Technical Information

Evaluation of an Automatic Drain System of Stagnant Drinking Water: A Case Study of a Water Supply Pipe in Seoul

Heekyong Oh^{1,†} · Wonsoo Kim²

¹Daewoo E&C

²Seoul Waterworks Authority

(Received September 16, 2020; Revised November 23, 2020; Accepted December 10, 2020)

Abstract : This study provides a case study using an automatic draining solution within the drinking distribution system where it was difficult to maintain an acceptable level of retention time and water quality. Water quality behavior was simulated using EPANET 2.0 in a block system of the distribution network system linked with a given reservoir. The site surveys for the simulated stagnant areas were used for building the automatic drain system at the accessible site. Water quality online monitoring without drain showed that earlier occurrence event of residual chlorine below 0.1 mg/L with 45 days than that of turbidity above 0.5 NTU with 90 days was a critical factor to open and close the drain valve. The discharge volumes of the automatic drain system at the stagnant area were 10~100% of the flushing volume drained by the existing manual drain work. It was confirmed that the volume and cycle of drain could be flexibly changed over time and water temperature. The long term operation of the automatic drain system at the test bed showed that the annual flushing volume and working time could be reduced by 65% and 80%, respectively. The continuous operation of the automatic drain system showed that optimal flushing and online sensing compared to manual drainage could reduce maintenance costs and ensure stable water quality of stagnant drinking water. Although the scope and effect of this study are limited to a particular water pipe, the applicability of an automatic drain system can be evaluated by the approach of this study with optimized drain conditions.

Keywords : Automatic Drain System, Online Monitor, Residual Chlorine, Turbidity, Stagnant Drinking Water

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

[†] Corresponding author E-mail: heekyong.oh@daewooenc.com Tel: 02-2288-1263 Fax: 031-250-1133

기술자료

관망 정체수 자동퇴수장치 적용성 검토: 서울시 상수도관 시범적용 사례

오희경^{1,*} · 김원수²

¹대우건설

²서울특별시 상수도사업본부

요약: 본 연구에서는 배수 관망 정체구역에 자동 퇴수시스템을 구축하여 실시간 관망 수질 원격 감시와 퇴수 작업의 자동화를 통해 안전한 수도물 공급 및 선진화된 배수관 수질관리 기법을 마련하고자 하였다. 이를 위해 배급수 관망 실증단지의 배급수 블록에서 수질 거동을 우선적으로 모의하고 선정된 정체 구역에 대한 현장 조사를 통해 접근성이 용이한 구간에 자동 퇴수시스템을 구축하여 장기 운전하였다. 자동 퇴수시스템에서 무퇴수 조건으로 정체수 수질을 측정된 결과 0.1 mg/L 미만 잔류염소농도 출현주기가 0.5 NTU 초과 탁도 출현주기보다 짧아 퇴수밸브 작동의 critical 인자는 잔류염소임을 확인하였다. 잔류염소를 목표농도까지 회복시키는데 필요한 자동퇴수시스템의 퇴수량은 기존 수동 퇴수량의 10~100%로 시간과 수온에 따라 변했고 현장 특성에 맞는 퇴수량과 퇴수 주기의 조절이 필요했다. 해당 관망 정체구역에 자동 퇴수시스템을 도입할 경우 연간 퇴수량은 65% 절감되고 퇴수 작업시간은 80%로 단축되는 효과를 보였다. 관망 자동 퇴수시스템은 원격으로 수질을 감시하면서 퇴수 후의 수질 회복 상태를 관리할 수 있고 관망에서 정체수를 신속하게 배제하여 수질을 안정적으로 확보할 수 있음을 확인하여 그 적용성이 검증되었다. 그러나 다른 다양한 관망 정체구역에 자동 퇴수시스템을 구축할 경우 본 연구의 접근법이 활용될 수 있으나 해당 적용구간의 관망 정보와 물사용 특성에 따라 퇴수 조건의 변화 등 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

주제어: 자동 퇴수시스템, 실시간 수질 모니터링, 잔류 염소, 탁도, 관망 정체수

1. 서론

수도물은 정수장과 배수지로부터 상수 관망을 통해 소비자에게 공급될 때 수도관 내부 및 외부 요인에 의해 물리적 및 생물·화학적 수질 변화를 겪게 된다.^{1,2)} 일반적으로 상수 관망에서 소독부산물, 부식생성물 및 생물막을 최소화하기 위해 정수장에서 고도처리공정을 도입하고 소독공정을 실시하여 관망 유입전에 각 정수장 정수 수질 목표에 따라 수질을 먹는물 수질기준보다 더 안정적으로 관리하지만 정수장으로부터 정수를 송수한 후 배급수계통에서 수도물의 수질 변화를 모니터링하고 관리하는 것이 매우 어렵기 때문이다. 관로 내 잔류염소 등의 수질 특성 분포, 시간에 따른 수질 인자별 특성 변화 분석 및 수질 변화 원인을 파악하기 위한 연구 및 조사가 이루어지고 있고³⁻⁵⁾ 이러한 연구 및 조사 결과를 바탕으로 상수 관망 말단에서 부족해진 잔류염소 농도를 확보하기 위해 상수관로나 배수지에서 재염소를 실시하기도 하지만 잔류염소 농도가 회복되지 못하는 경우에는 플러싱과 퇴수 등의 정

기적 유지관리를 하거나 갱생 및 관교체 등의 공사를 해야 하는 경우가 발생한다.⁶⁾

상수 관망에서는 정수장과 달리 관리하는 주요 수질관리 인자가 탁도와 잔류염소이다. 정수장 영역안에서 CT값 제어는 수리학적으로 수체의 정보가 한 방향으로 유입되어 수질과 수량의 정보가 명확하고 수체 흐름 경계가 분명하기 때문에 비교적 수질 관리가 용이하다. 그러나 상수 관로에서 체류시간을 기반으로 한 관망 블록 단위 전 구간의 염소농도를 모니터링하는 것은 쉽지 않다. 배급수 관로인 수체 반응기가 지하에 매설되어 관리 및 통제가 어렵고 관망 정보가 복잡하며 유체 흐름 범위와 방향이 복합적이고 물 사용 패턴의 영향을 받아 해당 관망 구간에서 수도물의 입·출력의 정보가 실시간 변하기 때문이다. 따라서 상수 관로 정보를 기반으로 수리모델링을 수행해 주요 수질 항목을 예측하고 관리하는 연구가 수행되었고 최근에는 관로 말단에서 실시간 수질 모니터링을 수행하여 염소관리를 feedback하거나 관말의 수질관리를 위한 유지관리에 활용하고 있다.

Kim 등은⁷⁾ 상수관로에서 경제적인 재염소 주입지점의 선정과 최적의 염소주입량을 산정하기 위해 EPANET 2.0을 사용하여 유량, 체류시간 등을 고려해 잔류염소 농도를 예측하였고 수온이 25°C 이상인 경우 체류시간이 25시간이 지나면 염소농도가 50% 이상 감소하는 모의 결과를 보여주었다. Ahn 등은⁸⁾ 수체와 관벽에 대한 THMs 생성계수를 산출하고 관망 해석 수질모델링에 적용하여 THMs 현장 측정값과 실험값을 비교하여 배급수 계통에서의 THMs 생성 분포를 예측하였고 수온에 영향에 따라 예측이 달라짐을 확인하였다. Kim 등은⁹⁾ 상수도 관망의 관말로 갈수록 입자성 물질이 증가하고 위치에 따라 입자성 물질의 화학합 성분은 다르며 관망 내부 침적물에 차이가 있다고 보고했다. Choi 등은¹⁰⁾ 민원지역의 상수관망에서 수집된 이물질에 대해 분석한 결과 부식 생성물이 무기화합물과 유기화합물로 구성되어 있고 관 상태에 따라 영향을 받는다고 보고했다.

관망에서 염소를 예측하는 수질 예측 모형은 대상 관로의 특성을 반영하는 매개변수의 실험적 추정과 보정에 어려움이 있어 방대한 매개변수를 사용하지 않고도 수질 거동을 예측할 수 있는 모형 개발에 관심이 많았다. 이중 미국 EPA에서 개발한 EPANET Model은 배수관망에서 수질의 변화나 오염물질의 이동을 이해하기 위한 도구로 설계되어 사용되고 있으나 수질 농도를 예측하는데 시간 간격의 제한을 받는 점이 한계이다. 따라서 Davis 등은¹¹⁾ 수리 모의 해석과정에서 시간 간격에서 발생하는 질량 불균형에 대한 문제를 해결하기 위해 수질 라우팅 알고리즘을 향상시켜 질량 불균형과 수질 농도 예측률을 개선함으로써 수도사업자가 활용할 수 있도록 모델링을 수행했다. Ha와 Park는¹²⁾ 최근 인공신경망 모형을 이용해 광역 상수도 관로 내에서 잔류염소를 실시간으로 예측하는 모형을 개발했고 100회 이상 학습을 통해 상수 관망의 잔류염소 농도 예측값을 향상시켰고 입력단과 출력단의 정보를 모두 사용할 경우 3시간까지 잔류 염소 농도를 양호하게 예측할 수 있었다. Andrade 등은¹³⁾ Arizona주 Maricopa시의 관망을 대상으로 인공신경망 모델을 적용해 잔류염소를 예측한 결과 잔류염소 예측률의 만족도는 모델 아키텍처와 입력 데이터에 의해 달라질 수 있다고 했다.

수돗물에서 민원 대상은 시각, 촉각 및 후각을 통해 느껴지는 것으로 주로 탁도, 적수, 곰팡이와 흙냄새 및 염소 냄새 등이다. 이 중 색도 및 탁도 유발 원인은 장기적 공급에 따른 관망 내부 부식, 관내 유속 저하에 의한 탁도 물질 축적, 관망 오염에 의한 외부 오염물질 침투와 생물막 증식, 수계전환 작업 등 대형 공사에 따른 관로 파손과 조작 실패 등에 의한 적수 발생 등에 의해 발생한다. 관망에서 유지해야 할 잔류염소 농도는 소비자의 시각과 촉각으로 확인하기 어려워 민원 가능성이 낮지만 수도 사업자 입장에서는 중요한 배급수 관리 요소이다. 이에 서울시는¹⁴⁾ 아리수 수질 자동 감시시스템(Seoul Water Now)을 운영하면서 수도꼭지 102개에 감시지점

을 선정해 잔류염소를 포함해 탁도, pH, 전기전도도 및 수온을 24시간 실시간 측정해서 수질 사고와 민원 발생을 예방하고 있고 실제 수계전환 작업시 유입 및 유출부에서 탁도를 모니터링하여 적수 발생 안전성을 확보하였다. Shin 등은¹⁵⁾ 수질 자동 감시시스템을 이용해 배급수계통에서 미생물에 대한 안전성을 확보하기 위해 정수장 잔류염소 농도를 산정하였고 그 결과 동절기에 요구 CT값을 확보하면서도 서울시 평가 대상 정수장에서의 잔류염소 주입을 줄일 수 있다고 보고하였다.

관망에서의 주요 수질관리 인자는 통상 탁도와 잔류염소이고 관로 내 수질 이상시 수돗물을 관로에서 정기적으로 퇴수하거나 관로 세척하는 작업은 수질을 안정적으로 회복시키는데 중요한 역할을 한다. 따라서 상수 관로에 정체수 퇴수장치를 설치하여 관망 수질을 관리하기 위해서는 잔류염소농도 부족이 예상되거나 탁도가 상승되는 가능성이 높은 지점에 설치하여 연동 운영하는 것이 필요하다. 잔류 염소의 경우는 체류시간이 길어지거나 정체되는 구간에 퇴수장치 설치를 고려하고 탁도의 경우는 수질 민원, 최저 유속과 수압변동과 같은 수리상태, 구배 등의 매설상태 등에 의해 이물질 축적이 우려되는 곳에 퇴수장치를 설치하게 된다. Bae 등은¹⁶⁾ 상수 관망 모형 플랜트 시험을 통해 관 내부 입자의 축적을 최소화할 수 있는 자가세척 유속은 0.35 m/sec 이상 유지되어야 하고 철 부식생성물 0.425 μm 이하를 플러싱 단계에서 배출하기 위해서는 최소한 0.9 m/sec의 세척 유속을 유지해야 하는 실험 결과를 보고했다. Ahn 등은¹⁷⁾ 단방향 플러싱의 효과를 분석하기 위하여 배출수 수질 특성을 분석한 결과 플러싱 배출수 탁도가 1 NTU 이하일 경우 3.3%에서 잔류 알루미늄농도가 수질 기준 이상을 초과하는 결과를 보여주어 배급수관 특성에 따라 세척 방법의 다양성이 검토되어야 함을 보고하였다.

이와 같이 관망 정체 구간의 수질을 안정적으로 유지하기 위해 정기적 세척 및 정기적 퇴수절차를 체계화하는 연구가 필요하다.¹⁸⁾ 수도관 관망 수질을 실시간 모니터링하거나 수질 모델링을 통한 수질을 예측하여 이상 수질의 수돗물을 관로 내부에서 퇴수할 수 있는 by-pass 배관 및 부속 설비와 퇴수 공간 확보 등이 중요하다. 현재는 국내 대부분의 수도사업소에서 주로 체류 시간이 긴 관망 지역을 정체 구역으로 선정하여 수동 퇴수장치인 밸브나 소화전을 연결한 후 수도사업소에서 주기적으로 관망 지역을 방문하여 수동으로 퇴수하고 있고 최근에 들어서야 수질 모니터링을 기반으로 자동 퇴수시스템을 도입하려는 추세이다. 이를 위해 퇴수 대상 정체구간 관로에서 수돗물을 퇴수하는 방식과 절차를 최적화하거나 자동화하기 위해서는 배급수관로 현장 특성에 맞는 이상 수질의 수돗물 퇴수 주기, 퇴수량, 퇴수 유속 및 퇴수 효과 분석 등이 사전에 충분히 검토되어야 한다.

본 연구에서는 서울시 M배수지의 배급수관망 일부 구간을 실증단지로 선정하고 수질 모델링을 실시하였으며 이 결과를 바탕으로 수질 저하가 예상되는 해당 구역을 중심으로 현장

Table 1. Characteristics of test bed.

Reservoir (m ³)	Supply rate (m ³ /d)	Retention time (hr)	Pipeline (mm)	Number of households	Household population
60,000	122,063	11.7	150~800	183,316	487,009

Table 2. Characteristics of existing manual drain sites in the service area.

No	Diameter (mm)	Valve open rate (%)	Pressure (kgf/cm ²)	Drain cycle (day)	Type of drain device
1	100	20/30	4.5	30	drain valve
2	100	20/50	3.5	30	drain valve
3	80	20/50	4.3	30	drain valve
4	65	50	2.2	30	hydrant
5	65	20/50	2.5	30	hydrant
6	100	20/50	4.8	30	drain valve
7	100	20/30/50	4.4	30	drain valve
8	100	20/30/50	3.6	30	drain valve
9	65	20/50	2.0	30	hydrant
10	65	20/50	4.0	30	hydrant
11	65	20/50	4.1	30	hydrant
12	65	30/50	4.3	40	hydrant

수질 조사를 수행하였다. 수질 조사 결과와 퇴수 작업 용이성을 바탕으로 자동 퇴수시스템을 구축하고 운영하면서 정체구간의 목표 수질을 달성하기 위한 적정 퇴수량, 퇴수 주기 및 퇴수 효과를 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1. 대상 지역

본 연구에서는 서울시 Y정수장에서 직접 송수를 받는 M배수지의 배수계통 급수구역을 대상으로 하였다. Table 1과 같이 배수지의 용량은 60,000 m³이고 배수지와 공급받고 있는 급수구역의 관말정체지역에 정기적 수질 검사를 실시하기 위해 수질자동감시시스템을 운영하고 있다. 감시항목은 pH, 수온, 탁도, 잔류염소 및 전기전도도 5개 항목이며 수질기준 초과에 따라 경보발령을 내려 1급 상황에는 급수 정지, 2급 상황에는 주의 요망을 안내한다. 탁도 기준 초과 시 경보 발령 기준은 배수지 0.3 NTU 초과 시, 관말 정체지역 0.5 NTU 초과 시이고 잔류염소 기준 미달성 시 경보 발령 기준은 배수지 0.2 mg/L 미만, 관말 정체지역 0.1 mg/L 미만인 경우이며, pH는 5.8 미만, 8.5 초과 시 경보 발령이 조치된다.

M배수지를 관할하는 수도사업소는 11개의 관말 정체지역에 퇴수 공간을 확보하여 11개소를 순환하면서 정기적으로 퇴수하며 관말의 수돗물 수질을 관리하고 있다. 대부분이 주택가 인접지역, 상가 인접지역, 아파트 단지 내부, 공원 출입로 및 2차선 도로 중앙에 위치해 있고 배수관의 직경은 80~150 mm 범위의 덕타일주철관 재질로 되어 있는 수도 관망이다.

기존 수동 퇴수 주기는 10~50일 중 택일할 수 있으나 11개소 수질 취약 관로를 정기적으로 일괄 관리해야 하므로 30일 주기로 현장을 방문하여 퇴수를 수행한다. 퇴수전과 후의 수질 회복성은 휴대용 측정기를 이용하여 잔류염소와 탁도를 측정하여 점검하고 있으나 퇴수량을 측정할 수 있는 유량계가 설치되어 있지 않다. 따라서 관내 퇴수 실적을 관리하기 위해 오리피스공식 Eq. (1)을 이용하여 퇴수 시간을 모니터링한 후식에 적용하여 퇴수량을 산출한다. 유량계수 C는 오리피스, 노즐 및 벤튜리 등을 가진 관로에서 유량을 측정기하 위해 이론값과 실측값의 상관성을 나타내는 계수이다. 유량계수 C는 수축계수 C_a와 유속계수 C_v의 곱으로 정의되고 이를 통해 Eq. (2)와 같이 간소화할 수 있다. 수축계수는 오리피스 등에서 유출하는 물의 가장 축소된 부분의 단면적과 유출구의 면적과의 비이다. 유속계수는 오리피스 등을 통하는 유체가 그 단면형상 등의 특성에 의해서 받는 영향을 보정하기 위해 평균 유량을 구하는 실험식에 사용하는 비례상수이다. 관말 물 사용 특성, 수질 특성 및 배관 직경에 따라 밸브 개폐율을 20~50% 범위에서 수동으로 조절하고 퇴수 시간은 20~60분 등 11개소마다 퇴수 조건이 다르게 운영되고 있고 Table 2에 나타내었다. 수질 모의 결과를 기반으로 기존 11개 수동 퇴수 지점 중 현장 접근이 용이하고 민원 등 문제 발생 소지가 적으며 향후 단지 및 택지 개발 계획으로 인해 수계 변동이 없는 구간으로 선정하고자 하였다.

$$Q = C \times a \sqrt{2 \cdot g \times h} \quad (1)$$

$$Q = 0.64 \times a \sqrt{2 \times g \times 10P} = 3.2256 \times a \sqrt{P} \quad (2)$$

여기서 Q = 시간당 손실 수량(m^3/hr)
 C = 유량계수(m^3/hr)
 C_a = 수축계수(0.666 적용)
 C_v = 유속계수(0.97 적용)
 a = 퇴수 배관 구경 단면적(cm^2)
 g = 중력가속도(9.8 m/sec^2)
 h = 수두, $10 \times P$ (m)
 P = 수압(kgf/cm^2)

2.2. 수질 모델링

M배수지 배수계통의 급수구역에 대해 EPANET 2.0을 이용하여 관망 수질 모델링을 실시하고 체류 시간과 수온 특성에 따라 잔류 염소 농도가 저하된 관로 구간을 찾고자 하였다. 수질 모델에서는 관로 내 이송으로 인한 성분 농도의 변화를 예측하고 반응물질의 형성과 농도 감소를 계산하기 위하여 일차원의 흐름과 이송 반응을 이용하였다. 각 관로 길이의 위치에 따른 관로에서의 수질 농도를 거리(x)와 시간(t)의 함수로 Eq. (3)과 같이 기본 방정식으로 나타내고 관로 내 유체 이송은 유량을 단면적으로 나눈 유속의 함수로 나타내며 관로 길이 방향의 확산은 무시하고 관로 내 유체는 완전 혼합을 가정하였다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{Q_i}{A_i} \frac{\partial C_i}{\partial x} + \theta(C_i), i = 1 \dots P \quad (3)$$

여기에서 C_i = 관로 i 에서의 물질 농도(mg/L)

Q_i = 관로 i 에서의 유량(m^3/sec)

A_i = 관로 i 에서의 단면적(m^2)

$\theta(C_i)$ = 농도 변화율(mg/L/day)

농도 변화율의 항은 물에서의 화학반응을 나타낸 것으로서 물이 정수장을 떠나 관로 내에서 이동을 시작하면 복잡한 물리, 화학적 반응을 거쳐 변화가 일어난다. 화학적 반응을 모델화하기 위해서는 주로 유체 용적 반응, 관체 반응 및 한정적인 반응물질에 의한 형성 반응의 3가지로 표현된다. 이 중 유체 용적 반응은 대상 물질 농도, 반응물과 차수 및 형성물질의 농도 함수가 된다. 용적 반응으로 관망해석에서 수질 모델로 가장 많이 사용하는 소독 반응을 이용한다. 염소는 물속에 존재하는 유기물, 무기물, 생물막, 관 재질과 반응을 하고 1차원 반응으로도 관망 수질 모델에서 높은 정확도를 제공하기 때문에 Eq. (4)와 같이 1차 반응식으로 정리할 수 있다. 본 연구에서는 관망해석 모의 조건을 기반으로 관망해석을 수행하고 대상 구역의 수질 취약 지점을 예측하여 자동퇴수시스템의 설치 지점을 선정하는데 이용하였다. 시간에 따른 염소 농도 변화특성을 예측하기 위해서는 수체 감소계수가 필요하고 일반적으로 평가 대상의 배급수구역에서 장기간 염소 농도를 측정하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 배급수구역의 염소

Table 3. Input and boundary conditions of water quality monitoring.

Parameters	Values
Initial chlorine at a reservoir	0.4 mg/L
Water temperature	22.5°C
Bulk reaction coefficient	-0.3 day ⁻¹ (-0.0125 hr ⁻¹)
Simulation time	72 hr ¹⁾

1) Water transmission pattern from M reservoir to service area was considered.

실측을 통한 수체 감소계수의 실험값을 구하는 대신에 수질 특성과 배수지 염소 관리 패턴이 유사한 연구 사례의 수체 감소계수를 사용하였다. Ahn 등은⁸⁾ 계절별로 한강 수계를 대상으로 하는 정수장과 대배수지까지 1차 빠른 반응식에 의한 염소 감소계수와 배수지 이후 배급수계통에서 느린 반응식에 의한 염소 감소계수를 산출한 바 있다. 본 연구에서는 배급수계통의 염소감소계수와 온도와의 상관성을 분석하여 22.5°C에 해당하는 염소 감소계수를 Table 3과 같이 0.0125 h⁻¹을 이용하였다.

$$C = C_0 e^{-k_b t} \quad (4)$$

여기에서 C = 반응 후 염소 농도(mg/L)

C_0 = 초기 염소 농도(mg/L)

k_b = 염소 수체 감소계수(h^{-1})

2.3. 수질 분석

퇴수되는 수돗물의 탁도는 비색법의 탁도계(2100P, Hach Co.)로 측정하고 잔류염소는 DPD법의 휴대용 잔류염소계(Pocket Colorimeter II, Hach Co.)로 측정했다. 온라인 수질분석기는 먹는물 연속자동 측정기(i-Water Multi, 팬시아이십일)를 이용해 실시간 수온, pH, 탁도 및 잔류염소를 측정했다. 연속자동 측정기의 측정 범위는 0.02~2 NTU로 최소 측정단위는 소수점 셋째자리이며 잔류염소농도의 측정 범위는 0~2 mg/L로 최소 측정단위는 소수점 둘째자리까지 판독할 수 있는 기능을 가졌다.

2.4. 자동 퇴수시스템 구성

시스템은 수질 측정부, 전동 밸브부, 제어부 및 퇴수부로 구성된다(Fig. 1). 수질 측정부는 메인 급수관망의 수돗물을 실시간으로 pH, 수온, 탁도 및 잔류염소를 측정한다. 전동 밸브부는 기존 배관과 퇴수 배관을 연결하는 지점에 설치되어 제어부의 알고리즘에서 명령을 받아 개도율을 기반으로 개폐기능을 자동 또는 수동으로 수행한다. 제어부는 실시간 측정되는 수질값과 목표값과 비교하여 목표값에 달성하지 못할 경우 밸브 개도율 기반 퇴수 밸브를 단계적으로 열고 설정된 일정 기간 수질이 회복하면 퇴수 밸브를 개도율 기반 서서히

Fig. 1. Auto drain system at the stagnant pipe line.

Fig. 2. Human machine interface (HMI) of automatic drain system.

단을 수 있도록 알고리즘을 구성했다. 퇴수 밸브 작동 수질 인자는 해당 수도사업소의 경보 발령 기준이 되는 탁도와 잔류염소를 기반으로 하였고 수질 목표는 각각 탁도 0.5 NTU 초과 시, 잔류염소농도 0.1 mg/L 미만 시 퇴수 밸브가 작동되도록 설정하였다. 탁도의 또한 밸브 오작동, 통신 오류 등에 의해 유수율이 저하되거나 수질이 개선되지 못하는 일이 발생하지 않도록 강제 밸브 닫힘 및 수동 밸브 열림이 가능한 비상시 대응 알고리즘을 포함하였다(Fig. 2). 제어부는 수도사업소의 중앙제어실에서 원격으로 관리하거나 현장에서 PLC로 관리할 수 있도록 구성하였다. 퇴수부는 상수도 본관 직경 100 mm관에서 직경 80 mm의 by-pass 배관을 상수도시설 설계기준에 맞게 시공하고¹⁹⁻²¹⁾ 목표 수질 미달 시 수돗물을 인근의 우수관으로 연계하여 퇴수시키며 수질 회복 후 퇴수량을 측정하는 기능을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질 모의 및 취약 지점 선정

M 배수지 배수시스템의 급수구역에 대한 관망 해석을 위한 모의 조건은 Table 3과 같다. 배수지 급수구역의 관망해석 기초과일을 생성하고 급수구역의 계량기별 수돗물 사용량을

Fig. 3. Estimation of residual chlorine using EPANET 2.0.

base demand 값으로 입력했다. 또한 배수지의 시간별 유출량 패턴, 평균 잔류염소 농도, 수위 정보를 입력하여 급수구역의 수질 거동 특성을 모의했다. 그 결과 배급수구역에서 잔류염소농도가 0.1 mg/L 이하로 예측되는 수질 악화 구간이 존재함을 확인하였고 Fig. 3에 붉은색으로 표시되는 3개 지점이 수온이 높은 시기에 잔류염소가 낮아지는 취약지점으로 예측되었다.

Table 4. Offline monitoring at the stagnant area determined by EPANET 2.0.

Location	Residual chlorine (mg/L)	Turbidity (NTU)	Conductivity (S/m)	pH	Temp. (°C)	Number of measurement
A	0.32	0.12	1.04	7.71	6.9	1st
	0.32	0.13	1.09	7.70	6.5	2nd
	0.31	0.13	1.06	7.68	6.4	3rd
B	0.34	0.14	0.99	7.82	7.2	1st
	0.34	0.15	0.98	7.77	7.1	2nd
	0.33	0.12	0.95	7.75	7.3	3rd

Fig. 4. Turbidity behavior measured by offline monitor of stagnant water. **Fig. 5.** Residual chlorine behavior measured by offline monitor of stagnant water.

수질 모델을 통해 예측된 3개소 중 1개소는 수도사업소의 정기적 수동 퇴수 구간에 해당되었다. 수동 퇴수 구간을 제외한 2개소의 수질 취약 지점에서 수질을 측정하여 모델링 결과를 확인하였다. 그 결과 **Table 4**와 같이 측정 시기가 수온이 10℃ 이하였기 때문에 잔류염소 농도는 2개소에서 3회 연속 측정결과 모두 0.3 mg/L 이상으로 높게 측정되었다. 본 연구에서는 관망 수질 모델링을 통해 수질 취약 구간을 추적하고 현장 수질을 측정하여 해당 수질 취약 구간에 자동 퇴수시스템을 설치하는 절차로 수행하였기에 3개소 중 기존 수동 퇴수 관리지점에 자동 퇴수시스템을 설치하는 것으로 하였다. 그러나 수질 모델링을 통해 수질 취약지점을 예측하여 해당 구간의 수질을 측정했을 때 모의 결과와 수질 값이 다른 경우 관망 단에서 수용가의 물 사용량이 증가해 체류 시간의 단축 여부, 모델링에 사용된 염소 수체 감소계수의 조정 등을 통해 모델의 재검증이 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 수동 퇴수에 의한 정체 구간 수질 평가

자동 퇴수시스템을 구축한 후 시스템의 안정성과 시스템

가동 조건을 확인하기 위해 4개월 동안 관망 내 수돗물을 퇴수를 하지 않고 관망 정체구역의 수돗물 수질을 온라인과 휴대용 수질 측정기로 동시에 비교하였다. 무퇴수 구간에서 퇴수 지점의 하부에 수질 악화로 영향을 미치는 것을 방지하기 위하여 잔류염소가 0.05 mg/L 이하로 낮아질 경우에는 강제 퇴수를 수행하는 것으로 하였다. **Fig. 4**는 해당 구간에서 무퇴수 단계에서 연속적으로 측정된 시간에 따른 탁도 변화를 보여준다. 정체구역의 탁도는 시간 흐름에 큰 변동폭이 없으나 해당 정수장의 정수지 탁도와 M배수지 유출수 탁도보다는 높아짐을 확인할 수 있었다. 수질 모니터링을 시작한 이후 60일이 경과하자 관망 내 탁도가 소폭 상승하면서 90일이 지난 후 먹는물 수질기준인 0.5 NTU를 초과하는 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 무퇴수 구간에서 연속적으로 측정된 잔류염소농도를 보여준다. 시스템 구축 후 수질을 모니터링하기 시작한 이후 40일 경과 지점부터 0.1 mg/L의 잔류염소농도가 측정되었고 45일 경과 후에는 잔류염소농도가 감소하고 탁도 목표값이 초과하기 전까지 0.05~0.1 mg/L의 잔류염소농도가 유지되었다. 이를 통해 수돗물 퇴수를 위한 목표 수질에서 잔류염소

Fig. 6. Comparison of turbidity between reservoir effluent and stagnant water.

Fig. 7. Comparison of chlorine between reservoir effluent and stagnant water.

농도가 탁도보다 목표값 이하로 나타나 퇴수 밸브 개도에 대한 이벤트는 주로 잔류염소농도가 될 수 있음을 확인하였고 잔류염소농도 목표치를 달성하기 퇴수 밸브를 조작하면 탁도 목표값은 연쇄적으로 달성될 수 있을 것으로 예측되었다. 잔류염소농도가 감소된 원인은 체류시간에 따른 물리화학적 반응 특성상 관망 내에서 탁도를 상승시키는 물리적 환경이 발생하기 보다는 염소가 bulk상에서 체류시간 증가로 피산화물질에 의해 소모되면서 농도가 저감된 이유라고 판단되었다.

관망 지점의 수질은 배수지의 수질에 영향을 받기 때문에 이에 대한 비교 분석을 수행했다. Fig. 6과 Fig. 7은 배수지 유출 탁도와 정체구간에서 측정된 탁도 및 잔류염소 농도를 비교한 그래프이다. 퇴수 지점의 잔류염소는 배수지 유출수의 잔류염소와 농도 패턴이 유사함을 할 수 있었다. 이와 같이 수동 퇴수에 의한 정체수의 수질 분석 결과 잔류염소 농도의 저하가 선조건으로 퇴수 밸브를 작동하게 되면 탁도는 자동적으로 수질이 개선될 수 있을 것으로 판단되었고 기존 수동 퇴수 방식에서 정기적으로 수행하던 30일 퇴수 주기를 15일 이상 연장시킬 수 있음을 파악하였다.

3.3. 자동 퇴수 시스템 운영에 따른 수질 특성 평가

자동 퇴수시스템을 구축하여 실시간 정체구역의 수질을 모니터링하여 퇴수 발생조건을 분석하였다. Fig. 8은 정체수의 탁도를 모니터링한 값으로 침투 탁도가 0.3 NTU 이상으로 높아지는 구간이 있으나 수초내 발생 후 다시 회복되어 탁도에 의한 퇴수 조건을 일으키지는 않았다. Fig. 9는 정체수의 잔류염소를 모니터링한 결과로 하절기 수온이 상승하여 잔류

Fig. 8. Online turbidity measurement of the stagnant water.

Fig. 9. Online residual chlorine measurement of the stagnant water.

염소 농도가 0.1 mg/L 이하로 낮아지는 구간이 낮아져 퇴수 조건이 발생하였다. 그러나 퇴수 조건이 발생한 이후 동일한 봄철에 수온이 높음에도 잔류염소 농도가 안정적으로 유지되었는데 이는 해당 배수지에서 잔류염소 농도가 상향되어 관망 지역의 염소 농도도 안정적으로 유지될 수 있음을 확인하였다. 따라서 자동 퇴수시스템의 수질 모니터링 결과를 바탕으로 해당 배수지의 수질관리 특히 염소 주입을 feedback하는데 활용할 수 있음을 확인했고 배수지 대신 관로 내에서 재염소 투입 지점과 재염소 투입 농도를 결정하는데 사용할 수 있음을 검토하였다.

수온이 20℃ 이상 높은 경우 잔류염소 농도가 낮아지는 특성을 확인하기 위해 시간 및 계절 변화에 따라 잔류염소 농도의 변화 특성을 분석하였다. 시간대별 잔류염소 농도의 거동을 분석하기 위해 자동 퇴수시스템 정상 가동 기간의 자료를 24시간 동안 시간 단위 잔류 염소값을 추출하여 평균 및 표준편차를 구했다(Fig. 10). 각 시간 구간에 대한 데이터 수는 평균 5,048개, 표준편차는 0.015이고 평균 잔류염소 농도는 0.047 mg/L였다. 잔류염소 농도가 가장 높은 시간대는 12~14시 사이로 이는 물 수요량이 증가하여 체류 시간이 감소하였기 때문이었다. 계절 변화에 따른 잔류염소 농도는 Fig. 5와 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 온도가 20℃ 이상 높아지는 여름과 초가을에는 잔류염소 농도가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 가을철(9~11월) 자동퇴수 지점에서의 연속 수질모니터링에서는 배수지 잔류염소 농도나 물 사용량 패턴과 상관없이 온도에 의한 잔류염소 반응속도가 낮아져서 잔류염소 농도가 회복되

Fig. 10. Pattern of residual chlorine concentration over one day.

는 경향이 나타났다. 탁도의 경우는 시간 및 계절의 영향을 받지 않았다.

관말 정체구역의 수질 저하 요인을 분석하기 위하여 수용가의 물 사용량 패턴을 주중의 요일별 물 사용 특성에 따라 분석하였다. **Fig. 11**과 같이 요일별 잔류염소 농도의 유사한 변동 특성은 7~10시의 출근시간 시점에 물 사용량이 증가에 염소 농도가 낮아지는 패턴과 12~15시 염소 농도가 다소 높아지며 18~21시 퇴근 시간 물 사용량 증가로 염소 농도가 낮아졌다가 다시 야간부터 새벽까지 염소농도가 큰 변동폭 없이 높게 유

지되었다. 요일별 잔류염소 농도 차이는 크게 확인하기 어려웠으나 목요일의 잔류염소 농도가 평균적으로 낮고, 월요일과 금요일의 잔류염소 농도가 평균적 높게 나타났다. 잔류염소 농도의 변동폭이 크거나 최소 잔류염소 농도가 발생하는 요일의 경우 일요일과 목요일이었다. 이와 같이 수질의 변동폭이 안정적이지 못한 요일에는 수용가 측의 행동 또는 생활 활동에 대한 분석을 수행할 필요가 있고 자동 퇴수시스템의 퇴수 주기에 해당 요일을 중심으로 자동밸브가 열릴 가능성이 있음을 사전에 판단할 수 있다.

3.4. 자동 퇴수시스템 운영에 따른 퇴수량 특성 평가

자동 퇴수시스템을 장기 운영한 결과 수온이 점차 상승하는 구간에서 정체구간의 잔류 염소가 목표값인 0.1 mg/L보다 낮아지는 경우가 5~8월 사이에 4회 발생해 자동 퇴수가 시행되었다. 자동 퇴수가 진행된 구간에서 저하된 잔류염소 농도가 0.1 mg/L 이상으로 회복되어 안정된 잔류염소 농도로 회복되어 유지하는데 필요한 퇴수 시간은 달라질 수 있음을 확인하였다. **Table 5**에서와 같이 6월에는 자동 밸브가 열린 후 1회당 32.4 m³의 퇴수량이 배출된 후에 정체구간 수돗물의 잔류염소 농도가 회복되었다. 그러나 나머지 자동 퇴수 구간 중 2번의

Fig. 11. Residual chlorine measured weekly at the stagnant area.

Table 5. Comparison of flushing volume between automatic and manual drain.

Flushing volume	Months	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Automatic (m ³ /cycle)		0	0	0	0	9.3	32.4	8.2	4.1	0	0	0	0
Cumulative (m ³)		0	0	0	0	9.3	41.7	50	54	54	54	54	54
Manual (m ³ /cycle)		36	36	36	36	36	36	36	36	119	36	36	36
Cumulative (m ³)		36	72	108	144	180	216	252	288	407	443	479	515

퇴수 구간에서는 1회당 약 10 m^3 의 퇴수량으로 잔류염소 농도를 회복하였고 8월에는 약 4 m^3 의 퇴수량으로 잔류 염소 농도를 회복할 수 있음을 확인하였다. 자동 퇴수시스템 장기 운영을 통해 수온이 15°C 로 낮은 시기에는 염소농도와 탁도가 각각 관리 목표값을 달성함으로써 퇴수 밸브를 개폐조건이 발생하지 않아 퇴수할 필요가 없음을 확인하였다.

자동 퇴수시스템에 의한 퇴수량과 기존 수동 퇴수방식에 의한 퇴수량을 비교하였다. 기존 수동에 의한 퇴수 방식은 퇴수 주기 30일, 퇴수 시간은 20~30분, 밸브 개도율은 20%, 50%로 구분하여 현장 특성에 맞게 퇴수하였고 이 퇴수 조건과 배관의 정보를 이용하여 Table 5에 수동 퇴수 방식에 의한 퇴수량을 계산하였다. 수동 퇴수시 퇴수량을 측정하는 유량계가 없기 때문에 Eq. (3)의 오리피스공식을 이용하여 수압이 존재하는 조당 손실 수량을 계산하고 퇴수 시간을 곱해서 퇴수량을 산출하였다. 19분 퇴수시간에 20%의 밸브 개도율 조건에서는 1회에 퇴수량이 36 m^3 이고, 20분 퇴수시간에 20%의 밸브 개도율 조건에서는 1회당 38 m^3 의 퇴수량, 30분 퇴수시간에 50%의 밸브 개도율 조건에서는 1회 당 52 m^3 의 퇴수량이 발생했다.

자동 퇴수시 잔류염소를 0.1 mg/L 이상으로 회복시키는데 요구되는 1회당 최소 퇴수량은 4.1 m^3 이었고 최대 퇴수량은 32.4 m^3 이었다. 최대 퇴수량은 수동 퇴수방식에서 매월 1회 평균 퇴수량인 36 m^3 과 유사하고 이는 20% 밸브 개도율, 19분 퇴수시간인 수동퇴수 조건에 해당된다. 따라서 기존 수동에 의한 퇴수방식에서 수온이 15°C 이하인 조건에서 1회 고정하여 퇴수한 36 m^3 의 물량은 다소 많은 퇴수량이었다.

1년간 운영을 통해 해당 1개소의 자동 퇴수시스템은 연간 누적량 54 m^3 의 수돗물을 퇴수했고 이는 해당 구간의 기존 수동 방식에 의한 누적 퇴수량에 비해서 연간 65%의 수돗물을 줄일 수 있는 효과였다(Table 5). 본 적용 효과는 제한된 조건에서 얻은 실험결과를 바탕으로 산출된 것으로 적용되는 배수관망의 특성에 따라 달라질 수 있다. 단, 관망내 정제수 퇴수시 수질 모니터링을 통해 퇴수 단계에서 배수관 내부 수돗물의 수질을 검사하여 퇴수 시기를 판단하고 수질 회복을 위한 퇴수량의 적정량을 확인하는 단계가 중요함을 제시하는 실험 결과였다. 상수 관망 정제 구역의 수돗물 수질을 안정적으로 유지하기 위해 요구되는 퇴수 조건은 계절적 특성이나 배급수구역의 운영조건 등에 따라 퇴수 주기와 퇴수량이 적절하게 선정되어 유연하게 조절될 필요가 있음을 확인하였다.

3.5. 경제성 평가

1년간의 운영 자료를 기반으로 자동 퇴수시스템 도입에 따른 경제성 평가를 수행했다. 정수장에서 송수된 후 배수지와 가압장을 운영하는 수도사업소에서는 정제 관망의 수질을 관리하기 위해 정기적으로 현장에 방문하여 수돗물을 퇴수한

Fig. 12. Estimation of flushing water reduction when replacing the existing manual work with the automatic drain system.

다. 자동 퇴수시스템이 구축된 해당 수도사업소의 경우는 12개소의 퇴수 지점에서 수돗물의 수질을 안정적으로 관리하기 위해 매월 1회 주기적으로 퇴수 지점 현장을 방문하여 수돗물을 퇴수하였다. 1개소에 구축하여 운영했던 자동퇴수시스템의 운영 방식을 나머지 11개소로 확장시킬 경우 경제성 효과를 분석하였다. 각 정제구간의 수동 퇴수지점의 수질 회복을 위한 퇴수 시간과 퇴수량은 다르지만 기존 수행해 온 퇴수 실적을 바탕으로 비교하였고 자동퇴수시스템이 도입될 경우 본 실증단지의 자동퇴수이력인 퇴수량과 퇴수주기를 이용하였다. 즉 자동퇴수시스템이 도입될 경우 Table 5의 월별 이력을 참조하여 1~2월과 10~12월 저수온기로 무퇴수조건, 3~5월, 7~8월은 잔류염소가 낮아질 가능성이 있으나 물수요가 증가하기 때문에 기존 수동 퇴수량의 50%만으로도 회복되는 조건으로 반영하였고 6월은 수동퇴수조건과 동일한 퇴수량을 적용하였다. Fig. 12에 각 12개 지점에 자동퇴수시스템을 도입시 예측되는 자동퇴수량과 수동퇴수이력에 의한 퇴수량과 비교하여 절감량을 분석하였고 65%의 수돗물을 절감할 수 있을 것으로 예측되었다. 2015년 해당 수도사업소의 수돗물 생산원가가 m^3 당 673원임을 고려할 때 이는 연간 2,530천 원을 절감하는 예산이었다. 퇴수 작업에 소요되는 시간을 고려할 경우 수동 퇴수인 경우 정기적 방문시 이동 소요시간과 작업시간을 고려 2시간씩 매월 소요되고 1인이 12개소를 방문하는 것으로 하면 연중 288시간이 소요되지만 자동퇴수시스템을 고려할 경우 중앙제어실에서 관리하면서 현장에 문제가 될 때 방문하거나 염소 소모가 높은 시기에 1회 정도 정기적 방문을 수행하면 80% 이상의 작업시간을 단축시킬 수 있을 것으로 예측되었다. 이와 같이 시스템 자동화에 의해 중앙 제어실에서 일괄 여러 개소의 퇴수 지점을 관리할 수 있고 정기적으로 발생하는 출장시간과 퇴수 작업시간을 생략하거나 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

자동 퇴수 시스템의 장기 운영을 통해 발생한 주요 문제점은 통신 및 제어 오류에 의한 밸브의 오작동이었다. 수질 조건 미달 시 전동 밸브가 열리지 않으면 목표 수질로 회복이

되지 않아 수질 안전성을 저하시키고 밸브가 닫히지 않으면 퇴수량이 과도하게 발생해 유수율을 저하시킬 수 있게 되어 이 두 가지 조건은 모두 민원을 발생시킬 수 있는 원인이 된다. 따라서 퇴수 밸브 오작동으로 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지할 수 있는 알람 및 강제 밸브 조작 조건을 알고리즘에 반영하고 Fig. 2의 HMI에서 조작할 수 있도록 개선해야 하는 등 현장 특성에 유연하게 대응할 수 있도록 지속적인 운영 검증이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 배수관 정체수의 수질관리 자동화를 위한 일환으로 서울시 배수관망 실증단지에 자동 퇴수시스템을 구축하고 장기 운영하면서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 자동 퇴수시스템을 구축을 위한 과정으로 해당 블록에 대한 수질 모델링을 수행하여 수질 저하 예상 구간을 사전 파악하고 모의 결과를 중심으로 현장 수질 검사를 수행한 후 접근성이 용이한 상수 관망 정체 구간에 자동 퇴수시스템을 설치하였으며 시운전을 통해 시간과 수온에 따른 최적 퇴수량과 퇴수 주기를 도출하였다.

2) 관망 정체구역에서 수질 인자에 따른 퇴수 주기를 확인한 결과 0.1 mg/L 이하의 잔류 염소농도 출현이 0.5 NTU 이상의 탁도 출현보다 45일 짧아 자동 퇴수밸브를 작동시키는 critical 인자가 잔류염소였지만, 이는 인근에서 관로 공사 등에 의한 탁수 발생으로 퇴수밸브 작동 요인은 언제든지 변동될 수 있음을 고려해야 한다.

3) 정체수의 잔류염소 농도를 0.1 mg/L 이상으로 회복시키기 위해 자동 퇴수시스템에서 퇴수량은 시간과 수온에 따라 기존 수동 방식 퇴수량의 10%만 요구되거나 최대 동일 물량이 요구됨으로서 일정 간격의 퇴수주기에 동일한 퇴수량의 flushing 방식을 개선할 필요가 있었다.

4) 자동 퇴수시스템의 장기운영을 통해 기존 수동 퇴수방식과 비교한 결과 연간 퇴수량의 절감은 65%, 연간 퇴수 작업시간의 단축은 80%의 효과로 산출되었다. 이 효과는 해당 실증단지에서 수행되었던 수동 퇴수방식과 비교해 얻은 제한된 결과로 자동 퇴수시스템이 적용되는 현장 조건에 따라 적용 효과는 달라질 수 있을 것으로 판단된다.

5) 자동 퇴수시스템은 관망 퇴수 후 수질 회복 상태를 원격으로 관리할 수 있고 수질 저하된 정체수를 신속하게 관망에서 배출할 수 있어 관망 수질을 안정적으로 관리하는데 효과적인 것으로 확인하였으나, 다른 수도 관망에 본 시스템을 적용할 경우 해당 상수 관망의 운영 정보에 따라 퇴수 주기, 밸브 개도를 변화 등 퇴수 조건을 최적화할 필요가 있다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 “글로벌 환경기술개발사업(RE201606104)”으로 지원받은 과제입니다.

References

1. G. Liu, Y. Zhang, W. J. Knibbe, C. Feng, W. Liu, G. Medema, W. van der Meer, Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: a review, *Water Res.*, 116, 135-148(2017).
2. P. R. Sharp, A. K. Camper, J. J. Crippen, O. D. Schneider, S. Leggiero, Evaluation of drinking water biostability using biofilm methods, *J. Environ. Eng.*, 127(5), 403-410(2001).
3. M. J. Chang, I. H. Choi, M. J. Yu, Biofilm formation and NOM characterization in drinking water distribution networks after water treatment process, in *Proceedings of the Annual Meeting of Korean Society of Environmental Engineers*, KSEE, Seoul, Korea, pp. 6-11(2008).
4. L. Zhang, S. Liu, W. Liu, Investigation of organic matter migrating from polymeric pipes into drinking water under different flow manners, *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 16(2), 280-290(2014).
5. L. Zlatanović, J. P. van der Hoek, J. H. G. Vreeburg, An experimental study on the influence of water stagnation and temperature change on water quality in a full-scale domestic drinking water system, *Water Res.*, 123, 761-772(2017).
6. H. D. Lee, Renovation technologies in maintenance of water distribution systems, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 29(12), 1297-1309(2007).
7. D. H. Kim, D. J. Lee, K. P. Kim, C. H. Bae, H. E. Joo, Computing the dosage and analysing the effect of optimal rechlorination for adequate residual chlorine in water distribution system, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 32(10), 916-927(2010).
8. J. C. Ahn, S. W. Lee, B. S. Noh, Y. J. Choi, J. H. Choi, H. I. Kim, T. J. Park, C. M. Park, H. Park, J. Y. Koo, Modeling residual chlorine and THMs in water in distribution system, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 29(6), 706-714(2007).
9. D. H. Kim, D. J. Lee, J. S. Hwang, D. Y. Choi, Characteristic analysis and effect of particulate material in drinking water distribution networks, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 35(5), 312-320(2013).
10. M. A. Choi, D. H. Kim, C. H. Bae, D. J. Lee, D. Y. Choi, The component analysis of foreign substance occurred in water distribution networks, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 36(9), 614-623(2014).
11. M. J. Davis, R. Janke, T. N. Taxon, Mass imbalances in EPANET water-quality simulations, *Drink. Water Eng. Sci.*, 11(1), 25-47(2018).
12. S. Ha, S. Park, Realtime prediction of residual chlorine concentration in water distribution network using artificial neural network, *Journal of Civil Engineering* 19(II-6) 773-783(1999).

13. M. A. Andrade, C. Y. Choi, K. Lansey, A. M. ASCE, D. Jung, Enhanced artificial neural networks estimating water quality constraints for the optimal water distribution systems design, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 142(9), 04016024(2016).
14. Seoul Water Now, <https://arisu.seoul.go.kr/arisumap>.
15. P. S. Shin, S. G. Han, D. K. Ryu, J. G. Lee, Y. J. Choi, Y. S. Park, Study on the determination of residual chlorine concentration at the water supply pump station by on-line water quality monitoring, in *Proceedings of the Annual Meeting of Korean Society of Environmental Engineers*, KSEE, Jeju, Korea, pp. 739-742(2010).
16. C. H. Bae, D. Y. Choi, J. H. Kim, D. H. Kim, The assessment of self cleaning velocity and optimal flushing velocity in water distribution system, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 28(4), 441-451(2014).
17. J. C. Ahn, S. W. Lee, K. I. Baek, J. H. Choi, E. S. Jeong, J. G. Jang, Y. J. Choi, J. Y. Koo, Characteristics of flushed water in distribution networks, in *Proceedings of the Annual Meeting of Korean Society of Water and Wastewater*, KSWW and KSWE, Daegu, Korea, pp. 18-31(2006).
18. P. S. Shin, Y. L. Song, Y. J. Choi, Case-study; reduction of red water in distribution water supply system by on-line water quality monitoring, in *Proceedings of the Annual Meeting of Korean Society of Environmental Engineers*, KSEE, Gangwon, Korea, pp. 1049-1053(2007).
19. Ministry of Environment of Korea, Korean Design Standard KDS 57 50 00, pp. 7(2017).
20. Ministry of Environment of Korea, Korean Design Standard KDS 57 65 00, pp. 5(2017).
21. Ministry of Environment of Korea, Korean Construction Standard KCS 57 50 10(2017).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Heekyong Oh

Daewoo E&C, Ph.D., 0000-0003-2537-9072: Conceptualization, Data analysis, Methodology, Validation, Writing - original draft.

Wonsoo Kim

Seoul Waterworks Authority, Manager: Conceptualization, Data curation, Writing - review and editing.