

배급수계통에서 잔류염소 및 THMs 분포 예측에 관한 연구

안재찬[†] · 이수원 · 노방식 · 최영준 · 최재호 · 김효일 · 박태준 · 박창민 · 박 현 · 구자용*

서울특별시 상수도연구소 · *서울시립대학교 환경공학부

(2007년 4월 11일 접수, 2007년 6월 18일 채택)

Modeling Residual Chlorine and THMs in Water Distribution System

Jae-Chan Ahn[†] · Su-Won Lee · Bang-Sik Rho · Young-Jun Choi · Jae-Ho Choi · Hyo-Il Kim

Tae-Jun Park · Chang-Min Park · Hyeon Park · Ja-Yong Koo*

Waterworks Research Institute, Seoul Metropolitan Government · *Department of Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT : This study suggested a method for prediction of residual chlorine and THMs in water distribution system by measurement of residual chlorine, THMs, and other parameters, estimation of chlorine decay coefficients and THM formation coefficients, and simulation of water qualities using pipe network analysis. Bulk decay coefficients of parallel first-order were obtained by bottle tests, and pipe wall decay coefficients of first-order were estimated through evaluation of 5 models, which showed the lowest values of 0.03 for MAE(mean absolute error) and 0.037 MAE in comparison with the observed in field. And bottle tests were conducted to model first-order reaction of THM formation by nonlinear least square regression and the resultant coefficients were compared with the observed in field. As a result, the coefficients of determination(R^2) for the observed and the predicted values were 0.98 in September and 0.82 in November, and the formation of THMs was predicted by modeling.

Key Words : Residual Chlorine, THMs(Trihalomethanes), Bulk Decay Coefficients, Pipe Wall Decay Coefficients, Water Distribution System

요약 : 본 연구에서는 배급수계통에서 잔류염소와 THMs의 분포를 예측하는 방안을 제시하였다. 잔류염소와 THMs의 등의 수질변화에 대해 현장조사를 실시하였고, 수체와 관벽에 대한 잔류염소 감소계수와 THMs의 생성계수를 산출하여 관망해석에 의한 수질모델링에 적용하였다. 병실험을 통해 잔류염소 병렬 1차 수체 반응계수를 구하고, 5개 관벽 감소 모델을 비교 평가하여 1차 관벽 감소계수 산출하고 적용했을 때 잔류염소 현장 측정값과 관망 수질모델링에 의한 예측값의 평균절대오차 및 평균제곱근오차가 각각 0.03, 0.037 mg/L로 가장 작았다. 또한 병실험에 의한 THMs생성량을 비선형 회귀분석으로 1차 생성계수를 구하고 현장 측정값과 비교하였다. 그 결과, 9월의 현장 측정값과 예측값의 결정계수 R^2 는 0.98, 11월에는 0.82로 예측이 가능하였다.

주제어 : 잔류염소, 트리할로메탄, 수체 감소계수, 관벽 감소계수, 배급수계통

1. 서론

정수장에서 생산된 물을 송수하여 수요자에게 공급하는 배급수시설은 배수지, 배수관, 가압장, 각종 밸브 등으로 구성되며 그 관리 상태에 따라 시민에게 공급되는 수질에 직접적인 영향을 미치게 된다. 그러므로 배급수계통은 정수장에서부터 송수된 깨끗한 수돗물을 외부로부터 오염을 막고 수질의 안전성을 유지하여야 하며 또한 적절한 수압으로 수요자에게 안정적으로 공급하여야 한다.¹⁾

상수도 관망에서 수인성 질병을 예방하기 위해 주입하고 있는 염소는 사용이 편리하고 모니터링이 용이하기 때문에 많이 사용되고 있다. 그러나 관로를 통과하면서 수중의 잔류염소는 천연유기물질(NOM), 수도관벽의 슬라임과 스케일, 수도관 재질 등과 반응하고 관망과 저류시설에서의 체류시간이

증가함에 따라 감소하게 된다.²⁾ 염소 주입량이 너무 작으면 배수관로의 관말지역에는 잔류염소가 부족하여 수인성 질병에 노출될 수 있고 반면 너무 많으면 맛·냄새를 유발시키고 소독부산물 생성을 증가시키게 된다.

Sharp 등³⁾은 뉴저지 주 포트 먼마우스에서 잔류염소 감소계수가 PVC관($\phi 300$)은 4.89 day^{-1} , 비라이닝 회주철관($\phi 150, \phi 300$)은 각각 7.78 day^{-1} 과 5.76 day^{-1} 로 PVC보다 라이닝하지 않은 회주철관에서 염소 소모가 많고, 관 지름이 큰 회주철관에서 염소 소모가 적다는 것을 밝혀냈으며, Vasconcelos와 Rossman⁴⁾은 미국의 캘리포니아 페어필드 등 5개 관로에 대한 연구에서 잔류염소의 수체(bulk decay) 감소계수를 1차 반응으로 하고 관벽(pipe wall decay) 감소계수를 0차, 1차 반응식, 조도계수 등을 비교 평가하여 0차와 1차 반응식으로 나타냈을 때 효과적이라고 하였으나 최근까지 잔류염소 수체 감소반응 차수에 대한 연구가 진행 중이고 또한 계절적 수온변화에 따른 관벽 감소계수에 대한 연구는 아직 체계적으로 이루어지지 않은 실정이다. 국내에서는 상

[†] Corresponding author
E-mail: anjchan@hanmail.net
Tel: 02-2049-1130

Fax: 02-2049-1013

수도 배관망에서 수질변화를 조사하고 잔류염소 수체 및 관벽 감소계수를 산출하여 수질모델링의 접근방법을 제시하였고,⁵⁻⁸⁾ 배급수계통에서 잔류염소 감소변화에 있어서 체류시간과 수온에 대한 영향을 파악하고 체류시간이 긴 여름철 새벽시간대를 조사할 필요성을 제기하였다.⁹⁾

THMs 생성에 영향을 미치는 주요 수질인자는 잔류염소, 전구물질, 접촉시간, pH, 수온, 브롬 등이 있다. 통계를 이용한 여러 가지 THMs 생성 모델식이 제시되었다.^{10,11)} Vasconcelos 등¹²⁾은 미국의 벨링햄, 페어필드, 노스마틴 등의 배수관망에서 THMs 예측하기 위한 연구에서 수체에서 THMs 생성 모델을 1차 반응식으로 나타내고 배수관망에서 THMs를 예측하였다. 벨링햄에서는 THMs의 1차 생성계수가 1.92 day⁻¹, 페어필드에서는 1.16 day⁻¹, 노스마틴의 3곳에서는 각각 2.3, 15.1, 1.93 day⁻¹이었다. 국내에서는 배급수계통에서 THMs 생성특성에 대해 유기물, pH, 수온 등을 분석하여 생성 모델식을 제시하여¹³⁻¹⁵⁾ 활발한 연구를 지속하여 왔으며, 더 나아가 배급수계통에서 THMs의 1차 생성계수를 산출하고 관망해석 소프트웨어에 적용하는데 있어 체계적인 접근방법이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 잔류염소와 THMs 등의 24시간 수질변화에 대해 현장조사를 실시하였고, 수체와 관벽에 대한 잔류염소의 1차 감소계수와 THMs의 1차 생성계수를 산출하여 적용성을 평가하고 관망해석에 의한 수질모델링에 활용하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상지역 현황

G정수장은 한강물을 취수하여 응집제(poly aluminum chloride, poly aluminum hydroxide chloride silicate)를 주입하고 혼화지, 응집지, 침전지, 여과지 등의 공정을 통해 1일 720,000만 m³의 정수를 생산한다. 여과지에서 정수지로 유입되기 전에 후염소를 주입하여 소독하고 또한 배급수계통에서 적정 잔류염소를 유지되도록 하고 있다.

G정수장(A1)에서 생산된 정수는 ϕ 2,400 × 3열의 도복장 강관을 통해 약 15 km 거리에 있는 B배수지(A2)로 공급된다. B배수지는 터널형태의 배수지로 직경이 4.4 m이고 길이가 4,789 m의 터널이 2열로 설치되어 있다. 현장 조사지역은 서울시 북서쪽에 위치한 G가압장(A3) 배수지역으로 A2에서 물이 공급되며, A3은 J배수지(A4)와 S배수지(B1)를 통해 수돗물을 공급한다. 표고 100 m인 A4의 용량은 2,700 m³이고 배수지역 내에 11,941가구에 39,700명이 거주하고 있다. B1은 표고가 113 m이고, 용량이 4,000 m³이며 5,400여 가구에 21,900명이 거주하고 있다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 A4를 통해 공급되는 배수지역에는 4지점(A5, A6, A7, A8), B1의 배수지역에서는 3지점(B2, B3, B4)을 선정하였다.

2.2. 실험방법

2003년 3월부터 11월까지 격월로 총 5회에 걸쳐 오전 10시부터 다음날 오전 10시까지 24시간 동안 1~2시간 간격으로

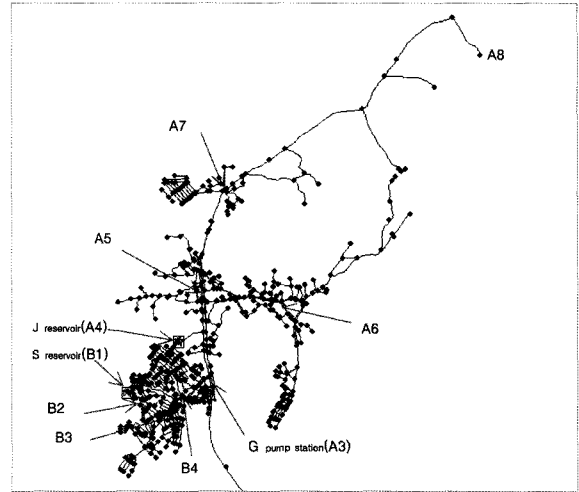


Fig. 1. Sampling sites.

로 2인 1조로 구성하여 3팀이 지점을 나누어 순회하면서 현장 조사연구를 수행하였다. 잔류염소는 1~2시간 간격으로 측정하였고 THMs는 8시간마다 채수하여 냉장보관한 후 실험실에서 분석하였다. A1과 A2의 잔류염소는 자동수질측정 데이터(서울시 상수도연구소, Seoul Water-Now System)를 활용하였다.

실험온도는 시료 채수시의 수온과 5, 15, 25°C이었다. 실험 초기에는 시간간격이 1시간, 3시간, 6시간이었고 그 후 12시간, 24시간으로 시간간격을 두었다.¹⁶⁾

잔류염소는 DPD 법의 Pocket Colorimeter(HACH Co.)로 측정하였다. THMs는 Purge & Trap Concentrator와 GC/MS로 분석하였고 TOC는 TOC 분석기(Sievers Co.)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 현장조사 결과

3.1.1. 대상지역의 수리해석

A1에서 A2를 거쳐 A3까지는 도복장강관이며 A3 이후에는 회주철관, 덕타일주철관, PE관으로 구성되어 있고, 급수관은 대부분 스테인레스강관과 아연도강관이였다. A3 이후의 관로는 관 지름이 15~450 mm이었으며, 관망 수리해석에는 관 지름 80 mm 이상의 관로로 구성하였다. 절점의 수는 752개, 관로의 수는 856개, 관 길이는 총 63 km이었다. 관로의 조도계수를 정확하게 실측하기 어렵기 때문에 문헌상의 값을 인용하였고^{17,18)} 손실수두는 Hazen-Williams식을 적용하였다. A1과 A2, A3으로 연결되는 수체에서 도중에 분기하는 지역에 대해서는 물 사용량과 물 사용계수를 입력하여 절점으로 간주하였다.

저지대의 가압장과 고지대의 배수지가 연계해 있는 배수구역의 경우, 가압장에서 배수지로 물을 펌핑하고 배수지에서 자연유하로 공급하는 간접배수방식과 평상시에는 가압펌프로 직접 배수지역으로 물을 공급하고 물 수요량이 작을 때에는 배수지로 보내는 직·간접병행 배수방식이 있는데 B1은 전

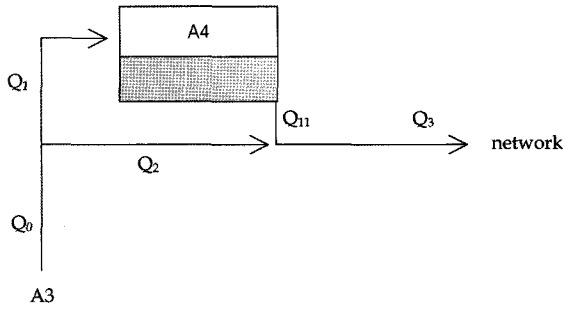


Fig. 2. Scheme of G Pumping station (A3) and J Service reservoir (A4).

자의 방식으로 운영하고 있었고 A4는 배수지 유입관과 유출관의 연결관인 바이패스관을 개방하여 후자와 같이 운영하고 있었다. 따라서 배수지역의 물 수요가 많을 때에는 바이패스 관으로 물이 공급되어 배수지의 물은 정체하게 되며, 물 수요가 줄어드는 심야시간에는 배수지로 유입되어 최고 수위(high level)가 되면 A3의 펌프가 정지한 후 배수지 물이 공급되다가 배수지의 수위가 떨어져 최저수위(low level)로 되면 펌프가 재기동한다.

A3에서 A4와 B1을 통해 물이 공급되는데 유량계가 펌프 토출 측에 설치되어 있어 펌프가 가동할 때에만 유량이 기록되므로 배수구역의 물 수요량 패턴을 파악할 수 없었기 때문에 펌프 운전과 배수지 수위의 수치분석을 통해 물 수요량 패턴을 도출하였다.

Fig. 2에서 만일 $Q_1 = 0$ 이라고 하면, 수위가 일정할 때 식 (1)과 같은 식이 성립된다.

$$dQ_0 = dQ_2 = dQ_3 \quad (1)$$

물 수요량에 따라 유량 Q_{11} 이 A4를 유·출입하게 되며 식 (2)과 같이 표현될 수 있다(+ : 수위 상승시, - : 수위 하강시).

$$dQ_2 = dQ_3 \pm dQ_{11} \quad (2)$$

$Q_{11} = Adh$ 이므로, 식 (3)과 같이 된다.

$$dQ_2 = dQ_0 = dQ_3 \pm Adh \quad (3)$$

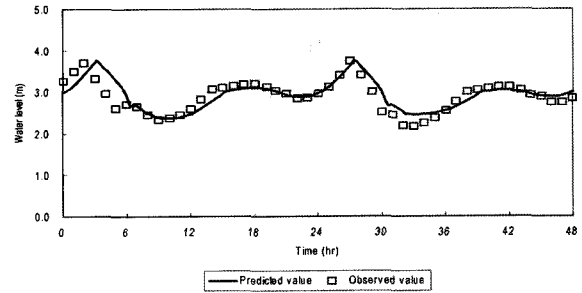
A3의 펌프 운전에 따른 유량 Q_3 은 펌프 가동시에는 식 (4), 펌프 정지시에는 식 (5)로 된다.

$$dQ_3 = dQ_0 \pm Adh \quad (4)$$

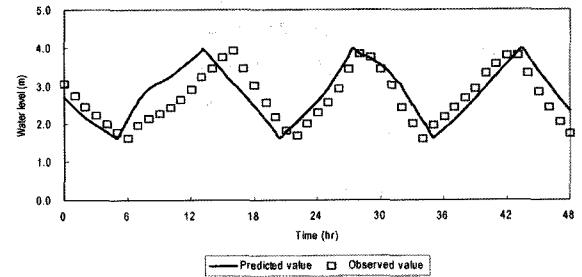
$$dQ_3 = - Adh \quad (5)$$

여기서, A는 배수지 면적(m^2)이고, h는 배수지 높이(m)이다.

A4와 B1 배수구역의 수도계량기 검침량에 기초한 일평균



(a) Water level of A4 reservoir



(b) Water level of B1 reservoir

Fig. 3. Observed and Predicted values of water level(May 2003).

물 사용량은 각각 $260 m^3/hr$, $194 m^3/hr$ 이었으며, 현장 조사 기간에 A3의 평균 펌핑량이 수도계량기 검침량보다 A4 배수지역이 1.2~1.3배, B1 배수지역은 1.4~1.5배 많았기 때문에 관망 수리해석에서 누수량 또는 불명수량이 배수구역 전체에 고르게 분포하는 것으로 간주하여 관망 수리해석을 실시하였다.

시간변화에 따른 수리 및 수질모델링에는 24시간의 물 수요량 패턴이 큰 영향을 미치므로 가압펌프의 펌핑량과 배수지 수위 변화를 적합하게 모의하는 것이 필요하다. Fig. 3에 A4와 B1 배수지 수위의 실측값과 예측값을 나타냈다. 가압장의 펌프 운전, 유량, 배수지 수위 데이터를 바탕으로 펌프 운전패턴을 반복 조정하여 실제 수위값에 근사시켰다. A4와 B1의 수위변화가 조금 다른 것은 물 수요에 따른 펌핑량과 관계가 있었으며 A3에서 펌핑하는 양이 많을수록 B1과 같은 수위형태이었고 상대적으로 펌핑량이 작으면 A4와 같은 유형이 되었다.

3.1.2. 현장 24시간 수질변화

정수장에서 수도꼭지까지 잔류염소를 가능한 한 낮추어 수돗물을 공급하기 위해 정수장과 배수지의 잔류염소 목표값을 평시(10~5월)와 여름철(6~9월)로 설정하여 후염소 투입량을 조정하고 있다. A1 정수장에서는 정수의 잔류염소가 평시에는 $0.8 mg/L$, 하절기에는 $1.0 mg/L$ 이 되도록 투입하고 있었다.

정수된 물이 상수도 배관을 통과하여 관말에 도달할 때까지 잔류염소의 변화를 조사하기 위해 A1 수계의 관말지역인 A3 배수지역에 대해 24시간 현장 조사를 실시하였다. Table 1의 샘플링 지점은 A1에서 A2의 유출지점까지 관 길이가 15 km, 체류시간은 17 hr, A3까지는 각각 25.2 km, 23 hr 그리고 A8의 관말지점까지는 31.2 km, 58 hr이었다.

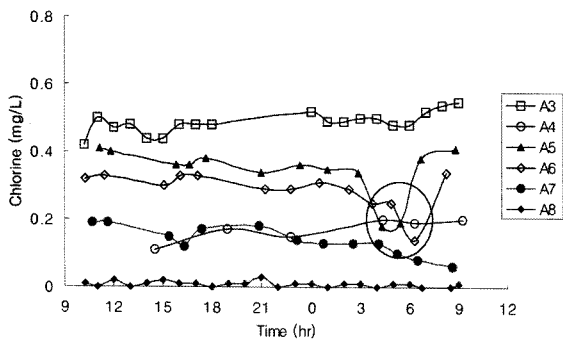
Table 1. Status of pipe length and residence time of 24-hour sampling sites

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
pipe length(km) (from A3)	-	15	25.2	25.8 (0.6)	26.5 (1.3)	27.2 (2.0)	28.2 (3.0)	31.2 (6.0)
residence time(hr)	-	17	23	25	27	28	30	58

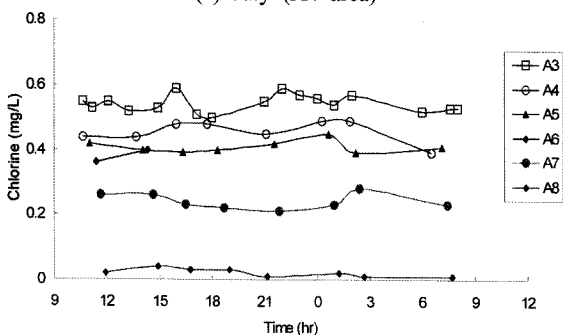
A1에서 송수 전에 정수의 잔류염소는 3월부터 11월까지 격월별로 0.80~0.97 mg/L의 범위였고 A2까지 송수되면 수온이 6°C로 가장 낮았던 3월에 잔류염소 감소량은 1 km 당 0.01 mg/L이었으며 수온이 23°C로 가장 높았던 7월에는 1 km 당 0.02 mg/L이 감소되어 수온에 따라 큰 차이를 보였다.

3~9월까지의 조사기간에 A4의 잔류염소가 A5, A6, A7보다 낮았고 새벽 5~6시경 A5와 A6의 잔류염소가 급격히 감소되어 A4의 잔류염소와 유사한 값을 보였는데 이것은 A4에서 배수지 청소 또는 비상용 바이패스관을 열어 두어 직·간접배수방식으로 운영하였기 때문이었다. 물 수요량이 많은 시간대에는 A3에서 펌핑된 물이 A4를 거치지 않고 바이패스관을 통해 직접 공급되며, 물 수요량이 적은 야간에는 배수지로 유입되어 수위가 높아져 가압장의 펌프가 정지되면 A4에서 낮 시간에 정체되어 잔류염소가 많이 감소된 물이 새벽시간에 공급되어 나타난 현상이라고 판단된다(Fig. 4(a)).

11월의 현장 조사 전에 A4의 바이패스관을 닫아 가압장에서 펌핑한 물이 전량 배수지를 통해 공급되도록 하는 간접배수방식으로 전환함에 따라 배수지내에서 정체하지 않게 되므로 A4의 잔류염소가 A5, A6, A7보다 높아졌고 또한 새벽 5~6시경 A5와 A6에서 잔류염소가 급격히 감소하던 현상도 없어졌다(Fig. 4(b), Fig. 5(e)).



(a) July (A4 area)



(b) November (A4 area)

Fig. 4. Residual chlorine of 24-hour sampling in study area.

A5 지점에서 A7 지점까지는 관 길이가 1.7 km이나 잔류염소 감소량은 각각 3월 0.08 mg/L, 5월 0.11 mg/L, 7월 0.20 mg/L, 9월 0.19 mg/L, 11월 0.17 mg/L로 A1에서 A2까지 송수관로에서의 잔류염소 감소량보다 약 5배 이상 컸다. 수돗물에서 잔류염소는 수체와의 반응으로 감소되고 또한 송배수관로를 통과하면서 관벽과 반응하여 감소되는데, 송수관로(A1~A3)에서는 잔류염소의 수체 실험값과 현장 측정값에 큰 차이가 없었지만, 배수관로(A4~A8)에서는 현장에서 측정된 잔류염소가 급격히 감소되어 수체 잔류염소 실험값과 큰 차이를 보였다(Fig. 5). 따라서 송수관로에서는 수체 잔류염소 반응이 지배적이고 관벽 반응에 의한 잔류염소 감소량이 미미하였는데 이것은 송수관로는 보통 대형관로로서 유속이 1.0 m/sec 이상으로 빠르고 유량이 많아 관벽과의 접촉면적이 상대적으로 적은 반면에 배수관로는 유속이 0.3 m/sec 이하로 느리고 관경도 작아 유량의 단위체적당 관벽과의 접촉면적이 크며 또한 이 지역에 비내식성관인 회주철관이 잔존해 있어 잔류염소가 많이 감소한 것으로 판단된다.

계절변화에 따른 수질과 수온의 영향으로 정수장에서 송수하기 전의 정수에서 THMs 생성량이 달랐는데 이 초기 THMs 생성량은 3~11월까지 격월별로 각각 5 µg/L, 11 µg/L, 25 µg/L, 10 µg/L, 4 µg/L이었다. 배급수계통을 거치면서 잔류염소와의 반응과 체류시간 증가로 THMs 생성량이 증가하게 된다. 체류시간이 58 hr인 A8 지점에서 3~11월까지 격월별로 각각 16 µg/L, 19 µg/L, 41 µg/L, 23 µg/L, 17 µg/L의 THMs가 생성되었으며 수온이 가장 높았던 7월에 생성량이 가장 많았다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 실험실의 THMs 생성 실험값과 현장 측정값을 비교했을 때 3월과 11월에는 현장 측정값이 더 컸고 7월과 9월에는 실험값이 더 컸는데 이것은 3월과 11월에는 현장의 수온이 생성 실험시 수온보다 더 높았고 7월과 9월에는 생성 실험시 수온이 다소 높았기 때문인 것으로 판단되며, 수온이 비슷했던 5월에는 현장 측정값과 실험값의 THMs가 유사하였다. 이것은 정수장에서 지표수를 원수로 이용하기 때문에 대기의 온도변화에 영향을 많이 받지만 배급수관로가 매설되어 있는 토양의 온도(지열) 영향도 받기 때문에 정수가 배급수관로를 통과하면서 주변 토양의 환경에 따라 수온의 차이가 발생하는 것으로 보인다.¹⁹⁾

3.2. 잔류염소 모델링

3.2.1. 잔류염소 수체 감소반응

잔류염소의 수체 감소반응은 수중의 유기물과 반응하는 것으로 1차 반응식 외에 병렬 1차, 2차, n차 등으로 표현될 수 있으며 잔류염소 감소반응의 적합한 모델을 구하기 위한 연구들이 수행되어 왔다.^{4,20,21)}

잔류염소 수체 감소계수를 구하기 위해 2002년 10월부터 2004년 2월까지 총 38회, A2 및 A3의 시료에 대해서는 실험을 4회 실험한 결과, Table 2와 Fig. 6에서와 같이 정수장에서 대배수지까지는 병렬 1차 빠른 반응식의 감소계수, 대배수지 이후의 배급수계통에 대해서는 병렬 1차 느린 반응

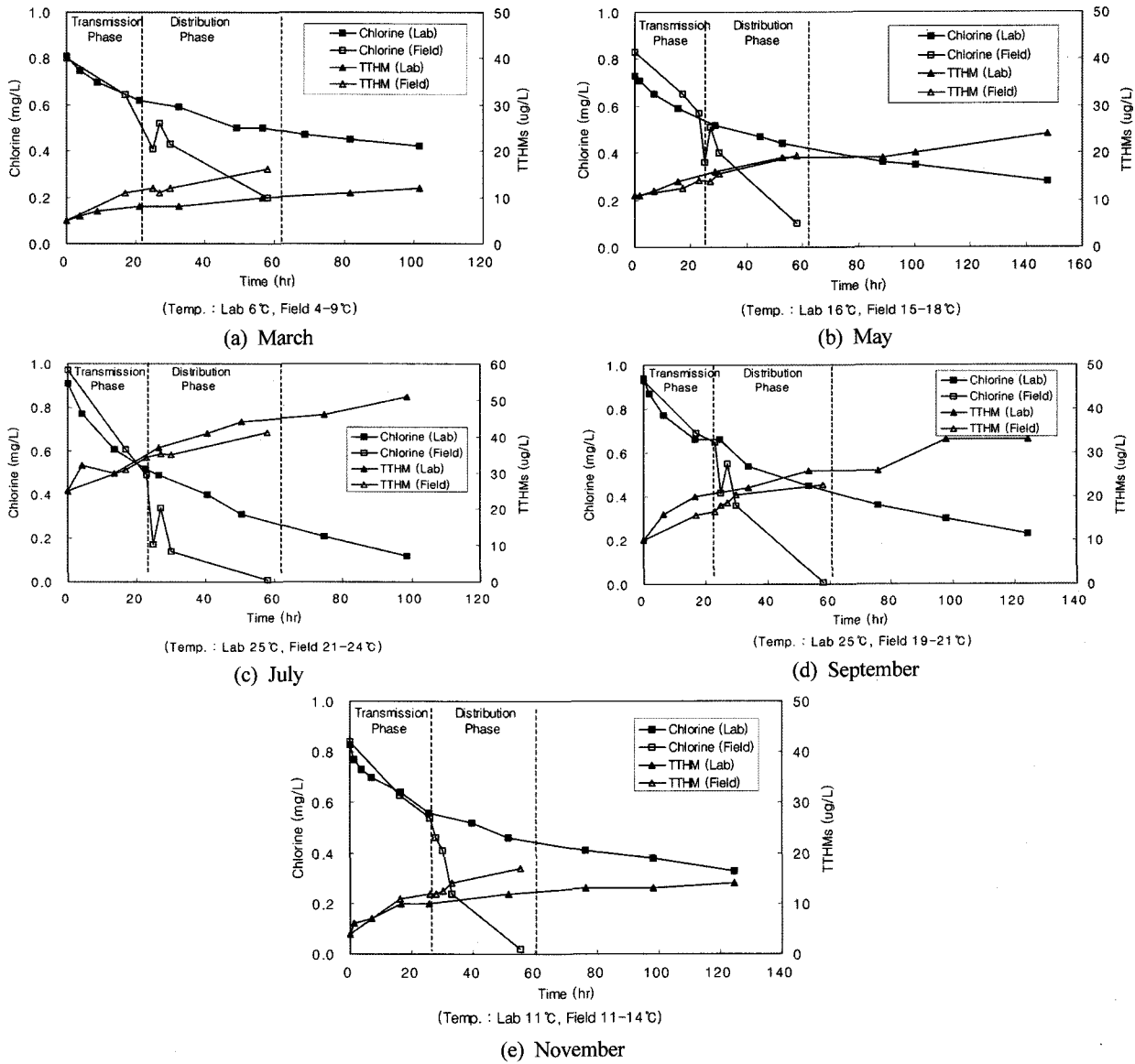


Fig. 5. Comparison of Lab test and Field study.

식의 감소계수를 적용하는 것이 가장 적합하였으며, 식 (6)으로 산출하여 Table 2에 나타냈다.^{16,22)}

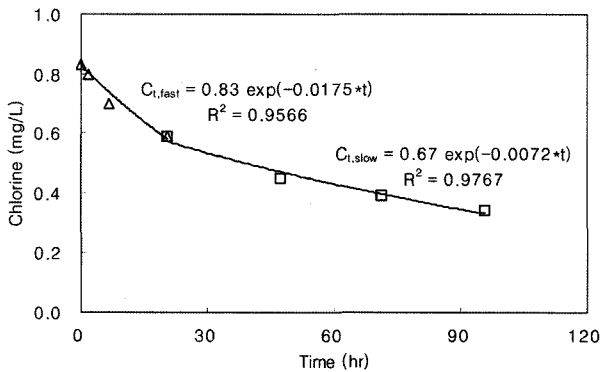


Fig. 6. Chlorine bulk decay by parallel first-order reaction model at 15°C (Jan. 2004).

Table 2. Chlorine bulk decay coefficients for water quality modeling in 2003 (Unit : hr⁻¹)

Chlorine bulk decay	Mar	May	Jul	Sep	Nov
Transmission phase	0.0136	0.0144	0.0273	0.0176	0.0169
Distribution phase	0.0053	0.0062	0.0200	0.0075	0.0072

$$C = C_{0,fast} \exp(-k_{b,fast} t_{fast}) + C_{0,slow} \exp(-k_{b,slow} t_{slow}) \quad (6)$$

여기서, $C_{0,fast}$ 와 $k_{b,fast}$ 는 빠른 반응의 잔류염소 농도(mg/L)와 수체 감소계수(hr⁻¹)이고, $C_{0,slow}$ 와 $k_{b,slow}$ 는 느린 반응의 잔류염소 농도(mg/L)와 수체 감소계수(hr⁻¹)이며, t 는 실험시 경과 시간(hr)이다.

3.2.2. 잔류염소 관벽 감소반응

관망해석 소프트웨어를 활용해 잔류염소 분포를 나타내기 위해서는 잔류염소의 관벽 감소계수를 구하여 식 (7)에 대

입하여야 한다. 수체 감소계수만을 적용했을 때, 0차 및 1차 관벽 감소계수를 적용했을 때, 조도계수를 고려한 0차 및 1차 관벽 감소계수를 적용했을 때의 5개 모델을 비교하였다. 평균절대오차(mean absolute error)와 평균제곱근오차(root mean square error)를 이용하여 잔류염소의 실측값과 예측값의 오차가 최소가 되는 값을 관벽 감소계수로 결정하였다. 잔류염소 1차 수체 감소계수와 1차 관벽 감소계수를 적용했을 때 평균절대오차와 평균제곱근오차가 0.03, 0.037 mg/L로 가장 작았다. 관벽 감소계수를 포함하기 전에는 관말로 갈수록 측정값과 예측값의 오차가 컸으나 관벽 감소계수를 적용했을 때 오차를 줄일 수 있었다. 오차가 최소인 1차 관벽 감소식에 대해 관종별로 관벽 감소계수를 반복 조정하여 Table 3과 같이 구하였다.²³⁾

$$K = k_b + \frac{k_w k_f}{r_h (k_w + k_f)} \quad (7)$$

여기서, K는 잔류염소의 총 감소계수이고, k_w 는 관벽 감소계수(m/day), k_f 는 물질전달계수이며, r_h 는 관의 수리학적 반지름이다.²⁴⁾

Table 3. Estimation of chlorine first-order wall decay(k_w) using water quality modeling(Unit : m/day)

Pipe type	Mar	May	Jul	Sep	Nov	
	2003	2003	2003	2003	2003	
DCIP	Service area of A4	0.02	0.05	0.20	0.16	0.17
	Service area of B1	-	-	-	0.02	0.02
	A3 → A5	0.03	0.05	0.20	0.20	0.10
CIP	A5 → A6	0.06	0.12	0.42	0.30	0.21
	A5 → A7	0.09	0.24	0.70	0.50	0.40

강관과 PVC 등은 관벽 감소계수가 0.02 m/day로 수온에 따라 큰 차이가 없었다. 덕타일주철관(DCIP)에서는 3월과 5

월에 0.02 m/day와 0.05 m/day에서 7월에는 0.2 m/day로 증가하였다. A4 배수구역의 관벽 감소계수가 B1 배수구역보다 큰 것으로 나타났다. 회주철관(CIP)에서는 7월에 A3에서 A5까지 0.2 m/day, A5에서 A6까지는 0.42 m/day, A5에서 A7까지는 0.7 m/day로 크게 증가하였는데 이것은 각 지점별 유속이 0.56 m/sec, 0.24 m/sec, 0.11 m/sec로서 유속의 차이에 기인한 결과라고 판단된다.

3.2.3. 배급수계통에서 잔류염소 분포

A1 정수장의 수계에서 잔류염소 수체 및 관벽 감소계수를 WaterCAD 소프트웨어(Haestad Methods, Inc.)에 입력하여 A3의 배수구역에서 격월별 잔류염소의 분포를 나타냈다(Fig. 7). 7월에 수온이 가장 높았을 때 잔류염소가 0.2 mg/L 이하로 감소되는 지역이 증가하였다.

A4 배수지에서는 배수지 바이패스관을 개방하여 직·간접 배수로 운영하고 있어서, 물 수요가 많은 주간에는 배수지내에서 물이 정체하다가 심야에 물 수요가 감소되면 배수지 수위가 상승하여 펌프 운전이 정지되고 주간에 잔류염소가 감소된 물이 배수지역으로 공급되는 현상이 Fig. 8과 같이 발생하였으나 A4의 바이패스관을 닫아 간접배수방식으로 전환한 후 그 현상은 나타나지 않았다.

3.3. THMs 모델링

A1에서 정수를 채수하여 월별, 수온별로 THMs 생성실험을 10회 실시하였다. 여과수가 정수지로 유입될 때 후염소를 주입하고 있었으며 따라서 정수지에서 채류하면서 펌핑전에 THMs이 생성되었는데 이를 Table 4에 초기생성량(C_0)으로 나타냈다. 수온이 가장 높았던 7월에 25 µg/L로 가장 큰 값을 보였다. 수온이 동일할 때 월별 수질변화에 따른 THMs의 생성량을 비교하기 위하여 수온 25°C에서 실험하였다(Fig. 9). 100시간이 경과했을 때 7월, 9월, 11월의 THMs는 각각 26 µg/L, 23 µg/L, 19 µg/L이었다. 전체적으로 볼 때 TOC가 증가함에 따라 THMs 생성량도 증가하는 경향을 보였다. Fig. 10은 수

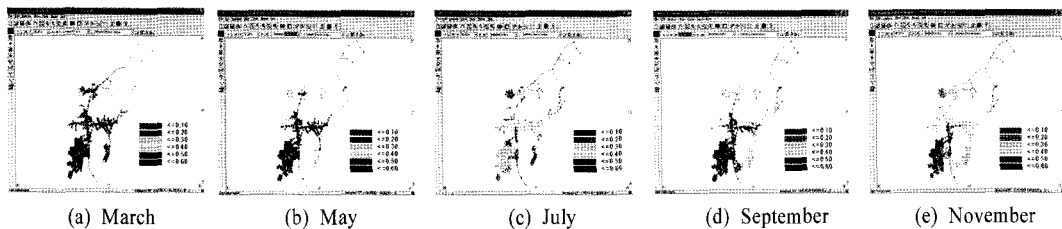


Fig. 7. Contours of residuals chlorine at A4 service area.

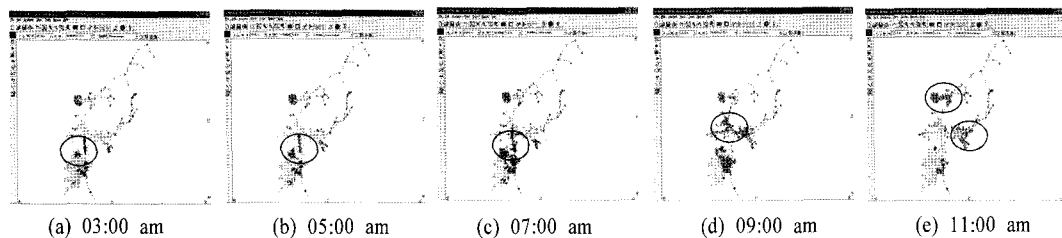


Fig. 8. Contours of residuals chlorine at A4 service area in July.

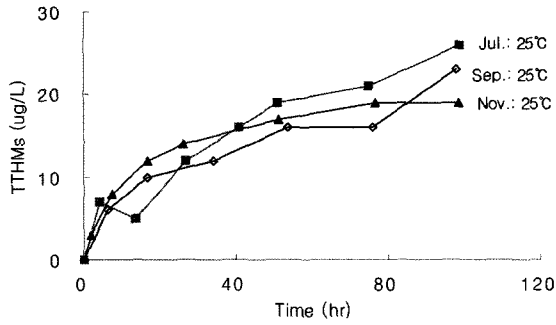


Fig. 9. THM formation at 25°C.
(TOC: Jul. 1.41, Sep. 0.91, and Nov. 1.13 mg/L)

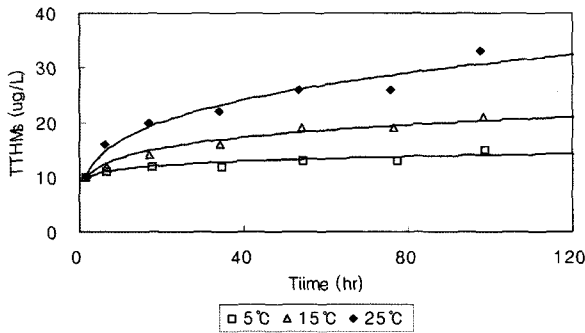


Fig. 10. THM formation by water temperatures in Sep.

온이 THMs에 미치는 영향을 실험한 것으로 수온에 비례하여 THMs 생성량이 증가하였다. 따라서 정수처리 공정에 큰 변화가 없고 정수처리수의 수질이 연중 큰 변화가 없다면 배급수계통에서 THMs의 생성에는 수온이 지배적인 인자라고 할 수 있다.

Fig. 11은 식 (8)에서 1차 생성계수(k)와 최종 생성농도(C_{max})를 구하기 위해 비선형 회귀분석으로 모델링한 것이다.¹²⁾ 수온 15°C에서 실험한 것으로 정수의 초기 생성농도(C₀)는 10 µg/L이었고 최종 생성농도는 12.6 µg/L, 1차 생성계수 k는 0.0203 hr⁻¹이었다. Table 4에 산출한 결과들을 정리하였다. 수온이 높으면 THMs의 1차 생성계수가 커졌으나 동일한 시료가 아닌 경우에는 비례하는 경향이 나타나지 않았는데, 이것은 TOC 등 계절별 수질의 변화에 따라 THMs의 생성속도에 다소 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

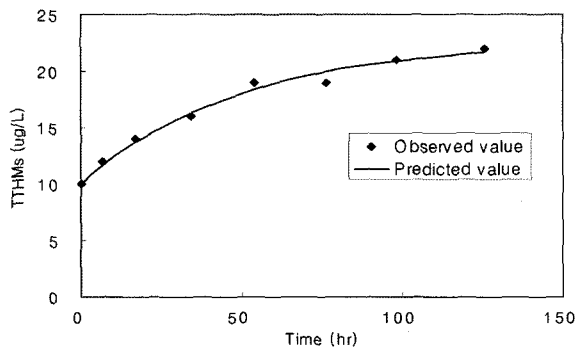


Fig. 11. Comparison of Observed and Predicted values by non-linear regression for THMs at 15°C(Sep. 2003).

$$THMs = C_0 + C_{max}(1 - \exp(-kt)) \quad (8)$$

여기서, k는 THMs의 1차 생성계수, C₀와 C_{max}는 초기 생성농도(µg/L)와 최종 생성농도(µg/L)이며, t는 실험시 경과시간(hr)이다.

Table 4와 같이 실험실에서의 실험온도는 9월에 5°C, 15°C, 25°C이었고 11월에는 5°C, 11°C, 15°C, 25°C이었다. 현장의 수온은 Table 5에서 9월과 11월 각각 21°C, 13°C이었으므로 현장의 THMs 생성값을 예측하기 위해서 현장과 동일한 온도에서의 k와 C_{max}를 구하는 것이 필요하였다.

Table 4에서 수온(T)에 대한 k를 9월과 11월에 대하여 각각 식 (9)와 (10)으로 나타내었다. Table 5에서 현장의 수온이 21°C이었던 9월에는 k값이 0.0225 hr⁻¹이었고, 현장의 수온이 13°C이었던 11월에는 k값이 0.0522 hr⁻¹이었다. 또한 9월과 11월에 수온(T)과 C_{max}의 관계식을 식 (11)과 (12) 같이 구하고, 9월과 11월의 현장 수온인 21°C와 13°C을 대입하여 산출한 결과, C_{max}는 각각 18.2 µg/L, 9.6 µg/L이었다 (Table 5).

Table 5의 C₀, C_{max}, k의 값을 식 (8)에 대입하여 Table 6과 Fig. 12와 같이 THMs의 현장 측정값(A1, A2, A3, A4, A5, A7, A8)과 예측값을 비교하였다. 9월의 현장 측정값과 예측값의 결정계수 R²는 0.98로 상당히 양호하였고, 11월에는 체류시간이 58시간인 A8 지점에서 실측값과 예측값의 차이가 4 µg/L이고 9월의 결과보다는 결정계수(R²=0.82)가 다소 낮았지만 예측이 가능한 것으로 판단된다. Fig. 13은 관망 해석 소프트웨어에 9월의 THMs 생성 인자를 입력하여 분포를 나타낸 것으로 연구대상지역에서 THMs 생성량을 파악할 수 있었다.

$$k_9 = 0.007 \ln(T) + 0.0012 \quad (R^2 = 0.99) \quad (9)$$

$$k_{11} = 0.0163 \ln(T) + 0.0104 \quad (R^2 = 0.96) \quad (10)$$

$$C_{max,9} = 4.6027 \exp(0.0654 \cdot T) \quad (R^2 = 0.99) \quad (11)$$

$$C_{max,11} = 4.9795 \exp(0.0505 \cdot T) \quad (R^2 = 0.95) \quad (12)$$

Table 4. Parameters of THM formation model by non-linear regression(Year : 2003)

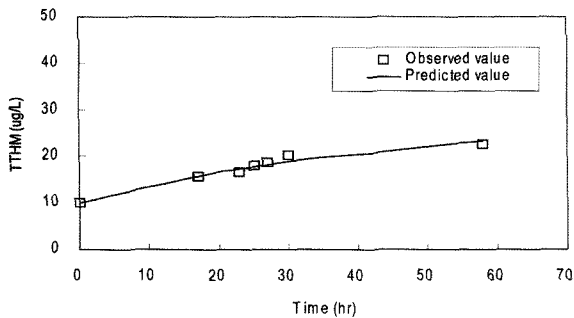
Month	Water Temp.(°C)	C ₀ (µg/L)	C _{max} (µg/L)	k(hr ⁻¹)	R ²
Mar	6	5.0	9.1	0.0149	0.97
May	15	11.0	15.5	0.0108	0.97
Jul	25	25.0	29.5	0.0193	0.95
Sep	5	10.0	6.3	0.0124	0.91
	15	10.0	12.6	0.0203	0.99
	25	10.0	23.3	0.0237	0.93
Nov	5	4.0	6.6	0.0362	0.84
	11	4.0	9.2	0.0520	0.96
	15	4.0	9.2	0.0515	0.96
	25	4.0	18.5	0.0635	0.99

Table 5. Modified parameters of THM formation model in September and November

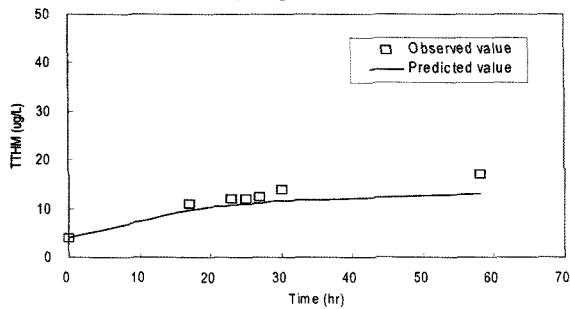
Month	Water temp.(°C)	C ₀ (µg/L)	C _{max} (µg/L)	k(hr ⁻¹)
Sep. 2003	21	10	18.2	0.0225
Nov. 2003	13	4	9.6	0.0522

Table 6. Comparison of Observed and Predicted THMs by non-linear regression

Residence Time	THMs in Sep. 2003(µg/L)			THMs in Nov. 2003(µg/L)		
	Observed	Predicted	R ²	Observed	Predicted	R ²
0	10	10		4	4	
17	16	16		11	10	
23	17	17		12	11	
25	18	18	0.98	12	11	0.82
27	19	18		13	11	
30	20	19		14	12	
58	23	23		17	13	



(a) September



(b) November

Fig. 12. Comparison of Observed and Predicted THMs in field.

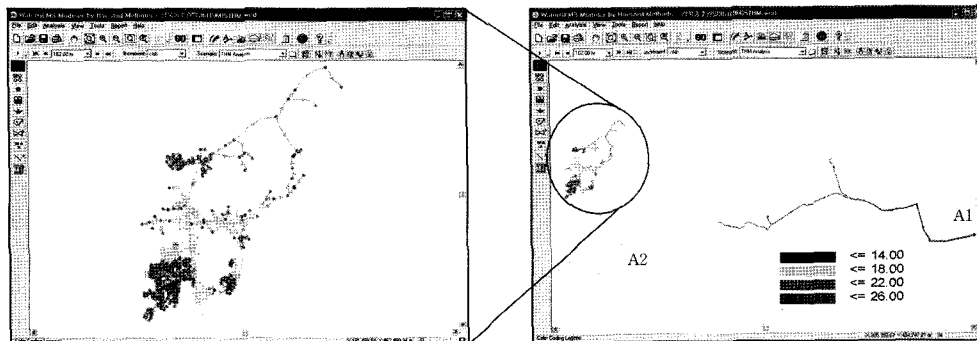


Fig. 13. Contours of THMs at A1 distribution system in September.

4. 결론

잔류염소 농도 변화를 예측하기 위해 연구대상지역으로 A1 정수장 수계의 관말지역을 선정하고 관로에 대한 24시간 현장 조사를 수행하고 잔류염소와 THMs의 수질모델링을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 잔류염소의 수체 실험값과 현장 측정값을 비교할 때, 송수관로에서는 두 값의 차이가 거의 없었으나 A3의 배수관로 통과하면서 현장의 잔류염소가 급격히 감소되었다. 이것은 송수관로는 보통 대형관로로서 유속이 1.0 m/sec 이상으로 빠르고 유량이 많아 관벽과의 접촉면적이 상대적으로 적은 반면에 배수관로는 유속이 0.3 m/sec 이하로 느리고 관경도 작아 유량의 단위체적당 관벽과의 접촉면적이 크며 또한 이 지역에 비내식성관인 회주철관이 잔존해 있어 잔류염소가 많이 감소한 것으로 판단된다.

2) THMs 생성 실험값과 현장 측정값을 비교했을 때 수온이 비슷했던 5월에는 현장 측정값과 실험값의 THMs가 유사하였지만 현장의 수온이 더 높았던 3월과 11월에는 현장 측정값이 더 컸고, 생성 실험시에 수온이 다소 높았던 7월과 9월에는 생성 실험값이 더 컸는데 이것은 물이 배급수관로를 통과하면서 토양환경의 영향을 받는 것으로 배급수계통의 평균적인 온도에서 실험한다면 현장 측정값과 생성 실험값이 매우 유사할 것으로 판단된다.

3) 병실험을 통해 잔류염소 병렬 1차 수체 반응계수를 구하고, 5개 관벽 감소 모델을 비교 평가하여 1차 관벽 감소계수 산출한 다음 관망해석 소프트웨어를 이용하여 잔류염소 분포를 예측한 결과, 연구대상지역에서 잔류염소 분포를 잘 나타낼 수 있었고, A4 배수지의 운영에 따른 잔류염소 변화를 확인할 수 있었다.

4) THMs의 1차 생성계수를 비선형 회귀분석으로 산출하여 현장 측정값과 비교한 결과, 9월의 현장 측정값과 예측값의 결정계수 R²는 0.98로 양호하였고, 11월에는 체류시간이 58 시간인 A8 지점에서 실측값과 예측값의 차이가 4 µg/L이고 9월의 결과보다는 결정계수(R²=0.82)가 다소 낮았지만 예측이 가능한 것으로 판단되었고, 관망해석 소프트웨어에 THMs 생성 인자를 입력하여 분포를 나타내어 연구대상지역에서 THMs 생성량을 파악할 수 있었다. 정수처리 공정에 큰 변화가 없

고 정수처리수의 수질이 연중 큰 변화가 없다면 1차 생성 계수를 이용하여 배급수계통에서 THMs의 생성 분포와 예측하는 데에 유용할 것으로 판단된다.

5) 배급수계통에서 잔류염소의 적정관리를 위해서는 관로 내의 잔류염소 분포, 시간적인 잔류염소 변화를 조사하고 분석하여 감소요인을 파악하는 것이 중요하며, 결과에 따라 잔류염소 농도가 많이 감소하는 관로에 대해서 플러싱, 갱생, 관교체, 또는 퇴수 등의 적절한 대책을 실시해야 할 것으로 본다.

참고문헌

1. 한국상하수도협회, 상수도시설기준, 689~695(2004).
2. Clark, R. M., Rossman, L. A., and Wymer, L. J., "Modeling distribution system water quality: Regulatory implications," *J. Water Resour. Plng. and Mgt. ASCE*, **121**(6), 423~428(1995).
3. Sharp, W. W., et al., "Insitu Chlorine Decay Rate Testing," in *Proceedings of AWWARF/EPA Conference on water quality modeling in distribution systems*, Cincinnati, OH, AWWARF/EPA(1991).
4. Vasconcelos, J. J., Rossman, A. L., Grayman, W. M., Boulos, F. P., and Clark, M. R., "Kinetics of chlorine decay," *J. AWWA*, **89**(7), 54~65(1997).
5. 이현동, 정원식, 문숙미, "상수도 배관망에서의 수질변화에 관한 연구," *대한상하수도학회지*, **11**(3), 59~66(1997).
6. 이현동, 정원식, 광필재, 김만기, "상수도시스템에서 잔류염소 거동에 관한 연구," *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 169~172(2000).
7. 주대성, 박노석, 박희경, 오정우, "상수관망내 잔류염소농도 분포 예측," *대한상하수도학회지*, **12**(3), 118~124(1998).
8. 현인환, 김형준, 강호, "수돗물에 있어서 잔류염소농도 감소계수에 관한 연구," *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 59~62(2000).
9. 현인환, 김형준, 강호, "송배수시스템에서 잔류염소 변화의 계절적 특성," *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 41~44(2001).
10. Westerhoff, P., et. at., "Applying DBP models to full-scale plants," *J. AWWA*, **92**(3), 89~102(2000).
11. Amy, G. L., Chadik, P. A., Chowdhury, Z. K., "Developing models for predicting Trihalomethane formation potential and kinetics," *J. AWWA*, **79**(7), 89~97(1987).
12. Vasconcelos, J. J., et al., *Characterization and Modeling of Chlorine Decay in Distribution Systems*, AWWARF, 184~247(1996).
13. 이지형, 김동윤, 최유정, "모형관과 상수도 현장 관망에서 THMs 생성 및 예측 모델링에 관한 연구," *대한환경공학회지*, **19**(6), 709~720(1997).
14. 오정우, 김주환, "상수도 관로내에서의 THMs 생성추정 모델식의 산정," *J. KSWQ*, **14**(4), 455~462(1998).
15. 한송희, 구윤희, 구자용, 유명진, "배수과정에서의 염소 소비 및 THMs 생성에 대한 예측," *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집*, E21~E24(2002).
16. 안재찬, 박창민, 구자용, "배급수계통에서 잔류염소 감소 특성 및 적용연구," *대한상하수도학회지*, **19**(4), 487~496(2005).
17. 최영박, 엄원택, *상수도학*, 형설출판사, 359(1992).
18. Walski, M. T., et. al., *Advanced water distribution modeling and management*, 4th ed., Haestad Press, pp. 36~37(2003).
19. Ahn, J. C., Lee, S. W., Lee, G. S., Koo, J. Y., "Predicting water pipe breaks using neural network," *Water Science and Technology: Water Supply, IWA*, **5**(3-4), 159~172(2005).
20. Hua, F., West, F. R., Barker, R. A., and Forster, C. F., "Modelling of chlorine decay in municipal water supplies," *Water Res.*, **33**(12), 2735~2746(1999).
21. Powell, J. C., et al., "Performance of various kinetic models for chlorine decay," *J. Water Resour. Plng. And Mgmt. ASCE*, **126**(1), 13~20(2000).
22. Ahn, J. C., Kim, Y. W., Lee, K. S., Koo, J. Y., "Residual chlorine management in water distribution systems using network modelling techniques: case study in Seoul City," *Water Science and Technology: Water Supply, IWA*, **4**(5-6), 421~429(2004).
23. 안재찬, 상수도 송배수시스템에서의 최적수질관리 방안에 관한 연구, 서울시립대학교, 박사학위 논문(2005).
24. Rossman, L. A., Clark, R. M., and Grayman, W. M., "Modeling chlorine residual in drinking water distribution system," *J. Environ. Eng.*, **120**, 803~820(1994).