

Prediction of residual chlorine using two-component second-order decay model in water distribution network

이변량 감소모델을 적용한 배급수관망에서의 잔류염소농도 예측 및 이의 활용

Young Hyo Kim¹ · Ji Hyang Kweon^{1*} · Doo Il Kim²

김영효¹ · 권지향^{1*} · 김두일²

¹Department of Environmental Engineering, Konkuk University · ²Department of Civil and Environmental Engineering Dankook University

Abstract : It is important to predict chlorine decay with different water purification processes and distribution pipeline materials, especially because chlorine decay is in direct relationship with the stability of water quality. The degree of chlorine decay may affect the water quality at the end of the pipeline: it may produce disinfection by-products or cause unpleasant odor and taste. Sand filtrate and dual media filtrate were used as influents in this study, and cast iron (CI), polyvinyl chloride (PVC), and stainless steel (SS) were used as pipeline materials. The results were analyzed via chlorine decay models by comparing the experimental and model parameters. The models were then used to estimate rechlorination time and chlorine decay time. The results indicated that water quality (e.g. organic matter and alkalinity) and pipeline materials were important factors influencing bulk decay and sand filtrate exhibited greater chlorine decay than dual media filtrate. The two-component second-order model was more applicable than the first decay model, and it enabled the estimation of chlorine decay time. These results are expected to provide the basis for modeling chlorine decay of different water purification processes and pipeline materials.

Key words : chlorine decay, chlorine residual, water distribution network, characteristic time, Re-chlorination, two-constituent decay model.
주제어 : 잔류염소, 염소감소, 이변량감소모델, 배급수관망, 특성시간, 재염소주입

1. 서론

상수도를 사용하는 사용자에게 수도꼭지까지 깨끗한 물을 미생물로부터 안전하게 공급을 하기 위해 사용되는 방법이 소독이다. 그중 염소소독은 지난 100년간 가장 경제적이고 안전한 소독 방법으로 사용이 되어왔다(Singer, 1999). 특히 염소는 소독효과가 최종 도달지인 수도꼭지까지 유지되는 잔류성이 존재하여 사용자에게 안전한 물을 공급할 수 있게 해준다. 우리나라는 수도꼭지의 먹는 물 잔류염소 최소농도를 유리잔류염소는 0.1

mg/L로, 결합잔류염소는 0.4 mg/L로 정하고 있다. 하지만 병원성 미생물에 의해 오염되었거나 오염 우려가 있는 경우에는 특별히 유리잔류염소는 0.4 mg/L, 결합잔류염소는 1.8 mg/L 이상이 되도록 규정하였다(Ministry of Environment, 2013). 이와 같이 정수처리공정 후 최종 소독공정 처리수가 운송되는 과정에서 말단 수도꼭지까지 안전한 수질을 유지하기 위해서는 관망내의 잔류염소에 대한 예측이 필요로 하다.

지난 수십 년 동안 잔류염소농도 변화를 예측하기 위해 소독제 감소 모델이 개발되어 왔다. 주로 염소농도에 기반을 둔 모델과 기타 수질 특성을 반영하는 이변량 감소모델이 개발되었다. 염

• Received 14 March 2014, revised 15 May 2014, accepted 30 May 2014.

* Corresponding author: E-mail : jhkweon@konkuk.ac.kr

소농도에 기반을 둔 대표적인 감소 모델식은 다음과 같다(Haas et al.,1984.; Powell et al., 2000).

· 1차 감소 모델 ; first-order decay model

$$\frac{dC}{dt} = -k_b C \quad (1)$$

· n차 감소 모델 ; power-law decay model

$$\frac{dC}{dt} = -k_0^n \cdot C^n \quad (2)$$

· 제한 1차 감소 모델 ; first-order decay with stable components

$$\frac{dC}{dt} = -k_b(C-C^*) \quad (3)$$

· 병렬 1차 감소 모델 ; parallel first-order decay model

$$\frac{dC}{dt} = -k_{b \cdot fast} C_{fast} - k_{b \cdot slow} C_{slow} \quad (4)$$

여기서,

n = reaction order (Dimensionless, $n \neq 1$)

k_0^n = n-th bulk decay coefficient
(L/h(mg/L)⁽ⁿ⁻¹⁾)

C^* = limit residual chlorine concentration

$k_{b \cdot fast}$ = bulk decay coefficient of fast reaction (L/hr)

C_{fast} = residual chlorine concentration of fast reaction(mg/L)

$k_{b \cdot slow}$ = bulk decay coefficient of slow reaction(L/hr)

C_{slow} = residual chlorine concentration of slow reaction(mg/L)

염소농도에 기반을 둔 모델에서 가장 보편적으로 사용하는 잔류 염소 감소 식은 1차 감소 모델(first-order decay model, FDM)이다. Jordan-Hecart et al.(1992)은 실험초기에 4시간까지 잔류염소농도 감소가 급속하게 나타나고 그 이후에는 느린 속도로 감소한다 하였고,

Rossman et al.(1994)는 질량 이동을 바탕으로 하여 배·급수계통에서 관을 통과하며 변화하는 반응물질의 손실, 염소의 감소를 고려하여 모델을 개발하였다. 1차 감소 모델을 포함한 위의 잔류염소 감소모델에서 잔류염소농도를 결정하는 주요인자는 초기염소농도(C_0)와 감소계수이다. 하지만 상수관망에서 일어나는 반응에 대해 두 가지 인자로 대변하기에는 정확성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 극복하고 정확한 모델을 개발하기 위해 많은 연구자들이 다양한 연구를 진행하였다. Gotoh(1988)는 잔류염소 감소계수가 수질, 수온, 유속, 배관 재질, 배관의 접촉면적 등에 따라 변화한다고 하였으며, Sharp et al.(1991)은 관 지름, 배관 재질, 유량 등이 주요인자라고 설명하였다.

Clark(1998)는 이변량 감소모델(two-component second-order model, TCM)을 적용하면서 염소 감소에 큰 영향을 주는 인자를 통틀어 RA(reaction agent)라 칭하였다. RA에 해당하는 물질은 total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC)과 수질 특성인 온도, pH를 포함한다. 식(5)는 실험을 통해 얻어진 경험식을 바탕으로 해 기본원리를 식으로 표현하였다. Huang et al.(2007)은 식(5)의 이변량 감소모델의 해석해로 식(6)을 제시하였다.



RA = reactive agent in water distribution pipe

$$C_{Cl}(t) = \frac{C_{Cl_0} - C_{RA_0}}{1 - (C_{RA_0}/C_{Cl_0}) \cdot \exp(-(C_{Cl_0}/C_{RA_0}) \cdot k_{TCM} \cdot t)} \quad (6)$$

$C_{Cl}(t)$ = chlorine concentration over time (mg/L)

C_{Cl_0} = initial chlorine concentration(mg/L)

C_{RA_0} = reactive agent concentration (mg/L)

k_{TCM} = TCM decay coefficient (h^{-1})

현재까지 소독제감소에 대한 예측은 편의성에 의해 1차 감소 모델을 많이 사용하고 있다. 하지만 정수공정의 다양화와 이에 따른 수질의 변화에 의한 소독제 감소현상을 명확히 하기 위해서는 정밀한 염소감소모델이 필요하다. 특히 염소 농도를 최소화하여 수돗물의 맛을 좀 더 좋게 하면서도, 수질에서의 미생물에 대한 안정성을 확보하기 위해 재염소 주입을 고려하는 상황이므로 염소감소현상에 대한 연구가 절실하다.

본 연구는 1차 감소모델과 이변량 감소모델의 정확성을 알아보기 위해 증류수, 사여과수, 2중여재 여과수로 회분식실험을 실시하여 실험값과 두개 모델간의 적합성을 파악하였다. 또한 용액상의 염소감소와 관망재질을 포함했을 때의 염소감소를 비교 분석하였다. 마지막으로 전체염소감소를 고려했을 때 재염소 주입기간을 산정하는 방법을 제시하였다. 좀 더 정확한 모델을 사용함으로써 재염소 주입시점을 합리적으로 예측하여 안전한 수돗물 공급에 기여할 것으로 판단된다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 원수

원수는 서울시 G정수장에서 취수된 취수원수와 표준정수처리인 사여과처리수, G정수장 내에 운영 중인 파일럿플랜트에서 처리된 2중여재 처리수, 증류수(ELGA Labwater, PURELAB)를 이용하여 실험을 수행하였다. G정수장에서 취수된 원수와 처리수 2종에 대한 수질 특성은 Table 1로 정리를 하였다.

Table 1. Characteristics of the intake water, sand filtrate and dual media filtrate

	Intake water	Sand filtrate	Dual media filtrate
Temperature(°C)	20	20	20
pH	7.77	7.71	7.51
Conductivity (μs/cm)	154	145	148.7
Turbidity(NTU)	5.40	0.328	0.367
TOC(mg/L)	1.66	1.02	1.08

2.2 시편의 선정

시편은 cast iron(CI), polyvinyl chloride (PVC), stainless steel 304(SS) 3종을 선정하였다. 국내에 매설되어있는 관별 재질을 조사하였더니 송수관은 덕타일주철관(57.5%), 배수관은 PVC관(42.5%), 급수관은 PE관과 스테인레스관(30.9%)이 가장 많이 사용되고 있는 것으로 나타났다(National waterworks information system, 2011). 따라서 이 결과를 바탕으로 금속재질의 CI, SS재질을 선택하였고, 비금속재질로 PVC를 선택하였다.

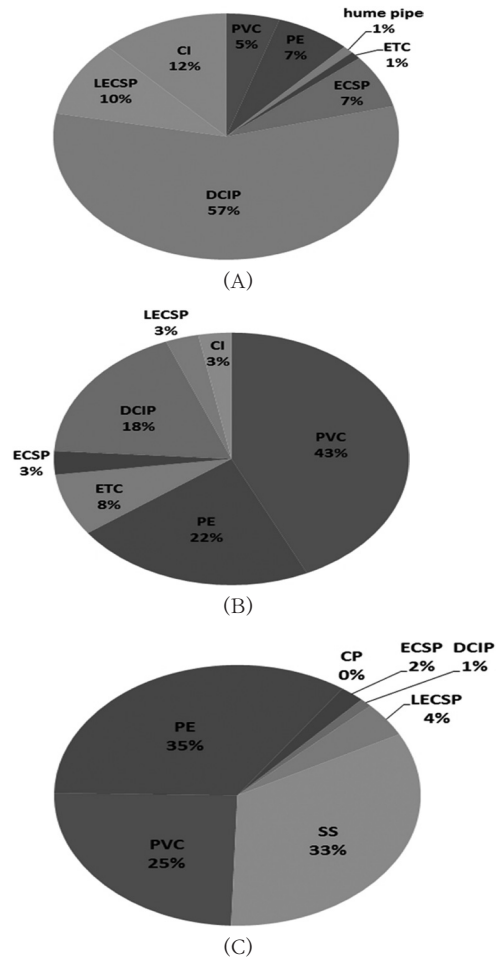


Fig. 1. Statistics of pipe material of (a) main pipe, (b) distribution pipe, and (c) water service pipe (National waterworks information system, 2011) * ESCP : Enamel Coated Steel Pipe, DCIP : Ductile Cast Iron Pipe, LECSP : Liquid Epoxy Coated Steel Pipe, CI : Cast Iron Pipe, CP : Copper Pipe.

2.3 염소감소 실험 방법

염소감소실험은 PP재질의 55 ml용량 튜브에서 회분식으로 수행되었다. 회분식 실험중 관내에서 발생하는 흐름은 작은 스케일로 보면 관의 시편과 흐름이 없는 수체간의 반응으로 볼 수 있어 흐름을 제하고 실험을 실시하였다.

수질차이에 의한 염소감소현상을 파악하기 위해 관 재질을 포함하지 않은 튜브 1개와 재질 유무에 의한 염소감소를 같이 측정하기 위해 각 재질의 쿠폰을 포함한 튜브 3개 즉 4개 1세트로 구성하였다. 장치 내에는 조건을 같게 해주기 위하여 시편을 한 개 씩 투입하였고, 염소농도는 4 ~ 5 mg/L로 하였다. 실험 장치에 영향을 줄 수 있는 인자인 온도, 자외선, 공기를 줄이기 위해 밀봉하여 인큐베이터에서 20 °C로 조절 후 실험하였다.

염소감소실험을 실시하기 전 시편의 전체적인 상태를 동등하게 유지하기 위하여 증류수를 이용하여 3회 세척하고, 121 °C 오븐에서 30분 동안 건조 하여 유기물과 수분을 제거하였다. 오븐을 이용하여 수분을 제거한 후 실험 전까지 수분의 영향을 배제하고 방랭을 위하여 데시케이터에 보관하였다.

2.4 수질 측정 방법

염소감소실험 원수의 수질 특성의 변화를 여러 장비를 이용하여 측정하였다. pH는 Thermo 3 star(Thermo, USA), TOC는 SIEVERS 5310C(SIEVERS, USA), 온도, 전기전도도는 YSI-3100(YSI, USA), 탁도는 Hach 2100N(Hach, USA), 흡광도는 Thermo 10UV(Thermo, USA), 잔류 염소측정은 DPD측정법을 이용한 Pocket Colorimeter™ II (Hach, USA)를 이용하여 측정을 하였다. 염소감소 실험 중 탁도가 증가하는 경우에는 0.45 μm polypropylene(PP)재질의 주사기필터를 이용하여 탁도 물질을 제거한 후 잔류염소 농도를 측정하였다. 실험은 Fig. 2와 같이 순서도에 따라

실시하였다.

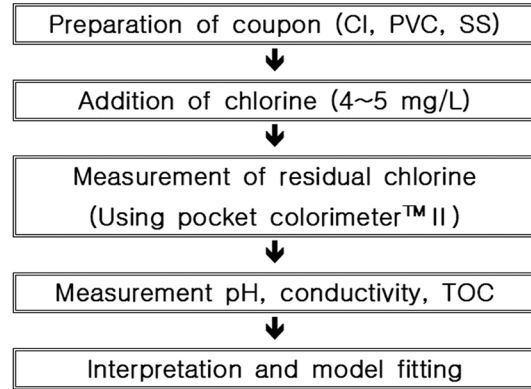


Fig. 2, Experiment flowchart.

2.5 모델 정확성 분석

모델의 정확성 분석은 실험측정자료와 모델 예측값(FDM, TCM) 사이의 r²값과 가중치오차(x²)값을 이용하여 수행하였다. 결정계수 r²은 데이터를 선형회귀분석 했을 때 평균값에 비해 향상된 정도를 나타내는 값이다.

결정계수를 구하는 순서는 먼저 식 (7)을 이용하여 실험측정자료와 평균값의 차이의 제곱 합을 구한다.

$$S_t = \sum_{i=1}^n (y_{i,measured} - \bar{y})^2 \quad (7)$$

$y_{i,measured}$: experimental data

\bar{y} : average of experimental data

그리고 식 (8)과 같이 잔차의 제곱합(sum of the squares of the residual or errors(S_r))을 모델 예측값과 실험측정자료의 차를 제곱하여 구한다. 식 (8)을 이용하여 구한 값(S_r)은 측정값과 예측된 모델의 값의 차이가 작으면 0에 가까워지고, 차이가 커지면 값도 커지게 된다. S_r 의 값이 작으면 작을수록 모델 예측 값이 실험 값과 비슷하다는 것을 의미한다.

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,measured} - y_{i,model})^2 \quad (8)$$

$y_{i,model}$ = model prediction data (FDM, TCM)

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (9)$$

결정계수(coefficient of determination)는 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 식 (8)을 이용하여 계산한 값인 $S_r=0$ 일 때, 식 (9)의 r^2 은 1이 되는데, 이는 실험측정자료와 모델예측값이 회귀분석을 통해 100 % 일치한다는 것을 뜻하게 된다.

또 다른 방법으로 Kopaei et al.(2011)이 사용한 가중치오차(weighted error)을 이용하였다. 가중치오차는 실험측정자료와 모델예측값의 차를 실험측정자료의 표준편차로 나눈 값의 제곱합이며 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\chi^2(p) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{i,measured} - y_{i,model}}{\sigma_{measured,i}} \right)^2 \quad (10)$$

$\sigma_{measured,i}$ = standard deviation of experimental data

3. 결과 및 고찰

3.1 실험원수성상에 대한 수체염소 감소

실험 원수성상에 따른 수체염소 감소 정도를 비교하기 위해 실험원수에 염소만 주입을 하여 염소 변화량을 측정하였다. 수체염소감소란 원수 내에 포함된 반응물질과 염소간의 반응만을 칭하는 것으로 관벽 재질에 의한 염소감소를 배제한 것이다.

수체감소실험 시 원수에 주입한 염소 농도는 4 ~ 5 mg/L로 조정하였고, 실제 주입값은 증류수는 5 mg/L, 사여과수는 4 mg/L, 2중여재 처리수는 4.5 mg/L이다. 수체감소 실험에 사용한 3개 원수의 감소 현상은 Fig. 3과 같이 표현되었다. 실험값 데이터는 3차례 실험을 실시하여 평균값을 사용하였고, 평균오차 0.1 %이하로 나오

는 값을 사용하였다.

실험원수별 염소감소의 정도는 사여과수, 2중여재 처리수, 증류수 순으로 감소량 차이가 발생하였다. 증류수는 수체염소감소를 일으키는 반응물질이 적어 감소량이 작았지만, 실제 원수인 사여과수와 2중여재 처리수는 원수 내 포함된 반응물질, 즉 pH, 알칼리도, DOC 등으로 표현되는 물질들에 의해 염소감소량이 상대적으로 크게 나타났다.

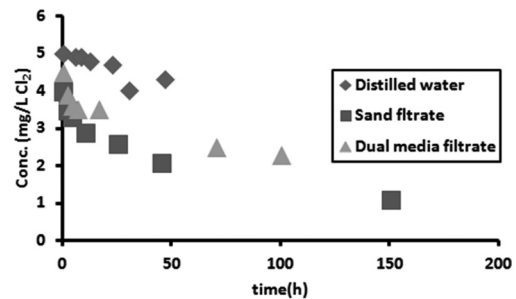


Fig. 3. Bulk decay of distilled water, sand filtrate, and dual media filtrate.

각 실험원수에 1차 염소감소모델과 이변량 감소모델을 적용하였다. MS EXCEL을 이용하여 실험측정자료와 모델 예측값에 대한 적합성을 비교·분석하였다. Fig. 4과 같이 실험측정자료는 O로 표현하고 FDM은 실선, TCM은 점선으로 표현하였다. Fig. 4(a) 증류수의 경우는 FDM과 TCM이 실험측정자료와 비슷하게 감소하는 것을 볼 수 있지만, Fig. 4(b), (c) 실제원수를 이용한 적합성평가에서는 사여과수의 FDM이 실제측정자료를 대변하는 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다.

Fig. 4에서 나타나는 감소현상을 대변하는 값은 Table 2에 있는 1차, 이변량 염소감소계수이다. 사여과수에서 0.008, 0.010이 나왔고, 증류수와 2중여재 처리수에서는 낮은 값인 0.002 ~ 0.006이 나와 염소감소에 대한 차이를 확인할 수 있었다. 실험값과 모델의 예측 값에 대한 상관성을 나타내는 값과 가중치 오차 값을 이용하여 두 모델에 대한 적합성을 비교하여 Table 2에

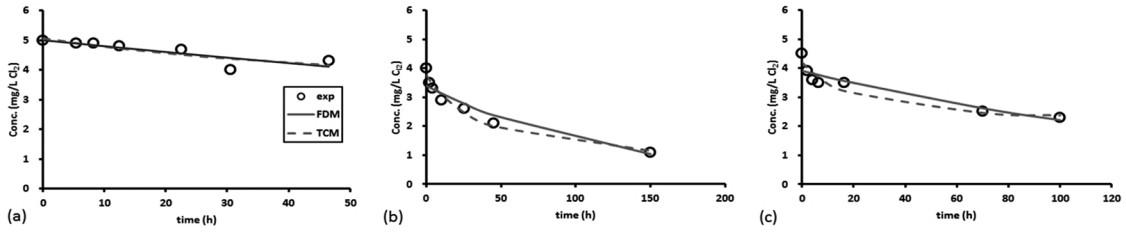


Fig. 4. Bulk decay of (a) distilled water, (b) sand filtrate, and (c) dual media filtrate.

Table 2. Bulk decay and model parameters

Concentration(mg/L)	k_{FDM}	k_{TCM}	$r^2(FDM)$	$r^2(TCM)$	$\chi^2 FDM$	$\chi^2 TCM$	C_{Rd0}	
Distilled water	5	0.004	0.003	0.725	0.732	1.922	1.878	1.589
Sand filtrate	4	0.008	0.010	0.899	0.950	0.707	0.349	3.007
Dual media filtrate	4.5	0.006	0.002	0.859	0.885	0.984	0.802	1.883

기재하였다. 증류수와 실제원수를 이용하여 수체 염소감소만을 본 모델 적합성 실험에서 적합성을 나타내는 수치를 비교한 결과에서 TCM이 FDM보다 1.01 ~ 1.05배, 예서는 1.02 ~ 2.02배 뛰어난 것으로 나타났다. 위와 같은 결과로 증류수와 실제원수를 이용한 수체감소에서는 TCM을 이용하여 염소감소량을 예측하는 것이 좀 더 정확한 값을 얻을 수 있는 방법임을 확인하였다.

3.2 관재질에 따른 관벽 염소감소

원수내의 반응성이 높은 염소가 접촉하는 관재질의 영향으로 일어나는 염소감소를 관벽감소라고 한다. 증류수를 사용하여 수체염소감소를 배제한 상태에서 관벽에서의 염소감소계수를 측정하여, 재질별 염소감소특성을 파악하고자 하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 송수, 배수, 급수관에서 가장 많이 사용되는 재질인 CI, PVC, SS를 사용하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 시간에 따른 염소농도변화가 재질에 따라 많이 달랐다. 염소감소가 가장 큰 재질은 cast iron(CI)이고, 나머지 두 재질인 polyvinyl chloride(PVC)와 stainless steel(SS)는 염소 감소량이 크지 않았다. 관재질을 반응성이 큰 (reactive) 재질과, 반응성이 낮은 (unreactive)로 보통 나누는데, CI는 반응성재질로, PVC와 SS는 비반응성

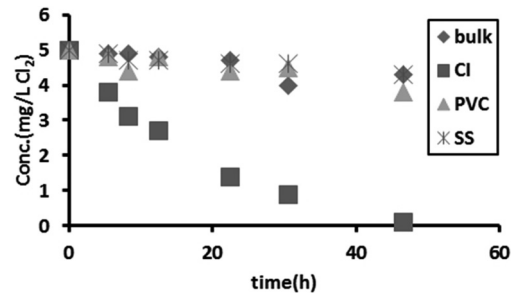


Fig. 5. Wall decay due to different pipe materials using distilled water.

재질로 구분할 수 있다.

염소감소량이 가장 큰 주철관의 경우, 주원료인 철이 산소(O₂)가 녹아있는 물과 반응을 하여 수산화철로 산화하는 과정 중 상수관내에 포함된 잔류염소를 소모하는것으로 판단된다. 철의 산화반응식은 식 (11)과 같다. 식 (12)에 따르면 철 1 g이 산화하는데 염소 0.64 g이 소모됨을 할 수 있다. 또한 철 2가 양이온이 철 3가 양이온으로 산화되면서 0.9 g/L로 CaCO₃의 알칼리도가 소모된다는 것을 알 수 있다(Choi, 2006). 결국 이 식에 의한 염소감소를 1차 반응만으로 표현하기에 어렵다는 것을 알 수 있다. 하지만 다른 물질들이 충분하게 존재한다는 가정 하에 Pseudo-first order reaction으로 표현가능하다.

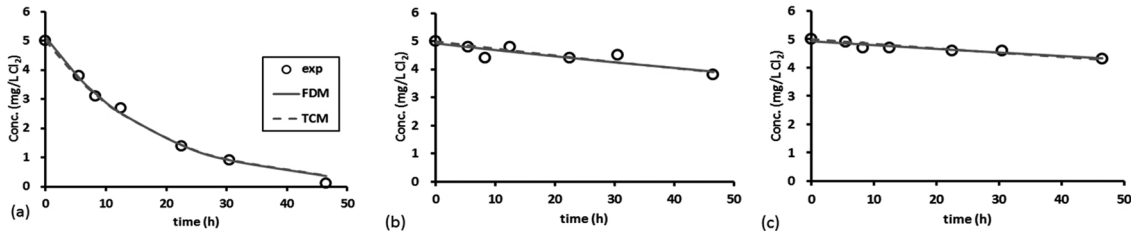
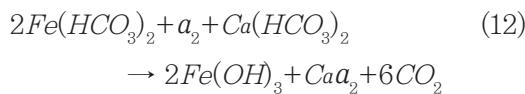


Fig. 6. Wall decay in (a) CI, (b) PVC, and (c) SS.

Table 4. Wall decay and model parameters

concentration(mg/L)	k_{FDM}	k_{TCM}	$r^2(FDM)$	$r^2(TCM)$	$\chi^2 FDM$	$\chi^2 TCM$
CI 5	0,057	$0.9104 \cdot 10^{-5}$	0,993	0,993	0,051	0,050
PVC 5	0,005	$0.2311 \cdot 10^{-5}$	0,760	0,762	1,679	1,669
SS 5	0,003	$0.0285 \cdot 10^{-5}$	0,899	0,900	0,707	0,700



실험측정자료를 바탕으로 모델예측값과 실험 측정자료간의 적합성을 Fig. 6과 같이 표현하였다. 모델 FDM과 TCM을 이용한 관벽염소(wall decay)감소의 예측값을 표현한 Fig. 6에서 (a) CI의 경우는 실제측정자료의 급격한 감소를 바탕으로 모델예측값도 크게 감소하는 모습을 볼 수 있다. 반면 반응성이 작은 PVC와 SS는 bulk 상태의 감소형태와 유사하게 감소하는 모습이 나타났다. 그림에 나타난 적합성을 r^2 , χ^2 으로 정리하여 Table 4에 자세히 기술하였다.

염소와 반응이 큰 CI의 경우는 k_{FDM} 값이 0.057으로 반응성이 큰 재질을 대변하는 값으로 볼 수 있다. 반면 염소와 반응이 적은 SS와 PVC에서는 0.003 ~ 0.005로 거의 증류수를 이용한 수체염소감소와 유사한 작은 값이 나왔다. 증류수를 이용한 관벽감소에서 예측모델을 사용한 결과 모델과 실험값의 적합성을 표현하는 r^2 과 χ^2 에서 FDM과 TCM의 차이가 크지 않지만 작은 차이로 TCM이 좀 더 정확한 값을 나타내었다.

3.3 사여과수 이용 총염소감소를 고려한 경우

정수처리에 가장 많이 사용되고 있는 여과방법중 하나인 사여과처리수를 이용하여 총 염소 감소현상을 파악하고자 하였다. 여기서 총 염소 감소(total decay)란 원수내의 반응물질과 반응하여 염소감소가 일어나는 수체감소(bulk decay)와 원수내의 염소와 접촉하는 관재질의 영향에 대한 감소형태인 관벽감소(wall decay)를 모두 고려한 감소이다.

증류수를 이용한 수체 및 관벽염소감소(bulk · wall decay)를 통해 TCM의 정확성을 확인하였고, 사여과수를 사용함으로써 실제원수에서도 정확한 예측을 분석하기 위하여 실험을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 7에 제시하였다.

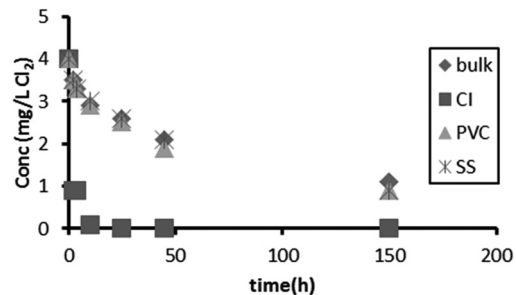


Fig. 7. Total decay in different pipe materials using sand filtrate.

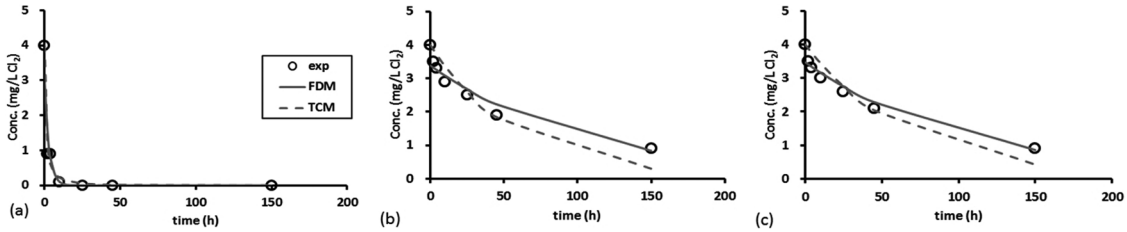


Fig. 8. Total decay in (a) CI, (b) PVC, and (c) SS using sand filtrate.

Table 5. Total decay using sand filtrate and model parameters

Concentration(mg/L)	k_{FDM}	k_{TCM}	$r^2(FDM)$	$r^2(TCM)$	$x^2 FDM$	$x^2 TCM$	C_{RA_0}
bulk 4	0.008	0.007	0.818	0.972	1.275	0.197	3.01
CI 4	0.342	0.314	0.885	0.989	0.802	0.079	4.16
PVC 4	0.009	0.007	0.838	0.982	1.136	0.126	3.38
SS 4	0.009	0.005	0.905	0.977	0.663	0.159	3.82

염소와 반응이 큰 재질인 CI는 증류수를 이용한 관벽감소와 유사한 형태로 초기에 급속한 감소를 보였다. 반면 다른 비 반응성 재질인 SS, PVC는 사여과수의 수체염소감소와 비슷하게 감소를 하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 감소형태로 미루어 사여과수를 이용한 총 염소감소에서는 비 반응성 재질인 SS, PVC는 수체염소감소를 따라 서서히 감소하는 형태를 보이고, 반응성 재질인 CI는 관벽염소감소가 우위를 점하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8는 사여과수를 이용하여 재질별 총 염소감소(total decay)에 관한 염소감소 모델을 적용하여 감소경향을 예측하였다. 실제원수인 사여과처리수를 이용한 실험이 증류수를 이용한 실험보다 더 빠른 염소감소가 나타났다. Table 1에서 나타난 것과 같이 증류수와는 다르게 수질인자를 포함하여 염소감소가 일어나 기본적으로 많은 감소량을 나타내었다. 그 중 사여과수를 이용한 염소감소실험 중 CI의 경우 초기에 많은 양의 염소가 소모되었다. 이러한 수치는 감소량의 지표로 볼 수 있는 감소계수에서도 나타났다. Table 5에서 k_{FDM} , k_{TCM} 에서 CI에서 가장 큰 값을 나타내었다. 모델에 대한 적합성을 비교한 결과 수체감소와 관벽감소를 포함한 총 염소감

소에서 모든 재질에 대하여 FDM보다 TCM에서 더 정확한 예측이 가능하였다.

3.4 재염소 주입에 관한 판단

3.4.1 Characteristic time이용

관망시스템에서 목표농도까지 염소농도가 감소하는 시간을 추정하기 위해 초기농도 90 %로 감소하는 시간인 t_{90} 을 특성시간으로 하여 계산해 보았다. 실험을 통하여 얻은 1차 감소계수 및 이변량 감소계수를 이용하여 여러 재질과 처리 방법에 따른 특성반응시간을 계산하였다.

1차 감소모델(FDM)을 이용한 t_{90} 의 계산식은 식 (11) 나타낼 수 있다.

$$t_{90} = -\frac{\ln(0.1)}{k_{FDM}} \tag{11}$$

이변량 감소 모델(TCM)의 계산식은 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$t_{90} = \frac{\ln\left(\frac{10 \cdot C_{ra} - 9 \cdot a_0}{C_{ra}}\right)}{-(a_0 - C_{ra}) \cdot k_{TCM}} \tag{12}$$

Table 6. Characteristic time (day) according to initial chlorine concentration, influent, and pipe material

Distilled water		10 mg/L				5 mg/L				2 mg/L			
		bulk	CI	PVC	SS	bulk	CI	PVC	SS	bulk	CI	PVC	SS
	FDM	479	5.4	80	106	22	1.7	19.6	34.3	8.9	0.5	11.4	19.2
	TCM	1106	3.7	88	111		1.7	20.1	28.6	13	0.5		
Sand filtrate		10 mg/L				4 mg/L							
		bulk	CI	PVC	SS	bulk	CI	PVC	SS				
	FDM	19.6	0.7	17.8	17.1	7.6	0.3	6.5	7.5				
	TCM		0.8				0.3	20.3	14.8				

위의 두 계산식 식(11), (12)을 이용하여 초기 염소 농도에서 90 %가 소모될 때까지의 시간을 계산하였다. 원수의 수질 특성 및 재질별로 Table 6로 정리를 하였다. 90 %까지 감소하는 시간은 재질별로 차이가 발생하였다. 가장 반응성이 큰 CI가 90 %까지 감소하는데 가장 빨랐고, 비 반응성 재질인 PVC와 SS는 느리게 감소하였다. 이러한 결과로 CI 재질로 구성된 송수관에서 염소 소독제에 감소에 대한 영향력이 가장 크고, 배·급수관에 많이 사용되는 SS, PVC는 염소 감소에 대한 영향이 미미한 것으로 판단된다.

또한 증류수와 사여과수를 비교한 결과 증류수에 비해 사여과수가 수중 내 포함된 염소감소 유발물질에 의해 좀 더 빠른 감소시간을 나타내었다. 그러므로 재염소의 시점은 관 재질에 따라 감소량의 영향이 다른 것으로 확인되었으므로 배수관이 끝나고 배수지에서 농도를 측정하여 재염소 주입을 결정하는 것이 가장 안전하고 현명한 방법이라 생각이 된다. 위와 같은 원인으로 감소모델별 t_{90} 을 살펴보면 FDM보다 TCM을 이용한 계산 결과에서 재염소 주입시간이 큰 것을 볼 수 있다.

3.4.2 초기주입농도 영향

증류수를 이용한 실험에서 초기 농도값 10, 5, 2 mg/L로 하였을 때 농도가 줄어들수록 목표농도까지 감소하는데 걸리는 시간이 짧아졌다. 하지만 실험을 실시한 농도는 실제 주입농도 보다 높은 값으로 대변성이 떨어진다. 서울시에서는

정수장에서 염소주입 후 유지농도를 0.7 mg/L로 하고 있다(Seoul city, 2013). 이후 이송되는 관내에서 최소한 유지되어야 하는 잔류염소 농도는 0.1 mg/L이다. 실험을 실시하여 얻은 감소모델의 정확성을 바탕으로 원수는 가장 많이 사용되고 있는 모래여과를 마친 사여과수를 기준으로 하고, 관 재질별 0.7 mg/L에서 0.1 mg/L로 감소하는데 걸리는 특성시간을 계산하였다.

잔류염소농도 0.7 mg/L에 대한 염소감소계수를 파악해야 한다. 기존의 증류수를 이용한 실험을 바탕으로 농도별 감소 계수에 대한 변화량을 EXCEL의 차트와 회귀분석기능을 이용하여 예측을 하였다. 변화량은 R^2 값이 0.9482 ~ 0.9986까지 높은 정확성을 나타내어 사여과수도 같은 방식을 이용하여 염소감소계수를 계산하였다. 계산결과 잔류염소농도 0.7 mg/L에서 감소계수는 Table 7과 같이 나타났다.

Table 7. Time required for chlorine decay from 0.7 mg/L to 0.1 mg/L (using sand filtrate and FDM)

	kFDM(h ⁻¹)	0.7 mg/L → 0.1 mg/L (day)
bulk	0.013	6.0
CI	0.720	0.1
PVC	0.033	2.5
SS	0.026	3.1

감소시간은 2.7 ~ 144.5 h로 나타났다. Table 7에서 초기농도 2 mg/L일때 0.5 ~ 19.2 day였던 것이 초기농도가 0.7 mg/L로 조정되면서 증가하는 것을 알 수 있다. FDM의 경우

초기 시간에 변화하는 경향이 TCM과 비슷하고 FDM만이 계산이 가능하여 사용하였다.

4. 결론

정수장에서 깨끗한 물을 만들고 염소소독을 거쳐 안전하게 전달하기 위해서는 송·배·급수관에서 충분한 잔류염소가 확보되어야 한다. 본 연구에서는 관 재질과 여과방법에 따른 1차 감소모델과 이변량 감소모델에 대한 정확성을 분석하고 재염소 시점을 확인할 수 있는 방법인 characteristic time을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 염소감소는 대상 원수별로 다르게 나타났다. 기준으로 잡은 증류수가 일차감소계수는 0.004으로 나타났고 이변량 감소계수는 0.003으로 가장 작은 값을 나타내었고, 가장 크게 감소하는 원수는 사여과 처리수였다. 사여과 처리수의 수체 일차감소계수는 0.008이었고, 이변량 감소계수는 0.010으로 계산되었다. 원수별로 감소량의 차이가 발생한 원인으로는 수중에 포함된 알칼리도, 유기물질, pH등이 원인으로 작용하여 차이가 발생하였다.
- 2) 관 재질별 염소감소계수는 CI, PVC, SS 순으로 나타났다. 반응성이 가장 큰 CI의 경우는 모든 원수에서 높은 감소계수가 나왔다. 증류수내 CI관이 존재하는 증류수에서는 일차감소계수가 0.057로 증류수만 존재하는 상황에서의 0.003에 20배에 가까운 감소계수를 나타내었다. 비반응성 재질인 PVC와 SS는 비슷한 값을 나타내었다. 관 재질이 염소감소에 미치는 영향력이 지대하다는 것을 파악하였고, 안전한 잔류염소를 유지하기 위하여 관재질의 선택이 중요한 것을 알게 되었다.
- 3) 증류수를 이용한 관벽, 수체 염소감소와 사여과수의 총 염소감소를 비교해보면 증류수를 이용한 염소감소보다 사여과수를 이

용한 총 염소감소가 더욱 컸다. 관 재질 중 CI를 이용한 총 염소감소에서 반응성이 큰 재질과 사여과수에 포함된 유기물질, 알칼리도의 영향으로 k_{FDM} 은 0.342, k_{TCM} 은 0.314로 높은 값이 나오는 것으로 확인하였다.

- 4) 염소감소예측으로 사용되는 모델중 TCM이 모든 원수에 대한 수체감소와 증류수를 이용한 관벽감소에서 FDM보다 정확성이 뛰어났다. TCM을 이용한 재염소주입 시간 및 특성시간을 계산한 결과 FDM보다 TCM을 이용 하였을 때 시간이 좀 더 늘어나는 것으로 확인 되었다.
- 5) 실제 염소주입농도후 유지농도인 (0.7 mg/L)을 이용한 예측을 계산 결과, 물이 공급되는 지역의 관이 CI일 때 0.1 mg/L로 감소하는데 2.7시간이 소요되는 것으로 나타났다. 안전하게 공급을 하기 위해서는 비반응성 재질을 선택하고, 정수처리 공정에서 염소주입농도들과 연계되어야만 원하는 잔류염소를 유지할 수 있을 것으로 판단한다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션 기술개발사업(GT-11-G-02-001-1)”으로 지원 받은 과제입니다. 이 논문은 국토교통부의 U-City 석·박사과정 지원사업으로 지원되었습니다.

참고문헌

- National waterworks information system, water distribution statics, (2011) http://www.waternow.go.kr/openPage.do?OPENCODE=PG_STAT03
- Seoul city, (2013), Decreasing disinfection odor of tap water in Seoul with new disinfection method, http://spp.seoul.go.kr/main/news/news_report.jsp?search_boardId=18232&act=VIEW&boardId=18232, Searching date : 2013.12.01

- Hyung-Jae Choi, (2006), Prediction of residual chlorine concentration in the water distribution pipes using the MIKE NET model, Master's thesis, pp. 19-20.
- Micistry of environment,(2013), Environmental Act 503, 2013.3.23.,Amended, Water Distribution Regulations, Article 22-2.
- Clark R., (1998) Chlorine demand and TTHM Formation kinetics: a second - order model, *Journal of water pollution control*, 56, 170-173.
- Gotoh, K., (1988) Residual chlorine concentration decreasing rate coefficient for various pipe materials, *In: Proceedings of the 17th IWSA water supply Conference*, vol. 7.
- Haas, C.N., Karra, S.B.,(1984) kinetics of waste chlorine demand exertion., *Jour. Water Pollution Control Fedn.*, 56(2), pp.170-173.
- Jadan-Hecart, A., El Mother, A., Stitou, M., Bouillot, P., and Legube, B. (1992) The chlorine demand of a treated water, *Water Research*, 26 (8), pp. 1073-1084
- J. J. Huang, E.A. McBean,(2007) Using Bayesian statistics to estimate the coefficients of a two- component second-order chlorine bulk decay model for a water distribution system., *water research*, 41 (2), pp.278-294.
- Kohpaei, A. J., Sathasivan, A.(2011) Chlorine decay prediction in bulk water using the parallel second order model: An analytical solution development, *Chemical Engineering journal*, 171, pp.232-241.
- Powell, J.C., West, R.J., Hallam, B.N., Forster, F.C., Simms, J.(2000) Performance of various kinetic models for chlorine decay, *J. water Resour. Plng. And Mgmt*, ACSE, Jan/Feb. 126 (1), pp.13-20
- Sharp, W.W., Preffer, J.,Morgan, M. (1991) Insitu chlorine decay rate testing, *Proceeding of the Water Quality Modeling in Distribution Systems Conference*, AWWA *Research Foundation*, Denver, CO.
- Singer P.C., (1999), Humic Substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products, *Water Science Technology*, 40 (9), pp.25-30.
- Rossmann, A.L., Clark, R.M., and Grayman, W.M. (1994) Modeling chlorine residuals in drinking water distribution systems, *J. Environmental engineering*. ASCE, 120 (4), pp.803-820