



Reaction coefficient assessment and rechlorination optimization for chlorine residual equalization in water distribution networks

Jeong, Gimoon^a · Kang, Doosun^{b*} · Hwang, Taemun^c

^aSenior Researcher, Water & Wastewater Research Center, K-water Research Institute, Daejeon, Korea

^bProfessor, Department of Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea

^cSenior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, South Korea

Paper number: 22-062

Received: 31 August 2022; Revised: 26 September 2022; Accepted: 27 September 2022

Abstract

Recently, users' complaints on drinking water quality are increasing according to emerging interest in the drinking water service issues such as pipe aging and various water quality accidents. In the case of drinking water quality complaints, not only the water pollution but also the inconvenience on the chlorine residual for disinfection are included, thus various efforts, such as rechlorination treatment, are being attempted in order to keep the chlorine concentration supplied evenly. In this research, for a more accurate water quality simulation of water distribution network, the water quality reaction coefficients were estimated, and an optimization method of chlorination/rechlorination scheduling was proposed considering satisfaction of water quality standards and chlorine residual equalization. The proposed method was applied to a large-scale real water network, and various chlorination schemes were comparatively analyzed through the grid search algorithm and optimized based on the suitability and uniformity of supplied chlorine residual concentration.

Keywords: Chlorine residual equalization, Reaction coefficient, Rechlorination, Water distribution network

상수도 잔류염소농도 균등화를 위한 반응계수 추정 및 염소 재투입 최적화

정기문^a · 강두선^{b*} · 황태문^c

^aK-water 연구원 상수도연구소 선임연구원, ^b경희대학교 사회기반시스템공학과 교수, ^c한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

요 지

최근 국내에서는 관로 노후화 및 다양한 수질사고 발생으로 인해 상수도 분야에 대한 관심이 급증함에 따라, 상수도 서비스에 대한 이용자들의 수질민원 또한 증가하고 있다. 수질민원의 경우 실제 수질오염뿐만 아니라 소독을 위한 잔류염소농도에 대한 불편을 포함하고 있으며, 따라서 사용자에게 공급되는 잔류염소농도를 균등하게 유지하기 위해 재염소 처리와 같은 다양한 노력이 시도되고 있다. 본 연구에서는 상수관망 내 잔류염소농도 모의를 위해 적용 대상지역의 수질반응계수를 추정하였으며, 수질기준을 만족시키는 동시에 잔류염소농도 균등화를 고려하기 위한 염소 투입 및 재투입 최적화 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 국내 대규모 지방상수도를 대상으로 적용하였으며, 격자탐색법을 통해 다양한 염소 투입/재투입 계획을 비교 분석하고, 공급 잔류염소농도의 적합성 및 균등성을 중심으로 최적화된 결과를 제시하였다.

핵심용어: 상수관망시스템, 수질반응계수, 염소 재투입, 잔류염소농도 균등화

*Corresponding Author. Tel: +82-31-201-2513
E-mail: doosunkang@khu.ac.kr (Kang, Doosun)

1. 서론

최근 국내에서는 관로 노후화로 인한 관로의 파열, 누수 사고부터 수도물 수질 사고 등 다양한 상수도 사고가 빈번하게 발생함에 따라 상수도 서비스에 대한 국민들의 관심도가 급격히 증가하였으며, 특히 2019년 이후 적수 및 유출 사고 등 먹는 물 수질에 대한 불안감이 크게 높아지면서 환경부와 지자체에서는 수질사고 유형에 따른 수도물 수질민원 대응 매뉴얼을 마련하는 등 수질사고에 대응하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 2016~2019년 상수도 통계(ME, 2016; 2017; 2018; 2019)에 따르면 전국 162개 지자체의 평균 수질민원 발생 건수는 지속적으로 증가하는 추세이며, 2021년 환경부와 한국상수도협회가 공동 조사한 「2021 수도물 먹는 실태조사 결과보고서」에서는 안전한 수질을 유지하기 위해 투입된 염소 냄새에 대한 민원 또한 상당수를 차지하고 있는 것으로 조사되어, 전반적인 상수도 서비스 만족도를 개선하기 위한 어려움이 가중되고 있다.

이처럼 정수장 단위에서 정수처리 공정을 제어하는 것을 넘어, 수용가의 공급 잔류염소농도를 효과적으로 고려하기 위해서는 상수관망시스템 전반에 대하여 정밀한 모니터링이 요구되나, 이를 대체하기 위해 상수관망 해석모형을 활용한 연구 방법이 제시되었다. 특히 1993년 최초 배포되어 현재까지 계속해서 기능을 보완해오고 있는 EPANET (Rossman *et al.*, 2020)은 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 상수관망 해석모형으로써, 상수관망 수질관리 분야에서도 EPANET을 활용하여 다양한 관련 연구가 수행된 바 있다.

대표적으로, Chung *et al.* (2004)의 연구에서는 배수시스템 내 잔류염소농도의 예측을 위해 다양한 온도 조건에서 관 및 배수지 모형 장치 실험을 통해 수질 반응계수를 추정하였으며, K-water (2017)와 Kim and Han (2014)는 각각 다양한 국내 지방상수도를 대상으로 계측 자료 및 EPANET을 이용하여 수질 반응계수를 추정하고 수질 취약구간을 파악하는 등 해석모형을 활용하여 실제 용수공급 상황을 정확하게 모의하기 위한 수질해석 매개변수를 추정하였다. 특히 수리해석 모형의 신뢰도가 점차 높아짐에 따라, 공급지역 내 잔류염소농도의 피드백을 통한 정수처리 제어(Kang and Lansley, 2010), EPANET 모형과 최적화 기법을 연계한 재염소투입 설비의 위치 및 재투입량 결정 등 최적 잔류염소농도 관리(Prasad *et al.*, 2004; Lee, 2019) 등의 연구와 같이 공급수질 운영·관리 분야로 점차 발전하였다. 이때 재염소투입 최적화 연구의 경우 과거에는 Prasad *et al.* (2004)의 연구와 같이 잔류염소농도 기준 충족률을 최대화시키는 동시에 경제성을 고려하는 형태

로 이루어졌으며, 최근에는 직접적인 시행착오법을 통해 재염소투입 농도를 최적화하거나(Han, 2014), 최적화 기법을 통해 재염소투입 설비의 위치 및 투입량을 최적화한 Lee (2019)의 연구와 같이 잔류염소농도를 균등화하는 방안으로 점차 발전하고 있으나, 대규모 공급지역에서 시공간적 잔류염소농도 균등화를 동시에 고려한 연구는 아직 활발하지 못한 실정이다. 특히 상수도 공급지역이 넓은 경우에는 상대적으로 긴 용수의 이송시간에 의해 지역에 따른 잔류염소농도 편차가 크게 나타나는 문제가 있으며, 비교적 긴 계산시간이 소요되는 수질모의의 단점에 의해 수질관리 최적화 연구의 발전을 저해하고 있어 이를 개선하기 위해 상수관망을 단순화시키는 네트워크 골격화 기법(Choi and Kang, 2015), 배급수지역을 분할하여 수리·수질해석을 수행하는 네트워크 계층화 기법(Jeong *et al.*, 2021) 등이 제시된 바 있다.

본 연구에서는 대규모 상수관망시스템을 대상으로, EPANET 모형을 활용하여 잔류염소농도 균등화를 고려한 최적 염소투입 계획을 수립하기 위한 방법을 제시하였다. 먼저 수질해석 모의를 위한 수질반응계수를 추정하였으며, 재염소 처리 지점의 선정 및 격자탐색법을 이용한 염소 투입/재투입 계획 최적화 방법, 그리고 공급 잔류염소농도의 균등성 및 적합성 평가 방법 등을 제시하고 국내 지방상수도를 대상으로 그 적용 결과를 분석하였다.

본 논문은 구체적으로 다음과 같이 구성되었다. 2.1절에서는 EPANET 모형의 수리·수질 해석 이론을 간략히 소개하였으며, 2.2절에서는 계측 실험 및 EPANET 모형을 활용한 상수관망 수질반응계수 추정 방법을 서술하였다. 3장에서는 잔류염소농도 균등화를 고려한 염소 투입/재투입 계획 최적화 방법(3.1절)과 공급 잔류염소농도의 적합성 및 균등성 평가 방법(3.2절)을 다루었다. 4장에서는 본 연구의 적용대상 네트워크에 대한 소개와 수질반응계수 추정 결과 및 염소 투입/재투입 최적화 결과를 분석하였으며, 마지막으로 5장을 통해 연구 결과를 요약하고 향후 관련 연구의 발전 방향을 소개하였다.

2. 상수관망시스템 수질해석 방법

2.1 EPANET 수질해석 알고리즘

상수관망을 통한 용수공급 과정은 크게 관로 내에서의 마찰에 의한 수두 손실(Head loss) 및 사용 구조에 따른 유량 변화 등 수리학적(Hydraulic) 과정과 용수의 이송시간에 따른 오염물질의 성장 또는 소독 물질의 감소 등 수질(Water quality) 측면에서의 과정으로 구분할 수 있다. 상수관망 해석은 용수

공급 조건에 따라 이러한 수리·수질 상태 변화를 연산하는 과정이며, 복잡한 상수관망시스템의 해석을 위해 다양한 전산 해석모형이 개발되었다. 특히 본 연구에서 활용된 EPANET 모형의 수리·수질 해석 과정을 간략히 소개하면 다음과 같다.

먼저 수리학적 상태 변화는 공급원, 펌프에 의한 수두의 확보 및 관로, 밸브에 의한 수두의 손실, 용수 이용에 따른 관내 유량, 유속 등의 상태 변화로 이해할 수 있으며, 이때 수리해석에서 가장 중요한 관로 손실 수두의 계산은 직경, 길이, 조도계수 등 입력된 관로의 정보와 각 수요절점의 수요 정보를 바탕으로 Hazen-Williams 공식을 포함하여 다양한 방법으로 계산할 수 있다.

다음으로 수질 상태 변화는 이송거리 및 시간, 유속 등에 따른 용수 내 반응물질의 상태 변화로 이해할 수 있으며, 수리해석을 통해 파악된 용수의 체류시간, 유속과 반응물질의 성분, 농도, 반응차수 및 계수 등 입력된 수질해석 조건을 바탕으로 Eq. (1)과 같은 형태로 반응물질의 농도를 계산한다. 이때 상수도 내 물질의 반응은 크게 유체 내 수체반응(Bulk fluid reactions)과 관벽과 유체 간 상호작용에 의한 관체반응(Wall reactions)으로 구분하여 각각 수체반응계수(Bulk reaction coefficient, k_{bulk})와 관체반응계수(Wall reaction coefficient, k_{wall})를 적용한다. 상수관망 내 잔류염소 수질해석에는 일반적으로 Eq. (2)와 같이 배급수관망의 반응 특성에 가장 잘 맞는 것으로 알려진 1차 반응함수식을 사용하고 있으며(Powell *et al.*, 2000), 따라서 k_{bulk} 와 k_{wall} 계수가 모두 T^{-1} 로 같은 차원을 가지므로, 잔류염소농도 해석에 적용되는 반응계수 k 는 Eq. (3)과 같이 두 반응계수(k_{bulk} , k_{wall})가 더해진 것으로 이해할 수 있다.

$$\theta(C) = \pm kC^n \quad (1)$$

$$C(t) = C_0 \times e^{kt} \quad (2)$$

$$k = k_{bulk} + k_{wall} \quad (3)$$

여기서, $\theta(C)$: 반응농도($M/L^3/T$), C : 차원의 물질 농도(M/L^3), k : 반응계수(T^{-1}), n : 반응차수, C_0 : 초기($t=0$) 농도, $C(t)$: 시간 t 에서의 농도.

이때, k_{wall} 은 관로의 직경, 관로 내 유속 등 개별 관로의 현황에 의해 다르게 산정되며, Rossman *et al.* (1994)의 연구에서는 편리한 k_{wall} 산정을 위해 Sherwood *et al.* (1975)의 연구에서 제시한 mass transfer coefficient (k_f), Sherwood number (Sh)

등을 바탕으로, 시스템 전체에 동일하게 적용할 수 있는 관체반응률(Wall reaction rate constant, k_w) 기반의 k_{wall} 산정식을 Eq. (4)와 같이 소개하였다. EPANET 모형에서는 이들 k_{wall} 또는 k_w 를 적용한 수질해석 기능을 모두 적용할 수 있다.

$$k_{wall} = \frac{2k_w k_f}{R(abs(k_w) + k_f)} \quad (4)$$

여기서, k_w : 관체반응률(L/T), k_f : mass transfer coefficient (L/T), R : 관로 반지름(L).

2.2 상수관망시스템의 수질해석 반응계수 추정

상수관망을 통해 공급되는 용수의 잔류염소농도는 공급과정에서 점차 감소하며, 이러한 감소반응은 앞서 소개한 바와 같이 수체반응 및 관체반응으로 구분할 수 있다. 이때 수체반응은 용수 자체의 반응으로 체류시간에 따라 잔류염소농도가 감소하는 과정이므로, 상수관망 내 공급용수를 실제로 채수(採水)한 후 시간에 따른 잔류염소농도 감소 양상을 분석함으로써 비교적 정확한 수체반응계수(k_{bulk})를 추정할 수 있다. 반면, 관체반응은 관벽과 용수의 반응에 의해 잔류염소농도가 감소하는 과정이므로, 관로 구간에 따라 상이하게 나타날 수 있어 정확하고 구체적인 관체반응계수(k_{wall}) 추정은 매우 어렵다. 따라서 관체반응계수(k_{wall}) 또는 관체반응률(k_w)의 추정은 관로의 재질과 매설년도 등 관로 유지관리 상태를 고려한 산정식을 통해 추정하는 방법(Al-Jasser, 2007; Hallam *et al.*, 2002; Lee, 2019) 또는 고정된 수체반응계수(k_{bulk})와 상수관망시스템 내 잔류염소농도 분포를 고려한 검보정 과정을 통해 추정하는 방법(K-water, 2017; Baek *et al.*, 2018) 등이 활용되고 있으며, 본 연구에서는 실제 계측된 잔류염소농도 분포를 고려한 검보정 과정을 통해 시스템의 전반적인 관체반응률(k_w)을 추정하였다.

먼저 수체반응계수를 추정하기 위해 시스템 내 일부 지점에서 공급용수를 직접 채수함으로써 시간에 따른 잔류염소농도 계측 결과를 분석하였다. 이때, 잔류염소농도의 계측은 Fig. 1과 같이 실험 시약과 용수 내 염소의 반응에 의해 나타나는 비색의 광학적 특성을 이용한 DPD (N, N-diethyl-p-phenylene diamine) 시약 비색법 잔류염소측정기를 통해 수행하였으며, 보다 정확한 반응계수 추정을 위해 각각 5, 15, 25°C 수온 조건에서 시간 경과에 따른 잔류염소농도 변화를 계측하고, 계측 결과를 Eq. (2)의 1차 반응함수식으로 회귀분석하여 수체반응계수를 추정하였다.

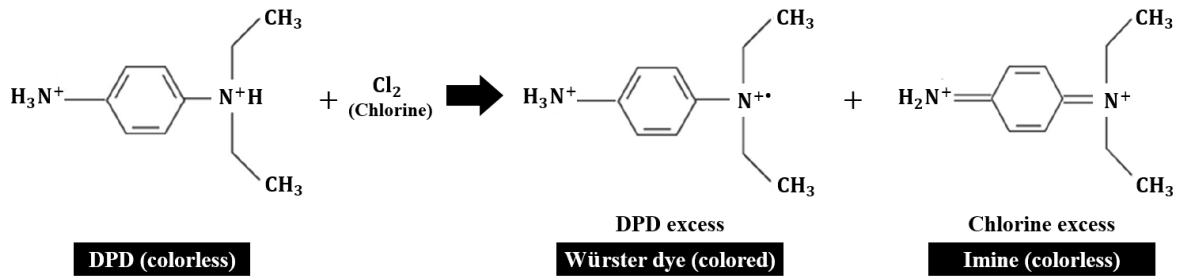


Fig. 1. DPD colorimetric method process

다음으로 관체반응률을 추정하기 위해 적용대상 지역의 수질해석을 위한 EPANET 관망해석 모델과 함께 적용대상 지역에서 주기적으로 계측 및 관리 중인 일부 수도꼭지 잔류염소농도 계측 이력을 확보하였으며, 앞서 추정된 수체반응계수를 바탕으로 EPANET 해석 결과가 실제 계측된 수도꼭지 잔류염소농도 이력과 유사하게 도출되도록 검보정하는 과정을 통해 관체반응률을 추정하였다. 구체적으로 각각 5, 15, 25°C 수온 조건에서 각각 추정된 수체반응계수 중 수도꼭지 잔류염소농도가 계측된 시기의 온도 조건에 해당하는 수체반응계수를 적용한 후, EPANET을 통해 관체반응률 값을 -0.1 m/d부터 -10⁻³ m/d까지 점진적으로 감소시켰을 때 잔류염소농도 모의결과와 실제 계측 이력의 상관관계를 Eq. (5)와 같이 평가하여 가장 적합한 관체반응률 값을 추정하였다.

$$r_C = \frac{\sum_{i=1}^S (C_{obs,i} - \overline{C_{obs}})(C_{sim,i} - \overline{C_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^S (C_{obs,i} - \overline{C_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^S (C_{sim,i} - \overline{C_{sim}})^2}} \quad (5)$$

여기서, r_C : 잔류염소농도 계측값과 모의값의 Pearson correlation coefficient, S : 잔류염소농도 계측 대상 절점의 수, $C_{obs,i}$: i 절점의 계측 잔류염소농도(mg/L), $\overline{C_{obs}}$: 대상 절점들의 평균 계측 잔류염소농도(mg/L), $C_{sim,i}$: i 절점의 모의 잔류염소농도(mg/L), $\overline{C_{sim}}$: 대상 절점들의 평균 모의 잔류염소농도(mg/L).

3. 잔류염소농도 균등화를 위한 염소 재투입 방법

3.1 상수관망시스템 내 염소 재투입 최적화

3.1.1 염소 재투입 지점 결정

상수도 공급과정에서 잔류염소농도는 이송시간에 따라 감소하므로 일반적으로 정수장에서부터 이송거리가 먼 수요절

점일수록 잔류염소농도가 더 낮아지는 형태의 분포를 보이며, 그 외에 관로에서의 유속 차이에 의해 일부 지역의 잔류염소농도 분포는 상이한 양상을 나타낼 수 있다. 국내에서는 「수도법 시행령」을 통해 0.1 mg/L의 잔류염소농도 하한기준을 적용하고 있으며, 따라서 넓은 지역에 용수를 공급하는 상수관망의 경우 이송거리가 먼 수요절점의 잔류염소농도 하한기준을 충족시키기 위해 정수장 투입농도가 높게 요구된다. 그러나, 이처럼 정수장 투입농도를 높게 유지하는 경우 이송거리가 짧은 지역에서 높은 잔류염소농도로 인한 소비자 민원(수돗물 냄새, 맛 등)이 제기되는 등 다양한 문제점이 발생할 수 있다.

재염소 처리는 이러한 문제점을 해결하기 위해 정수장에서 염소 투입농도를 적정 범위로 유지하여 용수를 공급한 후, 잔류염소농도가 일정 수준 이하로 저하된 공급지역만을 대상으로 잔류염소농도를 다시 확보하기 위해 염소를 재투입하는 방법으로, 다수의 국내 광역 및 지방상수도에서는 가압장 또는 배수장 등에 재염소 설비를 구축하여 운영하고 있다. Fig. 2는 세 개의 배급수지역을 포함하는 간단한 정수장 계통을 나타낸 모식도이며, 수요절점의 색이 연할수록 잔류염소농도가 더 낮은 것을 의미한다. 이때 수요절점의 색이 하얀색인 절점은 잔류염소농도 하한기준을 만족하지 못하는 지역을 의미하며, 해당 지역을 바탕으로 염소 재투입 대상 범위를 검토할 수 있다. 또한, 이러한 염소 재투입 대상 범위는 Figs. 2(a) and 2(b)에 나타난 것과 같이 정수장 염소 투입농도에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대상 지역 정수장에서 실제 운영 중인 염소 투입농도 범위를 바탕으로, 배급수지역별 잔류염소농도의 시공간적 분포를 검토하여 염소 재투입이 필요한 대상 범위 및 적정 재투입 지점을 결정하였다.

3.1.2 최적 염소 투입/재투입 계획

앞서 소개한 바와 같이 상수도 이송시간은 시간대별 수량 등에 의해 달라지므로 정수장에서는 물 사용 패턴에 따른 도달 잔류염소농도를 고려하여 시간대별로 염소 투입농도를

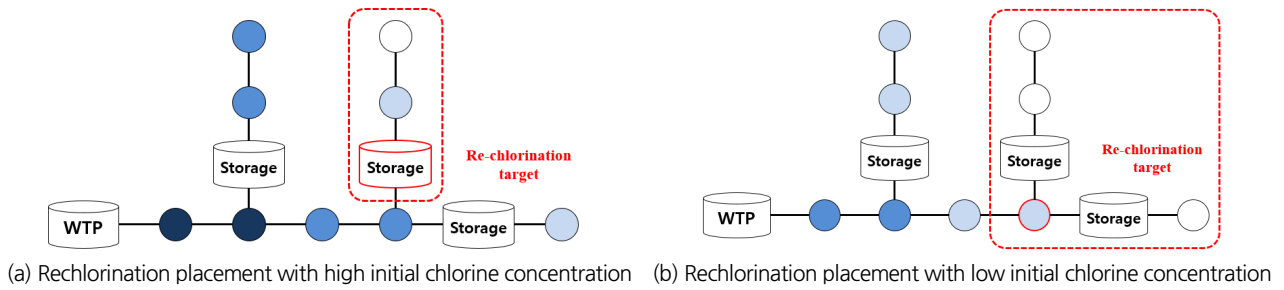


Fig. 2. Scheme of rechlorination facility placement

다양한 범위에서 운영할 수 있다. 특히 재염소 설비를 설치, 운영하는 경우 염소 재투입농도를 고려하여 초기 투입농도를 낮게 유지하거나 탄력적으로 조절하는 등 기존 대비 넓은 범위에서의 운영 방안을 검토할 수 있다.

본 연구에서는 격자탐색법(Grid search)을 이용하여 시간에 따른 염소의 초기 투입농도 및 중간 재투입농도에 따른 잔류염소농도 변화를 분석하고, 최적 투입 계획을 결정하였다. 격자탐색법은 설명 인자에 해당하는 각 변수들의 범위에 대하여 모든 조합의 가능해(Feasible solution)를 평가하는 방법으로, 변수의 범위가 넓거나 격자의 간격이 좁을수록 평가 대상 조합의 개수가 급격히 증가하는 단점이 있으나, 적용 가능한 문제에서 전역 최적해(Global optimum)에 매우 근접한 조합을 고정적으로 탐색할 수 있는 일종의 전역 최적화 기법으로 알려져 있다. 또한, 모든 가능해의 목적함수(Objective function) 및 제약조건(Constraint)을 분석할 수 있어 최적화 수행 후 변수 조합에 따른 변화 양상을 상세하게 검토할 수 있는 장점이 있다.

이때 본 연구에서는 효율적인 격자탐색법의 적용을 고려하여 과도한 가능해 조합의 수를 줄이고, 정수장 및 재염소 설비의 염소 투입농도가 변동되는 횟수를 낮추기 위해, 초기 투입농도는 6시간 간격으로 일간 4회(0-6시, 7-12시, 13-18시, 19-24시)의 농도 변화를 반복하고, 재염소 처리 농도는 12시간 간격으로 일간 2회(0-12시, 13-24시)의 농도 변화를 반복하는 조건에서 대상 지역의 염소 투입/재투입 계획을 최적화 하였다. 이때 각 처리 지점별로 운영 가능한 염소 투입/재투입 농도의 범위 및 격자의 간격은 EPANET 수질해석을 통한 공급지역 내 염소 투입농도별 잔류염소농도 변화를 분석하여 결정하였다.

3.2 상수도 공급 잔류염소농도 분석

3.2.1 공급 잔류염소농도의 수질기준 충족률 분석

앞서 소개한 바와 같이 국내에서는 「수도법 시행령」을 통해 최소 0.1 mg/L부터 최대 4.0 mg/L까지의 적정 잔류염소농도 기준을 제시하고 있다. 그러나 경제성 및 소비자들의 거부감

등에 의해 실제 잔류염소농도는 하한기준을 충족할 수 있는 수준에서 가급적 낮은 범위로 운영되고 있으며, 따라서 본 연구에서는 대상지역 내 잔류염소농도 운영 목표 범위인 최소 0.1 mg/L부터 최대 0.6 mg/L를 적정 수질기준 범위로 적용하였다.

공급지역 내 잔류염소농도의 수질기준 충족 여부는 가장 먼저 수질기준 적용 범위를 벗어나는 절점의 현황을 통해 파악할 수 있으며, 각 절점에서의 잔류염소농도는 정수장 염소농도 운영 및 수요량 패턴 등에 의해 시간에 따라 다르게 나타나므로 시공간적인 현황을 함께 분석할 필요가 있다. 이때 물 사용량이 낮아 용수의 관내 체류시간이 증가하는 새벽 시간대 등에서는 전반적으로 잔류염소농도가 낮게 나타날 수 있으나, 해당 시간대에서의 잔류염소농도를 높게 유지하기 위해 염소 투입량을 증가시키는 운영은 실질적인 물 이용 측면에서 비효율적인 것으로 이해할 수 있다. 즉, 수요량이 낮은 절점 또는 시간대에서 수질기준을 벗어나는 경우와 수요량이 높은 절점 또는 시간대에서 수질기준을 벗어나는 경우의 용수공급 서비스는 서로 다르게 평가할 필요가 있다. Jeong *et al.* (2021)의 연구에서는 이처럼 수질기준을 벗어난 용수가 소비자에게 직접적으로 공급되는 규모를 함께 고려하기 위해, Eqs. (6) and (7)과 같이 매시간 수요절점별 수질기준 충족여부를 검토함으로써 수질기준을 벗어난 상태로 공급된 물 사용량 규모를 산정한 바 있으며, 본 연구에서는 Eq. (8)과 같이 전체 물 사용량 대비 수질기준을 벗어난 물 사용량 규모의 비율(R_{out})을 통해 공급 잔류염소농도의 수질기준 충족률을 분석하였다.

$$S_{low} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N D_i^t I_{low,i}^t \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_{low,i}^t = 1 & \text{if } C_i^t < \text{Lower boundary (0.1 mg/L)} \\ I_{low,i}^t = 0 & \text{if } C_i^t \geq \text{Lower boundary (0.1 mg/L)} \end{cases}$$

$$S_{high} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N D_i^t I_{high,i}^t \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_{high,i}^t = 1 & \text{if } C_i^t > \text{Upper boundary (0.6 mg/L)} \\ I_{high,i}^t = 0 & \text{if } C_i^t \leq \text{Upper boundary (0.6 mg/L)} \end{cases}$$

$$R_{out} = \frac{S_{low} + S_{high}}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N D_i^t} \quad (8)$$

여기서, S_{low} : 잔류염소농도 하한기준(0.1 mg/L) 미만의 용수 공급량(m^3), $I_{low,i}^t$: t 시간에 i 절점의 잔류염소농도 하한기준 미달여부를 나타내는 지수값(0 혹은 1), S_{high} : 잔류염소농도 상한기준(0.6 mg/L)을 초과한 용수공급량(m^3), $I_{high,i}^t$: t 시간에 i 절점의 잔류염소농도 상한기준 초과여부를 나타내는 지수값(0 혹은 1), C_i^t : t 시간에 i 절점의 잔류염소농도(mg/L), D_i^t : t 시간에 i 절점의 용수사용량(m^3/h), T : 총 분석대상기간(hr), N : 대상지역의 총 절점수.

3.2.2 공급 잔류염소농도의 균등성 분석

공급 잔류염소농도의 균등성 분석을 위해서는 상수관망 내 수요량의 분포를 고려할 필요가 있다. Fig. 3은 동일한 공급지역에서 수요량이 서로 다르게 분포하고 있는 두 가지 경우를 나타낸 그림이다. 먼저 Fig. 3(a)와 같이 중간 지역의 수요량이 작고 말단 지역의 수요량이 큰 경우 초기 잔류염소농도를 비교적 낮게 유지한 후, 다시 수요량이 큰 말단 지역에 재염소 처리를 통해 충분한 잔류염소농도를 유지할 수 있다. 반면, Fig. 3(b)와 같이 중간 지역의 수요량이 크고 말단 지역의 수요량이 작은 경우, 중간 지역의 잔류염소농도를 고려하여 초기 잔류염소농도를 상대적으로 높게 유지하고, 재염소 처리는 감소시킴으로써 소비되는 용수의 실질적인 잔류염소농도를 더 많이 확보하는 동시에 전반적으로 더 균등하게 유지할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 구체적인 수요량의 분포를 고려한 잔류염소농도 공급 현황을 정량화하기 위해, Eqs. (9) and (10)과 같이 절점 수요량을 기반으로 한 가중평균 잔류염소농도 및 잔류염소농도 분포의 가중표준편차(Weighted standard deviation)를 산정하고, 공급 잔류염소농도 변화 및 균등성 분석에 활용하였다.

$$\overline{C_w} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N D_i^t C_i^t}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N D_i^t} \quad (9)$$

여기서, $\overline{C_w}$: 가중평균 잔류염소농도(mg/L).

$$C_{wsd} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N D_i^t (\overline{C_w} - C_i^t)^2}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N D_i^t}} \quad (10)$$

여기서, C_{wsd} : 잔류염소농도 분포의 가중표준편차(mg/L).

4. 적용 및 결과

4.1 적용대상 네트워크

4.1.1 적용대상 네트워크 개요

본 연구에서는 국내 1시 지방상수도를 대상으로 잔류염소농도 균등화를 위한 수질 반응계수 추정 및 염소 투입/재투입 계획을 도출하였으며, 적용대상 상수관망의 전반적인 구조는 Fig. 4를 통해 확인할 수 있다. Fig. 4에서 검은색으로 표시된 관로는 두 개의 정수장으로부터 배수지를 거치지 않고 바로 용수를 공급받는 직결급수 I-0 지역을 나타내며, 그 외 다양한 색으로 표시된 관로는 각각의 배수지 조절을 통해 용수를 공급받는 I-1 지역부터 I-10 지역까지 열 개의 배급수지역을 나타낸다. 각 배급수지역의 용수공급 구조는 Fig. 5를 통해 파악할 수 있다. 적용대상 상수관망은 총 97,118개의 관로를 통해, 전체 92,082개의 절점 중 실제 물 수요가 발생하는 33,625개의 수요절점에 하루 평균 약 444,961 m^3 (18,540 m^3/h)의 수요량을 공급한다. 전체 공급지역에 대한 평균적인 24시간 물 사용량 변화는 Fig. 6과 같이 조사되었으며, 이때 배급수지역

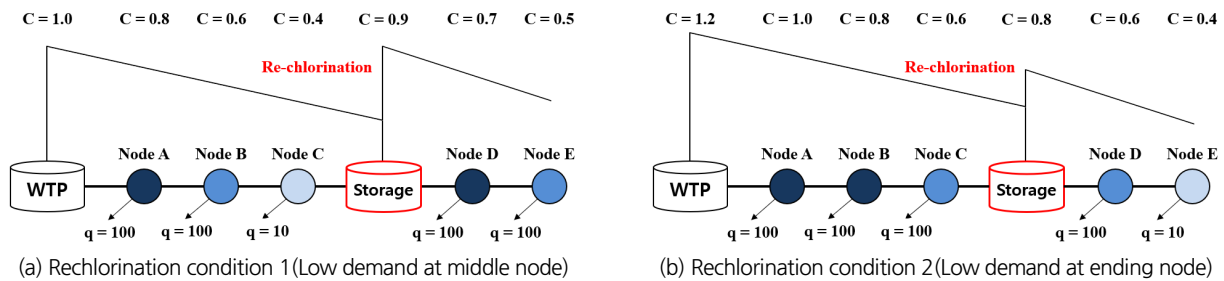


Fig. 3. Scheme of spatial rechlorination scheduling

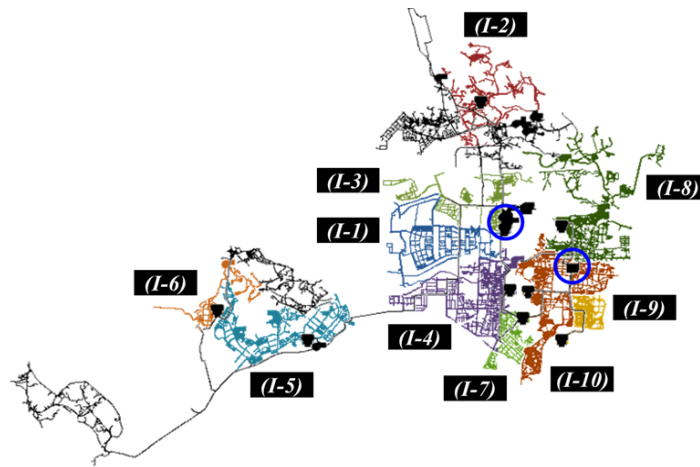


Fig. 4. Application network (I-city, South Korea)

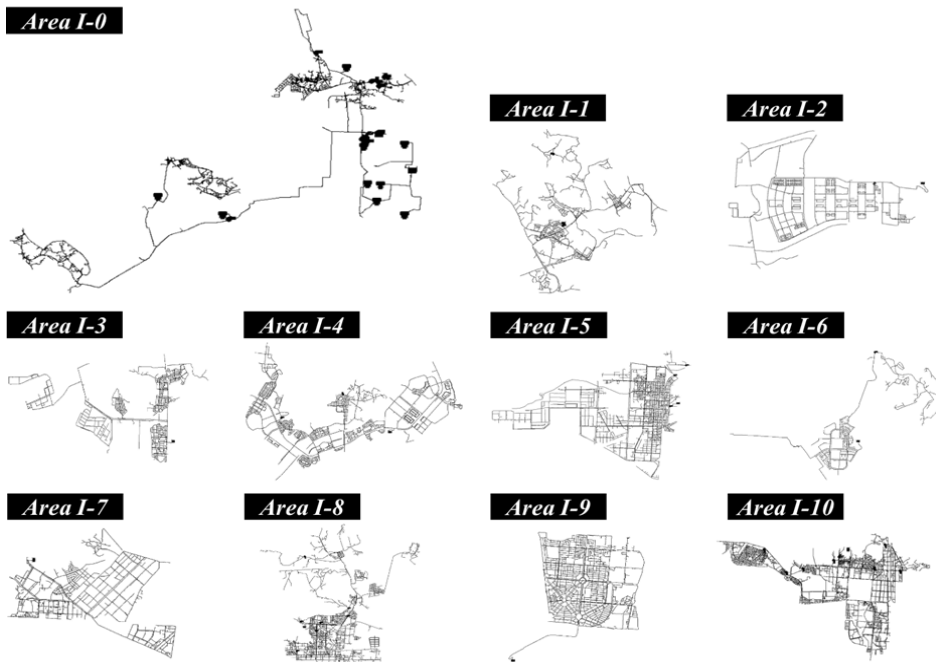


Fig. 5. Tank feeding blocks in the application network

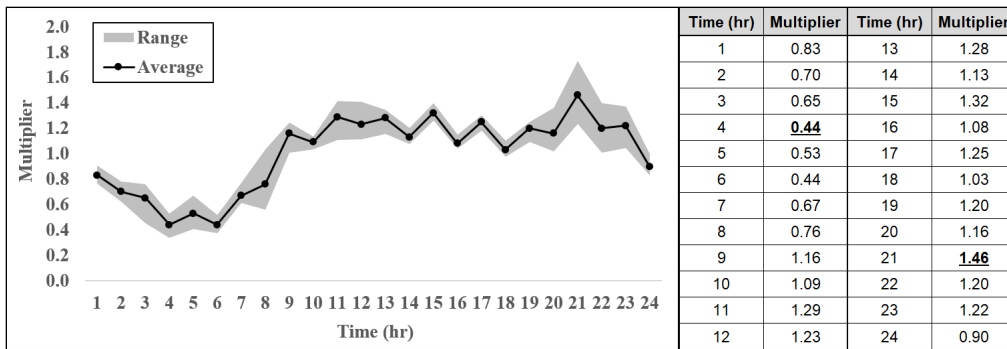


Fig. 6. 24-hour water demand pattern of the application network

별 물 사용량 변화의 편차(회색 음영)는 평균 대비 약 11% 범위 이내로 나타나 전반적인 시간대별 사용 경향은 모두 유사한 것으로 분석되었다. 따라서 시스템 전체의 시간당 수요량은 최소 약 8,158 m³/h (4시)부터 최대 약 27,068 m³/h (21시)까지의 범위를 가지며, Table 1을 통해 배급수지역별 네트워크의 절점(수요절점) 및 관로의 개수, 시간당 평균, 최대, 최소 물 사용량 등을 요약하였다.

4.1.2 적용대상 네트워크의 수질해석 모의 안정화 검토

EPANET 수질해석 모의에서는 대상 네트워크의 용수공급을 처음 개시하는 형태로 이루어지므로 잔류염소농도는 용수 공급원을 중심으로 모의시간이 경과함에 따라 점차 확산되는 결과를 나타낸다. 따라서 EPANET 수질해석 결과는 네트워크 전체에 용수공급이 충분히 이루어져, 수요 및 염소 투입 패턴에 따라 일정 범위에서의 잔류염소농도 변화가 반복적으로 나타나는 “안정화” 상태에 도달한 후 분석되어야 한다(Jeong *et al.*, 2021). 즉, 물 사용량 패턴이 반복되는 수리해석 조건에

서 24시간 잔류염소농도 값이 다음 24시간에도 동일한 값으로 나타나는 경우 잔류염소농도 패턴이 안정화된 것으로 판단할 수 있으며, 본 연구에서는 먼저 충분한 정수장 염소 투입농도 조건에서 네트워크 내 모든 배급수지역에서 잔류염소농도 안정화를 달성할 때까지 수질해석을 수행함으로써 안정화 달성 시간을 분석하였다.

Fig. 7은 각 배급수지역에서 잔류염소농도가 가장 늦게 나타나는 말단 절점에서의 잔류염소농도 변화 양상을 나타낸 그림이며, 이때 I-0 지역의 모의시간은 정수장에서 용수공급이 개시된 이후의 경과시간을 의미하고, 나머지 배급수지역의 모의시간은 정수장이 아닌 각 배수지에서 용수공급이 이루어진 이후의 경과시간을 의미한다는 점에 유의하여야 한다. 수질해석 안정화 검토 결과, I-0 지역의 수질해석 안정화는 정수장에서 용수공급이 개시된 후 약 648시간, 나머지 배급수지역의 수질해석 안정화는 각 배수지에서 용수공급이 개시된 후 약 240시간(I-1), 192시간(I-2), 240시간(I-3), 480시간(I-4), 360시간(I-5), 168시간(I-6), 240시간(I-7), 336시간(I-8), 168

Table 1. Sub-network information

Phase	Area	No. of nodes	No. of demand nodes	No. of pipes	Average water demand (m ³ /h)	Max. hourly water demand (m ³ /h)	Min. hourly water demand (m ³ /h)
Main	I-0	14,334	4,084	15,044	2,050	2,993	902
	I-1	4,602	913	4,830	1,372	2,003	604
Tank feeding	I-2	4,279	1,723	4,507	986	1,440	434
	I-3	4,791	2,103	5,133	993	1,450	437
	I-4	12,184	5,077	12,840	2,605	3,803	1,146
	I-5	8,507	1,075	9,065	420	613	185
	I-6	1,230	445	1,281	270	394	119
	I-7	4,027	1,501	4,219	1,088	1,588	479
	I-8	14,785	6,709	15,545	3,073	4,487	1,352
	I-9	6,812	3,356	7,228	1,463	2,136	644
	I-10	16,531	6,639	17,426	4,218	6,158	1,856

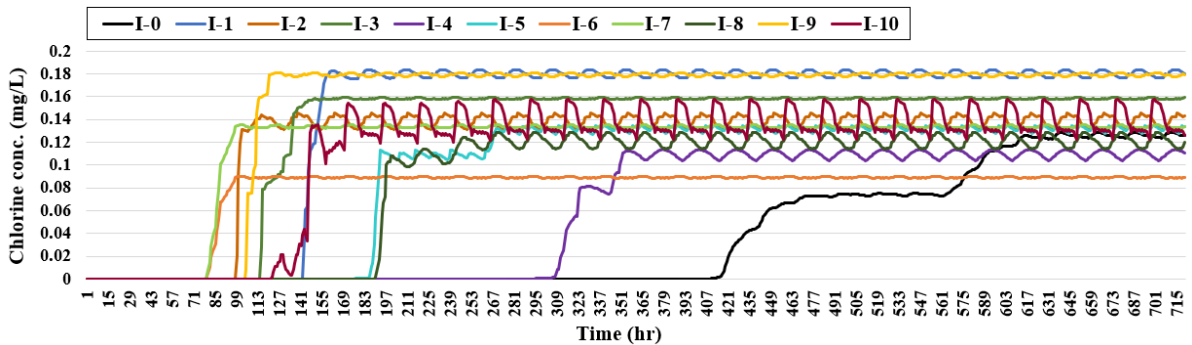


Fig. 7. Stabilization of sub-network water quality simulation

시간(I-9), 336시간(I-10)의 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 염소 투입 및 재투입 계획에 따른 잔류염소농도 변화 분석은 사전 모의를 통해 구해진 안정화 소요 시간이 경과된 후, 24시간 동안의 잔류염소농도 결과를 바탕으로 수행되었다.

4.2 수질해석 반응계수 추정 결과

I시 상수도 계통은 모두 같은 원수(raw water)를 공유하므로, 배급수지역 중 세 개 지역(I-2, I-4, I-7)을 임의로 선정하여 용수를 채수하였으며, 실험실 환경에서 144시간(8,640분)에 걸쳐 시간 경과에 따른 지역별 용수의 잔류염소농도를 2회씩 측정하여 수체반응에 따른 잔류염소농도 감소를 분석하였다. 특히 계절별 수체반응계수(k_{bulk})를 추정하기 위해 5, 15, 25°C 조건에서 각각 동일한 실험을 진행하였으며, 잔류염소농도 측정 결과는 Table 2를 통해 요약하였다. 이때 Table 2에 정리된 잔류염소농도 측정값은 각각 2회씩 측정된 잔류염소농도의 평균값을 의미한다.

시간 경과에 따른 온도별, 지역별 잔류염소농도 감소관계를 Eq. (2)의 1차 반응함수식으로 회귀분석하여 Table 3과 같이 k_{bulk} 를 추정하였으며, I-7 배급수지역의 용수는 상대적으로 낮은 감소반응을, I-2 배급수지역의 용수는 상대적으로 높

은 감소반응을 보였다. 세 지역의 평균적인 k_{bulk} 값은 각각 5°C 조건에서 -0.114 d^{-1} , 15°C 조건에서 -0.273 d^{-1} , 25°C 조건에서 -0.622 d^{-1} 로 추정되었으며, 수온에 비례하여 수체반응계수가 증가하는 것을 확인하였다.

k_w 값의 추정은 k_{bulk} 값을 고정한 후, EPANET 수질해석에 따른 모의 잔류염소농도가 대상지역 내 수용가에서의 계측 잔류염소농도와 얼마나 잘 부합하는지 검토하는 과정으로 이루어졌으며, 이때 수용가 잔류염소농도의 계측시기(4월)를 고려하여, k_{bulk} 는 25°C 조건을 제외한 5°C 및 15°C 조건을 대상으로 Table 4에 나타난 것과 같이 k_w 값을 검토하였다. 검토 결과, 15°C k_{bulk} 조건에서는 I-4 지역의 낮은 상관관계로 인해 적합한 k_w 값을 추정할 수 없는 것으로 나타났으며, 5°C k_{bulk} 조건 및 -0.01 m/d 이하의 k_w 조건에서 세 지역 모두 일정 수준 이상의 상관관계를 보였다. 이때, k_w 값이 -0.01 m/d 보다 작아질 경우 I-2, I-4 지역의 상관계수가 증가하였으나, 가장 높은 상관관계를 보이는 I-7 지역의 상관계수가 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 선행연구(K-water, 2017; Chung et al., 2004; Kim and Han, 2014)에서 추정된 k_w 의 분포 범위를 고려하여, 최종적인 수질해석 반응계수는 $k_{bulk} = -0.114 \text{ d}^{-1}$, $k_w = -0.01 \text{ m/d}$ 의 값으로 추정하였다.

Table 2. Bulk reaction experiment results in the application network

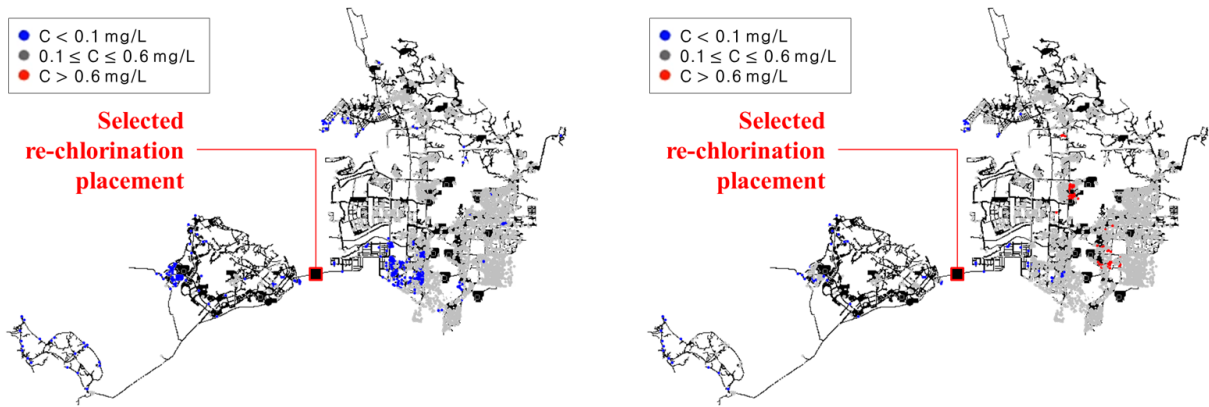
Temp. (°C)	Test area	Chlorine concentration (mg/L) at each measuring time (min)											
		0	10	30	60	120	240	480	1,440	2,880	4,320	7,200	8,640
5	I-2	1.06	1.04	1.01	1.00	0.97	0.95	0.93	0.69	0.67	0.64	0.47	0.42
	I-4	1.06	1.02	1.00	0.98	0.95	0.94	0.91	0.75	0.72	0.70	0.64	0.48
	I-7	1.06	1.04	1.02	0.99	0.99	0.96	0.94	0.79	0.78	0.74	0.68	0.55
15	I-2	1.07	1.05	0.95	0.93	0.91	0.87	0.77	0.53	0.42	0.35	0.18	0.15
	I-4	1.06	1.01	0.97	0.97	0.95	0.91	0.86	0.60	0.53	0.45	0.33	0.23
	I-7	1.01	0.99	0.96	0.94	0.88	0.80	0.78	0.66	0.64	0.56	0.39	0.33
25	I-2	1.04	0.88	0.91	0.87	0.76	0.72	0.57	0.20	0.13	0.10	0.03	0.01
	I-4	1.02	0.92	0.92	0.88	0.88	0.79	0.67	0.39	0.25	0.17	0.05	0.03
	I-7	1.01	0.93	0.89	0.87	0.84	0.79	0.72	0.48	0.33	0.23	0.02	0.02

Table 3. Bulk reaction coefficient (k_{bulk}) estimated in the application network

Experiment area	Bulk reaction coefficient (d^{-1})		
	5 °C	15 °C	25 °C
I-2	-0.144	-0.332	-0.720
I-4	-0.115	-0.259	-0.552
I-7	-0.082	-0.228	-0.593
Average	-0.114	-0.273	-0.622

Table 4. Determined reaction coefficients in the application network

Reaction coefficient	K_{bulk} (d^{-1})	-0.273	-0.273	-0.273	-0.273	-0.273
	K_w (m/d)	-0.1	-0.05	-0.01	-0.005	-0.001
Correlation coefficient (r_c)	I-2	0.55	0.56	0.53	0.53	0.54
	I-4	0.09	0.16	0.26	0.29	0.3
	I-7	0.79	0.84	0.82	0.8	0.77
	Average	0.48	0.52	0.54	0.54	0.54
Reaction coefficient	K_{bulk} (d^{-1})	-0.114	-0.114	-0.114	-0.114	-0.114
	K_w (m/d)	-0.1	-0.05	-0.01	-0.005	-0.001
Correlation coefficient (r_c)	I-2	0.55	0.55	0.48	0.49	0.52
	I-4	0.09	0.2	0.42	0.46	0.49
	I-7	0.79	0.83	0.79	0.77	0.73
	Average	0.48	0.53	0.56	0.57	0.58



(a) Average nodal chlorine concentration (WTP chlorine injection of 0.8 mg/L) (b) Average nodal chlorine concentration (WTP chlorine injection of 1.2 mg/L)

Fig. 8. Spatial distribution of nodal chlorine concentration

4.3 염소 투입/재투입 계획 최적화 결과

4.3.1 염소 투입/재투입 조건

최적 염소 투입/재투입 계획에 앞서, 염소 재투입 위치 및 계획 염소 투입농도의 격자(grid)를 결정하기 위해 대상지역 정수장의 기존 염소 투입농도 범위를 바탕으로 수요절점별 24시간 평균 잔류염소농도의 분포를 Fig. 8과 같이 분석하였다. 이때 파란색 및 붉은색으로 표시된 수요절점은 잔류염소농도가 각각 하한기준(0.1 mg/L)과 상한기준(0.6 mg/L)을 벗어나는 수요절점을 의미하며, 회색은 정상 범위의 잔류염소농도를 의미한다.

먼저 염소 투입농도를 하한값인 0.8 mg/L로 유지할 경우, Fig. 8(a)에 나타난 것과 같이 I-1, I-4, I-5, I-6, I-10 지역에서 잔류염소농도가 하한기준을 만족하지 못하는 수요절점이 다수 발생하는 것으로 나타났으며, 염소 투입농도를 상한값인 1.2 mg/L로 유지할 경우, Fig. 8(b)에 나타난 것과 같이 I-1, I-4,

I-5, I-6 지역에서 하한기준 미만, I-0, I-10 지역에서 상한기준을 초과하는 수요절점이 발생하는 것으로 나타났다. 이때, I-5, I-6 배급수지역의 경우 염소 투입농도 1.2 mg/L 조건에서도 잔류염소농도가 하한기준을 크게 만족시키지 못하였으며, 해당 수요량 또한 비교적 큰 것으로 판단되어, Fig. 8에 표시된 것과 같이 I-5, I-6 배급수지역과 나머지 지역을 연결하는 지점을 염소 재투입 위치로 결정하였다.

또한, 정수장 염소 투입농도를 고정할 경우, 각각 잔류염소농도가 하한 및 상한기준을 벗어나는 수요절점이 다수 발생하고 있어 앞서 소개한 바와 같이 탄력적인 염소 투입농도 운영이 필요한 것을 알 수 있으며, 정수장 염소 투입농도의 계획 격자는 기존 투입농도 범위를 그대로 반영하여, Table 5에 정리된 것과 같이 각각 0.2 mg/L 간격으로 0.8, 1.0, 1.2 mg/L의 범위에서 6시간 간격으로 변경할 수 있도록 결정하였다. 반면, 염소 재투입농도의 계획 격자는 재투입 대상 지역의 잔류염소농

Table 5. Chlorine injection grid for the grid-search application

Chlorination phase	Chlorine injection grid (mg/L) by time period			
	00-06hr	07-12hr	13-18hr	19-24hr
WTP injection	[0.8 / 1.0 / 1.2]	[0.8 / 1.0 / 1.2]	[0.8 / 1.0 / 1.2]	[0.8 / 1.0 / 1.2]
Rechlorination	[0.4 / 0.6]		[0.4 / 0.6]	

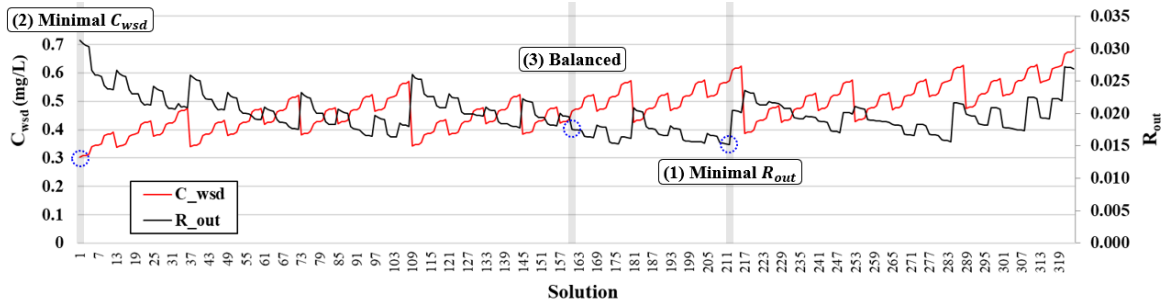


Fig. 9. Objective function changes for individual solutions

도 분포를 바탕으로 결정할 수 있으며, 0.8~1.2 mg/L 범위의 정수장 염소 투입농도 적용시 해당 지역의 잔류염소농도가 하한기준에 미치지 못하는 수준을 고려하여 각각 0.4, 0.6 mg/L의 범위에서 12시간 간격으로 변경할 수 있도록 결정하였다.

4.3.2 염소 투입/재투입 계획 격자탐색 결과

앞서 결정된 염소 투입/재투입 계획의 격자 조건에 따라, EPANET 수리해석을 통해 총 324개(3⁴ × 2²)의 조합을 검토하였다. Fig. 9는 각각의 조합에 따라 본 연구에서 제시한 두 가지 공급 잔류염소농도 분석 지표(R_{out} 및 C_{wsdl})가 변화하는 것을 나타낸 그림이며, 염소 투입농도 조합의 세부적인 조합에 따라 각 지표의 증가와 감소가 반복되고 있으나, C_{wsdl} 지표는 전반적인 투입농도가 증가할수록 커지는 우상향 분포를 보이고, R_{out} 은 특정 조합을 기점으로 전반적인 투입농도가 감소 또는 증가할수록 커지는 U자형 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이때 회색 음영으로 표시된 조합은 각각 (1) 잔류염소농도 기준을 벗어난 용수의 공급량이 가장 작게 나타나는 조합, (2) 잔류염소농도의 가중표준편차가 가장 작게 나타나는 조합, (3) 정규화(Normalized)된 두 지표에 동일한 가중치(Weight)를 부여하였을 때 두 분석 지표의 합계가 가장 작게 나타난 조합을 의미한다. Fig. 10은 해당 격자탐색의 전체 가능해 조합 중 서로 trade-off 관계에 있어 상호 지배되지 않는 Pareto fronts를 나타낸 그림이며, 이를 통해 Pareto fronts 조합 사이에서 두 가지 지표의 trade-off 양상을 구체적으로 파악할 수 있다. Table 6은 최적해로 선택된 세 가지 조합의 염소 투입/재투입농도 계획을 정리한 표이다. 이때 최소 가중표준

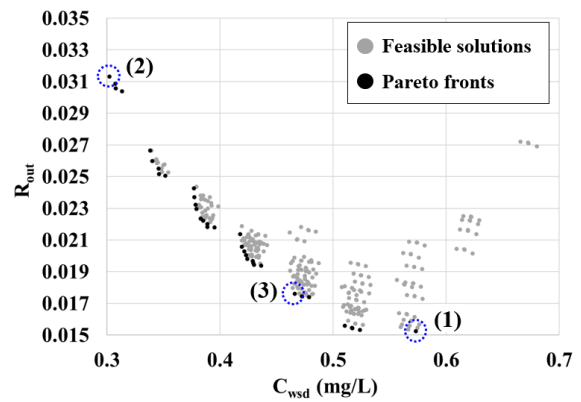


Fig. 10. Pareto fronts obtained by grid search results

편차를 나타낸 조합 (2)는 단순히 전체 가능해 중 총 염소 투입농도가 가장 작은 조합으로써, 이는 잔류염소농도가 더 높을수록 더 큰 감소폭을 보이기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 공급용수의 수질기준 충족률을 극대화한 조합 (1)과 수질기준 충족률을 유지하면서 전체 잔류염소농도를 균등화시킨 조합 (3)의 잔류염소농도 분포를 집중적으로 비교 분석하였다.

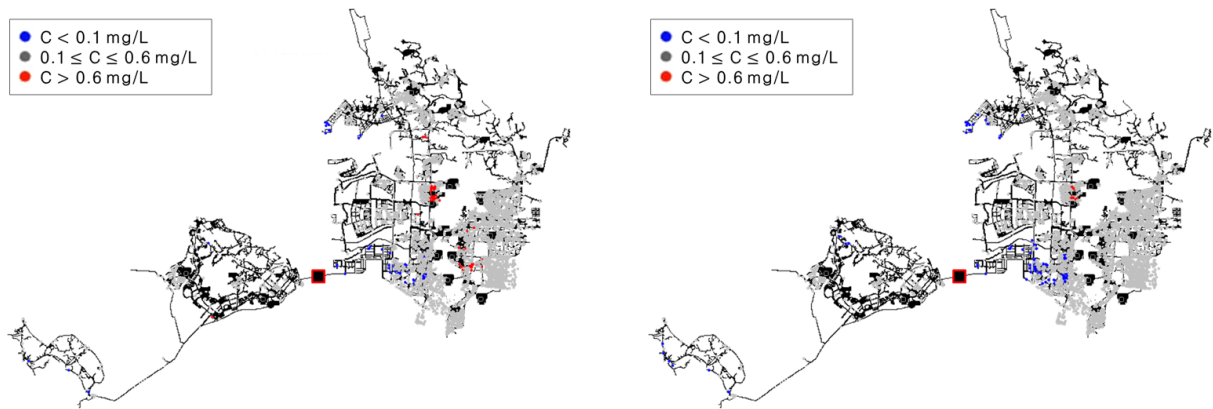
Fig. 11은 앞서 제시된 조합 (1)과 조합 (3) 적용에 따른 수요일 절점별 24시간 평균 잔류염소농도를 나타낸 그림이며, Table 7을 통해 네트워크 전체 물 사용량 대비 각 배급수지역이 차지하는 하한기준 미만 공급량 및 상한기준 초과 공급량의 비율을 구체적으로 정리하였다. 먼저 수질기준 충족률을 극대화하는 경우 (조합 1), 수질기준을 벗어난 공급량 비율은 1.52%, 잔류염소농도의 가중표준편차는 0.57 mg/L로 산정되었으며, Fig. 11(a) 및 Table 7에 나타난 것과 같이 하한기준 및 상한

기준을 벗어난 공급량의 비율은 서로 유사한 것으로 나타났다. 반면, 수질기준 충족률과 잔류염소농도 균등화를 함께 고려한 경우 (조합 3), 수질기준을 벗어난 공급량 비율은 1.76%,

잔류염소농도의 가중표준편차는 0.47 mg/L로 산정되었으며, Fig. 11(b)에 나타난 것과 같이 상한기준을 초과한 공급량이 감소하고 하한기준을 벗어난 공급량이 증가하는 것으로

Table 6. Selected three optimal solutions from grid search results

Objective	Chlorination phase	Chlorine conc. (mg/L) injected at each time period			
		00-06hr	07-12hr	13-18hr	19-24hr
(1) Minimal R_{out}	WTP injection	1.0	1.2	1.2	1.0
	Rechlorination	0.6		0.6	
(2) Minimal C_{wsd}	WTP injection	0.8	0.8	0.8	0.8
	Rechlorination	0.4		0.4	
(3) Balanced	WTP injection	1.0	1.0	1.0	1.0
	Rechlorination	0.4		0.4	



(a) Average nodal chlorine concentration obtained by minimal R_{out} solution (b) Average nodal chlorine concentration obtained by balanced solution

Fig. 11. Spatial distribution of nodal chlorine concentration by the selected solution

Table 7. Water supplied unmet chlorine concentration limit by selected solutions

Service area	Minimal R_{out} solution			Balanced solution		
	Water amount supplied with $C < 0.1$ mg/L (%)	Water amount supplied with $C > 0.6$ mg/L (%)	Sum (%)	Water amount supplied with $C < 0.1$ mg/L (%)	Water amount supplied with $C > 0.6$ mg/L (%)	Sum (%)
Sum (%)	0.90	0.62	1.52	1.63	0.13	1.76
I-0	0.31	0.30	0.61	0.39	0.13	0.52
I-1	-	0.01	0.01	-	-	-
I-2	-	-	-	-	-	-
I-3	-	-	-	-	-	-
I-4	0.55	-	0.55	1.16	-	1.16
I-5	-	-	-	-	-	-
I-6	0.01	-	0.01	0.02	-	0.02
I-7	-	-	-	-	-	-
I-8	0.01	-	0.01	0.03	-	0.03
I-9	-	-	-	-	-	-
I-10	0.02	0.31	0.33	0.02	-	0.02

나타났다. 따라서 잔류염소농도 균등화를 함께 고려한 결과, 수질기준 충족률은 약 0.24%p 감소하였으나 잔류염소농도의 가중표준편차가 약 0.1 mg/L 감소하여 잔류염소농도 균등성이 개선되었으며, 총 염소 투입량이 또한 감소하여 염소 투입/재투입 경제성이 개선되는 등 보다 효과적인 잔류염소농도 관리가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 상수도 공급 잔류염소농도의 균등화를 고려한 염소 투입/재투입 계획 최적화 방법의 일환으로, EPANET 수질해석을 위한 네트워크 수질반응계수의 추정 방법 및 공급 잔류염소농도의 분석 지표를 제시하고, 이를 바탕으로 격자탐색법을 통해 최적 염소 투입/재투입 계획을 도출하는 과정을 함께 제시하였다. 제시된 방법론은 대규모 상수관망인 국내 1시의 지방상수도를 대상으로 적용하였으며, 먼저 채수를 통한 실제 잔류염소농도 계측 및 EPANET 수질해석을 활용하여 네트워크의 수질반응계수를 추정한 결과 수체반응계수(k_{bulk})는 -0.114 d^{-1} , 관체반응률(k_w)은 -0.01 m/d 로 각각 추정되었다. 다음으로 추정된 수질반응계수를 적용하여 EPANET 수질해석을 수행한 후, 잔류염소농도의 공간적 분포를 통해 수질 취약 지역을 식별하여 적정 염소 재투입 지점을 결정하였으며, 정수장에서의 기존 염소 투입농도 범위 및 수질 취약 지역의 잔류염소농도 과부족량을 고려하여 염소 투입/재투입 계획 격자를 결정하였다. 최종적으로 결정된 324개의 염소 투입/재투입 계획을 격자탐색법을 통해 최적화하고, 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 잔류염소농도 가중표준편차(C_{wsd})는 전반적인 염소 투입농도와 비례하는 관계를 보여, 단순히 염소 투입농도를 최소화할수록 공급 잔류염소농도의 균등성이 개선되는 것으로 나타났으며, 이는 잔류염소농도가 더 높을수록 더 큰 감소폭을 보이기 때문인 것으로 분석되었다.
- 2) 수질기준을 벗어난 공급량의 비율(R_{out})은 특정 조합을 기점으로 전반적인 투입농도가 감소 또는 증가할수록 커지는 U자형 분포를 보였으며, R_{out} 을 기준으로 최적 조합을 적용하였을 때의 R_{out} 은 1.52%, C_{wsd} 는 0.57 mg/L로 산정되었다.
- 3) 정규화된 C_{wsd} 와 R_{out} 지표에 동일한 가중치를 적용하여 다목적 최적 조합을 도출한 결과, R_{out} 은 1.76%, C_{wsd} 는 0.47 mg/L로 산정되었으며, 따라서 수질기준을 벗어나는

공급량이 0.24%p 증가하였으나, 전반적인 잔류염소농도 가중표준편차가 0.1 mg/L 감소하여 뚜렷한 잔류염소농도 균등화 효과와 함께 총 염소 투입량 또한 감소하는 효과가 있는 것으로 분석되었다.

EPANET을 활용한 수질해석 분야는 k_{bulk} 및 k_w 등 사실적인 수질반응계수의 추정이 어렵고, 모의시간이 긴 문제점으로 인해 수리해석 분야 대비 상대적으로 관련 연구가 활발하게 수행되지 못하였다. 본 연구에서는 현장 채수를 통해 관측된 수도꼭지 잔류염소 농도값을 바탕으로 네트워크의 수질반응계수를 추정하는 과정을 소개하였으며, 특히 배급수 지역으로 분할된 EPANET 네트워크를 활용함으로써 수질모의 시간을 단축하여 최적화 기법을 효과적으로 적용하였다. 말단 수용가에서 주기적으로 잔류염소농도를 계측한다면 보다 정확한 수질반응계수 추정이 가능할 것으로 판단되며, 이를 통해 잔류염소농도 균등화 및 상수관망 내 수질해석 연구의 신뢰도는 더욱 개선될 수 있다. 국내에서는 향후 Smart Water Metering 사업이 확장됨에 따라 계측 데이터의 확보와 시공간적 해상도가 더욱 개선될 것으로 기대되므로, 본 연구에서 제시된 연구방법은 향후 해석모형을 활용한 수질 취약 지역 개선 및 안정적인 잔류염소농도 운영·관리 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 1) 과학기술정보통신부 한국연구재단(과제번호: NRF-2020R1A2C2009517)의 지원과 2) 환경부 한국환경산업기술원의 상수도 혁신 기술개발사업(과제번호: 2020002700004)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Al-Jasser, A. (2007). "Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect." *Water Research*, Vol. 41, No. 2, pp. 387-396.

- Baek, D., Kim, H., and Kim, S. (2018). "A comparative study for the decay of chlorine residual using EPANET2.0 and an experimental pipeline system." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 32, No. 5, pp. 411-419.
- Choi, J., and Kang, D. (2015). "Skeletonization methods for complex water distribution network." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 10, pp. 845-855.
- Chung, W., Kim, I., Lee, H., and Yu, M. (2004). "Subject water quality management in small water distribution reservoir using residual chlorine decay." *Seoul Studies*, Vol. 5, No. 2, pp. 27-43.
- Hallam, N., West, J., Forster, C., Powell, J., and Spencer, I. (2002). "The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems." *Water Research*, Vol. 36, No. 14, pp. 3479-3488.
- Han, J. (2014). *Application of pipe network model for the equalization of residual chlorine in tap water of Jeju*. Master Thesis, Jeju National University.
- Jeong, G., Kang, D., and Hwang, T. (2021). "Spatiotemporal chlorine residual prediction in water distribution networks using a hierarchical water quality simulation technique." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 9, pp. 643-656.
- Kang, D., and Lansey, K. (2010). "Real-time optimal valve operation and booster disinfection for water quality in water distribution systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 4, pp. 463-473.
- Kim, J., and Han, J. (2014). "Rechlorination for residual chlorine concentration equalization in distribution system." *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 28, No. 1, pp. 91-101.
- K-water (2017). *Development of techniques for reconstructing and operating water belt*. Technical Report, KIWE-WWRC-17-01.
- Lee, S. (2019). *Study on equalization of residual chlorine concentration in water supply systems using optimization techniques*. Ph. D. Dissertation, Korea University.
- Ministry of Environment (ME) (2016). *Statistics of waterworks 2016*.
- Ministry of Environment (ME) (2017). *Statistics of waterworks 2017*.
- Ministry of Environment (ME) (2018). *Statistics of waterworks 2018*.
- Ministry of Environment (ME) (2019). *Statistics of waterworks 2019*.
- Powell, J., Hallam, N., West, J., Forster, C., and Simms, J. (2000). "Factors which control bulk chlorine decay rates." *Water Research*, Vol. 34, No. 1, pp. 117-126.
- Prasad, T., Walters, G., and Savic, D. (2004). "Booster disinfection of water supply networks: Multiobjective approach." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 5, pp. 347-376.
- Rossman, L., Clark, R., and Grayman, W. (1994). "Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 120, No. 4, pp. 803-820.
- Rossman, L., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., and Haxton, T. (2020). *EPANET 2.2 user manual*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-20/133, Washington, D.C., U.S.
- Sherwood, T., Pigford, R., and Wilke, C. (1975). *Mass transfer*. McGraw-Hill, NY, U.S.