Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.25, No.4, pp.497-502, August, 2011

상하수도학회지, 논문
25권 4호, pp.497-502, 8월, 2011

염소 접촉조 직렬 연결시 수리흐름 특성에 관한 연구

Case study on Hydraulic characteristics within Chlorine Contactors in Series

강태훈[1] · 채선하[1] · 김성수[1*] · 왕창근[2]

Tea-Hun Kang[1] · Seon-Ha Chae[1] · Seong-Su Kim[1*] · Chang-Keun Wang[2]

1 한국수자원공사, 2 충남대학교 환경공학과

(2011년 4월 14일 접수 ; 2011년 7월 12일 수정 , 2011년 7월 20일 채택)

Abstract

In order to examine the effects of combination of plug flow reactors in series on hydraulic characteristics, comparative tracer tests were conducted for the cases of the existing clear well and clear wells combined in series. From the results of tests, T_{10}/T within existing clear well was 0.62~0.68 depending on inlet flowrate, and that in the case of combination in series was 0.69~0.78. While it would be minor improvement in contact efficiency, it would be appropriate to combine two clearwell with pipe in series for expansion.

Key words : chlorine contactor, series, tracer test, hydraulic characteristics

주제어 : 염소접촉조, 직렬연결, 추적자 실험, 수리 특성

1. 서 론

소독공정은 미생물을 불활성화 시켜 병원성 미생물에 의한 질병으로부터 보호하기 위한 가장 기본적이고 효율적인 수단으로 수처리 공정의 가장 마지막 단계에 위치하고 있다. 이러한 소독은 소독제의 종류에 따라 염소, 이산화염소, 오존, 클로라민, 자외선 등의 소독제를 사용하는 방법이 있으며, 통상적인 정수처리 공정의 정수지에서는 수도법 상 언급하고 있는 잔류염소 농도기준에 의해 염소를 이용한 소독이 필수적이다. 소독의 효율은 통상적으로 C·T 개념으로 설명되어 진다. C는 잔류소독제 즉, 정수지 유출측에서의 잔류염소 농도를 의미하며, T는 정수지의 이론적 체류시간을 의미한다. 소독효율을 높이기 위해서는 소독제의 농도(C)를 높이거나, 소독제와의 접촉시간(T)을 증가시키면 된다. 그러나 소독의 효율을 높이기 위하여 과량의 소독제를 사용하는 경우 소독부산물(Disinfection By-products)의 생성(신은허, 2008a; 신은허, 2008b; 이승재, 2007; 신은허, 2005)과 과량의 소독제 주입에 따른 냄새 발생으로 인한 소비자 민원 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 일반적으로 소독접촉조의 접촉효율을 증가시켜 소독능을 만족시키기 위해서는 접촉조의 부피를 증가시켜 접촉시간(T)을 증가시키거나 접촉조 내부에 도류벽 등을 추가 하여 장폭비 환산계수(T_{10}/T) 값을 증가시키는 등 소독접촉조 내에서 단락류를 최소화하기 위해 플러그 흐름(Plug flow)을 유도하기 위한 설계 및 개량이 검토되고 있다.

전술한 바와 같이 소독의 정도는 C·T값으로 소독능을 평가하는데, T의 산정에 있어서 유효접촉시간 산정인자

* Corresponding author Tel:+82-42-870-7527, Fax:+82-42-870-7549, E-mail: kssman@kwater.or.kr(Kim, S.)

β 값(장폭비 환산계수)을 구하여 10%의 유체가 유출되는 시간 T_{10}값을 사용하여 보수적인 소독능 평가를 하게 된다. 정수지에서 수리학적 거동 및 효율을 평가하는 지표로는 T_{90}/T_{10}(Morril index), T_{10}/T(환산계수, β값), dispersion number 등이 있으나, 일반적으로 T_{10}/T값으로써 나타내고 있다.

이제까지 많은 연구자들은 정수지의 소독능에 영향을 미치는 수리학적 인자들을 조사 연구하였는데, 그 중 Hannoun(1997, 1998)은 지의 형상, 도류벽의 유무, 유입 및 유출부의 우치와 속도, 정류벽의 유무 등이 T_{10}/T값에 영향을 미친다고 제시하였으며, 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 가로의 길이/세로의 길이의 비를 정의하여 이 값이 증가할수록 T_{10}/T값이 증가함을 발표하였다. 그리고, 정류벽 및 내부 도류벽의 설치로 T_{10}/T값이 증가하는 경향은 많은 연구자들(Hannoun et al., 1995; Lee et al., 2006, 박현오, 2010, 김선진, 2010)이 동일한 결과를 제시하고 있다. 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}/T을 가지는 것으로 조사되었다(신은허, 2008b). 각 수도시설에서는 정수지의 소독능을 안정적으로 달성하기 위해서 많은 정수지의 개량 및 개선이 이루어지고 있으며, 도류벽의 추가 공사시 권장치는 T_{10}/T값을 0.6이상으로 제고시킬 것을 제시하고 있다. 상수도 시설기준에서는 상기 Table 1에서 보이는 바와 장폭비에 따른 T_{10}/T값을 제시하고 있으며, 정수지 개량시 장폭비를 기준으로 환산계수의 도출방법 및 적정성을 제시하고 있다(상수도시설 유지관리매뉴얼, 한국상하수도협회, 2007). 일반적으로 정수지의 소독능을 향상시키기 위해 도류벽을 추가 설치함으로써 지 내 사류지역을 감소시키고 plug flow의 흐름을 유도해내어 T_{10}/T를 증가시키는 방안이 적용되고 있다.

Table 1. The Relation between T10/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

그러나, 최근 운영중인 정수장 수요증가 및 소독능의 안정적 달성을 위하여 정수지의 증설을 고려하여야 하는 경우가 발생하고 있다. 이러한 경우 정수지 증설을 위해서 기존 정수지를 증설하는 방법을 생각할 수 있다. 절대적인 정수지의 용량부족으로 인한 정수지내 체류시간의 부족은 도류벽의 증설로 T_{10}값을 증가시키는 데에 제한이 있으므로 일반적으로 정수지를 증설 병렬 연결하는 방법을 선택하게 된다. 그러나 현장 여건상 증설된 정수지배관의 병렬연결이 여의치 않을 경우에는 대안으로 직렬 연결방법을 모색해 볼 수가 있다.

이에 본 연구에서는 전라북도 S_정수장 정수지를 대상으로 직렬로 연결시키는 경우 실제 추적자 실험을 통해 T_{10}/T, Morill지수, Modal 지수 및 단락류 지수를 이용하여 수리흐름의 특성을 조사하고 소독능의 달성 여부를 평가하고자 하였다. 또한, 동일한 모양의 정수지에 유입유량을 달리하는 경우 수리흐름 특성이 변화하는 민감도에 대해서 고찰하고자 하였다.

2. 대상 시설현황 및 실험방법

2.1 대상 정수지 시설현황

본 연구의 대상시설은 전라북도에 있는 S_정수장이다. 다음 **Fig. 1**은 S_정수장내에 위치한 정수지의 평면도이다. 정수지는 총 3지로 나뉘어져 있으며, 편의상 왼쪽부터 #1지(기존 정수지, 23.7m×21.7m×4.0m), #2지(기존 정수지, 23.7m×21.7m×4.0m), 그리고 #3지(신설 정수지, 23.5m×22.0m×4.0m)로 구분하였다. #1~#3 정수지의 총 용적(V)은 6,182 m^3이며, 추적자 실험을 수행하는 동안 유입유량(Q)은 60,000 m^3/d이었다. **Fig. 1**에서와 같이 #2지와 #3지를 직렬로 연결한 사유는 현장여건(굴착심도, 기반암분포) 불리 및 기존배관과의 연결에 따른 단수 등의 사유로 병렬 연결이 여의치 않았기 때문이다. #3번 신설지의 용적은 2,068 m^3이며, 기존 #2지로 유입되던 관로를 폐쇄하고 #3번 신설지 유출측에서 #2번 기존지로 유입되는 연장 23m, 직경 800mm의 연결관로를 설치하였다.

상하수도학회지, 논문
25권 4호, pp.497-502, 8월, 2011

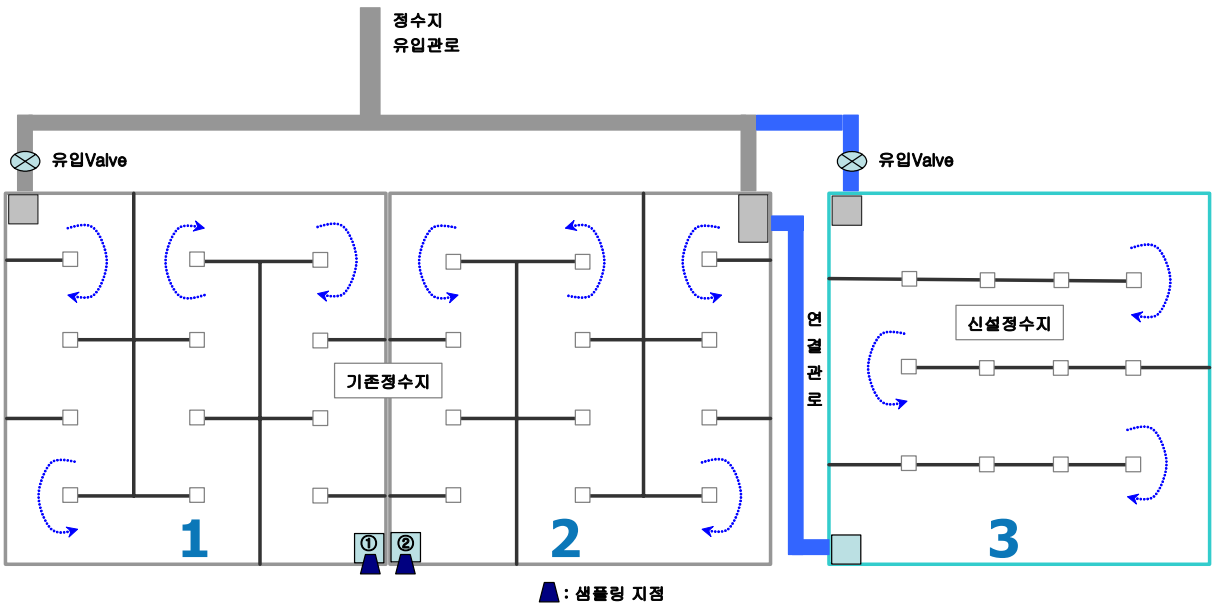

Fig. 1 Top-view of clearwell in S_WTP

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 수질적인 안정성의 이유로 불소를 추적자로 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서의 추적자 실험은 Fig. 1에 나타난 여과지에서 정수지로의 유입관로에 불화규산(H_2SiF_6, 함량 25%, 비중 1.27) 20 L를 Slug Dose 방법으로 일시에 주입한 후, 2분 간격으로 2곳의 샘플링 지점(Fig. 1 참조)에서 실시간 추적자 분석시스템을 이용하여 불소농도를 측정하였다(Kawamura, 2000; Hudson, 1981). 추적자 실험을 수행하는 동안 S_정수장 #1 기존 정수지의 수리학적 체류시간(T)은 76.5분, 그리고 기존 #2지와 연결관로 및 신설 #3지를 경유하는 통합지는 153.4 분으로 계산되어 진다. 추적자 실험동안 정수지 유입유량은 2,500 m^3/hr, 정수지 내 수위는 3.1m를 유지하였다.

본 연구에서는 기존 #1지에 비해 용량이 거의 2배정도 증가한 #2지와 #3지 통합 정수지에 유입되는 유량을 변화시키면서도 수리적 거동을 살펴보았다. 그 조건은 다음의 **Table. 2**와 같다.

Table. 2 유입밸브 조정을 통한 유량 조건

구분		#1지	#3지
조건1	개도율	100 %	100 %
	유량	1,250 m^3/hr	1,250 m^3/hr
조건2	개도율	50 %	100 %
	유량	740 m^3/hr	1,760 m^3/hr

3. 결과 및 고찰

다음 **Fig. 2**는 기존 #1번 정수지 유입밸브를 100% 개도한 경우 샘플링 지점 ①번과 ②번 지점에서 불소 농도를 측정한 결과를 도시한 것이다. 기존 #1번 정수지 유입량(1,250 m^3/hr) 기준으로 이론적 체류시간은 76.5분, 평균 체류시간은 67.8분으로 계산되었다. 실험상으로 도출된 T_{10}은 47.3분으로 장폭비 환산계수(β)는 0.62로 추산되었다. Index법에 의한 평가결과, Morill 지수값(1에 가까울수록 plug flow를 나타냄)은 1.90, Modal 지수값(1에 가까울수록 plug flow, 전체흐름에 대한 plug flow의 분율)은 0.83으로 나타나고 있으며, 단락류 지수 또한 0.07로 비교적 작은 것으로 평가되고 있다(**Table 3** 참조).

기존 2번 정수지와 3번 신설지를 관로로 연결한 경우, 이론적 체류시간은 153.4분, 평균 체류시간은 141.3분으로 나타났다. T_{10}은 105.3분으로 장폭비 환산계수(β)는 0.69로 추산되었다. Index법에 의한 평가결과, Morill 지수값은 1.69, Modal 지수값은 0.90으로 나타나고 있으며, 단

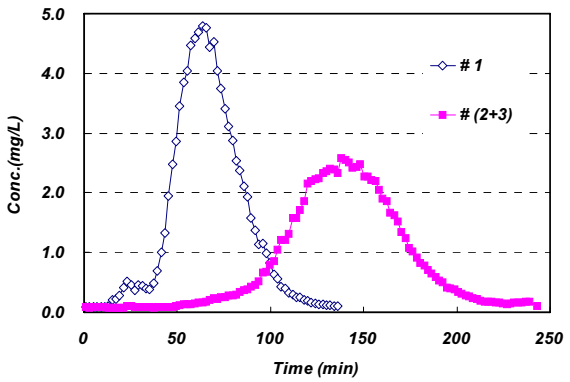

Fig. 2 The results of tracer test (No. 1 inlet valve 100% open)

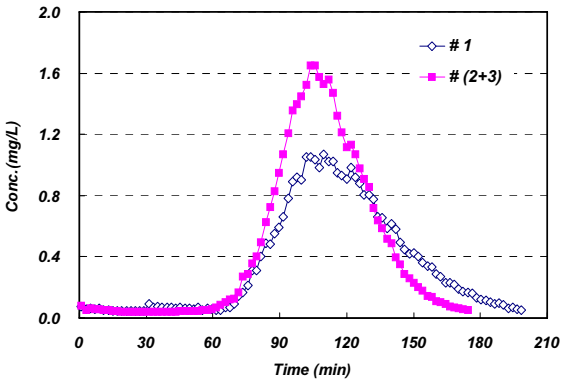

Fig. 3 The results of tracer test (No. 1 inlet valve 50% open)

Table 3. Hydraulic characteristics indicated by index method (No. 1 inlet valve 100% open)

평 가 항 목	# 1	# (2+3)
T	76.5분	153.4분
Mean residence time	67.8분	141.3분
T_{10}	47.3분	105.3분
T_{50}	65.5분	139.5분
T_{90}	89.7분	178.0분
T_P	68.0분	137.5분
$\frac{T_{10}}{T}\ (\beta)$	0.62	0.69
Morill index = $\frac{t_{90}}{t_{10}}$	1.90	1.69
Modal index = $\frac{t_p}{T}$	0.83	0.90
단락류 index = $\frac{(t_g - t_p)}{t_g}$	0.07	-0.13
Plug Flow (p)	0.53	0.56
Mixes Flow (1-p)	0.47	0.44

Table 4. Hydraulic characteristics indicated by index method (No. 1 inlet valve 50% open)

평 가 항 목	# 1	# (2+3)
T	129.3분	109.0분
Mean residence time	118.6분	110.1분
T_{10}	87.6분	85.1분
T_{50}	115.9분	107.2분
T_{90}	152.2분	133.5분
T_P	110.0분	105.0분
$\frac{T_{10}}{T}\ (\beta)$	0.68	0.78
Morill index = $\frac{t_{90}}{t_{10}}$	1.74	1.57
Modal index = $\frac{t_p}{T}$	0.85	0.96
단락류 index = $\frac{(t_g - t_p)}{t_g}$	-0.11	-0.21
Plug Flow (p)	0.50	0.51
Mixes Flow (1-p)	0.50	0.49

락류 지수는 음의 값을 나타내서 거의 단락류가 발생하지 않는 것으로 평가할 수 있다.

조건 2의 실험인 기존 #1 정수지로 유입되는 밸브를 50%만 개도하였을 때, 추적자 실험에 있어서 유량조건은 기존 #1 정수지로 유입되는 유량은 740 m^3/hr이고 신설 #3지로 유입되는 유량은 총 유량 2,500m^3/hr중에서 그 나머지인 1,760m^3/hr이 실험기간 동안 유입되었다.

다음 **Fig. 3**은 기존 #1 정수지 유입밸브를 50% 개도한 경우 샘플링 지점 1번지점과 2번지점에서 불소 농도를 측정한 결과를 도시한 것이다.

Fig. 3과 **Table 4**에서 나타나듯이, 기존 #1 정수지의 유입밸브를 50%만 개도하여 유입되는 유량을 줄인 경우, 이론적 체류시간은 129.3분, 평균체류시간은 118.6분으로 나타났다. 또한, T_{10}은 87.6분으로 장폭비 환산계수(β)는 0.68로 추산되었다. Index법에 의한 평가결과, Morill 지수값은 1.74, Modal 지수값은 0.85으로 나타나고 있으며, 단락류 지수는 -0.11로 측정되었다.

또한, 기존 #2 정수지와 #3 신설 정수지를 관로로 연결

상하수도학회지, 논문
25권 4호, pp.497-502, 8월, 2011

한 경우, 전체 이론적 체류시간은 109.0분, 평균 체류시간은 110.1분으로 나타났다. T_{10}은 85.1분으로 장폭비 환산계수(β)는 0.78로 추산되었는데 이러한 상승폭은 기존 #1번 정수지의 경우와 비슷한 양상을 보이고 있다. 또한, Index법에 의한 평가결과, Morill 지수값은 1.57, Modal 지수값은 0.96으로 나타나고 있으며, 단락류 지수는 음의 값을 나타내서 거의 단락류가 발생하지 않는 것으로 평가할 수 있다.

이에 기존 #2 정수지와 #3 신설지를 직렬로 연결하는 경우 그 영향은 작지만 #1 정수지의 T_{10}/T 값과 비교할 때 두 정수지의 총 T_{10}/T값을 0.07~0.1 (10% ~ 12%)정도 증가시키는 역할을 하는 것으로 조사되었다. 이러한 경우 기존 #2 정수지와 #3 신설지의 규모가 거의 비슷하여 용적의 2배 증가분이 환산계수 증가에 미치는 영향으로 사료된다. 결론적으로 염소 접촉조에서 소독을 목적으로 하는 정수지 증설을 위하여 선택 가능한 직렬 연결 방식의 적용은 현장 여건에 따라 정수지 증설 공사의 하나의 대안이 될 수 있다. 또한, 같은 모양의 정수지에 유입유량을 줄이거나 증가시켜 유량이 변경되는 경우, 용적이 작은 정수지(기존 #1 정수지)에 비해 용적이 큰 정수지(기존 #2 정수지와 #3 신설지 통합)가 수리흐름 특성 값들이 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

이러한 정수지 개량 후 소독능을 안정적으로 달성하는지의 여부를 소독능 달성이 어려운 겨울철 최악 조건을 적용하여 다음의 **Table. 5**와 같은 기준으로 평가하였다. 소독능 평가 결과 불활성화비 1.16으로 소독능을 만족하는 것으로 나타났다.

Table. 5 소독능 평가 조건 (동절기 최악조건)

소독제명	잔류염소 (㎎/L)	온도(℃)	pH
유리염소	0.7	0.5	7.5

Table. 6 소독능 평가 결과

구 분	통과 유량 (㎥/hr)	장폭비 환산 계수	체류 시간 (min)	C・T 값 (계산)	바이러스 불활성비	지아디아 불활성비
#1지	740	0.68	104.3	49.6	8.67	1.20
#2+3지	1,760	0.78	87.9	48.0	8.38	1.16

4. 결 론

본 연구에서는 국내 전북의 S_정수장을 대상으로 정수지를 직렬로 확장시키는 경우 실제 추적자 실험을 통해 T_{10}/T, Morill지수, Modal 지수 및 단락류 지수를 이용하여 수리흐름의 특성을 조사하고 소독능의 이상여부를 평가하였다. 또한, 동일한 모양의 정수지에 유입유량을 달리하는 경우 수리흐름 특성이 변화하는 민감도에 대해서 고찰하였다. 이에 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 기존 정수지와 신설정수지를 직렬 만수관으로 연결시키는 경우를 대상으로 추적자 실험을 수행한 결과, 기존 #1 정수지에서는 장폭비 환산계가 유량에 따라 0.62 ~ 0.68, 기존 #2 정수지와 #3 신설지를 직렬로 연결하는 경우에는 0.69 ~ 0.78로 도출되어 정수지의 직렬 연결은 단수 없이 시공이 가능하다고 결론지을 수 있으며, 또한 직렬 연결을 통한 용적의 증가는 작지만 환산계수의 제고에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2) 같은 모양의 정수지에 유입유량을 변동시키는 경우 기존 #1지와 같이 용적이 작은 정수지에 비해 #2지와 #3지가 통합되어 용적이 큰 정수지가 수리흐름 특성상 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 이러한 직렬 연결 방식의 정수지 증설시 소독능 평가결과 소독능이 저하되는 현상은 없는 것으로 판단된다.

참고문헌

김선진, 김성수, 박노석, 차민환, 왕창근 (2010) "Transient CFD 모사기법을 이용한 정수지 최적설계 사례연구" 상하수도학회지, Vol.24, No.4, pp.425-432.

박현오, 박노석, 차민환, 김사동, 원찬희 (2010) "유공벽을 이용한 우류식 염소접촉조 사류 저감 방안 연구" 상하수도학회지, Vol.24, No.5, pp.519-525.

신은허, 이승재, 김성훈, 박희경, (2008) "정수지 내부 단락류 발생평가 :Part A. 정수장 내부 단락류 분석을 통한 장폭비와 형태가 T_{10}/T값에 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}/T증가 분석", 상하수도학회지, Vol.22, No.1, pp.113-120.

신은허, 김성훈, 박희경, 안재찬, 최재호, 최영준, (2005) "정수지의 형상과 유입유량이 T10에 미치는 영향연구" 상하수도학

회지, Vol.19, No.6, pp.819-826.

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

한국상하수도협회, 상수도시설 유지관리매뉴얼, 2007

환경부, 2010, 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.

Clark. M.M., Ducoste J. and Burns C. (1999) *Improving Clearwell Design for CT Compliance*, AWWARF and AWWA

Currie, I. G., (1993) Fundamental mechanics of fluids, McGraw-Hill, New York.

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

Hudson, H. E. Jr (1981) Water clarification Process, Practical Design, and Evaluation, Van Nostrand Reinhold, New York.

Kawamura, S. (2000) Integrated Design of Water Treatment Facilities, 5th ed., John Wiley&Sons, New York

Lee Seungjae, Shin Eunher, Kim Sunghoon and Park Heekyung (2006) "Improving Hydraulic Efficiency of Clearwell Using CFD Simulation", 15th Joint KKNN Symposium, Kyoto, Japan.

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

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.