



송·배수시스템의 최적 잔류염소농도 관리 모델 개발

Development of an Optimal Operation Model of Residual Chlorine Concentration in Water Supply System

김기범·형진석·서지원·신희수·구자용*

Kibum Kim·Jinseok Hyung·Jeewon Seo·Hwisu Shin·Jayong Koo*

서울시립대학교 환경공학과

Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT

This study aimed to develop a method to optimize residual chlorine concentrations in the process of providing water supply. To this end, this study developed a model capable of optimizing the chlorine input into the clearwell in the purification plant and the optimal installation location of rechlorination facilities, and chlorine input. This study applied genetic algorithms finding the optimal point with appropriate residual chlorine concentrations and deriving a cost-optimal solution. The developed model was applied to SN purification plant supply area. As a result, it was possible to meet the target residual chlorine concentration with the minimum cost. Also, the optimal operation method in target area according to the water temperature and volume of supply was suggested. On the basis of the results, this study derived the most economical operational method of coping with water pollution in the process of providing water supply and satisfying the service level required by consumers in the aspects of cost effectiveness. It is considered possible to appropriately respond to increasing service level required by consumers in the future and to use the study results to establish an operational management plan in a short-term perspective.

Key words: Optimization of rechlorination, Residual chlorine, Tap water, Water quality, Water supply system

주제어: 잔류염소농도 최적화, 잔류염소, 수돗물, 수질, 상수도 시스템

1. 서 론

우리나라의 경제수준이 선진국 반열에 올라섬에 따라 상수도를 공급받는 소비자의 서비스 요구 수준은 시간이 지남에 따라 증가하고 있다. 특히, 최근의 소비자들은 수돗물의 수질에 대해 많은 관심을 보이고 있다. 과거의 수도사업자들은 정수장에서 높은 품질의 수돗물을 생산한다면 소비자의 수도꼭지에서 높은 품질의 수돗물이 공급될 것으로 생각하였다. 그러나 최근의 수도사업자들은 정수의 수송과정인 송·배·급수 관망에서의 수질관리가 소비자의 수도꼭지에서 높은

품질의 수돗물을 공급할 수 있다는 인식을 보편적으로 갖게 되었다.

우리나라의 수도법에서는 수돗물을 공급하는 과정에서 2차 수질오염피해를 방지하기 위하여 수도꼭지의 잔류염소 농도가 0.1 mg/L 이상(병원성 미생물에 의해 오염되거나 오염될 우려가 있는 경우 0.4 mg/L 이상)이어야 한다고 규정하고 있다. 그러나 노후 상수도관로에서의 침적물 산화 및 누수, 가정에 설치되어 있는 물탱크에서의 체류시간 증가로 인해 잔류염소 농도가 규정치 이하로 검출되는 문제가 종종 발생하고 있다. 이와 같은 문제점을 방지하기 위하여 정수지에서 과잉의 염소를 주입한다면 비용적인 측면에서 효율적이지 못하고, 소독부산물의 생성 확률을 높일 뿐 아니라, 소비자의 이-

Received 14 November 2017, revised 30 November 2017, accepted 1 December 2017

*Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: jykoo@uos.ac.kr)

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

취미에 대한 민원 및 음용률 저하와 같은 새로운 문제를 유발할 수 있다 (Kim et al., 2010).

상수도 공급과정에서 발생할 수 있는 수질문제는 공중 보건에 심각한 영향을 미칠 수 있고, 상수도 시스템 전반에 대한 신뢰도를 저하시킬 수 있으므로 각별히 주의해야 할 문제이다. 이를 고려하였을 때 현재 우리나라 수도사업자들이 실시하고 있는 공급과정 중 잔류염소농도 관리 방법은 소비자의 신뢰성을 제고함과 동시에 수도사업자의 비용지출을 고려하여 최적화될 필요성이 있다.

공급과정 중 잔류염소농도를 최적으로 관리하기 위해 최근 다양한 방법들이 제안되고 있다. 대표적인 방법으로는 부족한 잔류염소농도를 공급과정 상수도관망 중에서 재염소 투입을 통하여 추가할 수 있도록 하는 방안이 있다. 공급과정에서 재염소시설을 설치하여 관망 내 잔류염소농도를 유지하기 위한 방안은 다음과 같이 다양하게 연구되어 왔다.

Bocelli et al., (2003), Sert (2009), Ayvaz et al., (2014)은 결정론적 해찾기 방법인 선형계획법(LP, Linear Programming)을 이용하여 재염소시설의 최적 스케줄링 문제를 공식화하였다. Tryby et al., (2002)는 정수형 결정변수로서 재염소 위치를 설정하고 일반적인 혼합정수계획법(MILP, Mixed Integer Linear Programming)문제로 공식화함으로써 재염소 투입량을 결정하였다. 기술한 연구들은 결정론적 관점에서 문제해결에 접근한 연구들로 정의할 수 있다.

Munavalli and Mohan-Kumar (2003)은 재염소시설의 위치를 고정한 상태에서 총 염소투입량을 최소로 하는 목적함수를 도출하기 위해 유전알고리즘(GA, Genetic Algorithm)을 적용하였다. Prasad et al., (2004)은 재염소시설 개소수에 대한 문제를 해결하기 위해 다목적유전알고리즘(MOGA, Multi Objective GA)을 적용하였다. Ostfeld and Salomons (2006)은 염소농도의 제약조건 하에서 재염소시설 설치비, 운영비를 최소로 하는 재염소시설 위치를 찾기 위하여 GA를 적용하였으며, Ohar and Ostfeld (2014)는 EPAnet MSX와의 연계를 통해 잔류염소농도와 더불어 소독부산물의 생성을 최소로 하는 재염소시설 위치와 재염소투입량을 도출하였다. 그 외 Chu et al., (2008)은 면역알고리즘(IA, Immune Algorithm), Wang and Guo (2010)은 개미군집최적화(ACO, Ant Colony Optimization), Wang et al. (2010)은 입자군집최적화(PSO, Partical Swarm Optimization)를 이용하여 재염소시설의 설치 위치와

재염소투입량을 도출한 바 있다. 여기서 기술한 연구들은 확률론적 방법에서 문제해결에 접근한 연구들로 정의할 수 있다.

다만, 대다수의 선행연구들은 실제 상수도관망을 대상으로 한 연구사례가 드물며, 모의관망 또는 실험관망에서 모델링한 결과들을 제시하고 있다. 공급과정 중 최적잔류염소농도 유지관리를 위해 개발된 모델을 실제현장에 적용하기 위해서는 현장 모니터링자료 및 현장 측정자료를 활용하여 공급과정 중에 잔류염소농도 감소계수를 도출하고, 모델링 인자들을 현장에서 측정된 인자로 적용할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 공급과정에서의 잔류염소농도 최적 운영방안을 마련하기 위한 연구를 진행하였다. 선행연구에서도 다수 활용된 바 있는 GA를 기반으로 연구대상지역의 잔류염소농도 최적 운영관리 모델을 개발하였으며, 현장 모니터링 자료 및 현장 측정자료를 활용하여 연구대상지역의 계절별(수온별), 공급수량별(물 사용량별) 정수장 및 재염소시설에서의 재염소 투입량을 제시하였다. 이를 통해 모든 공급지역에서 적절한 잔류염소농도 범위를 갖는 수돗물을 공급함과 동시에 비용 측면에서 가장 최적의 운영방안을 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

본 연구에서는 현장실험이 가능하고, 정수장 운영데이터 확보가 가능한 S광역시상수도 PT계열 SN정수장 공급지역 및 송수관로를 연구대상으로 선정하였다. 선정된 연구대상지역은 관망의 길이가 길어 송수된 정수가 관 말단 배수지에 도달할 때까지 약 24 h가 소요되는 상태로서, 관 말단 배수지의 잔류염소농도를 확보하기 위해 정수장 유출수의 잔류염소농도를 높이는 경우 정수장 인근 배수구역에서 높은 잔류염소농도로 인한 이취미 문제가 빈번하게 제기되는 지역이다. 또한, 반대로 정수장 유출수의 잔류염소농도를 낮추는 경우 관말 지역에서 적정 잔류염소농도를 확보하지 못하는 문제가 발생하는 지역이다. 이에 따라 본 연구에서 선정된 연구대상관로는 잔류염소농도의 최적관리가 필요한 지역으로써, 재염소 투입시설의 도입이 필요한 지역이라 할 수 있다.

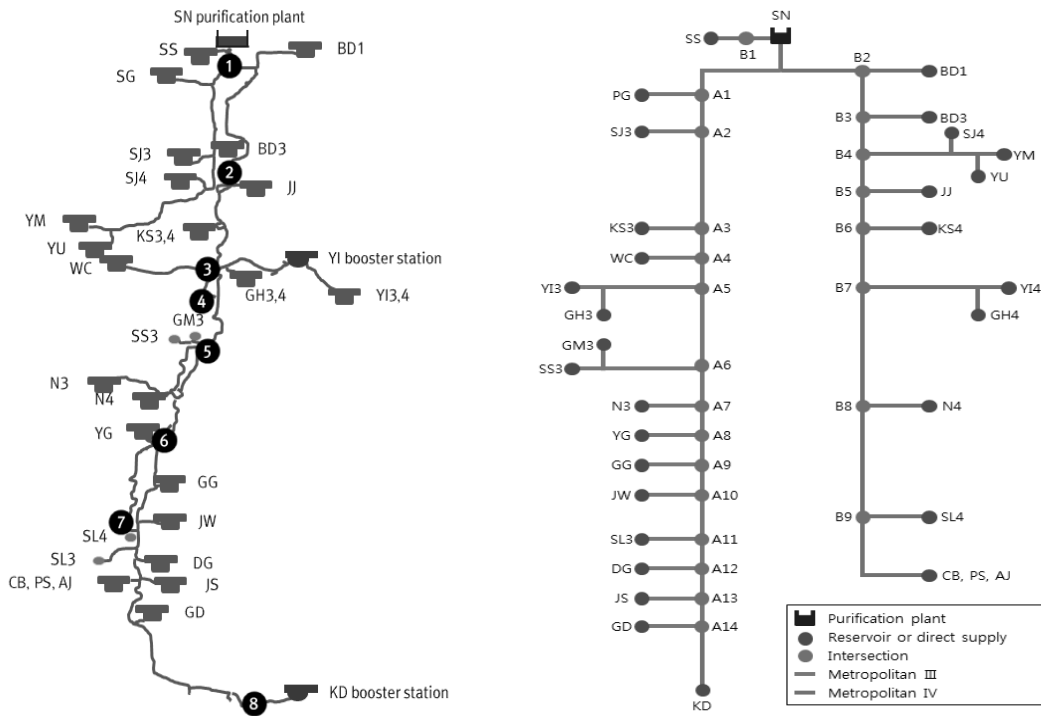


Fig. 1. Target area (a : current situation of target area and grap sampling point, b : skeletonization map of target pipes).

SN정수장 정수지의 시설용량은 786,000 m³/d이며, 2013년, 2014년 평균 431,106 m³/d, 434,433 m³/d의 유량을 공급하였다. SN정수장은 S광역상수도 송수관로를 통해 27개 배수지 및 3개 직수구역에 생산된 정수를 공급하고 있다. 송수관로의 총 연장은 185.25 km이며, 연구대상 송수관로의 관망 형태는 다음 Fig. 1a와 같다. Fig. 1b는 연구대상 송수관로의 관망 형태를 손쉽게 파악하기 위해 23개의 분기점을 기준으로 골격화한 모식도를 나타낸다.

SN정수장에서 잔류염소농도는 0.46 mg/L ~ 0.94 mg/L로 유출되는 것으로 조사되었다. 잔류염소농도의 최소값과 최대값의 편차는 0.48 mg/L로써 크게 나타났으나 평균 운영농도는 0.75 mg/L 내외인 것으로 조사되었다.

2.2 잔류염소농도 모델링 방법

공급과정 중의 잔류염소농도는 다음 Equation 1과 같은 1차반응식 형태의 잔류염소농도 감소 모델을 이용하였다.

$$C = C_0 \times e^{-K_T t} \quad (1)$$

여기서,

- C : 공급과정 중 잔류염소농도(mg/L),
- C_0 : 정수장에서 잔류염소 투입농도(초기농도)(mg/L),
- K_T : 총 잔류염소농도 감소계수(h⁻¹)
- t : 관망 내 체류시간(water age)(h)

총 잔류염소농도 감소계수(K_T)는 Rossman et al. (1993)이 제안한 질량 이동에 기초한 염소감소모델을 이용하여 산정하였다. 해당 모델은 상용화된 EPAnet 2.0에도 적용되어 있는 모델이다. Prasad et al., (1993)의 모델은 1차 동력학적 반응에 기초하고 잔류염소농도의 감소는 수체와 관 벽에서의 반응을 통해 발생하는 것으로 전제하며, 다음 Equation 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= -K_b C - \frac{k_f}{d}(C - C_w) \\ &= -K_b C - \frac{2k_f}{R}(C - C_w) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

$$\frac{dC}{dt} = \text{잔류염소 감소속도(mg/L/d)}$$

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

C = 공급과정 중 잔류염소 농도(mg/L)
 t = 시간(d)
 k_f = 질량전달계수(m/d)
 d = 관경(m)
 R = 관의 수리학적 반지름($d/2$)(m)
 C_w = 관 벽(wall)에서 잔류염소 농도(mg/L)
 K_b = 수체에서 잔류염소농도 감소계수(d^{-1})
 (이하 수체감소계수)

Equation 2의 첫 번째 항은 수체에서의 잔류염소농도 감소 반응이고, 두 번째 항은 관벽에서 발생하는 잔류염소농도 감소 반응을 나타낸다. 만약, 관 벽에서의 반응속도가 1차 반응이고, 잔류염소의 축적이 이루어지지 않는다고 가정하면, 다음 Equation 3과 같은 물질수지식이 성립된다.

$$k_f(C - C_w) = K_w C_w \quad (3)$$

여기서,
 K_w = 관 벽에서 잔류염소농도 감소계수(m/d)
 (이하 관벽감소계수)

Equation 3을 관 벽에서 잔류염소농도(C_w)에 대해 정리한 뒤, Equation 2에 대입하면 다음 Equation 4와 같은 수식을 도출할 수 있으며, 잔류염소농도(C)에 대해 이를 정리하면 Equation 5와 같다.

$$\frac{dC}{dt} = -K_b C - \frac{2K_w k_f C}{R(K_w + k_f)} \quad (4)$$

$$\frac{dC}{dt} = -\left(K_b + \frac{2K_w k_f}{R(K_w + k_f)}\right) C \quad (5)$$

Equation 6은 수체감소계수(K_b)와 관벽감소계수(K_w)를 합한 것으로서 Equation 1의 총 잔류염소농도계수(K_T)와 같다.

$$K_T = K_b + \frac{2K_w k_f}{R(K_w + k_f)} \quad (6)$$

Equation 6에서 질량전달계수(k_f)는 Equation 7과 같이 Sherwood number를 이용하여 계산할 수 있다. 여기서, Equation 7의 물에서 염소의 확산계수(D), Equation 8의

동점성계수(ν)는 각각 Kramer et al. (1959), Lee (2007)이 제시한 결과를 적용하였다.

$$k_f = \frac{Sh D}{d} \quad (7)$$

여기서,
 Sh = Sherwood number
 $Sh = 0.023 Re^{0.63} Sc^{0.33}$, ($Re \geq 2,300$)
 Re = 레이놀드수 (Equation 8)
 Sc = Schmidt number (Equation 9)
 D = 물에서 염소의 확산계수
 (20 °C에서 $0.10 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{d}$)

$$Re = \frac{u \times d}{\nu} \quad (8)$$

여기서,
 u = 유속(m/d)
 ν = 동점성계수 (20 °C에서 $0.09 \text{ m}^2/\text{d}$)

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (9)$$

본 연구에서는 상기 기술한 수식을 이용하여 총 잔류염소농도 감소계수를 관망의 각 관로에 적용하였다. 여기서, 수리해석을 통해 도출되는 유속(u)의 경우는 EPAnet 2.0 관망 수리해석 결과를 이용하였다.

Equation 6에 나타난 수체감소계수(K_b)와 관벽감소계수(K_w)는 실험을 통해 도출하였다. 수체감소계수(K_b)는 15년 11월 2일부터 3일까지 SN정수장의 정수지 유출수를 대상으로 Powell et al. (2000)이 제안한 실험방법을 이용하여 도출하였다. 수체감소계수(K_b)는 Equation 10과 같은 1차 감소반응식에 따른다고 가정하였다.

$$C = C_0 e^{-K_b \cdot t} \quad (10)$$

여기서,
 C : 공급과정 중 잔류염소농도(mg/L)
 C_0 : 초기 잔류염소농도(mg/L)
 K_b : 수체감소계수(d^{-1})
 t : 경과시간(min)

수체감소계수(K_b)는 동절기를 모사하기 위해 5 °C,



춘추절기를 모사하기 위하여 15 °C, 하절기를 모사하기 위하여 25 °C에서 각각 실험하였으며, 실험 결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. Fig. 2 내의 회귀식의 계수(기울기)는 각 온도별 수체감소계수(K_b)를 나타낸다.

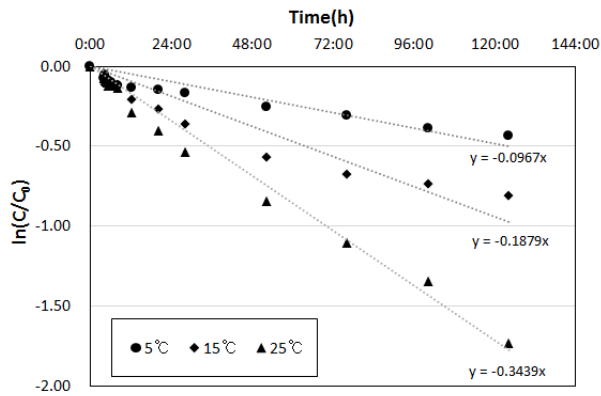


Fig. 2. Experimental result for calculating bulk coefficient.

도출된 수온별 수체감소계수(K_b)에 대해 아레니우스 식을 이용하여 회귀식을 도출한 결과는 다음 Equation 11과 같다.

$$\ln K_b = -4.852 \times (1000/T) + 15.073 \quad (R^2 = 0.9302) \quad (11)$$

여기서,

T : 절대온도 (K) = 273+°C

관벽감소계수(K_w) 산정을 위하여 8개소의 현장에서 잔류염소농도 측정시험을 실시하였다. 관벽감소계수(K_w)는 시행착오법에 의해 추정하는 Systematic analysis method를 통해 도출하였으며, EPANet 2.0에서 제공하는 calibration 기능을 이용하였다. 수체감소계수(K_b) 도출을 위한 실험실 시험일의 현장 조건 및 모니터링 자료와 도출된 수체감소계수(K_b)를 활용하여,

관벽감소계수(K_w)는 -0.0806 m/d로 도출되었다. 다음 Table 1은 관벽감소계수(K_w)의 추정을 위해 관망 내에 위치한 밸브실에서 잔류염소를 측정된 결과를 나타낸다.

2.3 최적 잔류염소농도 관리를 위한 최적화 방법

본 연구에서는 최적 잔류염소농도 관리를 공급지역에서의 공급목표로 설정한 잔류염소농도의 범위를 만족시키면서 잔류염소 소독에 소요되는 비용을 최소화하는 것으로 정의하였다. 최적 잔류염소농도 관리 모델의 개발에는 최적의 정수지 염소 주입량, 재염소 설치지점 및 재염소 주입량을 찾는 이진코딩과 실수코딩이 조합된 GA를 이용하였다. 다음 Fig. 3은 GA의 흐름도를 나타낸다.

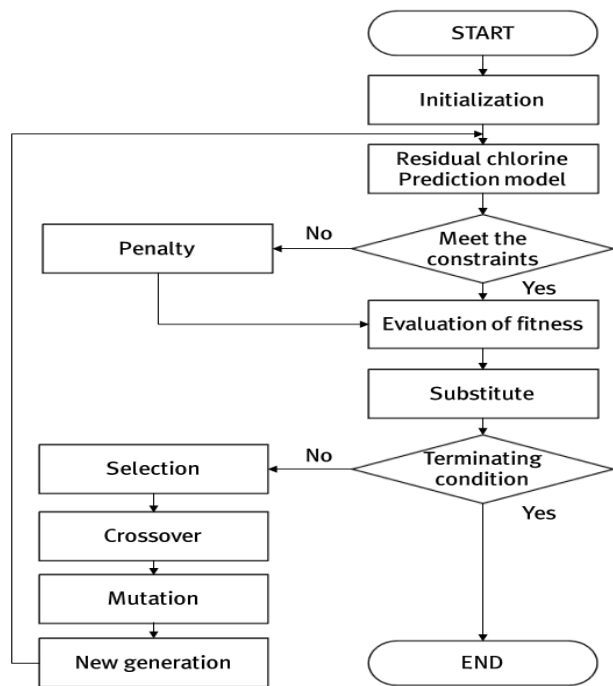


Fig. 2. Flow chart of GA.

Table 1. Result of gap sampling

Point (in Fig. 1(a))	Residual chlorine concentration (mg/L)	Point (in Fig. 1(a))	Residual chlorine concentration (mg/L)
1	0.650	5	0.665
2	0.695	6	0.530
3	0.617	7	0.495
4	0.637	8	0.427

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

최적 잔류염소농도 관리 모델의 목적함수는 Equation 12, Equation 13, Equation 14에 나타난 바와 같이 정수장 염소투입 비용, 재염소시설 설치 및 염소투입 비용 등과 같은 비용의 최소화로 설정하였다. 제시한 목적함수는 GA에서의 적합도검정에 사용하였으며, 비용이 적은값일수록 좋은 적합도를 받도록 설정하였다.

$$\min E = \min \left[E^{WPP} + \sum_{i=1}^n (E_i^{CBS} + E_i^{COE}) \right] \quad (12)$$

$$E^{WPP} = C^{WPP} \times Q^{WPP} \times \rho_{WPP}^{WPP} \quad (13)$$

$$E_i^{CBS} = (C_{i,a}^{CBS} - C_{i,b}^{CBS}) \times Q_i^{CBS} \times \rho_i^{CBS} \quad (14)$$

여기서,

E : 총 비용(원/d)

E^{WPP} : 정수장 염소투입 비용(원/d)

E_i^{CBS} : i노드에 설치된 재염소시설 염소투입 비용(원/d)

E_i^{COE} : i노드의 재염소시설 설치비용(= 67,850 원/d)

C^{WPP} : 정수장 잔류염소농도 투입농도(mg/L)

$C_{i,a}^{WPP}$: i노드 재염소시설에서 재염소 후 잔류염소농도 (mg/L)

$C_{i,b}^{WPP}$: i노드 재염소시설에서 재염소 전 잔류염소농도 (mg/L)

Q^{WPP} : 정수장 유출수량(m³/d)

Q_i^{CBS} : i노드 재염소시설의 재염소 유량(m³/d)

ρ_{WPP}^{WPP} : 정수장 액화염소가스 투입 단가(= 550 원/kg)

ρ_i^{CBS} : i노드 재염소시설 차아염소산나트륨 투입 단가 (= 15,426 원/kg)

재염소시설 설치비용은 재염소시설의 내용연수를 20년으로 가정하고, 총 설치비용을 하루 단위로 나누어 지불한다는 전제와 이자율 3%를 고려하여 하루 67,850원을 적용하였다. 이는 재염소시설의 초기투자비용이 운영비용에 비하여 매우 커 해를 도출하는 과정에서 재염소시설을 최대한 설치하지 않고, 정수장에서 최대의 잔류염소를 넣는 방법으로 목적해가 도출되기 때문이다.

염소투입비용은 정수장에서의 염소투입비용과 재염소시설에서의 염소투입비용을 나누어 산정하였다. 먼저, 정수장에서의 염소투입비용은 액화염소가스를 사용하는 경우의 투입 단가와 공급수량의 곱으로 산정하였다.

재염소시설에서의 염소투입비용은 차아염소산나트륨 투입 단가와 해당 재염소시설을 통과하는 유량의 곱으로 산정하였다. 여기서, 정수장 액화염소가스 투입 단가는 550 원/kg으로 설정하였다 (K-water, 2014). 재염소시설에서 차아염소산나트륨 투입 단가는 K시 및 D시의 사례를 고려하여, 각 순도별 차아염소산나트륨의 기초구매단가를 100% 차아염소나트륨으로 환산하였을 시 평균가격인 15,426 원/kg을 적용하였다.

제약조건으로는 각 배수지 및 직수공급지역에서 잔류염소 기준치를 만족여부를 설정하였으며, 기준치를 만족하지 못하는 경우 페널티를 부여하여 다음세대에 해당하는 유전자가 자연적으로 도태되도록 하였다. 수용가에서의 잔류염소 기준은 Equation 15와 같이 최소잔류염소농도를 0.40 mg/L, 최대잔류염소농도를 0.60 mg/L로 설정하였다. 소비자가 요구하는 잔류염소농도 범위의 최대값은 일반적인 성인이 잔류염소 냄새를 감지하는 수준으로 설정하였다 (Ekos Research Associates, 2011). Lechevallier et al (1996)은 0.2 mg/L 이상의 유리잔류염소농도를 확보하는 경우 박테리아 재성장을 막을 수 있다는 실험결과를 제안한 바 있다. 최소잔류염소농도는 연구대상관로가 주로 송수관로인 점, 수도법에서 미생물에 의해 오염될 우려가 있는 경우 잔류염소농도를 0.4 mg/L이상으로 유지하도록 한 점을 고려하여 0.4 mg/L로 설정하였다. 두 번째 제약조건으로는 정수장 유출수의 잔류염소농도를 1.0 mg/L 이하로 설정하였으며, Equation 16과 같이 표현할 수 있다.

$$0.40 \text{ mg/L} \leq C_c \leq 0.60 \text{ mg/L} \quad (15)$$

여기서,

C_c : 공급지역에서의 잔류염소농도(mg/L)

$$C^{WPP} \leq 1.0 \text{ mg/L} \quad (16)$$

유전파라미터는 개체수(population) 200, 세대수(generation) 20,000, 교차율(crossover rate) 0.75, 돌연변이율(mutation rate) 0.10으로 설정하였으며, 설정한 세대수가 종료되면 연산이 종료되도록 하였다.

2.4 최적 잔류염소농도 관리 방안

최적의 재염소시설 설치 지점은 최소유량, 최고수온인 운영조건에서 선정을 하도록 하였다.

최적의 재염소시설 설치 위치 선정에는 앞서 기술



한 GA에서 재염소시설 설치 유무 및 재염소시설에서의 재염소투입량, 정수장에서의 염소투입량을 설계변수로 한다. 여기서 재염소시설은 23개의 분기점에 설치가능한 것으로 가정하였다.

최적의 재염소시설 설치 위치가 정해진 다음에는 정수지 유출수량의 범위, 정수지 유출수온의 범위에 따라 연구대상지역의 재염소시설 운영방안을 도출하였다. 운영방안의 도출에도 개발한 잔류염소 최적화 모델을 이용하였으므로, 이 때에는 재염소 설치 위치를 고정한 상태에서 최적의 해를 도출하였으며, 최적화의 목적함수에 재염소시설 설치비용을 고려하지 않았다.

3. 연구 결과

3.1 최적 재염소시설 설치지점 도출 결과

최적 재염소 주입 지점을 도출하기 위해 수질적 측면에서의 최악조건을 적용하였다. 수질적 측면에서의 최악조건이란 잔류염소농도가 가장 빠르게 감소하는 조건과 공급수량이 적어 관망 내 체류시간이 긴 조건을 의미한다. 다음 Fig. 4와 Fig. 5는 2013년 01월부터 2015년 10월까지 SN정수장 공급수량과 수온을 나타낸다. 공급수량 데이터 중 7월, 8월, 9월을 하절기로 정의하였으며, 이 기간 동안의 최소 정수지 유출유량은 342,462 m³/d로 나타났다. 이 때, 최고수온은 29℃로 조사되었다. 해당 조건은 수질적 측면에서 최악의 조건이라 할 수 있다.

개발한 GA 기반 잔류염소농도 최적 관리 모델을 이용하여 SN정수장 공급관망에서 최적의 재염소시설 설치 위치를 도출한 결과는 Fig. 6과 같다. A계통과 B계통의 유량(공급량)은 차이가 있으며, 공급량 및 관로의 관경, 관 길이에 따른 체류시간을 고려할 때 최적의 재염소시설 설치 위치는 A7 분기점과 B8 분기점으로 나타났다.

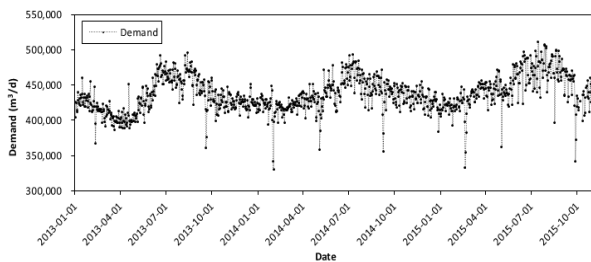


Fig. 3. Demand of target area.

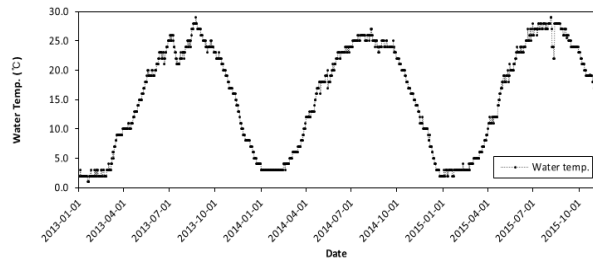


Fig. 4. Water temperature in SN purification plant.

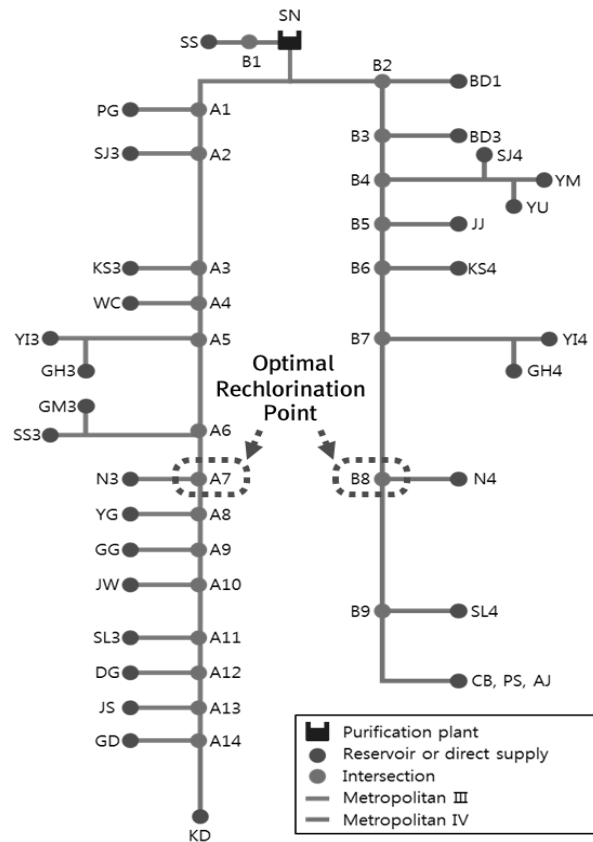


Fig. 5. Optimal rechlorination point (worst condition).

해당 지점에 재염소시설을 설치하는 경우 모든 공급지역에서 제약조건인 최소잔류염소농도 0.4 mg/L를 만족시킬 수 있으며, 최대잔류염소농도 0.6 mg/L를 만족시킬 수 있는 것으로 나타났다. 최악의 조건일 때, 정수장에서는 잔류염소농도를 0.59 mg/L로 유출하고, A7 분기점에서는 0.17 mg/L, B8 분기점에서는 0.08 mg/L의 재염소투입농도를 확보하도록 염소를 주입해야하는 것으로 나타났다. 다음 Table 2는 최악의 조건에서 정수장과 재염소시설 설치 위치에서의 재염소 주입농도 및 비용을 나타낸다.

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

Table 2. Result of optimization in worst condition

Point	Chlorine injection conc. (mg/L)	Chlorine injection dosage (kg/d)	Operation cost (KRW/d)	Installation cost (KRW/d)
SN purification plant	0.59	203.87 (liquefied chlorine)	112,126	
Rechlorination point A7	0.17	7.70 (NaOCl)	118,780	67,850
Rechlorination point B8	0.08	2.89 (NaOCl)	44,581	67,850

3.2 최적 잔류염소농도 관리 방안 도출 결과

앞서 도출된 최적 재염소시설 설치 위치 A7, B8에 재염소 시설을 설치할 경우, SN정수장에서 공급할 수 있는 공급수량 및 수온 조건에 따라 정수장 및 재염소시설 설치 위치에서의 최적 염소투입농도를 도출하였다. 최적화는 앞서 최적 재염소시설 설치 위치를 도출할 때와 유사하나, 염색체 구성시 재염소 위치와 관련된 유전자를 제외하고, 실수로 표현되는 정수장 및 재염소 지점에서의 염소 투입 농도만을 반영하였다. 조건식의 경우 목적함수에 재염소시설 설치 비용은 제외하였으며, 제약조건은 동일하게 모든 공급지역에서 최소잔류염소농도 0.4 mg/L 이상을 확보하고 최대잔류염소농도 0.6 mg/L를 초과하지 않는 것으로 설정하였다.

각 공급수량 및 수온 조건은 2013년 01월부터 2015년 10월까지의 운영자료를 바탕으로 설정하였다. 각 공급수량 및 수온조건은 Table 3, Table 4, Table 5에 나타낸 바와 같다. Table 3과 Fig. 7(a)는 SN 정수장에서 공급수량 및 수온에 따른 잔류염소농도 주입량을 나타낸다. Table 4와 Fig. 7(b)는 재염소시설 A7에서의 재염소 투입농도를, Table 5와 Fig. 7(c)는 재염소시설 B8에서의 재염소 투입농도를 나타낸다.

제시한 결과는 다음과 같이 활용할 수 있다. 예를 들어 물 수요예측 결과 500,000 m³/d의 수량을 공급해야 하는 특정일에 정수지 수온이 20℃라면, 정수지에서는 잔류염소농도가 0.50 mg/L가 되도록 염소를 주입하고, 재염소시설 A7과 B8에서는 각각 0.10 mg/L,

Table 3. Chlorine injection concentration in SN purification plant

SN purification plant chlorine injection concentration	Water temp. in clear well (°C)							
	1	5	10	15	20	25	30	
Demand (1,000 m ³ /d)	300	0.51	0.51	0.53	0.54	0.56	0.59	-
	350	0.49	0.50	0.51	0.52	0.54	0.57	0.60
	400	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52	0.55	0.57
	450	0.47	0.48	0.49	0.50	0.51	0.53	0.56
	500	0.47	0.47	0.48	0.49	0.50	0.52	0.54
	550	0.46	0.47	0.47	0.48	0.49	0.51	0.53

Table 4. Chlorine injection concentration in A7

Chlorine injection concentration in rechlorination point A7	Water temp. in clear well (°C)							
	1	5	10	15	20	25	30	
Demand (1,000 m ³ /d)	300	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.17	-
	350	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15	0.17
	400	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15
	450	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.14
	500	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13
	550	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.12



Table 5. Chlorine injection concentration in B8

Chlorine injection concentration in rechlorination point B8		Water temp. in clear well (°C)						
		1	5	10	15	20	25	30
Demand (1,000 m ³ /d)	300	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	-
	350	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08
	400	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08
	450	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07
	500	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07
	550	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06

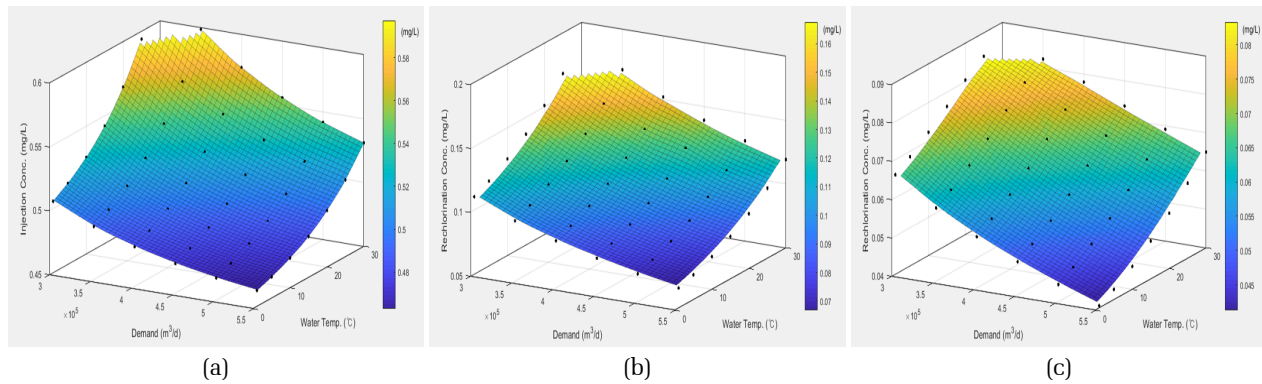


Fig. 6. Chlorine injection concentration (a : SN purification plant, b : Rechlorination point A7, c : Rechlorination point B8).

0.06 mg/L의 재염소를 주입한다. 이와 같이 염소를 주입하면 SN정수장 모든 공급지역에서 최소 및 최대 잔류염소농도 기준을 충족시킬 수 있다.

SN정수장의 평균 공급수량은 450,000 m³/d (2013년 01월부터 2015년 10월), 평균 수온은 15 °C(2013년 01월부터 2015년 10월)로 나타났다. SN정수장의 평균 공급조건에서 재염소시설이 없다면, SN정수장에서는 관 말단 공급지역의 최소잔류염소농도 기준인 0.4 mg/L를 만족시키기 위해 정수지에서 0.68 mg/L의 잔류염소농도를 투입하여야 한다. 이러한 경우 SN정수장 공급지역의 잔류염소농도 편차는 0.28 mg/L(최대 0.68 mg/L(SS reservoir), 최소 0.40 mg/L(KD booster station))로 나타나며, 그 때의 소독비용은 168,300 원/d로 산정된다.

그러나 재염소시설을 운영한다면, 동일한 조건에서 SN정수장에서는 0.50 mg/L, 재염소시설 A7과 B8에서는 각각 0.10 mg/L, 0.06 mg/L의 잔류염소농도를 투입하여야 한다. 재염소시설을 운영하는 경우 SN정수장 공급지역의 잔류염소농도 편차는 0.09 mg/L(최대 0.49 mg/L(SS reservoir), 최소 0.40 mg/L(KD booster station))로 나타나게 되며, 소독비용은 SN정수장 소독비용 123,000 원/d, 재염소시설 소독비용 133,600 원/d으로

산정된다. 즉, 재염소시설을 설치하여 운영하는 경우에는 하루 88,300 원의 추가비용이 발생하지만, SN정수장 모든 공급지역에서 잔류염소농도 편차를 0.19 mg/L 줄이고, 모든 공급지역에서 목표로 설정한 0.4 mg/L ~ 0.6 mg/L의 잔류염소농도를 갖는 수돗물을 공급할 수 있게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 선행연구들에서 다수 활용된 GA를 이용하여 최적 잔류염소농도 관리모델을 개발하였으며, 현장 모니터링 및 측정자료를 바탕으로 연구대상 지역인 SN정수장 공급지역의 잔류염소농도를 최적으로 운영하기 위한 방안을 도출하였다. 도출된 재염소시설 위치를 기반으로 대상지역의 공급수량 및 수온에 따라 정수장 최적 염소주입량, 재염소시설에서의 재염소 투입량을 도출하여 재염소시설을 운영할 시 활용할 수 있는 운영표를 제시하였으며, 활용 예시 및 재염소시설 설치 및 운영에 따른 효과 예시를 함께 제안하였다.

pp. 481-490
pp. 491-499
pp. 501-510
pp. 511-519
pp. 521-527
pp. 529-537
pp. 539-549
pp. 551-566
pp. 567-575
pp. 577-586
pp. 587-597
pp. 599-609
pp. 611-618
pp. 619-628

다만, 본 연구의 결과물들은 정수지 잔류염소농도 투입량 감소에 따른 소독능 감소는 별도로 고려하지 않았다는 한계를 지니고 있다. 추후 지아르디아 불활성화율을 충족시키기 위한 정수지 최소 잔류염소농도 투입기준 등 정수지에서의 소독능을 고려할 시 더욱 현장 조건에 적합한 결과물을 도출할 수 있을 것이라 생각된다. 아울러 공급과정 중 잔류염소농도 변화에 영향을 주는 다양한 요인에 대한 추가적인 검토 역시 필요하다고 판단된다.

본 연구의 결과는 향후 증가하는 소비자의 서비스 요구수준에 적절하게 대응하고, 단기적 관점에서 운영관리 계획 수립에 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

현재의 연구는 송수관망을 대상으로 진행된 것으로서, 향후 송·배수관망에 적용하여 실제 현장 적용성을 검토하고자 한다. 일반 소비자의 잔류염소농도와 관련된 서비스 요구수준을 정량적으로 추정하는 것에는 한계점이 있다. 본 연구에서는 소비자가 요구하는 서비스 수준을 임의로 설정하여 적용하였으나 설문조사를 통해 이를 결정하는 것 또한 방법이라 할 수 있다. 아울러, 재염소시설 설치에 대한 소비자의 지불의사액을 도출한다면, 최적 수질관리의 비용 대비 편익 역시 도출할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

이 논문은 2016년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비(20160010015)에 의하여 연구되었음.

References

- Ayvaz, M. T. and Kentel, E. (2014) Identification of the best booster station network for a water distribution system, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141 (5), 04014076. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000473.
- Boccelli, D., Tryby, M., Uber, J. and Summers, S. (2003) A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions, *Water Research*, 37 (11), 2654-2666. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00067-8.
- Chu, C. W., Lin, M. D. and Tsai, K. T. (2008) Optimal scheduling of booster chlorination with immune algorithm, 2008 International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology (ICIT 2008), Pusan, Korea, IEEE, DOI: 10.1109/ICIT.2008.411.
- Ekos Research Associates INC, (2011) Perceptions of drinking water quality in first nations communities and general population, Ekos Research Associates, Ontario, Canada, p.129.
- Kim, D. H., Lee, D. J., Kim, K. P., Bae, C. H. and Joo, H. E. (2010) Computing the dosage and analysing the effect of optimal rechlorination for adequate residual chlorine in water distribution system, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32 (10), 916-927.
- Kramer, H., Douglas, R. A. and Ulmann, R. M. (1959) The diffusivity of chlorine in water, *Chemical Engineering Science*, 10 (3), 190-191.
- K-water, (2014) 2013 Statistics of waterworks, K-water, Daejeon, p.1766.
- LeChevallier M. W., Welch N. J. and Smith D. B. (1996) Full-scale studies of factors related to coliform regrowth in drinking water. *Applied and Environmental Microbiology*. 62 (7), 2201 - 2211.
- Lee, J. S, (2007) Hydraulics, Goomibook, Seoul, p.725.
- Munavalli, G. R. and Mohan-Kumar, M. S. (2003) Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129 (6), 493-504. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:6(493).
- Ohar, Z. and Ostfeld, A. (2014) Optimal design and operation of booster chlorination layout in water distribution systems, *Water Research*, 58, 209-220. DOI: 10.1016/j.watres.2014.03.070.
- Ostfeld, A. and Salomons, E. (2006) Conjunctive optimal scheduling of pumping and booster chlorine injections in water distribution systems, *Engineering Optimization*, 38 (3), 337-352. DOI: 10.1080/03052150500478007.
- Powell, J., West, J., Hallam, N., Forster, C. and Simms, J. (2000) Performance of Various Kinetic Models for Chlorine Decay, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (1), 13-20. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:1(13).
- Prasad, T., Walters, G. and Savic, D. (2004) Booster disinfection of water supply networks : Multiobjective approach, *Journal of Water Resources and Management*, 130 (5), 367-376. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:5(367).
- Rossman, L. A., Boulos P. F. and Altman, T. (1993) Discrete Volume-Element Method of for Network Water Quality Models, *Journal of Water Resource Planning and*



Management, 119 (5), 505-517. DOI: 10.1061/ (ASCE) 0733-9496(1993)119:5(505).

Sert, C. (2009) Booster disinfection in water distribution networks, Master Thesis, Middle East Technical Univ., Ankara, Turkey.

Tryby, M. E., Bocelli, D. L., Uber, J. G. and Rossman, L. A. (2002) Facility location model for booster disinfection of water supply networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128 (5), 322-333. DOI: 10.1061/ (ASCE)0733-9496(2002)128:5(322).

Wang, H. and Guo, W. (2010) Ant colony optimization for booster chlorination stations of water distribution systems, 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010), Taiyuan, China, IEEE, DOI: 10.1109/ICCASM.2010.5619048.

Wang, H., Guo, W., Xu, J., and Gu, H. (2010) A hybrid PSO for optimizing locations of booster chlorination stations in water distribution systems, 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA 2010), Changsha, China, IEEE, DOI: 10.1109/ICICTA. 2010.505.

pp. 481-490

pp. 491-499

pp. 501-510

pp. 511-519

pp. 521-527

pp. 529-537

pp. 539-549

pp. 551-566

pp. 567-575

pp. 577-586

pp. 587-597

pp. 599-609

pp. 611-618

pp. 619-628