한국기계가공학회지, 제16권, 제2호, pp.22～27(2017.04) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.16, No.2, pp.22~27(2017.04) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.2.022

배수지의 배수효율분석을 위한 추적자실험 및 전산유체해석

조중연*, 고선호**, 곽이구*,#
*전주대학교 탄소융합공학과, **전주대학교 기계공학과

Tracer Experiment and Computational Fluid Dynamics Analysis for the Drainage Efficiency of a Reservoir

Jung-Yeon Cho*, Sun-Ho Go**, Lee-Ku Kwac*,#
*School of Carbon Fusion Engineering, JeonJu Univ.,
**School of Mechanical Engineering, JeonJu Univ.

(Received 4 January 2017; received in revised form 12 January 2017; accepted 2 February 2017)

ABSTRACT

During the water treatment process for household water supply, a reservoir is the last place the water is stored before being supplied to users, and the duration of the water's stay is an important factor that affects its safety. This may cause the concentration of the residual chlorine disinfectant to increase and thus lower the water's quality. The concentration and discharge efficiency of residual chlorine must be verified and managed, because these are key factors that affect the reservoir's performance. Because the actual verification test for analyzing the efficiency of a reservoir and the disinfectant's dilution capacity is difficult, simulations are generally conducted using the computational fluid analysis method. However, the simulation results require validation with experiments. The error and drainage efficiency were analyzed in this study by comparing and analyzing the actual tracer test and simulation so that the actual test for a hexagonal drainage can be replaced by the computational fluid analysis method. Based on the results of the efficiency analysis, the hexagonal reservoir was found to be appropriate, and the simulation's reliability was verified with a tracer test.

Key Words : Hexagonal Drainage(육각배수지), Computational Fluid Dynamics(전산유체해석), Tracer Experiment(추적자시험), Water Supply System(정수시스템), Water Safety(수질안전)

1. 서 론

정수장에서 정수한 물을 각 배수지까지 이송하는 송수시스템은 수요가까지 안전한 수돗물을 공급한다는 의미에서 중요한 시설이라 할 수 있다. 그러나, 송수관로의 길이가 긴 경우 수돗물의 공급과정에서 체류시간이 증가하게 되고 시간별, 계절별로 수온등의 운영조건이 변동하기 때문에 이에 따라 대표적인 소독물질인 잔류염소농도에 대한 최적의

Corresponding Author : kwac29@jj.ac.kr
Tel: +82-63-220-3063, Fax: +82-63-220-2958

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

관리방안에 대한 연구가 필요한 실정이다[1]. 또한, 우리나라는 수원의 95%를 지표수에 의존하고 있어 수질오염사고에 노출되는 경우가 많아 수질안전성이 취약하다. 수질이상을 확인하였을 때는 이미 오염된 물의 일부가 소비자에게 공급되어 수질안전성이 훼손된 상태가 되기 때문에 사전예방적 차원에서의 안전한 물관리가 요구되고 있다[2].

정수시스템 중 배수지는 수처리 공정에서 마지막에 위치한 중요한 시설로서 수요자에 공급되기 전후 염소 처리과정을 거치게 되는데, 정수지에서 염소에 대해 내성을 지닌 미생물(Giardia 및 Cryptosporidium) 등이 활성화된 상태로 존재하게 될 경우 수질사고의 위험성이 있어, 미생물로 인한 수질사고의 사전예방을 목적으로 소독능(CT value = 잔류소독제 농도 × 소독제 접촉시간) 평가가 이루어지고 있다. 실제로 소독제의 접촉시간을 측정할 때에는 도류벽의 형태나 개수에 따른 이론적인 값을 사용하거나, 정수지 소독제 주입지점에서 추적자를 주입하여 측정하게 된다.

T값은 정수지에서 추적자시험을 통해 구한 T_{10}값으로 대신하는데 T_{10}값은 주입한 추적자가 무게비로 10% 유출될 때까지 소요된 시간으로 소독과 관련지어 설명하면 소독제의 90%가 물 속의 미생물과 접촉되는 시간을 의미한다. 정확한 소독제 접촉시간이 평가되면 최소한의 소독제를 가지고도 소독요구사항을 만족시킬 수 있으므로 정수지에서 T_{10}값 측정은 소독에서 매우 중요하며, 접촉시간 T를 증가시키는 것이 소독능 향상에 매우 중요하다[3].

추적자 실험은 일반적으로 반응조나 관랑의 유입부에 염료나 방사선 물질, 염용액 등의 추적자를 주입 후에 유출부에서 다양한 시간간격으로 추적자의 농도를 측정함으로서 조 또는 지내 수리적인 특성에 관한 여러 정보를 알 수 있다. 예를 들어 평균체류시간, 단락류 발생 유무, Completely mixed flow(CMF)/Plug flow(PF)의 판단 등을 추적자 시험을 통하여 유추할 수 있다. 하지만, 추적자실험은 많은 비용과 노력이 필요하므로 빠르고 비용면에서 저렴하며 효율적인 전산유체역학기법을 이용한 시뮬레이션을 병행할 필요가 있다고 판단된다[4,5].

본 논문에서는 육각배수지를 실제 제작하여 배수효율 및 약제희석능력, 단락류에 대해 추적자실험과 동일한 모델의 유한요소모델을 구성하여 전산유체해석기법을 통해 실제값과 이론값을 비교분석하고자 하였으며, 이를 통해 육각배수지의 배수효율에 대해 비교분석하고자 한다.

2. 육각배수지의 분석방법

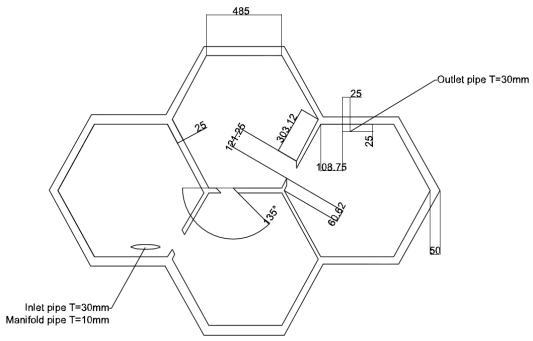
2.1 육각배수지의 추적자 실험

육각배수지 시제품에 직접 담수를 시켜 물의 흐름 및 수리적 거동에 대해 분석하고, 직접 추적자 실험을 실시하여 전산유체해석에 의한 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다[6].

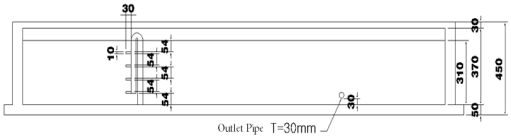
육각배수지의 구조 및 규격은 Fig. 1, Table 1과 같으며, Fig. 1의 (a)와 (b)는 적자실험과 전산유체해석에 적용된 육각집합배수지의 평면도와 정면도를 나타낸 그림이다. Fig. 2의 순서와 같이 실제 거푸집제작을 위해 콘크리트를 타설하여 육각집합구조의 콘크리트 배수지를 제작하였다. 배관 및 회전수류에 유의하여 콘크리트 양생 후에 라이닝을 하도록 하였으며, 회전수류와 와류, 역류 등 정세수 유무를 특수용액을 첨가하여 관찰하여 분석하고자 하였다. 또한, 추적자 실험에 사용된 물질은 불화규산(H_2FSi_6, 순도 : 25 %)으로 정수지 유입부 분지관 출구에 주입하였다. 주입방법은 Pulse input (Slug dose) 방법으로 충분한 혼합이 보장되는 곳에서 사용되어지는데, 충분히 많은 양을 순간적으로 주입한 후 출구에서 일정한 시간간격으로 샘플을 채취하여 농도를 측정하는 방법으로 추적자실험을 진행하였다.

Table 1 Properties of drainage

Length	Height	Diameter of pipe	Number of wall	Total capacity
485mm	310mm	30mm	4	768L



(a) Plan view



(b) Front view

Fig. 1 Draw of hexagonal drainage

(a) Placement plan

(b) Mould construct

(c) Pipe construct

(d) Wall and fixture construct

(e) Concrete construct

(f) Complete

(g) Set of tracer experiment

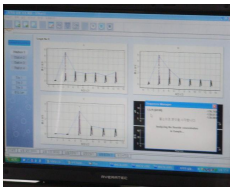
(h) Analysis of tracer

(i) Measuring equipment

(j) Flow control

(j) Input to tracer

(k) Start of tracer experiment



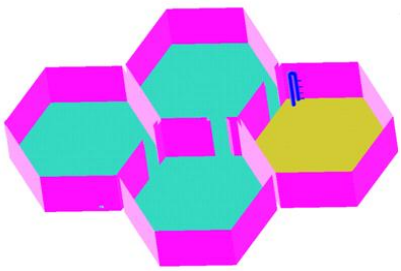
(l) Results analysis

(m) Results of experiment

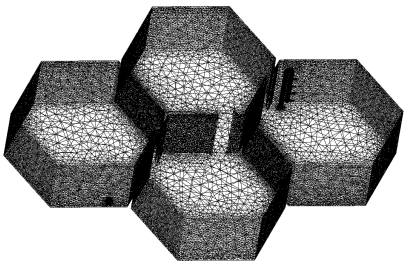
Fig. 2 Process of tracer experiments

2.2 육각배수지의 전산유체해석

육각배수지의 전산유체해석을 실시하여 Velocity를 Contour, Vector, Streamline으로 표현하여 분석하고자 하였으며, 실제 시제품추적자실험결과와 비교하고자 하였다. 해석모델은 실제 시제품추적자실험과 동일한 모델로 유한요소모델을 구성하였다. 육각배수지의 3-D모델링은 Fig. 3(a)와 같으며, 육각배수지의 유한요소모델링은 Fig. 3(b)와 같다.



(a) Plan of hexagonal drainage



(b) FEM model of hexagonal drainage

Fig. 3 Shape of hexagonal drainage

Nodes는 114,007개, Elements는 561,714개로 해석을 수행하였으며, 유한모델은 3차원 유한체적법(Finite volume method)로 형상을 구성하였다[7]. 격자망은 유동의 간섭이 심한 벽면 근처에 조밀하게 생성되도록 제어하였다[8]. Navier-stokes 방정식을 적용하여 유동을 계산하였으며, 난류모델은 표준 $k-\epsilon$모델을 적용하였다. Navier-stokes 방정식은 부가적인 정보를 필요로 하지 않고, 난류와 층류를 모두 기술하지만, 실제로 난류의 특성길이와 특성시간은 매우 다양하여 복잡한 3차원 형상에 대한 해석방법으로는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다[9]. 하지만, 본 연구는 형태가 복잡하지 않다고 사료되어 본 난류모델을 적용하였다. 유체는 상온의 물로 가정하여 해석을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 육각배수지의 추적자 실험결과

Table 2에서 나타난 바와 같이 이론체류시간과 평균 체류시간은 11.8분으로 거의 유사한 것으로 나타났고, T_{10}값은 5.0분으로 β값(장폭비 환산값)은 0.423이다. 이는 일반적으로 사용하고 있는 사각형 정수지에서 장폭비 약 15 정도에 해당하는 값으로 평가할 수 있다.

Table 2 Results of tracer experiment

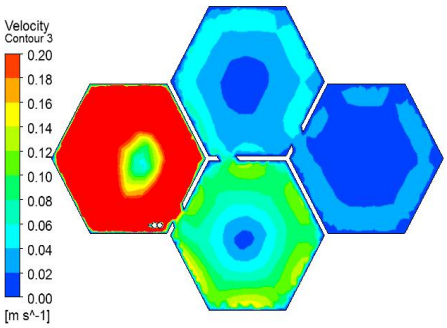
Results	
- Theoretical retention time	11.80
- Mean residence time	11.75
- CSTR	3.25
- Contact time (min_ T_{10})	5.0
- Baffling factor	0.423

Index 법 및 Rebhun & Argaman 법에 의한 평가결과, 육각형 배수지의 흐름은 CSTR(Continuous-flow stirred tank reactor)의 형태를 나타내고 있으며, Plug flow 흐름보다는 Mixed flow의 분율이 다소 높은 것으로 나타났으며, 사수부(Dead space)는 거의 없는 것으로 조사되었다. 또한 단락류 Index가 약간 높게 나타났는데 연구결과에 의하면 유입유량이 증가하면 $T_{10}/T(\beta)$값이 낮은 값을 가진다고 보고하고 있다.

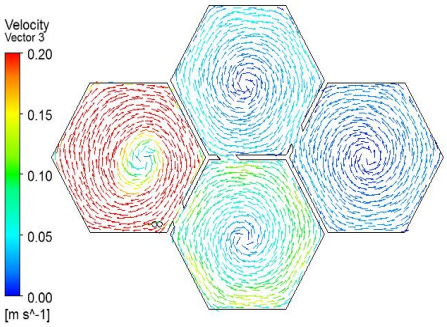
따라서 유량을 체류시간 120분 정도로 감소시키면 단락류는 줄어들고, T_{10}값은 더 증가될 것으로 보인다. 육각형 정수지 유입부에 유공 정류벽을 설치하여 흐름을 안정화시켜주면 단락류를 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 육각배수지의 전산유체해석 결과

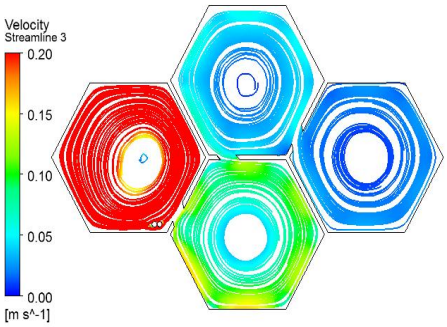
육각배수지의 배수효율에 대해 분석하고자 전산유체해석을 수행하였다. Fig. 4와 Table 3은 유체해석 결과를 나타낸 그림과 표이다. Fig. 4(a~c)를 살펴보면, 원형인 배수지타입의 특성으로 인해 유입구간에서의 원심력이 최대로 발생되고 유속이 가장 빠르지만, 각 지역으로 유체가 이동할 때마다 유속이 감소하는 것을 확인할 수 있었으나, 유입지역에서 발생된 원심력은 토출지역까지 유지되는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Contour



(b) Vector



(c) Streamline

Fig. 4 Results of CFD method

Table 3 Results of CFD method

Results	
- Theoretical retention time	11.79
- Mean residence time	11.4
- CSTR	3.079
- Contact time (min_T_{10})	5.2
- Baffling factor	0.406

4. 결 론

배수지의 배수효율 비교분석을 위해 추적자실험과 전산유체해석을 수행하였다. 그 결론을 아래에 정리하였다.

1. 본 연구결과에서 본 바와 같이 배수지의 형태가 원형에 가까운 육각의 형상으로 인해 유입구의 원심력이 유출구까지 유지되고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 유체의 흐름을 원활하게 하여 정체수가 없는 이상적인 배수지형태인 것을 추적자실험과 전산유체해석기법을 통해 동일하게 확인할 수 있었다.
2. 본 배수지는 정체수가 없이 원활한 흐름과 물의 저장성을 유지할 수 있으며, 배수지를 거치는 동안 약제와 희석되는 접촉시간이 5분 이상으로 추적자실험과 전산유체역학기법을 이용한 결과에서 나타난 것을 확인할 수 있었다. 두 기법의 결과가 약 96% 동일한 결과가 나타나, 추적자실험과 전산유체기법을 이용한 시뮬레이션이 적합한 조건과 방법으로 적합하게 수행된 것으로 판단된다.
3. 장폭비와 T_{10}/T의 결과에서는 추적자실험과 전산유체역학기법에서 0.4이상 수치를 나타내어 약 95% 동일한 결과를 나타내었다. 이는 국내 상수도시설기준인 보통수치인 0.5와 근접한 수치로서 유입구와 유출구에 완충기능이 있고 도류벽이 있는 배수지로 평가하고 있으므로, 적합한 배수지의 역할을 할 수 있을 것으로 판단되지만, 이상적인 배수지의 양호수준인 0.7의 수준으로 향상시키기 위해서는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 추적자실험과 전산유체역학기법의 시뮬레이션을 한 결과, 이론적 체류시간과 평균체류시간이 유사하며, Plug flow와 CSTR의 혼합류 형태를 유지하는 것으로 나타나 사수부는 거의 없는 것으로 판단되며, 추후 용량이 증가된다면 유량 및 단락류가 감소되고 T_{10}값은 더욱 증가되어 흐름을 더욱 안정화 시킬 수 있어 더욱 이상적인 배수지형태가 될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

"이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2016R1A6A03012069)."

REFERENCES

1. Kim, H. K., "An Optimum Management Method of Residual Chlorine in Water Supply System," A Thesis for a Master, University of Seoul, Republic of Korea, 2016.
2. Jang, H. Y., "A Study on the Introduction of Water Safety Plan for the Water Distribution Network Ensure Safety," A Thesis for a Master, University of Seoul, Republic of Korea, 2015.
3. Hyun, J. H., Kim, Y. M., Kim, Y. S., "Study of Estimating Disinfection Efficiency(CT value) and Optimizing Chlorine Dosage by Tracer Test", Journal of the Korean Society for Environmental Analysis, Vol.5, No.3, pp. 173-177, 2002.
4. Bae, B. U., Kim, Y. I., Park, J. H., "Simultaneous Evaluation of Hydraulic Characteristics of Flocculation and Sedimentation Basin in Water Treatment Plant Using Tracer Test", The Institute of Environmental Studies(Deajeon University), Vol.6, pp. 29-45, 2002.
5. H. K VERSTEEG, W. MALALASEKERA, "Anintroductionto Computational Fluid Dynamics", PrenticeHall, 1995.
6. A. Guardoa, M. Coussiratb, M. A. Larrayoza, F. Recasensa, E. Equsquizab, "Influenece of the turbulence model in CFD modeling of wall-to-fluid heat transfer in packed beds", Chemical Engineering Science, pp. 1733-1742, 2004.
7. Ta, C. T., Brignal, W. J., "Application of Computational Fluid Dynamics Technique to Storage Reservoir Studies", Pergamon Press, Vol.37, no.2, pp. 219-226, 1998.
8. Jang, S. C., Park, T. S., Hur, N. S., and Kim, I. H., "CAE/CFD Analysis and Design of High-Pressure Drop Control Valve for Offshore Project," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 42-49, 2015.
9. Jeon, E. C., Youn, G. H., and Kang, C. H., "A Study on Effect of Flow Characteristics for Turbine Impeller Shape," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 4, pp. 36-43, 2014.