

관로 내 적정소독능 확보를 위한 재염소 기법의 적용

Application of Rechlorination for Adequate Disinfection Ability in Water Distribution System

이두진¹ · 김영일^{1,*} · 이종민² · 정남정¹ · 김용운¹

Lee, Doo-Jin¹ · Kim, Young-Il^{1,*} · Lee, Jong-Min² · Jung, Nam-Jung¹ · Kim Yong-Woon¹

1 한국수자원공사

2 (주)현대제철 환경수처리시설팀

(2006년 6월 20일 논문 접수; 2006년 10월 11일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Disinfectant residual should be maintained to achieve biological stability during distribution of treated water. The wide distribution of retention times associated with storage and transport of water in a network and the reactivity of disinfectants make it difficult to maintain adequate residuals at critical locations. Rechlorination at some intermediate locations may reduce the total disinfectant dose while keeping residuals within specified limits throughout the water distribution system. In order to select the adequate location of rechlorination for achieving to maintain of residual chlorine throughout the distribution system, EPANET was used in this study. EPANET was well predicted chlorine transport and residual loss in the distribution system. Location of rechlorination was selected to maintain 0.4mg/L of residual chlorine throughout a water distribution system by field investigation and model simulation. The quantity of chlorine may reduced 36.7% and provided smooth residual between 0.42 and 0.60mg/L, when rechlorination would be used continuously at strategic location within the distribution system.

Key words: EPANET, rechlorination, residual chlorine, distribution system, bulk and wall decay constant

주제어: EPANET, 재염소, 잔류염소, 관망시스템, 수체 및 관벽 감소계수

1. 서 론

잔류염소는 미생물 재성장의 위험성을 줄여줄 수 있기 때문에 급배수관망 시스템의 수질안전성을 평가하는 간접적인 인자이다(Haas, 1999; LeChevallier,

1999). 최근에 많은 연구자들이 정수장에서 기본적인 소독능(CT)을 확보하는 것뿐만 아니라 배급수관망에 수인성 미생물을 불활성화 시키기 위해 잔류염소를 적절하게 유지해야 함을 강조하고 있다. 관로유입 이전 정수장에서 염소를 주입하는 경우, 염소가 유기 또는 무기화합물과 서서히 반응하면서 광범위한 관로

*Corresponding author Tel: +82-42-860-0556, FAX: +82-42-860-0399, E-mail: yikimenv@empal.com (Kim, Y.I.)

시스템을 가지고 있거나 체류시간이 긴 지역에서는 관말 지역의 잔류염소 농도가 급격하게 감소할 수 있다. 일반적으로 관말지역에서 최소한의 잔류염소를 존재하기 위한 정수장에서는 시행착오법 또는 수질 동역학 모델을 이용하여 염소주입농도를 추정하고 있으나, 염소를 과량 주입하면 냄새유발과 함께 수도물의 맛이 떨어지고, 소량 주입하면 미생물을 완전히 제거시키지 못하는 현상이 발생하게 된다.

일반적으로 관로시스템이 커지게 되면 관로 뿐만 아니라 배수지와 같은 저장시설에서 체류시간이 늘어나게 되고, 체류시간이 늘어나면 잔류염소의 농도를 감소시켜 관말지역의 잔류염소 부족, 소독부산물 생성, 그리고 미생물의 재생장 등과 같은 문제 등을 야기하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 관로상의 특정지점에 염소를 추가 주입하게 되면 정수장에서 주입하는 염소량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 관로 내 잔류염소를 일정한 농도로 유지할 수 있게 된다. 이러한 감소는 시간과 공간적으로 관로 내에 잔류염소의 평활화를 달성할 수 있고, 염소의 접촉시간도 줄일 수 있는 효과를 볼 수 있다. 이와 같은 재염소 기술은 이미 선진국에서 현장적용된 바가 있으며 (Tryby et al., 2002; Prasad et al., 2004; Propato and Uber, 2004), 최근 우리나라에서도 광역상수도도를 중심으로 몇몇 재염소 시설이 설치 및 운영 중에 있다.

관로 내 재염소 지점을 선정할 때 고려해야 되는 사항들은 총 염소 투입량을 최소화하고, DBP 생성을 최소화하며, 운전비를 포함한 재염소 시설의 총비용을 최소화하는 것이며, 마지막으로 모든 지역과 시간에 걸쳐 적정 잔류성을 확보하는 것이다(Prasad et al., 2004). DBP 생성과 투입되는 염소량 사이에는 정확한 상관관계가 존재하지 않으나, 총 염소투입량을 줄이게 되면 DBP 생성을 줄일 수 있는 효과가 있다 (Boccelli et al., 1998). 특히, 재염소 지점의 선정 및 시설 설계에서 가장 중요한 것은 관로 내 잔류염소의 거동을 정확하게 모니터링 하는 것이며, 모니터링 결과를 바탕으로 재염소 설치위치, 주입농도, 그리고 운전방법 등을 결정해야 하는 것이다. 이와 같은 배경을 바탕으로 본 연구에서는 송수관로를 대상으로 현장조사와 잔류염소 예측모델인 EPANET을 이용하여 적정 잔류염소 농도 유지를 위한 재염소 시설 설치지점을 선정하는 방법을 제시하고, 재염소를 통한

농도평활화, 잔류염소 사용량 절감효과 등을 평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 실험 대상지역

실험대상지역은 일반적인 정수처리공정을 운영하고 있는 S정수장의 송수관로이다. 송수관로는 1개의 라인으로 구성되어 있으며, 라인중간에 2개의 가압장을 가지고 있다. Fig. 1은 총 송수관로 연장이 152km인 실험대상지역의 송수관망도를 나타낸 것이며, 알파벳은 송수관로상의 현장조사지점 및 모의지점을 나타낸 것이다. 현장 조사지점은 분기점을 중심으로 현장접근이 용이하고 연속적으로 시료채취가 가능한 지점을 고려하여 선정하였으며, 모의지점은 송수관로에 중요한 시설물(가압장 혹은 배수지)이나 수질을 모니터링할 필요성이 있는 지점을 중심으로 선정하였다. C와 E지점은 가압시설, B와 D지점은 송수관로가 분기되는 지점, F와 H지점은 송수관로의 말단, 그리고 G와 I지점은 배수지이다. 조사지점 가운데 EPANET에 필요한 기초자료를 입력하기 위하여 총 4군데의 현장 조사지점(A, D, E, G)에서 2시간 간격으로 시료를 채취하여 pH, 온도, 그리고 잔류염소 등을 현장에서 측정하였다. 특히, A지점은 시설용량 285,000m³/d인 정수장으로 현재 가동율 35%인 100,000m³/d를 생산하여 대상지역으로 송수하고 있고, D지점은 20,000 m³/d가 넘는 유량이 빠져나가는 용수분기점이며, E지점은 관로가 양쪽으로 분기되는 지점으로 수질을 모니터링하기 위해 현장 조사지점으

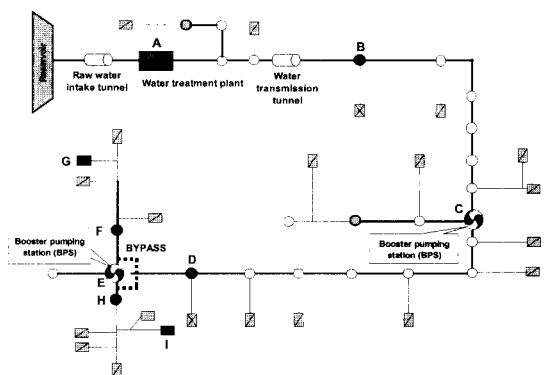


Fig. 1. Schematic diagram of distribution system in target area.

로 선정하였다.

2.2. 모델구축

미국환경청에서 개발한 EPANET은 배수관로 시스템 내에서 수리특성 및 수질변화를 예측할 수 있는 모형이다. EPANET은 관로 내의 물리적 특성인 관경, 길이, 조도계수, 수도 사용량 등을 이용하여 관로 내 각 지점별 시간별로 수리학적 특성인 유량, 유속, 수압, 그리고 손실수두와 관망에서의 수질변화를 예측할 수 있고, 예측한 결과를 수치적 데이터 또는 그림으로 출력할 수 있어 전체 관로 내에서 수리 및 수질변화 특성을 손쉽게 파악할 수 있다(Rossman, 2000).

배급수계통에서 수질을 모델링하기 위해서는 관망의 수리학적 해석이 전제조건이며, 먼저 관망해석이 제대로 되어야만 수질예측의 정확도를 높일 수 있다. 수리해석을 위하여 관로 내 유량 및 수압은 정상상태(steady state)를 가정하여 관경, 관 길이 및 조도계수를 이용해 수리인자를 구축하였으며, 모델의 보정은 최근 2년간의 유속 및 관압자료를 이용하였다. 한편, 수질인자는 실험실과 현장실험을 통하여 입력할 수 있는데, 실험실에서는 bottle test를 통하여 수체 잔류염소 감소계수(k_1)를 도출하였으며, 현장에서는 잔류염소를 측정하여 관벽 잔류염소 감소계수(k_w)를 도출하였다(Biswas and Clark, 1993; Clark et al., 2005).

2.3. 잔류염소 감소계수의 산정

잔류염소 감소계수를 산정하기 위하여 Serum bottle(160mL)과 테프론 코팅이 되어있는 실리콘 마개(20mm teflon silicon septa, Wheaton, USA), 그리고 알루미늄 캡(20mm Aluminium seal, Wheaton, USA)을

이용하여 bottle test를 실시하였다(Chambers et al., 1995; Hallam et al., 2002). 실험상의 오차를 최소화하기 위하여 실험에 사용한 시료병을 초음파 세척기로 약 1시간 세척한 후 초순수로 깨끗하게 씻고 105°C에서 건조시킨 다음 사용하였다. 시료병을 대상 시료로 3회 정도 세척한 다음 시료를 채취하였으며, 기포가 발생하지 않도록 시료를 병목까지 가득 채웠다. 온도변수를 고려한 잔류염소 감소계수를 산정하기 위하여 A지점 유출수를 대상으로 7, 20, 그리고 25°C의 온도조건에서 bottle test를 수행하였다. 차아염소산나트륨 농도가 160mg/L인 stock 용액 1 mL를 각각의 bottle에 넣어 잔류염소 농도가 1mg/L가 되도록 하였다. 반응시간 0, 1, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 36, 그리고 48시간 이후에 시료를 채취하여 잔류염소를 측정하였으며, 48시간 이후부터는 24시간씩 늘려 최종 168시간까지 시료를 채취하여 잔류염소를 측정하였다. 채염소를 모의하기 위해 필요한 잔류염소 감소계수는 48시간이 지난 이후에 0.48mg/L의 염소를 추가 주입하여 시간에 따른 잔류염소 농도를 측정하여 산정하였다. 잔류염소는 Pocket colorimeter(Hach, USA)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상지역의 수질현황

Table 1은 조사대상 지점 중에서 대표적인 5지점의 2004 및 2005년 계절별 잔류염소 농도를 나타낸 것이다. A지점(정수장) 유출수의 잔류염소농도는 관말까지 안정적 소독능을 유지하고 인접지역의 소독냄새 민원발생을 방지하기 위하여 하절기에는 0.8~1.0mg/L, 동절기에는 0.7~0.9mg/L 범위를 유

Table 1. Seasonal variations of residual chlorine concentration at sampling locations in distribution system

Season	Location	A	C	D	H	G	Reference
2004	Spring(3~5월)	0.77	0.72	0.66	0.55	0.44	'03. 12~'04. 2
	Summer(6~8월)	0.86	0.37	0.64	0.35	0.19	
	Autumn(9~11월)	0.93	0.77	0.61	0.57	0.29	
	Winter(12~2월)	0.83	0.65	0.64	0.68	0.41	
2005	Spring(3~5월)	0.87	0.56	0.64	0.49	0.51	'05. 9~'05. 10 '04. 12~'05. 2
	Summer(6~8월)	0.89	0.68	0.57	0.51	0.19	
	Autumn(9~11월)	0.91	0.67	0.83	0.78	0.30	
	Winter(12~2월)	0.86	0.58	0.60	0.51	0.39	

지하고 있다. 표에서 보는 바와 같이 최근 2년 동안 A지점 유출수의 잔류염소농도는 평균 0.86mg/L로 목표를 충족시키고 있는 것으로 나타났으나, 체류시간이 상대적으로 긴 지점 G에서는 하절기에 잔류염소농도가 0.2mg/L까지 감소하는 것으로 조사되었다. 따라서 A지점 유출수의 잔류염소농도를 1.0mg/L 이하로 유지할 경우, 향후 용수공급조건이 변화됨에 따라 관말에서 잔류염소농도를 평상시에는 0.2mg/L, 미생물의 재성장이 우려되는 시기에는 0.4mg/L 이상으로 유지하기 어려울 것으로 판단된다.

3.2. 잔류염소 감소계수의 산정

Fig. 2는 대상 실험조건에서 수체잔류염소 감소계수 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 1차 반응식을 기준으로 잔류염소 감소계수는 7, 20, 그리고 25°C에서 각각 0.0025, 0.0056, 0.0147hr⁻¹로 나타났다. 온도가 상승할수록 감소계수가 커지는 경향을 보였는데, 이는 수온증가에 따른 활성화 에너지의 증가로 인해 용존 유기물과 잔류염소간의 화학반응이 촉진되었기 때문이다(Jadas-Hecart et al., 1992; Zhang et al., 1992; Hua et al., 1999; Powell et al., 2000). 한편, 잔류염소 감소계수는 온도에 의존하여 변화하기 때문에 Arrhenius식으로 표현할 수 있으므로(AWWARF, 1996) 현장조사 당시 수온의 잔류염소 감소계수 값을 온도변화에 따른 잔류염소 감소계수 값과 Arrhenius식을 이용하여 도출하였다.

3.3. 모델의 보정 및 검증

관말지역인 G지점의 관로내 잔류염소농도가 0.4 mg/L 이상 유지하는 것을 목표로 설정한 다음 EPANET을 모의하였다. 모델 입력자료는 2004~2005년 사이 G지점의 유량 공급자료와 잔류염소 모니터링 결과를 이용하여 잔류염소 관리관점에서 가장 열악한 조건을 대상으로 설정하였다. 잔류염소 감소계수는 Arrhenius식을 이용하여 수체의 감소계수 값(K_b)을 산정하였으며, 이를 EPANET에 적용하여 보정과정을 거쳐 구간별 관벽 감소계수(K_w)값을 산정하였다(Clark et al., 2005). 참고로 Table 2에 EPANET 입력자료로 사용한 잔류염소 감소계수 값을 나타내었다. 이러한 값들이 제대로 산정되었는지 검증하기 위하여 구해진 값을 EPANET에 적용한

Table 2. Calculation of bulk and wall decay constant in accordance with sampling sections

Section	Overall chlorine decay constant	
	Bulk decay constant(K _b), d ⁻¹	Wall decay constant(K _w), d ⁻¹
A - D	0.1344	NA*
D - E	0.1344	0.035
E - G	0.1344	0.017

* not applicable

Table 3. Comparison of predicted and observed chlorine concentrations at sampling locations by EPANET

Section	Observed chlorine concentration (mg/L)	Predicted chlorine concentration (mg/L)	Error(%)
A	1.01	1.01	-
D	0.77	0.74	4.1
E	0.69	0.69	-
G	0.49	0.49	-

결과, 현장조사 지점별 잔류염소 실측치와 예측치 값이 잘 일치하는 것으로 나타났다(Table 3 참조).

모의대상 조건을 EPANET에 입력한 다음 대상지역의 체류시간과 잔류염소를 모의한 결과, Table 4와 같이 E지점을 지나는 시점에서 잔류염소가 0.4mg/L 이하로 떨어지는 것을 알 수 있다. 특히, 체류시간이 26시간이 넘는 F지점에서 G지점 사이에는 잔류염소가 급감하여 G지점에서는 잔류염소 농도가 0.21 mg/L로 예측되었다. 관로가 분기되는 E지점을 기준으로 F지점 방향과 H지점 방향의 거리와 체류시간을 비교한 결과, E지점에서 F지점까지의 거리와 체류시간은 각각 98.9km, 57.3시간이었으며, E지점에서 H

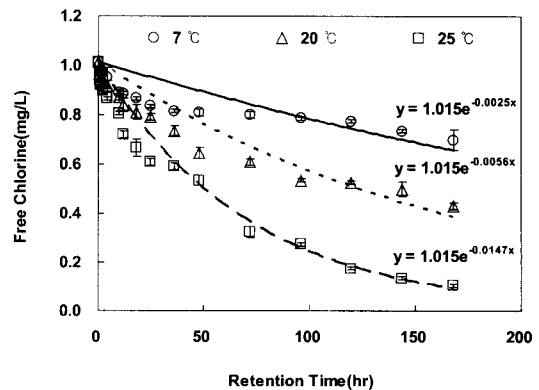


Fig. 2. Variations of bulk decay constant at different temperature.

Table 4. Simulation results by EPANET at target locations in water transmission pipeline

Location \ Item	Residual Chlorine (mg/L)	Retention Time (hr)	Distance (km)	References
A	0.95	0	0	Water Treatment Plant
B	0.82	9.0	10.2	Diverging Point
C	0.66	22.4	38.8	Booster Pumping Station
D	0.47	44.1	71.5	Diverging Point
E	0.42	19.9	78.9	Booster Pumping Station
F	0.35	57.3	98.9	Pipeline Ending point
G	0.21	83.3	121.3	Distribution Storage Reservoir
H	0.36	59.6	101.3	Pipeline Ending point
I	0.28	66.1	150.1	Distribution Storage Reservoir

지점까지는 101.3km, 59.6시간으로 양방향의 유사한 경향을 보였다. 잔류염소 농도는 F와 H지점에서의 값이 거의 동일하였으며, 최종 관말지역인 G와 I지점도 동일한 결과를 보였다. 반면, F에서 G지점, H에서 I지점까지의 거리는 각각 22.4km, 48.8km이었으나, 체류시간은 각각 26시간, 6.5시간으로 상대적으로 거리가 짧은 F~G지점에서 물이 정체한다는 것을 알 수 있었다. 잔류염소의 농도도 H~I지점에서는 0.08mg/L(0.36 → 0.28mg/L) 떨어진 반면, F~G지점에서는 0.14mg/L(0.35 → 0.21mg/L) 떨어져 체류시간 증가에 따른 잔류염소 농도의 감소폭이 큰 것으로 나타났다.

3.4. 재염소 지점 및 주입농도 결정

앞선 결과에서와 같이 계절적으로 수온이 높은 6~9월 사이에 일시적으로 G지점에서 잔류염소 부족현상이 나타나고 있다. 이를 해결하기 위해 관로상에 추가적으로 염소를 주입하는 방안을 검토하였으며, 앞서 도출한 모의조건을 이용하여 재염소 지점과 주입농도를 결정하고자 하였다. 재염소 주입시설은 관말의 잔류염소가 생물학적으로 안전한 기준을 초과할 수 있도록 관로상에 추가적으로 염소를 주입할 목적으로 건설된다. 관로 내 잔류염소 농도관리기준은 국가별로 다소 차이가 있으나, 한국수자원공사에서는 소독부산물 발생과 염소취에 의한 심미적 불쾌감을 저감시킬 목적으로 1999년 이후 자체 잔류염소 관리기준을 최고 1.0mg/L 이하로 운영하고 있으며, 송수관로 관말에서는 0.4mg/L를 유지하도록 정하고 있다.

앞서 모의한 최악조건에서 관로상에 체류시간이

49시간 지난 시점(E지점)에서 관로 내 잔류염소 농도가 0.4mg/L 이하로 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 E지점에서 재염소를 시행한다는 것을 전제로 재염소 이후 잔류염소 감소경향을 모의하기 위하여 추가적인 bottle test를 수행하여 1, 2차 잔류염소 감소계수를 산정하였다. 재염소에 따른 잔류염소 감소계수를 산정하기 위해 현장체류시간을 고려하여 48시간 이후에 추가적으로 0.48mg/L를 주입한 다음 bottle test를 계속적으로 수행하였다. Fig. 3은 잔류염소 감소반응을 1차반응식으로 가정하고 재염소 주입시 25°C에서의 잔류염소 감소계수를 산정한 결과이다. 1차 감소계수는 0.015hr⁻¹이었으며 2차 감소계수는 0.0062 hr⁻¹로 나타나 재염소 이후 잔류염소 감소계수 값이 2.4배 정도 낮아진 것으로 나타났다. Powell 등(2000)은 염소감소속도 계수를 산정하기 위하여 수온, 초기염소, 유기물의 상관관계식을 이용하여

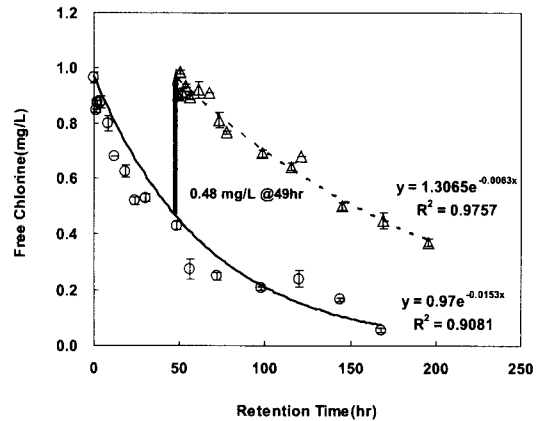


Fig. 3. Variations of bulk decay constant according to rechlorination.

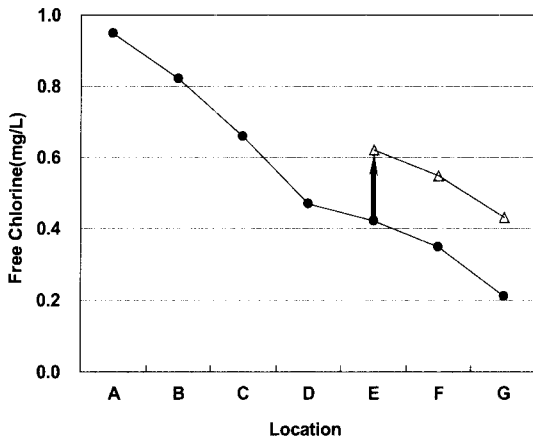


Fig. 4. Changes of chlorine concentration according to sampling locations by rechlorination.

여 다양한 조건에서 잔류염소 감소계수를 평가한 결과, 재염소 주입시 염소감소속도계수가 재염소주입 이전에 비해 최소 40% 감소하는 것으로 보고한 바가 있다. 이와 같이 재염소시 잔류염소 감소계수 속도가 느려지는 것은 1차 소독에 의해 반응성이 큰 물질이 대부분 산화되고, 상대적으로 반응성이 낮은 물질이 재염소에 의해 추가적으로 산화되므로 잔류염소의 감소가 느리게 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 4는 앞에서 언급한 바와 같이 E지점에 재염소 시설을 설치하였을 때, 전 대상지역의 잔류염소 농도의 변화를 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 E지점에 추가적으로 0.22mg/L의 염소를 주입하여 0.62mg/L를 유지하였을 때 관말에서도 잔류염소 농도가 최저관리 농도인 0.4mg/L를 상회하는 것으로 모의되었다. 재염소 시설의 활용방안은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 관말에 일시적으로 잔류염소가 부족한 시기에 염소를 보충하여 소독능을 유지하는 목적이고, 둘째는 평상시 재염소 시설을 운영함으로써 정수장 염소주입량을 줄여 관로 내 잔류염소 농도의 평활화를 도모하는 동시에 전체 염소사용량을 절감하는 것이다. Fig. 5에서와 같이 평상시 재염소를 운영하는 경우 정수장 염소 주입농도를 1.01mg/L에서 0.52mg/L로 약 49% 줄이고 E지점 재염소 시설에서 추가적으로 0.1mg/L를 주입함에 따라 송수관로 전반에 걸쳐 잔류염소 농도를 0.42~0.60mg/L로 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 염소사용량 관점에서도 재염소 이전에 염소 총사용량은 98kg/d이었으나,

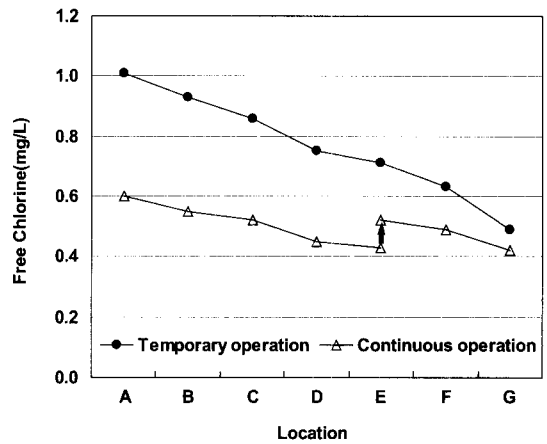


Fig. 5. Comparison in temporary and continuous operation of rechlorination.

재염소 시설을 운영하는 경우에는 총 62kg/d(1차 정수장 염소 58kg/d, 재염소 4kg/d)를 사용함으로써 염소사용량을 36.7% 절감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 잔류염소 농도의 평활화로 인해 정수장 인근에서 발생하는 염소취에 따른 민원이 줄어들 것으로 예상된다.

4. 결론

1) 정수장에서의 평균 잔류염소농도를 0.86mg/L로 운전하는 경우, 체류시간이 약 83시간에 이르는 긴 G지점에서는 하절기에 0.2mg/L까지 감소하는 것으로 조사되었으며, 향후 용수공급조건의 변화에 따라 정수장 잔류염소 농도를 1.0mg/L 이하로 유지하면 관말에서의 잔류염소 농도는 0.2mg/L 이상으로 유지하기 어려울 것으로 판단된다.

2) Bottle test와 Arrhenius식을 이용하여 구한 잔류염소 수치 감소계수 값(K_b)과 관벽 감소계수 값(K_w)을 EPANET에 적용한 결과, 현장조사 지점별 잔류염소 실측치와 예측치 값이 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3) EPANET을 이용하여 대상지역의 체류시간과 잔류염소 농도를 모의한 결과, E지점 이후에 송수관로 관리농도인 0.4mg/L에 미달하였으며, 특히 짧은 거리에도 불구하고 상대적으로 체류시간이 긴 F~G 지점사이에 잔류염소 농도의 감소폭이 큰 것으로 나타났다.

4) 재염소 이후 잔류염소 감소계수 값은 약 2.4배 정도 (0.015 → 0.0062) 낮아지는 것으로 나타났는데, 이는 1차 소독에 의해 반응성이 큰 물질이 대부분 산화되고 반응성이 낮은 물질이 재염소에 의해 추가적으로 산화되므로 잔류염소의 감소가 느리게 일어나는 것으로 판단된다.

5) E지점에 염소를 0.22mg/L 추가 주입하는 경우 전 대상지역의 잔류염소농도가 0.4mg/L를 상회하였다. 정상시에 재염소를 운영하는 경우 정수장 염소 주입농도를 1.01mg/L에서 0.52mg/L로 약 49% 줄이고 E지점 재염소 시설에서 추가적으로 0.1mg/L를 주입함에 따라 송수관로 전반에 걸쳐 잔류염소 농도의 평활화를 이룰 수 있으며, 염소사용량도 36.7 % 절감시킬 수 있을 것으로 예측되었다.

사 사

본 연구는 수처리선진화사업단(환경부 ECO-STAR Project, I2WATERTECH 04-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Biswas P. and Clark R.M. (1993) A Model for Chlorine Concentration Decay in Pipes, *Wat. Res.*, **27**(12), pp. 1715-1724.
2. Boccelli, D.L., Tryby, M.E., Uber, J.G., Rossman, L.A., Zierolf, M.L., and Polycarpou, M.M. (1998) Optimal Scheduling of Booster Disinfection in Water Distribution Systems. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **124**(2), pp. 99-111.
3. Chambers V.K., Creasy J.D. and Joy J.S. (1995) Modelling Free and Total Chlorine Decay in Potable Water Distribution Systems, *Aqua*, **44**(2), pp. 60-69.
4. Clark, R.M. and Haught, R.C. (2005) Characterizing Pipe Wall Demand: Implications for Water Quality Modeling, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **131**(3), pp. 208-217.
5. Haas, C.N. (1999) Benefits of Employing a Disinfection Residual, *Aqua*, **48**(1), pp. 11-15.
6. Hallama, N.B., Westa, J.R., Forstera, C.F., Powell, J.C. and Spencer, I. (2002) The Decay of Chlorine associated with the Pipe Wall in Water Distribution Systems, *Wat. Res.*, **36**(14), pp. 3479-3488.
7. Hua, F., West, J.R., Barker, R.A. and Forster, C.F. (1999) Modeling of Chlorine Decay in Municipal Water Supplies, *Wat. Res.*, **33**(12), pp. 2735-2746
8. Jadas-Hecart A., El Moher A., Stitou M., Bouillot P. and Legube B. (1992) The Chlorine Demand of a Treated Water, *Wat. Res.*, **26**(8), pp. 1073-1084.
9. LeChevallier, M.W. (1999) The Case for Maintaining a Disinfectant Residual, *AWWA*, **91**(1), pp. 86-94.
10. Powell, J.C., Hallam, N.B., West, J.R., Forster, C.F. and Simms, J. (2000) Factors which Control Bulk Chlorine Decay Rates, *Wat. Res.*, **34**(1) pp. 117-126.
11. Prasad, T. D., Walters, G. A. and Savic, D. A. (2004) Booster Disinfection of Water Supply Networks: Multiobjective Approach, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **130**(5), pp. 367-376.
12. Propato, M. and Uber, J.G. (2004) Linear Least-squares Formulation for Operation of Booster Disinfection Systems, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **130**(1), pp. 53-62.
13. Rossman, L. A. (2000) EPANET Version 2 User's Manual, Drinking Water Research Division, USEPA, Cincinnati.
14. Tryby, M.E., Boccelli, D.L., Uber, J.G. and Rossman L.A. (2002) Facility Location Model for Booster Disinfection of Water Supply Networks, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **128**(5), pp. 322-333.
15. Vasconcelos, J.J., Boulos, P.F., Grayman, W.M., Kiene, L., Wable O., Biswas, P., Bhari, A., Rossman, L.A., Clark, R.M., and Goodrich, J.A. (1996) Characterisation and Modeling of Chlorine Decay in Distribution Systems, *AWWARF*.
16. Zhang G.R., Kiene L., Wable O., Chan U.S. and Duguet J.P. (1992) Modelling of Chlorine Residual in the Water Distribution Network of Macao, *Environ. Technol.*, **13**(10), pp. 937-946.