



가상의 물 수요곡선에 따른 수충격에 의한 염소농도변동 모의연구

Simulation of chlorine decay by waterhammer in water distribution system based on hypothetical water demand curve

백다원·김현준·김상현*

Dawon Baek·Hyunjun Kim·Sanghyun Kim*

부산대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

pp. 077-087

pp. 089-096

pp. 097-106

pp. 107-113

pp. 115-122

pp. 123-130

pp. 131-143

pp. 145-152

pp. 153-158

pp. 159-168

pp. 169-181

pp. 183-192

pp. 193-200

ABSTRACT

Maintaining adequate residual chlorine concentration is an important criteria to provide secure drinking water. The chlorine decay can be influenced by unstable flow due to the transient event caused by operation of hydraulic devices in the pipeline system. In order to understand the relationship between the transient event and the chlorine decay, the probability density function based on the water demand curve of a hypothetical water distribution system was used. The irregular transient events and the same number of events with regular interval were assumed and the fate of chlorine decay was compared. The chlorine decay was modeled using a generic chlorine decay model with optimized parameters to minimize the root mean square error between the experimental chlorine concentration and the simulated chlorine concentration using genetic algorithm. As a result, the chlorine decay can be determined through the number of transients regardless of the occurrence intervals.

Key words: Chlorine decay, Genetic algorithm (GA), Hypothetical water demand curve, Probability density function (PDF), Water hammer

주제어: 염소감쇄거동, 유전자 알고리즘 (GA), 가상의 물 수요곡선, 확률밀도함수 (PDF), 수충격

1. 서 론

현대 사회에서 안전하고 안정적인 식수는 각 가정으로 분배되는 시스템의 수질 유지에 중요한 요소이다. 그런데 정수장으로부터 가정으로의 분배되는 과정에서의 수질은 수많은 위험들에 노출되고 있다. 그러므로 이러한 노출에 의해 멸균된 식수가 분배 시스템을 통해 가정으로 전달되는 과정에서의 2차적 오염이 일어나는 것을 방지하도록 염소 소독제의 적절한 농도를 유지하는 것은 필수적이다 (Abokifa et al., 2015). 염소는 소독된 식수에서의 미생물과 병원균의 증식을 효율적으로 방지하며 경제적

인 소독제이며 급배수관망에서 안전한 수질을 확보하기 위해 잔류 염소농도는 0.2 mg/L로 유지되어야 한다 (Termini and Viviani, 2015). 그러나 잔류 염소농도는 급배수관망을 따라 이동하면서 점차 감소하므로 적절한 염소농도가 유지될 수 있도록 염소 감쇄 거동을 충분히 이해할 필요성이 있다 (Clark, 1998).

잔류 염소농도의 감쇄는 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는데 이러한 영향 인자들에 의한 염소감쇄 거동을 정확히 예측하기 위한 연구는 계속되어왔다. 기존의 연구들은 정상 상태의 흐름에서 레이놀즈수 등 조건을 달리하여 염소감쇄거동에 관한 연구를 수행하였으며 1차 반응 모델이 적합하다는 결과를 나타냈다 (Biswas and Clark, 1993; Rossman et al., 1994;

Received 26 January 2018, revised 19 February 2018, accepted 28 February 2018

*Corresponding author: Sanghyun Kim (E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

Kiene et al., 1998; Kim et al., 2015).

이전의 많은 논문들이 정상 상태의 흐름에서의 염소 감쇄 거동을 연구하였으나 비정상류인 현실 여건은 이전의 연구들을 통해 실제 관망에 대한 염소감쇄거동을 정확하게 구현하는 것에는 한계가 있다. 실제 관망에서는 밸브 제어, 펌프 가동, 다양한 시간대별 물 수요량 등의 요소에 의해서 정상 상태의 유동이 비정상 상태의 유동으로 변하며, 염소감쇄가 더 빠르게 혹은 더 느리게 거동할 수도 있다. 밸브로 인한 유속의 변화에 의해 수충격(Transient)이 발생된 비정상 상태의 유동에서 그와 동시에 레이놀즈수가 줄어들어 염소감쇄속도가 느려진다는 연구 결과가 있다 (Ramos et al., 2010). 또한, Kim and Kim (2017)은 수충격 발생 주기가 짧아짐에 따라 난류 강도(Turbulence intensity)가 증가하며 그에 따라 염소감쇄 거동이 느려지는 상관관계를 밝혔다. 이전의 연구들을 통해 수충격이 많이 발생하는 불안정한 유동일수록 염소감쇄가 느려진다는 것을 알 수 있다. 그러나 진행됐던 연구들은 수충격을 동일한 시간 간격으로 일어나게 하여 실험을 하였는데, 실제 상수관망에서는 소비자들에 의해 간헐적으로 식수가 공급되므로 불규칙한 주기를 가진 수충격이 발생한다 (Goyal and Patel, 2015).

본 연구의 목표는 물 수요곡선의 가정을 통해 상수관망에 근접하게 구현한 비정상 유동을 가진 물 분배 시스템에서의 수충격 발생횟수와 잔류염소거동의 상관관계를 밝히는 것이다. 이를 위하여 소규모 물 분배 시스템에서 가정된 물 수요곡선을 바탕으로 한 확률밀도함수를 이용하여 수충격을 발생시키는 장치를 구성하였다. 이 실험 장치를 통해 발생횟수는 같게 하되 불규칙한 시간 간격의 수충격 발생과 일정한 시간 간격의 수충격 발생에 의한 잔류염소농도거동을 비교하는 실험을 수행하였다. 또한 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)를 이용해 실험적 염소농도와 모의된 염소농도 간의 RMSE(Root-Mean-Square errors)를 최소화하도록 하는 매개변수 최적화를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 가상의 물 수요곡선에 근거한 확률밀도함수

Goyal and Patel (2015)는 실제 상수관망에서는 소비자들에 의해 간헐적으로 식수가 공급되므로 불규칙한 주기를 가진 수충격이 발생한다고 하였다. 본 연구에서,

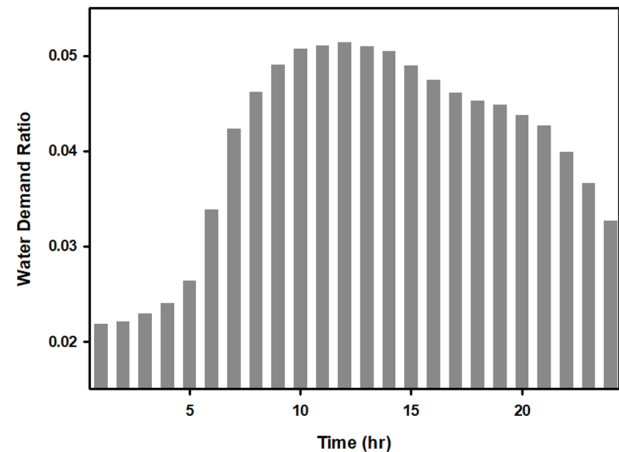


Fig. 1. Water demand curve in hypothetical water distribution system.

수충격 발생 주기는 시스템의 물 소비곡선과 유사하다고 가정하였고 수충격 발생 확률은 확률밀도함수(Probability density function)를 이용해 근사치를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 전체적인 물 소비량에 비해 상대적으로 새벽의 물 소비량이 작다고 가정한 물 수요곡선(Fig. 1)에 따른 5차 다항식의 확률밀도함수를 구성하였다.

2.2 실험적 조건

불안정한 유동에서 잔류 염소 농도를 실시간으로 측정하도록 만들어진 소규모 물 분배 시스템은 Fig 2와 같다. 관망은 총 125 m이고, 내경 0.02 m, 굵기 0.003 m이며 탄성 계수가 190 GPa인 스테인레스 스틸 관으로 이루어져 있다. 관망의 각 끝에는 물을 저장하는 저수 탱크와 펌프를 이용한 가압을 받을 가압 탱크로 총 두 개의 탱크가 설치되어 있고, 두 탱크 사이에는 직렬 펌프 시스템이 설치되어 있다. 염소 센서 (CLO-1-mA-2 ppm, ProMinent, Inc.)의 측정 범위는 0.02~2.00 ppm이고 불확도는 ± 0.02 ppm이다. 염소 센서는 유량 제어 밸브 및 유량 측정 장치 (DGMa310T000, ProMinent, Inc.)가 설치되어 있는 우회 관망에 설치되어 있다. 염소 센서의 유량은 60 L/hr로 유지되었으며 1 Hz의 샘플링 속도로 염소 농도를 측정하였다. 각 실험에 앞서 물 분배 시스템에서 수돗물을 30분 동안 순환시켜 생물막 생성 및 기타 잔류 물질들의 잠재적 영향을 최소화하도록 하였다.

수동으로 볼 밸브를 닫음으로써 발생하는 수충격은 균일한 강도로 조절하기 어렵기 때문에, Kim and Kim (2017)에서 제작된 수충격 발생기를 사용하여 실험을

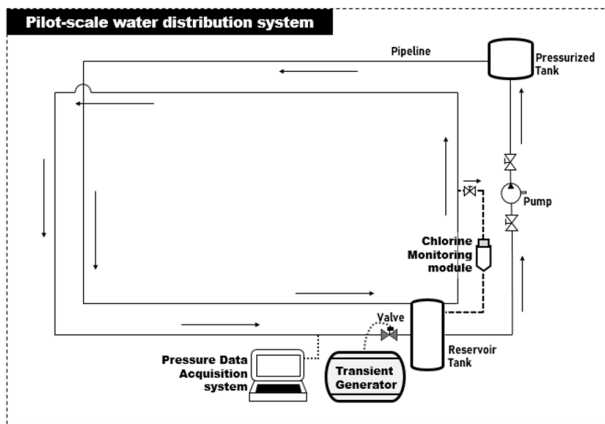


Fig. 2. A schematic the pilot-scale experimental pipeline system with a transient generator.

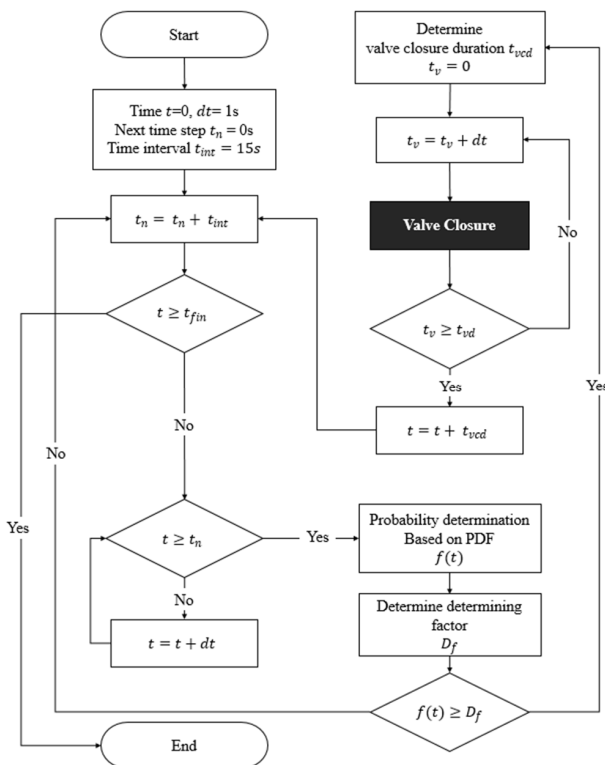


Fig. 3. Flow chart of transient generator using probability density function.

수행하였다. 또한 상수관망의 물 소비곡선에 따른 확률 밀도함수를 바탕으로 수충격을 발생시키기 위해 수충격 발생기는 National Instrument 장치 (NI cDAQ-8178, NI-9203, NI-9215)와 LabVIEW 2015 software를 통해 제어 하였다. Fig. 3은 수충격 발생기의 운영 흐름도를 보여준다. Fig. 3의 과정은 설정한 시간이 끝날 때(t_{finish})까지

반복된다. 모든 시간 간격(t_{int})에서 수충격 확률은 확률 밀도함수($f(t)$)를 기반으로 계산되며 밸브 결정 인자 (D_f)의 값은 난수 생성 절차에 의해 0과 1 사이에서 결정 된다. D_f 가 확률 조건($f(t) \geq D_f$)을 만족할 때, 밸브가 닫혀있는 시간을 설정해야 하는데, 밸브가 닫혀있는 시간이 길수록 수충격의 영향은 크게 감소한다.

본 연구에서는 수충격 발생기를 통해 소규모 실험관망에서 초기 농도 0.61 ppm의 농도인 상수를 각각 다른 조건에서 유속 60 L/hr로 2.07일 동안 운전하며 염소의 농도가 감소되는 거동을 살펴보았다. 정상 상태 유동 (Steady), 가정된 물 수요곡선의 확률밀도함수(Fig. 1)에 기초하여 수충격이 발생하는 유동(ADC(Assumed demand curve based flow)), ADC와 동일한 수충격 발생횟수를 가지나 발생간격이 530.55 sec당 1회로 일정한 유동(R(Regular based flow))으로 총 3가지 조건에서 실험을 수행하였다. 모든 조건에서의 밸브 닫힘 시간은 10초로 설정하였다.

2.3 염소 감소 모델

Table 1에서 물 분배 시스템의 염소 감소를 예측하기 위해 기존 모델 구조보다 정확도가 높은 표준 염소감소모델을 나타내었다 (Kim and Kim, 2017). 표준 염소감소모델은 n 을 정수로 제한하는 일반적인 모델과는 달리 n 을 실수로 정의한다. n 차 모델은 염소감소율이 염소 농도의 n 승에 비례하며 매개변수 k, n 가 조정 가능하며, 제한된 n 차 모델은 일부 염소가 미반응물로 남아 있다고 가정하여 매개변수 k, C^*, n 으로 조정 가능하다는 가정에 일반화된다. 그리고 결합된 ' $n+n$ ' 모델은 2개의 반응물이 도입됨에 따라 n 차 반응 모델과 제한된 n 차 반응 모델의 추가적인 일반화가 이루어진 모델이다.

본 연구에서 염소감소모델의 매개변수들은 유전자 알고리즘(GA)을 이용하여 최적화를 수행하였다. 유전자 알고리즘은 Dawin의 진화론을 기반으로 한 계산 모델로서 진화 연산(Evolutionary computation)에 속한 방법이다. 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 선택(Selection)하여 정해진 형태의 자료구조로 표현한다. 이들을 교배(Crossover) 또는 돌연변이(Mutation)를 생성하여 점차적으로 변형함으로써 더 좋은 해들을 생성한다. 유전자 알고리즘은 단순한 병렬적으로 해를 탐색하는 다른 진화적 알고리즘들과 달리 많은 매개변수들을 포함하여 복수의 개체 사이에서 선택이나

Table 1. Generic models for chlorine decay in water distribution system

Title	Governing equation	Parameters
<i>n</i> th	$C = \left((n-1)kt + \left(\frac{1}{C_0} \right)^{(n-1)} \right)^{-\frac{1}{n-1}}$	<i>k, n</i>
Limited <i>n</i> th	$C = C_* + \left((n-1)kt + \left(\frac{1}{C_0 - C_*} \right)^{(n-1)} \right)^{-\frac{1}{n-1}}$	<i>k, C*, n</i>
Combined (<i>n+n</i>)	$C = C_* + \left(k_1 t (n_1 - 1) + \left(\frac{1}{w(C_0 - C_*)} \right)^{n_1 - 1} \right)^{-\frac{1}{n_1 - 1}} + \left(k_2 t (n_2 - 1) + \left(\frac{1}{(1-w)(C_0 - C_*)} \right)^{n_2 - 1} \right)^{-\frac{1}{n_2 - 1}}$	<i>k₁, k₂, C*, w, n₁, n₂</i>

교배 등의 유전적 조작에 의해서 상호 협력적으로 해의 탐색을 수행할 수 있다. 또한 복잡한 수학적 연산이 불필요한 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 RMSE는 다음과 같이 정의하였다.

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

여기서 *i*는 시간 단위이고, *C_{obs}*는 측정된 염소 농도이고, *C_{model}*(*i, P₁, P₂, ..., P_k*)는 선택된 모델로부터 모의된 염소 농도이다. 그리고 *P_k*는 *k*번째 물질의 매개변수를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수충격 발생 소개 및 염소농도 감쇄 결과

Fig. 4은 정상 상태 유동(Steady), 가정된 물 수요곡선의 확률밀도함수에 의한 불규칙한 간격의 수충격이 발생하는 유동(ADC), 앞서 행한 실험과 수충격 발생 횟수는 같으나 규칙적인 간격의 수충격이 발생하는 유동(R)에서의 시간에 따른 잔류 염소감쇄거동을 나타낸 그래프이다. 이전의 연구들의 결과와 같이 정상 상태 유동 조건의 steady는 비정상 상태 유동에 비해 빠른 염소감쇄거동을 보인다. 그에 반해 ADC와 R은 느린 염소감쇄거동을 보이며 ADC와 R의 최종 잔류

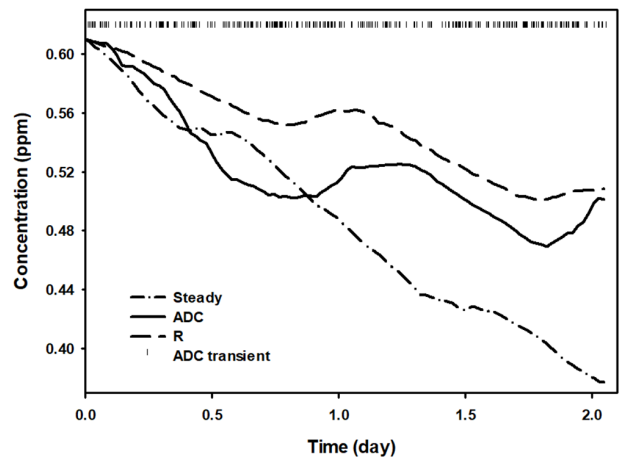


Fig. 4. Time series of chlorination of concentration under 3 hydraulic conditions (Steady, ADC, R).

염소농도는 비슷한 값을 나타낸다. 모델을 구동하기 전에 염소감쇄속도를 보다 정확하게 ADC와 R을 비교해보기 위해 1차 반응이라 가정하여 ADC의 염소감쇄속도 상수(*k_{b,ADC}*)과 R의 염소감쇄속도 상수(*k_{b,R}*)의 차이를 보면 *k_{b,R} - k_{b,ADC} = 0.0054 day⁻¹*로 수치적으로도 큰 차이가 없다. 이러한 결과는 수충격의 발생 횟수가 염소감쇄에 큰 영향을 미치며 발생 간격은 크게 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

본 연구에서의 실험은 건물 옥상의 모의관망에서 행해져 다른 날짜에 수행된 ADC와 R의 염소감쇄속도상수 사이의 작은 오차는 일조량과 같은 온도 변화가 수온에 영향을 주어 나타나는 것으로 볼 수 있다. Powell et al. (2000)은 수온은 일년 내내 변할 것이고, arrhenius 방정식은 온도 변화가 염소감쇄기작의 화학반응에 영향을 주는 것에 대한 방정식을 설명하는데 사용할 수 있다고 하였



다. Arrhenius 방정식은 다음과 같다.

$$k_b = F \times \exp\left[-\frac{E}{R(T+273)}\right] \quad (2)$$

여기서 k_b 는 염소감쇄속도상수(day^{-1}), F 는 빈도 인자(반응 차수에 따른 단위), E 는 활성화에너지(J/mol)이고 R 은 이상기체상수($8.31J/mol$)이다. F 의 값은 E/R 값의 변화에 민감하므로, Hallam et al. (2003)은 F 와 E/R 값을 고정하기 위해서 아래와 같은 k_b 을 예측하기 위한 결합방정식을 나타내었다.

$$k_b = 5.9 \times 10^6 \left(\frac{1}{C_0}\right) \leq f(TOC^{2.06} [e^{-\frac{E}{R(T+273)}}] (N^{1.14}) \\ = F \times \exp\left[-\frac{E}{R(T+273)}\right] \quad (3)$$

본 연구에서는 식(2)의 TOC 와 N 가 동일하다고 가정하며 ADC 와 R 을 위의 식을 통해 동일 온도로 보정한 염소감쇄속도를 비교하였다. 동일 온도로 보정하였을 때 ADC 의 염소감쇄속도상수($k_{cal,ADC}$)와 R 의 염소감쇄속도상수($k_{cal,R}$)의 차이는 $k_{cal,R} - k_{cal,ADC} = 0.0005day^{-1}$ 로 두 조건의 염소감쇄속도상수 값이 같다고 볼 수 있다.

3.2 염소 감쇄 매개변수의 최적화 결과

본 연구의 3가지 조건의 실험적 염소농도와 GA 를

통해 모의된 염소농도 간의 $RMSE$ 를 최소화하도록 하는 매개변수 최적화를 수행한 결과는 Table 2와 같다. Table 2의 각 조건에서 표준 염소감쇄모델들 사이의 $RMSE$ 값을 살펴보면 수치적으로 값이 크게 차이가 나지 않지만 그 중 특히 결합된 ‘ $n+n$ ’ 반응 모델의 $RMSE$ 값이 작게는 $0.0001 mg/L$, 크게는 $0.0005 mg/L$ 의 차이로 가장 낮다고 볼 수 있다. 그리고 표준 염소감쇄모델들의 계산 시간을 살펴보면 결합된 ‘ $n+n$ ’ 반응 모델이 다른 모델들에 비해 매개변수가 2 배 이상으로 많음에도 불구하고 계산 시간이 크게 차이가 나지 않는다. 결합된 ‘ $n+n$ ’ 반응 모델은 n 차 반응과 제한된 n 차 반응을 포함한 일반적인 모델로써 n 차 반응 모델 또는 제한된 n 차 반응 모델이 적합하다는 이전의 연구결과와 달리 염소감쇄거동을 다양한 매개변수들을 통해서 다른 모델들과 동일한 계산 시간 내에 보다 일반적으로 모의 및 예측이 가능하다. 이는 본 연구의 실험에서 뿐만이 아니라 다양한 실질적인 조건에서 염소감쇄거동을 예측하고 모의하는 것에 대해 적용성이 크다고 볼 수 있다. 그러므로 결합된 ‘ $n+n$ ’ 반응 모델이 가장 적합도가 높다고 판단되며 전반적으로 모든 조건들에서 표준 염소감쇄모델들을 통해 실험적 염소감쇄거동이 잘 모의됨을 알 수 있다.

각 조건들 사이의 $RMSE$ 값들을 비교하였을 때 $steady$ 는 ADC 와 R 에 비해 모든 염소감쇄모델들에서

Table 2. Generic models calibration using GA (Genetic algorithm)

Title	Parameters	Steady			ADC			R		
		Coefficient	RMSE (mg/L)	Calculation time (sec)	Coefficient	RMSE (mg/L)	Calculation time (sec)	Coefficient	RMSE (mg/L)	Calculation time (sec)
nth order	$k(d^{-1})$	0.2164	0.0066	15.922	48.3059	0.0146	15.797	2.0062	0.0085	15.906
	n	0.8986			10.5277			6.2346		
Limited nth order	$k(d^{-1})$	0.1870	0.0066	15.672	2.3127	0.0142	15.484	1.3793	0.0083	16.750
	$C^*(mg/L)$	0.0296			0.4766			0.3173		
	n	0.6237			1.1911			2.2913		
Combined (n+n)	$k_1(d^{-1})$	0.1979	0.0065	16.234	2.1830	0.0141	16.172	7.4389	0.0081	16.750
	$k_2(d^{-1})$	3.0127			1.1582			14.9995		
	$C^*(mg/L)$	0.0376			0.1405			0.0094		
	w	0.8660			0.8125			0.8630		
	n_1	0.6055			4.8126			6.5554		
	n_2	2.4638			0.7701			3.9158		

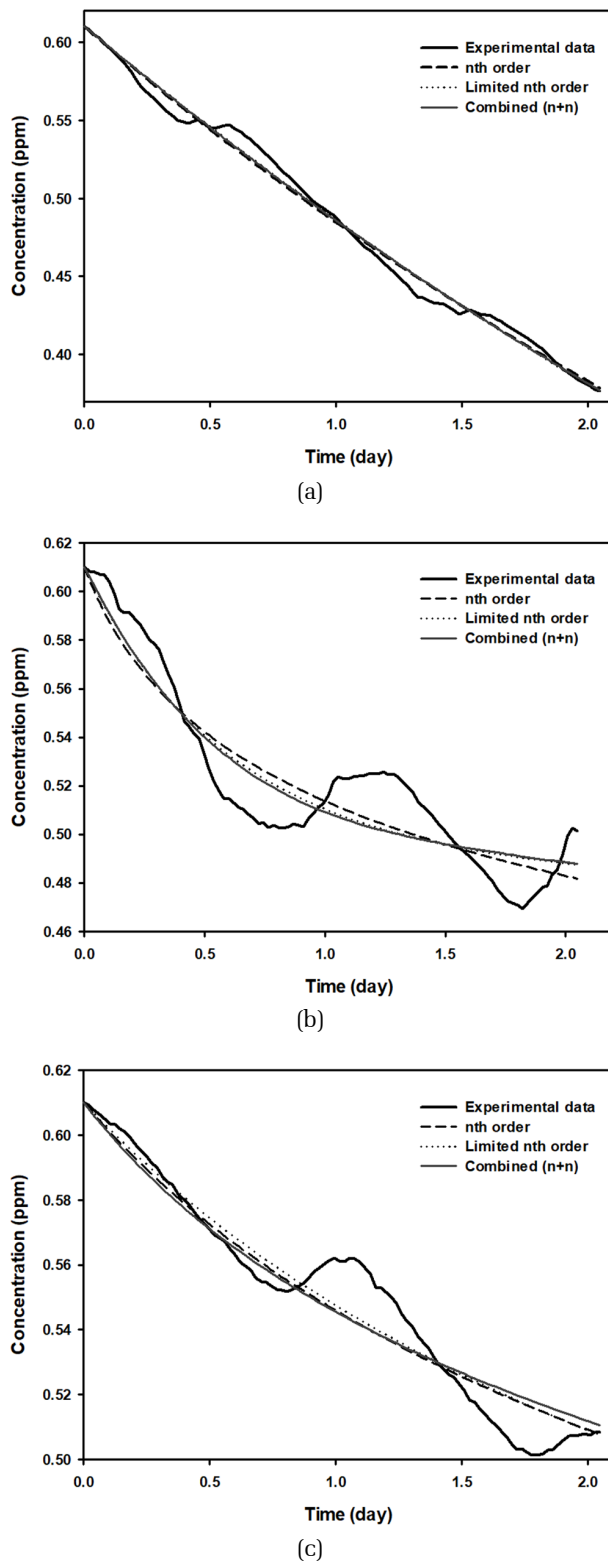


Fig. 5. Comparison of chlorine decay concentration using GA under (a) Steady condition, (b) under ADC condition, (c) R condition.

값이 낮다. Steady와 달리 ADC와 R은 수충격 발생에 의한 급격한 유속의 생성이 염소감쇄거동에 영향을 미치기 때문에 안정한 유동에서의 염소감쇄거동을 모의하는 steady의 표준 염소감쇄모델들의 RMSE 값은 ADC와 R에 비해 낮다. 또한 모델들을 통해 반응의 차수(n)에 대해 값을 구하였을 때도 steady의 경우 차이가 크게 없는데 ADC와 R의 경우 매개변수를 달리 함에 따라 크게 차이가 난다.

Fig. 5(a), (b), (c)는 각각 3가지 조건에서의 실험적 염소감쇄거동을 표준 염소감쇄모델을 통해서 모의한 그림이다. steady의 경우 ADC와 R에 비해 전반적으로 실험적 염소감쇄거동을 잘 모의하였다 (Fig. 5(a), (b), (c)). Table 2에서 steady의 RMSE값이 ADC와 R에 비해 낮은 값을 가지는 이유와 같이 수충격 발생에 의한 급격한 유속 변화를 가진 불안정한 유동에서 염소 농도를 관측했기 때문이다.

4. 결론

본 연구를 통해 수충격 발생횟수는 같으나 가상의 물 수요곡선을 바탕으로 형성되는 불규칙적인 시간 간격의 수충격과 규칙적인 시간 간격의 수충격 발생에 의한 염소감쇄거동을 비교해봄으로써 수충격 발생과 염소감쇄거동 간의 상관관계를 살펴보았다. 그리고 실험적 염소감쇄거동을 바탕으로 GA를 이용하여 표준 염소감쇄모델들의 매개변수 최적화를 수행하였다. 본 연구에서의 3가지 조건에서의 염소감쇄거동에 관한 실험은 외부에 있는 소규모 실험관망에서 수행되었기 때문에 일조량의 영향을 받으므로 이를 보정 해주었다. 결과적으로 ADC와 R의 실험적 염소감쇄속도는 동일하였고 이를 통해 수충격 발생횟수만 같다면 발생 간격에 상관없이 염소감쇄거동은 동일하다는 상관관계를 보였다. Steady, ADC, R 조건에서 매개변수 최적화를 수행한 표준 염소감쇄모델들은 모두 실험적 염소감쇄거동을 잘 모의하였으나 그 중 결합된 ' $n+n$ ' 모델이 적합도가 가장 높았다. 이 연구에서는 가정된 물 수요곡선과 매개변수 최적화를 수행한 표준 염소감쇄모델을 통해 염소감쇄거동에 대한 중요인자를 판별하고자 하였다. 이후 연구는 실제 상수관망의 물 수요곡선을 활용한 염소감쇄거동을 검증하는 연구가 반드시 필요하다.



기호 설명

t_{int}	= Time interval
t_{fin}	= Predetermined finish time
$f(t)$	= Probability density function (PDF)
D_f	= Valve determining factor
C_{obs}	= Experimental chlorine concentration (ppm)
$C_{model}(i)$	= The simulated chlorine concentration (ppm)
P_k	= Parameter of k th substance.
k_b	= Chlorine decay rate constant (day^{-1})
k_{cal}	= Chlorine decay rate constant with temperature compensation (day^{-1})
F	= Frequency factor
E	= Activation energy (J/mol)
R	= Ideal gas constant ($8.31 J/mol$)
C_0	= Initial chlorine concentration (ppm)
T	= Temperature ($^{\circ}C$)
TOC	= Total organic carbon concentration
N	= Number of times the water has been chlorinated
GA	= Genetic algorithm
Steady	= Steady-state flow
ADC	= Irregular transient events by assumed water demand curve based flow
R	= The same number of transient events of ADC but with regular interval based flow

사 사

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

References

- Abokifa, A.A., Yang, Y.J., Lo, C.S. and Biswas, P. (2016). Water quality modeling in the dead end sections of drinking water distribution, *Water Res.*, 89, 107-117.
- Biwas, P., Clark, R.M. (1993). A model for chlorine concentration decay in pipes, *Water Res.*, 27, 1712-1724.
- Clark, R.M. (1998). Chlorine demand and TTHM formation kinetics: a second-order model, *J. Environ. Eng.*, 124(1), 16-24.
- Goyal R.V, Patel, H.M. (2015). Analysis of residual chlorine in simple drinking water distribution system with intermittent water supply, *Appl. Water Sci.*, 5(3), 311-319.
- Hallam, N.B., Hua, F., West, J.R., Forster, C.F. and Simms, J. (2003). Bulk decay of chlorine in water distribution systems, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 129(1), 78-82.
- Kiene, L., Lu, W. and Levi, Y. (1998). Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems, *Water Sci. Technol.*, 38, 219-227.
- Kim, H., Kim, S. (2017). Evaluation of chlorine decay models under transient conditions in a water distribution system, *J. Hydroinform.*, 19, 522-537.
- Kim, H., Koo, J. and Kim, S. (2015). A general framework of chlorine decay modeling at a pilot-scale water distribution system, *J. Water Supply: Res. Technol.*, 64(5), 543-557.
- 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), 117-126.
- Ramos, H.M., Loureiro, D., Lopes, A., Fernandes, C., Covas, D., Reis, F. and Cunha, M.C. (2010). Evaluation of chlorine decay in drinking water systems for different flow conditions: from theory to practice, *Water Res. Manage.*, 24(4), 815-834.
- Rossmann, L.A., Clark, R.M. and Grayman, W.M. (1994). Modeling chlorine residuals in drinking water distribution systems, *J. Environ. Eng.*, 120(4), 803-820.
- Termini, D., Viviani, G. (2015). Spatial diversity of chlorine residual in a drinking water distribution system: application of an integrated fuzzy logic technique, *J. Hydroinform.*, 17, 293-306.

pp. 077-087	+
pp. 089-096	+
pp. 097-106	+
pp. 107-113	○
pp. 115-122	+
pp. 123-130	+
pp. 131-143	+
pp. 145-152	+
pp. 153-158	+
pp. 159-168	+
pp. 169-181	+
pp. 183-192	+
pp. 193-200	+