

하수재이용수의 유리잔류염소 수체감소 특성 연구

Characteristics of Residual Free Chlorine Decay in Reclaimed Water

강성원*.[†] · 이재영** · 이현동*.^{***} · 박재현* · 곽필재* · 오현제*

Sungwon Kang*.[†] · Jaiyoung Lee** · Hyundong Lee*.^{***} · Jaehyun Park* · Pilljae Kwak* · Hyunje Oh*

*한국건설기술연구원 환경연구실 · **서울시립대학교 환경공학부 · ***과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

*Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

**Department of Environmental Engineering, University of Seoul

***Department of Construction Environment Engineering, University of Science and Technology

(2012년 9월 25일 접수, 2013년 4월 15일 채택)

Abstract : The reclaimed water has been highlighted as a representative alternative to solve the lacking water resources. This study examined the reduction of residual free chlorine by temperature (5, 15, 25°C) and initial injection concentration (1, 2, 4, 6 mg/L) in the reclaimed water and carried out propose on the calculating method of the optimal chlorine dosage. As the reclaimed water showed a very fast reaction with chlorine at the initial time comparing to that of drinking water, the existing general first-order decay model ($C_t = C_o(e^{-k_b t})$) was not suitable for use. Accordingly, the reduction of residual free chlorine could be estimated in a more accurate way as a result of applying the exponential first-order decay model ($C_t = a + b(e^{-k_b t})$). ($r^2 = 0.872-0.988$). As a result of calculating the bulk decay constant, it showed the highest result at 653 day⁻¹ under the condition of 1 mg/L, 25°C for the initial injection whereas it showed the lowest result at 3.42 day⁻¹ under the condition of 6 mg/L, 5°C for the initial injection. The bulk decay constant tends to increase as temperature increases, whereas the bulk decay constant tends to decrease as the initial injection concentration increases. More accurate calculation for optimal chlorine dosage could be done by using the experimental results for 30~5,040 min, after the entire response time is classified into 0~30 min and 30~5,040 min to calculate the optimal chlorine dosage. In addition, as a result of calculating the optimal chlorine dosage by temperature, the relationships of initial chlorine demand (y) by temperature (x) could be obtained such as $y = 1.409 + 0.450x$ to maintain 0.2 mg/L of residual free chlorine at the time after 4 hours from the chlorine injection.

Key Words : Reclaimed Water, Chlorine Decay, Chlorine Demand, Bulk Decay Constant

요약 : 하수재이용수는 부족한 수자원 문제를 해결할 수 있는 대표적인 대안으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 하수재이용수의 공급시 유리잔류염소의 수체감소 특성을 온도별(5, 15, 25°C), 초기 주입농도별(1, 2, 4, 6 mg/L)로 살펴보고 그 결과를 이용하여 최적 염소주입량을 산정하는 방법에 대하여 연구하였다. 하수재이용수는 정수와 비교하여 염소주입시 반응속도가 초기에 매우 빠르게 나타나 기존의 general first-order decay model ($C_t = C_o(e^{-k_b t})$)을 사용하기에 부적합하여 exponential first-order decay model ($C_t = a + b(e^{-k_b t})$)을 적용한 결과 유리잔류염소의 감소를 더욱 정확하게 예측할 수 있었다($r^2 = 0.872-0.988$). 수체감소계수를 산출한 결과 초기주입량 1 mg/L, 25°C의 조건에서 653 day⁻¹로 가장 크게 나타났고, 5°C, 초기주입량 6 mg/L의 조건에서 3.42 day⁻¹로 가장 낮았다. 수체감소계수는 온도가 증가함에 따라 수체감소계수는 증가하는 경향을 나타내었고, 초기 주입농도가 증가함에 따라 수체감소계수는 감소하는 경향을 나타내었다. 적정 초기 염소요구량을 산정하기 위해서 전체 반응기간을 0~30분, 30~5,040분으로 구분한 후, 30~5,040분의 실험결과를 사용한 예측식을 사용함으로써 더욱 정확한 염소주입량 산정을 할 수 있었다. 또한, 온도별로 최적 염소주입량을 산정한 결과 염소주입 후 4시간이 경과한 시점에서 유리잔류염소 0.2 mg/L를 유지하기 위해서는 온도(x)별 초기 염소요구량(y)의 관계를 $y = 1.409 + 0.450x$ 와 같이 얻을 수 있었다.

주제어 : 하수재이용수, 염소 감소, 염소 요구량, 수체감소계수

1. 서론

하수처리수 재이용은 기후변화로 인한 물부족 현상을 극복할 수 있는 가장 현실적인 대안으로서 하천유지용수, 농업용수, 농업용수, 도시재용수(도로청소 등) 및 친수용수 등으로 활용할 수 있다.¹⁾ 환경부에서는 하수처리수 재이용사업을 확대 추진하여 2020년까지 재이용률을 31.1%로 증대시키는 것을 골자로 하는 물 재이용 기본계획을 수립하였는데, 그 중 기타 도시용수로 185,294 km³/year을 활용할 계획을 갖고 있다.²⁾ 도시용수로 활용하기 위해서는 농업용수, 하천유지용수와는 다르게 용수공급관망의 구조가 복잡해지게 되

어 상수공급을 위한 배수관망의 구조와 유사해지게 된다. 일례로 인천광역시 송도동에는 도시 내에 25.7 km의 재이용수 공급관망이 설치되어 있고, 2단계로 20.9 km를 추가 설치할 계획을 갖고 있다.

하수재이용수를 사용함에 있어 공공보건상의 유해성을 최소화하기 위해서는 반드시 적절한 소독공정이 필요하다. 현재까지 대부분의 연구는 하수처리수를 재이용하기 위해 요구되는 수질을 만족하기 위한 재이용수의 처리에 주안점이 맞춰져 있고 공급계통에서 발생할 수 있는 미생물의 재생장 억제 방안 등에 대한 연구는 거의 진행되지 않았다. 최근 들어 하수재이용수에서 소독제가 급격히 소멸되어 미생물

[†] Corresponding author E-mail: kang93@kict.re.kr Tel: 031-910-0773 Fax: 031-910-0291

재성장에 취약하다는 사실이 보고되고 있다.^{3,4)}

염소는 전통적으로 가장 많이 사용되고 있는 소독제로서 정수처리공정과 재이용수처리공정에 보편적으로 적용되고 있다. 염소는 수중의 미생물을 소독시킬 뿐만 아니라 유기 화합물 및 무기화합물과 모두 반응을 하는 특징을 갖는 비 선택적인 산화제이다. 자연 상태의 수중에서는 Fe²⁺, Mn²⁺, sulfide, bromide 및 ammonia와 같이 산화되기 쉬운 무기물과 반응성이 가장 크다.⁵⁾ 이러한 종류의 물질들과 염소의 반응 속도는 상대적으로 빨라서 수 분 이내에 반응이 이뤄진다. 염소는 유기물과도 반응을 하는데 이것은 전적으로 유기물의 분자구조적 특성에 따라 반응성이 결정되게 된다.⁶⁾ 또한, 관망시스템에서 수체와 염소의 반응 이외에도 관벽에 부착된 바이오필름과 염소가 반응하고 관벽에 발생한 부식물질과도 반응을 하게 된다. 이러한 이유로 염소소독 반응 이후 잔류염소의 농도를 정확히 예측하는 것은 쉽지 않다.^{7,8)}

미생물 재성장에 이용될 수 있는 유기물을 일반적으로 Biodegradable Organic Matter (BOM)라고 하며, 일반적으로 Assimilable Organic Carbon (AOC)과 Biodegradable Dissolved Organic Carbon (BDOC)을 측정하여 나타낸다. 먹는물의 경우 잔류 소독제가 없는 상태에서 AOC가 10 µg/L 이상이고 잔류 소독제가 있다고 해도 AOC가 100 µg/L 이상이면 생물학적으로 불안정한 AOC 농도이다.^{9,10)} 하수재이용수는 먹는물과 비교하여 AOC 농도가 5~10배 정도 높은 것으로 조사되어 용수공급 관망내에서 미생물 재성장 가능성이 높을 것으로 판단되고 있다.¹¹⁾ 이는 보건상으로 유해할 수 있는 가능성이 높다는 것을 의미하기 때문에 하수재이용수의 공급시 소독은 더욱 중요해진다.¹²⁾

본 연구에서는 하수재이용수에 염소가 투입되었을 때 시간 경과에 따른 염소의 소모 특성을 반응 온도별, 염소 주입량별로 관찰하였다. 이때, 하수재이용수와 염소의 화학반응에 적합한 모델을 제시하였고, 이를 바탕으로 염소의 최적 주입량을 산정해 보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 시료수

본 실험에 사용된 시료수는 K시 하수처리장의 처리수로서 UV소독 전에 채수하였다. K시 하수처리장은 공장폐수와 생활하수가 2:1의 비율로 유입되는 유입수의 특성을 갖는다. K시 하수처리장은 생물학적 처리공정 중 A₂O 공정을 사용하고 있으며 최종 침전지 후단에 모래여과 공정을 거친 후 UV소독을 수행하며, 본 실험에 사용된 시료수는 Table 1과 같은 수질 특성을 갖는다.

2.2. 실험방법

하수재이용수의 염소 주입시 온도가 잔류염소의 감소에 미치는 영향을 평가하기 위하여 5, 15, 25℃에서 수행되었다.

Table 1. Characteristics of water quality in sample

Temperature (°C)	17.5	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	12.80	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	89
pH	7.32	TOC (mg/L)	3.444	Cu (mg/L)	0.0037
Cl ⁻ (mg/L)	357.3	DOC (mg/L)	3.127	Fe (mg/L)	0.0065
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	143.0	UV ₂₅₄ (abs./cm)	0.060	Mn (mg/L)	0.0009
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.0	Hardness (mg/L as CaCO ₃)	280	Zn (mg/L)	0.0046

또한, 염소의 주입량이 미치는 영향을 파악하기 위하여 각 수온별로 초기 주입량을 1, 2, 4, 6 mg/L로 변경하며 실험을 수행하였다. 염소소독제로 차아염소산나트륨용액(NaOCl) (Sodium hypochlorite solution 8%, Junsei. co.)을 사용하였다. 잔류염소의 측정을 위해 Serum bottle 150 mL와 테프론 코팅이 되어 있는 실리콘 마개를 이용하였으며, 실험상의 오차를 최소화하기 위하여 Serum bottle을 증류수로 세척 후 105℃에서 1시간 건조 후 사용하였다. 실험에 사용할 차아염소산나트륨용액(8%)을 증류수로 4:1 (v/v) 희석하여 이를 시료수에 주입하였다. 염소주입농도조건에 따라 시료수가 들어 있는 각각의 Serum bottle에 희석된 차아염소산나트륨용액을 주입하고 시간의 경과에 따라 유리잔류염소와 총잔류염소를 측정하였다. 잔류염소농도의 측정은 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater의 DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine) colorimetric method를 이용하였으며, Pocket Colorimeter™ II (Hach)를 이용하였고 총잔류염소(Total chlorine residual)농도와 유리잔류염소(Free chlorine residual)농도를 각각 측정하였다. Pocket Colorimeter™ II의 Low Range의 EDL (Estimated Detection Limit)은 0.02 mg/L이며, High Range의 EDL은 0.1 mg/L이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 하수재이용수와 정수의 수체감소특성 비교

Fig. 1은 하수재이용수와 정수에서 시간에 따른 염소의 수체감소 반응 특성을 나타낸 것이다. Fig. 1과 같이 하수재이용수는 동일한 초기 주입량 및 온도에서 정수와 비교하여 단 시간 내에 감소되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 정수의 경우 5℃ 이하의 낮은 수온에서는 84시간이 경과해도 65%의 감소를 나타냈으나, 하수재이용수에서는 1시간 이내에 97% 이상 감소하는 경향을 나타내어 큰 차이를 보여주었다.

정수의 배급수시스템에 대한 이전의 연구들은 관을 흘러가는 물에서 염소의 감소반응은 1차 감소반응(general first-order decay model)이라고 가정하는 것이 합리적이라고 설명하고 있다.^{13,14)}

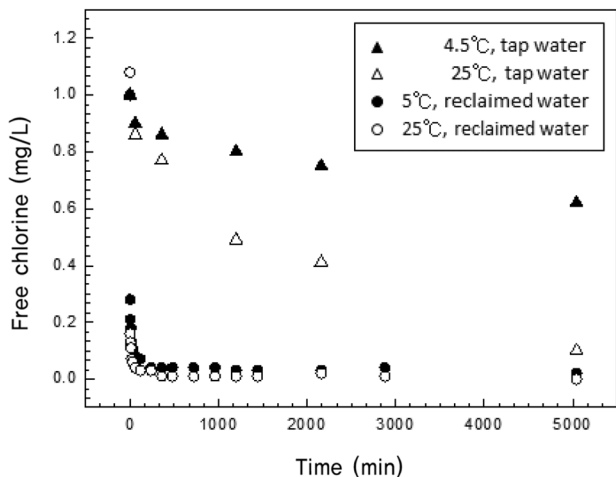


Fig. 1. Comparison on residual free chlorine in reclaimed water and drinking water.

$$dC/dt = -k_b C \text{ or } C_t = C_0(e^{-k_b t}) \quad (1)$$

그러나 식 (1)을 하수재이용수에서 염소의 수체감소특성에 적용한 결과 결정계수(R^2)가 0.3~0.6 정도로 낮아 1차 감소 모델이 적합하지 않은 것으로 확인되었다. 다른 여러 1차 반응 모델들을 적용한 결과, 식 (2)와 같은 가장 적합한 모델인 것으로 확인되었다.

$$C_t = a + b(e^{-k_b t}) \quad (2)$$

식 (2)를 하수재이용수에 대한 실험결과에 적용하여 exponential first-order decay model의 파라미터 k_b , a , b 를 결정하였다. 이 때, k_b 는 수체감소계수를 나타내고, a 는 그래프가 시간의 경과함에 따라 일정한 잔류염소를 나타낼 때의 농도를 의미하고, b 는 초기염소농도 중 반응한 양을 뺀 농도, 즉 $C_0 - a$ 를 의미한다. 식 (1)에서는 반응물질(염소)의 농도는 반응과정을 거치면서 0으로 향해가는 것을 가정한다. 그러나 식 (2)의 경우에는 염소가 과잉으로 존재하며 잔류염소농도는 변수 a 로 표현되는 잔류농도로 향해간다.

정수에 대한 수체감소계수, k_b 는 실험 조건에 따라 차이가 나지만 주로 0.1~2 day^{-1} 범위이다. 그러나, Fig. 1에 나타난 결과를 exponential first-order decay model에 적용한 결과 k_b 는 5, 25°C에 대하여 각각 397, 653 day^{-1} 를 나타내었다.

3.2. 온도와 초기 염소주입량의 영향

하수재이용수는 외부의 온도에 의하여 수온이 변화하게 된다. 하수재이용수의 원수인 하수처리수는 동절기와 하절기의 온도변화가 폭이 크기 때문에 정수와 비교하여 온도변화 폭이 더 크다. 이에 수체의 온도를 5, 15, 25°C로 한 후, 염소의 수체감소반응 특성을 실험한 결과 Fig. 2와 같은 결과를 얻었다.

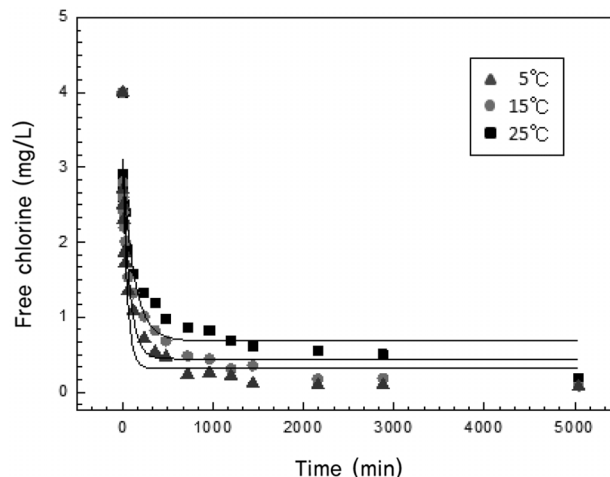


Fig. 2. Residual free chlorine concentration at 5, 15, 25°C.

대부분의 화학반응에서 반응속도는 온도가 증가함에 따라 증가하며 수체감소반응을 통한 잔류염소의 감소는 화학적 산화반응이기 때문에 온도가 상승할수록 반응속도가 증가한다. 화학반응에서 반응속도상수와 온도와의 관계를 나타내는 실험적 경험식으로는 Arrhenius equation이 있다. 온도에 따른 반응속도상수(수체감소계수)의 변화는 Arrhenius equation에 의해 수학적으로 표현이 가능하다.⁶⁾

$$k_b = Ae^{-(E/RT)} \quad (15)$$

여기서,

A : 빈도계수 또는 빈도인자(frequency factor or pre-exponential factor)

E : 활성화에너지(activation energy)

R : 기체상수(universal gas constant)

T : 절대온도(absolute temperature, K)

위의 Arrhenius equation에 log를 취하면 반응속도상수의 대수와 절대온도의 역수에 대한 그래프를 나타낼 수 있으며 이것을 Arrhenius plot이라 한다. 수온과 잔류염소의 수체감소계수에 대한 상관관계를 Arrhenius equation을 이용하여 평가한 선형관계식을 Fig. 3에 나타내었다. 선형회귀식을 살펴보면, 수온의 증가가 수체감소계수의 증가로 이어지는 것을 확인할 수 있다.

잔류염소는 수체의 여러 가지 성분들과 반응하고 관망으로 공급시 관벽의 성분들과 반응하여 감소하게 된다. 본 연구에서는 초기 잔류염소의 농도를 1 mg/L로 실험한 결과 1시간 이내에 모두 소모하는 것으로 나타났다. 이에 수온 15°C에서 공급관망에 잔류염소가 존재할 수 있도록 초기 주입량을 2, 4, 6 mg/L로 증가하며 실험을 수행한 결과 Fig. 4와 같이 나타났다. 초기 주입농도가 낮을 경우 잔류염소감소가 더 크게 감소하였으며, 초기 주입농도가 2, 4, 6 mg/L 일 때 수체감소계수 k_b 는 각각 97.2, 19.2, 4.5 day^{-1} 를 나타내었다.

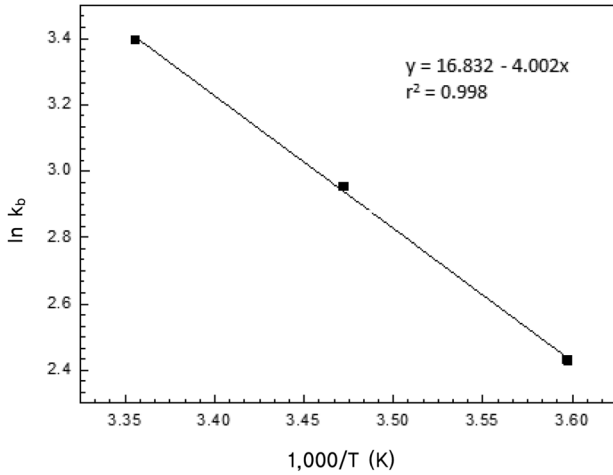


Fig. 3. Bulk decay constant by water temperature.

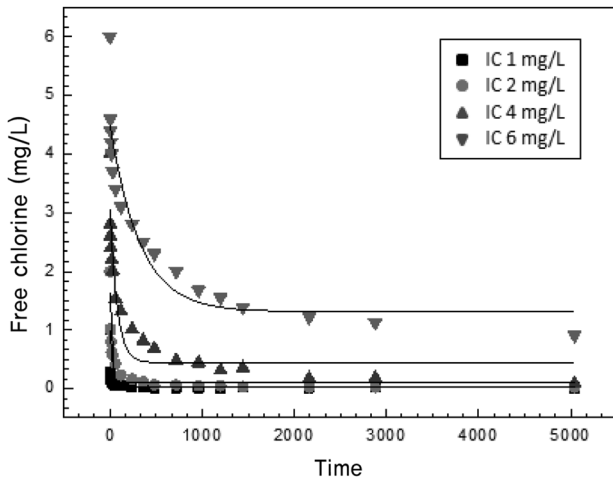


Fig. 4. Residual free chlorine versus time at initial chlorine (IC) 2, 4, 6 mg/L.

초기 주입농도에 따른 k_b , a , b 의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. k_b 는 초기 주입농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나, a 및 b 는 초기 주입농도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. Hallam의 연구에서도 수체감소계수와 초기염소농도 사이에는 역상관관계가 존재한다고 하였다.¹³⁾ Hua는 염소감소반응에서 염소 이외에 또 다른 반응물질그룹이 있다고 보았으며 이 반응을 2차 반응이라고 가정한다면 이에 따른 화학반응식은 다음과 같이 표현할 수 있다.¹⁴⁾



$$\frac{dC}{dt} = -k_o(X_0 - \alpha C_0)C \quad (4)$$

여기서,

- X : 반응물질
- P : 생성물질
- α : stoichiometry 상수
- C : t 시간에서 잔류염소농도
- C_0 : 초기 잔류염소농도
- k_o : 반응속도 상수
- X_0 : 초기 반응물질농도

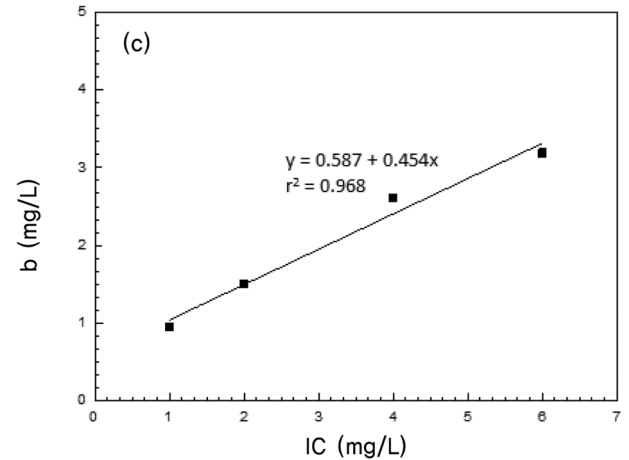
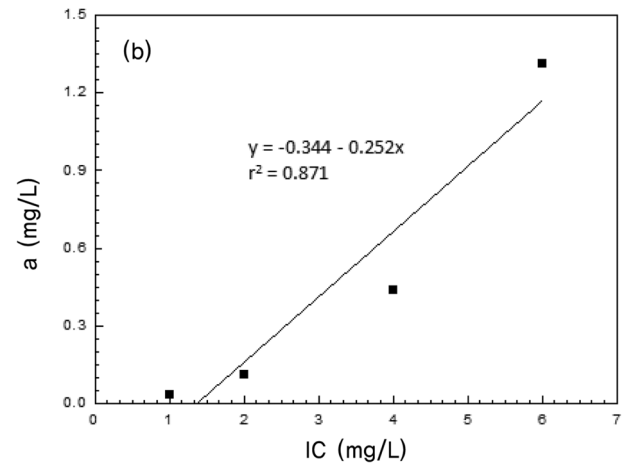
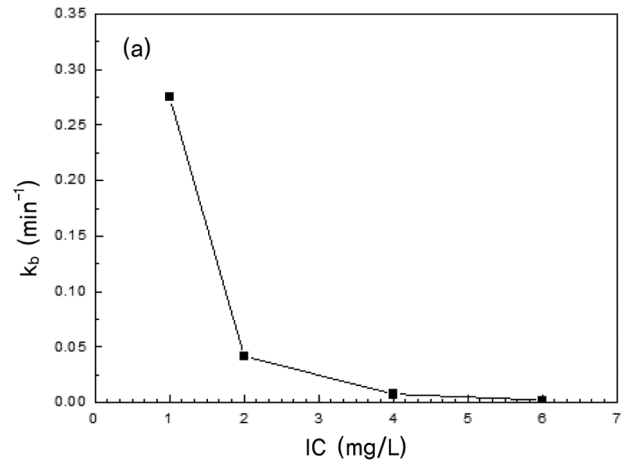


Fig. 5. The relationship of parameters on exponential first-order decay model; (a) k_b , (b) a , (c) b .

본 연구에서 잔류염소감소반응을 1차 반응이라고 가정하였으므로 식 (4)를 C 에 대한 1차반응식으로 표현하면 다음 식 (5)와 같다.

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C \quad (5)$$

$$k_1 = -k_o(X_0 - \alpha C_0) \quad (6)$$

Table 2. Parameters (a , b , k_b) at 5, 15, 25°C and at 1, 2, 4, 6 mg/L initial free chlorine concentration

Temp. (°C)	IC (mg/L)	a	b	k_b (min ⁻¹)	k_b (hr ⁻¹)	k_b (day ⁻¹)	R ²
5	1	0,07929	0,90097	0,27579	16,5474	397,1376	0,94284
	2	0,15568	1,39065	0,04191	2,5146	60,3504	0,87183
	4	0,68426	2,35978	0,00789	0,4734	11,3616	0,89213
	6	1,69329	3,15001	0,00238	0,1428	3,4272	0,92331
15	1	0,03512	0,95197	0,35591	21,3546	512,5104	0,96562
	2	0,11343	1,50718	0,06747	4,0482	97,1568	0,87662
	4	0,44163	2,6105	0,01332	0,7992	19,1808	0,89481
	6	1,31203	3,1904	0,0031	0,186	4,464	0,88324
25	1	0,02735	0,9684	0,45339	27,2034	652,8816	0,98821
	2	0,08468	1,55446	0,08223	4,9338	118,4112	0,8739
	4	0,31428	2,79353	0,02072	1,2432	29,8368	0,90388
	6	0,93116	3,54037	0,00459	0,2754	6,6096	0,89196

여기서 1차 반응속도상수 k_1 은 식 (6)에 표현한 것과 같이 실제로는 초기염소농도 C_0 의 함수가 되며 다른 반응물질의 농도 X_0 는 변하지 않는 조건에서 초기염소농도가 감소하게 되면 k_1 은 증가하게 된다. 이것이 잔류염소감소반응을 1차 감소모델로 표현할 때 초기염소농도 증가에 따라 염소감소 계수가 감소하는 경향을 보이는 이유이다.¹⁴⁾ 즉, 이번 연구실험을 통해 얻어진 수체감소계수 또는 관벽감소계수는 1차반응속도상수로 초기염소농도의 함수이며 초기염소농도가 증가할수록 잔류염소감소계수는 감소하게 되는 것이다.

Table 2는 본 연구에서 수행한 하수재이용수의 온도별(5, 15, 25°C) 및 초기 주입농도별(1, 2, 4, 6 mg/L) 조건에 따른 exponential first-order decay model의 파라미터 a , b , k_b 에 대한 결과를 정리한 것이다. 모든 실험에서 시간에 따른 잔류염소농도 모델의 결정계수는 0.872~0.988을 나타내어 본 모델이 잔류염소농도 예측에 적합할 것으로 판단된다.

3.3. 최적 염소주입량 산정

초기염소농도 조건에 대한 각각의 결과 그래프는 Fig. 5에 나타내었다. 하수재이용수 A의 결과그래프에서 IC 4 mg/L, IC 6 mg/L 경우에는 결정계수(R²)가 0.787~0.882로 비교적 낮게 나타났다. 이를 보완하기 위해 time interval을 빠른 염소 감소반응이 일어나는 short term과 비교적 느린 염소 감소반응이 일어나는 long term으로 나누어 exponential first-order decay function을 fitting하였다. 전체 84시간을 0~30분과 30~5,040분의 두 시간대로 나누어 시간이 흐름에 따른 잔류염소농도를 plot하고 exponential first-order decay function을 fitting한 그래프가 Fig. 6(a), (b)이다. 0~30분 및 30~5,040분 결과의 exponential first-order decay function이 good fit을 제공한다.

수체감소계수 산정 실험을 통해 얻어진 수온별, 초기염소농도별, 시간에 따른 잔류염소농도 데이터를 이용하여 잔류염소 적정수준 유지를 위한 최적 염소주입요구량(optimal chlorine demand)을 산정하였다.⁴¹⁾ 본 연구에서는 하수처리수 재이용시설에서 최종 처리 후 공급을 위해 관망에 유입되

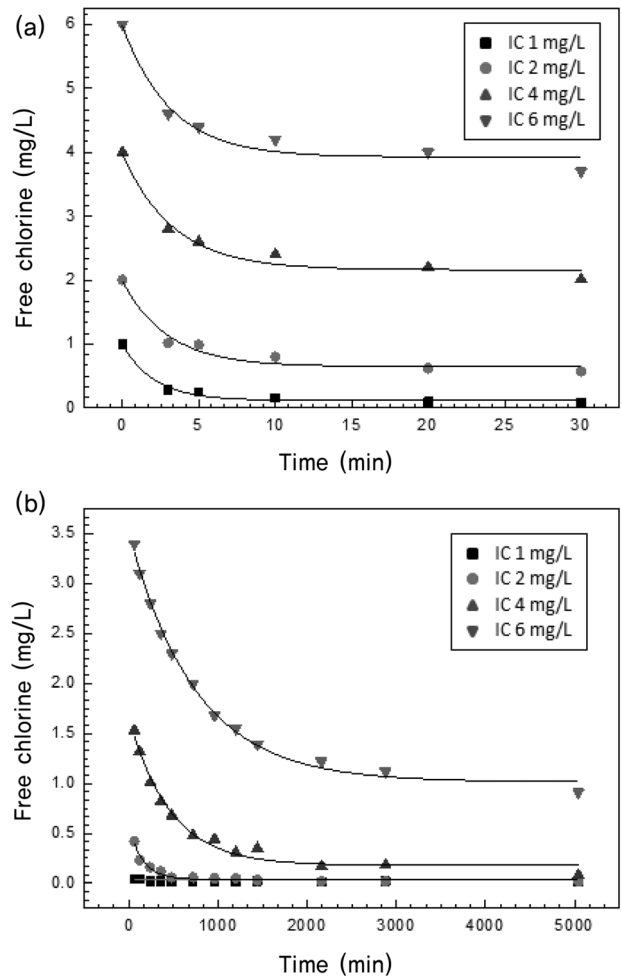


Fig. 6. Residual free chlorine concentration at different time interval; (a) short term 0~30 min, (b) long term 30~5,040 min.

기 전에 유리잔류염소농도 기준으로 0.2 mg/L를 보유하기 위해서 필요한 염소주입량을 산정하였다. 하수처리수 재이용 시설에서 처리수가 공급관망에 유입되기 전 저류시간(체류 시간)을 4시간이라고 가정하였다.

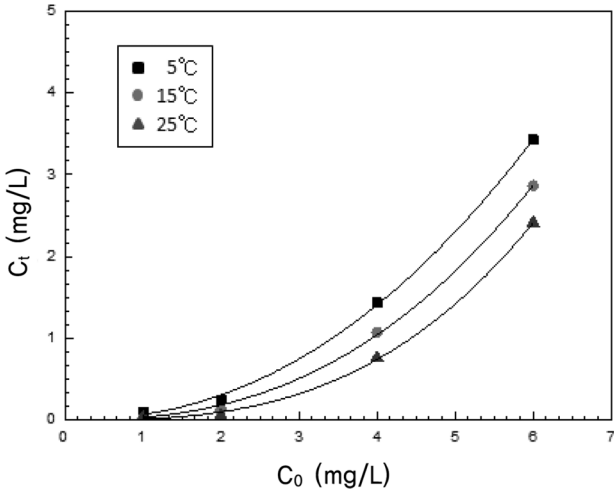


Fig. 7. Relationship between initial chlorine (C_0) and residual free chlorine (C_i) at the point of final pumping in reclaimed water treatment plant.

Table 3. Regression equation and chlorine demand for 0.2 mg/L at 5, 15, 25°C

Temp. (°C)	Regression equation	Chlorine demand (mg/L)
5	$C_{i,4hr} = 0.067C_0^{2.20}$	1.64
15	$C_{i,4hr} = 0.033C_0^{2.49}$	2.06
25	$C_{i,4hr} = 0.013C_0^{2.90}$	2.54

Fig. 6(b) long term (30~5,040분)의 염소감소계수 산정 결과를 통해 얻어진 식을 이용하여 각 수온별, 초기염소농도별 염소 주입 4시간 후의 유리잔류염소농도를 계산한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 초기염소농도(C_0)와 잔류염소농도(C_i) 간의 관계를 나타내기 위해 멱함수(power function)가 적용한 결과 공급시점에서 잔류염소를 0.2 mg/L로 유지하기 위해서는 초기 염소농도를 5, 15, 25°C에서 각각 1.64, 2.06 및 2.54 mg/L로 주입해야 한다. 또한, 이렇게 계산된 데이터를 회귀 분석을 통해 수온별 초기염소농도와 4시간 후의 잔류염소농도간의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 이를 통하여 4시간이

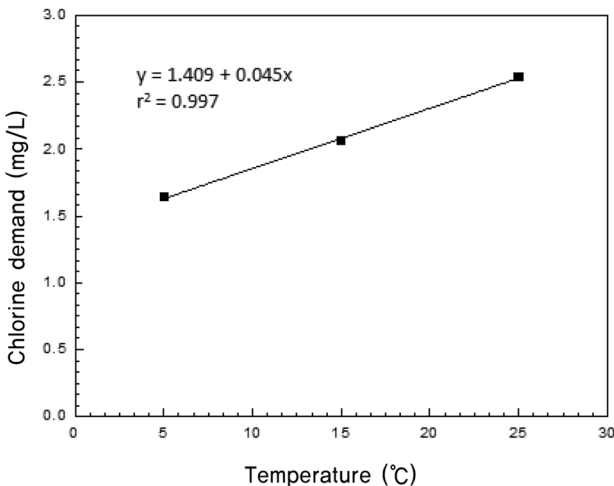


Fig. 8. Optimal chlorine demand by water temperature.

경과한 시점에서 유리잔류염소 0.2 mg/L를 유지하기 위해서는 온도(x)별 초기 염소요구량(y)의 관계를 $y = 1.409 + 0.450x$ 와 같이 얻을 수 있었다.

4. 결론

기후변화 및 물사용량 증가로 인해 대체수자원 개발에 대한 중요성이 커지고 있다. 그 중 하수재이용수는 안정적 및 경제적으로 용수를 공급할 수 있는 방안으로 관심이 더욱 커지고 있다. 본 연구에서는 하수재이용수의 공급시 유리잔류염소의 수체감소 특성을 온도별 및 초기 주입농도별로 조건을 변화하며 실험하였고 그 결과를 토대로 최적 염소주입량을 산정하는 방법에 대하여 연구하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 하수재이용수는 정수와 비교하여 염소주입시 반응속도가 매우 빠르게 나타나 기존의 $C_i = C_0(e^{-k_b t})$ 을 사용할 수 없었다. 이에 exponential first-order decay model ($C_i = a + b(e^{-k_b t})$)을 적용한 결과 유리잔류염소의 감소를 더욱 정확하게 예측할 수 있었다($R^2 = 0.872 \sim 0.988$).

2) 수체감소계수는 25°C, 초기주입량 1 mg/L의 조건에서 653 day^{-1} 로 가장 크게 나타났고 5°C, 초기주입량 6 mg/L의 조건에서 3.42 day^{-1} 로 가장 낮았다. 온도가 증가함에 따라 수체감소계수는 증가하는 경향을 나타내었고, 초기주입농도가 증가함에 따라 수체감소계수는 감소하는 경향을 나타내었다.

3) 잔류염소감소 실험은 Arrhenius식을 이용하여 실험의 정확성을 검증할 수 있는데 본 실험에서 $\ln(k_b)$ 와 $1,000/T$ 의 상관관계(R^2)가 0.99를 나타내어 실험결과가 정확했음을 증명할 수 있었다.

4) 적정 유리잔류염소를 산정하기 위해서 전체 반응기간을 0~30분, 30~5,040분으로 구분한 후 30~5,040분의 실험결과를 사용하여 예측식을 사용함으로써 더욱 정확한 염소주입량 산정을 할 수 있었다. 또한, 온도별로 초기 염소요구량을 산정한 결과 온도별(x) 초기 염소요구량(y)의 관계를 $y = 1.4089 + 0.4499x$ 와 같이 얻을 수 있었다.

사 사

본 과제는 한국건설기술연구원의 주요사업 중 마이크로 용수공급 기술 개발(2013-0014-1-1)과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

- Kim, I. S. and Oh, B. S., "Technologies of seawater desalination and wastewater reuse for solving water shortage," J.

- Kor. Soc. Environ. Eng.*, **30**(12), 1197~1202(2008).
2. Ministry of Environment, "Master plan of water reuse"(2011).
 3. Jjemba, P. K., Weinrich, L., Cheng, W., Giraldo, E. and LeChevallier, M. W., "Guidance document on the microbiological quality and biostability of reclaimed water following storage and distribuion (WRF-05-002)," Watereuse foundation (2010).
 4. Ryu, H., Alum, A. and Abbazadegan, M., "Microbial characterization and population changes in nonpotable reclaimed water distribution system," *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 8600~8605(2005).
 5. Vasconcelos, J. J., Rossman, L. A., Grayman, W. M., Boulos, P. F., Clark R. M., "Kinetics of chlorine decay," *J. Am. Water Works Assoc.*, **89**, 54~65(1997).
 6. Kim, D. H., Lee, D. J., Kim, K. P., Bae, C. H. and Joo, H. E., "Computing the dosage and analysing the effect of optimal rechlorination for adequate residual chlorine in water distribution system," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **32**(10), 916~927.
 7. Yoo, H. J., Kim, J. W., Jeong, H. J. and Lee, H. K., "Chlorine residual prediction in drinking water distribution system using EPANET," *Kor. J. Environ. Health*, **29**(1), 8~15 (2003)
 8. Haddix, P. L., Shaw, N. J. and LeChevallier, M. W., "Characterization of bioluminescent derivatives of assimilable organic carbon test bacteria," *Appl. Environ. Microbiol.*, **70**, 850~854(2004).
 9. Weinrich, L. A., Giraldo, E. and LeChevallier, M. W., "Development and application of a bioluminescent AOC test in reclaimed water," *Appl. Environ. Microbiol.*, **75**, 7385~7390 (2009).
 10. Weinrich, L. A., Jjemba, P. K., Giraldo, E. and LeChevallier, M. W., "Implication of organic carbon in the deterioration of eater quality in reclaimed water distribution systems," *Water Res.*, **44**, 5367~5375(2010).
 11. Norton, C. D., LeChevallier, M. W. and Falkinham, J. O., "Survival of *Mycobacterium avium* in a model distribution system," *Water Res.*, **38**, 1457~1466(2004).
 12. Warton, B., Heitz, A., Joll, C. and Kagi, R., "A new method for calculation of the chlorine demand of natural and treated waters," *Water Res.*, **40**, 2877~2884(2006).
 13. Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F., Powell, J. C. and Spencer, I., "The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems," *Water Res.*, **36**(14), 3479~3488(2002).
 14. Hua, F., West, J. R., Barker, R. A. and Forster, C. F., "Modelling of chlorine decay in municipal water supplies," *Water Res.*, **33**(12), 2735~2746(1999).