

도류벽 형태에 따른 정수지 내 유동 특성과 소독능 변화에 대한 수치 해석적 연구

이 석 원, 박 준 정, 리 광 훈*

서울시립대학교 대학원 기계정보공학과, *서울시립대학교 기계정보공학과

Numerical Analysis for Characteristic of Flow and Disinfection Performance with Variation of Guide Wall in Clearwell

Suk Won Lee, Jun Jung Park, Gwang Hoon Rhee

Graduated School of Mechanical Information Engineering University of Seoul, 130-743, Korea

*Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

ABSTRACT: The SWTR(Surface Water Treatment Rule) requires achieving removal 99.9% Giardia and 99.99% Virus. To remove Giardia and Virus, disinfection process is essential process. CT is important index for Disinfection performance. CT value is expressed by CXT. C is represented by disinfection concentration and T is represented by T₁₀ which means 90% contact time in clearwell. To improve Disinfection performance, it is desirable to increase T₁₀. Primary factor affected T₁₀ is flow pattern. Because guide wall change that flow pattern is uniform, we have installed guide wall to increase T₁₀. In this paper, we have performed numerical analysis for clearwell installed symmetric guide wall and center divided guide wall using CFD. We have analyzed flow pattern and T₁₀ in each clearwell. And, we compare symmetric guide wall with center divided guide wall in flow pattern and T₁₀.

Key words: T₁₀, Flow pattern(유동 패턴), CFD(computational Fluid Dynamics), Symmetric guide wall(좌우 대칭형 도류벽), Center divided guide wall(중앙 분리형 도류벽)

기 호 설 명

- T : 소독제와 물의 접촉시간 [min]
- T₁₀ : 접촉조 안에 90%의 소독제가 남아 있는 체류시간 [min]
- T_t : 이론적 체류시간, $\frac{V}{Q}$ [min]
- C : 잔류 소독제의 농도 [mg/L]
- CT : 성능 평가 계수 [min · mg/L]

그 리 스 문 자

- β : 무차원 체류시간

1. 서론

정수지에서 원수로 이용되는 지표수는 여러 가지 미생물 또는 병원균을 포함하고 있기 때문에 안전한 수돗물을 공급하기 위해서는 원수 내 미생물과 병원균을 제거하는 과정인 원수 처리 과정을 거쳐야 한다. 원수 처리 과정 중 침전과 여과에 의하여 원수 중의 세균류는 대부분 제거되나 처리수의 화학적, 생물학적 안전도를 높이기

†Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2181; fax: +82-2-2248-5110

E-mail address: ghrhee@uos.ac.kr

위해서 필수적으로 소독 공정을 시행한다. 현재 미국의 지표수 처리법(SWTR, Surface Water Treatment Rule)에 따르면 상수처리에서 바이러스(Virus)와 원생동물인 지아디아(Giardia)를 각각 99.99%(4Log)와 99.9% (3Log) 제거를 요구하고 있으며, 바이러스와 지아디아의 불활성 정도를 확인하는 지표로서 CT값 평가를 이용한다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 그러나, 우리나라는 소독 공정에 대한 구체적인 기준이 확립되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 SWTR에서 제시하고 있는 CT값에 따라 정수지의 소독능을 평가하였다.

CT값은 잔류 소독제의 농도 C[mg/L]와 소독제와 접촉시간을 의미하는 T[min]의 곱으로 정의되며, 여기서 T는 접촉조 안에 90%의 소독제가 남아 있는 체류시간(T₁₀)을 나타낸다.⁽³⁾ 일반적으로 소독능의 평가는 CT값에 의해서 이루어지며, CT값이 높을수록 정수지의 소독능이 좋다고 판단할 수 있으며 C를 증가시킬 경우 정수지 내에 소독부산물 발생이 증가되기 때문에, T를 증가시키는 것이 바람직하다. T에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 정수지 내의 유동이며, 정수지 내의 사수부(Dead zone)나 단락류(short circuit)는 T를 감소시키는 주요인이다. 이러한 정수지 내에서의 유동 흐름은 정수지의 장폭비(L/W), 유입구와 유출구의 위치와 모양 그리고 내부 도류벽의 유무, 위치 등에 영향을 받는다.⁽⁴⁾

정수지 내의 T₁₀을 증가를 시키기 위해 가장 일반적으로 사용되는 방법은 내부 도류벽을 설치하여 유동 흐름을 원활하게 하는 것이다. Mark M. Clark (1999)등은 도류벽이 설치되었을 때의 실질적인 유로의 길이(L)를 도류벽이 설치되었을 때의 실질적인 유로의 폭(W)으로 나눈 무차원변수인 장폭비와 T₁₀과의 상관관계에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. 김정현 등(2002)은 실험대상으로 선정한 정수장을 대상으로 추적자 실험을 통해 각 정수장의 CT를 판단하였으며, 도류벽의 설치에 따른 각 정수장의 CT 변화를 알아보았다. 석관수 등(2002)은 실험과 CFD해석을 병행하여 두개의 결과를 서로 비교하여 CFD 해석의 타당성을 검증하였다. 신은허 등(2005)은 정수지의 형상과 유입 유량이 T₁₀에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다.⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾

본 연구에서는 도류벽의 형태에 따른 유동 형상과 T₁₀의 변화에 관하여 전산 해석을 통한 연

구를 수행하였다. 상용 열유체 해석 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 좌우 대칭형 도류벽이 있는 정수지와 중앙 분리형 도류벽이 있는 정수지 내부의 유동 흐름과 T₁₀을 비교하여 효율적인 도류벽 형태에 대해 연구를 수행하였다.

2. 지배방정식 및 전산해석 방법

일반적인 비압축성 유체에서의 연속, 운동량 그리고 에너지 전달 방정식을 텐서 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1.)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + V \cdot \nabla u_i \right) = \rho g + \nabla P + \mu \nabla^2 u_i \quad (2.)$$

본 연구에서 해석대상으로 선정된 정수지의 유동 영역은 난류영역이므로 난류 해석을 위해 Standard k-ε high Reynolds number 모델을 적용하였다.

본 연구에 적용된 전산해석 방법에 대해 간략한 설명을 하면, 전체적인 지배방정식의 차별화는 유한체적법(FVM)을 적용하였으며 대류항 처리는 2차 정확도를 가진 Quick Scheme을 사용하였다. 압력 보간으로는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였으며 시간 분할을 위한 방법으로 Crank - Nicholson 도식을 사용하였다.⁽⁹⁾

3. 해석대상 및 경계조건

본 연구에서는 예천군 용문정수장을 해석모델로 선정하여 전산해석을 수행하였으며 그 모형은 Fig.1과 같다. 용문 정수장의 크기는 10m(L)×10m(W)×5m(H)이고 평균 수위(H_{ave})는 3.6m이다. 전산 해석을 위한 격자구성은 전체적으로 비균일 hexahedron 격자계를 구성하였으며, 격자의존성 및 시간 의존성을 위한 사전 해석을 바탕으로 격자수를 약 100000개로 하였으며, 시간 분할은 10초로 하였고 각 Time step마다 잔류량이 10⁻⁵ 미만이 된 경우에 수렴되었다고 판정하였다.

정수지에 물이 유입되는 현상을 모델링 하기

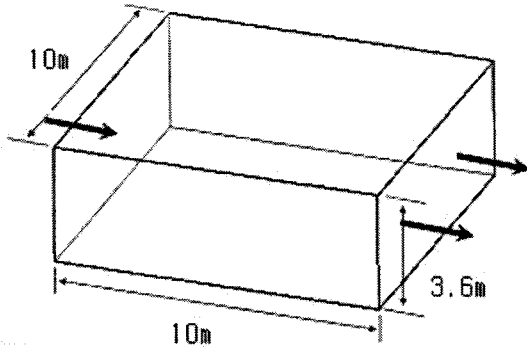


Fig. 1 Schematic diagram of clearwell.

위해 정수장 입구에 일정 유량 경계조건으로 0.01333 m³/s 적용하였고 벽면에는 no - slip 경계조건을 적용하였다. 또한 실제 정수장에서 자유 표면을 모사하기 위해 물과 공기의 접촉면에 자유 표면 경계조건을 적용하였다. 정수지에서 성능 평가시 일반적으로 사용하는 추적자 실험을 모델링 하기위해 실제추적자로 가장 많이 사용되어지고 있는 불화나트륨(NaF)을 유입시켰으며, 시간에 따른 불화나트륨(NaF)의 농도 분포를 알아봄으로써 소독능을 평가하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 정수지의 형태에 따른 정수지 내부 유동과 T₁₀의 변화에 대해 알아보기 위하여 좌우 대칭형 도류벽과 중앙 분리형 도류벽이 있는 정수지에 대해 전산 해석을 수행하였다. 일반적으로 추적자 실험을 통해 T₁₀을 구할 경우 유출부에서 추적자 농도를 측정하여 주입된 추적자 양으로 나누어 그 값이 0.1이 되는 지점의 시간을 T₁₀으로 결정한다.⁽⁶⁾ 본 연구에서는 유입구에서 추적자가 100% 유입되도록 경계조건을 적용하였으므로 유출부에서 추적자의 농도가 0.1이 되는 시간은 T₁₀으로 판단할 수 있다.

4.1 좌우 대칭형 도류벽의 개수 변화에 따른 $\beta(T_{10}/Tt)$ 의 변화

본 연구에서는 우선 좌우 대칭형 도류벽이 있는 정수지에서 장폭비에 따른 정수지의 T₁₀의 변화에 대해 전산 해석을 수행하였고 Clark의 실험

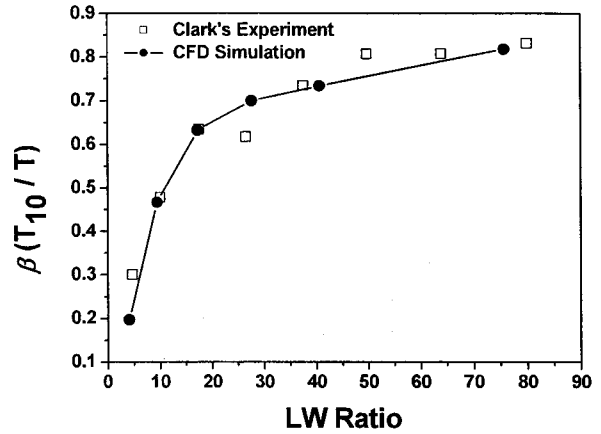


Fig. 2 The relation of LW ratio and β in Clark's experiment and CFD simulation.

Table 1 T₁₀ and β at Symmetric Guide Wall

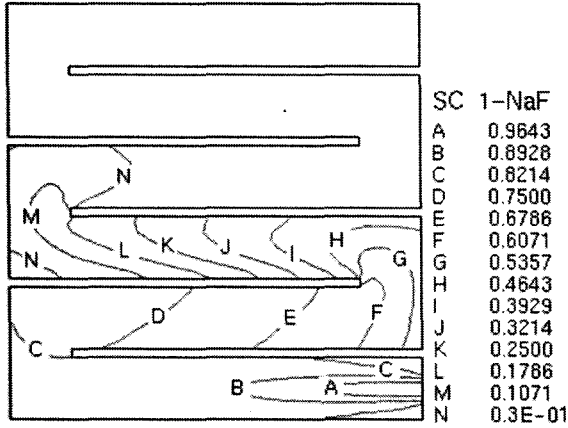
Guide Wall No.	LW Ratio	T ₁₀ (min)	$\beta(T_{10}/Tt)$
No Baffle	1	18	0.039
1	4.12	88	0.19
2	9.50	204	0.47
3	17.28	272	0.63
4	27.61	295	0.70
5	40.67	302	0.73
7	75.72	322	0.81

결과와 본 연구로부터 얻어진 전산 해석 결과를 비교함으로써 전산 해석의 타당성을 검증하였으며 Fig. 2에 나타내었다.

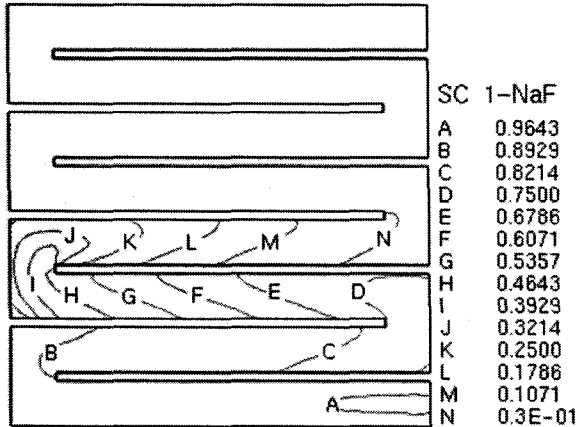
Fig. 2는 본 연구로부터 얻어진 전산해석 결과와 Clark의 실험 결과를 비교한 그래프이며 그래프로부터 본 연구의 전산 해석 결과는 Clark의 실험 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

정수지의 내부 도류벽의 개수를 1개부터 7개까지 변경시켜가면서 전산 해석을 수행하였으며 그 결과를 Table 1에 표시하였다. Table 1은 장폭비(L/W) 변화에 따른 T₁₀과 T₁₀을 이론적인 체류시간(Tt)으로 무차원화 시킨 β 를 각 경우마다 나타내고 있으며 여기서 β 는 접촉 탱크 내의 단락류를 측정하는 기준으로 사용되는 계수로써 β 가 클수록 단락류가 적어지는 특징을 지닌다.⁽¹⁰⁾

Table1로부터 도류벽이 있는 모든 경우에서 T₁₀과 β 가 도류벽이 없는 것보다 높다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 도류벽이 정수지



(a) 5 baffle

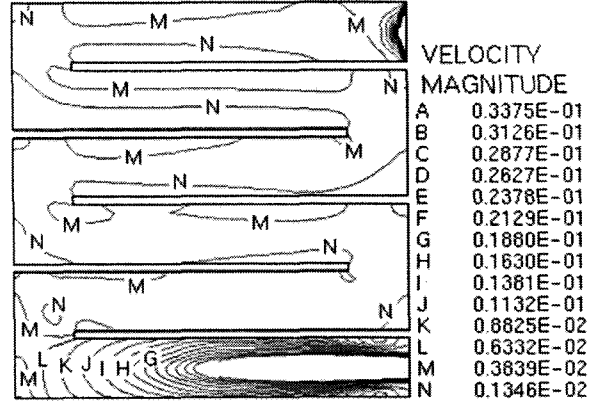


(b) 7 baffle

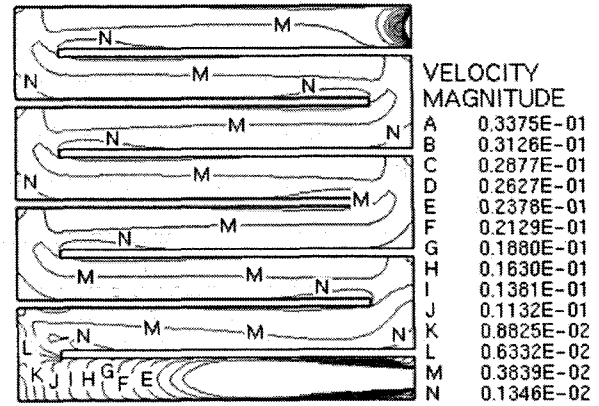
Fig. 3 Concentration of NaF at 2hour in symmetric guide wall

내의 유동 흐름을 원활하게 하여 사수부(Dead zone)와 단락류(Short circuit)를 감소시켰기 때문이라고 판단된다.

본 연구에서는 도류벽 개수에 따라 T_{10} 이 변화하는 이유를 알아보기 위해 추적자의 농도와 속도장을 그려보았다. Fig. 3은 전산 해석을 수행한 지 2시간이 지난 후 좌우 대칭형 도류벽이 5개인 경우와 7개인 경우의 추적자의 농도장을 비교하여 나타낸 그림이며 Fig. 4는 같은 시간대에서 도류벽의 개수가 5개와 7인 경우의 속도장을 각각 나타낸 그림이다. Fig. 3으로부터 추적자의 농도를 살펴보면 도류벽이 5개인 경우가 7개인 경우보다 출구 부근에서 추적자의 농도가 높은 것을 확인할 수 있으며, 이러한 원인을 Fig. 4에 표시된 속도장으로부터 찾을 수 있다. Fig. 4로부터 도류벽이 5개에서 7개로 증가함에 따라 유속은



(a) 5 baffle



(b) 7 baffle

Fig. 4 Velocity distribution in symmetric guide wall

0.005 m/s정도만 빨라지는 반면에 유로의 길이는 상대적으로 더 길게 늘어나기 때문에 도류벽의 개수가 증가할수록 추적자가 더 천천히 퍼져 나간다고 할 수 있다.

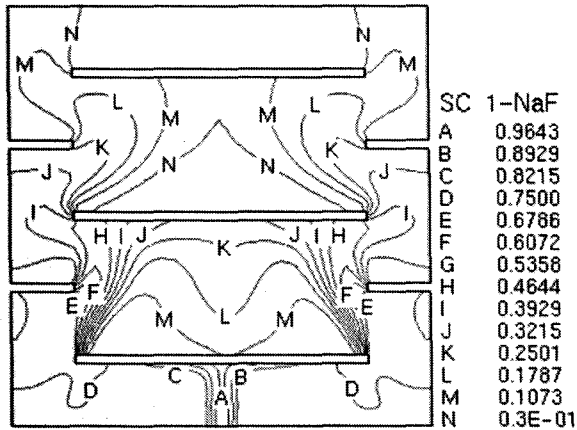
4.2 좌우 대칭형 도류벽과 중앙 분리형 도류벽에서의 β (T_{10}/T)

본 연구에서는 현재 대표적으로 사용 중인 도류벽인 좌우 대칭형 도류벽과 중앙 분리형 도류벽의 성능 차이를 알아보기 위해 전산 해석을 수행하였다. Table 2는 중앙 분리형 도류벽의 개수를 3, 5, 7개로 증가시켜 가면서 해석한 결과를 나타낸 표이다.

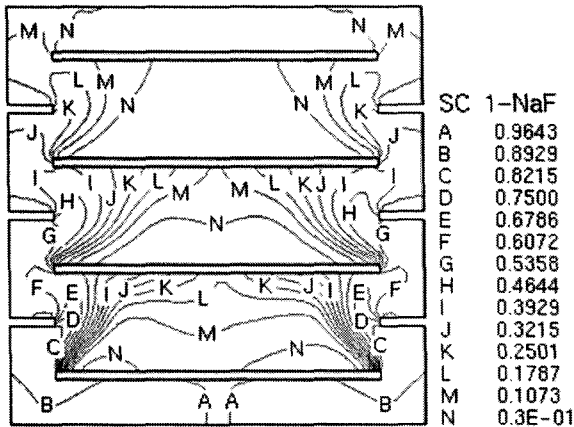
Table 2로부터 중앙 분리형 도류벽의 개수를 증가시켜도 T_{10} 과 β 의 변화가 크지 않다는 것을 알 수 있으며, 좌우대칭형 도류벽과는 반대로 7

Table 2. T_{10} and β at Center Divided Guide Wall

Guide Wall No.	T_{10} (min)	$\beta(T_{10}/Tt)$
3	137	0.3187
5	149	0.3606
7	140	0.3553



(a) 5 baffle

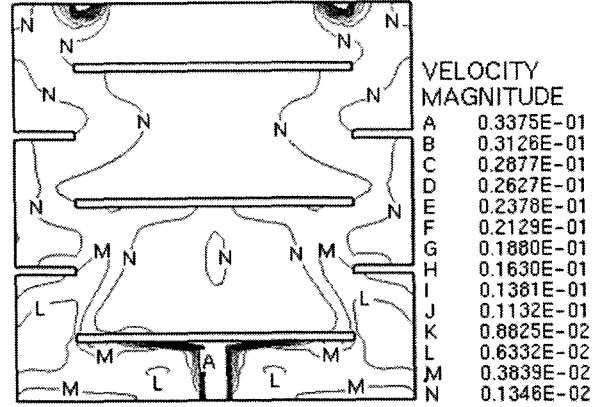


(b) 7 baffle

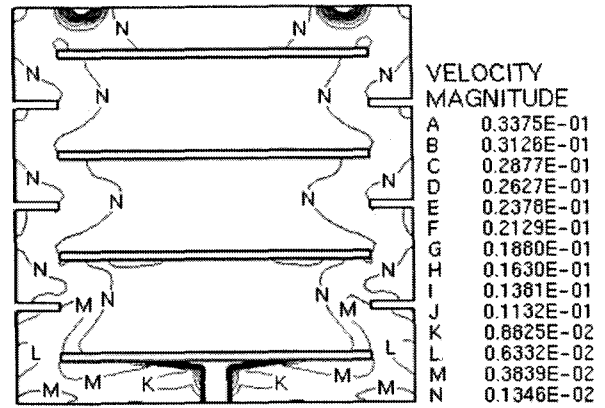
Fig. 5 Concentration of NaF at 2hour in center divided guide wall

개인 경우가 도류벽의 개수가 5개인 경우보다 T_{10} 과 β 가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

도류벽 개수가 변화함에 따라 T_{10} 이 변하는 이유를 살펴보기 위해 추적자가 유입된 지 2시간 후 도류벽이 5개인 경우와 7개인 경우의 추적자 농도와 속도장을 Fig.5과 6에 각각 표시하였다. Fig. 5로부터 좌우 대칭형 도류벽과는 달리 도류벽의 개수가 7개인 경우가 5개인 경우보다 출구



(a) 5 baffle



(b) 7 baffle

Fig. 6 Velocity distribution in center divided guide wall

부근에서 추적자의 농도가 더 높은 것을 볼 수 있으며 Fig. 6의 속도장을 살펴보면 이러한 원인을 알 수 있다. 중앙 분리벽 사이에서 사수부가 발생하고 도류벽의 개수가 증가될수록 중앙 분리벽 사이의 간격이 좁아지기 때문에 사수부가 더 크게 발생하는 것을 Fig. 6을 통해 확인 할 수 있다. 도류벽의 개수가 증가함에 따라 사수부가 더 크게 형성되므로 실제로 물이 지나가는 유로가 더 짧아지는 효과가 나타나게 되고 이러한 유동 현상이 도류벽의 개수가 증가 함에도 불구하고 T_{10} 이 감소한 원인으로 판단된다. 중앙 분리형 도류벽을 설치하였을 경우 도류벽의 개수가 5개인 경우가 최적의 효율을 보이는 도류벽임을 Table 2로부터 확인할 수 있다.

중앙 분리형과 좌우 대칭형 도류벽의 속도 차이와 관련 알아보기 위해 각각의 경우에서의 β 를 비교해 보았고, 그 결과를 Fig. 7에 표시하였다.

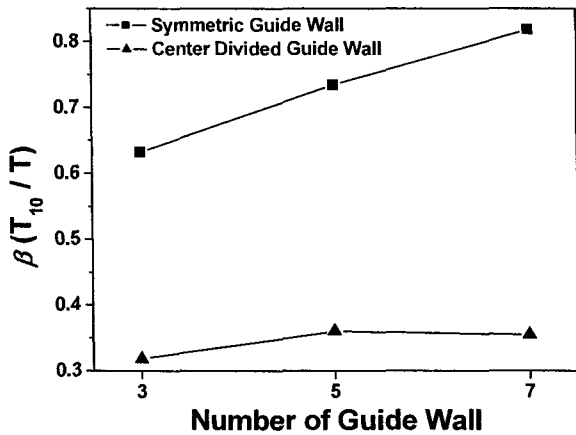


Fig. 7 comparison of β between symmetric guide wall and center divided guide wall

Fig. 7로부터 같은 개수의 도류벽을 설치하였을 때 좌우 대칭형이 중앙 분리형보다 β 가 2배 이상의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4와 Fig. 6에 표시된 속도장을 비교해 보면 좌우 대칭형이 중앙 분리형보다 정수지 내부에서 유동이 균일하고 상대적으로 사수부 발생이 적다는 것을 확인할 수 있다. 정수지 내에서 사수부가 발생하게 되면 소독제가 균일하게 분포하지 못하기 때문에 β 와 소독 성능은 감소하게 되며 좌우 대칭형 도류벽의 성능이 보다 우수함을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 좌우 대칭형과 중앙 분리형 도류벽의 소독능 차이를 알아보기 위해 전산 해석을 수행하였다. 먼저, 좌우 대칭형 도류벽의 개수를 변화시키면서 전산 해석을 수행한 결과 좌우 대칭형 도류벽은 도류벽의 개수가 증가할수록 T_{10} 이 점차적으로 증가한다는 것을 확인할 수 있었으며, 그 원인을 유동 현상에서부터 찾을 수 있었다. 다음으로 중앙 분리형 도류벽의 경우 도류벽의 개수가 5개를 넘어간 이후에는 정수지 내부의 사수부가 증가하여 T_{10} 이 오히려 감소하였다. 좌우 대칭형과 중앙 분리형 도류벽을 비교하면 좌우 대칭형이 중앙 분리형보다 정수지 내부의 유동을 균일하게 하고 사수부의 발생을 억제하여 T_{10} 이 훨씬 증가하고 그로 인해 좌우 대칭

형의 소독능이 더 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirement for Public Water System Using Surface Water Source, 1989, U.S.EPA.
2. Susan M. Teefy and Philip C. Singer, 1999, Performance and Analysis of Tracer Tests to Determine Compliance of a Disinfection scheme with the SWTR, JAWWA, pp. 88-98.
3. 김수원, 김부길, 안송엽, 정호진, 2002, 최신 상수도학, 신광문화사, pp.291-292.
4. Seok Kwan-Soo, Kim Sung-Hoon, Shin Eun-Her, Kim Hyun-Ok and Park Hee-Kyung, 2002, Clearwell Contact Time Estimation using Computational Fluid Dynamics, KSWW.
5. Mark M. Clark, Joel Ducoste, and Catherine Burns, 1999, Improving Clearwell Design for CT Compliance, AWWARF and AWWA.
6. Kim Jung-Hyun, Ha Eun-Jung, Yoon Jang-Ken, 2001, Evaluation of CT Compliance in Clearwells, Korea Water Resources Corporation, 39-48.
7. Seok Kwan-soo, Kim Sung-hoon, Shin Eun-her, Kim Hyun-ok and Park Hee-kyung, 2002, Clearwell Contact Time Estimation using Computational Fluid Dynamics, KSWW.
8. Shin Eun-Her, Kim Sung-Hoon, Park Hee-Kyung, Ahn Jea-Chan, Choi Jea-Ho, Choi Young-June, 2005, Effect of Shape and Flow Rate on T_{10} in Clearwell, KSWW.
9. Patankar, S. V., 1980 Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.
10. Kim Yun-Ho, Park Jun-Jung, Rhee Gwang-Hoon, 2004, Numerical Analysis for Optimization with Variation of Guide Wall and Porosity in Clearwell, Journal of the Institute of Industrial Technology, Vol. 12, pp. 59-64.