

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/314239953>

A Review Study on Major Factors Influencing Chlorine Disappearances in Water Storage Tanks

Article · December 2016

DOI: 10.21729/ksds.2016.9.2.63

CITATIONS

0

READS

162

4 authors, including:



Yoorae Noh
Yonsei University

4 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE



Joonhong Park
Yonsei University

109 PUBLICATIONS 2,273 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



CJ Cheiljedang fund View project

저수조 내 잔류염소 감소에 미치는 주요 영향 인자에 관한 문헌연구

노유래* · 김상호** · 최성욱*** · 박준홍****

A Review Study on Major Factors Influencing Chlorine Disappearances in Water Storage Tanks

Yoorae Noh*, Sang-Hyo Kim**, Sung-Uk Choi***, and Joonhong Park****

접수일자: 2016년 12월 3일/심사완료일: 2016년 12월 15일/게재일자: 2016년 12월 31일

요 약 안전한 수돗물 공급을 위해 정수처리장부터 최종 단계인 수도꼭지까지 일정 수준 이상의 잔류염소농도가 유지되어야 한다. 하지만 국내 문헌에 따르면 상수공급의 전체 과정 중에 30-60%의 잔류염소가 소실되고, 이에 대한 주요 원인으로 정수처리 과정에서 염소 사용량 감소 추세, 급수배관 내에서 염소분해 손실, 여름철의 높은 온도에 의한 잔류염소 분해 속도 증가, 급수배관의 노후화에 따른 잔류염소 손실, 저수조 내 저장 시 잔류염소 감소 발생 등이 파악되었다. 이러한 이유로 저수조를 거치는 급수 방식의 경우 최종 수도꼭지의 잔류염소 농도가 기준치보다 낮아질 개연성이 높고, 용량과 체류시간을 단순히 고려하는 기존의 저수조 설계 방식으로 인해서 수돗물 공급의 안전성에 대한 우려가 존재한다. 이의 개선 방안 도출을 위해서 본 연구에서는 저수조 내 잔류염소 감소에 관여하는 주요 기작들인 수체 내 잔류염소 분해, 벽체 표면 흡착, 그리고 증발에 의한 물질전달을 수학적으로 묘사하는 공식들과 계수 값들을 문헌을 통해서 획득하고, 일반적 저수조 조건에서 모델 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 저수조에 유입되는 수돗물 내 유기물 농도, 수돗물이 저수조에 유입되는 수리학적 조건(난류 정도), 그리고 저수조 벽체 표면 재질의 흡착능 등이 저수조 내 잔류염소 감소에 주요 영향 인자들임을 알 수 있었다. 본 연구에서 획득된 결과들은 잔류염소 감소를 최소화하여 안전한 수돗물 공급을 가능하게 하는 새로운 저수조 설계 기법이나 기술 개발에 유용하게 활용될 것이다.

핵심용어 수돗물 저수조, 잔류염소, 수체 내 분해, 흡착, 증발(탈기)

ABSTRACT For safe water supply, residual chlorine has to be maintained in tap-water above a certain level from drinking water treatment plants to the final tap-water end-point. However, according to the current literature, approximately 30-60% of residual chlorine is being lost during the whole water supply pathways. The losses of residual chlorine may have been attributed to the current tendency for water supply managers to reduce chlorine dosage in drinking water treatment plants, aqueous phase decomposition of residual chlorine in supply pipes, accelerated chlorine decomposition at a high temperature during summer, leakage or losses of residual chlorine from old water supply pipes, and disappearances of residual chlorine in water storage tanks. Because of these, it is difficult to rule out the possibility that residual chlorine concentrations become lower than a regulatory level. In addition, it is concerned that the regulatory satisfaction of residual chlorine in water storage tanks can not always be guaranteed by using the current design method in which only storage capacity and/or hydraulic retention time are simply used as design factors, without considering other physico-chemical processes involved in chlorine disappearances in water storage tank. To circumvent the limitations of the current design method, mathematical models for aqueous chlorine decomposition, sorption of chlorine into wall surface, and mass-transfer into air-phase via evaporation were selected from literature, and residual chlorine reduction behavior in water storage tanks was numerically simulated. The model simulation revealed that the major factors influencing residual chlorine disappearances in water storage tanks are the water quality (organic pollutant concentration) of tap-water entering into a storage tank, the hydraulic dispersion developed by inflow of tap-water into a water storage tank, and sorption capacity onto the wall of a water storage tank. The findings from

*연세대학교 토목환경공학과 석사과정(Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, E-mail: shdbfo93@hanmail.net)

**연세대학교 토목환경공학과 정교수(Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul)

***연세대학교 토목환경공학과 정교수(Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul)

****연세대학교 토목환경공학과 정교수(Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul)

this work provide useful information in developing novel design and technology for minimizing residual chlorine disappearances in water storage tanks.

KEYWORDS Water storage tank, Residual chlorine, Bulk decomposition, Absorption, Evaporation

1. 서 론

국내에서는 일정 규모 이상의 건물 및 공동주택 단지에서는 저수조 설치 및 운영이 의무화 되어 있다. 재난 및 긴급 상황에 의한 일시적인 단수에 의해서 수도물 공급이 제한되는 상황에 대처하기 위해서 최소 2일 이상 사용할 수 있는 생활용수로서 수도물을 저장해야 한다. 또한 소방용수의 저장 용도로도 저수조 설치와 운영이 현재 법제화 되어 있다(국토교통부, 2016). 미국, 일본 등의 OECD 국가에서는 40~50%인 반면 한국의 대도시에서 수도물 음용률이 5% 이내로 낮다. 이에 대한 주요원인은 최종 말단 수도물의 수질에 대한 시민들의 신뢰도가 높지 않기 때문이다(한국수자원공사, 2014). 이러한 불신은 저수조 내 저장된 수도물의 위생관리에 대한 우려에서 기인한다. 정수처리시설에서 안전한 수도물의 수도물을 공급을 하여도 저수조 내 일정기간 저장되는 동안에 외부환경에서 유입되는 불순물 특히 병원성 세균에 의한 오염 가능성이 존재한다(Geldreich et al., 1992). 이에 대한 기술적 대책은 저장되는 수도물 내 잔류염소 농도를 일정이상 유지하는 것인데, 이를 위한 첫째 방안은 저수조를 거치지 않고 직결로 최종 수용자에 급수하는 기술을 도입하는 것이고, 둘째는 기존 저수조 기술을 개선하는 것이다.

수도물의 직결급수 방식은 선진국들에서 사용되고 있기 때문에 서울특별시를 포함한 국내의 대도시에서 도입하는 것을 최근에 고려 중에 있고 일부 시범사업을 실제 수행하고 있다(서울정책아카이브, 2016). 하지만 직결 급수의 도입은 법적, 재정적 제약을 극복하는 시간이 필요하므로, 단기적인 해결책이 되기 힘들다. 즉, 현행 법제적인 개정을 위해서는 기술외적인 단계와 절차가 엄연히 존재하고, 대도시 내 직결급수 구현을 위한 인프라 설치를 위한 자원 마련이 현 국내 경제상황에서 녹록해 보이지 않는다. 이러한 법적, 재정적 제약이 극복된다 하더라도, 재난 및 긴급 상황에 의한 일시적인 단수에 대처하는 저수조의 당초 목적을 직결급수가 완전히 대체할 수는 없다. 이러한 이유들로 인해서 직결급수 제도가 도입이 된다고 하더라도, 단기적으로 기존 저수조 기술의 개선을 통해서 수도물 내 잔류염소의 적정 수준을 유지하는 방안이 보다 현실적이라고 판단된다.

최근 위생안전에 대한 국민들의 관심이 늘어나면서 안

전한 음용수 확보에 대한 중요성과 국민적 관심도 증가하였다. 정수처리시설에서는 시민들에게 공급되는 먹는 물이 유해 미생물 및 각종 오염물질에 대해 안전하도록 각종 소독처리를 실시한다. 국내에서는 기본적으로 수계 내 미생물을 사멸시키기 위하여 소독 효과가 있는 염소를 주입하고 있으며, 이는 수도물(수도꼭지)에 도달하기까지 잔류염소의 지속적인 유지가 요구된다(환경부, 2010). 「먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙」 제4조에 따르면 국내 잔류염소의 상한 기준은 4.0 mg/L이며, 0.1 mg/L 이상을 권고하고 있다(환경부, 2009). 여름철의 더운 날씨로 인해 수인성병원 감염성이 높을 경우에는 0.4 mg/L 이상의 잔류염소가 권고된다. 먹는 물의 위생이 강조됨에 따라 서울시의 경우에는 잔류염소 최소농도 가이드라인을 0.1 mg/L~0.3 mg/L으로 상향 조정하고 있다. 정수처리시설에서 정수공정을 거치고 난 물은 시민들이 음용하는 수도물로 오기까지 여러 급수시스템을 지나 공급이 되는데 이 과정에서 상당량의 염소가 감소되고 있다(Zhang et al., 1992; Kiene and Levi, 1993; Vasconcelos et al., 1997). 또한 수도물을 공급하는 마지막 저장시설인 저수조에서 수중 잔류염소 농도가 줄어들고 있다는 연구결과가 있다(Kennedy et al., 1993; 한국수자원공사, 1999).

수도물 내 잔류염소의 적정수준 유지를 위한 기존 저수조 기술의 개선을 위해서는 첫째, 정수처리장에서부터 최종 말단 수도꼭지까지의 전 과정 관점에서 충분히 높은 농도의 잔류염소가 저수조에 유입되게 하는 기술이 필요하고, 둘째, 저수조 내에서 잔류염소 감소가 최소화 되는 시설 설계 기술, 그리고 만약 저수조에서 유출되는 잔류염소의 수준이 기준치 보다 낮은 경우, 추가로 염소주입을 해 주는 운영기술 등이 요구된다. 이들 중 세 번째인 운영기술의 경우 저수조 내 잔류염소를 자동 모니터링하고 필요분의 염소를 추가해 주는 자동 장비와 운영 기술들이 국내에서 이미 상용화되어 있는 반면 수도물 공급 전반의 과정에서 잔류염소 감소에 대한 국내 현황 파악과 저수조 내 잔류염소 감소 최소화를 위한 설계기술 개선을 위한 연구는 국내에서 매우 제한적이다. 본 연구에서는 저수조 내 잔류염소 감소를 최소화하는 시설의 설계 방안 도출을 목적으로 (1) 국내 정수처리 및 급수 시설의 잔류염소 현황 파악과 (2) 저수조 내 잔류염소 감소에 관여하는 기작들에 대한 이론적 고찰 및

문헌조사 연구, 그리고 (3) 잔류염소 감소기작들의 수학적 모델을 이용한 모델 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 국내 수도물 공급 시스템 내 잔류염소 연구 동향

2.1 상수도 공급과정 전반에서 손실되는 잔류염소

서울특별시 상수도사업본부에 따르면 2006년도 1월부터 8개월간의 정수 내 잔류염소 평균 농도는 0.82 mg/L(표준편차: 0.09 mg/L)로 정수센터별 평균 0.66~0.99 mg/L의 잔류염소 농도 분포를 보였다(서울시 상수도사업본부, 2006). 반면, 최근 염소사용의 부작용 및 냄새 등의 단점들이 부각되기 시작하면서 대다수의 정수처리장에서 주입 염소 농도를 낮게 적용하고 있다. 실제로 서울특별시 상수도사업본부의 2016년도 1월부터 8개월간 자료에 따르면(서울시 상수도사업본부, 2016a), 정수 내 잔류염소 평균 농도는 0.40 mg/L(정수센터별 평균 0.37~0.47 mg/L)로 현재 정수처리시설에서 처리된 정수의 염소소독 처리농도가 10년 전보다 절반 이상 감소함을 알 수 있다.

서울특별시의 수도물 공급 최종 단계인 정수지와 최종 말단 수도꼭지에서 각각 잔류염소 농도를 측정된 자료를 분석한 결과(서울시 상수도사업본부, 2015a; 서울시 상수도사업본부, 2015b), 수도꼭지의 잔류염소 농도가 전반적

으로 기준치를 만족하였고, 이를 위해서 정수지에서 잔류염소 농도를 상승시켜서 운영하였음을 알 수 있었다. 정수지와 수도꼭지에서 측정된 잔류염소 농도 자료를 이용해서 잔류염소 감소율(disappearance rates)를 산정하고 분석한 결과(Fig. 1), 정수지 잔류염소의 30~60%는 수도물이 공급되는 과정에서 손실되고 있음을 알 수 있다. 또한 수도꼭지의 1월 평균 잔류염소농도는 0.25 mg/L(표준편차: 0.056 mg/L)인 반면에 8월 평균 농도는 0.19 mg/L(표준편차: 0.059 mg/L)로 잔류염소 감소율은 기온이 높은 여름철에 높고, 겨울철에는 상대적으로 낮음을 알 수 있었다.

이러한 계절의 영향은 온도의 영향과 더불어 계절 의존적인 도시수문학적 영향과 연관이 있는 듯하다. 급수관 내에서 잔류염소 감소 기작은 수중 내 유기물질과의 산화반응에 잔류염소가 분해되는 반응을 포함하며, 해당 분해반응 속도는 온도가 높아질수록 빨라지는 경향이 있다(Feben et al., 1951; Zhang et al., 1992). 도시수문학적 영향에 대해서는 장마철이나 호우 기간 동안에 노후 상수관거의 틈을 통해서 유입된 지하수 내 유기물질의 증가가 잔류염소 감소 촉진을 유발했을 것으로 사료된다. 여름철에는 기온의 상승과 더불어 호우가 동시에 발생하므로, 여름철 잔류염소 감소율이 겨울철에 비해서 높게 나타난 현상이 설명될 수 있다. 하지만 여름철 잔류염소 감소의 증가에 온도 영향이 노후

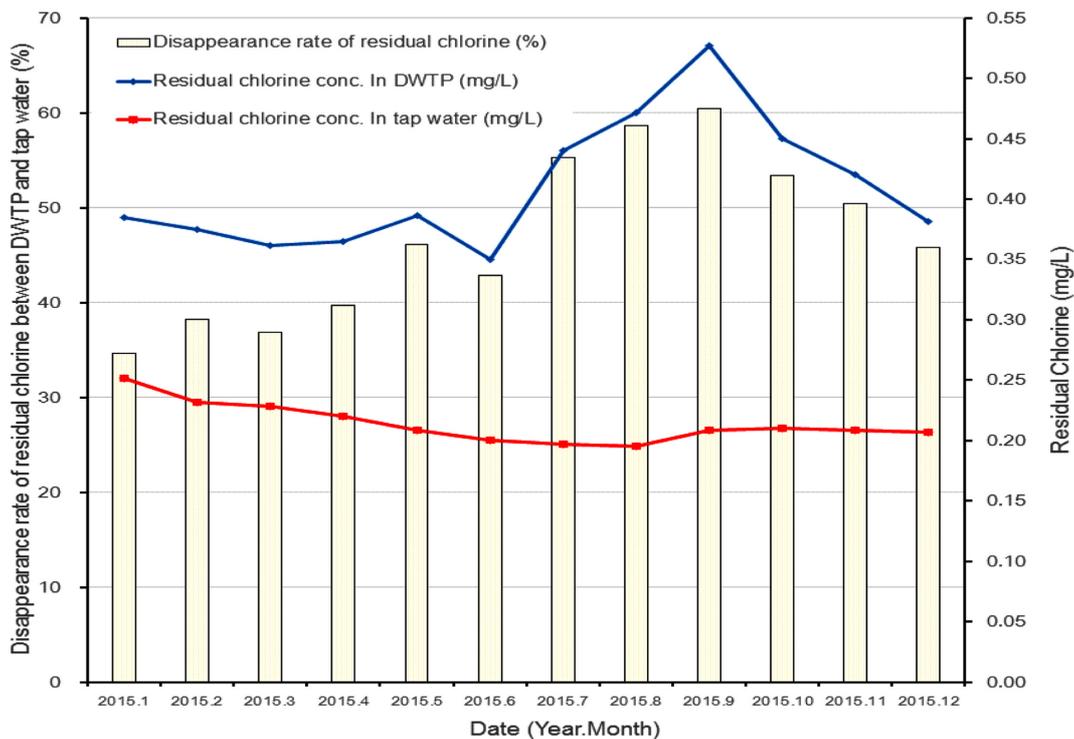


Fig. 1. Residual chlorine concentrations at drinking water treatment plants and at the final end-points of tap water, and their corresponding disappearance rates (The office of waterworks Seoul metropolitan government, 2015)

상수관거로 유입된 유기물질 증가에 의한 영향보다 더 크게 기여했는지는 현재의 자료로는 명확하지 않다. 만약 온도가 주요 영향 요소라면 급수배관 내 잔류염소 분해속도는 화학적인 방법을 이용하여 상대적으로 쉽게 예측이 가능하고 이를 기반으로 최종 말단 수도꼭지의 잔류염소 수준을 만족하는 정수지의 염소 주입량 산정이 용이하고 운영의 불확실성이 높지 않을 것이다. 하지만 만일 상수관거 노후화에 의한 지하수 유입 영향이 적지 않다면, 잔류염소 수준 만족을 위한 정수지의 잔류염소 운영관리에 불확실성이 높아진다(송영일 외, 2016). 현재 우리나라의 총 급수관 연장 71,401 km 중 21년 이상이 된 급수관의 연장은 23,347 km (33%)이다. 만일 향후 급수관의 교체 또는 개량이 수행되지 않는다면, 2030년에는 전체 급수관 중 52%가 21년 이상

된 노후 급수관일 것으로 예측하고 있다(환경부, 2014). 노후화된 상수관의 개선이 이루어지지 않을 경우, 수도물이 급수배관을 통해 건물에 도달하기 전까지의 잔류염소 감소와 농도 편차가 더 커질 수 있으며, 그로 인해서 유지관리의 리스크와 비용이 커질 것을 시사한다.

2.2 급수공급방법(직수 vs 저수조)이 수도물 내 잔류염소에 미치는 영향

급수공급방법(직수, 저수조)에 따른 수도꼭지의 잔류염소 농도 분포를 서울특별시 450 지점에 대해서 겨울(1월)과 여름(8월)에 대해서 각각 조사한 바 있다(서울시 상수도사업본부, 2016b; 서울시 상수도사업본부, 2016c). 그 결과를 자세히 분석해 보면, 저수조를 거쳐서 나올 경우에 수도물

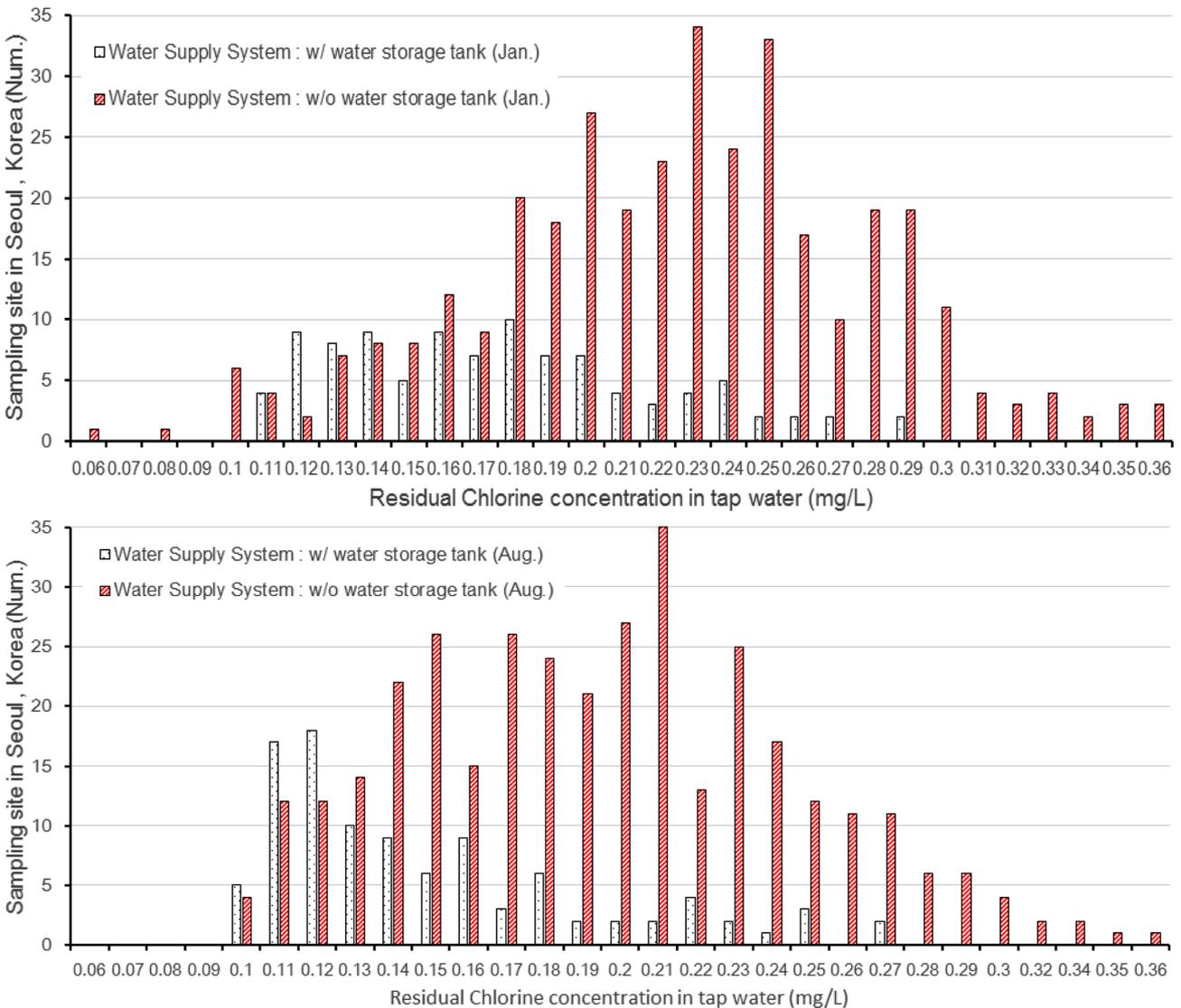


Fig. 2. Residual chlorine concentrations of water supply systems w/ and w/o water storage tanks (The office of waterworks Seoul metropolitan government, 2016)

내 잔류염소 농도가 계절에 무관하게 전반적으로 낮았다 (Fig. 2). 이는 배수지로부터 직결로 급수될 경우보다 저수조 내에서 체류하면서 잔류염소가 손실되었기 때문인 것으로 추정된다. 이러한 결론은 다른 지자체의 연구결과에서도 확인된다.

겨울(1월) 자료를 보면, 저수조의 경우는 수도꼭지에서 잔류염소가 기준치인 0.1 mg/L를 모두 만족한 반면에 직결 공급의 경우에는 2개 지점에서 0.1 mg/L 이하의 잔류염소 농도가 관측되었다. 저수조를 거쳐서 공급을 하는 경우에는 저수조 내 잔류염소를 모니터링해서 추가적으로 염소를 주입하는 등의 조치가 가능하지만, 직결의 경우는 중간 단계에서 모니터링이 이루어지지 않아서 최종 말단의 잔류염소 수준 관리가 쉽지 않기 때문인 것으로 추정된다. 이들이 시사하는 것은 저수조에서 저장되는 기간에 잔류염소의 손실은 직결보다는 클 수 있지만, 저수조를 거치는 시스템이 중간 모니터링을 용이하게 하여 최말단 수돗물의 잔류염소 수준 관리에 오히려 직결 공급보다 유리할 수도 있다는 점이다. 이점은 추후에 이에 대해 보다 면밀한 연구가 필요하다고 제안한다.

2.3 저수조 용량과 체류시간이 잔류염소에 미치는 영향

저수조는 「주택건설기준 등에 관한 규정」에 따라 공동주택에 비상시를 대비하여 일정 수량 이상을 저장할 수 있도록 설치가 의무화되어 있다. 하지만 보수의 어려움, 유지관리의 불편, 수질오염 등의 문제점이 발생되어 「주택건설기준 등에 관한 규정」 제35조에 따라 점차 그 용량이 축소되었다. 이러한 규정상의 이유로 저수조 설계에서는 용량 혹은 체류시간을 주요 설계 요소로 고려하고 있다. 하지만 실제 저수조의 현장 자료들을 분석해 본 결과(곽필재 외, 2005), 잔류염소 감소 최소화 관점에서 용량 및 체류시간이 유의하지 않다는 점을 발견하였다. 즉 용량/체류시간과 저수조 내 잔류염소 농도 간에 상관성이 낮았다(Fig. 3). 일반적으로 잔류염소는 수중의 유기물질과 반응하여 감소하거나, 저수조 벽체에 흡착되거나, 대기 중으로 휘발되는 증발 등에 의해서 손실 혹은 감소된다. 이론적으로 이러한 기작들에 관련된 조건이 저수조 설치에 동일하게 적용이 되었다면, 체류시간이 길어질 때 잔류염소 감소가 상대적으로 적게 발생될 것이다. 하지만 현장에서는 저수조 내 잔류염소 감소에 관여하는 다양한 기작들과 유체역학적인 조건에

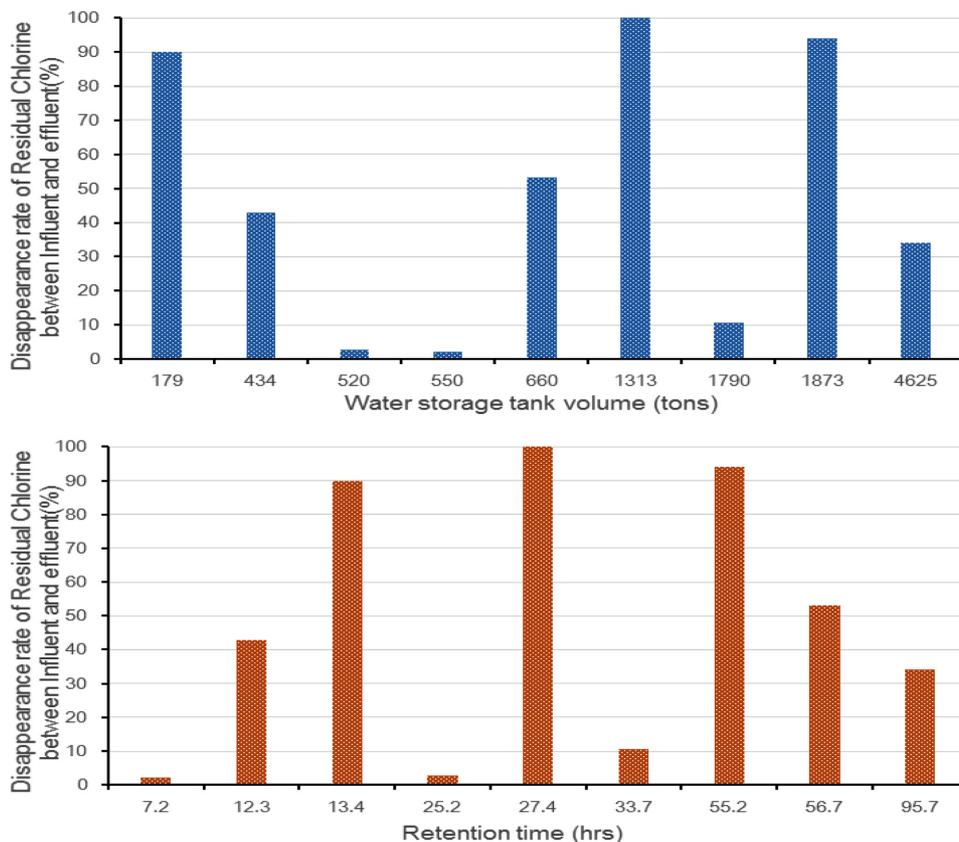


Fig. 3. Rates of residual chlorine disappearances between the influent and effluent points of water storage tanks in response to varying water storage tank volumes (upper) and retention times (lower)

대한 구체적인 고려 없이 체류시간/용량만을 고려한 단순한 설계로 저수조 설치와 운영관리가 되고 있다.

3. 저수조 내 잔류염소 감소에 관여하는 기작에 대한 이론적 고찰

선행연구들에 따르면 저수조로 유입되는 수돗물의 잔류염소 농도와 비교하였을 때, 저수조에서 유출되는 수돗물의 잔류염소는 더 낮게 관찰된다. 공공대형건축물 저수조를 조사한 바에 따르면 수도꼭지에서 관측한 평균 잔류염소 농도 0.17 mg/L는 저수조 유입수의 잔류염소 농도인 0.27 mg/L 보다 낮았다(전미희, 2015). 국내 광역지역 9개소의 콘크리트 지하저수조 내 잔류염소 조사 결과에 의하면, 저수조 유출수 내 잔류염소 농도는 유입수보다 평균 0.24 mg/L 정도 낮게 관측되었다(곽필재 외, 2005). 즉, 현재 저수조 내에서 잔류염소의 손실(감소)은 상당량 발생하고 있음을 알 수 있다. 잔류염소 감소에 관여하는 기작에 대한 연구는 배급수관 조건에서 주로 이루어져 왔으나, 저수조 조건에서는 상대적으로 매우 부족한 것으로 파악되었다(정원식 외, 2004).

저수조 내 잔류염소 감소에 관여하는 주요 물리화학적 기작들은 (1) 수체 분해 반응(bulk decomposition [Mechanism 1 in Fig. 4]), (2) 증발(탈기) 반응(evaporation [Mechanism 2]), 그리고 (3) 벽체 흡착 반응(sorption [Mechanism 3])이다. 수체 분해 반응은 수중 유기물질들과 반응하여 잔류염소가 분해되는 것이고, 증발반응은 수체 표면을 통해서 휘발성인 염소가 공기 중으로 이동되는 것이고, 벽체 흡착 반응은 수중 내 잔류염소가 벽체 재질에 흡착에서 수중으로부터 소실되는 것이다.

3.1 수체 내 분해(Bulk Decomposition)

잔류염소는 수체 내에 존재하는 유기물질의 양(과망간산칼륨소비량으로 측정) 등에 의해 분해되어 수중 내 잔류염소 농도가 감소된다. 잔류염소의 수체 내 분해 반응의 반응식은 식 (1)과 같이 표현 된다(Vasconcelos and Boulos., 1996).

$$R_{bulk} = \frac{dC}{dt} = -K_{bulk}C^n \tag{1}$$

K_{Bulk} : 수체 내 분해속도 계수(1/day)

C : 수체 내 잔류염소농도(mg/L)

n : 분해 반응차수

일반적인 잔류염소 분해 반응은 1차 반응(first-order decay)으로 알려져 있다(Murphy, 1985; Wable et al., 1991; 김도한 외, 2010). 수체 내 잔류염소의 분해반응은 산화-환원반응이기 때문에 온도가 반응속도에 영향을 준다. 즉 높은 온도에서 분해속도가 빨라진다. 온도에 따른 잔류염소의 수체 내 분해속도 계수(K_{Bulk})를 보정하기 위해서, Arrhenius 식을 통해 온도 영향을 보정하는 방법을 식 (2)와 같이 제시하였다(Coulson and Richardsom, 1964; Powell et al., 2000).

$$K_{Bulk} = f \cdot \exp[-e/(R \cdot T)] \tag{2}$$

K_{Bulk} : 수체 내 분해속도 계수(1/day)

f, e : 보정상수

R : 이상기체 상수

T : 수온(°K)

잔류염소 분해속도 계수는 수중의 유기물질의 양과 상관성이 있으므로, 유기물질 산화에 요구되는 과망간산칼

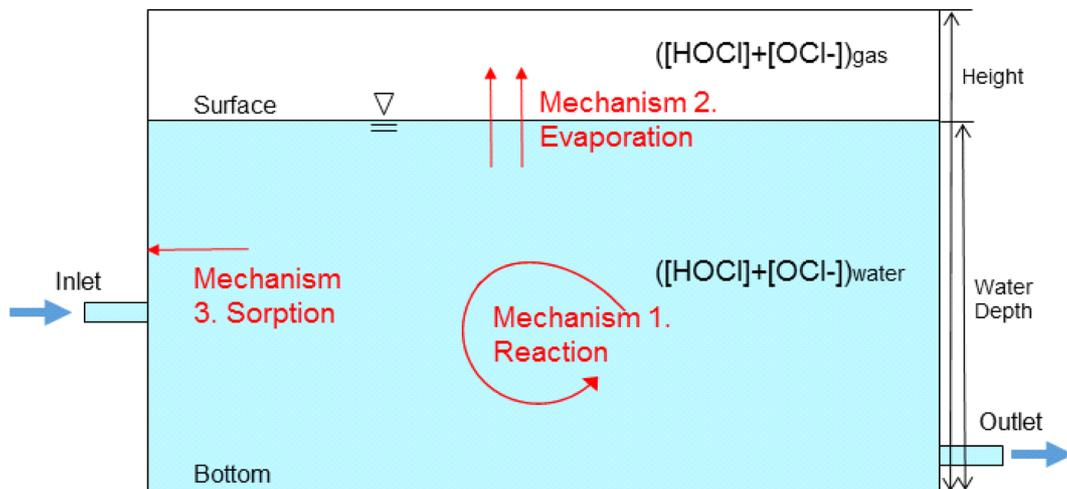


Fig. 4. Physico-chemical mechanisms involved in chlorine disappearances in water storage tank

류 소비량과 온도의 함수로서 일본 상황에 맞는 분해속도 계수를 산정하는 식 (3)을 호소이 요시히코(細井由彦)에 의해 제시된 바 있으며 이를 이용하여 국내 배수지 수준에서도 유사식이 제시된 바가 있다(정원식 외, 2004). 해당 산정식들은 배수지 조건에서 개발된 것으로 저수조 조건에서의 수체 내 분해반응에도 적용가능하다고 판단되나 정확도가 높은 수체 분해속도 계수를 산정하기 위해 국내 저수조 조건에 적합한 수식을 도출할 필요가 있다.

$$K_{Bulk} = \exp(0.074 \times T + 0.2 \times KMnO_4 \text{ 소비량} - 6.49) \quad (3)$$

K_{Bulk} : 수체 내 분해계수(1/day)

T : 수온(°C)

$KMnO_4$ 소비량: 유기물질 산화를 위한 과망간산칼륨 소비량(mg/L)

3.2 증발(탈기)(Evaporation)

염소는 녹는점과 끓는점이 각각 -101.5 °C, -34.04 °C로 휘발성이 강한 물질로서, 물속에 존재하는 염소 이온들도 상온(20±5 °C) 및 겨울철의 낮은 온도(0~5 °C)에서도 자발적으로 공기 중으로 증발(탈기)하게 된다(Greenwood and Earnshaw, 1984). 저수조 내에 존재하는 염소 이온 역시 시간이 지남에 따라 증발 반응으로 공기와 접촉하고 있는 물 표면에서 물질전달(inter-phase mass transfer)이 이루어진다. 잔류염소의 증발(탈기)에 의한 물질전달 확산유량(flux)은 아래 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다(William et al., 2001).

$$J_{aw} = K_{aw}(C_{water} - C_{air}) \quad (4)$$

J_{aw} : 공기-물 사이의 확산유량(flux) (g/m²/day)

K_{aw} : 증발(탈기)에 의한 물질전달 계수(m/day)

C_{water} : 수체 내 잔류염소농도(mg/L)

C_{air} : 대기 내 잔류염소농도(mg/L)

식 (4)는 저수조 내 공기 중의 염소농도가 희박하면 물질전달 확산유량이 커지고 저수조 내 공기 중 염소농도가 수중의 염소농도 수준과 같아지면 물질전달 확산유량이 없게 됨을 의미한다. 저수조를 밀폐시켜 공기 흐름을 막으면 저수조의 공기 내 염소농도가 물의 염소농도 수준으로 상승하게 될 수 있다. 하지만 현재 저수조는 지진 등의 급작한 충격에 의한 고압발생의 문제를 완화하기 위해서 저수조 내부와 대기 사이에 공기가 상시 유통될 수 있게 설계되고 있다. 이로 인해서 저수조 내 공기 중의 염소농도는 일반적으로 희박하며 증발에 의한 확산유량이 크고 이는 수체 내 잔류염소 손실의 증가의 원인이 된다.

대기와 수체에서의 확산 유량을 각각 산정하기 위해서 Fick's first law를 적용하면 다음의 식 (5)와 식 (6)과 같다. 여기서 이상기체 상수는 $R=8.2057 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$ (NIST, 2015)이다.

$$J_{aw-air} = D_a \frac{(P_{air} - P_i)/RT}{L_a} \quad (5)$$

$$J_{aw-water} = D_w \frac{(C_i - C_{water})}{L_w} \quad (6)$$

J_{aw-air} : 대기에서의 확산유량(mg/m²/day)

$J_{aw-water}$: 수체의 확산유량(mg/m²/day)

D_a : 공기 중 물질 확산 계수(m²/day)

D_w : 수체 내 물질 확산 계수(m²/day)

L_a : 공기 중 정체된 층(stagnant film layer) 두께(m)

L_w : 수체 내 정체된 층 두께(m)

P_{air} : 대기 분압

P_i : 인터페이스 인접 지점의 분압

C_{water} : 수체 내 잔류염소농도(mg/L)

C_i : 인터페이스 인접 지점 내 잔류염소농도(mg/L)

T : 수온(°K)

이때, 헨리 법칙(Henry's law)인 $P_i = K_H C_i$ (염소 헨리상수, K_H : $1.17 \times 10^{-2} \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$ [Staudinger and Roberts, 1996])를 식 (5)에 대입하면 아래와 같이 물질전달계수, K_{aw} 를 도출할 수 있다.

$$K_{aw} = \frac{D_w}{L_w} \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) = \frac{1}{\frac{L_w}{D_w} + \frac{L_a}{D_a} \cdot \frac{RT}{K_H}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{water}} + \frac{RT}{K_{air} K_H}} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{D_a L_w K_H}{D_w L_a RT}$$

K_{aw} : 증발(탈기)계수(m/day)

D_a : 공기 중 물질 확산 계수(m²/day)

D_w : 수체 내 물질 확산 계수(m²/day)

L_a : 공기 중 정체된 층 두께(m)

L_w : 수체 내 정체된 층 두께(m)

R : 이상기체 상수(atm·m³/mol·K)

T : 수온(°K)

K_{air} : 공기 중 물질전달계수(m/day)

K_{water} : 수체 내 물질전달계수(m/day)

공기 중에 정체된 층 두께(L_a)와 수체 내 정체된 층 두께(L_w)는 저수조 내 난류 정도에 관련된 수리학적 특성에 영향을 받는다. 급격한 난류의 발생은 정체된 층 두께를 얇게 하여 물질 전달계수를 크게 하는 경향이 있으므로, 가급적

잔잔하게 수돗물의 유입하고 유출하여 층류 특성을 유지하면 정체된 층 두께를 상대적으로 두껍게 해서 증발에 의한 손실을 적게 할 수 있다는 점을 식 (7)에서 시사한다. K_{water} 과 K_{air} 는 각각 물-경계층, 공기-경계층 사이의 물질전달 계수로써 실질적인 값을 구할 수 없다. 따라서 자연환경 상태에서의 K_{water} , K_{air} 을 유도한 식 (8), 식 (9)와 식 (10) (Schwarzenbach et al., 2005)을 상기의 식 (7)에 대입해서 K_{av} 값을 산정한다.

공기 중 물질전달 계수:

$$K_{air} = \left[\frac{D_a}{2.25 \text{m}^2 \text{day}^{-1}} \right]^{2/3} (7U_{10} + 11) \quad (8)$$

K_{air} : 공기-경계층 사이의 물질전달 계수(m/day)

D_a : 공기에서의 염소 확산율(m^2/day)

U_{10} : 수위 표면에서 10 m 떨어진 곳에서의 평균 풍속(m/day)

위 식의 U_{10} 의 경우, 저수조 내 공기 흐름을 0 m/s으로 가정하여 K_{air} 값은 157.68 m/hr로 산정될 수 있다.

느린 유속을 가진 수체상의 물질전달 계수:

$$K_{water} = \left[\frac{D_w}{2.25 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{day}^{-1}} \right]^{0.57} (0.0014U_w^2 + 0.014) \quad (9)$$

K_{water} : 물-경계층 사이의 물질전달 계수(m/day)

D_w : 물에서의 염소 확산율(m^2/day)

U_w : 유체 평균 흐름 속도(m/day)

빠른 유속을 가진 수체상의 물질전달 계수:

$$K_{water} = 0.18 \left[\frac{D_w}{2.25 \times 10^{-4} \text{m}^2 \text{day}^{-1}} \right]^{0.57} \left(\frac{U_w}{d_w} \right) \quad (10)$$

K_{water} : 물-경계층 사이의 물질전달 계수(m/day)

D_w : 물에서의 염소 확산율(m^2/day)

U_w : 유체 평균 흐름 속도(m/day)

d_w : 흐름의 깊이(m)

위 식의 U_w 의 경우, 한국건설기술연구원에서 조사한 저수조 용량과 체류시간을 고려하여 물의 평균 흐름 속도를 11.76 m/hr로 가정하였으며, 느린 유속과 빠른 유속에서의 K_{water} 값은 각각 0.226 m/hr과 0.814 m/hr로 산정되었다. 상기 식들에 필요한 헨리상수와 염소 확산 계수 값들은 기존의 문헌자료에서 획득이 가능하다(Staudinger and Roberts, 1996; GSI Environmental, 2014; Cussler, 1997). 저수조에서 발생할 수 있는 수체상의 물질전달계수와 공기상의 물질전달 계수를 각각 산정해서 이론에 근거한 K_{av} 값을 계산하면,

섭씨 25도 조건에서 대기와 개폐여부에 따라 계수 값은 0.226~0.227 m/day 범위로 현격한 차이는 없었으나 대기와 열린 경우 수체의 흐름 속도에 따라 산정한 계수 값은 0.227~0.813 m/day로 4배가량 차이가 있다(한국방재안전학회, 2016).

3.3 벽체 흡착(Sorption)

저수조 설계시 벽면의 재질도 중요한 요소이며, 벽체 재질에 염소의 흡착에 의해서 수중 내 염소가 손실이 될 수도 있다. 국내 지하저수조의 경우, 벽체 재질로 콘크리트가 40.0%로 가장 많이 사용되고 있고, 스테인레스 강판 (26.1%), Glass-Fiber Reinforced Plastics(FRP) (16.2%)이 그 뒤를 잇고 있다. 대형건축물 및 공동 주택단지 내에서의 저수조 재질(콘크리트, FRP, Sheet Molding Compound(SMC), 스테인리스강판, Poly Ethylene(PE))에 따른 잔류염소 현황연구에 따르면 평균 잔류염소농도는 0.25~0.63 mg/L으로 재질 별 차이가 있는 듯하다(박현건 외, 2009). 하지만 해당 현장조사는 벽체 재질 자체에 의한 감소효과의 정량적인 정보 제공이 없기 때문에 벽체 재질의 염소 흡착 특성을 설계에 활용하기에는 현 단계에서는 한계가 있다. 급수배관 벽에서 잔류염소 흡착을 고려하여 관벽 반응속도상수와 관의 조도계수와 상관계수를 나타낸 미국 EPA의 EPANET 모델 (Vasconcelos et al., 1997; Rossman et al., 1994)이 존재한다. 만일 잔류염소의 흡착계수를 반응 실험을 통해 산정하기 위해서는 Rossman이 개발한 식을 응용하는 것이 용이하다고 판단된다. Rossman은 수도관 벽 흡착반응에 대한 반응식을 제시하였고 (Rossman, 2006), 이를 저수조 내 벽체 흡착반응에 적용하기 위해서 저수조의 단위체적당 표면적 (surface area per unit volume, $\frac{S}{V}$)을 해당 식에 접목하여 본 연구에서는 저수조 내의 벽체 흡착 반응식을 식 (11)과 같이 제안하였다.

$$R_{wall} = \frac{dC}{dt} = - \left[\left(\frac{S}{V} \right) K_{wall} \right] C \quad (11)$$

K_{wall} : 벽체 흡착계수(m/day)

S : 수조 벽체 표면적(m^2)

V : 수조 단위 부피(m^3)

3.4 잔류염소 감소에 관여하는 기작들의 반응계수 값들

잔류염소 감소에 관여하는 기작들을 고려한 저수조 내 잔류염소 감소를 최소화하는 설계를 위해서는 이들 관여 기작들을 수학적식으로 기술할 수 있는 공식들이 필요하고, 이 공식에 사용될 반응계수 값들에 대한 정보가 필수적이다. 저수조 관련 현장 혹은 실험실 조건에서의 잔류염소 감

Table 1. Previously reported coefficient values for reactions involved in chlorine disappearances in distribution system

Condition	Temperature (°C)	Material	K_{Bulk} (1/day)	K_{aw} (m/day)	K_{wall} (m/day)	Reference
실험실	25.4	PVC	1.3702	Not available (N.A.)	0.0187	한국수자원공사(1999)
		PE			0.0337	
		DCIP100			0.1508	
		DCIP80			0.1575	
실험실	16.8	PVC	0.8548	N.A.	0.0129	
		PE			0.0162	
		DCIP100			0.0681	
		DCIP80			0.0981	
실험실	2.5	PVC	0.2526	N.A.	0.0036	
		PE			0.0029	
		DCIP100			0.0093	
		DCIP80			0.0098	
실험실	11	Not Defined (N.D.)	0.1872	N.A.	0.05~0.32	김도환 외(2010)
	4		0.1056	N.A.		
실험실	25	N.D.	0.3864	N.A.	-	한국시설안전공단(2015)
	20		0.2352	N.A.	0.021	
	5		0.1224	N.A.	-	
실험실	24	DCIP100	1.3455	N.A.	0.1814	정원식 외(2004)
		DCIP80			0.3006	
	15	DCIP100	0.9185	N.A.	0.1343	
		DCIP80			0.1949	
	6	DCIP100	0.4543	N.A.	0.0543	
		DCIP80			0.1147	
현장	N.D.	Gray cast iron	1.58	N.A.	0.039624	Wable et al. (1991)
		Ductile cast iron	1.15~2.88	N.A.	0.176784	
현장	N.D.	Gray cast iron	0.12	N.A.	0.0823~0.2621	Kiene and Levi (1993)
실험실	N.D.	Unlined cast iron	0.55	N.A.	0.4572	Rossman et al. (1994)
실험실	N.D.	Asbestos cement	1.16	N.A.	0	Vasconcelos et al. (1997)
		Unlined cast iron	0.83	N.A.	0.758952	
		Unlined galvanized iron	0.23	N.A.	0.271272	
		Cement-lined ductile iron	0.77	N.A.	0.03048	
실험실	N.D.	Cement-lined cast iron	0.00	N.A.	0.073152	Mathieu et al. (1993)
실험실	N.D.	Cement-lined cast iron	0.52	N.A.	0.0762	Parent et al. (1996a)
실험실	N.D.	Cement-lined cast iron	0.54	N.A.	0.298704	Parent et al. (1996b)
실험실	N.D.	Unlined ductile iron	0.25~0.49	N.A.	0.0945~0.1311	Rossman et al. (2001)

소 연구(한국수자원공사, 1999; 김도환 외, 2010; 한국시설 안전공단, 2015; 정원식 외, 2004)는 일부 존재하나, 모두 임의의 재질(FRP, 아크릴 등)로 이루어진 배수지 혹은 저수조에서의 잔류염소 감소계수 측정만이 존재한다. 저수조 내 잔류염소 유지를 위한 구체적인 방안을 마련하기 위해서는 저수조 내 잔류염소의 기작별 반응계수 연구가 필요하다. 하지만, 문헌조사에 따르면 배급수관에 비해 관말 지역과 고지대의 저수조에서의 잔류염소 거동에 관한 연구는 상대적으로 매우 부족하다. 이러한 배경으로 배급수관에서 측정된 반응계수 값이 저수조에서의 것들과 유사

하다고 가정하고 국내외 현장 혹은 실험실 조건에서 측정된 배급수관의 수체 내 분해속도 계수(K_{Bulk}), 증발에 의한 물질이동 계수(K_{aw}), 그리고 벽체 흡착반응 계수(K_{wall})의 문헌값들을 Table 1에 정리하였다.

국내 분해속도 계수(K_{Bulk}) 값들의 문헌 자료들을 보면, 온도가 높아질수록 K_{Bulk} 값이 증가되는 경향을 보이고 있다. 이 경향은 연구 간에 차이가 없으나 유사한 온도의 K_{Bulk} 값은 연구 간에 차이가 있었다. 이는 지역별 혹은 원수 종류별 수중 내 유기물 농도가 차이가 존재하기 때문이라고 추정된다. 벽체에 의한 잔류염소 흡착 반응에 관한 기존의 연

구들은 관벽 재질이 닥타일주철(Ductile Cast Iron Pipe; DCIP)과 플라스틱(Polyvinyl Chloride; PVC, PE), 시멘트에 대해 측정치를 제시하였다. 국내외에서 실험실 및 현장 조건에서의 DCIP 벽체에 의한 흡착 계수 값들을 측정 한 연구들이 가장 많이 되어 있으며, 일반적으로 유사한 경향을 보이고 있다. 그러므로 닥타일주철 벽체를 저수조로 사용하는 경우 벽체에 흡착하는 반응의 계수치는 별도의 실험 없이 Table 1의 값들을 사용해도 될 것으로 보인다. 해외 자료의 경우, 주로 시멘트 재질에서의 실험 결과가 많이 진행되어 있지만, 시멘트 재질은 국내 저수조 벽체 조건에서 사용되지 않고 있으므로 국내 저수조 재질에 적합한 실험이 필요하다. 실험실 조건 결과에 따르면(한국수자원공사, 1999), 플라스틱 표면에 의한 흡착 계수는 DCIP 벽체의 경우보다 적게 나타났다. 이 결과는 PVC나 PE와 같은 플라스틱 재질로 표면이 처리가 된 벽체를 사용하면 DCIP 표면의 벽체를 사용한 경우보다 흡착에 의한 잔류염소 감소를 줄일 수 있다는 것을 시사한다. 따라서 잔류염소 흡착이 최소화 될 수 있는 재질로 처리된 벽체 선정과 흡착 계수 산정이 저수조 설계 과정에 포함할 것을 제안한다.

분해속도 계수와 벽체 흡착 반응 계수 값들은 문헌에서 구할 수 있었지만, 증발에 의한 물질전달 계수 값은 측정치가 문헌에서 제공되고 있지 않았다. 저수조 내에서는 항상 공기와 물이 접촉되는 부분이 존재하고 해당 면적을 통해 휘발성이 강한 염소가 증발된다. Kruger의 연구진은 저수조 수체 표면과 공기에서의 잔류염소농도를 측정하였으나,

공기-물간의 물질전달 속도를 측정하거나 물질전달계수를 산정하지는 않았다(Kruger et al., 2000). 증발에 의한 물질 이동 계수는 식 (7)에서 보는 바와 같이, 잔류염소의 확산(diffusion) 계수 및 Henry Constant 등과 같이 염소물질의 물리화학적 특성치 정보와 더불어서 저수조 내 dispersion과 같은 수리학적 특성에 영향을 받는 K_{water} 와 K_{air} 에 대한 정보가 필요하다. 염소물질의 물리화학적 특성치는 저수조의 조건과 무관하게 수용액 환경에서 측정된 값들을 사용할 수 있으나, 물질전달계수는 저수조 별로 상이한 수리학적 조건에 따라서 차이가 있으므로 개별 저수조의 dispersion 조건을 고려하여 물질전달계수 값을 산정하여야 한다. K_{air} 는 식 (8)을 사용해서 산정하고, K_{water} 는 느린 유속의 경우와 빠른 유속의 경우에 식 (9)와 식 (10)을 각각 사용한다.

4. 저수조 내 잔류염소 감소 최소화를 위한 설계 방안 제시

저수조 내 잔류염소 감소에 관여하는 기작들의 정량적 효과를 비교 분석하기 위해서, 각 기작별 수학적 공식들과 문헌에서 획득된 계수 값들을 활용해서 모델 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해서 서울시 일반적 대형저수조 용량을 기준으로 저수조 용량(volume)을 1000ton으로 가정하고 각각 높이(H; height): 5 m, 폭(W; width): 15 m, 길이(L; length): 15 m로 설정하였으며 수위 높이는 4.5 m로 하였다. 온도는 섭씨 25도로 가정하였고, 수돗물의 유입과 유출이 존재하는

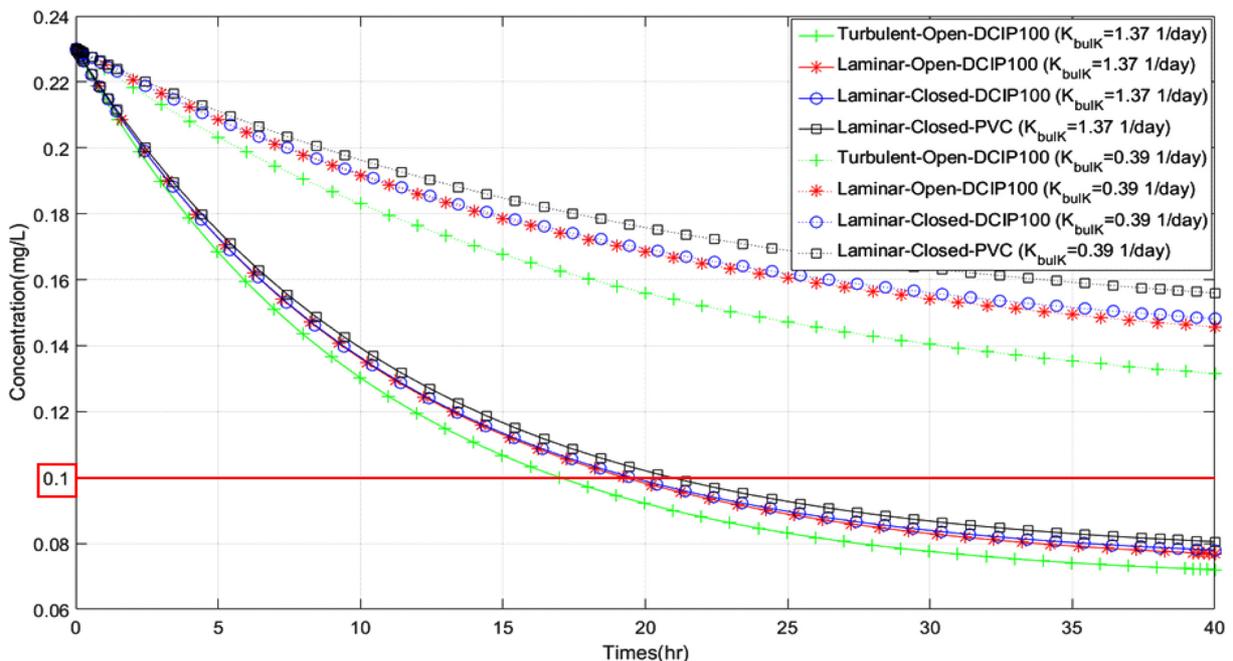


Fig. 5. Simulations of residual chlorine concentrations in water phase

연속교반탱크반응기(CSTR) 조건으로 진행하였다. 초기 잔류염소 농도는 서울시 평균 유입 농도인 0.23 mg/L로 가정하였다. 모델 시뮬레이션에 필요한 기작들의 수학적 모형의 계수 값들은 본 연구의 문헌 조사 결과로 도출된 값들(Table 1)을 사용하였다. 잔류염소 분해속도 계수(K_{Bulk})는 1.37 1/day, DCIP100 재질의 벽체 흡착 계수(K_{wall})는 0.15 m/day을 사용하였다. 증발에 의한 물질전달 계수(K_{ev})는 본 연구에서 도출한 수학적 결과를 이용하여 저수조 내 공기의 유출입이 존재하고 수체 흐름이 난류일 때의 값인 0.227 m/day 사용하였다. 체류시간에 따른 수체 내 잔류염소 농도 변화를 초기 잔류염소 농도로 정규화하여 Fig. 5와 같이 도시하였고 체류시간 16.5시간 이후에 수돗물 잔류염소 기준치(0.1 mg/L) 이하로 감소함을 알 수 있다.

잔류염소 감소를 최소화하는 방안을 도출하기 위해 수체의 흐름 상황 및 벽체 흡착과 증발에 의한 물질전달에 관해서 다양한 시나리오로 추가 시뮬레이션을 수행하였다. 저수조 수체의 흐름이 느리다고 가정(층류의 흐름)하여 시뮬레이션을 적용한 결과, 수돗물 잔류염소 기준치를 초과하는 최단 체류시간이 19.0시간 이후로 증가하였다(Fig. 5). 저수조와 대기 간의 공기 유통을 최소화하여서 공기 중의 염소 농도 수준이 수중의 수준과 동일하다고 가정하고(즉 증발에 의한 물질전달이 없다고 가정), DCIP100 재질의 벽체 조건에서 동일한 시뮬레이션을 수행한 결과, 수돗물의 잔류염소 기준치를 초과하는 최단 체류시간이 19.4시간 이후로 약간 증가되었다. 벽체의 흡착능력이 DCIP100 재질보다 약 10배 정도 적은 플라스틱 계열의 PVC 재질로 코팅된 벽체($K_{wall}=0.019$ m/day)와 공기 유통을 최소화 조건을 동시에 적용하면, 수돗물의 잔류염소 기준치를 초과하는 시간이 20.6시간 이후로 증가되었다. 저수조 내 수체의 유기물 농도에 따라 잔류염소 분해속도 계수(K_{Bulk})가 상이하게 관측될 수도 있다. 따라서 수질이 보다 더 좋은 유입수의 조건(유기물 농도가 낮은 $K_{Bulk}=0.37$ 1/day)에서 앞서 기술된 동일한 네가지 조건에서 시뮬레이션을 진행해보았다. 그 결과, 체류시간 40시간 이내에서 모두 수돗물 잔류염소 하향 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

이를 통해 수돗물 내 산화물질(유기물 등) 농도가 저수조 내 잔류염소 감소에 가장 큰 영향을 끼치며, 유기물 농도가 낮은 유입수가 공급되는 것이 저수조 내 잔류염소 유지에 주요한 방안임을 판단할 수 있다. 수돗물의 급격한 유입(난류 발생)이 잔류염소 감소에 두 번째로 영향을 미친다. 저수조 내 공기의 유출입은 미미하게 감소 영향을 보였으며 재질 특성상의 흡착 정도에 따라 잔류염소 감소율이 다르게 진행될 수 있음을 보였다. 따라서 설계적인 측면에서는

수돗물 유입시 난류발생을 최소화하고 흡착능이 낮은 벽체 사용하여 공기의 유입을 최소화 할 수 있는 저수조 설계가 잔류염소 감소 최소화를 가능케 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

안전한 수돗물 공급을 위해서 일정 잔류염소 농도가 유지되어야 하지만 국내 급수시설 및 저수조 잔류염소 현황을 살펴 본 결과, 수도꼭지의 잔류염소가 기준치보다 낮아질 수 있는 개연성이 존재함을 알 수 있었다. 이러한 결론에 대한 근거는 (1) 정수처리 과정에서 염소 사용량 감소 추세, (2) 급수배관 내에서 잔류염소의 30-60% 수준의 손실, (3) 여름철의 높은 온도에 의한 잔류염소 분해 속도 증가, (4) 급수배관의 노후화에 따른 잔류염소 손실, (5) 저수조 내 저장시 잔류염소 감소 발생이 국내 현황 자료에서 관찰되었다는 점이다. 이러한 경향들은 수돗물 내 잔류염소량 감소를 야기할 수 있으므로, 특히 저수조 연계된 급수공급의 경우에는 잔류염소 감소에 의한 영향에 대해서 면밀한 조치가 필요하다. 현재는 저수조 설치 허가 및 설계 과정에서 잔류염소 감소에 미치는 다양한 기작들에 대한 고려가 포함되어 있지 않고 용량과 체류시간에 대한 규정 혹은 지침만이 제시되고 있으나, 현황에 대한 문헌 자료들에 따르면 용량 및 체류시간은 잔류염소 감소와 뚜렷한 상관성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 문헌조사 결과 저수조 내 잔류염소 감소를 최소화하는 합리적인 방안 도출을 위해서 잔류염소 감소에 관여하는 기작들을 고려하는 것이 필요함을 강력하게 시사하고 있다.

저수조 내 잔류염소 감소에 관여하는 주요 기작으로 (i) 수체 내 분해 반응(Bulk decomposition), (ii) 증발(탈기) 반응(Evaporation), 그리고 (iii) 벽체 흡착 반응(Sorption)에 대해 본 연구에서 심층적인 문헌조사를 수행하였다. 이러한 기작들을 이론적으로 적절하게 설명할 수 있는 수학적 공식들을 문헌에서 선별하고 이 공식들에 필요한 계수 값들을 문헌을 통해서 획득하였다. 이 공식들과 계수 값들을 이용하여 저수조 내 잔류염소 감소의 최소화 방안 도출을 위한 모델 시뮬레이션을 임의의 저수조 조건에서 다양한 시나리오로 수행하였다. 그 결과, 동일한 온도 하에 수돗물 내 유기물 농도(수질 오염 수준)관리가 잔류염소 감소 최소화에 가장 중요하고, 저수조로 수돗물 유입시 난류 발생의 최소화와 염소 흡착능이 적은 벽체 재질의 사용이 그 다음으로 중요함을 알 수 있었다. 저수조의 공기상이 대기와 개폐 여부는 영향이 있으나 상기 요인들에 비해서 그 영향이 크지 않았다.

본 연구에서 획득된 결과들은 잔류염소 감소를 최소화해서 안전한 수돗물 공급을 가능하게 하는 새로운 저수조 설계기법이나 기술 개발에 유용하게 활용될 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 국토교통부(2016), 주택건설기준 등에 관한 규정 제35조 (비상급수시설).
2. 광필재, 황재운, 김석구, 이현동(2005), 지하저수조에서의 수리적 거동과 수질변화 특성. 2005 년도 대한토목학회 정기 학술대회, 364-367.
3. 기상청(2016).
4. 김도환, 이두진, 김경필, 배철호, 주혜은(2010), 배·급수관망의 잔류염소 확보를 위한 적정 재염소 주입량 산정 및 효과 분석. 대한환경공학회지 제, 32(10).
5. 박현건, 류승철, 전수임(2009), 연구논문: 저수조의 효율적 관리를 위한 수질실태에 관한 연구. 한국환경과학회지, 18(12), 1339-1347.
6. 상수도사업본부 수질과(2006), 정수장 수질 검사 현황(1월~8월), 서울시 상수도사업본부.
7. 상수도사업본부 수질과(2015a), 정수장 수질 검사 현황(1월~12월), 서울시 상수도사업본부.
8. 상수도사업본부 수질과(2015b), 수도꼭지 수질 검사 현황(1월~12월), 서울시 상수도사업본부.
9. 상수도사업본부 수질과(2016a), 정수장 수질 검사 현황(1월~8월), 서울시 상수도사업본부.
10. 상수도사업본부 수질과(2016b), 수도꼭지 수질 검사 현황(1월), 서울시 상수도사업본부.
11. 상수도사업본부 수질과(2016c), 수도꼭지 수질 검사 현황(8월), 서울시 상수도사업본부.
12. 서울정책아카이브(2016), 직결급수체계 전환, 상수도사업본부 급수부 급수계획과.
13. 송영일, 안수나, 안성윤, 서대근, 조혁진, 이재성, 최일환. 신창수, 이희숙(2016), 논문(論文): 관망에서의 소독부산물 변화와 관련 영향인자들의 상관관계 분석. 대한환경공학회지, 38(2), 63-70.
14. 전미희(2015), 대형건축물 저수조 수질현황 및 관리방안 연구. 경상남도 보건환경연구원.
15. 정원식, 김이태, 이현동, 유명진(2004), 논문: 잔류염소 분해 특성을 고려한 소규모 배수지의 수질관리-서울시 영등포 정수사업소 배수계통의 화곡배수지를 대상으로 한 현장연구. 서울시연구, 5(2), 27-43.
16. 한국방재안전학회(2016), 방재안전측면에서의 공동주택 저수조 적정용량 평가를 위한 연구.
17. 한국수자원공사(1999), 수돗물의 2차오염 방지기술.
18. 한국수자원공사(2014), 건강한 수돗물 공급 시범사업 보도 자료.
19. 한국시설안전공단(2015), 잔류염소 감소계수를 이용한 상수관망 잔류염소 분석 및 재염소 주입량 예측.
20. 환경부(2009), 수도시설의 청소 및 위생관리 등에 의한 규칙.
21. 환경부(2010), 상수도시설기준.
22. 환경부(2014), 2013 상수도통계.
23. Coulson, J. M., Richardson, J. F. (1964), Chemical Engineering: Fluid Flow. Pergamon.
24. Cussler, E. L. (1997), Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems (2nd ed.). New York: Cambridge University Press. ISBN 0-521-45078-0.
25. Feben, D., Taras, M. J., Faber, H. A., Hedgepeth, L. L. (1951), Studies on Chlorine Demand Constants [with Discussion]. Journal (American Water Works Association), 43(11), 922-932.
26. Geldreich, E. E., Fox, K. R., Goodrich, J. A., Rice, E. W., Clark, R. M., Swerdlow, D. L. (1992), Searching for a water supply connection in the Cabool, Missouri disease outbreak of Escherichia coli O157: H7. Water Research, 26(8), 1127-1137.
27. Greenwood, N. N., Earnshaw, A. (1984), Chemistry of the Elements.
28. GSI Environmental (2014), GSI Chemical Database.
29. Kennedy, M. S., Moegling, S., Sarikelle, S., Suravallo, K. (1993), Assessing the effects of storage tank design on water quality. Journal-American Water Works Association, 85, 78-78.
30. Kiene, L., Lu, W., Levi, Y. (1993, June), Parameters governing the rate of chlorine decay throughout distribution system. In Proceedings of AWWA Annual Conference, Water Quality (pp. 6-10).
31. Kruger, E., Viljoen, J., Lachmann, G., Pienaar, J. J. (2000), Chlorine decay on concrete surfaces and losses to the atmosphere in water storage facilities.
32. Mathieu, L., Block, J. C., Dutang, M., Maillard, J. (1993), Control of biofilm accumulation in drinking-water distribution systems. WATER SUPPLY-OXFORD-, 11, 365-365.
33. Murphy, S. B. (1985), Modeling chlorine concentrations in municipal water systems (Doctoral dissertation, Montana State University-Bozeman, College of Engineering).
34. NIST (2015). The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty. US National Institute of Standards and Technology. Retrieved 2015-09-25.
35. Parent, A., Saby, S., Sardin, M., Block, J. C., Gatel, D. (1996a, November). Contribution of biofilms to the chlorine demand

- of drinking water distribution systems. In Proceedings of AWWA 1996 Water Quality Technology Conference, Part II (pp. 17-21).
36. Parent, A., Fass, S., Dincher, M. L., Reasoner, D., Gatel, D., Block, J. C. (1996b), Control of coliform growth in drinking water distribution systems. *Water and Environment Journal*, 10(6), 442-445.
37. Powell, J. C., Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F., Simms, J. (2000), Factors which control bulk chlorine decay rates. *Water Research*, 34(1), 117-126.
38. Rossman, L. A. (2006), The effect of advanced treatment on chlorine decay in metallic pipes. *Water Research*, 40(13), 2493-2502.
39. Rossman, L. A., Brown, R. A., Singer, P. C., Nuckols, J. R. (2001). DBP formation kinetics in a simulated distribution system. *Water Research*, 35(14), 3483-3489.
40. Rossman, L. A., Clark, R. M., Grayman, W. M. (1994), Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 803-820.
41. Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., Imboden, D. M. (2005), *Environmental Organic Chemistry*. John Wiley & Sons.
42. Staudinger, J., Roberts, P. V. (1996), A critical review of Henry's law constants for environmental applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 26(3), 205-297.
43. Vasconcelos, J. J., Boulos, P. F. (1996), Characterization and modeling of chlorine decay in distribution systems. American Water Works Association.
44. Vasconcelos, J. J., Rossman, L. A., Grayman, W. M., Boulos, P. F., Clark, R. M. (1997), Kinetics of chlorine decay. *Journal-American Water Works Association*, 89(7), 54.
45. Wable, O., Dumoutier, N., Duguet, J. P., Jarrige, P. A., Gelas, G., Depierre, J. F. (1991), Modeling chlorine concentrations in a network and applications to Paris distribution network. *Proc. Water Quality Modeling in Distribution Systems*. AWWA Research Foundation, US EPA, Cincinnati, OH.
46. William W. Nazaroff, Lisa Alvarez-Cohen (2001), *Environmental Engineering Science*.
47. Zhang, G. R., Kiene, L., Wable, O., Chan, U. S., Duguet, J. P. (1992), Modelling of chlorine residual in the water distribution network of Macao. *Environmental Technology*, 13(10), 937-946.