ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI https://doi.org/10.11001/jksww.2018.32.5.411

EPANET 2.0과 관망실험을 통한 배수관망 염소농도 감쇄 비교연구

A comparative study for the decay of chlorine residual using EPANET2.0 and an experimental pipeline system

백다원·김현준·김상현*
Dawon Baek·Hyunjun Kim·Sanghyun Kim*

부산대학교 환경공학과, 부산광역시 금정구 부산대학로 63번길 2, 46241
Pusan National University Environmental Engineering, Busan, Geumjeong-gu, Busandaehak-ro, 63beon-gil, 2, 46241

ABSTRACT

The residual chlorine concentration is an essential factor to secure reliable water quality in the water distribution systems. The chlorine concentration decays along the pipeline system and the main processes of the reaction can be divided into the bulk decay and the wall decay mechanisms. Using EPANET 2.0, it is possible to predict the chlorine decay through bulk decay and wall decay based on the pipeline geometry and the hydraulic analysis of the water distribution system. In this study, we tried to verify the predictability of EPANET 2.0 using data collected from experimental practices. We performed chlorine concentration measurement according to various Reynolds numbers in a pilot-scale water distribution system. The chlorine concentration was predicted using both bulk decay model and wall decay model. As a result of the comparison between experimental data and simulated data, the performance of the limited 1st-order model was found to the best in the bulk decay model. The wall decay model simulated the initial decay well, but the overall chlorine decay cannot be properly predicted. Simulation also indicated that as the Reynolds number increased, the impact of the wall

Key words: Bulk decay reaction, Chlorine decay, EPANET 2.0, Reynolds number, Wall decay reaction

주제어: 체적감쇄반응, 염소감쇄거동, 관망해석프로그램, 레이놀즈수, 관벽감쇄반응

1. 서 론

염소는 제한된 수자원을 안전하고 안정적으로 수요자에게 공급하기 위한 매우 중요한 요소로서 물속의 불순물들을 제거할 수 있는 강력한 소독제이며 경제적이고 지속성이 있어서 이송 단계에서 잔류 소독제로 널리 사용된다. 염소는 잔류 소독제로서 소독의 효과를 위한 최소 염소농도뿐만 아니라 소독부산물에 의한 위험을 방지하기 위해 최대 잔류 염소 농도 또한 규정이 되어있는데, 안전한 수질 확보를 위한 수질기준으로는 관망 내 잔류염소의 농도를 최소 0.1 mg/L로 최대 2 mg/L의 범위로 유지하도록 하고 있다 (AI-Jasser, 2007). 수돗물이 정수장에서부터 가정으로 전달될 때까지 최소 염소농도를 유지하여 배수 시스템 전반에 걸친 미생물의 성장과 병원균의 침입을 막기 위해서 관망 내부에서의 염소 감쇄 거동을 이해할 필요성이 있다 (Mohammad et al., 2003).

일반적으로 관망 내부에서 잔류 염소농도에 영향을 미치는 요소들에 의해 염소농도 감쇄는 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 첫 번째로는 온도, 초기염소농도, 유기물

Received 21 August 2018, revised 13 September 2018, accepted 28 September 2018
*Corresponding author: Sanghyun Kim (E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

농도 등에 관련된 체적 감쇄(Bulk decay)이고 두 번째로는 배관재료, 유속, 배관 수명 등에 관련된 관벽 감쇄(Wall decay)이다 (Biwas and Clark, 1993; Clark et al., 1994; Beatty et al., 1996). Kim et al. (2014)은 레이놀즈수에 따른 염소농도를 측정하여 체적 감쇄 반응에 대한 5가지 염소감쇄모형의 모의결과와 비교하여 그 중 1차 반응 모형(1st order model)과 제한된 1차 반응 모형(Limited 1st order model)이 염소감쇄거동을 가장 잘 묘사하였음을 나타내었다. 그러나 염소 감쇄 거동은 체적 감쇄뿐만 아니라 관벽 감쇄에 의해서도 영향을 받는다. Wable et al. (1991)은 같은 물이 들어있는 단일 관에 대한 염소 감쇄율이 실험마다 다른 결과를 나타냄으로써 관벽 감쇄가 물 분배 시스템에서 염소감쇄거동에 영향을 미치는 중요한 기작임을 밝혔다. 그리고 Biwas et al. (1993)은 정상 상태 유동일 때 단일 관에서 체적 감쇄와 관벽 감쇄 반응을 고려한 염소 감쇄 모형을 개발하였다.

몇 번의 선행연구의 성공적인 염소 예측 결과에고 불구하고, 실제 관망의 형상과 수리학적 요인을 고려하지 않고 모형을 이용하여 염소감쇄거동을 모의하는 것은 실제 관망에서 염소 감쇄 거동을 예측하는 것에 한계점이 존재한다. 이러한 부분을 보완하기 위하여 수리학적 해석을 바탕으로 수질 모의가 가능한 EPANET을 도입한 연구가 진행되었다. Rossman et al. (1994)은 특정 지역의 실제 물 분배 시스템에서 약 2.2일 동안 1시간 간격으로 염소농도를 측정하였고, 측정한 염소농도 값과 EPANET의 체적 감쇄와 관벽 감쇄 모형을 함께 이용해 모의한 염소농도 값을 비교하였다. 또한 EPANET의 체적 감쇄 모형의 매개변수는 회귀직선에 의해 각 유속에 대한 매개변수 값을 구하고, 구한 체적 매개변수 값을 EPANET에 적용한 다음 실제 염소농도거동과 모의된 염소농도거동이 일치하도록 관벽 감쇄 모형의 매개변수 값을 설정하였다.

이상과 같이 EPANET을 이용하여 염소 감쇄 거동을 모의한 연구는 수행된 바가 있으나, 실험에서 수행된 염소감쇄거동을 EPANET의 체적 감쇄와 관벽 감쇄 중 어떤 모형으로 모의할 수 있는지 검증된 경우가 보고된 적은 없다. 그러므로 본 연구에서는 EPANET 2.0의 염소감쇄거동의 예측 능력을 시험해보고 이를 위해서 우리는 1)레이놀즈수에 따른 염소 농도를 측정하는 실험을 수행하고, 2)실험과 동일한 조건으로 EPANET 2.0을 구성하여 체적 감쇄 모형 또는 관벽 감쇄 모형으로 시간에 따른 염소농도를 예측하였다. 또한, 3)실험 데이터와 모의한 데이터를 비교하여 EPANET 2.0의 체적 감쇄와 관벽 감쇄의 기여도를 비교분석하였다.

2. 연구방법

2.1 실험적 조건

본 연구에서는 EPANET 2.0을 통한 염소감쇄거동 모의를 검증하고자 실험을 수행한 데이터를 확보하였다. 실험은 파일럿 규모의 관망 시스템(Fig.1)에서 행해졌다. Fig.1에 도시된 바와 같이, 관망 각 끝에는 물을 저장하는 저수 탱크와 펌프를 통한 가압 탱크가 있으며 그 사이에 세 개의 병렬 펌프가 구성되어 있다. 우리나라의 상하수도는 덕타일주철관(24.9%), PVC관(17.8%), PE관(17.5%), 스테인리스 강관(12.4%), 기타관(9.9%) 순으로 구성되어 있다 (Korea Water and Wastewater Works Association, 2014). 본 연구에서는 실제 수도관에서 쓰이는 관들 중 실험 관망 시스템을 스테인레스 강관으로 구성하였으며 총 길이는 125 m이고, 내경 0.02 m, 두께 0.003 m이다. 저장 탱크의 높이, 지름 및 저장 부피는 각각 2 m, 0.65 m, 660 L이고 가압 탱크는 각각 1.22 m, 0.98 m, 1000 L이다. 이 탱크의 사이에 위치해 있는 세 개의 병렬 펌프는 각각 0.73 m/s, 1.33 m/s, 1.90 m/s의 유속을 생성하며 레이놀즈수는 각각 14,600, 26,600, 39,000이다. 유속 조건을 제어하기 위하여 펌프의 앞·뒤에 유량 제어 밸브가 설치되어 있다.

염소 농도는 저장 탱크에서 33 m 떨어진 실시간 염소 측정 장치를 사용하여 측정하였다. 염소 센서 (CLO-1-mA-2ppm, ProMinent, Inc.)의 측정 범위는 0.02~2 ppm이고 정확도는 ±0.02 ppm이며 시스템은 1 Hz의

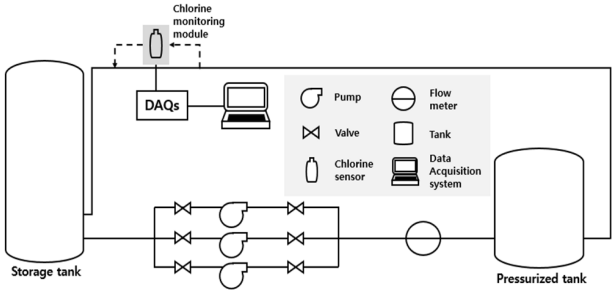


Fig. 1. Schematic diagram of the pilot-scaled water distribution system.

샘플링 속도로 염소 농도를 측정하였다. 실험 전에 관망 시스템에서 물을 30분 동안 순환시켰으며 그 후에 초기 염소 농도가 시간적 및 공간적으로 일정한 값에 도달하도록 만들었다. 일정한 펌프 및 제어 밸브 조건하에 초기 염소 농도는 0.2 ppm으로 하여 총 3개의 다른 유속 조건에서 각각 4~7일 동안의 염소 농도를 실시간으로 측정하였다.

2.2 체적 반응에 대한 염소 감쇄 모형

Table 1은 기존의 물 분배 시스템에서의 체적 반응에 대한 염소 감쇄 거동을 나타낸 모형들이다 (Haas and Karra, 1984). 1차 감쇄 모형은 염소 농도에 비례하여 감쇄가 발생한다는 이론을 기반으로 하는 모형으로 간단하고 일반적인 모형이다. 그러나 1차 감쇄모형은 유기물의 농도가 높아 초기 단계에서 일어나는 염소농도의 급격한 감쇄는 정확하게 모사하기 힘들 수 있다. Table 1의 n차 모형은 이러한 1차 감쇄 모형의 한계를 보완하여 염소농도의 n승에 비례하여 염소가 감쇄하는데 n값이 커질수록 급격한 염소감쇄를 모의할 수 있다. 제한적인 모형은 전체 염소의 농도 중 반응하지 않는 염소의 농도(C_L)가 있다고 가정하여, 실제 참여하는 염소의 농도($C_0 - C_L$)를 초기 농도로 한 모형으로 측정 센서의 한계 등의 영향을 받는 점을 고려할 수 있는 모형이다 (Powell et al., 2000).

본 연구에서는 체적 반응에 대한 염소감쇄모형의 매개변수들은 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용하여 최적화를 수행하였다. 유전자 알고리즘은 진화 연산(Evolutionary computation)에 속한 방법으로, 단순하게 병렬적으로 해를 탐색하는 다른 진화적 알고리즘들과 달리 많은 매개변수들을 포함하여 복수의 개체 사이에서 선택이나 교배 등의 유전적 조작에 의해서 상호 협력적으로 해의 탐색을 수행한다. 또한 간단한 수학적 연산인 적응도(Fitness) 평가를 통해 적절한 해를 분별함으로써 계산시간이 적게 소요되고 적응도 함수(Fitness function)가 불연속인 경우에도 적용이 가능하다. 이러한 특징에 의해 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용해 최적화를 수행하였으며 최적화의 목적 함수 Root-Mean Square Error(RMSE)는 다음과 같이 정의하였다.

$$SE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}[C_{obs}(i) - C_{model}(i, P_1, P_2, \cdots, P_k)]^2} \quad (1)$$

여기서 i는 시간 단위이고, C_{obs}는 측정된 염소 농도이고, $C_{model}(i, P_1, P_2, \cdots, P_k)$는 선택된 모델로부터 모의된 염소 농도이다. 그리고 P_k는 k번째 물질의 매개변수를 나타낸다.

2.3 EPANET 2.0

EPANET 2.0은 가압 관망 구조 내에서의 수리 및 수질의 장기간 시뮬레이션을 수행하는 범용 관망해석 프로그램이다 (Rossman, 2000). 관망 구조는 파이프, 노드(파이프 접합부), 펌프, 밸브 및 저장 탱크 또는 저장소로 구성된다. EPANET 2.0은 여러 시간 간격으로 구성된 시뮬레이션 기간 동안 관 요소별로 물의 흐름, 각 노드의 압력, 각 탱크의 물 높이 및 관망 구조 내의 화학물질의 농도를 추적한다. 화학 물질 외에도 수온 및 근원지 추적(Source tracing) 시뮬레이션도 가능하다.

EPANET 2.0의 해석범위는 수리해석과 수질해석으로 크게 나뉘어져 있는데, 먼저 수리해석은 해석하고자 하는 관망의 크기에 제한이 없으며 Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Chezy-Manning식을 사용하여 마찰 손실 수두를 계산한다. 또한 일정 또는 가변 속도의 펌프와 차단 밸브, 체크 밸브, 압력 조절 및 유량 제어 밸브를 포함한 다양한 유형의 밸브 모델링도 가능하다. 수질해석은 시간에 따른 비반응 물질의 이동을 모

Table 1. Chlorine decay models in water distribution system (Haas and Karra, 1984)

Model	Govering equations	Parameters
1st decay	$C = C_0 \exp(-kt)$	k
nth decay	$C = \frac{C_0}{1 + kt(n-1)C_0}$	k, n
Limited 1st decay	$C = C^* + (C_0 - C^*)\exp(-kt)$	k, C^*
Limited nth decay	$C = C^* + (kt(n-1) + (1/C_0 - C^*)^{n-1}))^{(1/(n-1))}$	k, n, C^*

의할 뿐만 아니라 시간에 따라 증가 또는 감소하는 반응 물질의 이동을 모의할 수 있다. 반응 물질의 거동을 해석할 때 관망 내의 유동을 고려한 체적 반응과 파이프 벽면 특성을 고려한 관벽 반응도 함께 적용하여 해석할 수 있다.

2.4 EPANET 2.0의 수질해석

EPANET 2.0은 물질이 분배 시스템을 통해 이동할 때 반응에 의한 물질의 증가 또는 감쇄를 추적할 수 있는데, 이를 위해서는 물질의 반응 속도와 물질의 농도를 알아야한다. 여기서 반응 속도는 체적 흐름 혹은 관 벽을 따라 물질과 반응하는 속도를 말한다. 일반적으로 체적 흐름 내에서의 반응은 체적 상(Bulk phase)의 천연유기물질(NOM)과 유리 염소(HOCl)가 반응하는 것이고, 관 벽 반응은 관 벽의 부식으로 인해 방출된 금속 물질과 유리 염소(HOCl)가 반응하는 것이다. EPANET 2.0을 사용하면 체적 반응 또는 관벽 반응으로 시간에 따른 물질의 농도를 예측할 수 있다.

EPANET 2.0에서 체적 반응은 n차 반응속도로 관망 내의 유동에서 발생하는 반응을 모델링하는데, 여기서 순간 반응 속도 R $[kg/m^3 \cdot s]$은 농도에 의존적이라고 가정하여 다음 식을 나타낸다.

$$R = K_b C^n \tag{2}$$

여기서, K_b는 bulk 반응속도계수, C는 반응물 농도 $[kg/m^3]$, n은 반응차수를 의미한다. 이 때 K_b가 양수이면 증가 반응, 음수이면 감쇄 반응을 한다.

또한 EPANET 2.0은 물질의 최종적인 증가 또는 감쇄인 한계농도도 고려할 수 있다.

$$R = K_b (C_L - C) C^{(n-1)} \text{ for } n>0,\ K_b>0 \tag{3}$$

$$R = K_b (C - C_L) C^{(n-1)} \text{ for } n>0,\ K_b<0 \tag{4}$$

C_L은 한계 농도이며 K_b, C_L, n은 체적 반응속도의 특징을 나타내는 변수들로 간주된다.

관벽 반응은 파이프 벽에서 또는 파이프 벽 근처에서 발생하는 수질 반응 속도로 아래의 식을 이용해 벌크 흐름의 농도에 의존하는 것으로 간주될 수 있다.

$$R = (A/V) K_w C^n \tag{5}$$

K_w는 관벽 반응속도계수, (A/V)는 파이프 내 단위 부피당 면적$[m \cdot s]$이다. EPANET 2.0은 K_w의 단위가 각각 $[kg/m^3 \cdot s]$ 또는 $[m/s]$가 되도록 관벽 반응 차수의 선택을 0 또는 1로 제한한다. 관벽 반응 차수가 0인 경우 K_w의 단위는 $[kg/m^3 \cdot s]$이고 1인 경우에는 $[m/s]$이다.

Table 2는 EPANET 2.0에서 고려할 수 있는 염소, 트리할로메탄, 물의 이력, 불소 추적 반응 모형과 매개변수의 특성을 기술한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과

Fig. 2는 파일럿 규모의 관망 시스템에서 수행된 레이놀즈수의 변동에 따라서 시간에 따른 염소농도 측정 실험결과이다. 모든 레이놀즈수에서 초기 감쇄가 큰 편이며 유속이 빨라질수록 감쇄되는 기울기가 커지는 것을 볼 수 있다. 일정 기간이 지나고 나타나는 약간의 변동성은 저염소농도에 대한 측정기기의 반응 오차로 판단된다. Table 3은 각 레이놀즈수에서의 시간에 따른 염소농도에 대해 유전자 알고리즘을 이용해 최적화의 목적 함수 RMSE 값이 최소가 되도록 한 염소감쇄상수를 나타낸 표이다. 모든 염소감쇄모형에서 레이놀즈수가 커질수록 염소감쇄속도는 빨라지는 것을 볼 수 있다. Table 3은 염소의 감쇄모형의 반응차

Table 2. Some special cases of bulk reaction models in EPANET 2.0

Model	Parameters	Examples
First-Order Decay	C_L=0, K_b<0, n=1	Chlorine
First-Order Saturation Growth	C_L>0, K_b>0, n=1	Trihalomethanes
Zero-Order Kinetics	C_L=0, K_b<0, n=1	Water age
No Reaction	C_L=0, K_b=0	Fluoride Tracer

Table 3. Calibrated parameters using genetic algorithm

Model \ Reynolds number		14,600	26,600	39,000
		k (d^{-1})	k (d^{-1})	k (d^{-1})
Bulk decay	1st	0.54689	1.44902	2.19794
	2nd	0.93478	2.10913	3.22367
	3rd	13.05887	25.87664	40.34242
	Limited 1st	0.93478	2.10913	3.22367
	Limited 2nd	13.05887	25.87664	40.34242
	Limited 3rd	205.0539	408.5208	692.0072

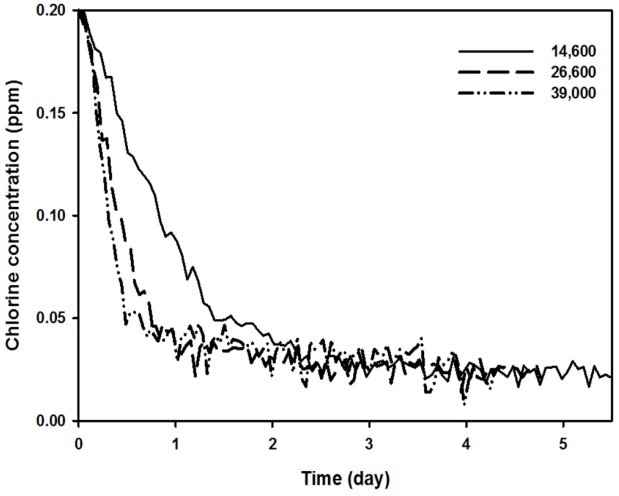


Fig. 2. Time series of measured chlorine concentration under three constant reynolds numbers of 14,600, 26,600, 39,000.

수가 증가함에 따라서 추정된 염소감쇄상수도 증가하는 경향도 보인다. Fig. 2와 Table 3은 유속의 증가에 대한 동일한 경향성을 보이고 있는데, 이는 레이놀즈수가 커짐에 따라 염소감쇄가 증가한다는 기존의 연구 결과와도 일치한다 (Kim et al., 2015).

3.2 EPANET 2.0 모의 결과

염소감쇄기작의 두가지 다른 효과를 고려하기 위해서 이들 과정이 구현되어 있는 EPANET 2.0을 이용하여 Fig. 1에서의 실험 관망 시스템과 동일한 조건의 운전을 하는 동안의 염소감쇄거동을 예측하기 위해 Fig. 3과 같은 가상 관망을 구성하였다. 관망의 모든 사양은 실험의 관망과 동일하게 설정을 하고, 실험의 레이놀즈수를 조절하기 위해 펌프의 운전조건을 조절하였다.

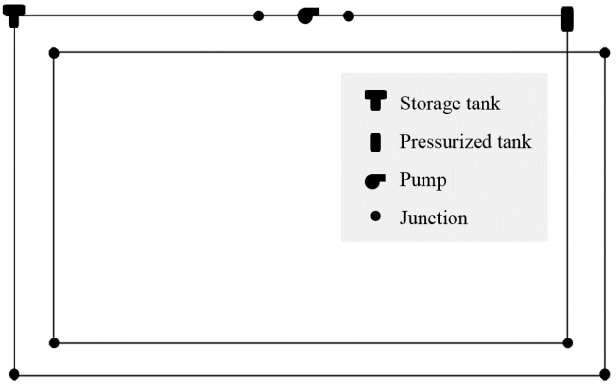


Fig. 3. Hypothetical water distribution system under the same condition as the experimental water distribution system.

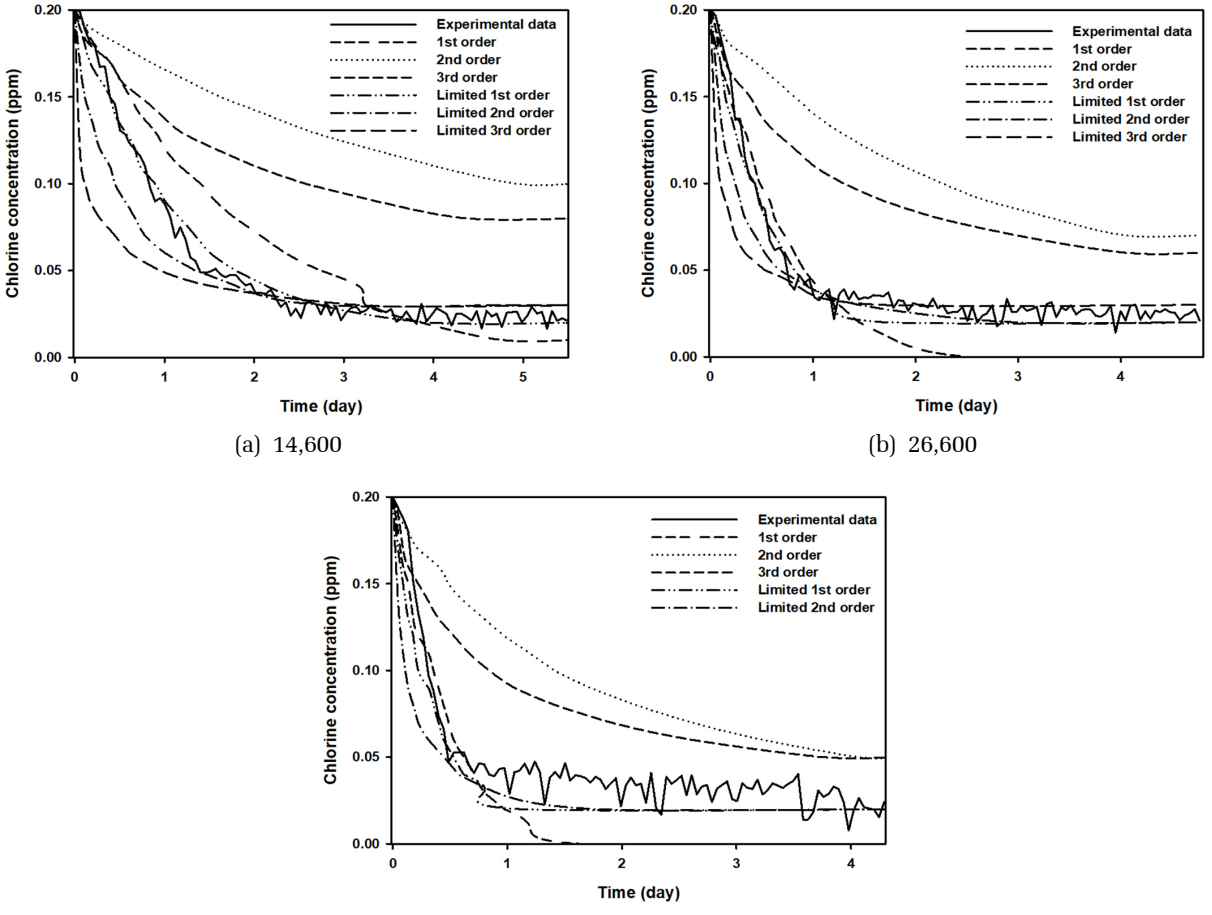
가상 관망은 실제 관망 시스템(Fig. 1)과 같게 총 길이는 125 m이고, 각 단일 관마다 내경 0.02 m, 두께 0.003 m로 설정하였다. 저장 탱크의 높이, 지름은 각각 2 m, 0.65 m가 되도록 설정하였다. 초기 염소 농도가 시간적 및 공간적으로 일정한 값에 도달한 상태를 만들기 위해서 각 절점마다 0.2 ppm의 염소농도 값을 설정하였고, 각 레이놀즈수 조건에 맞게 펌프의 수두와 유량을 조절하여 실험을 수행하였다.

3.2.1 체적 감쇄 모형을 이용한 염소 감쇄 모의

체적 감쇄 상수(Bulk decay coefficient)는 Eq(1)의 RMSE을 이용하여 실험적 염소 농도와 모의된 염소농도의 차이가 최소화되도록 하는 값들을 유전자 알고리즘을 통해 결정하였다. Fig. 4는 각각 레이놀즈수에서 실험적 염소감쇄거동과 EPANET 2.0을 이용해 모의한 염소감쇄거동을 비교한 그림이다. 모의 결과는 모든 레이놀즈수에서 제한적 1차 감쇄 모형이 실험적 거동을 가장 잘 모의하고 있고 그 다음으로 제한적 2차 모형이 잘 모의하는 것으로 나타났다.

Table 4. Parameters for bulk decay models in EPANET 2.0 with three Reynolds numbers

Model \ Reynolds number		14,600		26,600		39,000	
		k_b (d^{-1})	RMSE	k_b (d^{-1})	RMSE	k_b (d^{-1})	RMSE
Bulk decay	1st	0.54689	0.2346	1.44902	0.1955	2.19794	0.2473
	2nd	0.93478	0.8600	2.10913	0.6953	3.22367	0.5262
	3rd	13.05887	0.6026	25.87664	0.5001	40.34242	0.3789
	Limited 1st	0.93478	0.0625	2.10913	0.0669	3.22367	0.1250
	Limited 2nd	13.05887	0.1801	25.87664	0.1312	40.34242	0.2022
	Limited 3rd	205.0539	0.3119	408.5208	0.2226	692.0072	-



(a) 14,600 (b) 26,600

(c) 39,000

Fig. 4. Time series of chlorine concentration under various velocity in bulk decay reactions.

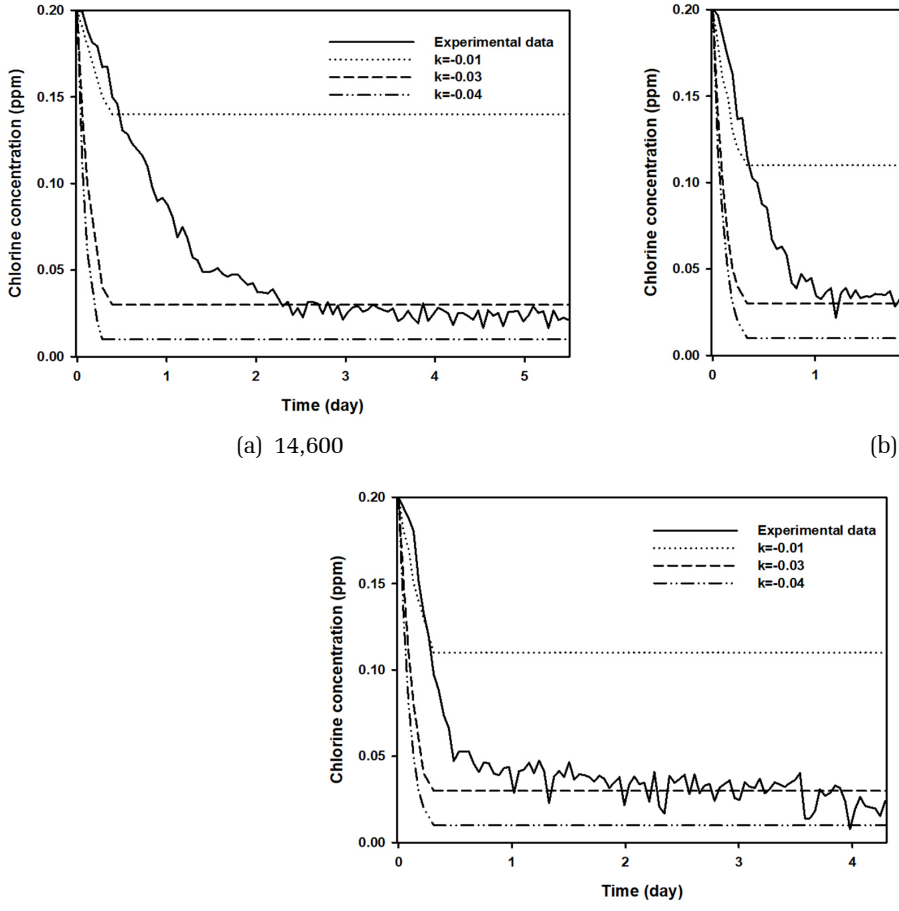
Table 4는 각 체적 감쇄 모형과 실험치의 정량적 비교를 위해 레이놀즈수에 따른 실험과 EPANET 2.0의 예측치의 RMSE 값을 나타낸 자료이다. Table 4를 보면 제한적 1차 모형에서 레이놀즈수가 14,600일 때는 RMSE=0.0625, 26,600일 때는 RMSE=0.0669, 39,000일 때는 RMSE=0.1250으로 다른 모형들에 비해 RMSE 값이 가장 작고 그 다음으로 제한적 2차 모형의 RMSE 값이 작다. 1차 모형 또는 제한적 1차 모형이 잘 모의한다는 기존 연구들(Hua et al.,1999; Kiene et al., 1998)과 달리 1차 모형의 예측 능력은 다른 모형들에 비해서도 낮은 편이다. 이는 EPANET 2.0은 제한적 구조에서의 안정농도(Stable concentration)를 고려

하는 것에 민감하기 때문에, EPANET 2.0에서 체적 감쇄 모형을 쓸 때는 안정농도를 고려하여 한계 농도(Limiting concentration) 값을 설정하는 과정이 중요함을 의미한다.

3.2.2 관벽 감쇄 모형을 이용한 염소 감쇄 모의

Fig. 5는 레이놀즈수의 변동에 대해 EPANET 2.0의 관벽 반응 모형으로 염소감쇄거동을 모의한 결과이다. 관벽 감쇄 반응을 모의할 때의 매개변수 값은 이분법(Bisection Method)을 이용하여 결정하였다. Fig. 5을 보면 전반적으로 급격한 초기 감쇄 거동을 나타내었는데, 이는 EPANET 2.0으로 관벽 감쇄 모형에 대한 염소감쇄거동을 모의할 때는 유속을 항상 일정하게 유지되도록 설정하였으나 실제 관망에서는 벽 근처에서의 전단응력과 같은 요인들에 의해 유속이 변화될 수 있다. 이러한 EPANET 2.0이 가지고 있는 관벽 감쇄 모형의 한계로서 전체 염소감쇄거동을 관벽감쇄모형만으로 모의하는 것에 어려움을 보여준다. 그럼에도 불구하고 관벽감쇄모형의 경우 k_w =-0.03일 때, 레이놀즈수가 증가할수록 모의된 결과가 염소감쇄농도의 최종치를 적절히 모사하는 능력이 있음을 보여준다.

Table 5는 이분법을 통해 설정한 k값들에 대한 관벽 감쇄 모형과 실험치의 정량적 비교를 위해 레이놀즈수에 따른 실험과 EPANET 2.0의 예측치의 RMSE 값을 나타낸 결과이다. Table 5를 보면 레이놀즈수가 14,600일 때는 RMSE=0.3935, 26,600일 때는 RMSE=0.2777, 39,000일 때는 RMSE=0.2326으로 Fig. 5에서 보이는 경향과 같게 레이놀즈수가 증가할수록 k_w =-0.03에 대한 관벽 감쇄 모형의 적합도가 높아진다는 결과를 보인다. 이러한 결과를 통해 유속이 낮을 때는 관벽 감쇄



(a) 14,600

(b) 26,600

(c) 39,000

Fig. 5. Time series of chlorine concentration under various velocity in wall decay reactions.

Table 5. Parameters for the wall decay models in EPANET 2.0 with three Reynolds numbers

Model \ Reynolds number	14,600		26,600		39,000	
	k_w (d^{-1})	RMSE	k_w (d^{-1})	RMSE	k_w (d^{-1})	RMSE
Wall decay	-0.01	1.0254	-0.01	0.7969	-0.01	0.8138
	-0.03	0.3935	-0.03	0.2777	-0.03	0.2326
	-0.04	0.5168	-0.04	0.3685	-0.04	0.3845

반응의 영향이 작으나, 유속이 증가할수록 관벽 감쇄 반응의 영향이 크다는 것을 알 수 있으며, Rossman et al. (1994)에서 유사한 결과를 보여주고 있다.

그러나 EPANET 2.0의 결과 값을 소수점의 한정된 표기 특성으로 모의된 염소감쇄거동이 실제 염소감쇄 거동을 표현하는 것엔 일정한 한계를 보였다. 또한 관벽과 체적 감쇄를 동시에 적용하여 모의할 경우에 제한농도(Limiting concentration)가 적용이 되지 않는 한계도 보였다. 이러한 EPANET 2.0의 한계점을 보완하여 추후의 연구에서 관벽+체적 감쇄 모형을 통해 염소감쇄거동 파악에 대한 연구를 수행할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 EPANET 2.0의 시간에 따른 염소농도 예측 능력을 시험해보기 위해 실험을 수행하고, EPANET 2.0에서 실험과 동일한 조건으로 체적 감쇄 모형 또는 관벽 감쇄 모형으로 시간에 따른 염소농도를 모의하였다. 실험 데이터와 모의한 데이터를 비교하여 EPANET 2.0의 체적 감쇄 또는 관벽 감쇄 모형을 이용한 예측능력을 비교 및 분석하였다. 연구를 통해 밝혀낸 바를 정리하면 다음과 같다.

1) 파일럿 규모의 물 분배 시스템에서 레이놀즈수에 따른 염소감쇄거동을 보기 위해 실험을 수행하였다. 실험 결과는 레이놀즈수가 커질수록 또는 유속이 빨라질수록 초기의 염소감쇄속도가 증가하는 경향을 보였다.

2) EPANET 2.0에서 체적 감쇄 모형을 통해 각 레이놀즈수에 대한 염소감쇄거동을 모의하였다. 체적 감쇄 모형에 들어가는 매개변수는 유전자 알고리즘을 이용하여 목적함수인 RMSE를 최소화하는 매개변수 값을 최적화하여 EPANET 2.0에 설정하였다. 모든 레이놀즈수에서 실험치를 가장 잘 모의하는 체적 감쇄 모형은 제한적 1차 모형이었고, 그 다음으로는 제한적 2차 모형이었다. 이는 EPANET 2.0의 안정농도를 고려하는 것에 민감한 모델 자체의 특성에 기인한 결과이다.

3) EPANET 2.0에서 관벽 감쇄 모형을 통해 레이놀즈수에 대한 염소감쇄거동을 모의하였는데, 초기감쇄속도가 빠른 것을 볼 수 있었다. 이는 실제 관망의 벽 근처에서 발생하는 전단응력과 같은 요소에 의해 유속이 변화됨에 의해 EPANET 2.0에서 유속이 일정하다는 조건과 차이가 있기 때문이다. 그러나 k=-0.03에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 모의된 결과가 실험결과와 잘 일치하며, Table 5에서의 RMSE 값으로 확인된다. 이러한 결과는 유속이 증가할수록 관벽 감쇄 반응의 영향이 크다는 것을 의미한다.

기호 설명

C_0 = Initial chlorine concentration (ppm)
C_L = The limiting concentration (ppm)
C_{obs} = Experimental chlorine concentration (ppm)
$C_{\mathrm{model}}(i)$ = The simulated chlorine concentration (ppm)
P_k = Parameter of kth substance.
R = The instantaneous rate of reaction
K_b = A bulk reaction rate coefficient
C = Reactant concentration
n = A reaction order
K_w = A wall reaction rate coefficient
(A/V) = The surface area per unit volume within a pipe
$RMSE$ = Root-Mean Square Error

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업(RE201606133)”으로 지원 받은 과제입니다.

References

AI-Jasser A.O. (2007). Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect, Water Res., 41(2), 387-96.

Beatty R., Bliss P.J., Vintage D.C., Clayton P. and Kelly J.P. (1996). "Analysis of factors influencing chlorine decay in piped distribution systems", *Proceedings of the australian water and wastewater association 16th federal convention,* Australian Water and wastewater association, sydney.

Biswas P., Lu C. and Clark R.M. (1993). A model for chlorine concentration decay in pipes, Water Res., 27(12), 1715-24.

Clark R.M., Grayman W.M., Goodrich J.A., Deininger R.A. and Skov K. (1994). Measuring and modeling chlorine propagation in water distribution systems, J. Water Resour. Plann. Manage., 120(6), 871-87.

Haas C.N. and Karra S.B. (1984). Kinetics of wastewater chlorine demand exertion, J. Water Pollut. Control. Federation, 170-3.

Hua F., West J.R., Barker R.A., Forster C.F. (1999). Modelling of chlorine decay in municipal water supplies, Water Res, 33(12), 2735-46.

Karim M.R., Abbaszadegan M. and LeChevallier M. (2003). Potential for pathogen intrusion during pressure transients, J. Am. Water Work Assoc., 95(5), 134-46.

Kiéné L., Lu W. and Lévi Y. (1998). Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems, Water Sci. Technol., 38(6), 219.

Kim H.J., Kim S.H. and Koo J.Y. (2014). Prediction of chlorine concentration in various hydraulic conditions for a pilot scale water distribution system, Procedia Eng., 70, 934-42.

Kim H.J., Koo J.Y. and Kim S.H. (2015). A general framework of chlorine decay modeling at a pilot-scale water distribution system, J. Water Supply Res. Technol., 64(5), 543-57.

Ministry of Environment, Korea Water and Wastewater Works Association (2015). 2014 Statistics of Waterworks, 11-1480000-000181-10, 12-14.

Powell J.C., Hallam N.B., West J.R., Forster C.F. and Simms J. (2000). Factors which control bulk chlorine decay rates, Water Res., 34(1), 117-26.

Rossman L.A. US Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. National Risk Management Research Laborator. (2000). EPANET 2: Users manual, 43-46.

Rossman L.A., Clark R.M., Grayman W.M. (1994). Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems, J. Environ. Eng., 120(4), 803-20.

Wable O., Dumoutier N., Duguet J.P., Jarrige P.A., Gelas G. and Depierre J.F. (1991). "Modeling chlorine concentrations in a network and applications to paris distribution network", *Proceedings of 1991 AWWARF/USEPA conference on water quality modeling in distribution systems,* cincinnati.