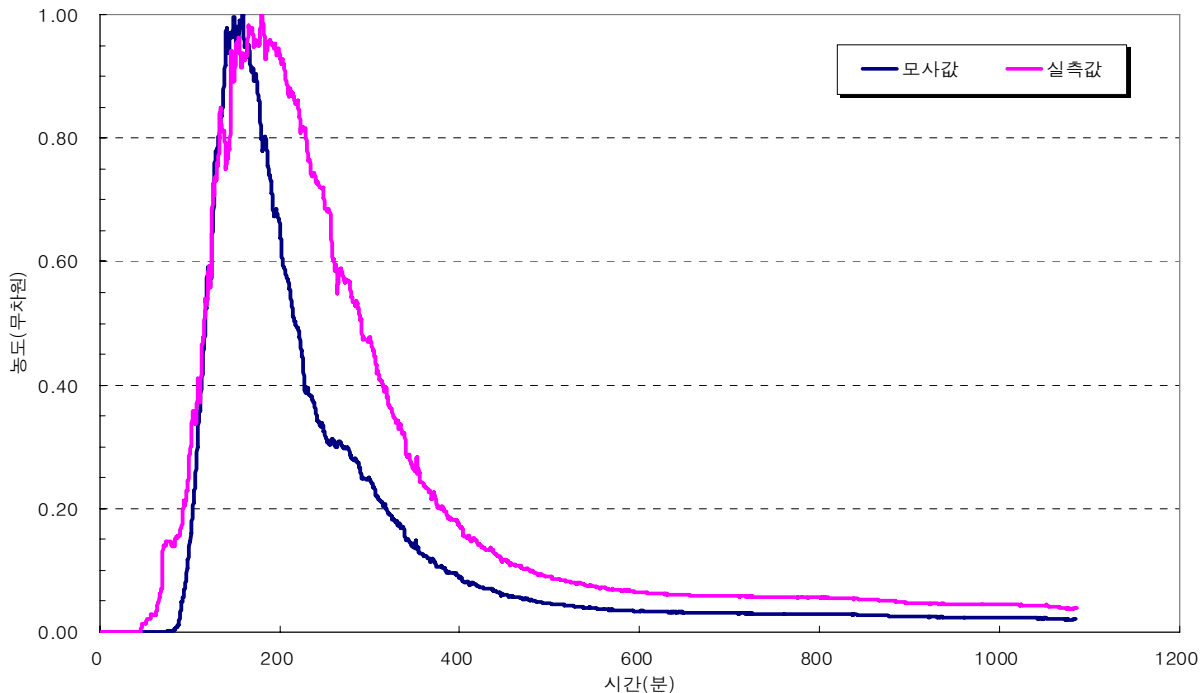
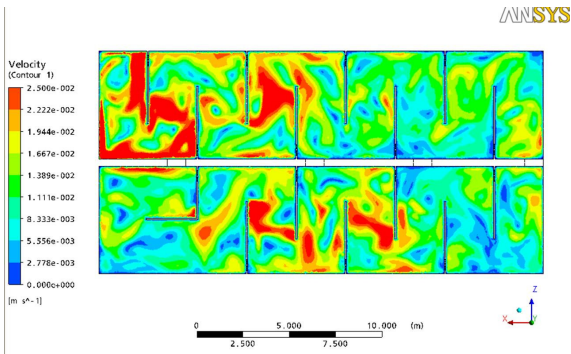
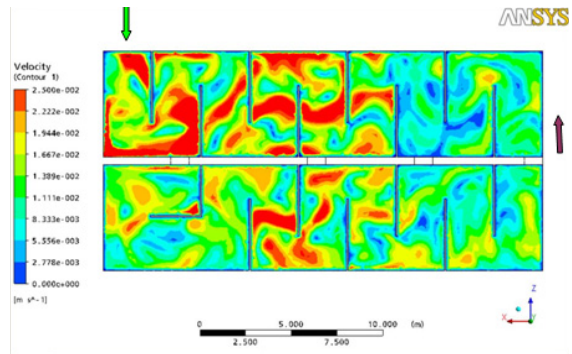


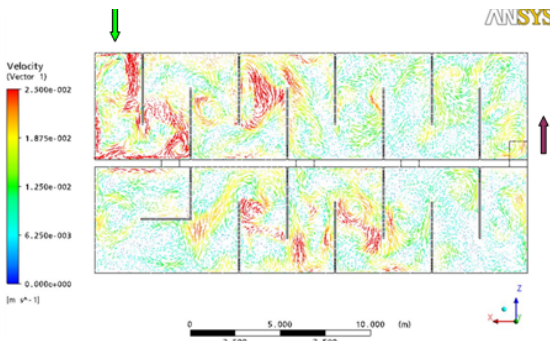
Fig. 3 The results of tracer test and CFD simulation(C-curve)



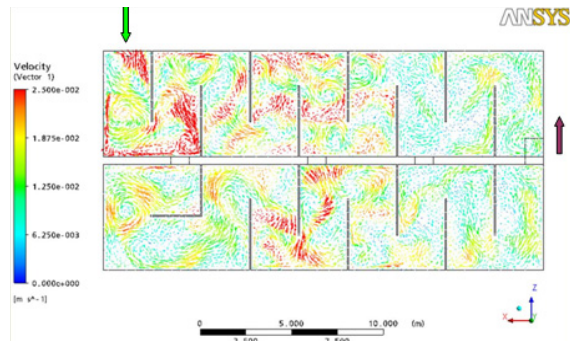
(a) velocity contour (바닥에서 1.6m 지점)



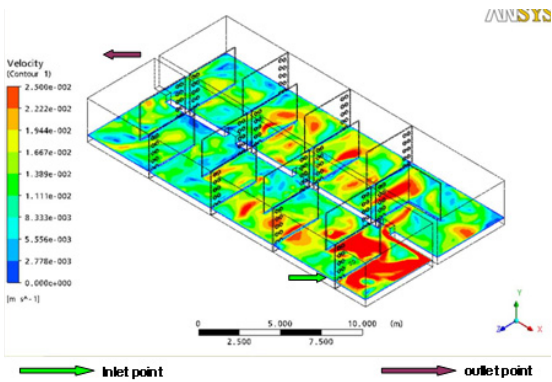
(a) velocity contour (바닥에서 1.6m)



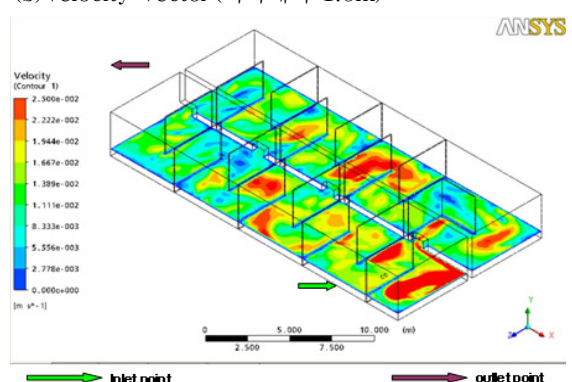
(b) velocity vector (바닥에서 1.6m 지점)



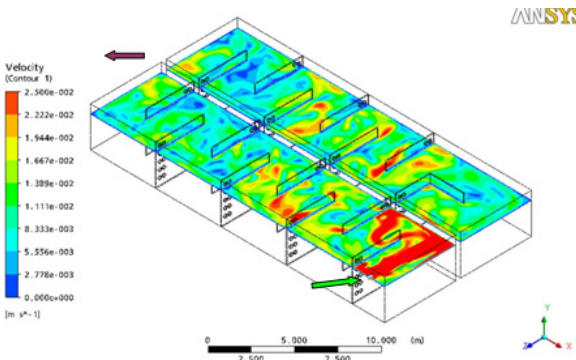
(b) velocity vector (바닥에서 1.6m)



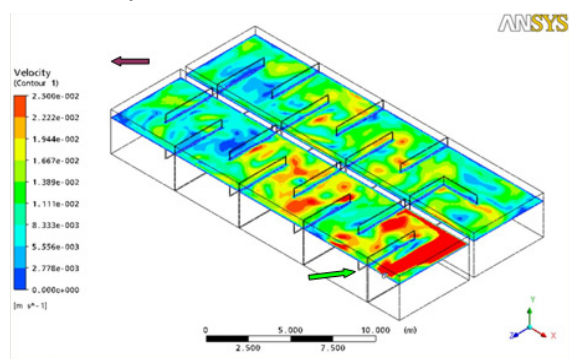
(c) velocity contour (바닥에서 0.5m)



(c) velocity contour (바닥에서 0.5m)



(d) velocity contour (유입구 높이)



(d) velocity contour (유입구 높이)

Fig. 4 The results of CFD simulation in the case with porous wall

Fig. 5 The results of CFD simulation in the case without porous wall

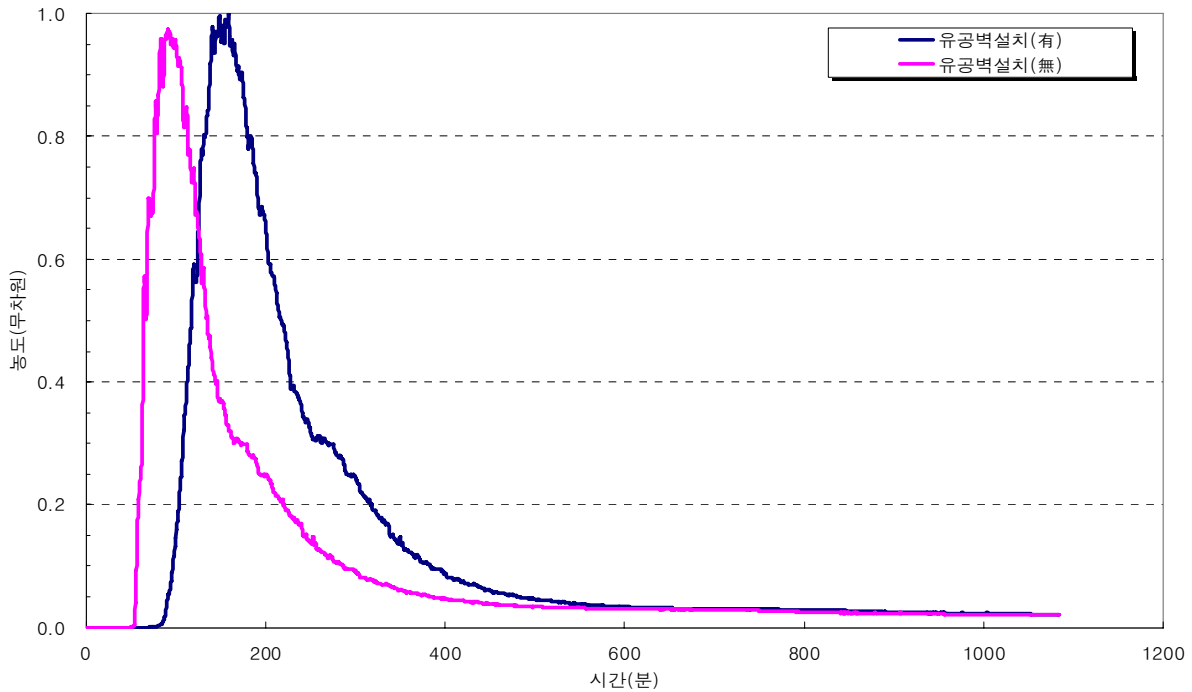


Fig. 6 Comparison between the cases with porous wall and without porous wall

단 Fig. 4(b)와 Fig. 5(b)의 velocity vector로 유속을 나타낸 경우를 비교할 때, 유공벽이 설치되지 않은 경우 (Fig. 5(b)) 좌측 하단부분에 와류(vortex)가 강하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 와류는 접촉 반응조 내부의 유효용량(effective volume)을 저감시키는 사류로 간주할 수 있다. 이에 본 연구에서는 보다 정확한 유공벽 설치의 효과 및 각 반응조의 흐름 특성을 파악하기 위해 비정상상태(transient) 조건에서 “추적자 실험”을 모사하였다. 다음 Fig. 6은 유공벽이 설치된 경우와 유공벽이 설치되지 않은 경우 추적자 실험을 CFD로 모사한 결과를 C-curve로 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 나타낸 바와 같이, 유공벽이 설치되지 않은 경우가 유공벽이 설치된 경우에 비해 그래프의 모양 측면에서 CSTR(Complete Stirrer Tank Reactor)에 가깝다. 또한 추적자의 유출 시간이 유공벽이 설치된 경우가 더 늦음도 알 수 있다. 상기 그래프에서 더 자세한 정보를 추출하여 흐름의 특성을 파악한 것이 다음 Table. 1에 정리하였다.

Table. 2에서 정리한 바와 같이 T_{10}/T 값이 유공벽이 설치된 경우가 설치하지 않은 경우에 비해 높게 나와 상대적으로 plug flow흐름에 근접함을 알 수 있다. 또한, 도출된 Morill index(1에 가까울수록 plug flow를 나타냄) 및 Modal index(1에 가까울수록 plug flow, 전체흐름에 대한 plug flow의 분율)로 판단하건데, 유공벽이 설치된 경우 사

Table. 1 Characteristics of Flow within both contactors

구 분	CFD 결과	
	유공벽 설치	유공벽 미설치
T_{10}	130(min)	78(min)
T_{10}/T	0.16	0.1
Morill index (T_{90}/T_{10})	4.21	7.72
Modal index (T_p/T)	0.19	0.11

T_{90} : 90%가 유출되는 시간
 T_{10} : 10%가 유출되는 시간
 T_p : mode 값(최고 값의 t)

류지역을 저감하고 유효용량 감소가 상대적으로 작아 접촉조 효율을 증가시키는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 염소 접촉조내 도류벽과 측면 벽이 만나는 구석공간에 유공벽을 설치하여 정체되는 사류지역의 흐름을 저감시키면서도 염소접촉시간의 감소를 초래하지 않는 방안을 제안하고 현장 추적자 실험과 CFD 모사를 통해 이

를 검증하고자 하였다. 또한 동일한 수리 구조를 가지는 염소 접촉조를 대상으로 사류 저감을 목적으로 하는 유공벽의 유무에 따라 T_{10}/T 값을 비교함으로써 향후 수리구조 변경안의 적용 타당성을 조사하였다. 이에 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 염소 접촉조내 도류벽과 측면 벽이 만나는 구석에서 발생하는 사류를 저감하기 위해 유공벽을 부분적으로 적용하는 것은 사류지역을 저감하고 유효용량 감소가 상대적으로 작아 접촉조 효율을 증가시키는 것으로 사료된다.
- 2) 특히, 동일한 접촉조내 유공벽을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 대상으로 추적자 실험 및 CFD 모사를 수행 결과로부터 T_{10}/T 값이 증가하여 plug flow에 가까운 흐름을 초래하여 염소 접촉 효율의 제고를 기대할 수 있다.
- 3) 이제까지 염소 접촉조를 대상으로 수행되어온 CFD 모사에 있어서 정상상태 흐름 해석으로는 충분한 흐름 특성에 관한 정보를 얻을 수 없음에 반해 비정상상태의 흐름해석으로 추적자 실험을 모사하는 경우 장시간의 manhour 투입 없이 정확한 정보를 얻을 수 있다.
- 4) 염소 접촉조 설계 및 개선안 제시에 주로 사용되었던 CFD 모사 기법 중에서 transient로 해를 구하는 방법론을 정립, 활용함으로써 수리구조의 개선 시공 이전에 많은 정량화된 흐름 특성 및 정보를 얻을 수 있어 사전 타당성을 평가할 수 있다.

참고문헌

- 신은허, 이승재, 김성훈, 박희경, (2008a) “정수지 내부 단락류 발생평가 :Part A. 정수장 내부 단락류 분석을 통한 장폭비와 형태가 T_{10}/T 값에 미치는 영향 연구”, 상하수도학회지, Vol.22, No.2, pp.105-112.
- 신은허, 이승재, 김성훈, 박희경, (2008b) “정수지 내부 단락류 발생평가 :Part B. 내부 단락류 평가 방법의 현장 적용을 통한 내부 도류벽과 정류벽을 이용한 T_{10}/T 증가 분석”, 상하수도학회지, Vol.22, No.1, pp.113-120.
- 이승재, 신은허, 김성훈, 박희경, (2007) “정수지내 사류지역의 수리학적 효율에 미치는 영향 연구” 상하수도학회지, Vol.21, No.2, pp.177-185.
- 신은허, 김성훈, 박희경, 안재찬, 최재호, 최영준, (2005) “정수지의 형상과 유입유량이 T_{10} 에 미치는 영향연구” 상하수도학회지, Vol.19, No.6, pp.819-826.
- 환경부, 2004, 상수도시설기준
- Bishop M.M., Morgan J.M., Cornell B., and Jamison D.K. (1993) "Improving the Disinfection Time of Water Plant Clearwell", *Journal of AWWA*, 85(3), pp.68-75.
- Shilton A. and Harrison J. (2003) "Development of guidelines for improved hydraulic design of waste stabilization ponds" *Water Science and Technology*, 48(2), pp.173-180
- Clark. M.M., Ducoste J. and Burns C. (1999) *Improving Clearwell Design for CT Compliance*, AWWARF and AWWA
- Hannoun I.A. and Bouls F. (1997) "Optimizing distribution storage water quality :A hydrodynamic approach", *Appl. Math. Modelling*, 21, pp.495-502.
- Hannoun I.A., Bouls F. and List J. (1998) "Using hydraulic modeling to optimize contact time", *Journal of AWWA*, 90(8), pp.77-87
- Hong Wang and Roger A. Falconer (1998) "Simulating Disinfection Processes in Chlorine Contact Tank Using Various Turbulence Model and High-Order Accurate Difference Scheme", *Water Research*, 32(5), pp 1529-1543
- Lee Seungjae, Shin Eunher, Kim Sunghoon and Park Heekyung (2006) "Improving Hydraulic Efficiency of Clearwell Using CFD Simulation", 15th Joint KKNN Symposium, Kyoto, Japan.
- Teefy, S.M., and Singer, P.C. (1990) “Performance and Analysis of Tracer Tests to Determine Compliance of a Disinfection Scheme with the SWTR” , *Journal of AWWA*, Vol.82, No.12, pp.88-98.
- Kawamura, S. (2000) *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, 5th ed., John Wiley&Sons, New York
- Hudson, H. E. Jr (1981) *Water clarification Process, Practical Design, and Evaluation*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Currie, I. G., (1993) *Fundamental mechanics of fluids*, McGraw-Hill, New York.