

배·급수관망의 잔류염소 확보를 위한 적정 재염소 주입량 산정 및 효과분석 Computing the Dosage and Analysing the Effect of Optimal Rechlorination for Adequate Residual Chlorine in Water Distribution System

김도환·이두진[†]·김경필·배철호·주혜은
Do-Hwan Kim · Doo-Jin Lee[†] · Kyoung-Pil Kim · Chul-Ho Bae · Hye-Eun Joo

K-water연구원 상하수도연구소
Water Research Center, K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation

(2010년 6월 4일 접수, 2010년 10월 20일 채택)

Abstract : In general water treatment process, the disinfection process by chlorine is used to prevent water borne disease and microbial regrowth in water distribution system. Because chlorines were reacted with organic matter, carcinogens such as disinfection by-products (DBPs) were produced in drinking water. Therefore, a suitable injection of chlorine is need to decrease DBPs. Rechlorination in water pipelines or reservoirs are recently increased to secure the residual chlorine in the end of water pipelines. EPANET 2.0 developed by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) is used to compute the optimal chlorine injection in water treatment plant and to predict the dosage of rechlorination into water distribution system. The bulk decay constant (k_{bulk}) was drawn by bottle test and the wall decay constant (k_{wall}) was derived from using systematic analysis method for water quality modeling in target region. In order to predict water quality based on hydraulic analysis model, residual chlorine concentration was forecasted in water distribution system. The formation of DBPs such as trihalomethanes (THMs) was verified with chlorine dosage in lab-scale test. The bulk decay constant (k_{bulk}) was rapidly decreased with increasing temperature in the early time. In the case of 25 degrees celsius, the bulk decay constant (k_{bulk}) decreased over half after 25 hours later. In this study, there were able to calculate about optimal rechlorine dosage and select on profitable sites in the network map.

Key Words : Water Distribution System, Disinfection By-products, Residual Chlorine, Rechlorination, EPANET

요약 : 일반적으로 정수처리 공정에서 염소에 의한 소독공정은 수인성 질병을 억제하고 상수도관망에서 미생물의 재성장을 억제하는 목적으로 사용되고 있다. 그러나 염소소독은 수중의 유기물과 반응하여 소독부산물(Disinfection By-products; DBPs)과 같은 발암성 물질을 생성함으로 적절한 염소 주입이 필요하고 최근에는 관말지역에서의 잔류염소 확보를 위해 상수관나 배수지 등에서 재염소를 실시하는 경향이 증가하고 있는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 정수장에서 최적의 염소주입과 재염소 주입량을 산정하기 위하여 미국 EPA에서 개발한 EPANET 2.0을 사용하여 최적 염소 주입량을 산정하고 그 효과를 모의하였다. 대상지역 상수관로에 대한 수질을 모의하기 위하여 bottle test를 통해 수체감소계수(k_{bulk})를 도출하였으며, systematic analysis method를 이용하여 관벽감소계수(k_{wall})를 도출하였다. 배·급수계통에서의 수질을 정확히 예측하고자 유량과 체류시간 등을 고려한 수리해석 모델을 기초로 하여 상수도관망에서의 잔류염소 농도를 예측하고 염소주입 농도에 따른 소독부산물(DBPs)인 트리할로메탄(Trihalomethanes; THMs)의 생성변화를 실험을 통해 확인하였다. 수체감소계수(k_{bulk})를 도출한 결과 온도가 높을수록 초기에 빠른 감소를 보였으며, 25°C의 경우 25시간이 지난 이후에는 절반이상이 감소하였다. 대상지역에 재염소 주입시설을 도입할 경우 최적 재염소 주입량을 산정하였으며, 관망도상에서 경제적으로 유리한 지점을 선정할 수 있었다.

주제어 : 상수도관망, 소독부산물, 잔류염소, 재염소, EPANET

1. 서론

정수처리공정에서 소독은 수중의 세균, virus, 원생동물 등의 단세포 미생물을 사멸시켜 소비자에게 안전한 수돗물을 공급하기 위한 공정이다.^{1,2)} 현재 우리나라는 수도법에 의하여 잔류염소의 농도를 수도꼭지에서 0.1 mg/L 이상(수질 오염 우려 시에는 0.4 mg/L 이상)부터 4.0 mg/L 이하로 유지하도록 규정하고 있다.³⁾ 상수도관망에서 잔류염소의 유지는 virus를 비롯한 미생물의 재성장 및 불활성화에 매우 효율적이며, 관로상에서의 잔류염소 농도는 수돗물 공급량, 체류시간, 계절변화에 따른 수온 등에 영향을 받는다.⁴⁾ 소독제로 가장 많이 사용되고 있는 염소는 그동안 이용 및 운영

방법상의 기술적 축적이 상당히 이루어져 왔으며, 소독부산물(DBPs) 생성에 대한 우려가 높은 단점을 가지고 있으나 계속해서 소독제로 많이 사용되고 있다.⁵⁾ 급·배수계통에서 수돗물을 안전하게 유지하기 위해서는 최소한의 잔류염소 농도를 유지시켜야 한다. 그러나 배수지의 배수관망에 유입된 후 염소소모성 물질과의 반응 및 그 외의 다른 물질과의 반응으로 분해를 가속화할 수 있는 문제점이 있고 이렇게 분해된 염소는 환원되어 금속류와 반응하여 부식을 촉진하기도 한다.⁶⁾

염소에 의한 소독부산물(DBPs)의 위해성은 새로운 분석 기법이 적용되기 시작한 1970년대에 밝혀지기 시작하여 자연유기물질(Natural Organic Matter; NOM)이 정수처리 과정

[†] Corresponding author E-mail: djlee@kwater.or.kr Tel: 042-629-2857 Fax: 042-629-2849

에서 염소와 반응을 하게 되면 Trihalomethanes (THMs), Haloacetic Acids (HAAs)와 같은 소독부산물(DBPs)을 생성시킨다.⁷⁾ 용존 잔류염소는 상수관로를 통하여 각 배수지나 수용가로 급수되는 과정에서 수체(bulk water)에서 자연유기물질(NOM) 등에 의해 잔류염소가 감소하고 수도관벽의 생물막과 결절(tubercles) 등에 의해서 잔류염소가 감소하는 반응이 이루어진다. 이러한 반응결과 잔류염소가 감소하고 관망에서의 체류시간과 저류시설에서의 정체시간에 따라 소독부산물(DBPs)도 증가하게 되고 정수장에서 보다 훨씬 높게 나타나곤 한다.^{4,8)} 최근에 미국에서 보고된 바에 의하면 소독부산물(DBPs)의 농도가 정수처리장에서 보다 상수도관망에서 기준치에 위배되는 경우가 갈수록 더 많이 발생하는 것으로 조사되었다.⁹⁾ 염소소독으로 인한 소독부산물(DBPs) 생성으로 건강상의 유해문제가 대두됨¹⁰⁾으로 국내의 경우 대규모의 광역상수도 시스템을 수십 년 동안 운영하고 있는바, 광역상수도는 2개 도시 이상에 상수를 공급하는 특성상 적정 잔류염소의 유지와 소독부산물(DBPs)의 관리가 보다 중요한 과제이다. 따라서 상수도관망 전반에 걸쳐 적정 잔류염소를 유지하고 소독부산물(DBPs)의 생성을 적절히 제어하기 위한 연구들이 활발히 이루어져야 할 것이다.¹¹⁾ 이에 우리나라에서도 1997년 12월에 개정된 상수도시설기준에서 정수장외에 염소의 재투입이 필요한 경우에는 배수지 및 관로시설 등에 추가 주입설비를 설치하는 것이 바람직하다고 명시되어 있어 재염소 주입의 필요성이 점차 강하게 제기되고 있다.¹²⁾

관로 상에서 기준치 이상의 잔류염소 농도를 확보하기 위해서는 정수장에서 후염소 처리에만 의존할 경우 관로에서 발생하는 극심한 잔류염소 농도의 변화를 재염소 주입기법의 적용에 의해 어느 정도 평활화 할 수 있는 것으로 나타났으며, 재염소 주입기법을 잘 적용시켰을 경우 정수장의 후염소 투입에만 의존하는 경우보다 총 염소투입량의 감소 효과를 보이는 것으로 나타났다.¹³⁾ 재염소 주입시설은 정수장에서 잔류염소 상한기준(1.00 mg/L)을 적용하여 수돗물 공급시 지자체 배수지 또는 수용가에서 잔류염소 농도가 법적 잔류염소 농도(0.10 mg/L) 이상 유지가 어려운 경우 설치한다. 이때 배수지 잔류염소 농도는 배수지 유입수를 기준으로 한다.¹⁴⁾

본 연구에서는 급·배수관망 계통의 잔류염소 농도를 예측하기 위하여 대상지역에 수리해석 관망도를 구축하였고 현장조사 및 배수지별 자동측정기기를 통한 잔류염소 농도 변화를 모니터링 하였다. 미국 EPA에서 개발한 EPANET 2.0을 이용하여 대상지역의 수요와 용수공급량(체류시간) 변화에 따른 잔류염소 변화를 예측하였다.¹⁵⁾ 구축된 관망도에 수체감소계수(k_{bulk})와 관벽감소계수(k_{wall})를 입력하여 실제 용수공급량과 수온에 따른 주요 지점별 잔류염소 농도를 예측함으로써 대상지역의 재염소 시설 설치의 필요성과 재염소 시설 설치에 따른 잔류염소 농도변화 및 소독부산물(DBPs)인 Trihalomethanes (THMs)의 생성변화에 대해서 확인하고자 하였다. 그리고 상수도관망에서의 잔류염소 농도

변화를 예측하여 적정 잔류염소 농도의 유지관리 방안을 제시하여 수돗물의 안정성을 확보하는데 기여하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 대상지역

본 연구에서는 경기도 D시에 있는 정수장과 상수도관망을 대상으로 하여 잔류염소 예측, 재염소 지점 및 주입농도를 산정하였다. D정수장은 팔당호를 수원으로 하여 약 300,000 m³/day의 정수를 생산하고 있으며, 수온이 증가하는 하절기에는 관말지역의 수도꼭지까지 잔류염소 확보가 어려운 문제점을 안고 있다. Fig. 1과 같이 D시의 상수도관망 내에는 다섯 개의 배수지가 있고 대상지역의 유입지점에 위치한 SP배수지로 분기된 후 YJ가압장에서 DA배수지와 SY배수지를 거쳐 NH가압장으로 물이 수수되고 있다. SP배수지 이전의 주송수관로에서 NH가압장으로 600 mm의 닥타일주철관(DCIP)이 매설되어 있으나 현재는 밸브가 닫힌 상태로 운영되고 있다. 향후 닫혀있는 밸브를 열고 통수하여 KA배수지와 NH배수지의 체류시간을 단축시켜 운영할 계획으로 있어 두 가지 경우에 대하여 모의를 실시하였다. Fig.

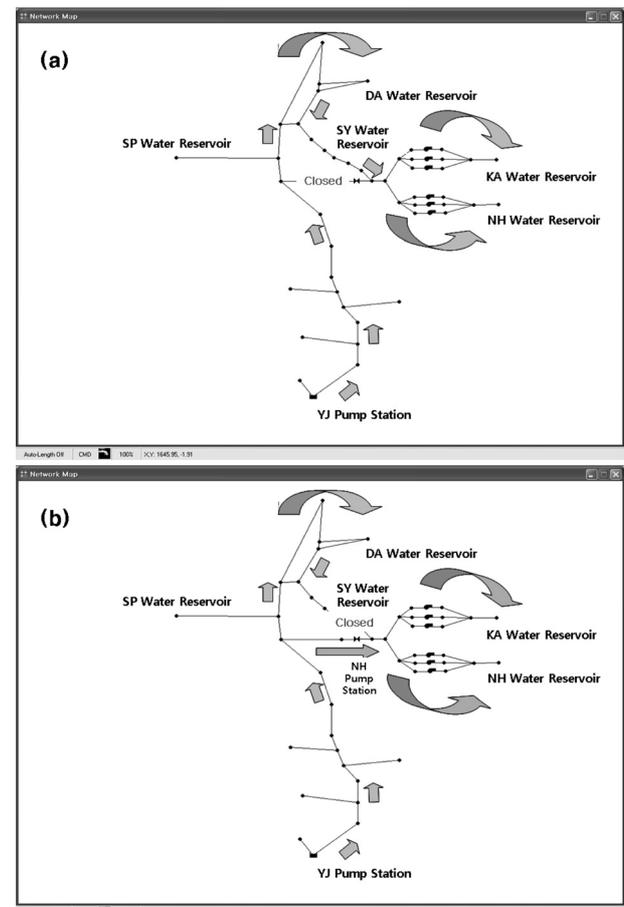


Fig. 1. Comparison of operating conditions for (a) present and (b) hereafter.

1은 대상지역에 대한 관망도로 현재와 향후 운영계획에 대한 공급흐름을 나타낸 것이다.

2.2. 조사방법

대상지역에 대한 잔류염소 예측과 재염소 주입량 산정을 위해 Fig. 2와 같은 방법으로 주요 지점들을 선정하여 선정된 지점들을 기준으로 관망도를 구축하였다. 잔류염소 모델의 구축 및 검·보정을 위하여 현장조사는 두 차례 이루어졌으며, D정수장의 여과수를 대상으로 실험실에서 수체감소계수(k_{bulk}) 도출을 위한 bottle test를 실시하였다.

2.3. 현장조사

현장 수질조사는 대상지역의 수질경향을 분석하고, 공급과정별 잔류염소 변화를 파악함으로써 잔류염소 예측에 필요한 관벽감소계수(k_{wall})를 추정하기 위해 수행된다. Fig. 3과 같이 대상지역 상수관망에서 주요지점과 각 배수지에서의 잔류염소, 소독부산물, 중금속 등의 수질항목을 측정하였다.

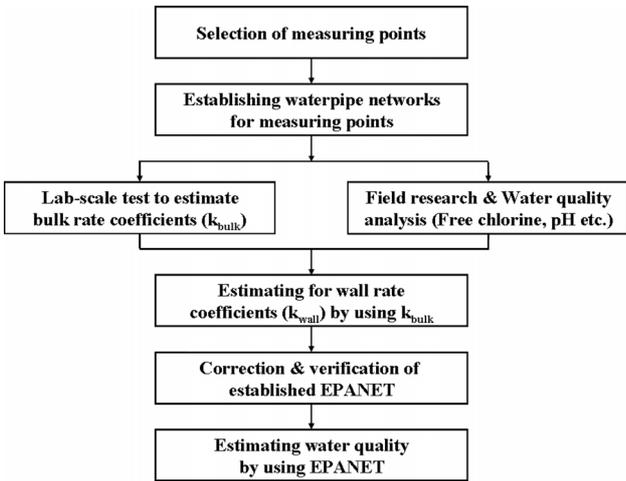


Fig. 2. Flow chart of survey method and process.

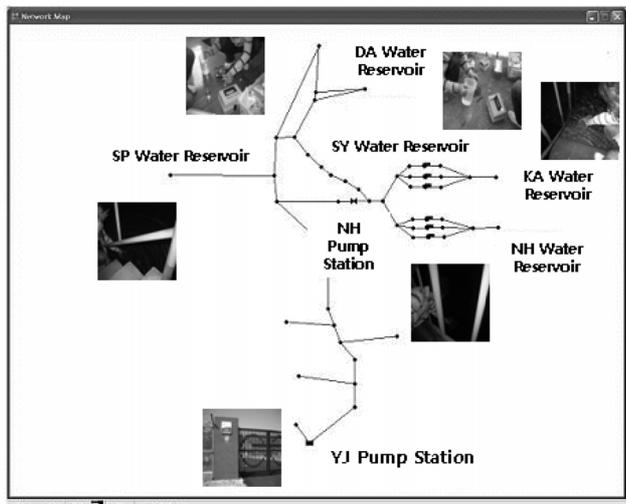


Fig. 3. A map of field survey for sampling and measuring points in study area.

Table 1. The analysis items, methods and instruments

Items	Methods	Instruments
pH	pH meter	Orion 4star Thermo pH potable
Temperature		Orion 4star Thermo
Conductivity		Orion 4star Thermo
Free Chlorine	DPD	Pocket Chlorimeter(HACH)

조사지점들 중에는 YJ가압장, SP배수지, SY배수지 및 DA 배수지에는 잔류염소 자동측정기가 있어 실시간으로 측정이 되었다. Table 1은 현장 수질조사에서의 분석항목들과 측정장비들을 나타낸 것이다.

2.4. 수체감소계수(k_{bulk})

상수관망 내의 수체에서 일어나는 반응속도는 일반적으로 식 (1)과 같다.

$$R_b = K_b C^n \tag{1}$$

여기서, K_b 는 수체반응계수(bulk rate coefficient)이며, 반응하는 물질의 농도가 제한되어 존재하는 경우의 반응속도는 식 (2)와 같이 표시되기도 한다.

$$R_b = K_b (C_L - C)^{n-1} \tag{2}$$

여기서, C_L 는 제한농도(limiting concentration)이며, 감소 반응의 경우 ($C_L - C$)는 ($C - C_L$)로 교체된다. 0차 혹은 1차 감소 모델은 배·급수관망의 수체반응에 상당히 잘 맞으며, 비보존성물질(Non-conservative constituents)의 경우에 감소계수를 산정하는데 더 유리한 것으로 알려져 있다.^{8,16-19)}

온도에 따른 수체감소계수(k_{bulk})를 도출하기 위해 serum bottle (160 mL)과 테프론 코팅이 되어있는 실리콘 마개를 사용하여 bottle test를 실시하였다. 실험상의 오차를 최소화하기 위하여 실험에 사용한 시료병을 초음파 세척기로 약 1시간 세척한 다음 초순수로 깨끗하게 세척하고 105°C에서 건조시킨 다음 사용하였다. 시료는 D정수장의 여과수를 이용하였으며, 온도 조건을 4.50, 18.0, 25.0°C로 설정하고 초기 잔류염소 농도가 1.00 mg/L가 되도록 차아염소산나트륨(NaOCl)을 주입한 후 시간경과에 따른 잔류염소 감소경향을 분석하였다. 반응시간이 증가함에 따라 잔류염소가 완만하게 감소함에 따라 24시간 이전에는 측정간격을 짧게 하였으며, 24시간 이후부터는 측정간격을 늘려가면서 최종 174시간까지 잔류염소를 측정하였다.

2.5. 관벽감소계수(k_{wall})

관벽에서의 반응속도에 영향을 미치는 인자는 반응에 이용 가능한 관벽의 면적과 수체에서 관벽으로의 물질전달율(rate of mass transfer)이다. 관벽의 면적은 단위체적당 표면적(surface area per unit volume)으로 표시되며, 물질전달계수(mass transfer coefficient)는 화학종의 분자확산율(mole-

cular diffusivity)과 Reynolds수에 의존한다. 관벽에서의 1차 반응을 가정하면 식 (3)과 같이 표시된다.

$$R_w = -\frac{k_f}{R_H}(C - C_w) \tag{3}$$

여기서, k_f 는 물질전달계수(mass transfer coefficient)이며, R_H 는 동수반경(hydraulic radius)이다.

관벽에서의 반응속도가 C_w 에 대해 1차 반응을 보이고, 물질이 관벽에 전달되는 것과 같은 속도로 진행한다고 가정하면, 관벽에서는 식 (4)와 같은 질량균형의 식이 성립한다.

$$k_f(C - C_w) = K_w C_w \tag{4}$$

여기서, K_w 는 관벽반응계수(wall reaction coefficient) 이다.

식 (3)과 (4)를 연립하여 풀면 식 (5)와 같은 관벽에서의 반응항이 구해진다.

$$R_w(C) = -\frac{K_w k_f C}{R_H(K_w + k_f)} \tag{5}$$

여기서, 물질전달계수는 무차원의 Sherwood수(Sh)의 향으로 식 (6)과 같다.

$$k_f = \frac{Sh D_m}{D} \tag{6}$$

여기서, D_m 은 화학종의 분자확산율(length²/time), D 는 관경이다.

Sherwood수는 층류의 경우 다음의 식 (7)과 같이 표시된다.

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668(D/L) Re S_c}{1 + 0.04[(D/L) Re S_c]^{2/3}} \tag{7}$$

여기서, Schmidt수(S_c)는 유체의 동점성계수(kinematic viscosity, ν)를 화학종의 확산율(diffusivity, D_m)로 나눈 값이다. 또한, 난류의 경우에는 Notter and Sleicher에 의해 식 (8)과 같이 정리된다.²⁰⁾

$$Sh = 0.0149 Re^{0.88} S_c^{1/3} \tag{8}$$

관벽에서의 잔류염소 감소계수를 추정하는 방법은 Table 2와 같다.¹⁹⁾ 본 연구에서는 systematic analysis method를 이용하여 관벽감소계수(k_{wall})를 도출하였다.

2.6. 관망구축

배·급수계통에서 수질을 모델링하기 위해서는 상수도관망의 수리학적 해석이 전제조건이며, 관망의 해석이 제대로 이루어져야 수질예측의 정확도를 높일 수 있다.¹⁵⁾ 기본적인 상수도관망의 해석모델은 수리학적인 변화에 초점을 맞추어 개발되어 왔으며, 수질변화를 예측하는 모델은 수리해석 모델을 기초로 하여 주로 잔류염소 농도 예측용으로 수질해석을 시도하였다. 일반적으로 송·배수관로의 수리해석 및 잔류염소 예측을 위한 관망해석 모델의 적용은 EPANET을 이용하고 있으며, 본 연구에서는 EPANET 2.0을 이용하여 관망해석을 실시하였다. Fig. 4는 상수도관망 해석을 위한 수리, 수질 모델링 절차를 나타낸 것이다. 잔류염소 예측을 위한 관망구축은 bottle test를 통해 도출된 수체감소계수(k_{bulk})와 systematic analysis method를 통해 도출된 관벽감소계수(k_{wall})를 적용하였다. 상수관망의 수리 및 수질예측에 대한 검증과 보정의 적합도는 예측의 목적에 따라 차이가 발생할 수 있으며, 상수관망의 특성상 관망을 골격화(skele-

Table 2. Determination methods of chlorine wall decay coefficients

Informal adjustment	The modeler may informally adjust the parameters relying upon experience and judgment to lead to an acceptable set of parameters. This method was most successful in systems dominated by the bulk decay where there was little wall demand.
Relationship between pipe characteristics and wall reaction rate constant	It may be postulated that certain physical pipe characteristics lead to increased wall demand. For example, pipes of a particular age or material may be more susceptible to uptake of chlorine at the wall or a relationship may exist between the roughness coefficient and wall demand.
Geographically zoned wall reaction rate coefficients	Pipe location may also serve as a surrogate for various factors that affect wall demand. Methods for grouping pipes and assigning and testing alternative wall demand parameters were used to derive best-fit parameters.
Heuristic method	The method starts at the point of entry of the water into the system with a bulk reaction rate coefficient based on bottle tests and first determines the best fit values for the pipes in the vicinity of the entry point, the method then moves downstream in an orderly manner determining best fit values along the way. Distribution systems with multiple sources or flow reversals are not very amenable to this approach.
Systematic analysis method	The chlorine decay bottle test data is analyzed using a nonlinear least squares regression software package to determine which kinetic model best describes the bulk decay reaction and to estimate bulk reaction rate coefficients for each water. In most cases, first order decay kinetics gave the best fit. A network modeling simulation is then performed using the bulk decay rate coefficient determined in bottle test. If the model over predicts the observed chlorine concentration, this is an indication that there is significant wall decay going on in the system.

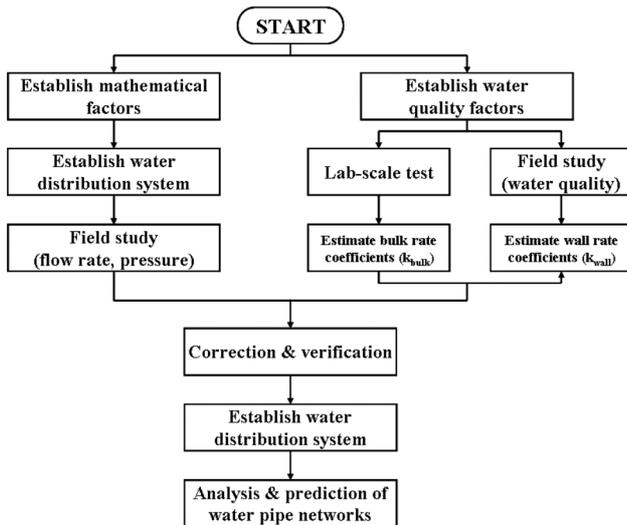


Fig. 4. Modeling procedures of chlorine residual in water distribution system.

ton)하는 범위에 따라 예측치의 적정범위가 달라질 수 있다. 수리해석의 경우 Mays는 수두손실의 15% 범위내로 예측하는 경우에는 수용가능(agree)하다고 제안한 바가 있으며,²¹⁾ 일반적으로 수리해석에 비해 수질의 변동성이 더 큰 것으로 판단하여 본 연구에서는 검증 및 보정 과정을 통하여 예측치와 실측치 농도의 표준오차가 20% 범위 이내에 들도록 완성하였다.²²⁾

2.7. THMs 분석

본 연구에서는 bottle test를 통해 배·급수관망에서의 소

Table 3. Analysis condition of THMs

Item		Note
Carrier	Gas	Nitrogen 29 mL/min,
	Initial temperature	35 °C
	Initial time	3 min,
Oven	Rate	4.0 °C/min,
		10.0 °C/min,
	Final temperature	220 °C
	Run time	30 min,
Detector	Type	Flame ionization detector
	Temperature	250 °C
Injector	Temperature	200 °C

Table 4. The composition of sampling and measuring points in study area

Measuring item \ Sampling points	YJ Pump Station	SP Water Reservoir	SY Water Reservoir	DA Water Reservoir	KA Water Reservoir	NH Water Reservoir
Length from YJ pump station (m)	0	15,857	22,418	30,659	39,216	40,254
pH	6.57	7.30	7.43	7.44	7.37	6.83
Temperature (°C)	8.4	8.5	8.0	8.1	7.7	7.3
Conductivity (µs/cm)	189.0	176.4	177.0	179.7	186.9	192.2
Residual Chlorine (mg/L)	0.68	0.59	0.57	0.55	0.50	0.44

독부산물(DBPs)의 거동을 예측할 목적으로 체류시간이 증가할수록 일정하게 증가하는 경향을 나타내는 THMs를 기준으로 하여 실험을 수행하였다. 소독부산물(DBPs)인 THMs는 160 mL의 bottle에 테프론 코팅이 되어있는 실리콘 마개와 알루미늄 캡을 이용하여 밀폐시키고 25 °C 조건에서 7일간 보관하여 측정하였다. THMs는 Galaxie 450 GC를 사용하였고, Aqua 70 vial auto sampler를 이용하여 주입하였다. 기기분석 조건은 Table 3과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 수질조사 결과

각 채수지점들의 현장 수질조사 결과를 Table 4에 정리하여 나타내었다. 대상지역의 YJ가압장을 시작으로 하여 NH배수지까지 관로 연장이 길어질수록 잔류염소가 감소하는 경향을 나타내고 있다. KA배수지와 NH배수지의 관로연장 차이는 크지 않으나 잔류염소의 농도가 각각 0.50 mg/L, 0.44 mg/L로 차이가 있는 것으로 조사되었다. 이는 관말까지의 체류시간 및 관벽감소계수(k_{wall})에 의한 영향으로 판단된다.

3.2. 수체감소계수(k_{bulk}) 도출

D정수장의 여과수를 이용하여 온도별 수체감소계수(k_{bulk})를 도출한 결과는 Fig. 5와 같다. 잔류염소 감소 경향을 살펴보면, 초기에 급격히 감소하므로 초기 염소요구량이 매

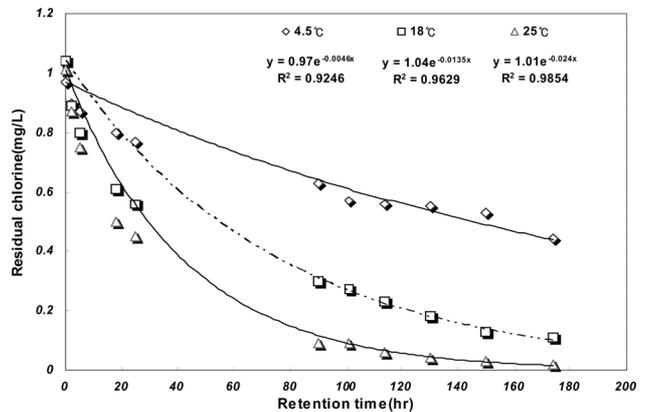


Fig. 5. Chlorine decay at different temperatures.

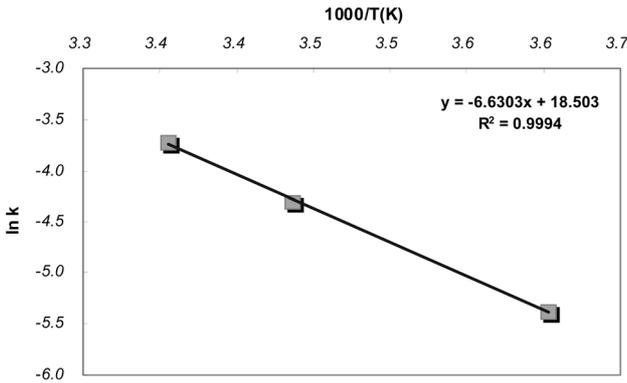


Fig. 6. Correlation of bulk decay coefficients and temperature by Arrhenius equation.

우 크다는 것을 알 수 있다. 그러므로 실제 정수장을 통해 나온 정수들은 정수지의 체류시간으로 인하여 어느 정도는 초기반응을 거친 상태라 할 수 있다.²³⁾

수체에서 잔류염소의 감소는 수중에 존재하는 피산화물에 의해 소모되는 잔류염소량을 의미하며, bottle test나 jar test를 통하여 시간에 따른 감소량을 1차 반응식을 통하여 산정한다.¹⁵⁾ 수체반응(bulk reaction)을 통한 잔류염소 감소는 화학적인 산화반응을 따르기 때문에 온도가 상승할수록 반응속도가 증가하는데, Powell은 Arrhenius equation을 통하여 온도변화에 대한 수체 잔류염소 감소계수의 증감을 적절하게 예측할 수 있음을 보고한 바 있다.¹⁷⁾

수온과 잔류염소의 수체감소계수(k_{bulk})에 대한 상관관계를 평가하기 위하여 Arrhenius equation을 이용하여 온도에 따른 감소계수의 상관관계식을 Fig. 6에 나타내었다.

3.3. 잔류염소 예측모델의 보정 및 검증

3.3.1. 관벽감소계수(k_{wall}) 설정

본 연구의 대상지역은 총인구 93,207명이 거주하고 실제 급수인구는 90,159명으로 96.7%의 보급률을 나타내고 있

다. 급수지역은 도수관로 4,400 m (PVC관 64.9%), 송수관로 29,159 m (덕타일주철관 55.5%), 배수관로 123,410 m (덕타일주철관 48.1%), 급수관로 298,270 m (스테인레스관 51.9%)로 총 455,239 m의 관로가 매설되어 있다.

관벽감소계수(k_{wall}) 도출을 위하여 자동수질측정기가 설치되어 있는 배수지를 기준으로 용수공급량 33,938 m^3/d 와 수온 11°C 조건의 수체감소계수(k_{bulk}) -0.1872 d^{-1} 를 입력하였고 구간별 실측값과의 비교를 통하여 관벽감소계수(k_{wall})를 추정하였다. Table 5는 잔류염소 감소계수의 실측값과 예측값의 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

3.3.2. 모델의 검증

보정된 관망도를 이용하여 용수공급량 32,190 m^3/d 와 수온 4.0°C 조건에서 배수지별 잔류염소의 실측값과 예측값을 검증한 결과를 Table 6에 나타내었다. 관벽감소계수(k_{wall})

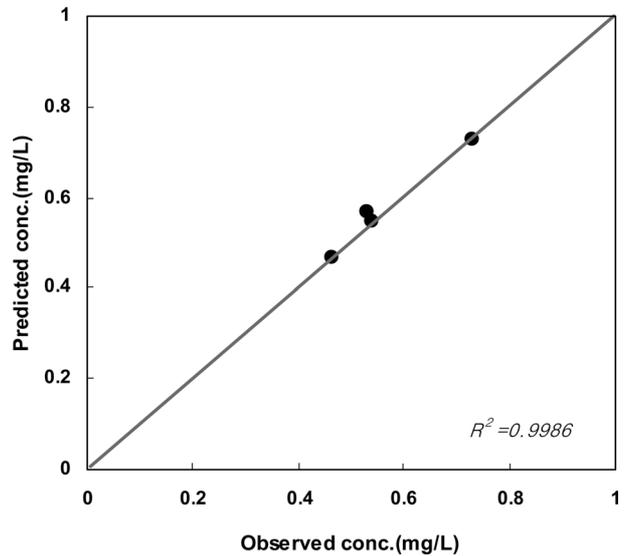


Fig. 7. Verification of residual chlorine prediction.

Table 5. Correction of chlorine decay coefficients

Section	Chlorine decay coefficient		Measured value (mg/L)	Predicted value (mg/L)	Retention time (hr)	Error (%)
	k_{bulk} (d^{-1})	k_{wall} (m/d)				
YJ P. S.*	—	—	0.79	0.79	—	—
SP W. R.**	-0.1872	-0.32	0.57	0.57	7.89	—
DA W. R.~SY W. R.		-0.12	0.59	0.59	9.43	—
M. P.***~DA W. R.		-0.05	0.51	0.51	13.22	—

* P. S. : Pump Station, ** W. R. : Water Reservoir, *** M. P. : Main Pipeline

Table 6. Verification of chlorine decay coefficients

Section	Chlorine decay coefficient		Measured value (mg/L)	Predicted value (mg/L)	Retention time (hr)	Error (%)
	k_{bulk} (d^{-1})	k_{wall} (m/d)				
YJ P. S.*	—	—	0.73	0.73	—	—
SP W. R.**	-0.1056	-0.32	0.53	0.57	7.26	-7.55
DA W. R.~SY W. R.		-0.12	0.54	0.55	9.90	-1.85
M. P.***~DA W. R.		-0.05	0.46	0.47	14.20	-2.17

* P. S. : Pump Station, ** W. R. : Water Reservoir, *** M. P. : Main Pipeline

보정결과를 바탕으로 실제 수온인 4.0°C를 Arrhenius equation에 적용하여 도출된 수체감소계수(k_{bulk}) $-0.1056 d^{-1}$ 를 적용하여 예측한 결과, SP배수지의 경우 예측값이 실측값에 비하여 약 7.55% 낮게 나타났으며, 그 외의 지점에서는 -2.17~1.85%의 오차를 나타내었다. 예측값과 실측값을 비교한 선형방정식의 결정계수(R^2)는 0.9986 (99.86%)으로 높은 설명력을 보였다(Fig. 7).

3.4. 재염소 지점 선정

관말 잔류염소의 적절한 관리를 위한 모의조건은 연중 잔류염소 관리가 가장 어려운 조건에서 예측하고 이를 극복할 수 있는 방안을 도출하여야 하기에 평균 용수공급량이 33,097 m³/d이고 수온이 25°C인 조건에서 잔류염소 감소를 모의하였다(Fig. 8).

용수공급현황에서 최악조건으로 모의한 결과 YJ가압장의 평균 잔류염소 농도를 0.76 mg/L로 운영하는 경우, SY배수지까지는 체류시간이 9.6 hr 소요되고 잔류염소는 0.49 mg/L로 예측되었다. 체류시간이 13 hr가 넘는 DA배수지와 KA 배수지 및 가장 긴 체류시간을 갖는 NH배수지까지의 잔류염소 농도는 각각 0.38, 0.36, 0.28 mg/L로 모의되었다. 『수도시설의청소및위생관리등의한규칙』 2조3항에 의하여 수도꼭지에서의 잔류염소는 항상 0.10 mg/L 이상이 되도록 정하고 있으며, 병원성 미생물에 의하여 오염되었거나 오염의 우려가 있는 경우에는 0.40 mg/L 이상이 되도록 규정하고 있다.³⁾ 따라서 주송수관로와 배수지의 잔류염소 관리기준이 별도로 정해져 있지는 않으나 배수지를 거친 후 배·급수관로, 옥내저수조 등에서의 추가적인 체류시간을 고려하여 배수지에서 약 0.40 mg/L 이상을 유지하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 SP배수지 분기 이후에서는 추가적인 염소주입이 필요할 것으로 판단되었다.

두 번째 공급조건인 SP배수지 이전의 주송수관로에서 NH가압장을 거쳐 KA배수지와 NH배수지로 수수하는 경우에 대하여 잔류염소를 모의한 결과, 체류시간이 10시간 이상인 DA배수지와 NH배수지는 각각 0.35, 0.36 mg/L로 모의되었다(Fig. 9). 첫 번째 운영조건에서 배수지 목표농도인 0.40

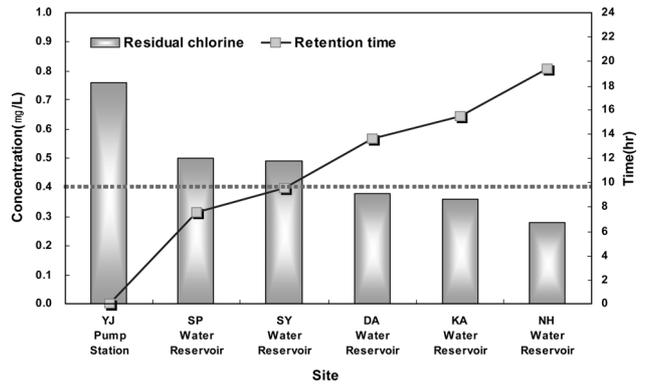


Fig. 8. Residual chlorine simulated results of the worst condition (First case).

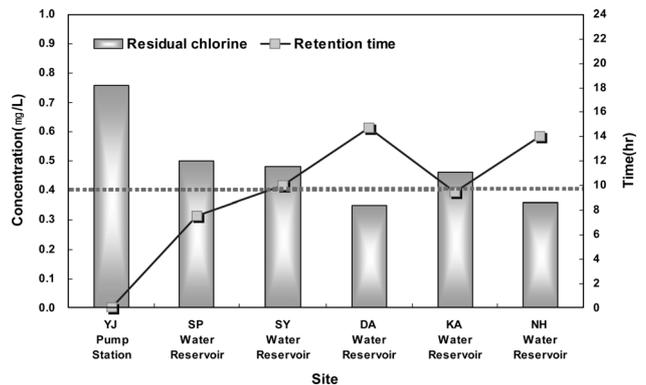


Fig. 9. Residual chlorine simulated results of the worst condition (Second case).

mg/L 미만인 KA배수지의 체류시간이 주송수관로와 NH가압장의 직접적인 통수로 인해 약 6시간 줄어들면서 잔류염소 농도가 0.40 mg/L로 유지되었으며, 이는 주송수관로와 NH가압장의 직접적인 통수가 잔류염소 확보에 유리한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 체류시간이 가장 긴 배수지인 NH배수지도 직접적인 통수가 이루어져 잔류염소가 0.36 mg/L까지 상승하는 것으로 나타났다. 반면에 DA배수지의 경우 약 4,000 m³/d의 용수가 연결 관로를 통하여 NH가압장으로 직접 공급됨에 따라 체류시간이 약 1시간 늘어나며

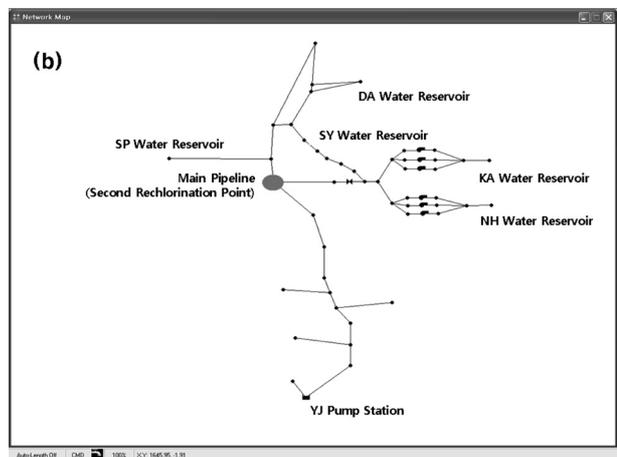
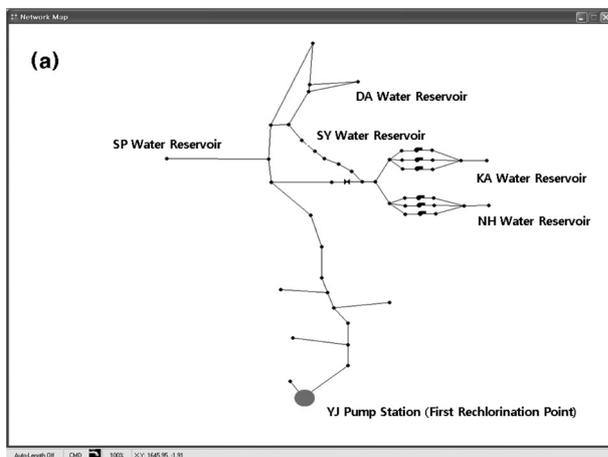


Fig. 10. Pertinent site of rechlorination; (a) first rechlorination point, (b) second rechlorination point.

Table 7. Chlorine residual concentration of each reservoir after rechlorination at YJ pump station

Section	First Case		Second Case		Condition
	Residual Chlorine (mg/L)	Retention Time (hr)	Residual Chlorine (mg/L)	Retention Time (hr)	
YJ P. S.*	1.07		0.86		
SP W. R.**	0.70	7.82	0.56	7.66	Flow rate : 33,097 m ³ /d
SY W. R.	0.68	9.84	0.54	10.10	
DA W. R.	0.54	13.82	0.40	14.77	Temperature : 25 °C
KA W. R.	0.51	15.64	0.52	9.51	
NH W. R.	0.40	19.61	0.41	14.09	

* P. S. : Pump Station, ** W. R. : Water Reservoir

잔류염소 농도가 0.01 mg/L 낮게 예측되었다. 따라서 주송수관로에서 NH가압장으로 직접적인 통수가 이루어지는 경우에는 잔류염소 확보가 가장 취약한 DA배수지에서 추가 염소가 필요할 것으로 예상되었다.

실측치 자료, 모의결과 및 관망도를 이용하여 Fig. 10과 같이 재염소 주입이 필요한 두 지점을 설정하였다. 두 번째 지점인 SP배수지 유입전 주송수관로는 관로상에 재염소 시설을 설치해야 하므로 어려움이 있지만, 재염소가 필요한 배수지의 가장 가까운 분기점으로써 두 번째 운영조건인 NH가압장과 직접적인 통수가 이루어질 경우 더욱 적절한 지점이라 할 수 있다.

3.5. 재염소 주입농도 산정

3.5.1. YJ가압장

YJ가압장을 재염소 지점으로 선정할 경우 첫 번째 운영조

건인 SP배수지를 거쳐 관말지점인 NH배수지까지 수수하는 경우에서 NH배수지의 잔류염소 농도를 0.40 mg/L 이상 유지하기 위해서 잔류염소를 1.07 mg/L 이상으로 높여야 할 것으로 예측되어 염소의 과농도에 의한 냄새 민원이 발생할 우려가 있다. YJ가압장의 잔류염소 농도는 평균 0.76 mg/L 이므로 추가적으로 주입해야 할 재염소 농도는 0.31 mg/L인 것으로 나타났다.

두 번째 운영조건인 D구역의 SP배수지 유입전 주송수관로와 NH가압장을 직접 연결하여 통수가 이루어질 경우, YJ가압장에서는 약 0.10 mg/L의 염소를 주입하여 0.86 mg/L로 유지하는 경우 DA배수지에서 0.40 mg/L의 잔류염소를 확보할 수 있을 것으로 예측되었다.

3.5.2. SP배수지 유입전 주송수관로

대상지역인 D구역의 유입경계부에서 첫 번째 배수지인 SP배수지 유입전의 주송수관로에 재염소를 시행할 경우, 체류시간이 가장 긴 NH배수지를 0.40 mg/L 이상으로 유지하기 위해서는 재염소 지점의 잔류염소 농도를 0.87 mg/L까지 높여야 할 것으로 예측되었다. 모의결과 SP배수지 유입전 주송수관로의 잔류염소 농도는 0.63 mg/L이였으며, 잔류염소 농도를 0.87 mg/L까지 높이기 위해서는 0.24 mg/L의 추가 염소주입이 필요할 것으로 모의되었다.

두 번째 운영조건인 SP배수지에서 주송수관로와 NH가압장을 직접 연결하여 통수하는 경우, 잔류염소가 가장 낮았던 DA배수지를 0.40 mg/L 이상으로 유지하기 위해서는 재염소 지점의 잔류염소가 0.71 mg/L 이상이 되어야 할 것으로 모의되었다. 잔류염소 농도를 증가시키기 위해서는 재염소 지점에서 0.08 mg/L의 추가 염소주입이 필요할 것으로 예측되었다.

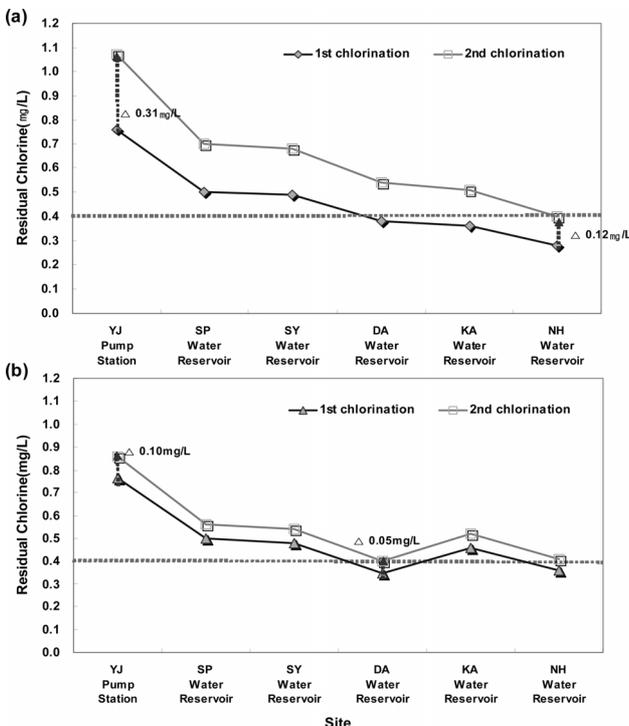


Fig. 11. Results of rechlorination in YJ pump station for (a) first and (b) second operate condition.

3.6. 재염소 주입에 따른 THMs 생성변화

3.6.1. 정수장 염소주입농도에 따른 THMs 생성변화

정수장에서의 초기 염소주입농도에 따른 THMs 생성변화를 관찰하기 위해 Fig. 13과 같이 염소의 주입농도를 각각 1.0, 2.0, 4.0 mg/L로 하여 THMs의 생성변화를 분석하였다. 그 결과, 세 가지 경우에서 모두 초기에 빠른 증가를 보였으며, 시간이 경과할수록 완만하게 증가하는 경향을 나타내었

Table 8. Chlorine residual concentration of each reservoir after rechlorination at main pipeline before SP water reservoir

Section	First Case		Second Case		Condition
	Residual Chlorine (mg/L)	Retention Time (hr)	Residual Chlorine (mg/L)	Retention Time (hr)	
YJ P. S.*	0.76		0.76		
Rechlorination Site	0.87		0.71		
SP W. R.**	0.69	3.34	0.56	3.22	Flow rate : 33,097 m ³ /d Temperature : 25℃
SY W. R.	0.67	5.53	0.54	5.87	
DA W. R.	0.53	9.83	0.40	10.90	
KA W. R.	0.51	11.83	0.51	5.22	
NH W. R.	0.40	16.18	0.41	10.18	

* P. S. : Pump Station, ** W. R. : Water Reservoir

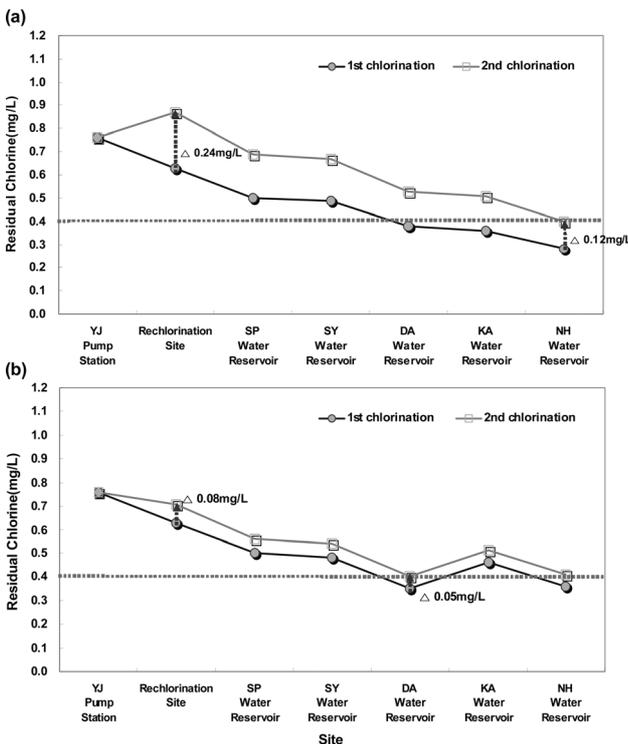


Fig. 12. Results of rechlorination at main pipeline before SP water reservoir for (a) first and (b) second operate condition.

다. 초기 염소를 4.0 mg/L로 주입한 시료는 시간이 흐를수록 THMs가 꾸준히 생성되어 7일이 경과한 후 약 86.0 µg/L까지 증가하였다.

3.6.2. 추가 염소주입에 따른 THMs 생성변화

대상지역에서 재염소 시설의 설치 가능한 지점은 YJ가압장과 SP배수지 유입전 주송수관로 두 지점이 적합한 재염소 지점으로 나타났으며, 첫 번째 운영조건에서 추가적으로 주입해야할 염소의 농도는 YJ가압장에서 0.31 mg/L, SP배수지 유입전 주송수관로에서 0.24 mg/L이었다. 이러한 모의결과를 기초로 하여 추가 염소주입에 따른 THMs 생성변화 실험을 수행한 결과 Fig. 14와 같다.

YJ가압장에서 재염소를 할 경우, 순간적으로 급격하게

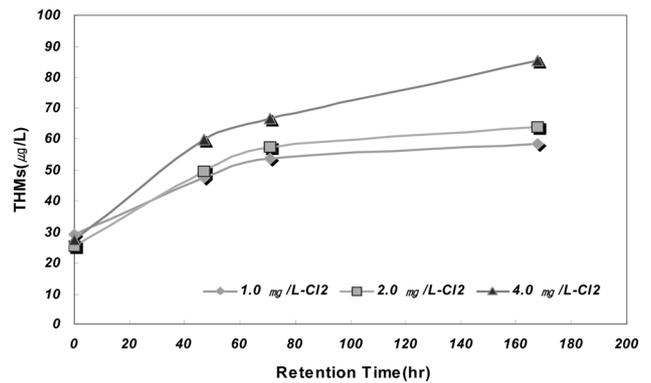


Fig. 13. Comparison of THMs formation according to initial chlorine application.

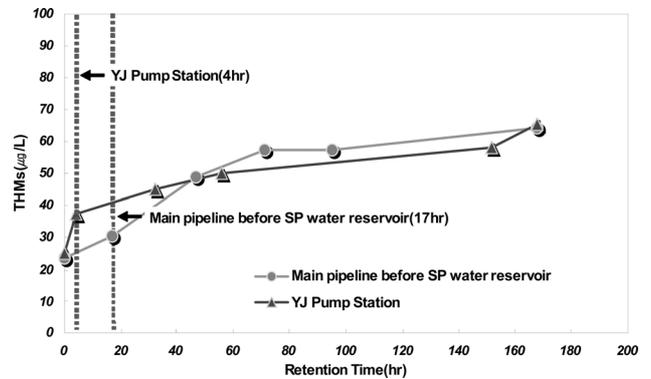


Fig. 14. Comparison of THMs formation by concentration of rechlorination.

THMs가 생성되는 것을 볼 수 있다. 반면에 SP배수지 유입전 주송수관로에서 재염소를 할 경우, 재염소 이후 THMs의 생성이 증가하다가 시간이 지날수록 서서히 증가하여 체류시간이 168시간일 때 약 64 µg/L로 측정되었다.

염소 주입농도에 따른 THMs 생성의 영향을 알아보기 위하여 재염소 시설을 설치할 수 있는 두 지점에 추가 염소주입농도를 1.0 mg/L와 2.0 mg/L로 주입하였을 경우에 대한 결과를 Fig. 15에 나타내었다. THMs 생성은 염소의 주입농도가 높을수록 많이 생성되었는데, 40시간 내외의 THMs 생성은 염소의 주입농도와 무관하게 비슷한 경향을 보였다. 그러나 시간이 경과함에 따라 염소주입농도가 클수록 THMs

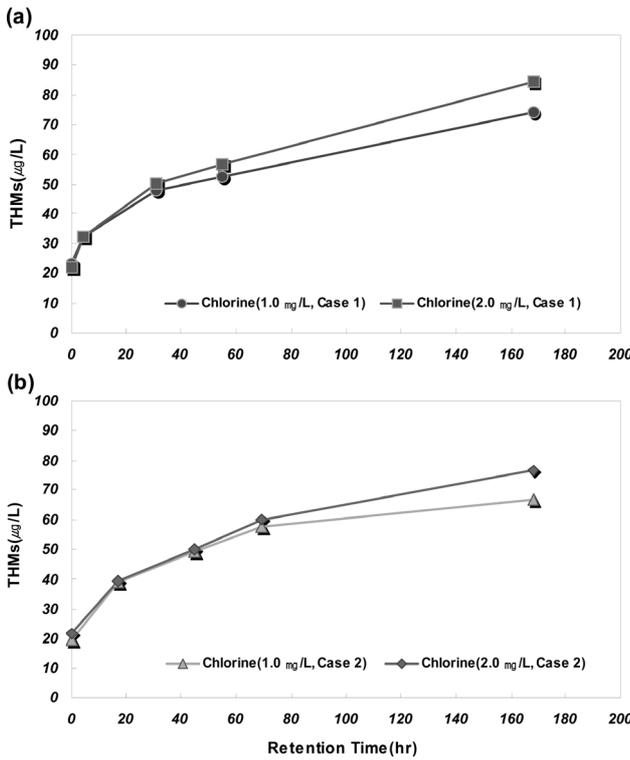


Fig. 15. Comparison of THMs formation by concentration of rechlorination: (a) YJ water reservoir (Case 1) and (b) main pipeline before SP water reservoir (Case 2).

생성이 많아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 THMs의 생성이 전구물질인 자연유기물질(Natural Organic Matter, NOM) 중에서 염소와 빨리 반응하는 부분이 있으며, 이러한 반응성이 강한 유기물질은 염소농도에 크게 영향을 받지 않고 어느 정도 염소가 존재하는 경우 반응이 빨리 일어나고 상대적으로 느린 속도의 반응을 보이는 유기물질은 염소농도가 충분한 조건에서 지속적으로 THMs를 증가시킨다는 것을 의미한다.¹¹⁾

Fig. 16은 추가 염소주입농도와 THMs 생성의 상관관계를 나타낸 것이다. 재염소 주입농도에 따라 THMFP의 경우 높은 선형상관관계를 나타내었다. 도출된 상관관계식을 이용하여 먹는물수질기준인 100 µg/L에 만족하는 최대가능 재염소 주입농도를 산정할 수 있으며, SP배수지 유입전 주송수관로를 재염소 지점으로 선정할 경우, 재염소 농도를 최대 6.00 mg/L까지 주입할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 YJ가압장을 재염소 지점으로 선정할 경우에는 최대 3.00 mg/L까지 추가 염소주입이 가능할 것으로 추정되었다.

3.7. 재염소 효과분석

상수관로에서 재염소 주입은 잔류염소 농도가 높은 지역에 비하여 수질안전성 차원에서 상대적으로 낮은 분포를 나타내는 상수관로 말단지역에 미생물 재성장 등의 2차 오염뿐만 아니라 수질을 균등하고 안정적으로 유지하기 위해 이용할 수 있는 방법이다. 또한 정수장에서의 염소 주입을 절감할 수 있으며, 상수관로 상에서 잔류염소 농도의 시간

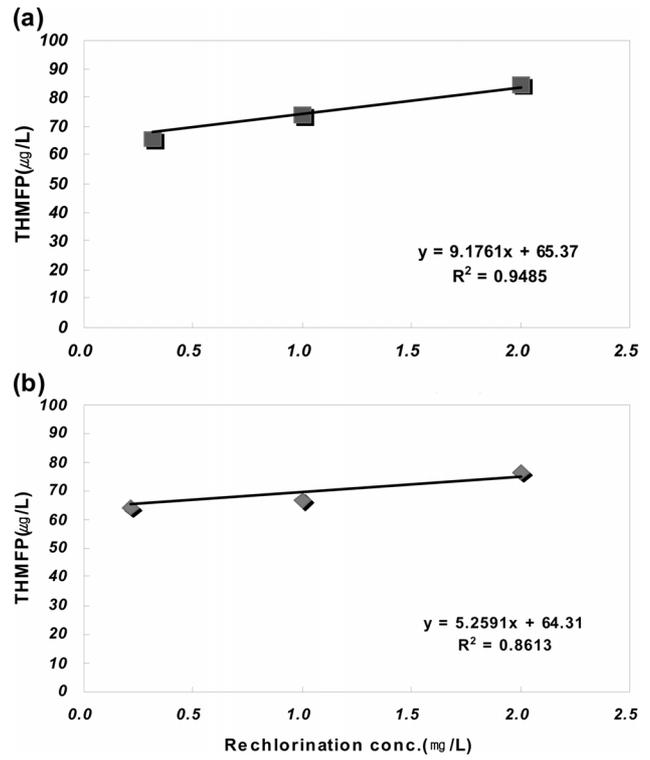


Fig. 16. Relationship with THMFP and rechlorination: (a) YJ water reservoir (Case 1) and (b) main pipeline before SP water reservoir (Case 2).

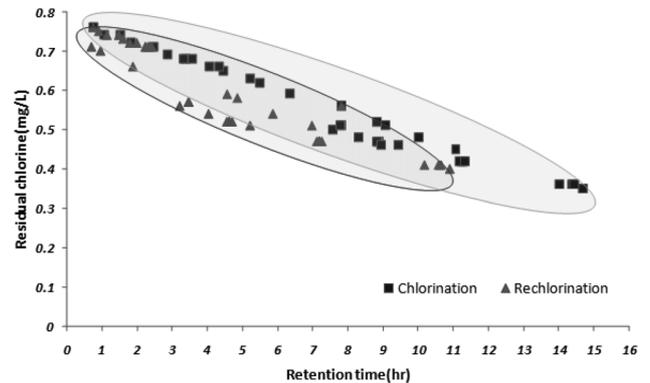


Fig. 17. Equalization of rechlorination in water distribution system.

적, 공간적 균등화를 이룰 수 있다. Fig. 17은 대상지역을 최악조건인 상태로 운영하였을 때 재염소 효과를 확인하고자 체류시간에 따른 잔류염소 농도의 분포를 나타내었다. 재염소를 시행하기 이전보다 시행하고 난 이후의 체류시간은 약 5시간 정도 줄어드는 것으로 나타났고 대상지역의 잔류염소 농도도 안정적인 분포를 보이는 것으로 변화하였다.

4. 결론

정수장에서 염소소독이 이루어진 최종 처리수를 소비자의 수도꼭지까지 안전하고 깨끗하게 공급하기 위해서는 정수장 및 배수지에서 뿐만 아니라 급·배수관망에서도 충분한

한 소독능이 확보되어야 한다. 본 연구에서는 배수지 및 급·배수관망의 잔류염소와 THMs를 예측하기 위해 수리해석을 통한 대상지역의 관망도를 구축하였으며, lab-scale의 초기 염소주입과 재염소 주입에 따른 잔류염소 및 THMs 거동에 관한 연구를 수행하였고 재염소 효과에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 수체감소계수 도출 실험결과 온도가 높을수록 초기에 빠른 감소를 보였고, 25℃의 경우 25시간이 경과한 이후 잔류염소가 절반이상 감소되었다.

2) THMs는 초기에 급격히 생성하였으며, 염소의 주입농도와 무관하게 증가하는 경향을 보였으나 시간이 경과함에 따라 염소의 주입농도가 높을수록 THMs는 증가를 하였다.

3) 추가 염소주입에 대한 THMs 생성능을 실험한 결과, 초기에 빠른 염소의 소모가 이루어진 이후 염소를 주입하는 것이 THMs 생성 억제에 효과가 있으므로 SP배수지 유입 전 주송수관로에 추가 염소주입 시설을 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

4) SP배수지 유입 전 주송수관로를 재염소 지점으로 선정할 경우, 두 가지 운영조건에서 추가 염소주입 농도는 각각 0.24 mg/L와 0.08 mg/L으로 모의되었으며, THMs의 상관관계를 통해 최대 재염소 농도를 6.00 mg/L까지 주입할 수 있는 것으로 예측되었다.

5) 대상지역에 재염소 시설을 설치할 경우, 체류시간은 약 5시간 이상 줄어들고 정수장에서부터 관말 배수지까지 잔류염소 농도는 균등하게 분포되어 시간적, 공간적인 균등화 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상되었다.

6) 광역화 되어가는 급·배수관망에서 수리해석을 통한 관망도를 구축하여 수질모의가 가능하도록 하고 그것을 이용하여 잔류염소 농도 및 재염소 주입농도와 시기를 예측할 수 있다는 것을 제시한 것에 의의가 있다.

사 사

본 연구는 수처리선진화사업단(환경부 ECO-STAR Project 12WATERTECH 09-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

- 손희중, 정철우, 강임석, “상수원수중의 천연유기물질 특성과 염소 소독부산물 생성의 관계,” 대한환경공학회지, **26**(4), 457~466(2004).
- 안재찬, 이수원, 노방식, 최영준, 최재호, 김효일, 박태준, 박창민, 박현, 구자용, “배급수계통에서 잔류염소 및 THMs 분포 예측에 관한 연구,” 대한환경공학회지, **29**(6), 706~714 (2007).
- 환경부, “수도시설의청소및위생관리등에의한규칙”, (2009).
- Clark, R. M., Rossman, L. A. and Wymer, L. J., “Modeling distribution system water water quality: Regulatory implications,” *J. Water Res. Plng, and Mgt. ASCE*, **121**(6), 423~428(1995).
- Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G. and Summers, R. S., “A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions,” *Water Res.*, **37**(11), 2654~2666(2003).
- Clark, R. M., Yang, Y. J., Impellitteri, C. A., Haught, R. C., Schupp, D. A., Panguluri, S. and Krishnan, E. R., “Chlorine fate and transport in distribution systems: Experimental and modeling studies,” *J. AWWA*, **102**(5), 144~155(2010).
- Trehy, M. L. and Bieber, T. I., “Detection, identification, and quantitative analysis of dihaloacetonitriles in chlorinated natural waters,” in *Advances in the identification and analysis of organic pollutants in water*, vol. 2, L. H. Keith, Ed., Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers, Inc., 941~975(1981).
- Rossman, L. A., Brown, R. A., Singer, P. C. and Nuckols, J. R., “DBP formation kinetics in a simulated distribution system,” *Water Res.*, **35**(14), 3483~3489(2001).
- Craun, G. F., Craun, M. F., Calderon, R. L. and Beach, M. J., “Waterborne outbreaks reported in the United States,” *J. Water and Health*, **4**(2), 19~30(2006).
- Kim, J. S., Chung Y., Shin D. C., Kim M. S., Lee Y. H., Lim Y. W. and Lee D. H., “Chlorination by-products in surface water treatment process,” *Desalination*, **151**(1), 1~9 (2003).
- 이종민, “재염소주입에 따른 관망내 잔류염소 및 트리할로메탄의 거동에 관한 연구,” 국민대학교 석사학위논문 (2004).
- 환경부, “상수도시설기준”, (2004).
- 윤재홍, 오정우, 최영송, “배수관망의 잔류염소 평활화를 위한 최적 재염소 처리,” 대한상하수도학회지, **12**(2), 90~98 (1998).
- 정창호, “배수관망에서 잔류염소 제어 및 소독부산물 예측기법 개발,” 국민대학교 석사학위논문(2008).
- Rossman, L. A., “EPANET 2 User Manual,” National risk management research laboratory, Office of research and development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH(2000).
- Biswas, P., Lu, C. S. and Clark, R. M., “A model for chlorine concentration decay in pipes,” *Water Res.*, **27**(12), 1715~1724(1993).
- Powell, J. C., Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F. and Simms, J., “Factors which control bulk chlorine decay rates,” *Water Res.*, **34**(1), 117~126(2000).
- Rossman, L. A., Clark, R. M. and Grayman, W. M., “Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems,” *J. Environ. Eng.*, **120**(4), 803~820(1994).
- Vasconcelos, J. J., “Characterization and modeling of chlorine decay in distribution systems,” American Water Works Association Research Foundation(1996).
- Notter, R. H. and Sleicher, C. A., “The eddy diffusivity in

- the turbulent boundary layer near a wall?," *Chem. Eng. Sci.*, **26**, 161~171(1971).
21. Mays, L. W., "Water distribution systems handbook," McGraw-Hill(2000).
 22. U.S. Environmental Protection Agency, "Water distribution system analysis: Field studies, modeling and management, Office of research and development, National risk management research laboratory, Water supply and water resources division, Cincinnati, OH(2005).
 23. 이동석, 민병섭, 박선구, 김정화, 류재근, "정수장에서 소독 부산물의 생성특성," *한국물환경학회지*, **20**(1), 55~62(2004).