

Rechlorination for residual chlorine concentration equalization in distribution system

급배수시스템에서 잔류염소 농도 균등화를 위한 재염소 처리

Jinkeun Kim* · Ji-An Han

김진근* · 한지안

제주대학교 환경공학과

Abstract : Three water treatment plants(WTPs) in Jeju island whose source water have different characteristics from those of the mainland of Korea were investigated. Coefficients of bulk water decay(k_b) of free chlorine at 5 °C for ES, GJ, NW WTPs were -0.003 hr^{-1} , -0.002 hr^{-1} and -0.001 hr^{-1} respectively based on bottle tests.

To simulate the free chlorine variations in the distribution system using EPANET, ES WTP was chosen. Free chlorine concentrations of several sites were less than the drinking water quality standards(i.e., 0.1 mg/L); E5(0.03 mg/L), E6(0.02 mg/L), W21(0.02 mg/L) and W25(0.03 mg/L). To maintain more than 0.1 mg/L of free chlorine in the distribution system, at least 1.9 mg/L of chlorine was needed at the WTP, which suggested rechlorination was needed to supply palatable tap water to customers.

Two sites, one that diverged into E5 and E6 in the east-line and another located before E21 in the west-line were selected for the appropriate rechlorination locations. The recommended rechlorination dosages were 0.42 mg/L for the east and 0.27 mg/L for the west. The simulated results indicated that the free chlorine could be reduced to 0.4 mg/L at the WTP with rechlorination, and taps with excessive free chlorine could be more stabilized(i.e., 0.1 ~0.4 mg/L).

Key words : tap water, residual chlorine, distribution system, bulk decay, wall decay

주제어 : 수돗물, 잔류염소, 급배수시스템, 수체감소, 관벽감소

1. 서론

안전한 수돗물의 생산공급을 위해 정수처리 공정에서 염소 소독에 의한 미생물의 불활성화(in-activation)는 필수적인 요소이다. 2002년 환경부에서 제정한 정수처리 기준에 의하면 바이러스와 지아디아의 불활성화 목표는 각각 4 log, 3 log 이상이며 이는 각각 99.99 %, 99.9 %의 불활성화율에 해당된다(MOE, 2014).

병원성 미생물은 대부분 일정한 크기를 갖는 입자성 물질로 일반적인 정수처리공정에서 여과 공정을 통해 일부 불활성화가 가능하지만 충분한 안전성 확보를 위해서는 후속되는 소독공정에서 일정한 소독능(CT 값)을 유지하여 한다. 국내 정수장에서는 충분한 소독능 확보를 위하여 원수의 수질, 전처리 및 정수지내 도류벽 설치 유무 등에 따라 차이는 있지만 일반적으로 정수지에서 유리 잔류염소를 1.0 mg/L 내외, 체류시간을 2 ~ 5시간 정도 유지하고 있다(KWWA, 2010).

적정 잔류염소 농도의 유지는 수돗물 공급과정에서의 2차 오염 제어와 미생물 재성장 억제를 위

* Received 14 January 2014, revised 10 February 2014, accepted 13 February 2014.

* Corresponding author: Tel : +82-64-754-3448 Fax : +82-64-725-2483 E-mail : kjinkeun@jejuu.ac.kr

해서도 반드시 필요하다. 특히 국내 수도물 공급 시스템은 전국 평균 누수율이 15 % 수준으로 단수 등 급배수과정에서 수압이 저하될 경우 상수관로내로 다양한 오염물질이 유입될 수 있는 문제점을 갖고 있다(MOE, 2013).

최근 국내 정수장에서는 공급과정에서의 누수율을 저감하고 수도물 수질개선, 안정적 수량 공급 등을 위하여 공급관로를 기존의 수지상(樹枝狀)에서 루프형으로 전환하고 있으나, 아직도 많은 지역의 공급관로는 수지상 형태를 하고 있다. 수지상의 수도관망 시스템과 휘발성을 갖는 염소 소독제의 특성상 염소 소독이 실시되는 정수장 인근에서는 고농도의 잔류염소가 검출되고 관말 지역에서는 잔류염소가 낮아지게 된다.

국내 수도물에서 잔류염소의 법적 수질기준은 0.1 mg/L ~ 4.0 mg/L이며, 최종 수도꼭지에서 잔류염소 농도를 0.1 mg/L 이상으로 유지하기 위해 정수장에서 1.0 mg/L 이상으로 유지하는 경우도 발생하고 있다. 이 경우 많은 지역에서 높은 잔류염소 냄새로 인해 수도물 음용을 기피하게 된다. 또한 고농도의 잔류염소는 소독 부산물의 농도도 증가시키는 부작용이 있다. 수도사업자는 병원성 미생물의 불활성화, 법정 잔류염소 농도 유지, 소독부산물 관련 기준 준수, 이취미 발생 저감의 4가지 목적을 동시에 이루는 방향으로 잔류염소 농도를 관리하여야 한다(Uber et al., 2003). 따라서 정수장에서 생산된 고품질의 수도물을 소비자가 쾌적하게 이용하기 위해서는 충분한 소독능이 확보되고, 법적 최소 잔류염소 기준이 만족되는 조건에서는 잔류염소 농도를 최대한 낮게 유지하는 것이 바람직하다.

수도물에 대한 주민의식 조사 결과 수도물에 냄새가 나서 음용을 기피한다는 의견이 2005년 26.3 %에서 2008년 19.5 %로 낮아졌는데, 이는 한국상하수도협회에서 2005년 수립한 맛있는 물 수질기준 수립방안 연구결과를 토대로 2006년 환경부에서 수도물의 잔류염소 최소 기준을 0.2 mg/L에서 0.1 mg/L로 완화한 영향도 있을 것으로 판단된다(MOE, 2006). 잔류염소 농도

를 완화한 배경에는 염소냄새 저감뿐만 아니라 2002년부터 정수처리기준이 시행되어 정수장에서 충분한 소독능이 유지되어 수도물의 안전성이 향상되어 가능했다고 판단된다.

일본의 유리잔류염소 국가 기준은 0.1 mg/L ~ 1.0 mg/L이나, 동경도는 안전하고 맛있는 물 공급을 위하여 공급과정에서 수도물의 잔류염소 농도를 0.1 ~ 0.4 mg/L 범위내로 유지하기 위하여 노력해왔다. 2011년 동경도는 수도물 수도꼭지 기준으로 55 %에서 자체 목표를 달성하였으며, 2015년에는 91 %, 2016년에는 전 지역에서 기준 만족을 목표로 하고 있다(TMG, 2014).

국내에서도 대규모 수도사업자를 중심으로 공급과정에서의 잔류염소 농도 저감 및 균등화를 위한 노력을 강화하고 있다. K-water는 정수장에서의 잔류염소 농도 상한값을 1.0 mg/L로 설정하여 운영하고 있으며, 서울시는 2010년부터 배수지를 중심으로 염소 분산 주입 시설을 설치하여 공급과정에서의 잔류염소 농도 균등화를 위하여 노력하고 있다(K-water, 2014; SMG, 2014)

수도물 공급과정에서의 잔류염소 농도 변화 특성과 관련하여 Ahn et al. (2007)은 서울시 배급수계통에서의 잔류염소 농도 분포, 시간적인 잔류염소 변화 등을 분석하였으며, Kim et al. (2010)은 공급과정에서 적정 잔류염소 확보를 위한 재염소 시스템의 적용을 팔당호를 취수원으로 하는 정수장을 대상으로 연구하였다. 또한 Yoo et al. (2003)은 EPANET을 이용하여 인천지역 수도물 공급과정에서의 잔류염소 거동을 예측하였다. 한편, 이전의 국내 연구는 모두 지표수를 대상으로 실시하여 대부분의 상수원을 지하수원에 의존하는 제주도의 경우와는 일정 부분 차이가 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 수도물 공급과정에서의 고농도 잔류염소 농도 유지로 발생할 수 있는 염소 냄새와 소독부산물 농도 등을 줄이기 위하여 공급과정에서의 잔류염소 농도를 저감하고 균등화하는

방안을 연구하였다. 이를 위해 lab test를 통해 도출한 수체감소 계수와 systematic analysis method로 도출한 관벽감소 계수를 이용하여 대상지역의 잔류염소 저감 및 균등화를 위한 재염소 주입시설의 필요성에 대해 검토하였으며, 시설 설치가 가능한 지점을 선정하고 재염소 주입량 및 잔류염소 농도 변화에 대해 고찰하였다.

2. 연구대상 및 분석방법

2.1 연구대상

본 연구는 제주도 지역을 대상으로 실시하였으며 제주도의 상수원은 국내 육지부와는 다르게 대부분 지하수 또는 용천수에 의존하고 있다. 제주도에는 16개의 정수장이 있으며(Jeju Province, 2014; MOE, 2013), 이중 지하수, 용천수, 지표수의 원수 수질을 대표하는 3개 정수장을 선정하여 수체에서의 잔류염소 감소특성을 고찰하였다. 또한, 지표수를 수원으로 하는 ES 정수장의 공급 관로를 대상으로 공급과정에서의 관벽에 의한 잔류염소 농도 감소 특성, 수돗물 공급과정에서의 잔류염소 농도 저감 특성 및 재염소 주입 방안 등을 EPANET을 활용하여 고찰하였다.

Table 1은 연구대상인 3개 정수장의 현황을 나타내고 있으며, 처리수의 수질은 2012년 매월 실시한 월간 정수 수질검사 결과를 나타내고 있다(Jeju Province, 2014). 특히, 유기물 지표인 과망간산칼륨 소비량의 경우 NW, GJ 정수장에서는 불검출되었으며, ES 정수장에서도 소

량 검출되어 전체적으로 유기물의 농도가 낮은 것으로 나타났다. 잔류염소 감소특성 분석을 위한 수체감소 계수는 Table 1의 3개 정수장을 대상으로 분석하였으며, 공급과정에서의 관벽감소 계수 산정은 ES 정수장 공급계통만을 대상으로 실시하였다.

ES 정수장의 급배수관망은 제주도내에서는 상대적으로 장대관로이며, 중간 조절지가 없이 정수장에서 자연유하로 공급되는 방식이다. 또한 급배수 관로가 다른 정수장의 공급계통과 대부분 분리되어 있는 점도 연구대상으로 선정할 이유 중의 하나이다.

2.2 분석방법

1) 수체감소 계수(bulk decay coefficient)

수중에 주입된 염소의 감소반응은 1차 반응으로 표현할 경우 아래의 식으로 단순화 할 수 있으며, 실제 반응에서는 시료수의 특성에 따라 1차 반응이 아닌 다양한 방정식으로 표현될 수도 있다. 아래의 식에서 k_b , k_w 가 시스템 내에서 동일해도 k 는 물질전달계수, 관경 등의 영향을 받으므로 구간별로 상이할 수 있다(Rossmann et al., 1994; Powell et al., 2000).

$$C_t = C_0 \exp(-kt)$$

$$k = k_b + \frac{2k_w k_f}{R(k_w + k_f)}$$

Table. 1. Specifications of water treatment plants(WTPs)

WTP	ES	NW	GJ
source	surface water	groundwater	spring water
capacity(m ³ /d)	15,000	37,000	25,000
treatment processes	slow filtration + chlorination	chlorination only	rapid filtration + chlorination
treated water quality(mg/L)			
- Fe	ND	ND	ND
- Mn	ND	ND	ND
- KMnO ₄ consumption	ND ~ 0.7	ND	ND
- NH ₃	ND	ND	ND
disinfectant		Ca(OCl) ₂	

여기서, C_t = 시간 t 에서 잔류염소 농도(M/L^3), C_o = 초기 잔류염소 농도(M/L^3), k = 잔류염소의 총감소 계수(T^{-1}), k_b = 수체감소 계수(T^{-1}), k_w = 관벽감소 계수(L/T), k_f = 물질전달 계수(L/T), R = 관의 반지름(L)이다.

수체감소는 수중에 존재하는 피산화물질에 의해 소모되는 염소량을 의미하며, bottle test 또는 jar test를 통하여 시간에 따른 감소량을 1차 반응식을 통하여 산정할 수 있다. 대표적인 피산화물질로는 용존 유기물질이 있으며, 암모니아질소, 철, 망간 등의 무기물질에 의해서도 소모될 수 있다(Fisher et al., 2011).

실험실 조건에서의 수체감소 계수 도출을 위하여 Table 1에 표시된 3개 정수장에서 염소 소독 전에 채수한 시료를 대상으로 3가지 온도 조건에서 serum bottle(70 mL)을 이용하여 bottle test를 실시하였다. 시료병은 질산세척 후 초순수로 깨끗이 씻고 120 °C에서 2시간 건조 후 사용하였으며, 시료 59 mL를 채우고 NaOCl을 이용하여 유리잔류염소 농도를 1 mg/L로 주입한 후 밀봉하고 온도조건을 5 °C, 15 °C, 25 °C로 설정한 배양기를 이용하여 일정한 온도 조건에서 실험을 실시하였다.

각 온도별로 145 hr까지 일정 간격으로 잔류염소 농도를 측정하였다. 반응시간이 증가함에 따라 잔류염소 감소가 완만해지므로 24시간 이전에는 측정간격을 짧게 하고, 24시간 이후에는 측정간격을 늘려가면서 최종 145시간까지 유리잔류염소를 측정하였다. 이를 통해 도출된 3개 온도에서의 수체감소 계수 값에 Arrhenius equation을 적용하여 실제 공급과정 수온에서의 수체감소 값을 추정하였다(Powell et al., 2000). 한편, 유리잔류염소 농도는 HACH사의 pocket colorimeter II를 이용하여 DPD법으로 측정하였다.

2) 관벽감소 계수(wall decay coefficient)

잔류염소는 수체와의 반응뿐만 아니라 수돗물 공급과정에서 관벽(pipe wall), 생물막, 부식

생성물 등에 의해서도 소모될 수 있는데 수체반응에 의한 손실을 제외한 이러한 유리 잔류염소의 감소요인을 총괄적으로 관벽감소라고 한다. 관벽감소 반응에 영향을 미치는 인자로는 관재질 및 관경, 초기 잔류염소 농도, 부식, 생물막 등이 있다(Mays, 2000). 일반적으로 수돗물 공급과정에서 실측한 잔류염소 농도 저감 부분 중 수체감소에 의한 부분을 제외한 모든 부분을 관벽감소에 기인하는 것으로 간주하고 있으나, 관 자체에서의 염소 소모량을 측정하기 위한 연구도 다수 수행되었다(Lee et al., 2013; Hallam et al., 2002).

관벽감소 계수 도출을 위한 방법으로는 informal adjustment, heuristic method, systematic analysis method 등을 고려할 수 있는데 본 연구에서는 조건의 제약을 적게 받으며 적용가능 범위가 비교적 넓은 추정법인 systematic analysis method를 이용하여 관벽감소 계수를 도출하였다. 국내에서는 Kim et al.(2010)이 systematic analysis method을 이용하여 관벽감소 계수를 도출하여 현장에 적용한 사례가 있다.

2.3 EPANET 모델링

연구 대상인 ES 정수장 급배수계통에서의 관경, 관의 길이, 고도, 용수공급량 등 관로에 대한 수리해석을 시행하고 그 결과를 바탕으로 EPA-NET2.0로 관망도를 구축하였다(Fig. 1 참조). 또한 현장에서의 실측 잔류염소 농도와 EPA-NET2.0로 모의한 해당 지역 예측 잔류염소 농도를 비교하여 관벽감소 계수를 구하였다. EPA-NET은 시간변화 모의를 바탕으로 수리 및 수질 해석 등의 다양한 해석이 가능하도록 USEPA에서 개발한 관망해석 프로그램이다. EPANET에서 구성되는 관망은 관, 노드, 펌프, 밸브, 저장탱크, 배수지 등으로 구성된다. EPANET은 개별 관의 물의 흐름, 개별 노드에서의 수압, 탱크의 표고와 잔류염소 등을 모의할 수 있다(USE-

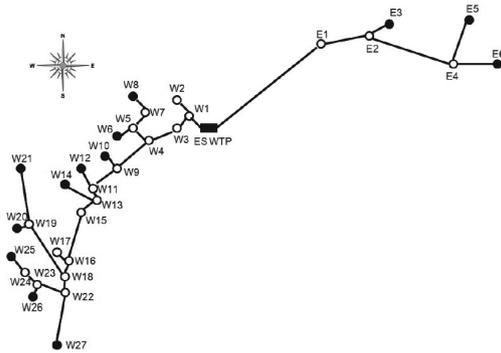


Fig. 1. Water network at ES distribution system(open circles represent pipe nodes, solid circles represent chlorine measurement locations, and numbers represent pipe numbers).

지표수를 상수원으로 하는 ES 정수장의 경우 초기 잔류염소의 감소 경향이 뚜렷하게 나타났으며, GJ 정수장의 경우도 유사한 반응을 보였다. 두 정수장은 염소를 소비할 만한 피산화물을 어느 정도 함유하고 있는 것으로 판단할 수 있다. ES 정수장의 경우 완만한 곡선형으로 25 ℃에서 절반의 잔류염소 소비까지 약 75 시간이 걸렸으며 초기 2.5시간 전에 급격한 잔류염소 소모(20 % 감소)가 이루어졌다. 그러나 지하수를 상수원으로 하는 NW 정수장의 경우에는 직선형에 가까운 그래프를 나타내며 25 ℃에서 100시간에 도달할 때까지 염소 감소량이 초

PA, 2014; Cha and Kim, 2012).

ES 정수장은 2012.12월 기준으로 2,377세대, 50개 목장 및 42개의 시설에 용수를 공급하며, 공급계통은 정수장을 중심으로 동부 26.8 km와 서부 21.4 km의 간선을 중심으로 여러 지선들로 구성되어 있다. 공급과정은 배수지 또는 중간 가압장 없이 자연 유하식으로 운영되고 있다.

구축된 관망도에 잔류염소의 수체감소 계수와 관벽감소 계수를 입력하고 실제 용수공급량과 수온에 따른 주요 지점별 잔류염소 농도를 예측함으로써 대상지역의 재염소 시설 설치의 필요성과 재염소 시설 설치에 따른 잔류염소 농도 변화에 대해서 모의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수체감소 계수 도출

3개 정수장에서 수온별 잔류염소 수체감소 계수 도출을 위한 실험 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 잔류염소는 전반적으로 반응 초기에 급격한 감소를 보이고 이후 완만하게 감소하였으며, 온도가 높을수록 감소량도 증가하였다. 실제 수도물 공급과정에서는 염소 소독 후 정수지에서 적정 소독능 확보를 위해 약 2 ~ 5시간의 체류시간을 가지므로 초기의 급격한 수체반응은 실제 공급과정 이전에 발생할 수도 있다.

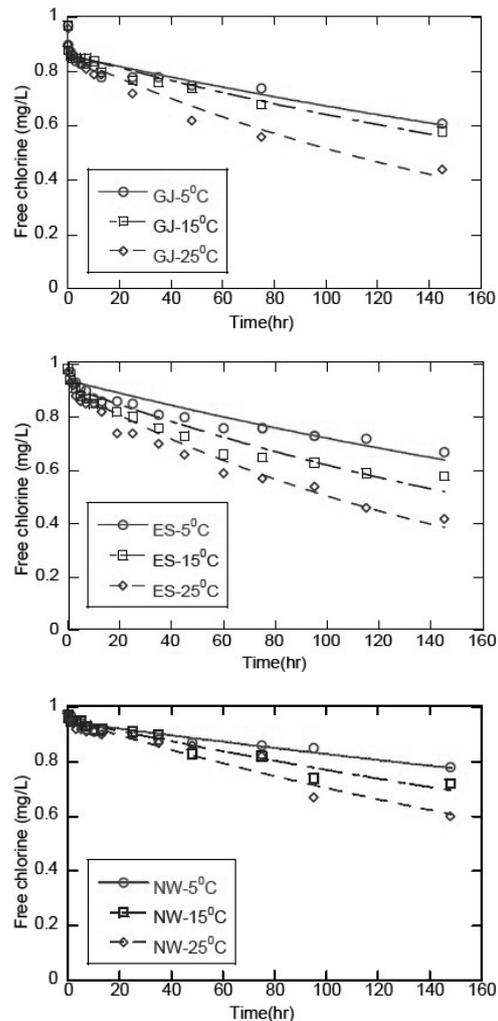


Fig. 2. Bulk water decay at different water temperature.

기 염소 농도의 31 % 정도에 불과하였다. 이는 ES 정수장에 비해 염소에 의한 피산화물질의 농도가 낮기 때문이며 NW 정수장의 원수인 지하수는 토양층을 통과하며 대부분의 유기물이 제거되어 염소를 소비할 만한 물질의 함량이 매우 낮아서 발생하는 현상으로 판단된다. 수체감소 반응이 1차 반응을 한다는 가정하에 실험을 통해 얻어진 수체감소 계수는 Table 2와 같다. 한편, USEPA(1992)에서 제안한 water treatment plant model에서는 수체감소반응은 0 ~ 5 min 사이에는 0차 반응, 5 min ~ 5 hr는 2차 반응, 5 hr 이상에는 1차 반응으로 정의하였으며 (Ulber et al., 2003), Rossman et al.(1994)은 수체감소 반응이 1차 반응을 만족스럽게 따른다고 보고하였다.

한강을 수원으로 하는 정수장의 수체감소 계수가 25 °C에서 평균 0.0184 hr⁻¹로 ES 정수장에 비해 3배 높은 값을 보였으며(Ahn et al., 2007), 팔당호를 대상의 연구에서는 25 °C에서 0.024 hr⁻¹로 ES 정수장과 비교하여 약 4배 높은 값을 나타냈다(Kim et al., 2010). 이는 제주도 정수장의 원수가 육지부에 비해 상대적으로 염소의 피산화물질의 농도가 낮음을 의미한다.

한편 Rossman et al.(1994)의 연구에서는 bottle test를 통해 구한 수체감소 계수를 0.55 d⁻¹(0.023 hr⁻¹)로 적용하였으며, Powell et al.(2000)은 다양한 문헌으로부터 수체감소 계수의 실험결과 값을 정리하여 제시하였는데 10회의 실험을 실시한 AWWARF의 보고서에서는 0.01 ~ 0.74 hr⁻¹, 3회의 실험을 실시한 Zhang et al.의 경우에는 0.07 ~ 0.11 hr⁻¹로 제시하였다. 이는 본 연구뿐만 아니라 국내에서 도출된 실험값과 비교하여 비슷하거나 높은 수준이며, 피산화물질의 농도 차이 등에 기인한 것으로 판단된다.

수체반응을 통한 잔류염소 감소는 온도가 상승할수록 증가하는데, Powell et al.(2000)은 Arrhenius equation을 통하여 온도변화에 대한 수체 잔류염소 감소 계수의 증감을 적절하게

Table 2. Bulk water decay coefficients(k_b) at different water temperature.

WTP	5 °C	15 °C	25 °C
ES	-0.003	-0.004	-0.006
NW	-0.001	-0.002	-0.003
GJ	-0.002	-0.003	-0.006

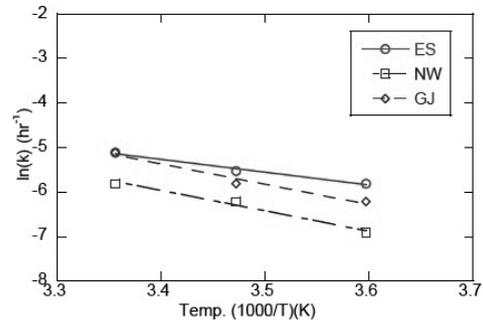


Fig. 3. Relationship between bulk water decay coefficient and water temperatures based on Arrhenius equation.

예측할 수 있음을 보고한 바 있다. Arrhenius equation을 이용하여 Fig. 3과 같은 상관관계식이 도출되었으며, 이를 토대로 ES 정수장 공급계통에서의 수온별 수체감소 계수를 구하였다.

3.2 관벽감소 계수 도출

현장조사시의 수온인 19.9 °C를 바탕으로 Arrhenius equation으로 추정된 ES 정수장의 수체감소 계수(k_b) -0.1188 d⁻¹를 적용하여 EPANET으로 모의한 다음, 보정과정을 통하여 관벽감소 계수(k_w)를 도출하였으며, 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 measured value는 현장 조사를 통해 측정된 잔류염소 농도이며 predicted value는 시행착오법으로 관벽 계수를 도출하여 EPANET을 통해 보정한 잔류염소 농도이다.

W25 지점은 관경 300 mm의 DCIP 송수관로에서 분기되면서 관경 150 mm의 PE관으로 변경되고 다시 관경이 80 mm로 바뀌고 마지막으로 80 mm의 SP로 바뀌게 된다. 이처럼 관로의 변화를 거치면서 관벽감소 계수 값이 커지게 되면서 비교적 높은 -1.44 m/d로 추정되었으며

Table 3. Simulation of chlorine decay coefficient(19.9 °C)

site	decay coefficient		residual chlorine(mg/L)		retention time(hr)	error(%) ($\frac{A-B}{A} \times 100$)
	k_d (d ⁻¹)	k_w (m/d)	measured(A)	predicted(B)		
WTP	-0.1188	-	0.62	0.62	-	-
W25		-1.44	0.03	0.03	10.67	-
W21		-0.17	0.03	0.03	18.97	-
W12		-0.23	0.06	0.06	15.22	-
W8		-0.63	0.09	0.09	5.22	-
E3		-0.012	0.19	0.19	35.91	-
E5		-0.014	0.11	0.11	52.26	-
E6		-1.62	0.02	0.02	46.99	-

Table 4. Verification of chlorine decay coefficient(3.0 °C)

site	decay coefficient		residual chlorine(mg/L)		retention time(hr)	error(%) ($\frac{A-B}{A} \times 100$)
	k_d (d ⁻¹)	k_w (m/d)	measured(A)	predicted(B)		
WTP	-0.0651	-	1.04	1.04	-	-
W25		-1.44	0.08	0.07	11.09	12.5
W21		-0.17	0.06	0.05	19.39	16.66
W12		-0.23	0.21	0.17	15.64	19.05
W8		-0.63	0.19	0.16	5.64	15.79
E3		-0.012	0.51	0.47	36.33	7.84
E5		-0.014	0.42	0.34	52.68	19.05
E6		-1.62	0.13	0.11	47.41	15.38

E6 지점의 경우 관중이나 관경의 변화가 없었음에도 가장 높은 관벽감소 계수 값을 나타내었다. 관벽감소는 관재질, 관부식, 생물막 등 다양한 요소에 의해 변화될 수 있다.

Table 3에서 도출된 관벽감소 계수의 검증 을 위해 보정된 관벽감소 계수와 수체감소 계수를 도입하여 2013년 12월의 일평균 용수공급량 12,623 m³/d와, 수온 3.0 °C 조건을 기준으로 잔류염소 실측값과 EPANET을 통해 예측한 값을 비교하여 Table 4에 나타내었다. 용수공급량의 경우 실제 주요 지점의 수도계량기 검침량 자료를 이용하여 분석자료의 신뢰도를 향상 시켰다.

Arrhenius equation에 의해 도출된 3.0 °C에서의 수체감소 계수 -0.0651 d⁻¹를 대상으로 검증한 결과, 동부관로의 경우 체류시간이 가장 긴 E5 지점에서 오차율이 19.05 %로 가장 크게 나타났으며 서부관로의 경우 W12 지점에서 가

장 큰 오차율을 나타냈으나, 모든 지점에서의 오차율은 20 % 미만이었다. 수리해석에 비해 수질의 변동성이 더 큰 점을 감안할 때 수용 가능한 오차율로 판단된다(Kim et al., 2010).

관벽감소 계수는 평균 -0.588 m/d였으며 -0.012 ~ -1.62 m/d의 분포를 보였다. 한편, Rossman et al.(1994)의 연구에서는 관벽계수를 -0.15 ~ -0.45 m/d로 산정하였으며, Kim et al.(2010)은 -0.05 ~ -0.32 m/d, Yoo et al.(2003)은 관경이 100 mm 미만, 100 ~ 200 mm, 200 mm 이상일 경우 각각 -0.1457 ~ -0.3316 m/d, -0.0850 ~ -0.2114 m/d, -0.0450 ~ -0.1305 m/d를 적용하였다. ES 정수장 공급계통에서의 관벽감소 계수는 국내외 타 연구에 비하여 상대적으로 높게 나타났으며, 이는 관경, 부식정도, 유속 등의 물리화학적 조건이 상이해서 나타나는 결과로 추정된다.

3.3 재염소 주입 지점 및 농도 산정

재염소 시설은 급배수시스템에서 적정 잔류염소 확보를 위해 추가적으로 염소를 주입하는 시설로서, 본 연구에서는 잔류염소 조절이 가장 어려운 최악 조건에서 적정 재염소 주입 지점 및 농도를 모의하였다.

공급과정에서의 잔류염소 농도는 환경부의 맛있는 물 가이드라인과 일본 동경도의 유리잔류염소 관리 목표인 0.1 ~ 0.4 mg/L과 동일하게 설정하였고, 이를 달성하기 위한 적정 재염소 지점 및 주입농도를 도출하고자 하였다. 모의를 위하여 2012. 1월부터 2013. 9월 사이의 정수장 평균 잔류염소 농도와 일평균 용수공급량 (13,053 m³/d)을 입력하고, 수온은 하절기 최악 조건을 고려하여 25 °C 조건에서 모의하였다.

Fig. 4는 EPANET을 이용한 모의 결과를 나타낸다. 서부관로에서는 W21, W25 지점에서 잔류염소 농도가 각각 0.02, 0.03 mg/L이며, 동부관로에서는 E5, E6 지점이 각 0.03, 0.02 mg/L로 법적 수질기준(0.1 mg/L)에 미치지 못하므로 적정 잔류염소 농도 유지를 위해서는 정수장에서 염소 주입량을 상승시키거나 공급과정에서의 재염소 처리가 필요한 것으로 나타났다. 공급과정에서 재염소 주입 없이 최종 관말에서 0.1 mg/L 이상을 유지하기 위해서는 정수장에서 최소 1.9 mg/L 이상을 유지하여야 하며, 이 경우 정수장 인접 지역은 극심한 냄새로 응용할 수 없는 수준에 이르게 된다. 따라서 동부관로에

서는 잔류염소 확보가 가장 취약한 E5, E6 지선이 분기되는 지점 앞에 재염소 시설을 설치하는 것이 효율적이며 서부관로에서는 W21 지선이 분기되는 지점에서 재염소를 주입하면 W25 지점까지 0.1 mg/L 이상의 잔류염소 농도 유지가 가능할 것으로 모의되었다.

현재 운영조건에서 동부관로는 대부분 지점에서 적정 잔류염소를 유지하고 있으나 적은 수량으로 인해 관내 체류시간이 다소 길게 나타났으며 이로 인해 E5, E6 지점에서 0.1 mg/L 이하로 잔류염소 농도가 검출되었다. 이 지점의 잔류염소를 0.1 mg/L 이상으로 유지시키기 위해 정수장의 잔류염소를 0.4 mg/L로 낮추고 E5, E6 지선이 분기되는 지점 앞에 재염소 시설을 설치할 경우 모든 지점에서 기준을 만족시킬 수 있었으며 최소 0.42 mg/L의 재염소 주입이 필요할 것으로 판단된다. 재염소 주입 전후의 농도변화는 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구에서 수온 조건은 최악조건으로 하고 수량조건은 평균 공급량을 고려하였는데, 일일 최소공급량으로 모의할 경우에는 관내 체류시간이 증가되어 재염소 주입량은 더 증가될 것으로 예상된다.

한편, Fig. 5에서 재염소 주입 전후의 농도차이는 정수장에서 거리가 멀어질수록 지속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 즉 정수장에서 재염소 주입 전후의 농도는 각각 0.69 mg/L, 0.40 mg/L로서 차이가 0.29 mg/L 이나, E4 지점에서는 각각 0.18 mg/L, 0.10 mg/L로서 차이가

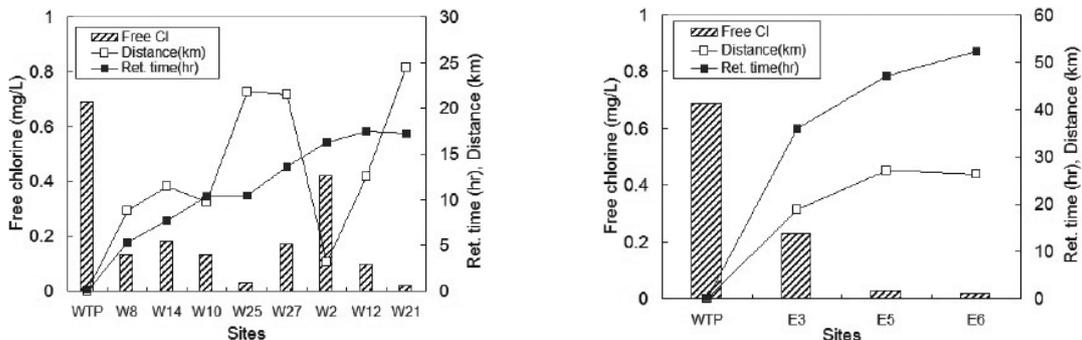


Fig. 4. Predicted residual chlorine concentration at 25 °C (left-west line, right-east line).

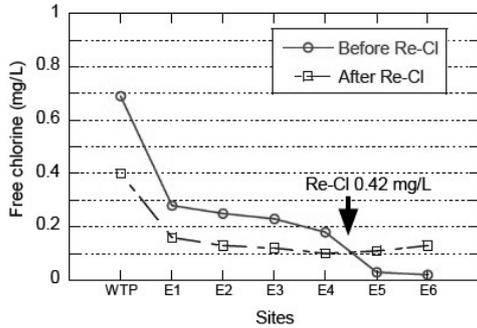


Fig. 5. Rechlorination impact on residual chlorine concentration at east distribution system(water temp.=25 °C).

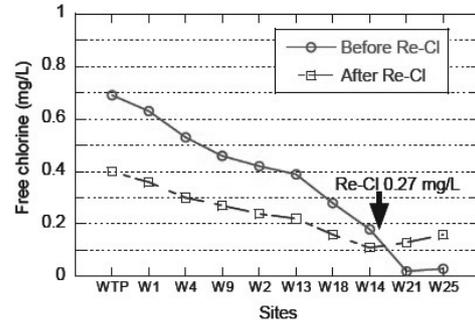


Fig. 7. Rechlorination impact on residual chlorine concentration at west distribution system(water temp.=25 °C).

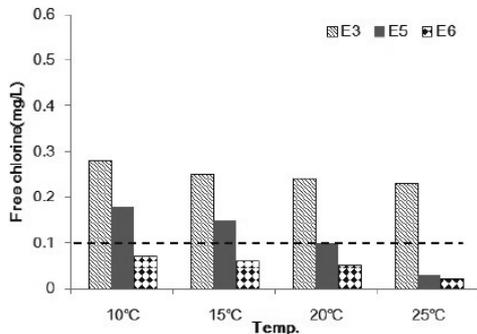


Fig. 6. Residual chlorine concentration vs, water temperature at east distribution system.

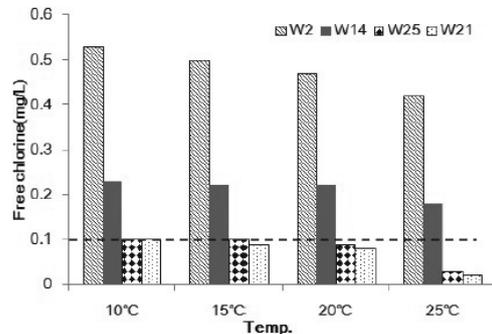


Fig. 8. Residual chlorine concentration vs, water temperature at west distribution system.

0.08 mg/L로 저감되었다. 이는 초기 잔류염소의 농도가 높을수록 염소소모량이 증가하는 다른 연구결과와 유사하다(Uber et al., 2003).

ES 동부관로에서 계절별 재염소가 필요한 시기를 예측하기 위해 수온 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C의 조건에서 잔류염소 농도에 대해 모의하였다. 모의 결과는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 E6 지점은 모든 수온에서 기준치에 도달하지 못하였으며 E5는 25 °C에서만 기준에 미달되는 것으로 분석되었다. 따라서 E5 지점의 경우 수온이 높은 하절기에만 재염소 시설의 운영이 필요하지만, 관말인 E6 지점까지 고려할 경우에는 E5 지점에서 상시 재염소 주입이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 ES 서부관로에서 최악의 조건으로 가정하여 모의한 결과로 W13 지점까지 잔류염소가 0.4 mg/L 이상으로 높게 유지되는 것으로

나타났으며 W21, W25 지점에서 기준 미달로 나타났다. 서부관로의 경우 적정 잔류염소 농도를 초과하는 지역이 동부계통 보다 많은 것으로 모의되었다. 정수장의 잔류염소 농도를 동부관로와 마찬가지로 0.4 mg/L로 조정하고 재염소를 W21 지선으로 분기되기 전에 주입하는 것으로 모의한 결과, 적정 재염소 주입 농도는 0.27 mg/L로 예측되었다.

Fig. 8은 ES 서부관로에서 수온에 따른 잔류염소 농도를 나타냈으며, 10 °C에서는 모든 지점에서 만족하는 값을 보였으나 15 °C 이상부터 W25, W21 지점에서 잔류염소 부족이 나타났으므로 15 °C부터 재염소를 시행하여야 하며 평균 수온을 기준으로 하였을 때 4월말 ~ 11월초에 일시적으로 재염소를 주입하면 관말에서 잔류염소 농도가 확보될 것으로 예측되었다.

4. 결론

제주지역의 3개 정수장을 대상으로 잔류염소 수체감소 계수를 산정하고 지표수를 정수처리하는 ES 정수장 공급계통에서의 관벽감소를 도출한 후, EPANET 모델을 이용하여 재염소 주입을 통한 잔류염소 농도 균등화 방안을 연구하였으며, 주요 내용은 아래와 같다.

1. 잔류염소 수체감소 실험결과, 염소 주입 후 급격한 감소를 보이고 20시간 후에는 완만한 감소를 보였으며, 수온이 높을수록 감소량도 증가하였다. 원수 수질에 따라 수체감소 계수의 차이를 보였으며 5 ℃의 경우 ES, GJ, NW 정수장에서 각각 -0.003 hr^{-1} , -0.002 hr^{-1} , -0.001 hr^{-1} 로 조사되었다. 지표수를 원수로 하는 ES 정수장의 경우 다른 정수장에 비해 피산화물질의 농도가 높아서 수체감소 계수가 크게 나타나는 것으로 판단된다.
2. 관벽감소 계수를 추정된 결과 서부관로의 경우 W25 지점이 -1.44 m/d 로 가장 높게 나타났으며, W21, W12, W8 지점에서 각각 -0.17 , -0.23 , -0.63 m/d 의 분포를 보였다. 동부관로의 경우에는 E3, E5, E6 지점에서 각각 -0.012 , -0.014 , -1.62 m/d 로 나타났는데 이는 국내외 연구결과와 비교하여 상대적으로 높은 수준이다.
3. EPANET2.0에 도출된 계수 값을 적용하여 최악의 조건으로 잔류염소 농도를 모의한 결과 모든 지점에서 0.1 mg/L 이상의 잔류염소를 유지하기 위해서는 정수장에서 최소 1.9 mg/L 이상의 잔류염소가 필요하므로 쾌적한 수돗물 공급을 위해서는 재염소 시설 설치가 필요할 것으로 판단되었다.
4. 재염소 주입시설을 설치할 경우, 적정 지점은 동부의 경우 E5과 E6 지점이 분기되는 주송수관로 이전이며 서부의 경우 W21 지점으로 분기되기 전이 적절할 것으로 예

측되었다. 현재 운영조건에서 적정 재염소 주입농도는 동부 0.42 mg/L , 서부 0.27 mg/L 로 산정되었으며, 재염소 주입을 통해 정수장으로부터 관말 분기점까지 잔류염소 농도가 균등하게 분포되는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(GT-11-G-02-001-1)”으로 지원 받은 과제입니다. 연구에 도움을 주신 제주도수자원본부 김우찬 기술사 및 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- Ahn, J. Lee, S. Rho, B. Choi, Y. Choi, J. Kim, H. Park, T. Park, C. Koo, J. (2007) Modeling residual chlorine and THMs in water distribution system, *J. of Korean Society of Water and Wastewater(KSWW)*, 29(6) 706-714.
- Cha, J. Kim, J. (2012) Leakage reduction through establishment of block system in Jeju city, *J. of KSWW*, 26(5) 693-703.
- Fisher, I. Kastl, G. Sathasivan, A. (2011) Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems, *Wat. Res.* 45, 4896-4908.
- Hallam, N.B. West, J.R. Forster, C.F. Powell, J.C. Spencer, I. (2002) The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems, *Wat. Res.* 36, 3479-3488.
- Jeju special self-governing province, Division of water supply (2014) www.jejuwater.go.kr.
- Kim, D. Lee, D. Kim, K. Bae, C. Joo, H. (2010) Computing the dosage and analysing the effect of optimal rechlorination for adequate residual chlorine in water distribution system, *J. of Korean Society of Env. Engineers*, 32(10) 916-927.
- Korea Water Works Association(KWWA) (2010) Standards for water supply facilities.

- K-water (2014) www.kwater.or.kr
- Lee, H., Park, J. Kong, M. Kang, S. Kwak, P. Lee, J. (2013) A Study on calculation of the pipe wall decay constants of residual chlorine and affecting factors in reclaimed water supply system, *J. of water treatment*, 21(2) 15-27.
- Mays, L.W. (2000) *Water distribution systems handbook*, McGraw-Hill.
- Ministry of Environment(MOE) (2006) Internal report.
- Ministry of Environment(MOE) (2013) *Water supply statistics 2012*.
- Ministry of Environment(MOE) (2014) www.me.go.kr.
- Powell, J.C. Hallam, N.B. West, J.R. Forster, C.F., Simms, J. (2000) Factors which control bulk chlorine decay rates, *Wat. Res.* 34(1) 117-126.
- Rossman, L.A. Clark, R.M. Grayman, W.M. (1994) Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems, 120(4) *J. of Env. Eng.* 803-820.
- The Office of waterworks in Seoul metropolitan government(SMG) (2014) arisu.seoul.go.kr
- Tokyo metropolitan government(TMG), Bureau of waterworks (2014) www.waterworks.metro.tokyo.jp.
- Uber, J.G. Boccelli, D.L. Summers, R.S. Tryby, M.E. (2003) Maintaining distribution system residuals through booster chlorination, *AWWARF*.
- USEPA (2014) www.epa.gov.
- Yoo, H.J. Kim, J.W. Jeong, H.J. Lee, H.K. (2003) Chlorine residual prediction in drinking water distribution system using EPANET, *Kor. J. env. hlth* 29(1) 8-15.