



벽면 조도계수가 염소 접촉조 수리특성에 미치는 영향 연구

Examining the effects of wall roughness on the hydraulic characteristics of chlorine contactor using Transient CFD Simulation Technique

채선하^{1*} · 임영택¹ · 차민환² · 김종오³

Seon-Ha Chae^{1*} · Youngtaek Lim¹ · Min-Whan Cha² · Jong-Oh Kim³

1 한국수자원공사, 2 (주)젠트로, 3 강릉원주대학교 토목공학과

(2011년 2월 8일 접수 ; 2011년 10월 12일 수정 ; 2011년 10월 14일 채택)

Abstract

In this study, in order to investigate the effects of wall roughness on the hydraulic characteristics of chlorine contactor, CFD simulation and tracer tests were conducted for both of reactors whose walls are made of concrete and lined with PE(Poly Ethylene). In the case of walls contacted with water being lined with PE (relatively lower roughness), the flow within reactor is closer to plug flow than that in the case of concrete walls (relatively higher roughness). Especially, the longer tail of C-curve from the results of transient CFD simulation can tell that Morill index in the case concrete walls is much higher than that in the case of walls be lined with lower roughness material.

Key words : chlorine contactor, transient CFD(Computational Fluid Dynamics), hydraulic characteristics, roughness

주제어 : 정수지, transient CFD 모사, 수리학적 특성, 조도계수

1. 서론

소독은 수처리공정의 가장 마지막 단계로써 미생물을 제거하는 가장 기본적이고 효율적인 수단이다. 그러나 소독의 효율을 높이기위해서 과량의 소독제를 사용하는 경우 소독 부산물의 생성이 증가되는 문제가 발생되기도 한다(신은허, 2008a; 신은허, 2008b; 이승재, 2007; 신은허, 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. 정수지에서 수리학적 거동 및 효율을 평가하는 지표로는 T_{90}/T_{10} (Morill index, T_{10}/T , dispersion number 등이

있으나, 일반적으로 T_{10}/T 값으로써 나타내고 있다.

이미 이제까지 많은 연구자들은 정수지의 소독능에 영향을 미치는 인자들은 조사 연구하였는데, 그 중 Hannoun(1997, 1998)은 지의 형상, 도류벽의 유무, 유입 및 유출부의 위치와 속도, 정류벽의 유무 등이 T_{10}/T 값에 영향을 미친다고 하였으며, Shilton 등(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).

현재 우리나라의 대부분의 정수지들은 장폭비가 10에서 20사이로 설계되어 있어 0.4에서 0.5사이의 낮은 T_{10}/T (은 이론적 체류시간)을 가지는 것으로 조사되었다. (신은

* Corresponding author Tel:+82-42-870-7524, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: shchae@kwater.or.kr(Chae, S.)

히, 2008b). 이에 환경부에서는 각 정수지내의 T_{10}/T 값을 0.6이상으로 제고시킬 것을 권고하고 있으며, 장폭비를 기준으로 환산계수의 도출방법 및 적정성을 상수도시설기준에 기술하고 있다 (환경부, 2004). 일반적으로 정수지의 소독능을 향상시키기 위해 도류벽을 추가 설치함으로써 지내 사류지역을 감소시키고 plug flow의 흐름을 유도해내어 T_{10}/T 를 증가시키는 방안이 적용되고 있다.

한편, 이제까지 염소 접촉조를 포함한 정수처리공정은 콘크리트 구조물로 구성되었다. 특히, 염소주입 이후 염소접촉을 목적으로 하는 접촉조의 경우, pH 11을 상회하는 콘크리트 표면과 pH 7.5정도의 수체(water body)사이의 수산화기(OH⁻)농도분극에 의해 (Fig.1참조) 콘크리트 내부 Ca²⁺의 용출로 콘크리트가 중성화되고 궁극적으로 표면의 박리 또는 손상되는 현상이 나타나고 있다. 이렇게 손상된 표면은 부착강도가 감소하여 표면으로부터 파손되어 수체로 떨어져 나오고 또 다시 파손된 면으로부터 Ca²⁺의 용출

이 발생함으로써 콘크리트 구조물 손상이 지속적으로 일어난다(환경부, 2004).

콘크리트의 중성화는 수질에도 영향을 미친다. 콘크리트 벽면에서 용출되는 Ca²⁺이온들과 콘크리트 중성화로 수체에 노출된 철근 등에서 용출되는 무기이온은 잔류염소를 감소시키는 요인으로 작용될 수 있다(환경부, 2007).

상기 언급한 콘크리트 중성화를 방지하기 위해 콘크리트 표면에 상이한 재료를 라이닝하여 수체가 직접 콘크리트 면과 접촉하는 것을 방지하기도 한다. 다음 Fig. 2는 국내 Y-정수장 염소 접촉조 콘크리트 벽면을 PE(Poly Ethylene)수지로 라이닝하는 작업을 나타낸 것이다.

그런데, 콘크리트로 시공된 염소 접촉조를 PE수지로 라이닝 하는 경우 수체와 접촉하는 벽면 및 바닥의 절대 조도계수(Absolute Roughness)가 변하게 된다. Kutter는 수로경사(I)가 1/1000보다 작거나 1/3000보다 크고, 경심(R)이 0.2m보다 큰 일반적인 경우, 아래 Eq.(1)을 이용하여 개수로 및 하천에서 이용될 조도계수(n)의 값을 구할 것을 제안하였다(이수식 외, 2002).

$$V = \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + (23 - \frac{n}{\sqrt{R}})} \sqrt{RI} \quad \text{식 (1)}$$

여기서, V는 구간의 평균유속을 나타내며, 단위는 m/sec 이다.

그러나 상기 식은 개수로 및 하천의 특정 단면에서 평균 유속을 구한 다음 역으로 조도계수를 산출하는 방법으로 그 정확성에 큰 기대를 하기 어렵다. 이에 다음 Table 1은 Heald가 Cameron Hydraulic Data Book에 제시한 물질별 상대 조도계수의 값이다(Heald, 2003)

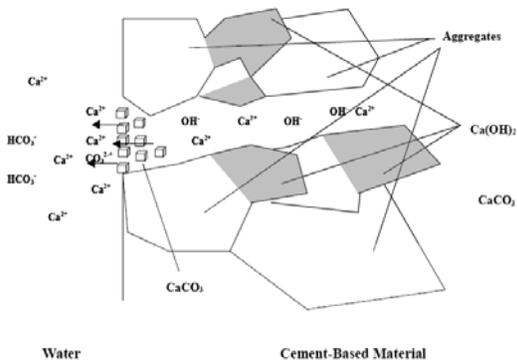


Fig. 1 수산화기 농도분극에 의한 콘크리트벽면으로부터 Ca²⁺의 용출 과정



Fig. 2 염소 접촉조 라이닝 현장(측벽 및 바닥면까지 PE로 라이닝)

Table. 1 Absolute Roughness Values

Material	Absolute Roughness (m×10 ⁻⁶)
Riveted Steel	915 ~ 9150
Concrete	305 ~ 3050
Wood Stave	91 ~ 183
Galvanized iron	152
Cast iron-asphalt dipped	122
Cast iron uncoated	254
Carbon steel or wrought iron	45
Stainless steel	45
Drawn tubing-glass, brass, plastic	1.5

이에 본 연구에서는 대상 염소 접촉조를 선정하고, transient CFD기법을 이용하여 콘크리트 벽면인 경우와 PE 수지로 라이닝 한 경우를 대상으로 조도계수를 변화시키며 접촉조 흐름을 모사한 후, 실제 PE수지로 라이닝 한 경우를 대상으로 추적자 실험을 수행하여 CFD모사 결과를 검증하였다. CFD 모사 결과 및 추적자 실험 결과를 대상으로 염소 접촉조에 있어서 벽면 및 바닥의 조도계수가 접촉 내 수리거동에 미치는 영향을 토의하였다.

2. 대상 염소접촉조 현황 및 실험방법

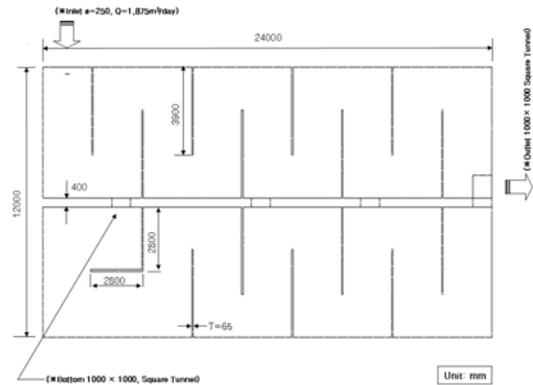
2.1 염소접촉조 현황

본 연구에서 대상으로 삼은 정수장은 경북 예천에 있는 Y정수장이다. 다음 Fig. 3은 Y정수장내에 위치한 염소 접촉조의 geometry 도면이다. 염소 접촉조의 총 용적(V)은 1,071 m³이며, 추적자 실험을 수행하는 동안의 유입유량(Q)은 1,875 m³/day이었다. Fig. 3(a)에서와 같이 지내에는 현재 15개의 도류벽이 설치되어 있으며, 이에 따른 장폭비는 21:1, 상수도시설기준에 따라 이 장폭비에 상응하는 T₁₀/T값은 0.6로 도출된다. Fig. 3(b)는 구석에서 발생하는 사류 저감을 위해 측면 벽과 수직으로 만나는 도류벽의 너비 1m에 직경 125~150mm 구멍 10개를 뚫은 유공벽을 설치한 것이다. Fig. 2(a)에서 나타나듯이 물의 유입은 상부 측면에서 250mm 유입 파이프를 통하여 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.

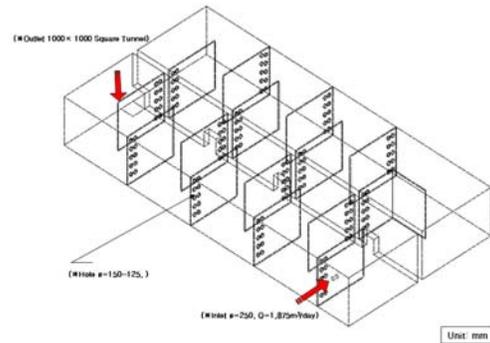
2.2 Transient CFD 모사 기법

CFD는 수작업으로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FVM(Finite Volume 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.

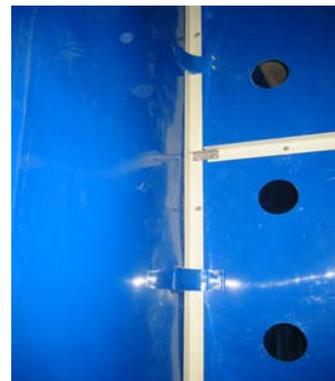
본 연구에서는 대상 염소 접촉조의 흐름 및 추적자 실험을 모사하기위해 전산유체역학(CFD) 기법을 이용하여 조내의 수리거동을 모사하였다. Transient 모사 시 유출관로를 통해 유출되는 불소(추적자)의 농도는 유출관로 단면의 시간대별 평균농도를 관측하였으며, 총 모사시간은 15시간을 할당하였다. Pre-processing에 있어서 1초마다의 불소 유출농도가 저장되도록 하였다.



(a) Top-view



(b) Baffles with Porous Baffle



(c) Porous on baffle

Fig. 3 Geometry of the Chlorine Contactor

2.2.1 지배방정식

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

본 모델링에서 사용되는 기본적인 식은 아래의 두 식이다.

연속방정식

$$\nabla \cdot \rho \overline{V} = 0 \quad \text{식(2)}$$

모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation)

$$\frac{\partial \overline{V}}{\partial t} + (\overline{V} \cdot \nabla) \overline{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \overline{V} + F \quad \text{식(3)}$$

여기서, ρ 는 밀도, \overline{V} 는 속도(각 방향 속도성분), t 는 시간, P 는 압력 그리고 ν 는 동점성계수를 나타낸다.

2.2.2 난류 모델링

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

2.2.3 경계 조건

본 연구에서는 정수지의 자유수면은 평면적이며 마찰이 없다고 가정하였다. 그 이유는 공기와 접촉하고 있는 자유수면에서의 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).

2.2.4 추적자 주입 조건

본 연구에서 추적자 실험을 CFD로 모사하기 위하여 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 계산하여

야 하는데 그 시간은 4.3 초가 도출되었다. 이에 아래 식(4)과 같이 염소가 주입되는 식을 수립하였다.

$$\frac{dC}{dt} = \text{step}(4.3 - t/1(\text{sec}))(kg/m^3) \quad \text{식(4)}$$

여기서, C는 무차원의 불소 농도를 의미한다.

2.2.5 모사 대상

본 연구에서 CFD를 이용하여 모사할 대상은 염소 접촉조의 벽면이 콘크리트인 경우와 PE 수지로 라이닝 한 경우를 대상으로 조도계수를 변화시키며 접촉조 흐름을 모사하였다. 다음 Table 2는 각 경우 모사 조건을 정리한 것이다.

Table 1에서 Heald가 제시한 콘크리트 벽면의 절대 조도계수값은 0.000305 ~ 0.00305이며, PE라이닝을 한 경우 벽면의 절대 조도계수는 0.0000015이다. 본 모사에 적용한 각각의 값 0.001과 0.000001은 정확한 벽면의 절대 조도계수값을 측정할 수 없어 Heald가 제시한 참고 값과 차수(Order)만 일치시켜 정한 값이다. PE라이닝 소재의 절대 조도계수값이 실험실에서 측정되는 경우 Heald가 제시한 0.0000015가 되겠지만 콘크리트 벽면에 라이닝하면서 발생하는 이음새 및 가공으로 인해 발생하는 불균일한 면에 대한 보정은 사실상 불가능하다.

2.3 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. 3에 나타난 유입관로 불소 원액(NaF, 함량 24%)

Table 2 Methodology for CFD simulation

모사 대상	벽면 및 바닥이 콘크리트인 경우	벽면 및 바닥에 PE라이닝을 한 경우	비고
지배방정식	연속, 모멘텀, 에너지	연속, 모멘텀, 에너지	동일
Node 수	약 570,000개	약 570,000개	동일
난류 모델링	Standard k-ε 모델	Standard k-ε 모델	동일
기타 Geometry 특성	PE라이닝을 한 것을 제외하고는 동일		
벽면 및 바닥면 조도계수	0.001	0.000001	Table. 1 참조

4L를 정수지 유입관로 pulse input 방법으로 투입한 후, 1분 간격으로 시간 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; 이론적 체류시간)은 822분이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 추적자 실험

다음 Fig. 4는 Y정수장 염소 접촉조(Fig. 3(b); 유공벽이 있고 PE수지로 라이닝을 한 경우)를 대상으로 유입유량(Q)이 1,875m³/day이었을 당시 추적자 실험을 한 결과(C-curve)와 그러한 상황을 Transient로 CFD모사한 결과이다. 여기서 현장에서 실험한 추적자 회수율은 72.1%로 계산되어 본 추적자 실험이 의미가 있음을 알 수 있었다. Fig. 4에서 y축은 염소 접촉조 유출부에서 측정된 추적자(불소)의 농도를 무차원으로 나타낸 것이고, x축은 측정시간을 분단위로 나타낸 것이다. 실측값에서 기저 값이 0으로 잡히지 않은 것은 선행된 실험에서 조내 잔류되어 있던 불소의 농도가 측정된 것이다. 본 C-curve에서 추적자 실험을 통한 실측값으로부터 T₁₀/T값은 0.15(T₁₀는 124분, T는 822분), CFD모사 결과로부터 도출된 T₁₀/T값은 0.14(T₁₀는 115분, T는 822분)가 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. 5는 Y정수장 염소 접촉조를 대상으로(Fig. 3(a)와 (b) 참조) 측벽과 바닥의 절대 조도계수가 0.001일 때와 0.000001일 때 CFD 모사 결과를 도시한 것이다. Fig. 5에서 도시한 CFD모사 결과는 정상상태(steady state)로 모사한 결과를 바닥으로부터 수위 1.6m(총 수위 3.2m) 단면의 유속 분포를 contour로 나타낸 것이다.

그런데 상기 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 CFD를 이용하여 정상상태로 모사하였을 경우, 절대 조도계수가 상이할 때 접촉조의 흐름 특성에 있어서 뚜렷한 차이점을 발견할 수 없었다. 단 Fig. 5 우측 상단과 하단에 도시한대로, 특정 구간을 자세히 살펴보면 지점 유속이 약간씩 차이가 나는 것 이외에 전체적인 흐름 양상은 비슷한 것으로 나타난다. 이에 본 연구에서는 보다 정확한 벽면 및 바닥면의 조도계

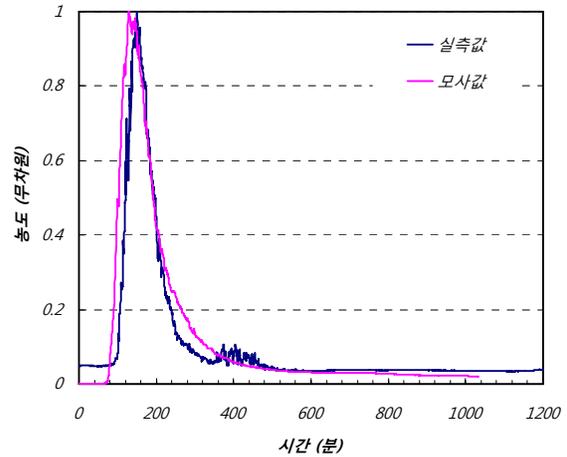


Fig. 4 The results of tracer test and CFD simulation for PE lining clearwell

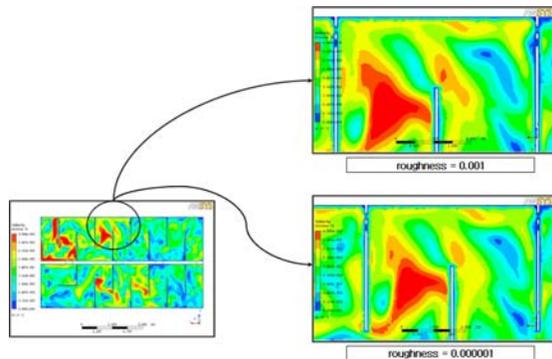


Fig. 5 The results of CFD simulation in the cases of roughness = 0.001 and 0.000001

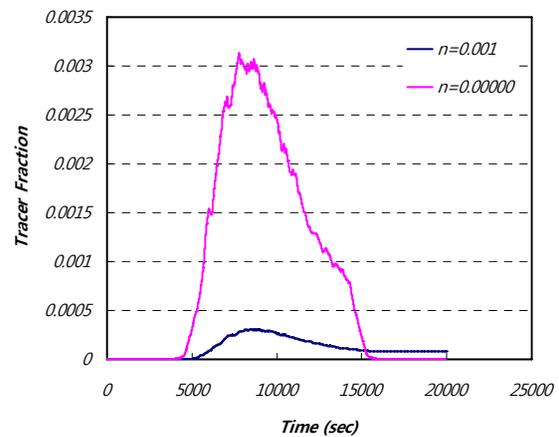


Fig. 6 Comparison between the cases with roughness = 0.001 and roughness = 0.000001

Table. 3 Characteristics of Flow within both contactors

구 분	CFD 결과		비 고
	roughness = 0.001	roughness = 0.000001	
T ₁₀	6559(sec)	7228(sec)	T ₉₀ : 90%가 유출되는 시간 T ₁₀ : 10%가 유출되는 시간 T _p : mode 값(최고 값의 t)
T ₁₀ /T	0.14	0.15	
Morill index (T ₉₀ /T ₁₀)	2.39	1.9	
Modal index (T _p /T)	0.16	0.16	

수의 효과 및 각 반응조의 흐름 특성을 파악하기 위해 비정상상태(transient) 조건에서 “추적자 실험”을 모사하였다. 다음 Fig. 6은 각각의 벽면 및 측면의 조도계수가 0.001일 때와 0.000001일 때 추적자 실험을 CFD로 모사한 결과를 C-curve로 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 나타낸 바와 같이, 조도계수가 큰 경우(roughness = 0.001) C-curve의 꼬리가 길게 늘어지는 것을 볼 수 있는데 이는 그 흐름 특성이 조도계수가 작은 경우(roughness = 0.000001)에 비해 CSTR (Complete Stirrer Tank Reactor)에 가깝다. 또한 추적자의 유출 시간이 벽면과 측벽이 거친 경우가 더 늦음도 알 수 있다. 상기 그래프에서 더 자세한 정보를 추출하여 흐름의 특성을 파악하여 상기의 Table. 3에 정리하였다.

Table. 3에서 정리한 T₁₀/T값의 비교에 있어서 조도계수가 작은 경우 T₁₀/T이 큰 것으로 나타났는데 이는 Fig. 6에서 제시한 조도계수가 0.001인 경우 C-curve가 길게 늘어지는 부분을 고려하지 않고 나타난 차이므로 실제 그 차이는 더 클 것으로 사료된다. 이러한 결과는 벽면 및 바닥면의 조도계수가 낮은 경우 상대적으로 plug flow흐름에 근접하다고 결론지을 수 있다. 또한, 도출된 Morill index(1에 가까울수록 plug flow를 나타냄)로 판단컨대, 접촉조 내의 조도계수가 낮은 경우 사류지역을 저감하고 유효용량 감소가 상대적으로 작아 접촉조 효율을 증가시키는 것으로 사료된다.

결론적으로 염소 접촉조의 수체와 접촉하는 면(perimeter: 윤변)의 조도계수를 낮추는 방법으로 제시되는 각 소재들의 라이닝 기법은 콘크리트 벽면의 중성화 지연 및 접촉 효율을 제고시킬 수 있다고 판단되나, 소재의 접촉 강도 강구 및 시공 후 유지관리(시공 후 탈리 및 청소 문제)는 현장 적용 타당성 관점에서 다루어져야 함에 본 연구의 범위에서는 제외한다.

4. 결 론

본 연구에서는 대상 염소 접촉조를 선정하고, transient CFD기법을 이용하여 콘크리트 벽면인 경우와 PE 수지로 라이닝 한 경우를 대상으로 조도계수를 변화시키며 접촉조 흐름을 모사한 후, 실제 PE수지로 라이닝 한 경우를 대상으로 추적자 실험을 수행하여 CFD모사 결과를 검증하였다. CFD 모사 결과 및 추적자 실험 결과를 대상으로 염소 접촉조에 있어서 벽면 및 바닥의 조도계수가 접촉내 수리거동에 미치는 영향을 토의하였다. 이에 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) CFD 실험과 추적자 실험결과 염소 접촉조 내 수체가 흐르면서 접촉하는 윤변을 구성하는 측벽 및 바닥면의 절대 조도 계수는 접촉조 내 흐름 특성에 영향을 주며, 조도 계수가 낮은 경우 내부 흐름은 plug flow에 가깝다.
- 2) 본 연구에서 적용한 콘크리트 벽면과 PE 라이닝을 한 경우 각각의 조도계수는 0.001과 0.000001로 적용하였을 때 특히, Morill index(1에 가까울수록 plug flow를 나타냄)로 판단컨대 접촉조 내의 조도계수가 낮은 경우 사류지역을 저감하고 유효용량 감소가 상대적으로 작아 접촉조 효율을 증가시키는 것으로 기대된다.
- 3) 본 연구에서 제시한 조도계수를 낮추는 방법인 다른 소재의 라이닝 기법은 콘크리트 벽면의 중성화 지연 및 접촉 효율을 제고시킬 수 있다고 판단되나, 소재의 접촉 강도 강구 및 시공 후 유지관리(시공 후 탈리 및 청소 문제)는 현장 적용 타당성 관점에서 다루어져야 함에 본 연구의 범위에서는 제외한다.

참고문헌

- 신은허, 이승재, 김성훈, 박희경, (2008) “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, (2008) “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 사류비역이 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, 상수도 시설물 내수연한 설정 연구
- 이수식, 이상배, 안경모, 이재경, 최선호 (2002) 수리학, 동학 출판사
- Heald, C. C. (2003) Cameron Hydraulic Data Book, FLOWSERVE
- Kawamura, S. (2000) Integrated Design of Water Treatment Facilities, 5th ed., John Wiley&Sons, New York
- 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
- 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*, 82(12), pp.88-98.
- Currie, I. G., (1993) *Fundamental mechanics of fluids*, McGraw-Hill, New York.