



# 상수도 공급과정 중 재염소 투입에 따른 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델 개발

## Development of prediction models of chlorine bulk decay coefficient by rechlorination in water distribution network

정보배·김기범·서지원·구자용\*  
Bobae Jeong·Kibum Kim·Jeewon Seo·Jayong Koo\*

서울시립대학교 환경공학과, 서울시 동대문구 서울시립대로 163, 서울시립대학교 제1공학관, 02504  
*Department of Environmental Engineering, University of Seoul, 1 Engineering, Seoulsiripdae-ro 163, Dongdaemun-gu, Seoul, 02504*

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

### ABSTRACT

This study developed prediction models of chlorine bulk decay coefficient by each condition of water quality, measuring chlorine bulk decay coefficients of the water and water quality by water purification processes. The second-reaction order of chlorine were selected as the optimal reaction order of research area because the decay of chlorine was best represented. Chlorine bulk decay coefficients of the water in conventional processes, advanced processes before rechlorination was respectively  $5.9072 \text{ (mg/L)}^{-1}\text{d}^{-1}$  and  $3.3974 \text{ (mg/L)}^{-1}\text{d}^{-1}$ , and  $1.2522 \text{ (mg/L)}^{-1}\text{d}^{-1}$  and  $1.1998 \text{ (mg/L)}^{-1}\text{d}^{-1}$  after rechlorination. As a result, the reduction of organic material concentration during the retention time has greatly changed the chlorine bulk decay coefficient. All the coefficients of determination were higher than 0.8 in the developed models of the chlorine bulk decay coefficient, considering the drawn chlorine bulk decay coefficient and several parameters of water quality and statistically significant. Thus, it was judged that models that could express the actual values, properly were developed. In the meantime, the chlorine bulk decay coefficient was in proportion to the initial residual chlorine concentration and the concentration of rechlorination; however, it may greatly vary depending on rechlorination. Thus, it is judged that it is necessary to set a plan for the management of residual chlorine concentration after experimentally assessing this change, utilizing the methodology proposed in this study in the actual fields. The prediction models in this study would simulate the reduction of residual chlorine concentration according to the conditions of the operation of water purification plants and the introduction of rechlorination facilities, more reasonably considering water purification process and the time of chlorination. In addition, utilizing the prediction models, the reduction of residual chlorine concentration in the supply areas can be predicted, and it is judged that this can be utilized in setting plans for the management of residual chlorine concentration.

**Key words:** Chlorine bulk decay coefficient, Rechlorination, Residual chlorine concentration, Water purification processes, Water quality

**주제어:** 잔류염소농도 수체감소계수, 재염소, 잔류염소농도, 정수 처리 방식, 정수 수질

Received 16 November 2018, revised 4 January 2019, accepted 8 January 2019.

\*Corresponding author: Jayong Koo (E-mail: [jykoo@uos.ac.kr](mailto:jykoo@uos.ac.kr))

## 1. 서 론

상수도 공급과정에서 미생물 재성장과 같은 2차 수질오염을 제어하기 위해 정수장에서 투입되고 있는 염소는 다양한 영향요인의 영향 속에서 시간이 지남에 따라 감소된다. 대한민국의 수도법에서는 수도꼭지에서의 잔류염소농도 하한 기준을 0.1 mg/L 이상으로 규정하고 있다. 이러한 기준을 충족시키기 위해 정수장에서 과량의 염소를 투입하는 경우, 정수장 인근에 거주하는 소비자는 상대적으로 높은 잔류염소농도, 즉 높은 염소 이취미를 갖는 수돗물을 사용하게 된다. 이와 같은 문제는 소비자의 수돗물에 대한 신뢰도를 저하시키는 요인이 되기에 최근의 수도사업자들은 정수장에서 투입하는 염소농도를 낮추면서, 부족한 염소농도를 보충하기 위한 재염소 투입 시스템을 도입하고 있다.

현재 정수장 및 재염소 투입 설비에서 염소 투입농도를 결정할 때에는 체류시간과 수온 이외의 인자들은 수체감소계수 실험 내에 함축적으로 반영되고, 변동되지 않는다는 전제 속에서, 잔류염소 수체감소반응 실험을 통해 상수도관망 내에서의 체류시간과 수온만을 주요 변수로 설정하여 염소 감소기작을 고려하는 경우가 많다. 이는 잔류염소농도의 감소가 1차 반응 또는 2차 반응식에 따른다는 가정 속에서, 반응 속도상수와 온도 사이의 관계를 표현할 수 있는 Arrhenius 식을 적용하여 표현한 잔류염소농도 수체감소계수 예측 모델을 사용하는 것이라 할 수 있다 (Ahn et al., 2005). 그러나 잔류염소농도의 감소는 체류시간과 수온 이외에도 초기 잔류염소농도, 유기물 농도 등과 같은 정수 수질인자와 정수처리방식 및 염소 투입 시점에 의해 영향을 받는다는 연구 결과들이 다음과 같이 보고되고 있다.

Vasconcelos et al. (1996)는 TOC(Total Organic Carbon) 및 수온을 인자로 하는 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 제시하였다. Powell et al. (2000)은 입상활성탄 공정을 통해 처리된 고도처리수, 배수지에서 채수한 정수 등 다양한 시료에 대해 bottle test를 수행하여 초기 잔류염소농도, 수온 뿐만 아니라 TOC 및 UV<sub>254</sub>(UV absorbance at 254 nm) 인자를 고려한 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 제시하였다. Koo (2004)는 표준처리공정을 거친 여과수를 대상으로 DOC(Dissolved Organic Carbon)와 UV<sub>254</sub>의 곱, 초기 잔류염소농도, 수온을 고려한 수체감소계수 예측모델을

제안하였다. Dominguez-Tello et al. (2015)은 모래여과를 거친 표준처리수, 전오존처리와 입상활성탄공정을 거친 고도처리수의 수온, DOC, pH, 염소 투입농도를 측정하여 해당 인자들을 변수로 하는 예측모델을 개발하였다. Al-Heboos and Licisko (2017)은 초기 염소투입농도와 COD 측정결과를 기반으로 한 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 제시하였다.

한편, Powell et al. (2000)과 Lee et al. (2006)은 염소 투입시점, 즉, 염소 재투입에 따라 잔류염소농도 감소기작이 달라짐을 제안하였다. 다만, 기술한 연구들은 염소의 재투입에 따른 잔류염소농도 수체감소계수의 변화를 모의할 수 있는 모델을 제안한 연구는 아니다. Hallam et al. (2003)은 입상활성탄에 의해 처리된 고도처리수에 차아염소산나트륨을 투입하여 염소 재투입 시 잔류염소농도 수체감소반응을 모의하였다. 이를 토대로 염소 투입횟수, 초기 잔류염소농도, TOC, 수온을 고려한 수체감소계수 예측모델을 제안하였다.

선행 연구결과들을 통해 알 수 있듯이, 잔류염소농도 수체감소계수는 체류시간과 수온 외에 다양한 영향요인에 영향을 받으며, 최근 화두가 되고 있는 재염소 투입에 따라서도 달라질 수 있다. 또한 정수처리방식에 따라서도 달라질 수 있다. 다만, 현재까지 우리나라에서는 이러한 기작을 모델링하는데 활용할 수 있는 구체적인 모델이 제안된 바 없다. 정수 수질인자의 변화 및 재염소 투입을 고려한 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델은 정수 운영조건에 따라 급수구역의 잔류염소농도를 사전에 예측하는데 활용될 수 있다. 더 나아가 정수장 및 재염소 투입 설비의 염소 투입농도를 설계하기 위한 의사결정 시 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 정수처리방식에 따라 달라질 수 있는 잔류염소농도 수체감소계수를 파악하기 위하여 표준처리수와 고도처리수의 잔류염소농도 수체감소계수를 산정하고, 동시에 정수 수질을 측정하여 정수수질 조건별 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 개발하고자 한다. 또한 재염소 투입 여부에 따라 잔류염소농도 수체감소계수가 어떻게 변화되는지를 파악하고, 이를 고려할 수 있는 모델을 개발하고자 한다. 개발된 예측모델의 통계적 유의성을 검증하고, 민감도 분석을 수행하여 잔류염소농도 관리 시의 고려사항을 제안하고자 한다.



## 2. 연구방법

본 연구에서는 정수처리방식별 정수 수질인자의 변화와 재염소 투입을 고려한 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 개발하고자 하였으며, 연구 흐름도는 다음 Fig. 1과 같다.

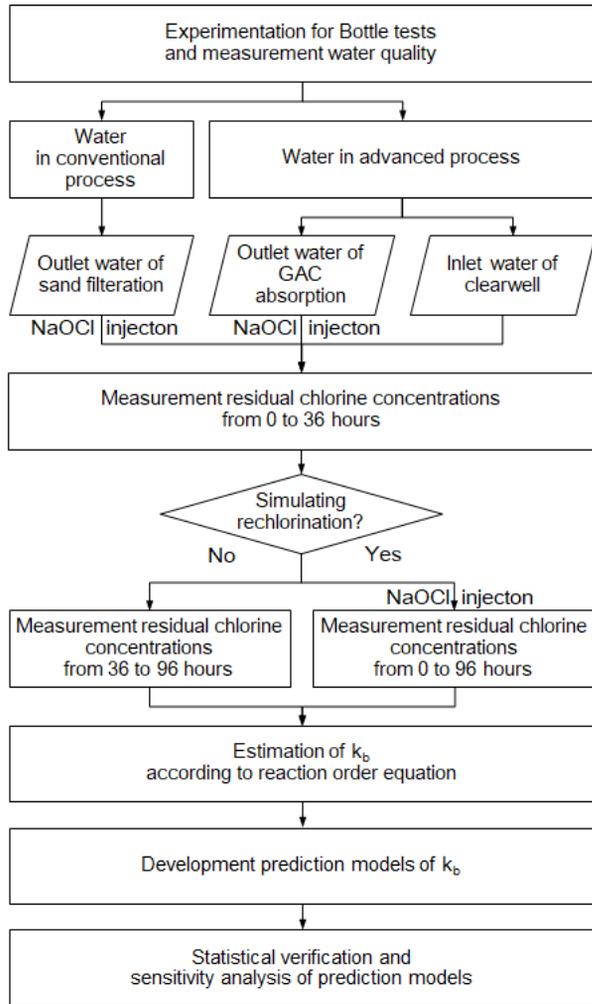


Fig. 1. Flow chart of the study.

### 2.1 연구대상지역

본 연구에서는 정수처리방식을 고려할 수 있도록 정수처리과정 내 고도처리공정이 설치되어 있는, 공급과정에서 염소 재투입에 따른 잔류염소농도 감소 특성을 고려할 수 있도록 공급과정 중 8개소의 재염소 투입 설비가 설치되어 있는 G 정수장 급수계통을 연구대상지역으로 선정하였다. G 정수장의 시설용량은

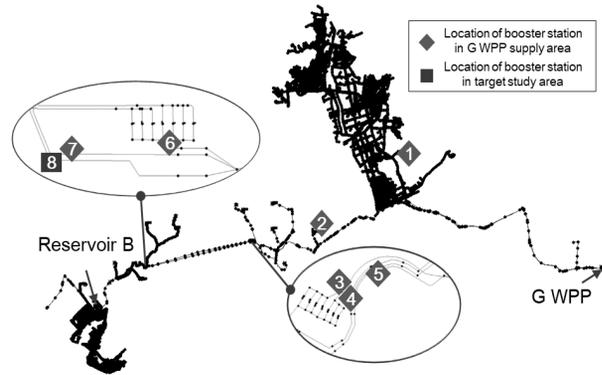


Fig. 2. Target study area (G Water purification plant supply area).

1,000,000  $m^3/d$  이며, 전염소처리된 원수를 공급받아 응집·침전 및 급속모래여과방식의 표준처리공정 이후 고도처리공정인 오존접촉, 입상활성탄 흡착 및 염소 소독공정을 통해 정수처리를 하고 있으며, 2016년 기준 평균 791,503  $m^3/d$ 의 정수를 공급하고 있다.

한편, 구체적인 연구지역 범위를 한정하기 위하여, G 정수장 급수계통 중 정수장의 송수 잔류염소농도 변동에 따라 잔류염소농도 법적 기준치를 만족하지 못할 우려가 있는 관말 급수구역을 중심으로 연구를 진행하였다. 이에 따라 G 정수장에 가장 멀리 위치한 B 배수지 급수구역을 연구대상지역으로 선정하였다. B 배수지의 시설용량은 40,000  $m^3/d$  이며, 재염소 설비는 B 배수지 유입계통의 관로에 설치되어 있다. G 정수장과 연구대상지역, 재염소 설비 위치를 관망도상에 표기하면 다음 Fig. 2와 같다.

### 2.2 잔류염소농도 수체감소계수 산정

Rossman et al. (1994)은 잔류염소 감소반응모델을 상수관망을 통해 공급되는 과정에서 관의 길이, 수체에서 잔류염소농도 반응, 수체에서 관벽으로의 물질 전달계수, 관의 동수반경 등을 고려하여 식 (1)과 같이 제시하였다. 식 (1)의 우변의 첫 번째 항은 단면적을 통과하는 염소의 이류흐름에 대해 나타내며, 분산 유속에서는 일반적으로 무시할 수 있다. 이로써 잔류염소농도 감소반응모델은 수체에서의 반응과 관벽에서의 반응로 식 우변의 두 번째, 세 번째 항과 같이 표현될 수 있다. 본 연구에서는 정수 수질변동에 따른 잔류염소농도 감소반응을 중심으로 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 개발하고자 잔류염소농도 수

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

체반응계수만을 산정하였다.

$$\frac{dC}{dt} = -u \frac{dC}{dx} - k_b C - \frac{k_f}{r_h} (C - C_w) \quad (1)$$

$C$  = Chlorine concentration in the bulk flow

$t$  = time

$u$  = Flow velocity in pipe

$x$  = Distance along pipe

$k_b$  = Bulk decay coefficient

$k_f$  = Mass-transfer coefficient

$r_h$  = Hydraulic radius of pipe

$C_w$  = Chlorine concentration at the pipe wall

수체감소계수 예측모델 개발을 위해 사용한 잔류염소농도 수체감소계수는 다음과 같은 방법에 의해 산정하였다. 여기서, G 정수장의 응집·침전 공정을 거친 뒤 급속모래여과를 거친 유출수는 일반적인 표준처리공정을 거친 것으로 판단하여 표준처리수로 간주하였다. 한편, 모래여과 이후 오존처리 및 입상활성탄 흡착 공정을 거친 유출수는 고도처리공정을 거친 것으로 판단하여 고도처리수로 간주하였다. 본 연구에서 표현하는 표준처리수와 고도처리수는 모두 정수지의 염소소독 이전의 처리수로, 잔류염소농도가 검출한계인 0.02 mg/L 미만으로 나타나 잔류염소가 존재하지 않는 것으로 판단되었으며, 실험조건에 따라 차아염소산나트륨 용액의 투입량을 달리하여 잔류염소농도를 조정하였다.

잔류염소농도 수체감소계수는 Powell et al. (2000) 이 제안한 bottle test 방법을 동일하게 활용하였다. 2018년 2월부터 6월까지 G 정수장의 모래여과지 유출수 및 고도처리공정 유출수 또는 정수지 유입수를 수회 채수하여, 표준처리수와 고도처리수의 채수시기, 초기 잔류염소농도 및 수온을 다르게 설정한 뒤 다양한 조건에서 bottle test를 수행하였으며, 실험조건에 따른 잔류염소 수체감소계수를 산정하였다. 이 때 하절기 및 동절기 때의 수온을 고려하여 5~30 °C 범위 내 불연속적인 간격으로 일정 온도를 설정하였으며, 일정 온도에 맞춰진 항온배양기에 채수한 시료를 각각 보관하여 측정간격에 따라 잔류염소농도를 측정하였다.

염소 재투입 시 잔류염소농도 수체감소계수를 산정

할 경우 정수지 체류시간 및 연구대상지역 B 배수지 재염소 설비까지의 체류시간을 고려하여 초기 잔류염소농도 측정시점을 기준으로 36시간이 경과하였을 때 차아염소산나트륨 용액을 투입하였다.

잔류염소농도 측정간격은 염소를 재투입하지 않은 시료에 대해서는 초기 잔류염소농도 측정시점 이후 1시간, 2시간, 4시간, 6시간, 12시간, 24시간, 36시간, 48시간, 72시간, 96시간으로 설정하였으며, 염소를 재투입한 시료는 재투입 시점 이후 1시간, 2시간, 12시간, 24시간, 48시간, 72시간, 96시간으로 설정하였다. bottle test 결과에 대해 다음 식 (2)와 같은 1차 반응식, 식 (3)과 같은 2차 반응식, 식 (4)와 같은 3차 반응식에 따라 곡선 적합법을 사용하여 잔류염소농도 수체감소계수 값을 산정한 뒤, 실제 감소기작을 가장 잘 표현하는 반응식을 도출하였다.

$$C = C_0 \cdot e^{-k_{b,1}t} \quad (2)$$

$$C = \frac{C_0}{1 + k_{b,2} C_0 t} \quad (3)$$

$$C = \frac{C_0}{(1 + k_{b,3} C_0^2 t)^2} \quad (4)$$

$k_{b,n}$  = Bulk decay coefficient in n-th order equation [(mg/L)<sup>(n-1)</sup>d<sup>-1</sup>]

$C$  = Residual chlorine concentration of time t (mg/L)

$C_0$  = Initial chlorine concentration (mg/L)

### 2.3 잔류염소농도 감소 영향인자 측정

앞서 기술한 바와 같이 수체에서의 잔류염소농도 감소는 체류시간과 수온 이외에 초기 잔류염소농도, 유기물 농도 등과 같은 다양한 정수 수질인자 및 염소 투입 시점에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 이를 고려한 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 개발하기 위하여 정수 수질인자 중 pH, 탁도, 수온, 전기전도도, TOC, DOC, UV<sub>254</sub>, SUVA(Specific UV absorbance)를 측정하였다.

각 시료에 대한 bottle test와 동시에 정수 수질을 측정하였으며, 측정 시 활용한 방법 및 기기는 Table 1과 같다.



**Table 1.** Analysis methods and instruments for water quality measurement

Parameter	Method	Instrument
Residual chlorine concentration (mg/L)	DPD method	HACH Chlorine Pocket Colorimeter II
pH (-)	Electrode method	HACH HQd Portable Meter
Turbidity (NTU)	EPA Method 180.1	HACH 2100Q Turbidimeter
Temperature (°C)	Thermocouple	Thermometer
Conductivity (µS/cm)	Electrode method	HACH HQd Portable Meter
TOC (mg/L)	ES 04311.1c	Elementar vario TOC/TNb analysis
DOC (mg/L)	ES 04316.1	Elementar vario TOC/TNb analysis
UV254 (cm <sup>-1</sup> )	EPA Method 5910	HACH DR2000
SUVA (L/mg·m)	EPA Method 415.3	-

## 2.4 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델 개발

잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 개발하기 위해 종속변수는 bottle test를 통해 산정한 잔류염소농도 수체감소계수로 설정하였고, 독립변수로는 bottle test와 동시에 측정한 잔류염소농도 감소 영향인자를 설정하였다. 또한 염소 재투입 시 잔류염소농도를 고려하기 위해 3가지 형태의 독립변수를 추가적으로 설정하여 모델을 개발하였다. 추가적으로 설정한 독립변수 중 염소 재투입 시 잔류염소농도 ( $C_{re}$ )는 다음 식 (5)와 같이 염소 재투입 시점에 잔류하는 잔류염소농도 ( $C_{before}$ )와 재투입한 잔류염소농도 ( $C_{booster}$ )를 더하여 산정하였다. 염소 투입농도에 대한 곱 ( $C_{injection}$ )은 다음 식 (6)과 같이 초기 잔류염소농도 ( $C_0$ )와 염소 재투입 시 잔류염소농도 ( $C_{re}$ )를 곱한 값에 거듭제곱근을 취한 형태의 변수로, 재염소 투입 설비 운영시 초기 잔류염소농도와 염소 재투입 시점의 잔류염소농도가 반비례 관계에 있음에 따라 해당 형태의 인자를 독립변수로 설정하였다.

$$C_{re} = C_{before} + C_{booster} \quad (5)$$

$$C_{injection} = \sqrt{C_0 \times C_{re}} \quad (6)$$

$C_{re}$  : Residual chlorine concentration after rechlorination (mg/L)

$C_{before}$  : Residual chlorine concentration before rechlorination (mg/L)

$C_{booster}$  : Injected residual chlorine concentration in booster station (mg/L)

$C_{injection}$  : Square root of the product of  $C_0$  and  $C_{re}$  (mg/L)

$C_0$  : Initial chlorine concentration (mg/L)

잔류염소농도 수체감소계수 예측모델은 잔류염소농도 감소에 영향을 주는 요인들에 대한 중회귀분석을 통해 개발하였다. 중회귀분석은 통계 분석 프로그램인 IBM SPSS Statistics 23.0을 이용하여 수행하였으며, 모델 개발에 활용한 변수들은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

개발된 모델의 통계적 유의성을 검증하기 위해 Durbin-Watson 통계량, 분산분석 결과, 회귀계수에 대한 t-test 결과 및 공차한계를 검토하였다. Durbin-Watson 통계량은 회귀모형의 기본 가정 중 하나인 오차항 간의 상관관계가 없음과 독립성을 검증할 수 있는 통계값으로, 정상분포곡선을 나타내는 기준값이 2 이기 때문에 2 에 가까울 경우 오차항들이 서로 독립이라고 할 수 있다. 0 또는 4에 가까우면 반대로 오차항의 독립성이 없고, 상관관계가 있어 회귀모형의 가정에 벗어남을 의미한다. 또한 회귀모형에 대한 분산분석 시 F 통계량의 유의확률(p-value)을 통해 회귀모형의 오차항의 독립성, 등분산성 및 정규성에 대해 검토할 수 있다. 회귀모형에 대한 t-test 시 회귀계수의 t 값 유의확률을 토대로 회귀계수의 적합성을 검토할 수 있으며, 중회귀모형의 다중공선성 여부는 공차한계(Tolerance)를 통해 확인할 수 있다.

개발된 예측모델의 변수값들의 영향도를 검토하기 위해 민감도분석을 수행하였다. 이를 위해 변수값의 범위에 대한 평균값을 기준값으로 설정하고, 영향도를 검토하고자 하는 변수에 대해서 최소, 최대값으로 변동시킨 후 잔류염소농도 수체감소계수 변화를 검토하였다.

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

**Table 2.** Independent variables for development of prediction models

Prediction model	Water purification processes	Independent variables
$k_b$ by no-rechlorination	Conventional, Advanced	$C_0$ , pH, Turbidity, Temp., E.C, TOC, DOC, $UV_{254}$ , SUVA
$k_b$ by rechlorination	Conventional	$C_{re}$ , pH, Turbidity, Temp., E.C, TOC, DOC, $UV_{254}$ , SUVA
	Advanced	$C_{injection}$ , pH, Turbidity, Temp., E.C, TOC, DOC, $UV_{254}$ , SUVA

$k_b$  : Bulk decay coefficient [(mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>]  
 $C_0$  : Initial chlorine concentration (mg/L)  
 Temp. : Temperature (°C)  
 E.C : Conductivity (µS/cm)  
 SUVA : Specific UV absorbance (L/mg·m), [( $UV_{254}$ )×100]/(DOC)  
 $C_{re}$  : Residual chlorine concentration after rechlorination (mg/L)  
 $C_{injection}$  : Square root of the product of  $C_0$  and  $C_{re}$  (mg/L)

### 3. 결 과

#### 3.1 잔류염소농도 수체감소계수 산정 결과

표준처리수와 고도처리수의 채수시기, 초기 잔류염소농도 및 수온을 다르게 설정한 뒤 다양한 조건에서 수행한 모든 bottle test 결과에 대해서 각각 1차, 2차 및 3차 반응식의 잔류염소농도 수체감소계수를 산정하고, 산정 결과를 비교하였다. 모든 bottle test 결과에 대해 반응차수별로 예측값과 실측값간의 결정계수와 상대오차의 평균을 비교한 결과는 Table 3과 같다.

표준처리수를 대상으로 최초 염소투입 후 재염소 투입 없이 잔류염소농도의 감소를 모의한 경우, 재염소 투입 후 잔류염소농도의 감소를 모의한 경우에 대해 반응차수별로 잔류염소농도 수체감소계수 값을 추정한 결과, 결정계수의 평균값이 가장 높은 차수는 모두 2차 반응식으로 나타났으며, 각각의 평균 결정계수 값은 0.9743, 0.9655로 매우 높게 나타났다.

표준처리수의 재염소 투입 전 잔류염소농도 수체감소계수는 조건에 따라 0.4832 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>에서 18.1640 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타났으며, 평균 수온인 17.1°C에서는

**Table 3.** Results of estimated  $k_b$  by nth-order reaction

Index		R <sup>2</sup> between measured and predicted values			Average of relative errors between measured and predicted values		
		First order reaction	Second order reaction	Third order reaction	First order reaction	Second order reaction	Third order reaction
No rechlorination in conventional processes (N=34)	Min	0.8349	0.8887	0.9199	0.1195	0.0724	0.0460
	Max	0.9958	0.9943	0.9896	0.6112	0.8017	1.6281
	Average	0.9577	0.9743	0.9693	0.3487	0.2463	0.5860
Rechlorination in conventional processes (N=20)	Min	0.8590	0.9187	0.8959	0.0404	0.0295	0.0466
	Max	0.9972	0.9950	0.9878	0.5438	0.7219	1.2801
	Average	0.9606	0.9655	0.9539	0.1622	0.2665	0.4385
No rechlorination in advanced processes (N=51)	Min	0.8789	0.9109	0.9082	0.0846	0.0614	0.0356
	Max	0.9983	0.9936	0.9927	0.4368	0.7117	1.2667
	Average	0.9570	0.9715	0.9662	0.2541	0.2296	0.4282
Rechlorination in advanced processes (N=25)	Min	0.8346	0.8852	0.8767	0.0267	0.0164	0.0178
	Max	0.9983	0.9962	0.9931	0.4758	0.6404	1.0513
	Average	0.9620	0.9634	0.9514	0.1250	0.1576	0.2456
Total (N=130)	Average	0.9587	0.9698	0.9623	0.2399	0.2258	0.4359



pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

5.9072 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타났다. 반면 재염소를 투입한 후 잔류염소농도 수체감소는 0.5297 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>에서 8.9806 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타났으며, 평균 수온에서는 1.2522 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타나 재염소 투입 전과 비교하였을 때, 78.8% 가량 작은 계수값을 갖는 것으로 나타났다.

마찬가지로 고도처리수를 대상으로 재염소 투입을 하지 않는 경우와 재염소 투입을 한 경우에 대해 반응차수별로 잔류염소농도 수체감소계수 값을 추정할 결과 역시 반응식으로 2차 반응식을 활용하였을 때 평균 결정계수 값이 각각 0.9715, 0.9634 로 가장 높게 나타났다. 또한 고도처리수의 재염소 투입 전 잔류염소농도 수체감소계수는 조건에 따라 0.3326 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>에서 13.0222 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타났으며, 평균수온인 16.8°C에서는 3.3974 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타났다. 재염소를 투입한 후 잔류염소농도 수체감소계수는 0.4938 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>에서 7.4160 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타났으며, 평균 수온인 16.8°C에서는 1.1998 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타나 재염소 투입 전과 비교하였을 때, 64.7% 가량 작은 계수값을 갖는 것으로 나타났다.

전반적으로 가장 높은 상관성을 나타내며, 상대오차가 가장 적게 나타난 반응차수는 2차 반응식으로, 본 연구대상지역 G 정수장 정수의 잔류염소 수체감소에 대한 최적 반응차수로 2차 반응식을 선정하였다.

### 3.2 재염소 투입에 따른 잔류염소농도 수체감소계수의 변화

초기 염소투입 후 재염소 투입이 없는 경우와 재염소를 투입한 경우에 대해서 잔류염소농도 수체감소계수를 비교하기 위하여, 표준처리수 및 고도처리수를 대상으로 초기 잔류염소농도와 재투입 시점의 잔류염소농도를 유사하도록 설정하여 bottle test를 수행한 결과는 Fig. 3, Fig. 4, Table 4와 같다.

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 표준처리수와 고도처리수에 대한 17°C 조건에서의 실험 결과를 예시로 나타낸 것으로서, 재염소 투입을 한 경우가 재염소 투입이 없는 경우에 비해 잔류염소농도 수체감소계수값이 각각 78.8%, 64.7% 작게 나타났다.

이러한 경향은 최초 염소를 투입한 시점의 TOC 농도와 재염소 투입 시점에서의 TOC 농도의 차이를 통해서 파악할 수 있다. 재염소 투입 시점에서의 TOC

농도는 최초 염소 투입 시점과 비교하였을 때, 각각 6.6% (표준처리수 최초 염소 투입시 : 1.270 mg/L, 재염소 투입시 : 1.187 mg/L), 16.3% (고도처리수 최초 염소 투입시 : 1.120 mg/L, 재염소 투입시 : 0.938 mg/L) 감소하였다. 즉, 최초 염소 투입 후 유기물질의 산화로 인하여 유기물질의 농도가 감소하여 염소를 소모하는 물질량이 줄어들었기 때문에, 염소 소모의 속도를 나타내는 잔류염소농도 수체감소계수가 상대적으로 작게 추정된다고 판단된다. 따라서 재염소 설비에서 염소가 재투입되는 경우의 잔류염소 수체감소는 정수장에서 염소 초기투입 시의 수체감소보다 느린 반응을 나타냄을 추정할 수 있다. 또한 염소 투입 시점이 구분된 잔류염소 수체감소계수 예측모델 개발이 필요함을 확인할 수 있었다.

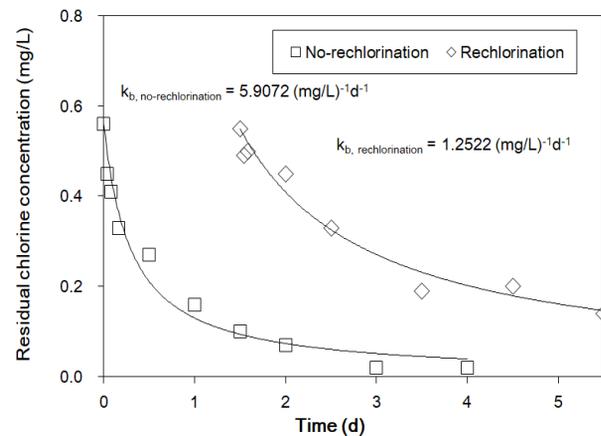


Fig. 3.  $k_b$  by no-rechlorination and by rechlorination (in conventional processes, Temperature = 17.1°C).

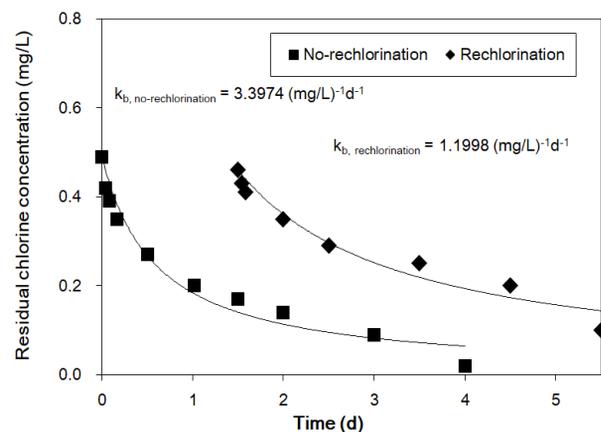


Fig. 4.  $k_b$  by no-rechlorination and by rechlorination (in advanced processes, Temperature = 16.8°C).

**Table 4.**  $k_b$  by rechlorination, water purification processes and temperature

Water purification process	Temperature (°C)	No-rechlorination		Rechlorination	
		$C_0$ (mg/L)	$k_b$ [(mg/L) <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]	$C_{re}$ (mg/L)	$k_b$ [(mg/L) <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]
Conventional processes	8.5	0.56	3.5071	0.54	0.5297
	16.8	0.56	5.9072	0.55	1.2522
	24.8	0.56	14.2697	0.53	2.1761
Advanced processes	9.2	0.49	1.8378	0.48	0.5702
	16.9	0.49	3.3974	0.46	1.1998
	24.1	0.49	6.4541	0.45	3.1272

$C_0$  : Initial chlorine concentration

$C_{re}$  : Residual chlorine concentration after rechlorination

### 3.3 잔류염소 수체감소계수 예측모델 개발 결과

정수처리방식별 잔류염소 수체감소계수 예측모델 개발 시 활용한 시료의 수질인자는 Table 5와 같다. 해당 자료를 토대로 중회귀분석을 수행하였으며, 단계별 회귀방향을 통해 유의한 독립변수를 선정하였다.

그 결과 표준처리수 및 고도처리수의 초기 염소투입 후 재염소 투입이 없는 경우 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델은, 표준처리수에 대하여는 식 (7), 고도처리수에 대하여는 식 (9)와 같이 도출되었다. 한편,

재염소 투입시 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델은 각각 식 (8), 식 (10)과 같이 도출되었다.

개발된 예측모델의 표현력을 검증하기 위해 실제 추정된 잔류염소농도 수체감소계수와 수질인자들을 통해 예측된 잔류염소 수체감소계수 간의 상관성을 파악한 결과는 다음 Fig. 5와 같다. 결정계수 값이 모두 0.8 이상으로 나타나 설명력과 예측력이 높은 회귀식이 도출된 것으로 판단된다. 다만, 도출된 예측모델은 앞서 Table 5에서 제시한 독립변수 범위 내에서 활용 가능하다.

**Table 5.** Parameters for development of prediction models

Index		$k_b$ in conventional processes		$k_b$ in advanced processes	
Rechlorination		No-rechlorination	Rechlorination	No-rechlorination	Rechlorination
Number of sample		34	20	51	25
Dependent variable [(mg/L) <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]		$k_{b,Conv.} = 0.4832 \sim 18.1640$	$k_{b,Conv.re.} = 0.5297 \sim 8.9806$	$k_{b,Adv.} = 0.3326 \sim 13.0222$	$k_{b,Adv.re.} = 0.4938 \sim 7.4160$
Independent variables	Chlorine (mg/L)	$C_0 : 0.39 \sim 1.04$	$C_{re} : 0.33 \sim 0.55$	$C_0 : 0.35 \sim 1.03$	$C_{injection} : 0.37 \sim 0.49$
	pH (-)	6.98 ~ 7.73	7.20 ~ 7.59	6.86 ~ 7.89	7.14 ~ 7.31
	Turbidity (NTU)	0.045 ~ 0.061	0.046 ~ 0.061	0.040 ~ 0.080	0.050 ~ 0.080
	E.C (µS/cm)	198.5 ~ 1907.0	250.0 ~ 1907.0	136.5 ~ 1746.0	216.2 ~ 1746.0
	Temperature (°C)	6.9 ~ 30.4	7.7 ~ 29.8	5.3 ~ 30.8	7.0 ~ 24.9
	TOC (mg/L)	1.240 ~ 1.897	1.258 ~ 1.897	1.104 ~ 1.548	1.120 ~ 1.548
	DOC (mg/L)	1.181 ~ 1.897	1.181 ~ 1.897	1.026 ~ 1.525	1.053 ~ 1.525
	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	0.017 ~ 0.034	0.017 ~ 0.034	0.011 ~ 0.024	0.011 ~ 0.024
	SUVA (L/mg·m)	1.260 ~ 1.948	1.279 ~ 1.948	0.858 ~ 1.653	0.869 ~ 1.653

$k_{b,Conv.}$  = Bulk decay coefficient, No-rechlorination in conventional processes

$k_{b,Conv.re.}$  = Bulk decay coefficient, Rechlorination in conventional processes

$k_{b,Adv.}$  = Bulk decay coefficient, No-rechlorination in advanced processes

$k_{b,Adv.re.}$  = Bulk decay coefficient, Rechlorination in advanced processes



$$k_{b, Conv.} = e^{-2.462 \ln(C_0) + 1.057 \ln(Temp.) + 7.479 \ln(pH) + 0.881 \ln(UV_{254}) + 0.255 \ln(E.C) - 15.656} \quad (7)$$

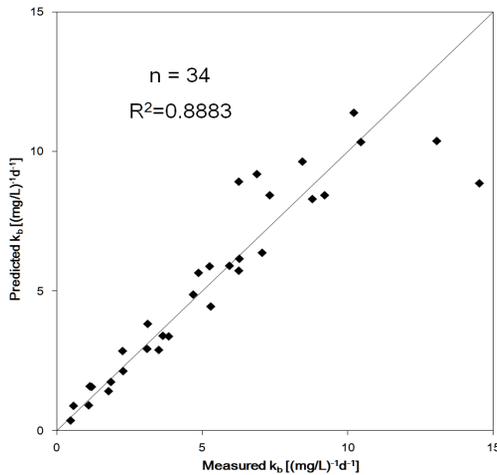
$$k_{b, Conv.,re} = e^{1.229 \ln(Temp.) - 2.119 \ln(C_{re}) - 4.334} \quad (8)$$

$$k_{b, Adv.} = e^{-2.436 \ln(C_0) + 1.309 \ln(Temp.) + 7.399 \ln(pH) + 0.909 \ln(UV_{254}) - 14.898} \quad (9)$$

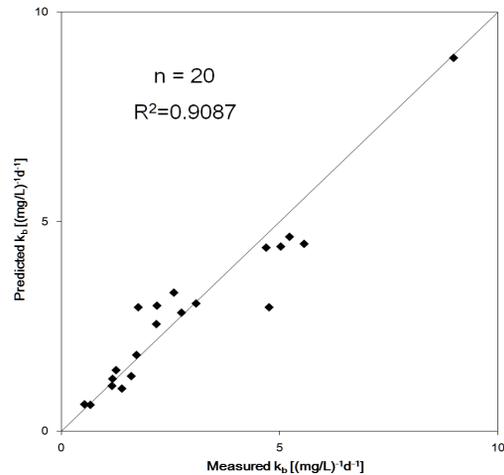
$$k_{b, Adv.,re} = e^{1.262 \ln(Temp.) - 2.691 \ln(C_{injection}) + 1.709 \ln(DOC) - 5.450} \quad (10)$$

개발된 예측모델의 통계적 유의성을 검토하기 위해 Durbin-Watson 통계량, 분산분석 결과, 회귀계수에 대한 t-test 및 다중공선성 여부를 확인하였다. 개발된 예측모델 식 (7), 식 (8), 식 (9), 식 (10)의 Durbin-Watson 통계량은 각각 1.281, 2.835, 1.887, 2.309로 수치가 2에 가깝게 도출된 것을 토대로 회귀모형의 기본 가정 중 하나인 오차항

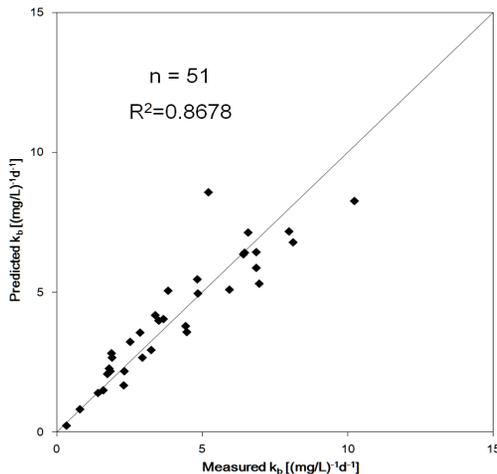
간의 독립성을 확인하였다. 또한 분산분석 결과는 개발된 예측모델 식 (7), 식 (8), 식 (9), 식 (10)의 F 값이 각각 102.834, 83.228, 123.510, 34.415로 나타났고, 그에 대한 유의확률은 모두 0.05 이하로 나타나 신뢰구간 95% 구간에서 모형의 통계적 유의성을 확인하였다. 회귀계수에 대한 t-test 와 다중공선성 여부를 검토한 결과 개발한



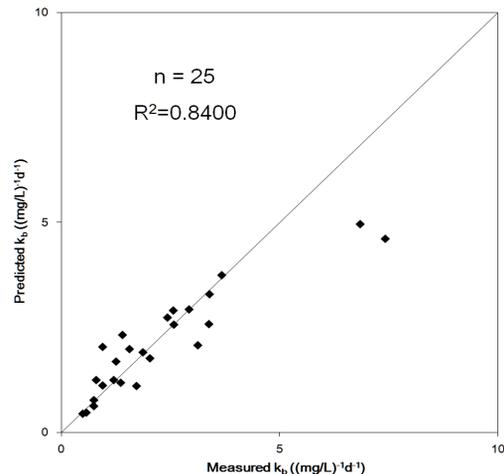
(a) No-rechlorination in conventional processes



(b) Rechlorination in conventional processes



(c) No-rechlorination in advanced processes



(d) Rechlorination in advanced processes

Fig. 5. Comparison between measured  $k_b$  and predicted  $k_b$ .

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

예측모델 모두 각 계수에 대한 t 값의 유의확률이 0.05 이하, 공차한계가 0.1 이상으로 나타났다. 이에 따라 신뢰 구간 95% 구간에서 통계적으로 유의한 계수값이 도출되고, 변수간의 다중공선성에 문제가 없음을 확인하였다. 최종적으로 개발한 예측모델은 모두 통계적으로 유의함을 확인하였다.

다음 Table 6, Table 7, Table 8, Table 9는 각각의 모델에 대한 민감도 분석 결과를 나타낸다.

먼저 Table 6은 표준처리수, 초기 염소투입 후 재염소 투입이 없는 경우의 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델에 대한 민감도 분석 결과를 나타낸다. 표준처리수에 대하여는 초기 잔류염소농도, 수온, pH, UV<sub>254</sub>, 전기전도도 순으로 잔류염소농도 수체감소계수의 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다. 식 (7)에서 알 수 있듯이, 표준처리를 하는 정수장의 경우에는 상수도 공급과정에서의 잔류염소농도 관리를 위하여

초기 잔류염소농도를 적정 수준으로 유지하면서, 수온, pH, UV<sub>254</sub>, 전기전도도가 낮을수록 잔류염소농도의 소모 속도가 적은 것으로 나타났다.

Table 7은 표준처리수, 재염소투입을 한 경우의 잔류염소농도 수체감소계수 예측 모델에 대한 민감도 분석 결과를 나타낸다. 잔류염소농도 수체감소계수에 미치는 영향도가 큰 수질인자는 수온, 염소가 재주입된 시점의 잔류염소 농도 순으로 나타났다. 식 (7)에 나타난 재염소투입을 하지 않는 경우와 비교하였을 때, 유기물질의 농도를 간접적으로 파악할 수 있는 UV<sub>254</sub>와 pH가 예측 모델에서 제외되었는데, 이는 최초 염소투입 후 지속적으로 유기물질이 산화됨에 따라 재염소를 실시하는 시점에는 표준처리수 내 UV<sub>254</sub> 값은 잔류염소농도 수체감소계수의 변화를 표현할 만큼의 큰 요인이 되지 못하였기 때문으로 판단된다. 다만, 앞서 3.2절에 기술한 바와 같이 최초 염소투입후

**Table 6.** Sensitivity analysis of prediction model of  $k_b$  (no-rechlorination in conventional processes)

Index	C <sub>0</sub> (mg/L)	Temp. (°C)	pH	UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	E.C (μS/cm)	k <sub>b</sub> [(mg/L) <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]		
Average	0.72	18.7	7.36	0.027	1052.8	5.6301		
Min	0.39	6.9	6.98	0.017	198.5	2.7058		
Max	1.04	30.4	7.73	0.034	1907	8.1576		
Sensitivity analysis	0.39	18.7	7.36	0.027	1052.8	25.6738		
	1.04					2.2949		
	0.72	6.9				1.9782		
		30.4				9.4842		
		18.7				6.98	3.8173	
						7.73	8.1894	
						7.36	0.017	3.9028
							0.034	7.1875
	0.72	18.7				7.36	198.5	3.7083
							1907	6.6028

**Table 7.** Sensitivity analysis of prediction model of  $k_b$  (rechlorination in conventional processes)

Index.	Temp. (°C)	C <sub>re</sub> (mg/L)	k <sub>b</sub> [(mg/L) <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]
Average	18.8	0.44	2.7404
Min	7.7	0.33	1.6886
Max	29.8	0.55	3.0182
Sensitivity analysis	7.7	0.44	0.9179
	29.8		4.8429
	18.1	0.33	5.0414
		0.55	1.7079



pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086

**Table 8.** Sensitivity analysis of prediction model of  $k_b$  (no-rechlorination in advanced processes)

Index	$C_0$ (mg/L)	Temp. (°C)	pH	$UV_{254}$ (cm <sup>-1</sup> )	$k_b$ [(mg/L) <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]
Average	0.69	18.1	7.38	0.018	2.4585
Min	0.35	5.3	6.86	0.011	0.9913
Max	1.03	30.8	7.89	0.024	4.0946
Sensitivity analysis	0.35	18.1	7.38	0.018	12.8455
					1.03
	0.69	5.3			0.4943
		30.8			4.9482
	0.69	18.1	6.86	1.4390	
			7.89	4.0510	
			7.38	0.011	1.6120
			0.024	3.2761	

**Table 9.** Sensitivity analysis of prediction model of  $k_b$  (rechlorination in advanced processes)

Index	Temp. (°C)	$C_{injection}$ (mg/L)	DOC (mg/L)	$k_b$ [(mg/L) <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ]
Average	16.0	0.43	1.289	2.1171
Min	7.0	0.37	1.053	0.7942
Max	24.9	0.49	1.525	3.4833
Sensitivity analysis	7.0	0.43	1.289	0.7488
				24.9
	16.0	0.37		3.1723
		0.49	1.4896	
		0.43	1.053	1.4985
			1.525	2.8218

잔류염소농도의 감소속도와 재염소 투입 후 잔류염소 농도 감소속도는 확연한 차이를 나타내었다. 또한 재염소 투입 농도에 따라 수체감소계수가 달라지는 점을 고려하였을 때, 재염소 투입 설비를 설치하는 지점에는 본 연구에서 제안한 방법론을 활용하여 사전에 해당 수계의 평균적인 잔류염소농도 수체감소계수를 파악할 필요성이 있다고 판단된다.

한편, Table 8은 고도처리수, 초기 염소투입 후 재염소 투입이 없는 경우의 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델에 대한 민감도 분석 결과를 나타낸다. 식 (9)에 나타난 바와 같이 고도처리수의 경우는 표준처리수와는 다르게 전기전도도가 잔류염소농도 수체감소계수를 변화시키는 요인으로 선정되지 않았다. 그 외의 항목들은 모두 동일하게 나타났으며, 민감도 분석 결과 초기 잔류염소농도, 수온, pH,  $UV_{254}$  순으로 잔류염소농도 수체감소계수에 미치는 영향도가 큰 것을

확인할 수 있었다. 표준처리수와 마찬가지로 초기 잔류염소농도가 잔류염소농도 수체감소계수를 가장 크게 변화시키는 요인인 것으로 나타났다.

마지막으로 Table 9는 고도처리수, 재염소투입을 한 경우의 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델에 대한 민감도 분석 결과를 나타낸다. 잔류염소농도 수체감소계수에 미치는 영향도가 큰 수질인자는 수온, 염소 투입농도에 대한 곱 ( $C_{injection}$ ), DOC 순으로 나타났다. 이를 고려하였을 때, 고도처리수가 공급되는 지역에서 재염소 설비를 운영할 때에는 수온, 재염소 투입농도를 고려하여 잔류염소 농도를 관리해야 하는 것이 적절하다는 결과를 도출할 수 있었다. 한편, 고도처리수의 DOC 농도에 의해 재염소 시 수체감소계수 값이 영향을 받는 것으로 나타난 점을 고려할 때, 정수처리를 통해 DOC 농도를 낮추어 수질과 잔류염소 농도를 관리하는 것이 합리적이라는 결과가 도출되었다.

**Table 10.** Comparison between prediction results of Arrhenius equations and prediction models

Index	Prediction method	
	Equation	R <sup>2</sup>
No-rechlorination in conventional processes (N=17)	Arrhenius equation : $k_b = e^{-7.184(Temp.) + 26.706}$	0.6819
	Prediction model (Equation 7) : $k_b = e^{-2.462 \ln(C_0) + 1.057 \ln(Temp.) + 7.479 \ln(pH) + 0.881 \ln(UV_{254}) + 0.255 \ln(EC) - 15.656}$	0.7867
Rechlorination in conventional processes (N=8)	Arrhenius equation : $k_b = e^{-7.286(Temp.) + 25.287}$	0.6266
	Prediction model (Equation 8) : $k_b = e^{1.229 \ln(Temp.) - 2.119 \ln(C_{re}) - 4.334}$	0.8511
No-rechlorination in advanced processes (N=37)	Arrhenius equation : $k_b = e^{-7.057(Temp.) + 25.600}$	0.4703
	Prediction model (Equation 9) : $k_b = e^{-2.436 \ln(C_0) + 1.309 \ln(Temp.) + 7.399 \ln(pH) + 0.909 \ln(UV_{254}) - 14.898}$	0.8344
Rechlorination in advanced processes (N=14)	Arrhenius equation : $k_b = e^{-9.542(Temp.) + 33.200}$	0.4327
	Prediction model (Equation 10) : $k_b = e^{1.262 \ln(Temp.) - 2.691 \ln(C_{injection}) + 1.709 \ln(DOC) - 5.450}$	0.8835

또한 개발된 예측모델의 활용성을 검토하기 위해, 현재 잔류염소농도 수체감소계수와 수온 사이의 관계를 Arrhenius 식으로 표현하여 잔류염소농도 수체감소계수를 예측하는 방법과 개발된 예측모델을 활용하는 방법을 비교해보았다. 앞서 제시한 Table 4의 실험 시 시료가 평균적인 수질 경향을 보임에 따라 해당 실험 시 결과를 표본으로 활용하여 수온만의 함수로 잔류염소농도 수체감소계수를 예측하였다. 다만, 개발된 예측모델의 민감도 분석을 토대로 표준처리수 및 고도처리수의 초기 염소농도 또는 염소가 재주입된 시점의 잔류염소농도 및 수온이 공통적으로 잔류염소농도 수체감소계수 변화에 큰 영향을 미침에 따라 초기 염소농도 또는 염소가 재주입된 시점의 잔류염소농도가 표본시료의 값에 대해 ±25% 범위 내에 있으며, 수온이 표본 시료의 수온범위 내에 있는 제한된 bottle test에 대해서만 예측 및 비교를 하였다. 비교 결과는 Table 10과 같이 Arrhenius 식을 사용하여 수온만을 변수로 한 경우보다 예측모델을 활용할 경우의 결정계수 값이 모두 높았다. 이를 통해 원수 특성 및 정수장의 처리효율 등 여러 요인에 따라 정수 수질이 변동되며, 이 때 잔류염소농도 감소가 수온 뿐만 아니라

다른 수질인자에 의해 영향을 받음을 확인할 수 있다. 따라서 연구대상지역의 실제 잔류염소농도 수체감소계수 값을 예측할 시 본 연구에서 개발된 예측모델을 활용하는 것이 정수의 잔류염소농도 수체감소를 보다 적절하게 예측할 수 있을 것이라고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 표준처리수와 고도처리수의 잔류염소농도 수체감소계수를 측정하고, 동시에 정수 수질을 측정하여 정수수질 조건별 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델을 개발하였다. 본 연구의 주요 연구결과를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

연구대상지역 G 정수장의 경우 2차 반응식이 잔류염소농도 수체감소반응을 가장 잘 모사함에 따라 2차 반응차수 값을 잔류염소 수체감소계수로 활용하였다. 표준처리수의 재염소 투입 전 잔류염소농도 수체감소계수는 평균 수온인 17.1°C에서는 5.9072 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타난 반면, 재염소 투입 후에는 잔류염소농도 수체감소계수가 78.8% 가량 작은 1.2522 (mg/L)<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>로 나타났다. 동일한 방법으로 고도처리수의 재염소 투입 전



잔류염소농도 수체감소계수는 평균 수온인 16.8°C에서는  $3.3974 \text{ (mg/L)}^{-1}\text{d}^{-1}$ 로 나타났으며, 재염소를 투입한 후 64.7% 가량 작은  $1.1998 \text{ (mg/L)}^{-1}\text{d}^{-1}$ 로 나타나 체류시간 동안의 유기물질 농도 감소가 잔류염소농도 수체감소계수를 변화시킨다는 결과가 도출되었다. 따라서 이러한 요인을 고려한 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델의 개발이 필요함을 확인하였다.

2차 반응식을 통해 도출된 수체감소계수와 여러 가지 수질인자를 고려하여 개발한 잔류염소농도 수체감소계수 예측모델의 경우 결정계수가 모두 0.8 이상으로 나타났으며, 통계적으로 유의하여, 실제값을 잘 표현할 수 있는 모델이 개발된 것으로 판단되었다.

한편, 잔류염소농도 수체감소계수는 초기 잔류염소 투입 농도 및 재염소 투입농도에 비례하는 것으로 나타났으나, 재염소 투입 유무에 따라 큰 폭으로 변할 수 있는 것으로 나타나, 실제 현장에서 본 연구에서 제안한 방법론을 활용하여 이러한 변화를 실험적으로 파악한 뒤, 잔류염소농도 관리계획을 수립함이 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 개발한 예측모델은 기존 선행연구들에 비해 발전된 형태의 예측모델로, 정수처리방식과 염소 투입 시점을 고려하여 정수장 운영조건 및 재염소 설비 도입에 따른 잔류염소농도 감소를 더욱 합리적으로 모의할 수 있을 것이다. 잔류염소농도를 연속적인 시간 간격 및 모든 공간에 대해서 측정할 수 있는 경우 잔류염소농도를 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것이라 판단되며, 급수구역의 잔류염소농도 관벽감소계수를 추가적으로 고려할 경우 급수구역의 잔류염소농도 감소를 사전에 예측할 수 있어, 상수도 공급과정에서의 잔류염소 농도 관리 계획 수립 시 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업 (2016002120006)”으로 지원받았습니다.

## References

- Ahn, J.C., Park, C.M. and Koo, J.Y. (2005) Modeling and application of chlorine bulk decay in drinking water distribution system, *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, 19(4), 487-496.
- Al-Heboos, S. and Liesko, I. (2017), Application and comparison of two chlorine decay models for predicting bulk chlorine residuals, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, 61(1), 7-13.
- Dominguez-Tello, A., Arias-Borrego, A., Garcia-Barrera, T., and Gomez-Ariza, J.L., (2015). Seasonal and spatial evolution of trihalomethanes in a drinking water distribution system according to the treatment process, *Environ. Monit. Assess.*, 187(11), 662.
- Hallam, N.B., Hua, F., West, J.R., Forster, C.F., and Simms, J. (2003). Bulk decay of chlorine in water distribution systems, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 129(1), 78-81.
- Koo, Y.H., (2004). Characterization of water quality variation in a water distribution system : Focused on residual chlorine and THMs, Ph.D dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea, 210.
- Lee, D.J., Lee, J.M., Kim, J.H., Kim, J.H, Bae, C.H. and U, H.M., (2006). “Prediction of chlorine and THM in water distribution system”, *Proceedings of Korean Society of Environmental Engineers Conference*, 27-29 April, 2006, Ilsan, Korea, Korean Society of Environmental Engineers.
- Powell, J.C., Hallam, N.B., West, J.R., Forster, C.F., and Simms, J. (2000). Factors which control bulk chlorine decay rates, *Water Res.*, 34(1), 117-126.
- Rossmann, L.A., Clark, R.M., and Grayman, W.M. (1994). Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems, *J. Environ. Eng.*, 120(4), 803-820.
- Vasconcelos, J.J., Boulos, P.F., Grayman, W.M., Kiene, L., Wable, O., Biswas, P., Bhari, A., Rossmann, L.A., Clark, R.M. and Goodrich, J.A., AWWARF(American water works association research foundation). (1996). Characterization and modeling of chlorine decay in distribution systems (ISBN: 0-89867-870-6), 402.

pp. 001-008

pp. 009-016

pp. 017-029

pp. 031-041

pp. 043-053

pp. 055-062

pp. 063-077

pp. 079-086