



다목적 최적화기법을 활용한 상수도 공급계통 잔류염소농도 최적운영 모델 개발

Development of optimization model for booster chlorination in water supply system using multi-objective optimization method

김기범¹·서지원²·형진석¹·김태현¹·최태호³·구자용^{1*}

Kibum Kim¹·Jeewon Seo²·Jinseok Hyung¹·Taehyeon Kim¹·Taeho Choi²·Jayong Koo^{1*}

¹서울시립대학교 환경공학과, ²한국상하수도협회, ³한국수자원공사 연구원

¹Department of Environmental Engineering, University of Seoul, ²Korea Water and Wastewater Works Association,

³K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

ABSTRACT

In this study, a model to optimize residual chlorine concentrations in a water supply system was developed using a multi-objective genetic algorithm. Moreover, to quantify the effects of optimized residual chlorine concentration management and to consider customer service requirements, this study developed indices to quantify the spatial and temporal distributions of residual chlorine concentration. Based on the results, the most economical operational method to manage booster chlorination was derived, which would supply water that satisfies the service level required by consumers, as well as the cost-effectiveness and operation requirements relevant to the service providers. A simulation model was then created based on an actual

Received 3 August 2020, revised 25 August 2020, accepted 1 September 2020.

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

- 김기범 (연구교수) / Kibum Kim (Research Professor)
서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea
- 서지원 (전문위원) / Jeewon Seo (Research Fellow)
서울특별시 영등포구 대림로 244, 07379
244, Daerim-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07379, Republic of Korea
- 형진석 (박사과정) / Jinseok Hyung (Ph. D. Student)
서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea
- 김태현 (박사과정) / Taehyeon Kim (Ph.D. Student)
서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea
- 최태호 (선임연구원) / Taeho Choi (Senior Researcher)
대전광역시 유성구 유성대로 1689번길 125, 34045
125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34045, Republic of Korea
- 구자용 (정교수) / Jayong Koo (Professor)
서울특별시 동대문구 서울시립대로 163, 02504
163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<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.

water supply system (i.e., the Multi-regional Water Supply W in Korea). Simulated optimizations were successful, evidencing that it is possible to meet the residual chlorine concentration demanded by consumers at a low cost.

Key words: Booster chlorination, Multi-objective optimization, Residual chlorine concentration, Tap water, Water supply system

주제어: 재염소, 다목적 최적화, 잔류염소농도, 수돗물, 상수도공급 시스템

1. 서 론

2019년 붉은 수돗물 사고, 2020년 수돗물 유충 사고 등으로 인해 최근의 소비자들은 수도사업자로부터 제공받고 있는 서비스 중 수돗물의 수질에 대한 많은 관심을 보이고 있다. 또한, 수도사업자 또한 고품질의 수돗물을 생산하는 것과 더불어 상수도관망에서의 수질관리가 매우 중요하다는 인식이 보편화되고 있다.

상수도 공급과정에서 수돗물을 화학적, 미생물학적으로 안전하게 유지하기 위해서는 적절한 잔류염소농도를 유지해야한다. 그러나 상수도관로의 노후화로 대두되는 다양한 문제와 상수도관망 내 체류시간 증가로 인하여 잔류염소 농도가 규정치 이하로 검출되는 문제가 종종 발생하고 있다 (Kim et al., 2017). 관망 지역에서의 잔류염소 농도를 확보하기 위하여 과잉의 염소를 주입하게 된다면 소독부산물의 생성확률을 높이고, 맛·냄새 관련한 소비자의 민원 증가 및 음용률 저하와 같은 새로운 문제를 유발할 수 있다. 따라서 전문가들은 공급과정에서의 잔류염소농도를 적절하게 관리함과 동시에 소비자의 만족도를 제고할 수 있는 방법론의 개발이 시급함을 강조하고 있다.

최근 상수도 공급과정에서 적절한 잔류염소농도를 유지하기 위해 상대적으로 잔류염소농도 조정이 용이한 정수장에서 잔류염소의 농도를 소독능 CT값 만족을 위한 최소농도로 유지하도록 하고, 관망에서 부족한 잔류염소농도는 재염소(Booster chlorination)를 통하여 추가할 수 있도록 하는 방안이 다수 검토되고 있다. 그리고 이와 관련된 연구들은 어디에 재염소시설을 설치하는 것이 가장 적절한지, 재염소시설에서의 재염소투입량은 얼마가 최적인지를 찾기 위한 문제를 풀기 위한 것으로 요약할 수 있다. 재염소시설의 설치개소수, 설치지점, 설치지점에서의 잔류염소농도 투입량 등을 최적화한 선행연구들은 결정론적 방법의 선형계획법 또는 확률론적 방법의 유전알고리즘을 포함하고 있으며, 다음 Table 1과 같다.

대부분의 선행 연구들은 염소주입량 또는 염소소독비용이 최소가 되는 목적함수를 찾기 위한 알고리즘을 개발하여 적용한 것으로 요약할 수 있다. 상세하게 선행 연구들의 결과들을 분석하면, 단순히 염소소독비용이 최소가 되는 목적함수를 찾게 되면 정수장에서 잔류염소농도를 높게 조정하면 재염소시설의 설치를 최소화하는 것이 최적이라는 결론들이 도출된다. 이는 정수장에서의 염소소독비용이 재염소시설에서의 염소소독에 비해 저렴하기 때문이다. 그러나 이와 같은 접근법은 정수장에서 가장 먼 지역에서도 잔류염소농도 기준을 만족하는 수돗물을 공급받을 수 있다는 장점과 동시에 물리적으로 가까운 지역은 잔류염소농도가 높은 수돗물을 공급받게 된다는 단점이 존재한다. 염소주입량 또는 염소소독비용이 최소가 되는 하나의 목적함수를 사용할 때 발생하는 단점을 극복하기 위해서는 모든 지역에서 적절한 잔류염소농도를 갖는 수도를 공급받을 수 있도록 조치하기 위한 또 다른 목적함수를 필요로 하며, 이는 물을 사용하는 소비자의 만족도를 통해서 고려할 수 있을 것이라 판단된다.

한편, 잔류염소농도를 최적으로 관리하기 위한 모델이 개발된 사례는 다양하게 존재한다. 그러나 개발된 모델이 실제 관망에 적용되어 어떠한 정량적 효과를 얻을 수 있는지를 분석한 연구사례는 많지 않아 개발된 모델이 실제 현장에 적용된 사례 역시 미미한 실정이다. 잔류염소농도의 최적화가 어떤 효과가 있는지를 정량적으로 분석할 수 있다면, 개발된 모델의 적용빈도 역시 증가할 수 있을 것이라 판단된다.

선행 연구의 한계점들을 고려하여 본 연구에서는 2가지 연구목적 설정하였다. 첫 번째로, 상수도 공급과정에서 잔류염소농도를 최적으로 관리함과 동시에 소비자의 수돗물 만족도를 최대화하기 위한 방안을 마련하고자 하였다. 이를 위해 공급과정 중 잔류염소농도의 유지관리를 위한 정수지 염소 주입량, 재염소가 필요한 경우 최적의 재염소 설치지점과 재염소 투입량을 도출할 수 있는 모델을 개발하였다. 모델의 개



Table 1. Previous studies addressing the optimization of booster chlorination

| Optimization method | | Previous study | Objective |
|------------------------|---|--|---|
| Deterministic approach | Linear programming | Bocelli et al. (2003); Ayvaz et al. (2014) | Minimize chlorine dosage |
| | Mixed integer linear programming | Tryby et al. (2002) | Minimize chlorine dosage |
| Probabilistic approach | Genetic algorithm | Munavalli and Kumar (2003); Lansey et al. (2007); Kim et al. (2017); Seo et al. (2019) | Minimize booster chlorination operation cost and design cost |
| | | Ohar and Ostfeld (2014) | Minimize number of booster stations and chlorine dosage |
| | Multi objective genetic algorithm | Prasad et al. (2004) | Minimize number of booster stations and disinfectant dose and maximize level of constraints satisfied |
| Others | Harmony search algorithm | Yoo et al. (2018) | Minimize the disinfectant mass |
| | Multi-objective ant-colony optimization algorithm | Shokoohi et al. (2017) | Minimize the cost and maximize the reliability |

발에는 두 가지 이상의 목적함수에 대한 최적점을 찾을 수 있는 다목적 유전알고리즘을 적용하였으며, 적절한 잔류염소농도 범위를 갖는 수돗물을 공급하는 것을 기본으로, 비용적인 측면에서 가장 최적인, 소비자의 만족도 제고 측면에서 가장 최적인 해를 도출할 수 있는 모델을 개발하였다.

두 번째로, 개발한 모델을 실제 상수도관망에 적용한 뒤 적용하기 전과의 비교를 통해 어떤 효과를 얻을 수 있는지를 정량화하고자 하였다. 이를 위해 몇 가지 성과지표를 제안하고 실제 연구대상지역에 최적화 모델을 적용하기 전·후의 효과분석을 실시하였다. 최종적으로 본 연구에서는 분석된 효과가 도출되기 위한 가장 경제적인 운영방안을 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 WJ시의 W광역상수도로 선정하였다. WJ시는 최근 대규모 택지개발사업으로 인해 W광역상수도로부터 공급받는 수량이 증가되어야 할 지역으로써, 대규모 택지개발사업이 이루어지고 있는 BK배수구역은 W광역상수도의 관말에 해당하는 지역이고, 잔류염소농도가 부족으로 인한 문제가 빈

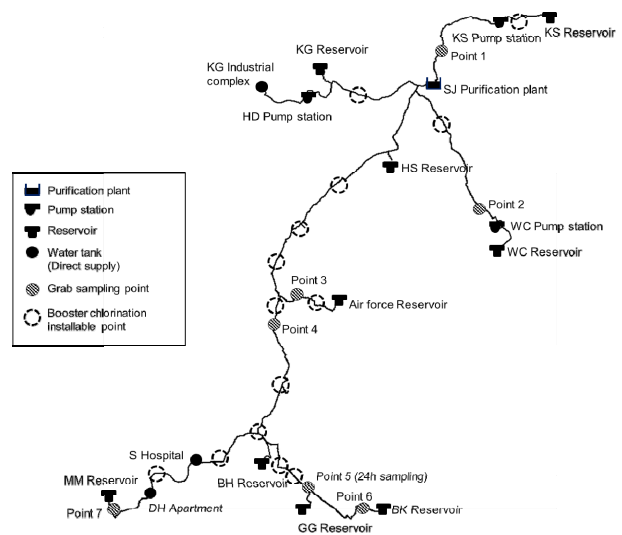


Fig. 1. The W multi-regional water supply system.

번하게 발생하고 있기에 이를 해결하기 위한 방안 모색이 시급한 지역이다. 특히, 여름철 BK배수구역의 잔류염소농도를 기준치 이상으로 조정하기 위해 정수장 유출수의 잔류염소농도를 높이는 경우 정수장 인근 HS배수구역, KG배수구역 등은 0.8 mg/L 이상의 잔류염소농도를 갖는 수도를 공급받게 되어 염소 이취미로 인한 민원제기가 빈번하게 나타나고 있다. 본 연구의 연구대상지역은 Fig. 1과 같으며, 76.03 km의 관로를 통해 하루 평균 72,600 m³을 공급하고 있다.

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

2.2 잔류염소농도 감소계수 실험 및 적용 방법

본 연구에서는 잔류염소 최적화 모델 개발에 앞서, 모델의 기초 인자가 되는 잔류염소 감소 계수를 실험을 통해 도출하였다. 잔류염소 감소 계수는 수체 감소 계수(k_{bulk})(d^{-1})와 관벽 감소계수(k_{wall})($m^{-1}d^{-1}$)로 구분할 수 있다. 수체 감소계수(k_{bulk})는 Powell et al (2000)이 제안한 실험실 시험 방법을 통해 도출하였다. 2015년 7월 14일부터 18일까지 W광역상수도 SJ정수장의 정수지 유출수를 대상으로 시험을 실시하여 도출한 수체 감소계수(k_{bulk})는 다음 Eq. 1과 같다.

$$\ln k_{bulk} = -5.8184 \times (1000/T) + 18.548 \quad (R^2 = 0.9569) \quad (Eq. 1)$$

T : Absolute temperature (K) = 273+ $^{\circ}C$

관벽 감소계수(k_{wall})는 7개소의 현장에서의 grab sampling 실험 결과와 시행착오법에 의해 추정하는 systematic analysis method를 통해 도출하였다. 현장 실험은 2015년 10월 7일부터 9일까지 실시하였으며, sampling을 실시한 장소는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 한편, 실제 관망에서의 잔류염소농도는 수용가의 물 사용량의 변동에 따라 변화하게 된다. 따라서 본 연구에서는 관망 내의 잔류염소농도 변화 폭을 파악하고 이를 보정에 활용하기 위하여 24시간 연속 잔류염소 측정기기를 관말지역(Fig. 1의 Point 5)에 설치하였다.

현장 실험일의 정수장 유출수 수온은 18.5 $^{\circ}C$ 로, Equation 1에 의해 해당 수온에서의 수체 감소계수(k_{bulk})는 -0.2437 d^{-1} 로 나타난다. 현장 실험일의 정수장 유출수량(69,847 m^3/d), 정수장 유출수의 잔류염소농도(0.81 mg/L), 각 배수지의 유입수량을 반영하여 관벽 감소계수(k_{wall})를 추정하였으며, 최종적으로 W광역상수도의 관벽 감소계수(k_{wall})는 -0.0511 $m^{-1}d^{-1}$ 로 계산되었다.

실험실 시험과 현장 실험을 통해 도출한 수체 감소계수(k_{bulk})와 관벽 감소계수(k_{wall})를 이용하여 잔류염소농도를 모델링한 결과와 실제 현장에서 잔류염소농도를 측정된 결과 사이의 상관계수는 0.912로 나타났으며, RMSE(Root mean square error)는 0.037로 나타나 실제 잔류염소농도 감소추이를 상당히 잘 모사하는 잔류염소농도 감소계수를 도출한 것으로 판단하였다. 실험실 실험 및 현장 실험을 통해 도출한 잔류염소농도 감소계수들은 잔류염소 최적화 모델의 기초인자로

활용하였다.

2.3 다목적 유전알고리즘을 활용한 재염소시설 최적화 모델 개발 방법

최적의 정수지 염소 주입량, 재염소 설치지점 및 재염소 주입량을 찾는 잔류염소 최적화 모델의 개발에는 다목적 유전알고리즘을 이용하였다. 다목적 유전알고리즘은 Deb et al (2002)에 의해 개발된 비지배분류 유전알고리즘 (Non-dominant sorting genetic algorithm II, NSGA II)를 이용하였으며, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 대다수의 선행연구에서 활용된 EPANet toolkit의 수질모델링 모듈을 최적화 알고리즘과 연계하여 활용하였다.

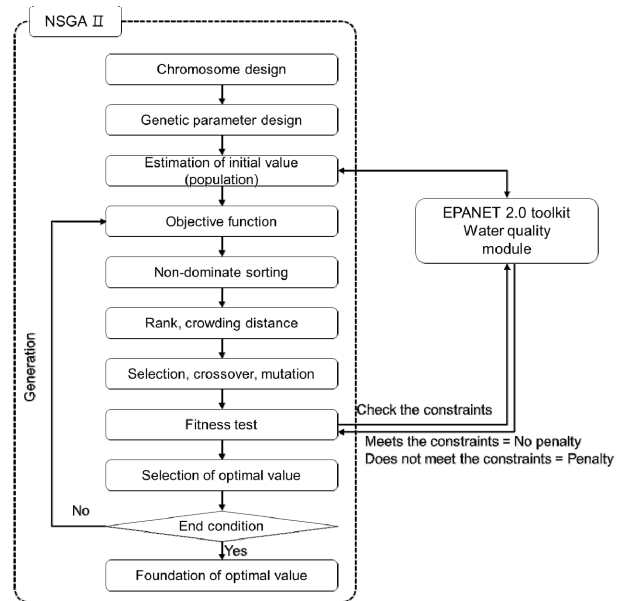


Fig. 2. Optimization flow of the developed model.

최적화 알고리즘에서는 먼저 염색체(Chromosome)를 구성한 뒤, 유전 파라미터(Genetic parameter)인 인구수(Population), 세대수(Generation), 교차율(Crossover rate), 돌연변이율(Mutation rate)을 설정하였다. 다음으로 설정된 인구수를 대상으로 초기해집단을 도출한 뒤, 도출된 해를 기준으로 비지배분류(Non-dominant sorting)와 혼잡도 거리분류(Crowding distance sorting)를 통해 자식해를 생성하도록 하였다. 자식해를 생성할 때에는 일반적인 유전알고리즘에서 사용하는 선택(Selection), 교차(Crossover), 돌연변이 생성(Mutation)을



동일하게 이용하였으며 적합도 검정(Fitness test)을 통해 최적해를 선정하는 과정으로 구성하였다. 적합도 검정을 할 때에는 EPAnet toolkit의 수질모델링과 연계하여 제약조건을 만족시키는지 여부를 검정하고, 만약 제약조건을 만족시키지 못한다면 페널티를 부과하여 자식해 생성과정에서 도태되도록 하였다.

잔류염소 최적화 모델의 첫 번째 목적함수는 Kim et al (2017), Seo et al (2019)의 연구에서 기 활용된 바 있는 정수장 염소투입 비용, 재염소지점 염소투입 비용 등과 같은 운영 비용의 최소화로 설정하였으며, 다음 Eq. 2, Eq. 3, Eq. 4와 같다.

$$\min E = \min \left[E^{WPP} + \sum_{i=1}^n (E_i^{CBS} + E_i^{COE}) \right] \quad (\text{Eq. 2})$$

$$E^{WPP} = C^{WPP} \times Q^{WPP} \times \rho^{WPP} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$E_i^{CBS} = (C_{i,a}^{CBS} - C_{i,b}^{CBS}) \times Q_i^{CBS} \times \rho_i^{CBS} \quad (\text{Eq. 4})$$

E : Total cost (Installation and operation cost) (KRW/d),

E^{WPP} : Purification plant chlorination costs (KRW/d),

E_i^{CBS} : Chlorination cost in booster chlorination point i (KRW/d),

E_i^{COE} : Installation cost in booster chlorination point i (KRW),

Q^{WPP} : Water quantity in the purification plant (m^3/d),

Q_i^{CBS} : Water quantity in booster chlorination point i (m^3/d),

C^{WPP} : Chlorine concentration in purification plant (mg/L),

$C_{i,a}^{CBS}$: Chlorine concentration in booster chlorination point i after boosting (mg/L)

$C_{i,b}^{CBS}$: Chlorine concentration in booster chlorination point i before boosting (mg/L)

ρ^{WPP} : Unit price of chlorination in purification plant (KRW/kg)

ρ_i^{CBS} : Unit price of booster chlorination at point i (KRW/kg)

재염소시설 설치비용은 재염소시설의 규모에 따라

다음 Table 2의 값을 적용하였다. 재염소시설 설치비용은 재염소시설의 내용연수를 20년으로 가정하고, 필요한 비용을 하루 단위로 나누어 지불한다는 전제하에 적용하였다. 이는 재염소시설의 초기투자비용이 운영비용에 비하여 매우 커 해를 도출하는 과정에서 재염소시설을 최대한 설치하지 않는 방향으로 목적해가 도출되기 때문이다. 한편, 재염소시설 운영비용은 Kim et al (2017)과 동일하게 염소투입방법 및 염소사용량에 따라 계산하도록 Table 3의 값을 적용하였다.

Table 2. Installation cost of booster chlorination facilities

| Size | Installation cost (KRW/d) |
|---------|---------------------------|
| 20 kg/d | 58,000 |
| 5 kg/d | 43,000 |
| 1 kg/d | 36,000 |

Table 3. Operation cost of booster chlorination facilities

| Classification | Chlorination cost (KRW/kg chlorine injection) |
|------------------------------|---|
| Purification plant | 550 (using liquefied chlorine) |
| Booster chlorination station | 15,426 (using NaOCl consider purity) |

두 번째 목적함수는 Eq. 5와 같이 소비자가 요구하는 잔류염소농도 범위를 만족하는 수량 비율의 최대화로 설정하였다. 여기서, W광역상수도는 배수지까지 물을 공급하는 것을 고려하여, 배수지(소비자)에서 요구하는 잔류염소농도 범위를 0.4 mg/L 이상 0.8 mg/L 이하로 설정하였다.

$$\text{Max } S = \text{Max } \frac{D_s}{D_t} \times 100(\%) \quad (\text{Eq. 5})$$

S : Satisfaction rate of required chlorine concentration (%)

D_s : Satisfaction demand of required chlorine concentration in the target area (m^3/d)

D_t : Total demand in the target area (m^3/d)

제약조건으로는 각 배수지에서 반드시 만족시켜야 하는 잔류염소농도 기준을 설정하였다. 반드시 만족시켜야 하는 기준을 만족하지 못하는 경우 페널티를 부여하여 다음세대에 해당하는 유전자가 자연적으로

도태되도록 하였다. 배수지에서의 기준은 Eq. 6과 같이 소비자가 요구하는 잔류염소농도 범위보다 큰 범위로써, 최소잔류염소농도를 0.35 mg/L, 최대잔류염소농도를 0.85 mg/L로 설정하였다.

두 번째 제약조건으로는 정수장 유출수의 잔류염소농도를 1.0 mg/L 이하로 설정하였으며, Eq. 7과 같이 표현할 수 있다.

$$0.35 \leq C_{i=r_k}^{CBS} \leq 0.85 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$C^{WPP} \leq 1.0 \quad (\text{Eq. 7})$$

앞서 기술한 바와 같이, 비지배분류 유전알고리즘의 비지배분류(Non-dominated sorting)와 혼잡도 거리분류(Crowding distance sorting)은 세대수를 거쳐 자식해를 생성하는 과정에서 작동하도록 하였다. 순위(Rank)로 분류된 해집단에 대해 가중치를 부여하는 방법을 적용하였으며, 순위는 인구수에 대해 5단계로 구분한 뒤 순위별 해집단에 대해서 50%, 40%, 30%, 20%, 10%의 가중치를 부여한 뒤 자식해를 생성할 때 가중치에 따라 자식해 숫자를 다르게 하였다.

유전파라미터는 민감도분석 과정을 거쳐 인구수 200, 세대수 4,000, 교차율 0.85, 돌연변이율 0.15를 설정하였으며, 최적해 집단, 즉, 파레토 해집단(Pareto solutions)이 변경되지 않거나, 설정한 세대수가 종료되면 연산이 종료되도록 하였다.

2.4 개발모델 실증 및 효과 분석 방법

최적의 재염소 지점은 수온이 높고, 유량이 최소인 최악의 운영조건일 때 먼저 선정을 하도록 하였다. 따라서 잔류염소 최적화를 위한 모델에서는 미리 선정된 재염소지점에서 재염소 투입량을 설계변수로 한다. 여기서 재염소시설은 공기밸브, 제수밸브 등 밸브실에 설치하되, 밸브실 상부가 점유되어 있지 않은 곳에 만 설치가 가능한 것으로 가정하였다. 이에 따라 W광역상수도에 재염소시설 설치가 가능한 밸브실은 14곳으로 선정되었으며, 선정된 14곳은 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

최적의 재염소 시설 설치 위치가 정해진 다음에는 계절에 따라 대상지역에서의 재염소시설 운영방안을 도출하였다. 운영방안의 도출에도 개발한 잔류염소 최적화 모델을 이용하였으며, 이 때에는 재염소 설치

위치를 고정한 상태에서 최적의 해를 도출하였다.

공급과정에서의 잔류염소농도를 최적화한다면 잔류염소농도의 공간적 분포와 시간적 분포가 변화할 것이다. 본 연구에서는 잔류염소농도 최적화의 효과로써 최적화 전·후 다음과 같은 평가지표를 비교하였다.

먼저 잔류염소농도의 공간적 분포에 따른 효과 분석을 위한 지표는 Eq. 8, Eq. 9, Eq. 10에 나타난 수식을 이용하였다. Equation 8은 잔류염소농도의 공간적 편차를 나타낸다. Equation 9는 소비자가 요구하는 잔류염소농도 범위를 만족시키지 못하는 수량의 비율을 나타내며, Equation 10은 배수지에서 반드시 만족시켜야 하는 잔류염소농도 기준을 만족시키지 못하는 수량의 비율을 나타낸다.

$$SD = C^{WPP} - C^{EON} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$DS = 100 - S \quad (\text{Eq. 9})$$

$$DC = \left(1 - \frac{D_c}{D_t}\right) \times 100 (\%) \quad (\text{Eq. 10})$$

SD : Spatial differentiation of residual chlorine concentration (mg/L),

C^{WPP} : Chlorine concentration in purification plant (mg/L),

C^{EON} : Chlorine concentration at the end of the water supply system (mg/L),

DS : Dissatisfaction rate of required chlorine concentration (%),

S : Satisfaction rate of required chlorine concentration (%),

DC : Dissatisfaction rate of required chlorine concentration criteria (%),

D_c : Satisfaction demand of chlorine concentration criteria at supply area (m³/d),

D_t : Total demand in the target area (m³/d)

다음으로 잔류염소농도의 시간적 분포에 따른 효과 분석을 위한 지표는 계절별 잔류염소농도를 중심으로 계산하였다. Eq. 11, Eq. 12와 같이 정수장과 관말지역에서의 잔류염소농도의 계절적 편차로써 표현하였다.



$$TD_{pp} = C_{\max}^{WPP} - C_{\min}^{WPP} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$TD_{en} = C_{\max}^{EON} - C_{\min}^{EON} \quad (\text{Eq. 12})$$

C_{\max}^{WPP} : Seasonal maximum chlorine concentration in the purification plant (mg/L),

C_{\min}^{WPP} : Seasonal minimum chlorine concentration in the purification plant (mg/L),

C_{\max}^{EON} : Seasonal maximum chlorine concentration at the end of the water supply system (mg/L),

C_{\min}^{EON} : Seasonal minimum chlorine concentration at the end of the water supply system (mg/L)

3. 연구결과

3.1 연구대상지역 재염소시설 최적화 결과

정수장의 운영조건에 따라, 계절에 따른 수온의 변화에 따라 재염소시설의 위치는 지속적으로 변화한다. 그러나 재염소시설은 한번 설치하면 이동시킬 수 없는 장치이다. 따라서 본 연구에서는 재염소시설의 위치를 선행적으로 결정하기 위하여 정수장 운영상 최악의 조건일 때를 기준으로 재염소시설의 위치를 결정하였다.

최악의 운영조건은 정수장 수온이 최대이고, 정수장 유출수량이 최소인 때로 정의할 수 있다. 이는 정수장 수온이 최대일 때 잔류염소농도의 감소속도가 가장 빠르고, 정수장 유출수량이 최소일 때 관망 내 체류시간이 가장 크기 때문이다.

이와 같은 조건에 따라 W광역상수도의 최악의 운영조건을 설정한 결과, 2014년 1월부터 2015년 7월 기간 중 정수장 유출수의 수온 중 가장 높은 수온인 28 °C, 정수장 유출수량 중 최소수량인 59,577 m³/d를 최악의 조건으로 설정하였다. 최악의 조건에서 정수장에서 잔류염소농도를 0.8 mg/L로 유지하는 경우의 수질 기준 만족율(S)은 58.5%로 나타났다.

최악의 운영조건에서 잔류염소농도 최적화 모델을 이용하여 파레토 해집단(Pareto solutions)를 도출하고, 이를 선분으로 연결한 파레토 최적 프론트(Pareto optimal front)는 Fig. 3과 같다. 파레토 최적 프론트는 파레토 해집단이 존재하는 영역을 도시한 것으로, 파레토

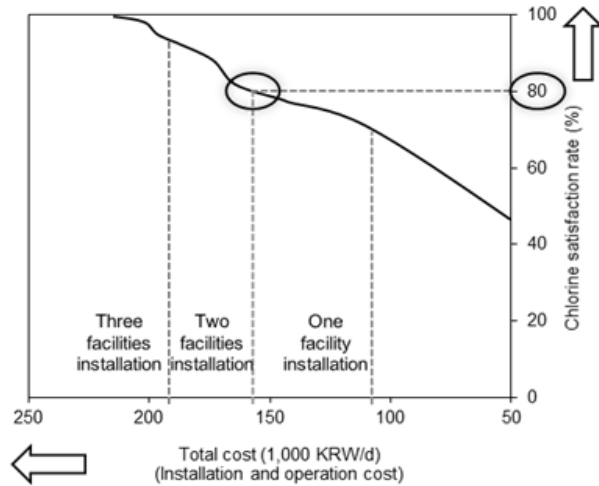


Fig. 3. Pareto solution set.

최적 프론트에 존재하는 모든 해는 각각의 조건에서 최적의 해를 의미한다. Fig. 3의 파레토 최적 프론트를 통해 알 수 있듯이, 재염소시설 운영비용이 증가할수록(x축의 왼쪽방향) 잔류염소 적정 범위를 만족시키는 비율은 증가하는 경향을 나타내었다. 반대로 재염소시설의 운영비용이 감소할수록(x축의 오른쪽방향) 잔류염소 적정 범위를 만족시키는 비율은 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 재염소시설의 설치 개수에 따라 최적해 영역이 구분되는 결과가 도출되었다. Fig. 3의 수직 점선으로 구분된 구간은 재염소시설 설치 개수를 나타내며, 이와 같이 재염소시설 설치 개수에 따라 최적해 영역이 구분된 결과는 재염소시설의 초기 설치비용이 운영비용에 비해 커서 총 비용을 지배하는 요인이 되기 때문인 것으로 파악된다.

기술한 바와 같이 Fig. 3에 나타난 파레토 최적 프론트는 각각의 해가 모두 최적의 해로써 선정될 수 있음을 의미한다. 따라서 주어진 조건에서 최적의 해로 도출된 해집합 중 연구자의 판단에 의해 최적의 해를 선정할 필요성이 있다. 본 연구에서는 연구대상지역에 최악의 운영조건이 발생하여도, 80% 이상의 수량에 대해 소비자가 요구하는 잔류염소농도 범위를 만족시킬 수 있는 해를 최적의 해로 선정하였다. 그 결과 연구대상지역에는 2개의 재염소시설을 설치하여야 한다는 결과가 도출되었다.

다음 Fig. 4는 최악의 운영조건일 때 재염소시설에서 투입하여야 하는 재염소농도와 정수장에서 주입하여야 하는 염소농도를 산정한 결과를 나타낸다. 그림

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383

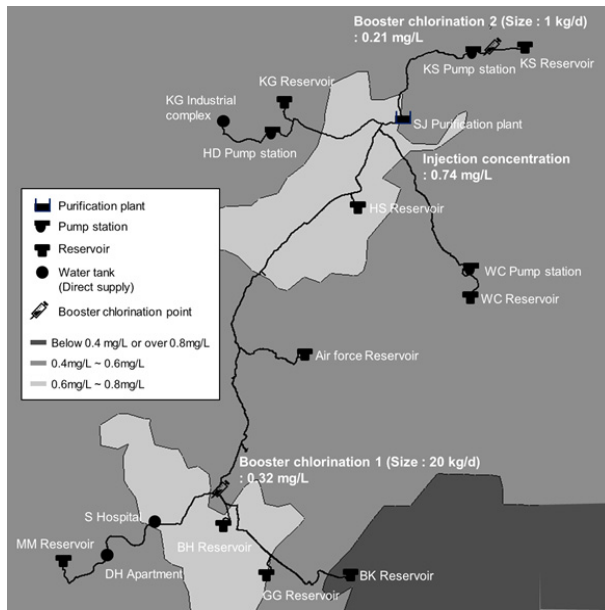


Fig. 4. Optimal booster chlorination points assuming the worst operation scenario.

에서 음영이 가장 짙게 표시된 지역은 소비자가 요구하는 잔류염소농도 범위를 만족시키지 못하는 구간을 나타낸다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 최악의 운영조건에서 BK 배수구역에서 사용하는 수량은 소비자가 요구하는 잔류염소농도 범위를 만족시키지 못하는 20%에 해당하는 것으로 나타났다. 다만, 제약조건으로써 설정한 최소 잔류염소농도(0.35 mg/L)는 만족시킬 수 있는 것으로 나타나, 잔류염소농도의 부족으로 인한 수질사고가 발생하지는 않을 것으로 판단되었다. 최적의 재염소 지점으로 선정된 2곳에 설치하여야 하는 재염소시설의 크기는 각각 20 kg/d 규모, 1 kg/d 규모인 것으로 나타났으며, 재염소농도는 0.32 mg/L, 0.21 mg/L로 나타났다. 한편, 정수장에서는 0.74 mg/L의 염소농도를 갖도록 염소를 주입하면 되는 것으로 나타나, HS배수

구역과 BK배수구역을 제외한 모든 배수구역에서 잔류염소농도가 0.4~0.6 mg/L로 비교적 균등하게 유지되는 것으로 나타났다.

3.2 연간 재염소시설 운영 최적화 결과

앞서 선정된 2곳의 재염소시설 설치 위치 및 재염소 투입농도는 연구대상지역에서 가장 최악의 상황을 모의하였을 때 선정된 결과이다. 일반적인 운영조건에서는 정수장 및 재염소시설에서 투입하여야 하는 염소농도가 변화할 것이고 이에 따라 운영비용 역시 달라질 것이다.

Table 4는 연구대상지역의 계절별 평균 수온 및 평균 공급량을 기준으로, 본 연구에서 개발한 최적화 모델을 이용하여 정수장과 재염소시설에서 투입하여야 하는 잔류염소농도와 이에 따른 운영비용을 산정한 결과를 나타낸다. 일반적인 정수장 운영조건에서 Table 4에 나타난 것과 같이 잔류염소농도를 투입하여 운영한다면 1년간 총 운영비용은 44,729,000원으로 예상되었다. 또한, 여름철을 제외한 모든 계절에 대해서 소비자의 만족도는 100.0%를 달성할 수 있는 것으로 나타났다. 여름철의 경우 수질 기준은 100.0% 만족시킬 수 있으나 소비자의 만족도가 98.8%로 나타났다. 이는 BK배수구역으로 연결되는 관로의 관경이 택지개발사업을 염두하여 현재의 물 사용량에 비해 크게 설계되었으나 아직 사업이 준공되지 못하여 적절한 물 사용량을 확보하지 못하고 있고, 이에 따라 관망 내 체류시간이 늘어나기 때문이라 판단된다. 만약 택지개발사업이 준공되어 현재의 관경에 적합한 물 사용량이 확보된다면 관망 내 체류시간을 줄일 수 있게 되어 소비자 만족도 100.0%를 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

즉, 본 연구에서 개발한 잔류염소 최적화 모델을 이

Table 4. Total annual cost of booster chlorination in the target area

| Season | Average temperature (°C) | Quantity (m ³ /d) | Injection concentration at purification plant (mg/L) | Boosting concentration at booster station 1 (mg/L) | Boosting concentration at booster station 2 (mg/L) | Total cost (KRW/d) | Satisfaction rate (S) (%) |
|--------------|--------------------------|------------------------------|--|--|--|--------------------|---------------------------|
| Spring/Fall | 15 | 70,714 | 0.67 | 0.22 | 0.15 | 124,000 | 100.0 |
| Summer | 21 | 73,300 | 0.68 | 0.28 | 0.16 | 131,000 | 98.8 |
| Winter | 5 | 70,731 | 0.63 | 0.19 | 0.15 | 118,000 | 100.0 |
| Annual total | - | | | | | 44,729,000 | |



용하여 도출된 결과를 대상지역에 적용할 시 수질적으로도 안정적인 수돗물 공급이 가능할 것은 물론이고, 소비자가 요구하는 서비스 수준을 충족시킬 수 있음과 동시에 수도사업자 입장에서도 최소의 비용으로 재염소시설을 운영할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 재염소시설 운영 최적화의 효과 분석 결과

본 연구에서 제안하는 효과분석 지표를 활용하여 잔류염소농도를 최적화하기 전·후의 비교를 통해 최적화의 도출한 효과는 다음과 같다.

먼저, Fig. 5는 최악의 조건에서 현재 운영하는 방식으로 잔류염소농도를 관리할 때와 본 연구에서 개발한 최적화 모델을 이용하여 최적으로 잔류염소농도를 관리할 때 잔류염소농도의 공간적 분포를 나타낸다. Fig. 5의 가로축은 정수장부터 관말까지 이어지는 관망의 주요지점을 나타내며, 오른쪽 방향으로 갈수록 관말인 BK배수구역에 가까워짐을 의미한다. 현재 운영하는 방식으로 잔류염소농도를 관리한다면, 관말 BK배수구역에서는 수질기준을 만족하기 어려웠으며, 정수장과 관말 사이의 잔류염소농도 편차(SD)는 0.53 mg/L로 높게 나타난다. 그러나 최적화된 결과를 적용

한다면, 정수장과 관말 사이의 잔류염소농도 편차(SD)는 0.36 mg/L로 현재의 운영방식에 비해 0.17 mg/L 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

한편, Table 5에 나타낸 바와 같이 소비자가 요구하는 잔류염소농도 범위를 만족시키지 못하는 수량의 비율(DS)도 17.4%에서 1.2%로 크게 감소되었으며, 최적화를 실시하면 반드시 만족시켜야 하는 잔류염소농도 기준을 만족시키지 못하는 수량의 비율(DC)은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이에 따라 공급과정 전반에 걸쳐 잔류염소농도를 고르게 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

다음으로 Table 6은 최적화를 실시하기 전·후 잔류염소농도의 시간적 분포에 따른 효과를 분석한 결과이다. 최적화 전·후 정수장 잔류염소농도의 계절적 편차(TD_{pp})는 최적화 전·후 0.11 mg/L로 동일하게 나타났다. 그러나 관말에서의 계절적 편차(TD_{em})는 최적화 전 0.08 mg/L에서 최적화 후 0.02 mg/L로 감소하였다.

본 연구에서 개발한 다목적 잔류염소농도 최적화 모델을 대상지역에 실증 적용한 결과, 대상지역 잔류염소농도의 공간적 편차와 관말에서의 계절적 편차가

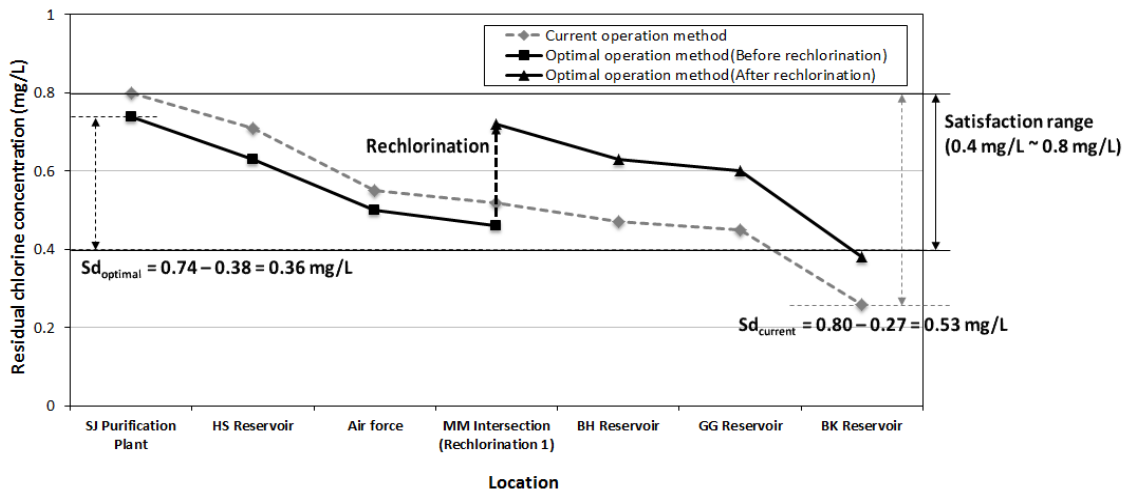


Fig. 5. Spatial distribution of residual chlorine concentration assuming the worst operation scenario.

Table 5. Spatial distribution in residual chlorine concentration

| Operation method | Spatial differentiation of residual chlorine concentration (SD) (mg/L) | Dissatisfaction rate of required chlorine concentration (DS) (%) | Dissatisfaction rate of chlorine concentration criteria (DC) (%) |
|------------------|--|--|--|
| Current | 0.53 | 17.4 | 7.5 |
| Optimal | 0.36 | 1.2 | 0.0 |

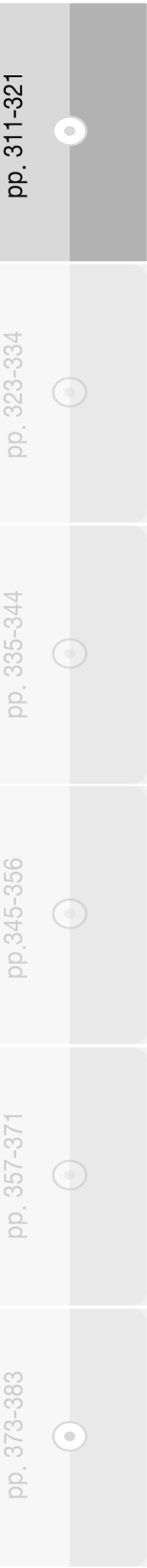


Table 6. Temporal distribution of residual chlorine concentration

| Season | Chlorine concentration at purification plant (C^{WPP}) (mg/L) | | Chlorine concentration at end of network (C^{EON}) (mg/L) | | Seasonal differentiation at purification plant (TD_{PP}) (mg/L) | | Seasonal differentiation at end of network (TD_{en}) (mg/L) | |
|-------------|---|---------|---|---------|---|---------|---|---------|
| | Current | Optimal | Current | Optimal | Current | Optimal | Current | Optimal |
| Spring/Fall | 0.76 | 0.67 | 0.35 | 0.40 | 0.11 | 0.11 | 0.08 | 0.02 |
| Summer | 0.80 | 0.74 | 0.27 | 0.38 | | | | |
| Winter | 0.69 | 0.63 | 0.36 | 0.40 | | | | |

확연히 감소한 것으로 나타났다. 이는 대상지역 소비자가 거주 위치 및 관망 운영조건에 관계없이 1년 내 내 비슷한 수준의 수돗물을 공급받게 됨을 의미하며, 소비자의 수돗물에 대한 만족도 및 신뢰도를 최대화할 수 있는 방안이 마련됨을 의미한다. 또한 이를 위해 소요되는 추가로 투입되어야 하는 비용 역시 가장 최소로 할 수 있기 때문에 수도사업자 입장에서도 합리적인 상수도관망 수질관리 방안을 마련할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 선행연구의 한계점으로 지적된 잔류염소농도의 시·공간적 편차를 최소화하면서 소비자의 만족도를 최대화할 수 있음과 동시에 비용적인 측면에서 최적의 잔류염소농도 관리방안을 마련할 수 있는 다목적 유전알고리즘 기반의 잔류염소농도 최적화 모델을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 모델을 연구대상지역의 실제 관망에 실증적용함으로써, 정수지 염소 주입량, 재염소가 필요한 경우 최적의 재염소 설치지점과 재염소 투입량을 도출할 수 있었다. 연구대상지역의 경우 2곳에 재염소시설을 설치하는 것이 가장 최적인 것으로 판단하였으며, 최적의 방안을 적용하였을 때 연간 44,729,000원의 최소비용으로 소비자의 잔류염소농도 만족율을 100.0% 수준으로 충족시킬 수 있는 것으로 나타났다.

한편, 본 연구에서 제안한 잔류염소농도 최적화의 효과분석지표들을 연구대상지역에 적용한 결과, 최적화를 통해 공간적인 관점에서 정수장과 관말 사이의 잔류염소농도 편차(SD)는 0.53 mg/L에서 0.36 mg/L로 0.17 mg/L 더 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 또한 최적화를 통해 시간적인 관점에서 관말에서의 계절적

잔류염소농도 편차(TD_{en})를 0.08 mg/L에서 0.02 mg/L로 낮출 수 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 잔류염소농도 최적화의 효과분석 지표들이 실제 현장에서 충분히 활용할 수 있는 지표임과 동시에 본 연구에서 개발한 최적화 모델이 실질적인 효과를 이끌어 낼 수 있음을 검증하였다.

본 연구의 결과는 일련의 수질 사고들로 인해 급증하고 있는 소비자의 서비스 요구수준에 적절하게 대응하고, 단기적으로 상수도시설의 운영관리 계획 수립에 활용가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업 (2016002120006)”으로 지원받은 과제입니다.

References

- Ayvaz, M.T. and Kentel, E. (2014). Identification of the best booster station network for a water distribution system, *J. Water Res. Plan. Manag.*, 141(5), 04014076.
- Boccelli, D., Tryby, M., Uber, J. and Summers, S. (2003). A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions, *Water Res.*, 37(11), 2654-2666.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T.A.M.T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- Kim, K., Hyung, J., Seo, J., Shin, H. and Koo, J. (2017). Development of an optimal operation model of residual chlorine concentration in water supply system, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 31(6), 491-501.
- Lansley, K., Pasha, F., Pool, S., Elshorbagy, W., and Uber, J. (2007). Locating satellite booster disinfectant stations,



- J. Water Res. Plan. Manag., 133(4), 372-376.
- Munavalli, G.R., and Mohan Kumar, M.S. (2003). Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems, J. Water Res. Plan. Manag., 129(6), 493-504.
- Ohar, Z. and Ostfeld, A. (2014). Optimal design and operation of booster chlorination layout in water distribution systems, Water Res., 58, 209-220.
- Powell, J., West, J., Hallam, N., Forster, C., and Simms, J. (2000). Performance of Various Kinetic Models for Chlorine Decay, J. Water Res. Plan. Manag., 126(1), 13-20.
- Prasad, T., Walters, G. and Savic, D. (2004). Booster disinfection of water supply networks : Multiobjective approach, J. Water Res. Plan. Manag., 130(1), 53-62.
- Seo, J., Kim, K., Hyung, J., Kim, T. and Koo, J. (2019). Optimization model for location and operation schedule of chlorine booster stations in water distribution networks, Desalin. Water Treat., 140, 91-102.
- Shokoohi, M., Tabesh, M., Nazif, S. and Dini, M. (2017). Water quality based multi-objective optimal design of water distribution systems, Water Resour. Manag., 31, 93-108.
- Tryby, M.E., Bocelli, D.L., Uber, J.G., and Rossman, L.A. (2002). Facility location model for booster disinfection of water supply networks, J. Water Res. Plan. Manag., 128(5), 322-333.
- Yoo, D., Lee, S., Lee H, Choi, Y. and Kim, J. (2018). Optimizing re-chlorination injection points for water supply networks using harmony search algorithm, Water, 10, 547.

pp. 311-321

pp. 323-334

pp. 335-344

pp. 345-356

pp. 357-371

pp. 373-383