

온도 변화에 따른 수돗물 저장 저수조 내 잔류염소에 관한 수학적 모형 시뮬레이션

노유래 · 박준홍[†]

연세대학교 토목환경공학과

Mathematical Model Simulations Assessing the Effects of Temperature on Residual Chlorine Concentrations in Water Storage Tanks

Yoorae Noh · Joonhong Park[†]

Department of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University
(Received 1 February 2017, Revised 6 March 2017, Accepted 20 March 2017)

Abstract

To ensure hygienic safety of drinking water in a water storage tank, the concentrations of residual chlorine should be above a certain regulation level. In this study, we conducted model simulations to investigate the effects of temperature on residual chlorine in water storage tank conditions typically used in Seoul. For this, values of model parameters (decomposition rate constant, sorption coefficient, and evaporation mass transfer coefficient) were experimentally determined from laboratory experiments. The model simulations under continuous flow conditions showed that the residual chlorine concentrations were satisfied the water quality standard level (0.1 mg/L) at all the temperature conditions (5°C, 10°C, 15°C, 20°C and 25°C). Meanwhile, when the tanks had a no flow condition (i.e., no tap-water influent due to a sudden shut-down), the concentrations became lower than the regulatory level after certain periods. The findings from this modeling works simulating Seoul's water storage tanks suggested disappearance rate of residual chlorine could be reduced through the tanks design optimization with maintenance of low water temperature, minimization of air flow and volume, suppression of dispersion and the use of wall materials with low sorption ability.

Key words : Bulk decomposition, Evaporation, Residual chlorine, Sorption, Temperature, Water storage tank

1. Introduction

시민들의 건강과 위생적인 삶을 도모하기 위해 안전한 음용수 확보는 필수적인 요소이다. 상수원 지역의 원수 내에 존재하는 유해 세균 및 여러 오염물들을 제거 및 살균하고 배수계통을 통한 안전한 급수공급을 위해 정수처리시설에서는 소독처리를 실시한다. 국내에서는 기본적으로 수계 내 미생물 사멸 효과가 있는 염소를 주입하고 있으며, 수돗물까지 잔류염소의 지속적인 잔류가 요구되고 있다(MOE, 2010). 「먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙」 제4조에 따르면 국내 잔류염소의 기준은 0.1~4.0 mg/L이며 수인성질병 감염위험성이 높을 경우 혹은 단수 이후 재급수시에는 0.4 mg/L 이상을 권고하고 있다(MOE, 2009). 정수처리시설에서 정수공정을 거치고 난 물은 시민들이 음

용하는 수돗물로 오기까지 여러 급수시스템을 지나는데 이 과정에서 상당량의 잔류염소가 소실되며(Kiene and Levi, 1993; Vasconcelos et al., 1997; Zhang et al., 1992), 정수지에서부터 급수과정을 거쳐 수도꼭지로 오기까지 급수배관과 저수조 등을 통해 약 30-60%의 잔류염소가 감소되는 것을 볼 수 있다(Noh et al., 2016). 서울시 상수도사업본부의 조사에 따르면 특히 여름철에 잔류염소 분해 속도가 다소 증가하는 것을 보이며, 최근에는 정수처리과정에서 10년 전 대비 염소 투입량을 약 절반가량 감소하는 경향을 보였다(The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2015a, 2015b).

수도공급시 저수조를 거치는 급수 방식의 경우 최종 수도꼭지 내 잔류염소 농도가 기준치(0.1mg/L)보다 낮아질 개연성이 높다는 연구결과(Jun, 2015; Kennedy et al., 1993; K-water, 1999; Kwak et al., 2005)가 존재하지만 국내 「주택건설기준 등에 관한 규정」에 따르면 일정 규모 이상의 건물 혹은 공동주택 단지에는 비상용수를 보관할 수 있는 저수조 설치가 의무화되어 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 서울특별시에서 저수조를 지나는 급수방법을 사용하는 수도꼭지수 내 평균 잔류염소

[†] To whom correspondence should be addressed.
parkj@yonsei.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

농도는 직결급수의 경우보다 전반적으로 낮았으나 직결 급수의 일부 수도꼭지수에서만 잔류염소 하한 기준치보다 낮은 경우가 존재하였다(The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government, 2016). 이는 급수공급과정에 저수조가 존재할 경우, 소비자에게 최종 공급하기 이전에 위급시 위생처리를 추가적으로 진행할 수 있어 보다 안전한 음용수를 제공할 수 있기 때문이라고 판단된다. 최근에는 국내 대도시를 기점으로 직결 급수방식 도입을 고려하고 있고 일부에서는 시범사업을 운영(Seoul Solution, 2016)하는 등 급수체계가 변화되고 있다. 하지만, 완벽한 직결급수체계가 도입되더라도 긴급상황을 대비하여 저장용수를 담아야 하는 저수조 설치의 불가피하다. 따라서 수도공급의 마지막 저장시설인 저수조 내 수돗물 위생관리는 계속적으로 이루어져야 하며, 저수조 내 잔류염소 유지를 위한 체계적인 연구 역시 필요하다.

저수조 내 잔류염소가 감소함에 따라 수돗물 공급의 안전성에 대한 우려가 존재해왔으나, 기존의 저수조 설계는 단순히 용량과 체류시간만을 고려하고 있다. 이러한 문제를 방지하기 위해서는 저수조 내 잔류염소 농도 감소에 관여하는 기작들의 정량적 영향에 대한 정보와 지식이 필요하다. 저수조 내 잔류염소 감소에 관여하는 주요 기작은 (i) 수체 내 분해 반응(Bulk decomposition), (ii) 증발(탈기) 반응(Evaporation), 그리고 (iii) 벽체 흡착 반응(Sorption)으로 구분될 수 있다.

일반적으로 저수조는 설치 위치에 따라 지상, 지하 저수조, 고가수조, 중간수조 및 기타수조(부저수조, 압력수조 등)로 구분이 되며, 건물 위에 존재하는 지상 저수조 혹은 고가수조는 계절별로 바깥 온도에 따라 직접적인 영향을 받기 때문에 온도에 따른 잔류염소 분해 정도가 크게 변화될 것으로 파악된다. 이는 지상 저수조만이 아니라 옥내에 위치한 지하 저수조에서 겨울과 여름철에 진행된 현장조사에서도 평균 수질 온도는 각각 4~10°C (유입수 평균 수온: 6.5°C, 유출수 평균 수온: 5.8°C), 20~26°C (유입수 평균 수온: 22.2°C, 유출수 평균 수온: 22.7°C) 사이로 계절에 따른 수온이 달라지므로(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 2004) 저수조 내 온도의 영향은 매우 중요할 것이라 판단이 된다. 하지만, 현재까지도 다양한 온도 변화에 따른 저수조 내 잔류염소 분해/감소에 관한 연구는 미비한 상태이다. 잔류염소의 수체 내 분해는 산화-환원반응에 의해 진행되기 때문에 온도가 반응속도에 영향을 주며 분해 계수는 아레니우스(Arrhenius)식을 통해 온도 보정이 가능하다(Coulson and Richardsom, 1964; Powell et al., 2000). 호소이 요시히코(細井由彦)는 잔류염소 분해속도계수가 수중의 유기물질의 양과 상관성이 있다고 판단하여 유기물질 산화에 요구되는 과망간산칼륨 소비량(consumed $KMnO_4$)과 온도와의 함수로 일본 상황에 맞는 분해속도계수 산정식을 제시하였으나, 국내 배수지 조건의 연구에 따르면 $KMnO_4$ 소비량은 잔류염소 분해계수 값에 낮은 영향을 미치며 저온에서는 영향력이 거의 없는 것으로 연구되었다(Chung et al., 2004). 따라서 여러 온도상

의 국내 상수 조건에서 잔류염소 감소의 체계적인 검증 연구가 필요하다.

잔류염소 감소에 관한 수체 내 분해와 흡착 반응의 연구들은 국내에서 일부 조사 및 연구된 바가 있으나 대부분 급수배관 혹은 배수지에 국한되어 있다(Chung et al., 2004; Kim et al., 2010; KISTEC, 2015; K-water, 1999). 저수조 내의 증발(탈기) 반응에 대해서는 국내외 관련 연구가 전무하므로 이에 대한 연구가 필요한 상황이다. 벽체 흡착 반응 역시 국내외 모두 급수배관을 위주로 연구가 진행되었으며, 재질의 종류는 닥타일주철관, Polyvinyl Chloride (PVC) 등이 존재한다. 하지만 저수조의 벽체 표면은 주로 콘크리트, Sheet Molding Compound (SMC), Stainless Steel (STS) 등의 재질로 이루어져 있기 때문에 해당 재질들에 대한 실험적인 연구평가가 이루어져야 한다고 생각된다. 본 연구진은 이러한 기작들을 이론적으로 적절하게 설명할 수 있는 수학적 공식들을 문헌에서 선별하였으며 문헌조사로 획득된 기작별 계수 값들을 이용한 시뮬레이션으로 잔류염소 감소 최소화방안을 모색해보았다(Noh et al., 2016). 하지만 국내 실정에 맞는 저수조 설계기법 및 지침 제시를 위해서는 국내 수돗물 조건과 저수조 조건에서의 관련 계수들을 실험적으로 측정하는 것이 필요하다. 또한 이런 실험기반의 계수 값들을 이용하여 실제 저수조 내에서 잔류염소가 어떠한 감소 형태를 보이는지를 살펴보는 수학적 모형 시뮬레이션 연구는 국내 저수조 조건에서 다양한 온도에 따른 잔류염소에 대한 평가를 체계적으로 하는 방법으로 사용될 수 있다. 하지만 이러한 연구는 아직 시도된 바가 없다.

본 연구에서는 서울시의 대표적인 저수조 조건에서 잔류염소 농도가 감소하는데 기여하는 기작들(수체 내 분해반응, 증발(탈기)반응, 벽체 흡착반응)의 계수 값들을 국내 수돗물 조건에서 실험적으로 결정하였고, 이를 이용해서 다양한 온도에 따른 저수조 조건에서의 잔류염소 감소 거동을 수학적 모형 시뮬레이션으로 살펴보았다. 이 시뮬레이션에서는 자연재난 등의 위급 상황에서의 단수 조건과 일반적인 무단수 조건을 모사하는 계산을 각각 수행하고 비교하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 잔류염소 감소 기작별(수체 내 분해, 증발(탈기), 흡착) 반응 실험

저수조 내 잔류염소 감소에 미치는 영향을 알아보기 위하여 반응 기작별 잔류염소 감소정도를 정량적으로 측정하고 반응계수 값을 산정하였다. 이때 본 실험에서는 서울시 S지역의 수돗물(pH: 6.9~7.5, 잔류염소: 0.15~0.22 mg/L, COD: 0.7~2.3 mg/L)을 이용하였으며 수체 내 잔류염소 측정용 Chemets Kit Chlorine K-2502 (CHEMetrics Inc., Calverton, Virginia) (Vilaseca et al., 2010)를 이용하였다. 초기 잔류염소를 모두 1.0mg/L로 맞추기 위하여 식 (1)에 따라 차아염소산나트륨($NaOCl$, 12%)을 주입하여 10분간 용해를 시킨 후, 잔류염소 경향을 측정하였다(MOE, 2010).

$$V = Q \times R \times \frac{100}{c} \times \frac{1}{d} \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

- V: 차아염소산나트륨의 주입량(L)
- Q: 유효부피(m^3)
- R: 잔류염소농도(mg/L)
- c: 차아염소산나트륨의 유효염소 농도(%)
- d: 차아염소산나트륨의 밀도(kg/L)

본 연구의 실험은 회분식 반응조 방식(batch reactor system)으로 진행되었으며, 시간별로 잔류염소 농도를 측정하였다. 또한, 온도에 따른 잔류염소 반응을 도출하기 위해 여름철과 겨울철의 저수조 내 수온을 고려하여 인큐베이터 온도를 25°C, 5°C로 설정하였다. 이 때, 반응조 내 초기 수온은 각각 23°C와 6°C로 측정되었다. 실험의 오차를 최소화하기 위하여 실험 기기 및 반응조는 증류수로 세척한 후, 105°C에서 건조 및 멸균한 후 이용하였다(Kim et al., 2010).

수체 내 분해 반응, 증발(탈기) 반응, 벽체 흡착 반응의 영향을 각각 살펴보기 위하여 Fig. 1과 같은 세 개의 반응조를 운영하였다. 수체 내 분해 반응만을 관찰하기 위하여 증발을 억제하고 벽체 흡착이 거의 없는 serum bottle (160 mL)을 이용한 실험을 수행하였다(a). 개방형 플라스크에서 교반으로 공기-물 물질이동이 큰 조건에서 수체 내 분해 반응과 탈기 반응의 복합 현상을 관찰하였다(b). 실험(c)는 반응조(b)와 동일한 조건에서 추가적으로 저수조에 사용되는 벽체 소재를 포함하여 재질의 변화에 따른 현상을 살펴 보았다. 본 연구에서는 Stainless Steel (STS; 1.5 cm × 0.2 cm × 10 cm * 5), Sheet Molding Compound (SMC; 1.3 cm × 1 cm × 7.1 cm * 5)와 Poly Ethylene (PE; 1.5 cm × 0.2 cm × 10 cm * 5) 재질을 가지고 실험을 진행하였고 해당 결과들을 통해 기작별 반응계수 값을 구할 수 있었다.

각각의 반응에서의 수체 내 분해계수(K_{Bulk}), 증발(탈기)계수(K_{aw}), 벽체 흡착계수(K_{wall}) 값을 산정하기 위해 저수조 내에서의 다음의 세가지 수학적 반응식을 사용하였다.

수체 내 분해: $C = C_0 e^{-K_{Bulk}t} \quad (2)$

- K_{Bulk} : 수체 내 분해계수(1/day)
- C: 수체 내 잔류염소농도(mg/L)
- C_0 : 초기 잔류염소농도(mg/L)
- t: 반응 시간(day)

증발(탈기): $C = C_0 e^{-\left(\frac{A}{V}\right)K_{aw}t} \quad (3)$

- K_{aw} : 증발(탈기)계수(m/day)
- A: 공기-물 사이의 표면적(m^2)
- V: 수조 단위 부피(m^3)
- t: 반응 시간(day)

벽체 흡착: $C = C_0 e^{-\left(\frac{S}{V}\right)K_{wall}t} \quad (4)$

- K_{wall} : 벽체 흡착계수(m/day)
- S: 수조 벽체 표면적(m^2)
- V: 수조 단위 부피(m^3)
- t: 반응 시간(day)

2.2. 증발(탈기) 계수 값 산정식 도출

증발(탈기) 계수(K_{aw})의 경우 잔류염소의 증발에 의한 물질전달 확산유량 공식에 픽의 법칙(Fick's first law)과 헨리 법칙(Henry's law)을 적용하여 산정하였다(식 (5)).

$$K_{aw} = \frac{1}{\frac{1}{K_{water}} + \frac{RT}{K_{air} K_H}} \quad (5)$$

- K_{aw} : 증발(탈기)계수(m/day)
- K_{water} : 물-정체된 경계층 사이의 물질전달 계수(m/day)
- K_{air} : 공기-정체된 경계층 사이의 물질전달 계수(m/day)
- R: 이상기체상수($m^3 atm/mol \cdot K$)
- T: 절대온도(°K)

여기서 K_{water} 과 K_{air} 는 실질적인 값을 구하기 힘들기 때문에 자연환경 상태에서의 K_{water} , K_{air} 를 유도한 식(Nazaroff and Alvarez-Cohen, 2001; Schwarzenbach et al., 1993)을 K_{aw} 에 접목시켰다.

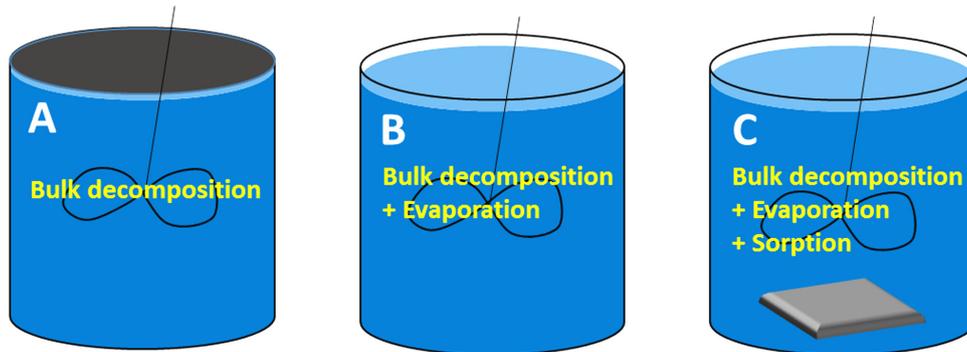


Fig. 1. Residual chlorine testing reactors used in this study. The residual chlorine was decayed by bulk decomposition (A), bulk decomposition and evaporation (B) and sorption added with (B) reaction (C).

$$K_{air} = \left[\frac{D_a}{D_{a_water}} \right]^{\frac{2}{3}} (7U_a + 11) \quad (6)$$

D_a : 공기에서의 염소 확산율(m^2day^{-1})
 D_{a_water} : 공기에서의 물(H_2O) 확산율(m^2day^{-1})
 U_a : 수위 표면에서 10 m 떨어진 곳에서의 평균 풍속(m/day)

느린 유속 유체 물질전달 계수:

$$K_{water} = \left[\frac{D_w}{D_{w_oxygen}} \right]^{0.57} (0.0014U_w^2 + 0.014) \quad (7)$$

빠른 유속 유체 물질전달 계수:

$$K_{water} = 0.18 \left[\frac{D_w}{D_{w_oxygen}} \right]^{0.57} \left(\frac{U_w}{d_w} \right) \quad (8)$$

D_w : 물에서의 염소 확산율(m^2day^{-1})
 D_{w_oxygen} : 물에서의 산소(O_2) 확산율(m^2day^{-1})
 U_w : 유체 평균 흐름 속력(m/day)
 d_w : 흐름의 깊이(m)

위의 수식들을 사용하여 저수조 내 공기의 흐름이 존재하는 일반적인 경우와 흐름이 존재하지 않아 공기층에 잔류염소가 포화되는 경우, 수돗물 유입 혹은 이동이 잔잔한 흐름으로 진행되어 분산효과(dispersion)가 적은 경우와 물의 흐름이 난류 상태로 진행되어 dispersion이 큰 경우를 비교함으로써 수체와 공기의 흐름 종류에 따른 비난류/난류와 공기층 개폐 상태의 탈기계수인 K_{aw} 를 각각 산정할 수 있다. 온도에 따른 보정을 위해서 공기 중 확산계수는

EPA에서 지점별 평가방법으로 제시된 Fuller, Schettler and Giddings(FSG) 방법(Lyman et al., 1990)을 사용하였으며, 수식에 필요한 이외의 계수 및 상수들은 Table 1에 나타냈다.

2.3. 저수조 시뮬레이션

기작별 도출된 계수 값을 이용하여 저수조에서의 잔류염소 거동 시뮬레이션을 시행하였다. 서울시 대형 저수조를 기준으로 저수조 용량을 1280ton으로 가정하고 각각 높이(H; height): 5m, 폭(W; width): 16m, 길이(L; length): 16m로 설정하였다. 시뮬레이션 연구에서 저수조 내에 수돗물 유출입이 존재하는 일반적인 경우는 연속교반탱크반응기(CSTR; Continuous Stirred Tank Reactor)로 간주하였고, 화재 및 지진 등의 자연재해로 인한 단수 상태는 회분식반응기(Batch Reactor)로 가정을 하고 진행하였다.

보다 정확한 저수조 내의 잔류염소 감소를 파악하기 위해 수체 내의 반응과 저수조에 존재하는 기체 내 잔류염소와의 관계를 살펴보았다. 이 때, 회분식 반응기에서 유도된 잔류염소 반응은 식 (9)와 같다.

$$\begin{cases} \frac{\partial(CV)}{\partial t} = R_{total} V \\ \frac{\partial(C_a V_a)}{\partial t} = Q_a C_{a-in} - Q_a C_a(t) - R_{aw} V \end{cases} \quad (9)$$

R_{total} : 잔류염소 전체 반응
 R_{aw} : 잔류염소 증발(탈기) 반응
 C_a : 기체 내 잔류염소 농도(mg/L)
 V : 수체 부피(m^3)
 V_a : 저수조 내 기체 부피(m^3)
 Q_a : 기체 유출입 유량(m^3/day)
 C_{a-in} : 기체 내 초기 잔류염소 농도(mg/L)

Table 1. Physico-chemical parameters used in measurement of mass transfer coefficients

Factor	Units	Constant					Ref.
		Temperature (°C)					
		5	10	15	20	25	
Diffusivity of water in air (Da_water)	m^2/day	1.960	2.029	2.098	2.167	2.236	Bretznajder (1971); McCabe et al. (1993); Cussler (1984); Reid et al. (1987)
Diffusivity of oxygen in water (Dw_oxygen)	m^2/day	7.382×10^{-5}	1.044×10^{-4}	1.349×10^{-4}	1.654×10^{-4}	1.960×10^{-4}	Richard (1996)
Diffusivity of chlorine in water (Dw)	m^2/day	2.074×10^{-5}	4.234×10^{-5}	6.394×10^{-5}	8.554×10^{-5}	1.071×10^{-4}	Tang and Sandall (1985)
Molar volume of chlorine (0°C, M)	cm^3/mol	2.241×10^{-1}					De Podesta (2002)
Molar mass of dry air (Ma)	g/mol	2.896×10^1					Shelquist (2009)
Molar mass of chlorine (Mc)	g/mol	7.091×10^1					Nist (2015)
Henry's constant (Kh)	$m^3 atm/mol$	5.984×10^{-3}	7.015×10^{-3}	8.177×10^{-3}	9.483×10^{-3}	1.094×10^{-2}	Wilhelm et al. (1977)
Ideal gas constant (R)	$m^3 atm/mol \cdot K$	8.210×10^{-5}					Nist (2015)

여기서 전체 반응 R_{total} 는 다음과 같다.

$$R_{total}(C) = R_{Bulk}(C) + R_{wall}(C) + R_{aw}(C) \quad (10)$$

$$= -V \cdot K_{Bulk} C(t) - S \cdot K_{wall} C(t) - A \cdot K_{aw} (C(t) - C_a(t))$$

- K_{Bulk} : 수체 내 분해계수(1/day)
- C : 수체 내 잔류염소 농도(mg/L)
- K_{wall} : 벽체 흡착계수(m/day)
- S : 수조 벽체 표면적(m^2)
- K_{aw} : 증발(탈기)계수(m/day)
- A : 공기-물 사이의 표면적(m^2)

수돗물의 유입, 유출이 존재하는 연속교반탱크반응기 내에서의 잔류염소 반응은 다음의 식을 통해 산정할 수 있으며, R_{total} 은 식 (10)과 동일하다. 시뮬레이션은 Matlab R2015b 를 이용하여 구현하였다.

$$\begin{cases} \frac{\partial(CV)}{\partial t} = Q C_{in} - Q C(t) + R_{total} V \\ \frac{\partial(C_a V_a)}{\partial t} = Q_a C_{a-in} - Q_a C_a(t) - R_{aw} V \end{cases} \quad (11)$$

- R_{total} : 잔류염소 전체 반응
- R_{aw} : 잔류염소 증발(탈기) 반응
- C : 수체 내 잔류염소 농도(mg/L)
- V : 수체 부피(m^3)
- V_a : 저수조 내 기체 부피(m^3)
- Q : 수체 유출입 유량(m^3/day)
- Q_a : 기체 유출입 유량(m^3/day)
- C_{in} : 수체 내 초기 잔류염소 농도(mg/L)

3. Results and Discussion

3.1. 감소 기작별(수체 내 분해, 증발(탈기), 흡착) 잔류염소 거동

수체 내 분해 반응에서는 온도 25°C의 경우 분해 반응이 시작된 후, 수체 내 잔류염소 농도가 0.1mg/L이 될 때까지 지수곡선을 그리며 감소하는 패턴을 보였으며 총 170시간이 소요되었다(Fig. 2, 25°C, negative control (closed)). 반면, 온도가 5°C일 경우, 초기 20시간까지는 25°C 실험에서와 유사한 농도 감소패턴을 보였으나, 20시간 이후에는 감소 속도가 급격히 저감하여 약 50시간 이후에는 잔류염소 농도가 0.7 mg/L로 유지됨을 보였다(Fig. 2, 5°C, negative control (closed)).

증발(탈기) 반응으로 인한 잔류염소 감소는 대조군(negative control (closed)) 대비 수체 내 분해반응 시스템에서 증발 반응만 추가적으로 일어난 결과(negative control (open))로 살펴보았다. 25°C에서는 반응시간이 지남에 따라 계속해서 잔류염소 농도가 감소되며, 수체 분해 반응만이 존재하는 시료와 증발 반응까지 동시에 일어나는 시료 사이의 농도 격차가 점차 커짐을 볼 수 있었다. 반면에 5°C에서는 반응시간 10시간 근처에서 증발효과로 인한 급격한 농도감

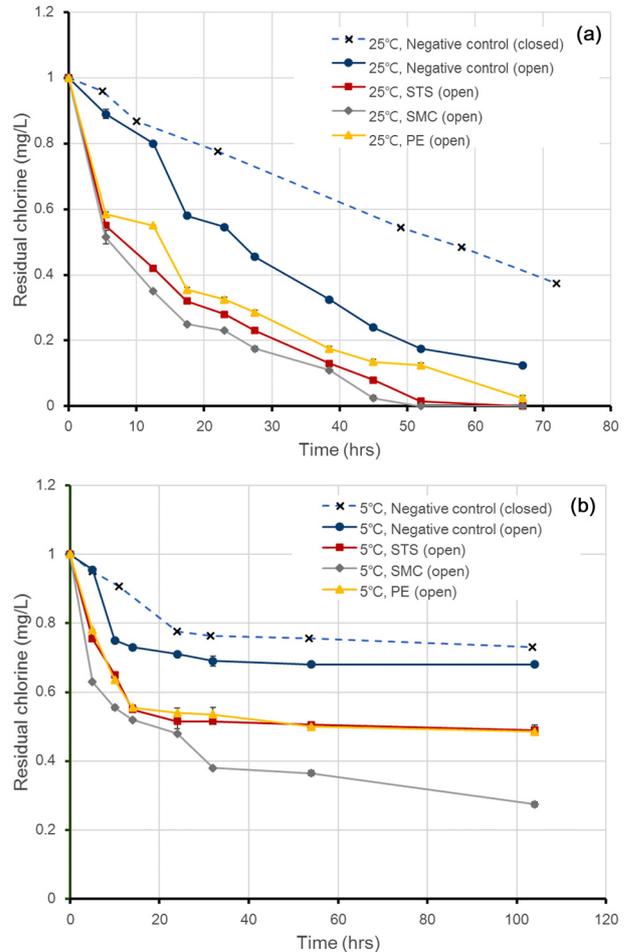


Fig. 2. Residual chlorine concentration with temperature 25°C (A), and 5°C (B).

소를 보였으나 30시간 이후에는 잔류염소 농도가 0.68mg/L 정도로 일정하게 유지됨을 볼 수 있었다.

온도 5°C와 25°C에서 시간에 따른 재질별 흡착에 의한 잔류염소 감소 변화(STS(open), SMC (open), PE (open))는 수체 내 분해반응과 증발반응이 동시에 진행되는 negative control (open) 시료와 동일한 환경으로 진행되었다. 실험 결과, 특정 재료를 투여했을 경우가 negative control (open)에 비해 반응 초기시간(20시간) 동안에 상대적으로 급격한 잔류염소 농도의 감소량을 보였다. 이 현상은 온도가 높았을 때 감소 속도가 훨씬 빠른 경향을 보였다. 겨울철 수온일 경우에 SMC를 제외하고는 초기 25시간 반응 후 잔류염소 농도가 0.5mg/L로 유지되었으며, SMC 재질의 경우 시간에 따라 지속적으로 감소되는 것을 볼 수 있었다. 20시간 가량의 반응시간 이후, PE와 STS 재질은 SMC 재질에 비해 잔류염소 감소량이 약 2% 정도 적은 것을 확인하였으나 55시간의 반응시간 이후에는 13.5% 정도의 차이가 남을 확인할 수 있었다. 여름철 수온일 경우에는 잔류염소 농도가 0mg/L가 될 때까지 감소하는 경향을 보였으며, 세 가지 재료 모두에서 대체적으로 68~70시간 반응을 하였을 때 잔류염소가 모두 소멸됨을 보였다. 25°C에서 각각의 재질의 잔류염소 흡착능은 SMC, STS, PE 순으로 높았으며, SMC

재질이 포함된 반응조 내 잔류염소의 감소율이 STS와 PE 보다 약 7~10.5% 가량 높았다. 위 재질 실험을 통해 높은 온도에서는 PE 재질을 사용하였을 때, 잔류염소 감소율이 가장 적었으며 낮은 온도에서는 SMC 재질을 사용하였을 때, 잔류염소 감소율이 일정 시간 안에 가장 빠르게 증가하였다.

3.2. 온도에 따른 잔류염소 감소 계수 값 도출

수체 내 분해 반응으로 인한 잔류염소 농도 예측을 위해 분해 계수 값을 산정하면 온도가 25°C일 때, K_{Bulk} 값은 0.2928 1/day이고 5°C일 때는 0.1344 1/day로 산정되었다. 이를 통해 20°C 가량의 온도가 상승할 경우 분해 속도 계수 값은 약 2.2배 증가함을 알 수 있었다. 본 실험으로 도출한 수체 내 분해계수 값과 문헌에서 획득된 계수 값들 (Kim et al., 2010; KISTEC, 2015)의 자연로그는 온도와 높은 상관관계를 보였다(Fig. 3). 따라서 국내 상황에 적합한 수체 내 분해계수 산정식($R^2=0.94$)을 아래와 같이 도출하였으며 해당 수식과 이를 통해 도출한 분해계수 값들은 Table 2에 나타냈다.

증발(탈기)반응 실험에 대한 계수 값을 산정하기 위해 식 (3)의 잔류염소 증발반응식을 이용하여 물질전달계수 값(K_{aw})

Table 2. Bulk decomposition coefficients and its formula derived in this study

Temperature (°C)	K_{Bulk} (m/day)	Bulk decomposition coefficients formula
5	0.1241	$\ln(K_{Bulk}) = 12.412 - 4.0307 \times \frac{1000}{T}$
10	0.1603	
15	0.2053	K_{Bulk} : Bulk decomposition coefficients (1/day)
20	0.2606	
25	0.3283	T : Absolute temperature (°K)

을 계산하면, 온도가 25°C일 때 K_{aw} 값은 0.1872 m/day로 산정되고 5°C일 때는 0.0552 m/day가 된다. 이를 통해 여름철의 온도 상승 시 겨울철보다 증발 속도계수 값이 약 3.4배 증가함을 알 수 있었다. 실험을 통해 도출한 계수의 타당성을 입증하기 위해 이론을 기반으로 하여 증발(탈기) 계수 값을 산정하였다. 이 때, 일반적으로 저수조 수위는 70~90% 가량 유지하므로 5 m 높이를 가진 저수조 내에 수위가 각각 3.5 m와 4.5 m일 경우의 이론적 증발(탈기) 계수 값은 Table 3과 같다. 또한 본 실험과 유사한 조건인 공기가 정상적으로 통하는 조건에서 dispersion이 작용하였을 때, K_{aw} 값은 25°C에서 0.2041m/day, 5°C에서 0.1396 m/day로

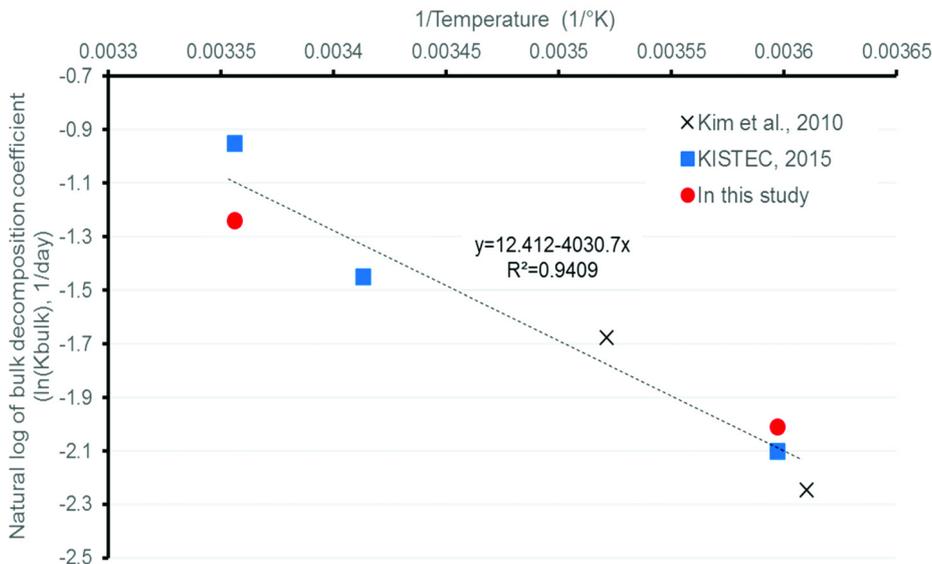


Fig. 3. Correlation between bulk decomposition coefficients (K_{Bulk}) and temperature.

Table 3. Evaporation coefficients with conditions of water storage tank

Water depth (m)	Air phase system	Dispersion	K_{aw} (m/day)				
			Temperature (°C)				
			5	10	15	20	25
3.5	Closed	O	0.2388	0.2944	0.3217	0.3381	0.3491
		X	0.1626	0.2005	0.2191	0.2303	0.2377
	Open	O	0.2394	0.2952	0.3225	0.3389	0.3499
		X	0.1629	0.2009	0.2195	0.2306	0.2381
4.5	Closed	O	0.1858	0.2291	0.2503	0.2631	0.2717
		X	0.1626	0.2005	0.2191	0.2303	0.2377
	Open	O	0.1862	0.2296	0.2508	0.2636	0.2721
		X	0.1629	0.2009	0.2195	0.2306	0.2381

Table 4. Sorption coefficients of PE derived in this study

Temperature (°C)	$K_{wall_{PE}}$ (m/day)	PE sorption coefficients formula
5	0.00404	$\ln(K_{Bulk_{PE}}) = 24.112 - 8.2355 \times \frac{1000}{T}$
10	0.00681	
15	0.01129	$K_{wall_{PE}}$: Sorption coefficients of PE (m/day)
20	0.01840	
25	0.02948	T : Absolute temperature (°K)

계산되었다. 해당 K_{aw} 값은 실험을 토대로 나온 K_{aw} 값과 비교하였을 때 다소 높게 나왔으나 분명할 정도로 값이 상이하지는 않았다.

잔류염소 흡착반응에 대한 물질전달계수(K_{wall}) 값은 온도가 25°C일 때 STS의 K_{wall} 값은 0.0683 m/day로 산정되었고, SMC와 PE는 각각 0.0786 m/day, 0.0237 m/day로 계산되었다. 온도가 5°C일 때 STS의 K_{wall} 값은 0.0591 m/day이며 SMC와 PE의 계수 값은 0.0584 m/day와 0.0534 m/day가 되었다. 또한, 여름철의 온도 상승 시 STS, SMC 재질의 분해 속도계수 값은 약 1.16배와 1.35배가량 증가하였으나, PE의 경우에는 2.25배가 감소함을 알 수 있었다. 세가지 벽체 재질 중 흡착능이 가장 적게 산정된 PE에 대해서 온도에 따른 흡착계수 값을 산정하기 위해 한국수자원공사에서 선행 연구된 PE 재질 흡착실험(2.5, 16.8, 25.4°C) 결과와 종합하여 PE 재질의 흡착계수 산정식($R^2 = 0.97$)을 아래와 같이 도출하였다. PE 재질의 흡착계수 산정식 및 해당 수식을 통해 도출한 분해계수 값들은 Table 4에 나타났다.

3.3. 온도 변화에 따른 저수조 내 잔류염소 시뮬레이션
일반적으로 저수조에서는 공기가 저수조 안팎으로 자유

롭게 이동이 가능하며 수돗물 사용량에 따라 저수조 내 물이 연속적으로 흐르도록 설계되어 있다. 여기서 저수조 내로 수돗물이 급격하게 유입이 되면, 수체 내 dispersion(분산) 현상이 발생하게 되고 이는 공기-물간 물질이동을 촉진하므로 수중 내 잔류염소 감소가 증가하게 된다. 만일 화재, 지진 등의 불가피한 재난에 의해 단수 상황이 발생하면 수돗물의 유입이 중단되고 결국 dispersion 효과가 줄어들게 된다. Fig. 4에서는 저수조 내 단수 조건(수돗물 유입이 없는 조건, Batch)에서와 무단수 조건(수돗물 유입이 있는 조건, CSTR)에서 온도의 영향에 따른 잔류염소 농도 감소를 도시하였다. 초기 잔류염소 농도가 0.2 mg/L일 경우 무단수 조건에서는 온도가 높아짐에 따라 잔류염소 농도의 감소 정도는 계속적으로 증가함을 보이지만 모든 온도에서 잔류염소 법정기준 하한치(0.1 mg/L)를 상회하였다. 하지만 단수조건에서는 모든 조건에서 약 80시간 이내에 수체 잔류염소 농도가 급격하게 감소하여 법정기준 이하로 수질기준을 만족하지 않게 되었다. 주변 환경 온도가 25°C일 때는 37시간 이후에 수체 내 잔류염소의 기준치를 만족하지 않게 된 반면에 5°C에서는 이를 가량이 증가된 82시간동안 법정기준을 만족하는 것으로 파악되었다. 이는 잔류염소 감소에 관여하는 모든 기작들이 온도에 의존적이기 때문에 온도에 따라 잔류염소 유지기간이 상당한 차이를 보인다고 생각된다. 따라서 경제성을 고려한 설계 내에서 저수조 내 수온을 최대한 낮게 유지하는 것이 저수조 내 잔류염소 유지에 기본적인 사항이라고 판단된다.

저수조 내에서 최대한의 잔류염소를 유지하기 위해서는 수체 내 분해반응, 흡착(탈기)반응, 벽체 흡착반응 모두에서 감소작용이 최소화되어야 한다. 따라서 각각의 기작들이 잔류염소 관점에서 최적의 상황이 되었을 때의 영향을 알아보고자 일반적인 설계 조건(공기 흐름, 공기부피: 전체부피

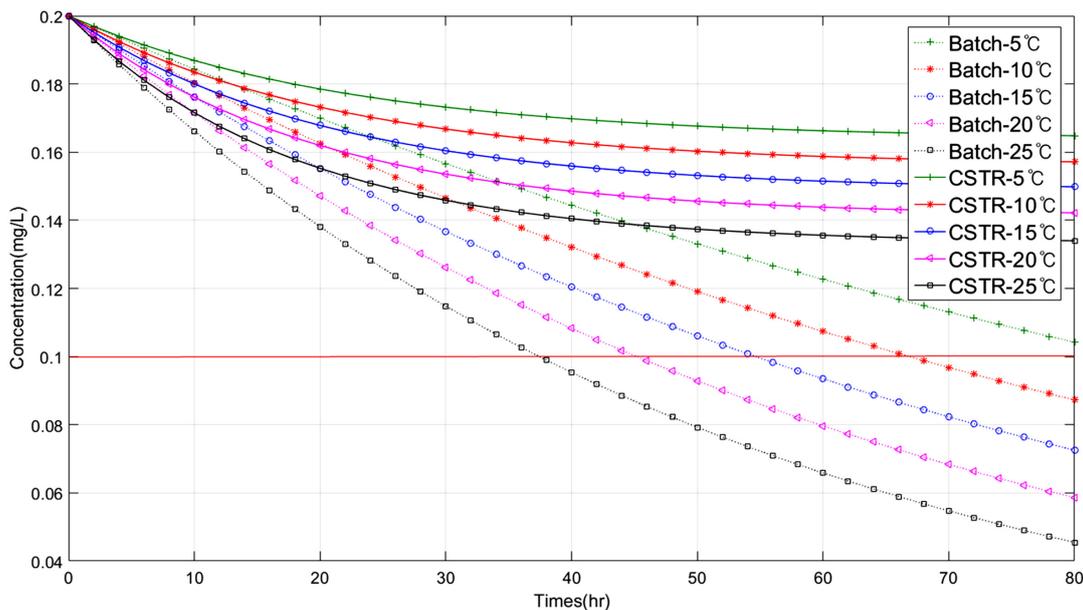


Fig. 4. Dynamic simulation of residual chlorine in water storage tanks with no flow system (CSTR) and continuous flow system (Batch Reactor) in response to different temperature conditions.

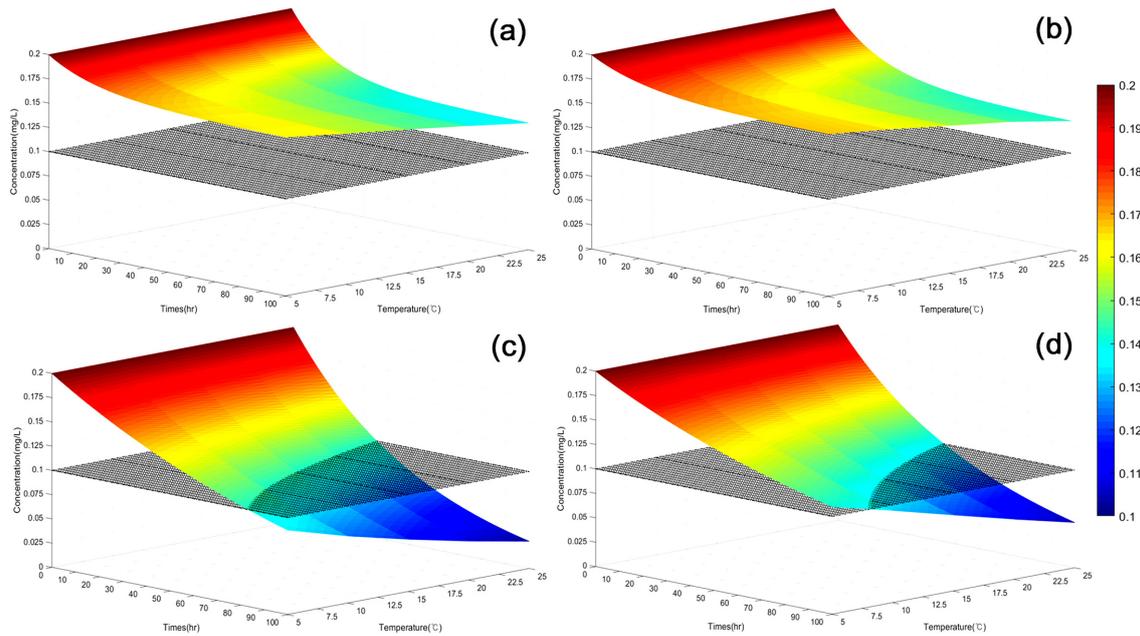


Fig. 5. Residual chlorine disappearances in typical continuous flow Water Storage Tanks (WSTs) (A) and modified WSTs (Low temperature, low sorption, no dispersion, low air volume and flow) (B); and typical no flow WSTs (C) and modified WSTs (D) with water quality standard of residual chlorine (0.1mg/L).

의 30%내외, 분산작용 존재, 벽체 재질: SMC)과 설계조건을 다음과 같이 변화(공기 흐름 폐쇄, 공기부피: 전체부피의 10%내외, 분산작용 억제, 벽체 재질: PE)하였을 때, 저수조 수체 내 잔류염소 농도를 다양한 온도 환경에서 살펴 보았다(Fig. 5). 그 결과, 무단수 조건에서는 변화된 설계조건을 통해 저수조 내에서 최대 20%의 잔류염소 감소의 저감효과를 보였으며 단수 조건에서는 최대 40%의 저감효과가 나타났다. 무단수 조건에서는 설계조건을 변화함에 따라 수체 내 잔류염소 기준치(0.1 mg/L)를 만족하는 기간이 10~25시간까지 증가하는 것으로 나타났으며 단수 조건에서는 적어도 100시간 이내에서 항상 상회하였다. 해당 결과에 따라 저수조 내 공기흐름을 저감하고 유입 분산을 저감하는 장치 개발하여 적용하는 것이 저수조 내에서의 잔류염소량 감소 저감에 유의한 결과가 있음을 파악되었다. 또한, 저수조 수체의 저온 유지, 흡착능이 적은 벽체 재질 사용, 저장용량 중 공기부피를 줄여서 운영을 하면 잔류염소 유지에 더욱 효과적일 것으로 판단이 된다.

4. Conclusions

먹는 물의 위생 안전성을 보장하기 위하여 저수조 내 잔류염소 농도는 법정기준인 0.1 mg/L 이상을 유지해야 한다. 이를 위해서는 국내 조건에 적합한 저수조 내에서의 감소 기작을 광범위한 온도 조건에서 진단 및 평가하고 이에 따른 설계조건이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 국내 수돗물 조건에서 수체 내 분해반응, 증발(탈기)반응, 흡착반응에 대한 감소 계수 값을 도출하였으며, 이를 기반으로 기작별 잔류염소 감소계수 산정식을

제시하였다. 또한, 실지 저수조 스케일에서 온도(5~25°C)에 따른 단수와 무단수 조건에서의 잔류염소 거동을 해석해보았다. 정상적인 정수처리 및 급수관리가 이루어질 경우, 잔류염소 농도가 법정기준을 상회하는 것으로 나타났으나 자연재해로 인한 단수 상황이 발생되면 일정기간 내에 기준치 이하로 감소되었다. 만일 저수조 설계를 기존의 저수조 대비 수체 저온 유지, 공기 흐름 및 부피 최소화, 분산작용 억제, 흡착능이 적은 벽체 재질을 사용한다면 다소 높은 잔류염소 감소의 저감효과(약 20~40%)를 얻을 수 있다. 본 연구에서 제시한 수정된 저수조 설계방법을 사용한다면 단수 조건에서는 적정 잔류염소 농도 유지 기간이 길어지며, 무단수 조건에서도 전반적인 잔류염소 농도 감소폭이 줄어들며 초기 잔류염소가 0.2 mg/L 이상으로 저수조에 유입된다면 무단수의 경우는 설계방법에 상관없이 잔류염소의 국내 법정기준을 항상 만족하게 된다.

본 연구를 통해 국내 상황에 적합한 저수조의 잔류염소 기작별 감소계수 값을 다양한 온도 범위에서 파악함으로써 저수조 내에서의 잔류염소 유지 방법 마련이 가능하게 되었다. 특히 닥타일주철 재질을 위주로 연구된 기존의 흡착 연구와는 다르게 STS, SMC, PE를 이용한 벽체 흡착실험으로 다양한 재질에서의 잔류염소 영향을 판단할 수 있게 되었다. 또한, 저수조 내에서의 증발작용의 고려와 정량적인 기작 평가를 통해서 잔류염소 유지를 위한 위생적인 저수조 설계 기반을 구축하였다. 뿐만 아니라 실지 저수조 수준에서의 시뮬레이션 평가를 통해 현실 적용가능성을 파악하였으므로 저상 저수조 및 물탱크 내의 잔류염소 유지 가이드에 대한 기초 정보로 사용될 수 있음을 시사한다.

Acknowledgement

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030040)

References

- Bretsznajder, S. (1971). *Prediction of Transport and Other Physical Properties of Fluids*, Pergamon Press, New York, 1-408.
- Chung, W. S., Kim, I. T., Lee, H. D., and Yu, M. J. (2004). Water Quality Management in Small Water Distribution Reservoir Using Residual Chlorine Decay, *Seoul Studies*, 5(2), 27-43. [Korean Literature]
- Coulson, J. M. and Richardson, J. F. (1964). *Chemical Engineering: Fluid Flow*, Pergamon.
- Cussler, E. L. (1984). *Diffusion, Mass Transfer in Fluid Systems*, 3.
- De Podesta, M. (2002). *Understanding the Properties of Matter*, CRC Press.
- Jun, M. H. (2015). *A Study on Water Quality Variation of Tap Water in Drinking Water Distribution Systems, Watershed and Drinking Water Division*, Institute of Health Environment. [Korean Literature]
- Kennedy, M. S., Moegling, S., Sarikelle, S., and Suravallop, K. (1993). Assessing the Effects of Storage Tank Design on Water Quality, *Journal-American Water Works Association*, 85, 78-78.
- Kiene, L., Lu, W., and Levi, Y. (1993). Parameters Governing the Rate of Chlorine Decay throughout Distribution System, *In Proceedings of AWWA Annual Conference*, Water Quality, 6-10.
- Kim, D. H., Lee, D. J., Kim, K. P., Bae, C. H., and Joo, H. E. (2010). Computing the Dosage and Analysing the Effect of Optimal Rechlorination for Adequate Residual Chlorine in Water Distribution System, *Korean Society of Environmental Engineers*, 32(10), 916-927. [Korean Literature]
- Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC). (2015). *Analysis of Residual Chlorine in Water Networks Using Residual Chlorine Decay Coefficient*, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation. [Korean Literature]
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. (2004). *A Development of Priority Rehabilitation Decision System on Water Supply System and Performance Assessment of Eco-Pretty System in the Building*, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. [Korean Literature]
- Korea Water Resources Corporation (K-water). (1999). *Control Technologies of Drinking Water Quality in Pipeline Networks*, Korea Water Resources Corporation. [Korean Literature]
- Korean Society of Disaster and Security. (2016). *A Study on Evaluation of Appropriate Capacity of Water Storage Tanks in terms of Disaster Prevention*, Korean Society of Disaster and Security. [Korean Literature]
- Kwak, P. J., Hwang, J. W., Kim, S. K., and Lee, H. D. (2005). Hydraulic Behavior and Water Quality Variation Characteristics in Underground Reservoir, *2005 Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers*, 364-367. [Korean Literature]
- Lyman, W. J., Reehl, W. F., and Rosenblatt, D. H. (1990). *Handbook of Chemical Property Estimation Methods: Environmental Behavior of Organic Compounds*.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P. (1993). *Unit Operations of Chemical Engineering*, New York: McGraw-Hill, 5, 154.
- Ministry of Environment (MOE). (2009). *Rules by Cleaning and Sanitation Management of Water Facilities (Installation Standards of Water Tank)*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2010). *Standards for Waterworks Facilities*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2016). *Regulations on Standards, etc. of Housing Construction No. 35 (Emergency Water Supply Facility)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport. [Korean Literature]
- Nazaroff, W. W. and Alvarez-Cohen, L. (2001). *Environmental Engineering Science*.
- National Institute of Standards and Technology (Nist). (2015). *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. US National Institute of Standards and Technology*, Retrieved 2015-09-25
- Noh, Y. R., Kim, S. H., Choi, S. U., and Park, J. H. (2016). A Review Study on Major Factors Influencing Chlorine Disappearances in Water Storage Tanks, *Journal of Korean Society of Disaster and Security*, 3(2), 63-75. [Korean Literature]
- Powell, J. C., Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F., and Simms, J. (2000). Factors which Control Bulk Chlorine Decay Rates, *Water Research*, 34(1), 117-126.
- Reid, R. C., Prausnitz, J. M., and Poling, B. E. (1987). The properties of gases and liquids, *The Properties of Gases and Liquids*, 4th.
- Richard, T. (1996). *Calculating the Oxygen Diffusion Coefficient in Water*, Cornell Waste Management Institute, Cornell University.
- Schwarzenbach, R. P., Geschwend, P. M., and Imboden, D. M. (1993). *Environmental Organic Chemistry*, John Wiley, New York, 255.
- Seoul Solution. (2016). *Conversion of Direct Series Distribution System*, Waterworks Business Division. [Korean Literature]
- Shelquist, R. (2009). *Equations - Air Density and Density Altitude*.
- Tang, A. and Sandall, O. C. (1985). Diffusion Coefficient of Chlorine in Water at 25-60 Degree, *Journal of Chemical and Engineering Data*, 30(2), 189-191.
- The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government. (2015a). *Status of Water Quality Inspection in Drinking Water Treatment Processes (January~December)*, The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government. [Korean Literature]
- The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government. (2015b). *Status of Tap-Water Quality Inspection (January~December)*, The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government. [Korean Literature]
- The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government. (2016). *Status of Tap-Water Quality Inspection*, The Office of Waterworks Seoul Metropolitan Government. [Korean Literature]
- Vasconcelos et al., 1997 Vasconcelos, J. J., Rossman, L. A.,

- Grayman, W. M., Boulos, P. F., and Clark, R. M. (1997). Kinetics of Chlorine Decay, *Journal-American Water Works Association*, 89(7), 54.
- Vilaseca, M., Gutiérrez, M. C., López-Grimau, V., López-Mesas, M., and Crespi, M. (2010). Biological Treatment of a Textile Effluent after Electrochemical Oxidation of Reactive Dyes, *Water Environment Research*, 82(2), 176-182.
- Wilhelm, E., Battino, R., and Wilcock, R. J. (1977). Low-Pressure Solubility of Gases in Liquid Water, *Chemical Reviews*, 77(2), 219-262.
- Zhang, G. R., Kiene, L., Wable, O., Chan, U. S., and Duguet, J. P. (1992). Modelling of Chlorine Residual in the Water Distribution Network of Macao, *Environmental Technology*, 13(10), 937-946.