



Transient CFD 모사기법을 이용한 정수지 최적설계 사례연구

Case study on Remodeling Clearwell Hydraulic Structure using Transient CFD Simulation Technique

김선진¹ · 김성수¹ · 박노석^{1*} · 차민환² · 왕창근³

Seon-Jin Kim¹ · Seong-Su Kim¹ · No-Suk Park^{1*} · Min-Whan Cha² · Chang-Keun Wang³

1 한국수자원공사, 2 (주)젠트로, 3 충남대학교 환경공학과

(2010년 7월 26일 접수 ; 2010년 8월 10일 수정 ; 2010년 8월 13일 채택)

Abstract

From the results of tracer test for the existing clearwell in Y water treatment plant, T_{10} and T_{10}/T were calculated as 150 min and 0.24, 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, using transient CFD(Computational Fluid Dynamics) simulation technique, tracer tests on dynamic condition for the suggested schemes were simulated. From the results of simulation, it was revealed that 8-6 baffles are necessary to guarantee the disinfection ability in the existing clearwell. Also, installing orifice baffle in the vicinity of inlet could increase plug flow fraction within clearwell.

Key words : 정수지, transient CFD 모사, 수리학적 효율, 정류벽

주제어 : clearwell, transient CFD(Computational Fluid Dynamics), hydraulic efficiency, baffles

1. 서론

소독은 수처리 공정의 가장 마지막 단계로써 미생물을 불활성화시켜 병원성 미생물에 의한 질병으로부터 보호하기 위한 가장 기본적이고 효율적인 수단이다. 이러한 소독방법은 염소, 이산화염소, 오존, 클로라민, 자외선 등의 소독제를 사용하는 방법이 있으며, 통상적인 정수처리 공정의 정수지에서는 염소를 이용한 소독이 주로 이용되고 있다. 그러나 소독의 효율을 높이기 위하여 과량의 소독제를 사용하는 경우 소독부산물(Disinfection By-products)의 생성이 증가되는 문제가 발생하게 된다(신은허, 2008a; 신은허, 2008b; 이승재, 2007; 신은허, 2005). 따라서, 일반적으로

소독접촉조의 접촉효율을 증가시키기 위해 소독접촉조 내에서 단락류를 최소화하기 위해 플러그 흐름(Plug flow)을 유도하기 위한 설계 및 개량이 검토되고 있다.

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} (Morril index), T_{10}/T (환산계수, β 값), dispersion number 등이 있으나, 일반적으로 T_{10}/T 값으로써 나타내고 있다.

이미 이제까지 많은 연구자들은 정수지의 소독능에 영향을 미치는 인자들을 조사 연구하였는데, 그 중 Hannoun(1997, 1998)은 지의 형상, 도류벽의 유무, 유입

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

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). 또한 신은허(2005)의 연구에서는 장방형 정수지에서 형상비(Shape factor, 정수지의 가로와 세로의 길이/세로의 길이)를 정의하여 이 값이 증가할수록 T_{10}/T 값이 증가함을 발표하였다. 정류벽 및 내부 도류벽의 설치로 T_{10}/T 값이 증가하는 경향(Hannoun et al., 1998; Lee et al., 2006)을 나타내었다. 또한 도류벽을 추가로 설치하여 장폭비를 증가시키는 것은 수리학적 효율을 향상시키는데 도움이 된다는 연구결과가 있다(Clark et al., 1999, Bishop et al., 1993)

현재 우리나라의 대부분의 정수지들은 장폭비가 10에서 20사이로 설계되어 있어 0.4에서 0.5사이의 낮은 T_{10}/T (T 는 이론적 체류시간)을 가지는 것으로 조사되었다.(신은허, 2008b). 이에 환경부에서는 각 정수지 내의 T_{10}/T 값을 0.6이상으로 제고시킬 것을 권고하고 있으며, 장폭비를 기준으로 환산계수의 도출방법 및 적정성을 상수도 시설기준에 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. 그러나 이제까지 많은 엔지니어들은 T_{10}/T 의 제고 목적으로 정수지의 도류벽을 설계하는 데에 있어 문헌으로부터 장폭비에 따른 환산계수를 도출하거나, CFD(Computational Fluid Dynamics)기법을 이용하여 steady 상태 정수지내 흐름을 모사하는 것을 이용하여 왔다(신은허, 2008b; 이승재, 2007). 그러나 지내 plug flow의 흐름의 정도를 측정하고

실제 T_{10}/T 를 도출하기 위한 가장 정확한 방법은 현장에서 추적자 실험(tracer test)이다. 하지만 실제 구조물이 없는 상태에서 실제 추적자 실험을 수행하는 것은 불가능하다.

이에 본 연구에서는 대상 정수장을 선정하여 현장 정수지에서 추적자 실험을 통해 T_{10}/T 를 실측하고, transient CFD 모사기법을 이용하여 이를 검증하였다. 또한 대상 정수장의 정수지 내 T_{10}/T 를 제고시키는 여러 가지 개량방안을 도출한 후, 도출된 개량안을 대상으로 transient CFD 모사를 통하여 가상의 추적자 실험을 수행하여 나타난 결과를 바탕으로 최적 수리구조 안을 선정 제시하고자 하였다.

2. 대상 시설현황 및 실험방법

2.1 대상 정수지 시설현황

본 연구에서 대상으로 삼은 정수장은 경북 예천에 있는 Y정수장이다. 다음 Fig. 1은 Y정수장내에 위치한 정수지의 평면도와 측면도이다. 정수지의 총 용적(V)는 461 m^3 이며, 추적자 실험을 수행하는 동안의 유입유량(Q)은 $45 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이었다. Fig. 1에서와 같이 지내에는 현재 4개의 도류벽이 설치되어 있으며, 이에 따른 장폭비는 11:1, 상수도시 설계기준에 따라 이 장폭비에 상응하는 T_{10}/T 값은 0.4로 도출된다. 상부는 콘크리트 슬라브로 복개되어 있으며, 평면도에서 나타나듯이 중앙에는 기둥이 설치되어 있다. 추적자 실험을 통해 계산되어진 T_{10}/T 값을 확인하였다.

Table 1. The Relation between T_{10}/T and L/W

환산계수(β)	장폭비(L/W)
0.10	2 미만
0.20	2이상 5미만
0.30	5이상 10미만
0.40	10이상 15미만
0.50	15이상 20미만
0.60	20이상 30미만
0.65	30이상 40미만
0.70	40이상 50미만
0.71이상	50이상 추적자실험

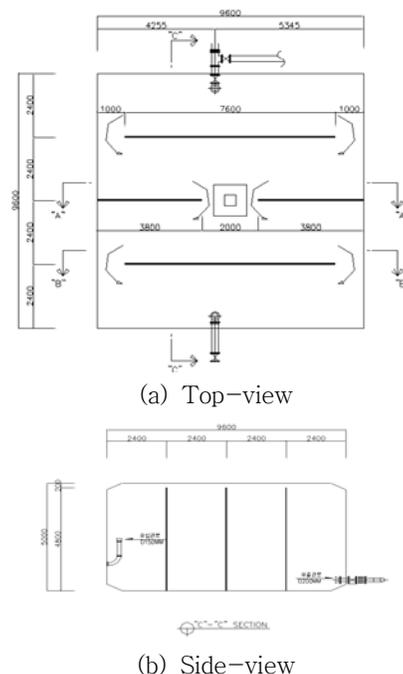


Fig. 1 Shape of the clearwell

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 수질 안정성의 이유로 불소를 추적자로 이용하여 실험을 수행하였다. 실험은 Fig. 1(b)에 나타난 유입관로 불소 원액(NaF, 함량 24%) 18L를 정수지 유입관로 pulse input 방법으로 투입한 후, 5분 간격으로 시간 간격으로 유출측 배관에서 불소농도를 측정하였다(Kawamura, 2000; Hudson, 1981). 불소농도는 DR2010 (Hach, USA)을 이용하여 발색법으로 측정하였으며, 시료채취 간격과 실험시간을 수리학적 체류시간의 0.1배 및 2배 정도로 각각 선정하였다. 추적자 실험 수행 동안 Y정수장 정수지의 수리학적 체류시간(T)은 614 분이였다.

2.3 Transient CFD 모사 기법

전산유체해석(CFD)은 수작업으로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 작은 셀로 분할하여 각각의 경계조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 본 연구에서는 대상으로 한 정수지의 추적자 실험을 해석하기 위해 상용 전산유체 프로그램인 ANSYS CFX 11.0을 사용하였다.

본 연구에서는 대상 정수지의 흐름 및 추적자 실험을 모사하기 위하여 전산유체역학(CFD) 기법을 이용하여 지내의 수리거동을 모사하였다. Transient 모사시 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 정수지 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 $k-\epsilon$ 모델이 대부분 사용되며, 본 연구에서는 난류가 등방성 방향으로 분포된다고 가정하는 Standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.3.3 경계 조건

본 연구에서는 정수지의 자유수면은 평면적이며 마찰이 없다고 가정하였다. 그 이유는 공기과 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).

2.3.4 추적자 주입 조건

본 연구에서 추적자 실험을 CFD로 모사하기 위해 추적자의 주입은 'step function'으로 주입됨을 가정하였다. 물리적으로 18L의 불소를 유입관로에 주입하는 데에 있어서 $t=0$ 시점부터 불소가 유입관로를 통해 주입되고 나서 물이 유입됨을 가정하는 방법이다. 이를 위해서는 18 L의 불소가 유입관로의 통수단면적을 모두 지나가는 시간을 계산하여야 하는데 그 시간은 11.8초가 도출되었다. 이에 아래 식 (3)과 같이 불소가 주입되는 식을 수립하였다.

$$\frac{dC}{dt} = \text{step}(11.8 - t/1(\text{sec}))(kg/m^3) \quad \text{식(3)}$$

여기서, C는 무차원의 불소 농도를 의미한다.

2.3.5 모사 대상

본 연구의 대상이 된 Y정수장의 정수지는 장폭비 11:1로 상수도 시설기준에서 권장하고 있는 적정 수준인 20:1에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 8가지의 내부도류벽 설치 대안을 Fig. 2와 같이 마련하여 Transient CFD모사기법을 통하여 추적자 실험을 시뮬레이션 하였다.

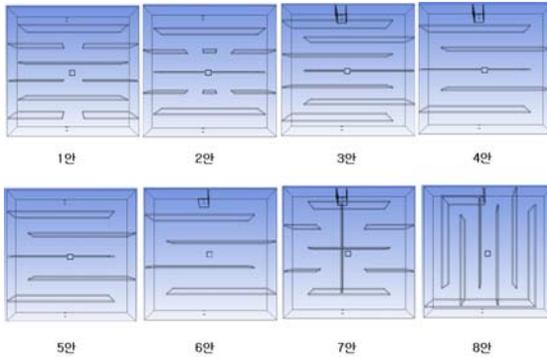


Fig. 2 Y정수장 정수지 내부도류벽 개선안

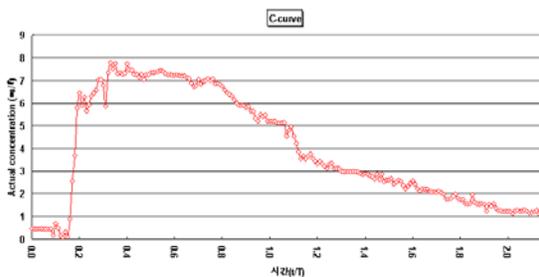


Fig. 3 The results of tracer test(C-curve)

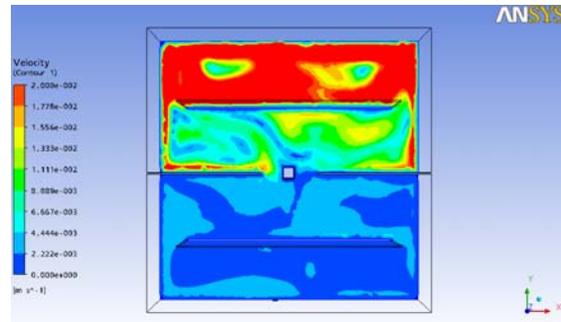
상기 Fig. 2에서 3, 4, 6, 7과 8안은 유입부측에 정류벽을 두어 유입측부터 발생하는 혼합 흐름의 발생을 방지하도록 설계하였다.

3. 결과 및 고찰

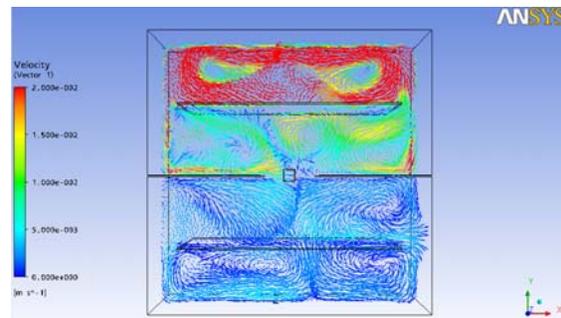
3.1 추적자 실험

다음 Fig. 3은 현장에서 Y정수장 정수지를 대상으로 유입유량(Q)이 45 m³/hr이었을 당시 추적자 실험을 한 결과(C-curve)이다. 여기서 추적자 회수율은 78.5%로 계산되어 본 추적자 실험이 의미가 있음을 알 수 있었다.

Y정수장 정수지를 대상으로 추적자 실험을 한 결과, T₁₀은 150분으로 산출되었으며, T₁₀/T는 0.24로 계산되었다. 이는 기준을 만족하지 못하는 정수지이며, 개선이 필요할 것으로 판단할 수 있다. 또한 본 정수지의 Morill index(T₉₀/T₁₀)는 4.73, Modal index는 0.27로 계산되었는데 이는 지내의 흐름이 plug flow보다는 완전 혼합흐름에 가까움을 의미한다. 참고로 mixed flow 분율은 0.63이었으며, plug flow 분율은 0.37로 나타났다.



(a) contour(바닥에서 2.1m 지점)



(b) vector(바닥에서 2.1m 지점)

Fig. 4 The results of CFD simulation for the existing clearwell

3.2 CFD 모사 결과

다음 Fig. 4는 기존 Y정수장 정수지의 CFD모사 결과를 도시한 것이다. 그림은 바닥에서 2.1m되는 지점의 평면 그림이다.

Fig. 4에서 나타나듯이 유입부와 유출부에서는 속도가 빠른 영역이 나타나고 중간 기둥 부근에서는 정체구역이 관측되었다. 좀 더 자세한 해석을 위해 Transient 모사 결과로부터 얻은 추적자 실험결과와 실제 현장에서 측정한 추적자 실험결과를 비교하였다 (Fig. 5 및 Table 2 참조)

Transient CFD 모사결과로부터 얻은 T₁₀은 205분으로 산출되었으며, T₁₀/T는 0.33로 계산되었다. 모사결과로부터 추산된 본 정수지의 Morill index(T₉₀/T₁₀)는 3.78, Modal index는 0.55로 계산되었다. 이와 같이 실제 실험과 Transient CFD 모사 결과와의 차이가 생긴 이유는 실제 실험 시 이상적으로 정확한 step function에 따라 추적자를 주입할 수가 없으며, 벽면 거칠기의 정확한 정보가 없고, 수온의 고려가 없기 때문이다. 그러나 이론적 체류시간 614분을 기준으로 T₁₀값의 차이가 55분(205분 - 150분)이 발생하는 것은 약 8.9%의 오차가 발생하는 것으로 상대적인 비교 측면에서 그 경향을 잘 모사한 것으로 판단되며 추

Table 2. Comparison between the measurement and the simulation

구분	Wet Test	CFD Result	비 고
T ₁₀	150 min	205 min	T ₉₀ : 90%가 유출되는 시간
T ₁₀ /T	0.24	0.33	
Morill index (T ₉₀ /T ₁₀)	4.73	3.78	T ₁₀ : 10%가 유출되는 시간
Modal index (T _p /T)	0.27	0.55	T _p : mode 값 (최고값의 t)

Table 3 L/W ratio, T₁₀/T, Morill index and Modal index

개선안	장폭비	T ₁₀ /T	Morill index (T _p /T)	Modal index (T ₉₀ /T ₁₀)
실 측	11.2	0.24	4.73	0.27
기존 안	11.2	0.33	3.78	0.55
1 안	19	0.28	4.14	0.46
2 안	12.4	0.46	2.74	0.73
3 안	68	0.68	1.85	0.82
4 안	32	0.68	1.87	0.91
5 안	32	0.48	2.66	0.75
6 안	31.3	0.43	2.91	0.59
7 안	20	0.32	3.77	0.54
8 안	46	0.61	2.09	0.76

T_{10,50,90} : 누적 유출량이 전체 Tracer량의 10, 50, 90%가 될 때의 시간

T_p : 유출 Tracer농도가 최대일 때의 시간

T : 이론적 체류시간

후 오차를 줄일 수 있는 방안이 있어야 할 것 같다.

다음 Fig. 6는 기존 Y정수장 정수지의 개선안 8가지를 대상으로 CFD 모사한 결과를 나열한 것이다.

상기 Fig. 6에 나타나듯이 1안과 2안의 경우 유입부 근처에서 발생하는 빠른 유속영역과 후단으로 갈수록 정체구간과 유속이 낮은 영역이 혼재되어 있다. 이는 중앙에 위치한 기둥을 중심으로 도류벽이 개방되어 있어 유체가 기둥을 지나면서 완전혼화흐름으로 전환됨을 알 수 있다. 반면에 3안과 4안의 경우 어느 정도의 plug flow를 유지하면서 안전적

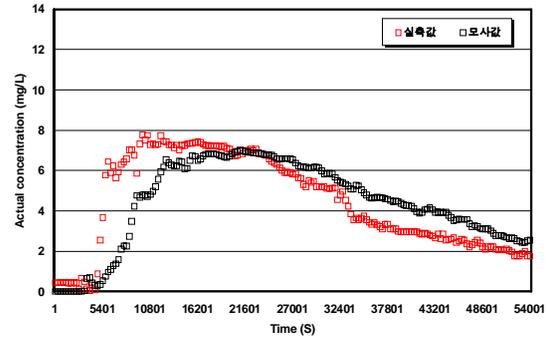


Fig. 5 Comparison between the measurement and the simulation

인 유황이 관측되었는데, 3안과 4안의 경우 장폭비도 각각 68:1 및 32:1로 나타났으며, 유입관로 부근의 정류벽도 plug flow를 만드는데 도움을 주는 것으로 판단된다. 이는 5안과 4안의 경우를 비교 시에 4안은 유입 정류벽이 있는 반면에 5안은 정류벽이 없어서 유입수의 모멘텀이 유입관로 근처에서 완전혼화흐름을 만드는 것으로 나타났다. 이에 정류벽이 없는 6안과 8안의 경우 유입관로 근처에서의 빠른 유속 영역과 후단으로 갈수록 발생하는 느린 유속영역이 확연히 구분되는 것도 그 근거가 될 수 있다.

다음 Fig. 7은 8가지 대안을 대상으로 transient로 CFD 모사를 하였을 때 추적자 실험결과를 도시한 것이다.

Fig. 7에서 나타나듯이, 기존, 1안, 2안, 6안 및 7안의 경우의 C-curve가 앞쪽으로 편향되어 완전혼화흐름이 지배하는 유황을 타나내는 반면에 3, 4 및 5안의 경우에는 종모양의 plug flow의 특성이 많이 내재된 흐름 상황을 나타내고 있다. 이를 정량화하기 위하여 Fig. 7에서 얻은 정보를 해석하여 다음 Table. 3과 같이 각 대안별로 장폭비, T₁₀/T, Morill index 및 Modal index를 정리하였다.

정수지의 효율측면에서는 3안이 4안보다 T₁₀/T이 좋을 것으로 관측되었지만 운영 및 경제성 측면에서 4안이 3안을 앞설 것으로 판단된다. 정수지는 1년에 한 번씩 운영을 중단하고 청소를 하여야 한다. 3안의 경우 격벽과 격벽사이의 폭이 1.25 m밖에 되지 않아 운영자가 유지관리 및 청소를 하기에 무리가 있다. 이에 비해 4안의 경우에는 격벽과 격벽사이의 간격이 1.7 m로 청소를 위한 기구의 운반 및 작업공간의 확보가 충분하여 유지관리 용이할 것으로 사료된다. 따라서, 대상 정수지의 T₁₀/T을 제고시키기 위하여 본 연구에서 제시한 8개의 대안 중에서는 4안이 가장 효율적인 것으로 판단된다.

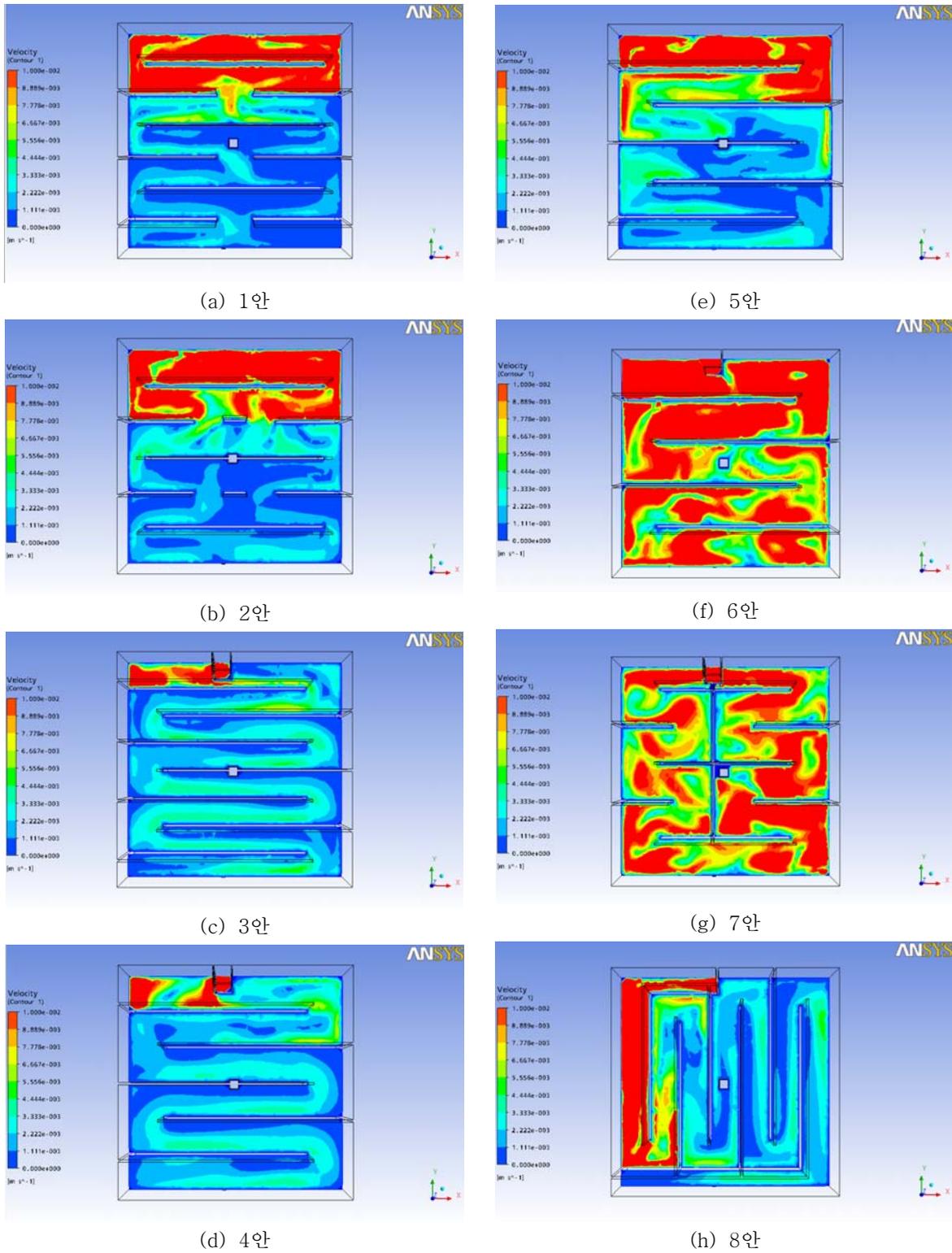


Fig. 6 The results of CFD simulation for the remodeled (바닥에서 2.1m되는 지점)

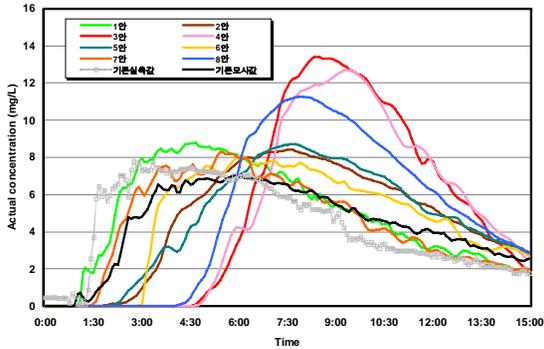


Fig. 7 The simulated tracer tests

4. 결 론

본 연구에서는 T_{10}/T 가 낮은 국내 Y정수장 정수지를 대상으로 현장 추적자 실험을 통해 T_{10}/T 를 실측하고, transient CFD 모사기법을 이용하여 이를 검증하였다. 또한 대상 정수장의 정수지 내 T_{10}/T 를 제고시키는 여러 가지 안들을 대상으로 transient CFD모사를 통하여 가상의 추적자 실험을 수행한 결과를 바탕으로 최적 수리구조 안을 선정 제시하였다. 이에 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) Y정수장 정수지를 대상으로 추적자 실험을 한 결과, T_{10} 은 150분으로 산출되었으며, T_{10}/T 는 0.24로 계산되어 기준을 만족하지 못하여 개선이 필요할 것으로 판단할 수 있었다. 또한 Morill index (T_{90}/T_{10})는 4.73, Modal index는 0.27로 도출되어 지내의 흐름이 plug flow보다는 완전혼화흐름이 지내 유향을 지배하는 것으로 나타났다. 이와 같은 사실은 transient CFD 모사기법을 이용한 추적자 실험 결과에서도 같은 경향을 나타냈으며, 실측값과 모사값에는 약 8.9%의 오차가 나타났다.
- 2) 본 연구에서 제시한 8가지의 대안 중에서 3안과 4안의 경우 장폭비도 각각 68:1 및 32:1로 나타났으며(Fig. 7 및 Table 1 참조), 유입관로 부근의 정류벽도 plug flow를 만드는데 도움을 주는 것으로 나타났다. 좀 더 자세히 언급하면 4안은 유입 정류벽이 있는 반면에 5안은 정류벽이 없어서 유입수의 모멘텀이 유입관로 근처에서 완전혼화흐름을 만드는 것으로 나타났다. 또한 유입 정류벽이 없는 대안(6안과 8안)의 경우 유입관로 근처에서의 빠른 유속 영역과 후단으로 갈수록 발생하는 느린 유속영역이 확연히 구분되는 것도 그 근거가 될 수 있다.

3) 정수지의 청소 및 유지관리를 위해서는 격벽과 격벽사이의 공간도 중요하다. 단지 T_{10}/T 의 측면에서는 가능한 많은 수의 격벽이 설치되어 장폭비가 크면 클수록 좋겠지만 운영 및 경제성을 고려할 경우 기구의 운반 및 작업공간의 확보가 가능한 대안이 선정되어야 한다.

4) 마지막으로, 정수지 설계에 주로 사용되었던 CFD 모사 기법 중에서 transient로 해를 구하는 방법론을 정립, 활용함으로써 수리구조의 개선 시공 이전에 많은 정량화된 흐름 특성 및 정보를 얻을 수 있고 이를 바탕으로 최적의 설계가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

신은희, 이승재, 김성훈, 박희경, (2008, a) "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.

신은희, 이승재, 김성훈, 박희경, (2008, b) "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, 신은희, 김성훈, 박희경, (2007) "정수지내 사류벽이 수리학적 효율에 미치는 영향 연구" 상하수도학회지, Vol.21, No.2, pp.177-185.

신은희, 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

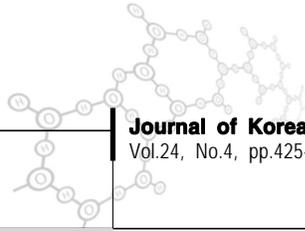
Bishop M.M., Morgan J.M., Cornell B., and Jamison D.K. (1993) "Improving the Disinfection Time of Water Plant Clearwell", *Journal of AWWA*, 85(3), pp.68-75.

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 Bous F. (1997) "Optimizing distribution storage water quality :A hydrodynamic approach", *Appl. Math. Modelling*, 21, pp.495-502.

Hannoun I.A., Bous 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*, 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.