

정수지의 형상과 유입 유량이 T_{10} 에 미치는 영향 연구

Effect of Shape and Flow Rate on T_{10} in Clearwell

신은허¹ · 김성훈¹ · 박희경^{1,*} · 안재찬² · 최재호² · 최영준²

Shin, Eun-Her¹ · Kim, Sung-Hoon¹ · Park, Hee-Kyung^{1,*} · Ahn, Jae-Chan² ·
Choi, Jae-Ho² · Choi, Young-June²

1 KAIST 건설 및 환경공학과

2 서울시 상수도연구소

(2005년 11월 1일 논문 접수: 2005년 12월 13일 최종 수정논문 채택)

Abstract

To guarantee the disinfection ability in clearwell, a value of CT is considered where C[mg/l] is disinfectant residual at the exit of clearwell and T[min] means T_{10} , the contact time when 10% of tracer is out of clearwell after introducing the tracer at the inlet. To meet a CT value required, increasing the C value is not recommended because high C value can increase potential of producing disinfection by product like THMs. Increasing the hydraulic efficiency surrogated by T_{10} is thus an option widely recommended. Right now, it is widely adopted estimating T_{10} considering LW ratio only due to the suggestions of previous researches. The authors think however there are other factors to consider including shape, flow rate, configuration of inlet and outlet, and the existence of intra basin. This study is initiated to closely look at the effects of two factor on hydraulic efficiency. The factors are shape and inlet flow velocity, i.e., inflow. For that, computational fluid dynamics (CFD) model is developed and pilot test is also carried out. The results show that at a L/W ratio, disinfection ability is overestimated with larger length in shape and higher inlet flow velocity. This suggests that in determining T_{10} , the shapes of clearwell and inlet flow velocity should also be considered as well as L/W ratio.

Key words: CFD model, hydraulic efficiency in clearwell, LW ratio, shape factor, flow rate

주제어: CFD 모델, 수리학적 효율, 장폭비, 형상 계수, 유입 유량

1. 서 론

소독은 가장 기본적인 효과적인 수인성 미생물

제거 공정이며, 현재 정수처리 기준으로 바이러스는 $4\text{-log}(99.99\%)$, 지아디아는 $3\text{-log}(99.9\%)$ 의 불활성화를 요구하고 있다. 정수지에서 소독제에 의한 불활성화는 CT 값과 pH, 수온, 잔류염소농도를 같이 고

*Corresponding author. Tel: +82-42-869-3620, FAX: +82-42-869-3610, E-mail: hxpark@kaist.ac.kr (Park, H.K.)

려하여 USEPA(1989)에서 개발한 표를 이용하여 평가한다. C [mg/l]는 정수지 유출부의 잔류 소독제 농도를 의미하며 T [min]는 접촉조 안에 90%의 유체가 남아있는 체류시간(T_{10})을 나타낸다. 요구 CT 값을 만족 하기위하여 투입되는 염소의 양을 증가시키는 것은 THMs과 같은 소독부산물을 발생시킬 수 있으므로, 수리학적 효율을 향상 시키는 것, 즉 T_{10} 을 증가시켜 조건을 만족하는 것이 더 바람직 할 것이다.

정수지의 수리학적 효율 향상을 위하여 가장 보편적으로 사용되는 것은 도류벽(Baffle)이다. Marske와 Boyle(1973)은 세로방향의 도류벽 설치 시 정수지의 수리학적 효율이 향상됨을 보여주었다. Bishop(1993)은 장폭비(LW ratio)의 개념을 도입하여 조내 도류벽 형태를 정량화 하였으며, 장폭비를 통하여 수리학적 효율을 산정하였다. 그 결과 장폭비가 20일 때까지 T_{10} 이 선형적으로 증가하다가 그 이후로는 증가가 둔해지며 50 이후에는 변화가 없음을 보여주었다. 그러나 이 결과는 7.4, 16.7, 46.1의 세 가지 장폭비에서 수행된 실험의 결과이어서 정확한 경향을 반영하기는 무리가 있다. Clark(1999)은 장방향의 구조(가로 세로 수위: 8feet × 8feet × 1feet)에 일정량의 유량 시 (77.87lpm) 9개의 pilot test를 통하여 Fig. 1과 같이 보다 정밀하게 장폭비와 T_{10} 값의 관계를 정립하였으며, 현재 정수지의 소독능(CT 값) 평가를 위한 T_{10} 값은 Clark의 실험 결과를 이용해 간접적으로 산정하고 있다. Hannoun(1995)은 4개의 정류벽을 설치하여 50%의 T_{10}/T 값의 향상을 보였으며, Henry와 Freeman(1995)은 오존 접촉조에서 내부 도류벽이 단락류 발생을 억제하는 것을 보고하였다. 또한 Bishop(1993)의 연구에서 유량이 다를 경우 15%의 수리학적 효율의 차가 있음을 알 수 있었으나, 이에 관한 자세한 연구는 수행되지 않았다. 따라서 정수지의 수리학적 효율을 평가하는데 항의 구조, 유입 유량, 유입구 유출부의 형태와 위치, 내부도류벽을 유무 등의 여러 가지 영향요소를 무시하고 단순히 장폭비만으로 수리학적 효율을 평가하는 것은 문제가 있을 것으로 사료된다.

조의 수리학적 효율에 영향을 미치는 영향 요소들 중 가장 고려되어야 할 사항은 조 내부의 구조를 설명하여 주는 장폭비와 조의 형상, 유입 유량이다. 따라서 본 논문에서는 기존에 정수지의 수리학적 효율

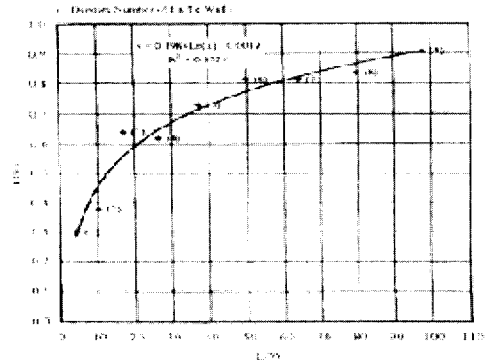


Fig. 1. The relation of LW ratio and T_{10}/T in Mark M. Clark's pilot tests.

을 산정하는데 있어 장폭비만 고려하는 데에서 더 나아가, 형상과 유입 유량이 수리학적 효율에 미치는 영향에 대하여 연구하여 향후 정수지 설계 시 보다 정확한 수리학적 효율을 산정하고자 하였다. 이를 위하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 이용한 simulation과 pilot test를 수행하였다. 개발된 CFD 모델은 Clark의 Pilot test와 직접 수행한 Pilot test를 통하여 검증하였다.

2. 연구 방법

수행된 Pilot test 및 CFD simulation은 조의 수위 (0.30m) 및 부피(1,772m³)는 일정하게 유지시켰다. 형태가 수리학적 효율에 미치는 영향을 분석하기 위해 일반적인 정수지 형태를 포함하는 범위인 가로:세로의 비율이 1:2(Type I), 1:1(Type II), 2:1(Type III)인 세 가지의 Type들을 고려하였으며, 유입 유량은 Clark의 pilot test시 유입유량의 1/2배, 1배, 2배인 Q_1 (38.94l/min), Q_2 (77.87l/min), Q_3 (155.74l/min)의 세 가지 경우를 고려하였다. Type II, Q_2 의 Case가 Clark의 Pilot test이다. CFD simulation은 모든 Type과 유입 유량의 경우에 수행 되었으며, Pilot test는 Type I과 Type III의 경우에 수행 되었다. 수행된 Case의 조건은 Table 1에 나타나 있다.

2.1. CFD Model 개발

상용 CFD package를 이용하여 CFD simulation을 수행하였으며, 정수지 CFD Model의 형상은 아래

Table 1. Cases of CFD simulations and Pilot tests

유량[l/min]	형태[m] (가로*세로*높이)	Type I	Type II	Type III
		1.707*3.414*0.30	2.414*2.414*0.30	3.414*1.707*0.30
Q1	38.94	Type I-Q1	Type II-Q1	Type III-Q1
Q2	77.87	Type I-Q2	Type II-Q2	Type III-Q2
Q3	155.74	Type I-Q3	Type II-Q3	Type III-Q3

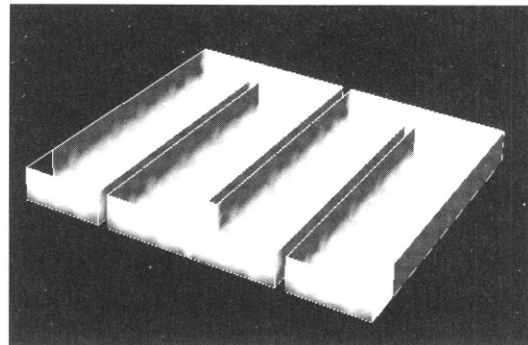
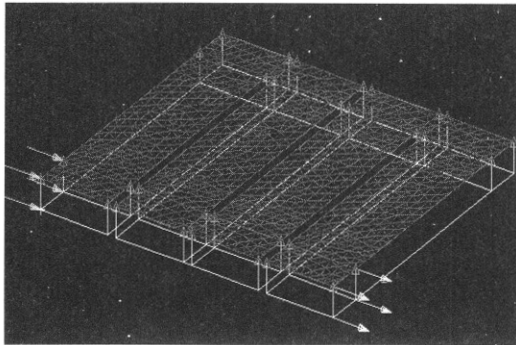


Fig 2. CFD Model mesh(left) and configuration(right).

Table 2. CFD Model Condition

항목	조건	항목	조건
유체	순수한 물(25도)	수면 조건	free-slip condition
난류 모델	k-ε model	Mesh	tetra mesh
Heat transfer	고려 안함	Mesh 갯수	약 10만 개
유입 유량 및 수위 변동	없음	iteration 횟수	50회
유출부 압력	1 atm	time step	30초
벽면 조건	no-slip condition	수렴 조건	target residual < 10 ⁻³

Fig. 2 와 같이 실제 Pilot plant와 동일한 형상을 가지도록 구성하였고, 그 외에 다른 조건들은 **Table 2** 와 같다. 정수지를 CFD 모사하는데 난류 모델은 k-ε이 가장 타당하므로 이 모델을 이용하였다(Wang, 1998).

CFD model을 **Table 2**의 조건으로 설정한 뒤, simulation을 다음과 같은 과정으로 수행하였다.

- 처음에 tracer 투입 없이 임의의 initial condition으로 steady상태로 simulation 함.
- 이 결과를 initial condition으로 설정.
- diffusivity가 없고 화학적으로 안정한 tracer를 유입부에 초기에 투입하고, transient state로 simulation을 수행.

- 유출부에서 유출되는 tracer양을 측정하여 E-curve 및 누적함수 F-curve를 구한 후, 수리학적 효율(T_{10}/T) 평가.

Set up된 CFD Model은 Clark의 pilot test 결과와 수행한 pilot test 결과를 통하여 검증하였다. Clark의 pilot test 및 수행된 pilot test의 조건은 **Table 3**과 같다.

2.2. 형상이 수리학적 효율에 미치는 영향 평가
대다수의 정수지가 직사각형의 형태를 띠고 있으므로 본 연구에서는 직사각형의 형상을 가지는 정수지의 형상에 따른 수리학적 효율을 평가하였다. 정수지의 형태가 장폭비와 T_{10}/T 의 관계에 미치는 영향

Table 3. Clark's pilot test conditions and performed pilot test conditions

특징	Clark's pilot test	Pilot test
항의 구조[m] (가로*세로*높이)	2.414*2.414*0.30	3.414*1.707*0.30
도류벽 구조[m] (가로*세로*높이)	0.01*2.009*0.30	0.01*1.402*0.30
이론적 체류 시간[min]		23.2
유입구, 유출구 형태		원형
유입구, 유출구 지름[m]		0.091
유입 유량[l/min]		77.87

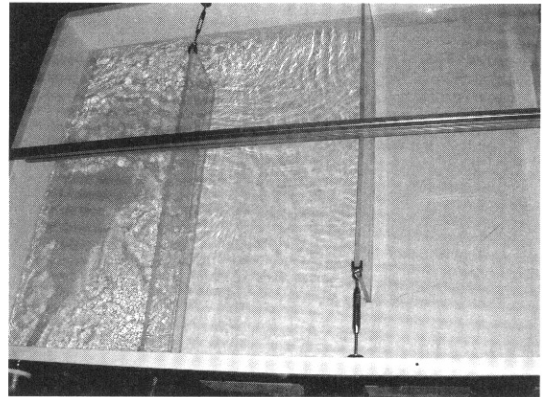
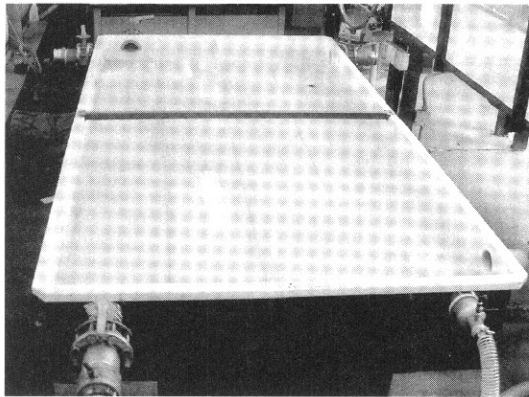


Fig. 3. Performed pilot plant.

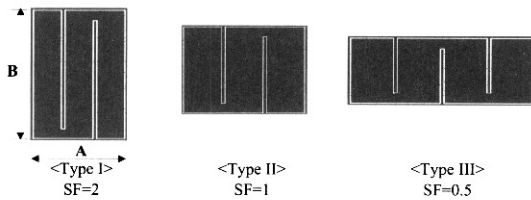


Fig. 4. Types of clearwell.

을 알아보기 위하여 Shape factor를 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Shape Factor (SF)} = \frac{\text{정수지 가로 길이}}{\text{정수지 세로 길이}} = \frac{B}{A}$$

기존 정수지의 설계 Guideline은 shape factor가 1일 경우의 pilot test 결과를 통하여 도출된 결과이다. 그러나 정수지의 형상은 항상 장방형(SF = 1)이 아니고, 매설 지형에 따라 다양한 형태를 가진다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 정수지의 형상을 나타낼 수 있는 범위인 Shape factor가 2, 1, 0.5인 Type I, Type II, Type III의 3가지 경우의 CFD Simulation 및 Type I,

Type III의 Pilot test를 수행하여, 같은 장폭비 및 조건 하에서 형태가 달라짐에 따라 수리학적 효율이 어떻게 변하는지를 연구하였다. 수행된 Type들의 형태와 조건들은 Fig. 4와 Table 4에 나타나 있다.

2.3. 유입 유량이 수리학적 효율에 미치는 영향 평가

정수지 운영 시 가장 큰 문제점중 하나는 유입 유량이 일정하게 유지되지 않고, 시간에 따라 변화한다는 것이다. 유입 유량이 변동되면 정수지의 수리학적 여건이 달라져서, 다른 형태의 수리학적 효율을 가질 것으로 예상된다. 그러나 이 영향 요소 또한 정수지를 설계하는데 있어서 고려되지 않고 있다.

따라서 이러한 문제점을 알아보고 해결하기 위하여 2.1절에서 수행된 동일한 형태의 pilot test와 검증된 CFD model을 이용하여 유입 유량의 변화에 의한 장폭비와 T_{10}/T 의 관계의 변화에 대하여 연구하였다. Pilot test는 Type I, III에 대하여, CFD simulation은 Type I, II, III에 대하여 수행되었으며, 고려된 유입 유량은 $Q_1 = 38.94\text{liter/min}$, $Q_2 = 77.87\text{liter/min}$, 그

Table 4. The conditions of CFD simulations and pilot tests

	Type I	Type II	Type III
Shape factor	2	1	0.5
항의 구조(가로*세로*높이)[m]	1.707*3.414*0.30	2.414*2.414*0.30	3.414*1.707*0.30
도류벽 구조(가로*세로*높이)[m]	0.01*3.009*0.30	0.01*2.009*0.30	0.01*1.402*0.30
이론적 체류 시간[min]		23.2	
유입구, 유출구 형태		원형	
유입구, 유출구 지름[m]		0.091	
유입 유량[l/min]	77.87		

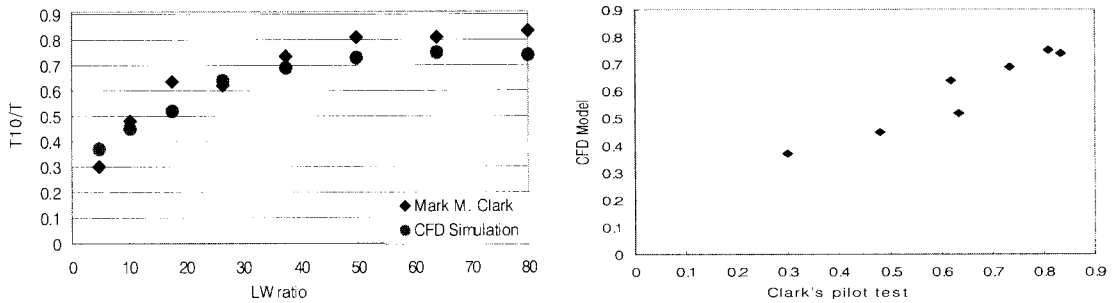


Fig. 5. Clark's pilot test results vs CFD simulation results.

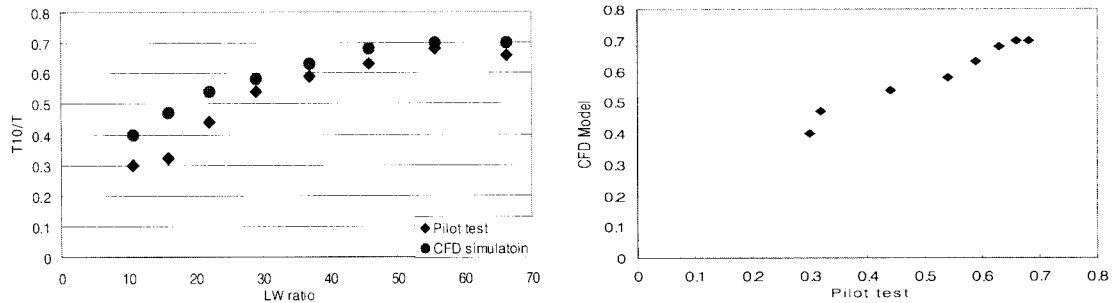


Fig. 6. Performed pilot test results vs CFD simulation results.

리고 $Q_3 = 155.74$ liter/min이다. 이 중 Q_2 의 경우가 Clark의 pilot test에서 적용한 유입 유량이다. 유입 유량의 변화에 따라 수위의 변화가 약간 있지만, 이것이 장폭비와 T_{10}/T 에 미치는 영향은 미미하여 고려하지 않았다.

3. 연구 결과

3.1. CFD Model 개발

Clark의 pilot test와 set up된 CFD Model의 simulation은 Fig. 5에서 나타난 것과 같이 유사한 결과를 보였다. 그러나 Clark의 pilot test에서는 장폭비

가 50이 넘어서도 수리학적 효율이 지속적으로 증가되었으나, CFD simulation에서는 더 이상의 수리학적 효율의 증가가 없었다. 그러나 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 Clark의 pilot test에서도 장폭비가 50이 넘어가는 6, 7, 8번째 경우에도 T_{10}/T 값의 증가는 거의 없었으나, 9번째 경우 급격한 증가를 보여서 전체적으로 장폭비가 50이 넘어가도 수리학적 효율이 증가하는 결과를 보여 주었다. 따라서 이는 9번째 pilot test의 실험 오류라고 판단되며, 장방향의 형태, 즉 SF=1에서는 장폭비 50 이후의 범위에서는 수리학적 효율의 증가가 없을 것으로 사료된다.

수행된 pilot test와 set up된 CFD Model의

simulation 또한 Fig. 6에서와 같이 유사한 결과를 보이므로, set up된 CFD Model은 적절히 검증되었다고 판단된다.

3.2. 형상이 수리학적 효율에 미치는 영향 평가

Type I, II의 pilot test와 Type I, II, III의 CFD simulation의 장폭비와 수리학적 효율(T_{10}/T)의 관계는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나 있다. Type I과 Type II는 같은 장폭비에서 유사한 T_{10}/T 값을 가지나, Type III의 경우 Type I, II보다 같은 장폭비에서 낮은 수리학적 효율을 가진다. 같은 장폭비에서 형태가 다르므로 해서 T_{10}/T 값이 최대 0.15 정도 차이가 나며, 더 큰 문제점은 이러한 차이가 나타나는 영역이 실제 정수지의 설계에서 가장 널리 이용되는 장폭비가 25~30 범위에서 발생한다는 것이다. 이와 같은 결과를 보이는 이유는 같은 장폭비에서 Type I과 Type II는 비슷한 도류벽의 숫자를 가지나 Type III의 경우 다른 Type에 비해 많은 도류벽의 숫자를 가져, 수리학적 효율을 감소시키는 주 사류 지역인 180 turning이 발생하는 지역이 많음에 기인하는 것으로 사료된다. 180° turning 영역에서는 유속이 빨라지고, 유속변화가 커서 단락류가 발생하기 용이하기 때문이다.

또한 장폭비가 60이 넘은 후에는 Shape Factor(SF)에 상관없이 일정한 T_{10}/T 값에 수렴함을 알 수 있다. SF가 1 이상의 범위에서는 장폭비를 40 이상 증가시켜도 수리학적 효율의 향상이 없으며, SF가 0.5 범위에서는 장폭비를 60까지 장폭비를 증가시켜도 수리학적 효율의 증가가 있음을 알 수 있었다.

정수지를 설계하는데 있어서 현재처럼 형상을 고려하지 않고, 단지 장폭비만을 고려하는 것은, 낮은 Shape Factor를 가지는 정수지의 수리학적 효율을 과대평가하는 문제가 발생 한다. 따라서 정수지의 설계시 정수지의 형상은 고려하여야 할 것이다.

3.3. 유입 유량이 수리학적 효율에 미치는 영향 평가

CFD simulation과 pilot test 결과 Type에 상관없이 모든 경우에서 같은 장폭비를 갖을 때, 유입 유량이 증가함에 따라 T_{10}/T 의 값은 감소함을 알 수 있었다. 이는 유입 유속이 빨라질수록 유입부에서 mixing이 잘되지 않아서, 유입부 이후에 flow 형태가 plug flow

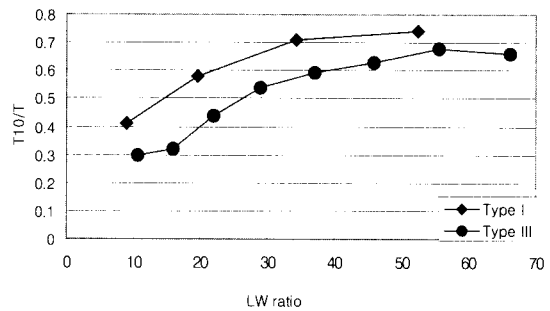


Fig. 7. The relation of LW ratio and T_{10}/T in Type I and III as pilot test results.

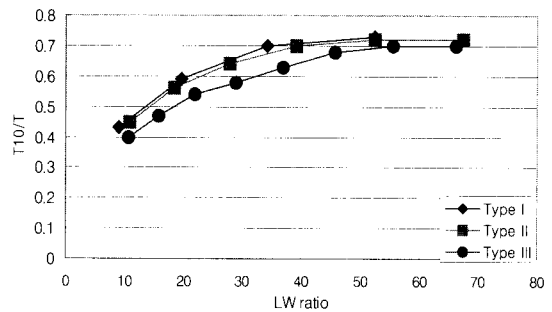


Fig. 8. The relation of LW ratio and T_{10}/T in Type I, II and III as CFD simulation results.

형태를 띠지 않게 됨에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 9-Fig 13에서 나타난 것과 같이 모든 Type에서 낮은 장폭비의 범위(10 근처)에서는 T_{10}/T 값의 차이는 유입 유속에 상관없이 비슷한 값을 가졌으나, 장폭비가 증가할수록 유입 유속이 낮은 경우(Q_1)와 유입 유속이 빠른 경우(Q_3)의 T_{10}/T 값의 차이가 점점 벌어짐을 알 수 있었다. 이는 장폭비가 증가할수록 유입 유속이 수리학적 효율에 미치는 영향이 커짐을 의미한다.

CFD simulation 결과 유입 유량에 따른 T_{10}/T 값의 차이는 Type I의 경우 0.14, Type II의 경우 0.17, 그리고 Type III의 경우 0.12 정도 차이가 발생한다. 따라서 기존의 한가지의 유입 유속(Q_2)을 고려하여 T_{10}/T 값을 산정 할 경우, Q_2 보다 유입 유속이 빠른 경우에는 수리학적 효율의 과대평가를, Q_2 보다 유입 유속이 느릴 경우에는 수리학적 효율의 과소평가를 초래하게 될 것이다. 따라서 유입 유량 역시 정수지의 설계에서 장폭비와 함께 고려되어야 하는 사항임을 알 수 있다.

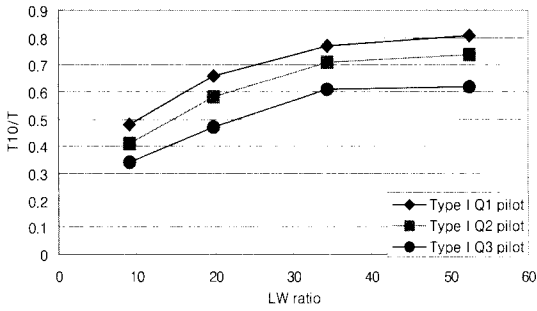


Fig. 9. The relation of LW ratio and T_{10}/T in Type I varying with flow rate as pilot test results.

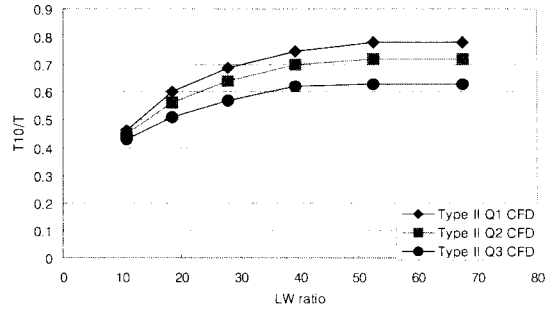


Fig. 12. The relation of LW ratio and T_{10}/T in Type II varying with flow rate as CFD simulation results.

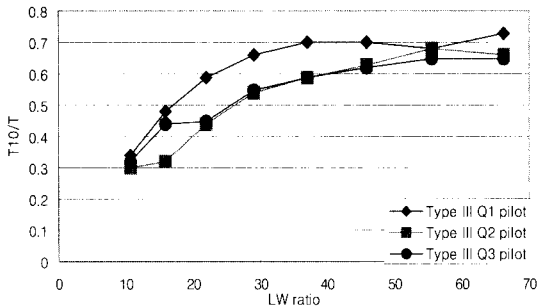


Fig. 10. The relation of LW ratio and T_{10}/T in Type III varying with flow rate as pilot test results.

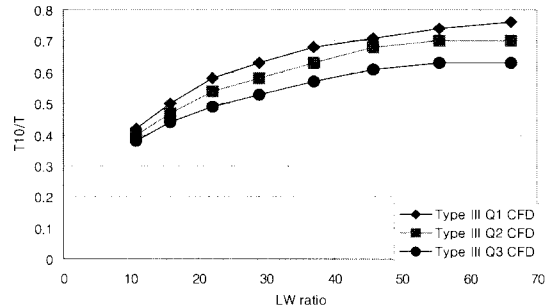


Fig. 13. The relation of LW ratio and T_{10}/T in Type II varying with flow rate as CFD simulation results.

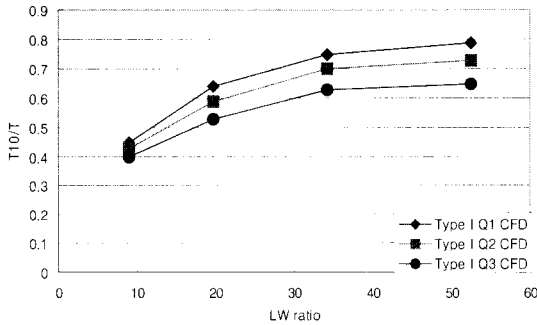


Fig. 11. The relation of LW ratio and T_{10}/T in Type I varying with flow rate as CFD simulation results.

4. 결 론

본 연구는 현재 정수지의 설계 시 T_{10}/T 값 산정을 위해 고려되는 영향요소인 장폭비 이외에 정수지의 형상과 유입 유속이 수리학적 효율에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 도출할

수 있었다.

첫째, 개발된 정수지 모델의 CFD simulation 결과와 pilot test 결과 비교를 통하여 모델의 정당성을 검증할 수 있었다.

둘째, 정수지의 형상을 고려한 shape factor(SF)가 작을수록 같은 장폭비에서 수리학적 효율이 낮음을 알 수 있었다. 장폭비가 25~30 범위에서 T_{10}/T 값이 최대 0.15 정도 차이가 발생 하였으며, SF가 낮은 정수지의 경우 기존의 방식으로 소독능을 산정하게 되면 과대평가되는 문제가 발생한다.

셋째, SF가 0.5인 경우 T_{10}/T 값이 장폭비가 60에 이르기까지 증가하였으나, SF = 1의 경우와 SF = 2의 경우에는 40 이후의 장폭비에서는 T_{10}/T 값의 증가가 없었다. 따라서 형상에 따라 T_{10}/T 값을 증가시킬 수 있는 한계 장폭비의 값의 차이를 알 수 있다.

넷째, 유입 유속이 빠를수록 정수지의 형상에 관계 없이 수리학적 효율이 좋지 못함을 알 수 있었다. 낮은 장폭비에서는 형태에 상관없이 유사한 T_{10}/T 값을 가졌으며, 높은 장폭비에서는 형태에 따라 0.12~

0.17의 T_{10}/T 값의 차이를 보였다.

넷째, 정수지의 수리학적 효율을 산정하는데 있어서 장폭비만을 고려하는 기존의 방식은 정확한 값을 산정할 수 없으며, 형상과 유입 유속이 장폭비와 함께 수리학적 효율 산정시 고려되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 서울시 상수도연구소 "전산유체를 이용한 정수지 및 배수지 최적화 방안 연구" 연구비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- Bishop Mark M., J Mark Morgan, Brendon Cornwell, and Donald K. Jamison (1993) Improving the Disinfection Time of Water Plant Clearwell. *Jour. AWWA*, **85**(3), pp. 68-75.
- Buchberger, Steven G. and Lin (1995), Model for instantaneous Residential Water Demands, *Jour. of Hydraulic Engineering*, **121**(3), pp. 232-246.
- Charles N. Haas, Josh Joffe, Uma Anmangandla, Joseph G. Jacangelo, and Mark Heath(1996) Water quality and disinfection kinetics, *Jour. AWWA*, **88**(3), pp. 95-103.
- David J. Opferman, Steven G. Buchberger, and D. John Arduini (1995) Complying with the SWTR: Ohio's experience, *Jour. AWWA*, **87**(2), pp. 53-67.
- Hart, Frederick L., Richard Allen, and Joseph Di Alesio (1975), Modifications Improve Chlorine Contact Chamber Performance, *Water & Sewage Works*, pp. 88-90.
- Henry D.J., and E.M. Freeman (1995) Finite Element Analysis and T_{10} Optimization of Ozone Contactors, *Ozone Science and Engineering*, **17**, pp. 587-606.
- Hong Wang and Roger A. Falconer (1998) Simulating Disinfection Processes in Chlorine Contact Tanks Using Various Turbulence Model and High-Order Accurate Difference Schemes. *Wat. Res.*, **32**(5), pp. 1529-1543.
- Imad A. Hannoun, Faul Boulos (1997), Optimizing distribution storage water quality: A hydrodynamic approach, *Appl. Math Modelling*, **21**, pp. 495-502.
- Imad A. Hannoun, Paul F. Boulos, and John List (1998), Using hydraulic modeling to optimize contact time, *Jour. AWWA*, **90**(8), 77-87.
- Mark M. Clark, Joel Ducoste, and Catherine Burns (1999) Improving Clearwell Design for CT Compliance. *AWWARF and AWWA*.
- Susan M. Teefy and Philip C. Singer (1990) Performance and Analysis of Tracer Tests to Determin Compliance of a Disinfection Scheme with the SWTR, *Jour AWWA*, **82**(12), pp. 88-98.
- USEPA (1989) GuidanceManual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources, Denver, Co: *AWWA*.
- Walter M. Grayman, Rolf A. Deininger, Adam Green, Paul F. Boulos, Robert W. Bowcock, and chris C. Godwin(1996) Water quality and mixing models for tanks and reservoirs, *Jour. AWWA*, **88**(7), pp. 60-73.