

잔류염소 분해특성을 고려한 소규모 배수지의 수질관리

- 서울시 영등포정수사업소 배수계통의 화곡배수지를 대상으로 한 현장연구 -
정 원 식* · 김 이 태* · 이 현 동** · 유 명 진***

Water Quality Management in Small Water Distribution Reservoir Using Residual Chlorine Decay

- Field Study for Hwagok Reservoir in Yongdungpo Water Distribution System
in Seoul -

Won-Sik Chung* · I-Tae Kim* · Hyun-Dong Lee** · Myong-Jin Yu***

요약 : 본 연구는 세가지 관점에서 수행되었다. 첫째는 실험실과 현장의 잔류염소분해 실험을 통해 관내 및 배수지내 잔류염소 분해 특성을 분석하여 분해상수 K값을 구하고, 둘째, 수질영향인자에 따른 잔류염소 분해 예측식을 도출하며, 마지막으로 예측식을 이용하여 배수지내 잔류염소 감소를 모의하여 수리적인 혼화형태를 평가하고 염소농도를 유지할 수 있는 계절별 배수지 관리 방안을 제시하고자 하였다. 실험실 및 현장의 잔류염소분해 특성 비교 결과, 관내 및 배수지에 대한 잔류염소 분해상수(K)값은 실험실 값이 현장 측정값보다 각각 2.4~3.2배와 1.2~1.4배 크게 나타났다. 또한 수온에 따른 관내 및 배수지의 분해상수는 각각 1.26 및 1.22배로 수온이 높은 여름철이 겨울보다 큰 것으로 나타났다. 또한 배수지내 잔류염소 분해에 미치는 주요 영향인자는 수온, 초기 잔류염소농도, 유기물, 체류시간인 것으로 나타났다. 그리고 예측식을 이용한 대상 배수지내 잔류염소분해 특성을 모의한 결과 유입수가 비교적 양호하게 혼합되는 것으로 판단되었으며, 수위조절을 통해 효과적인 잔류염소농도 유지 및 저류의 역할을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 잔류염소, 배수지, 염소분해상수

ABSTRACT : This study focused on the three viewpoints which were to investigate the kinetics of residual chlorine decay in pipe and reservoir, and compare the kinetics of laboratory and field, and predict the decay equation according to various factors which were water temperature, initial chlorine concentration levels, consumed KMnO_4 , and modelling chlorine decay in distribution reservoir. The results of chlorine decay analysis in pipe wall and reservoir represented that the decay coefficient K values of pipe wall and reservoir in laboratory are respectively high 2.4~3.2 and 1.2~1.4 times than field test, also, the major influence factors were water temperature, initial concentration of residual chlorine, consumed KMnO_4 , and hydraulic retention time. From

* 한국건설기술연구원 건설환경연구부 선임연구원(Senior Researcher, Construction Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology)

** 한국건설기술연구원 건설환경연구부 수석연구원(Research Fellow, Construction Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology)

*** 서울시립대학교 환경공학부 교수(Professor, Department of Environmental Engineering, The University of Seoul)

modelling chlorine decay in field reservoir using this prediction equations, the influent in model reservoir were completely mixed. Therefore, HRT or water depth control with water temperature(or seasons) as optimal methods for effective water quality management in model reservoir is proposed.

Key Words : Residual Chlorine, Water Reservoir, Chlorine Decay Coefficient

I. 서론

상수도 배수시스템에서 정수는 생물학적, 물리화학적, 심미적 수질변화가 일어나며, 수질 변화는 일반적으로 수질이 악화되는 방향이다(Levi and Mallevialle, 1996). 이러한 상수관망내 수질의 특성 및 거동을 예측하고 법적인 안전성을 보장하는 지표로서 잔류염소가 이용되며, 상수관망내 수질관리를 위한 잔류염소농도의 관리는 수돗물의 안전성을 확보하기 위한 가장 중요한 문제이다(Vasconcelos et al., 1997). 특히 상수도시스템에서 잔류염소농도의 부족은 공중 위생에 심각한 영향을 줄 가능성이 있으며, 잔류염소는 배수시스템에서 세균의 재성장을 방지하기 위한 필수적인 소독제로 이용된다(Clark and Coyle, 1994).

잔류염소는 탁도, 소독 스트레스(stressing)에 의한 염소의 급속한 효율 저하가 문제로 대두되고 있으며 특히 거대한 배수관망의 중간 이후에서 심각한 문제로 제기되고 있다. 또한 pH의 변화나 유기성 클로라민류로 인한 염소효율의 저하 역시 소독력에 좋지 않은 영향을 주고 있다. 이를 위해 관말까지 잔류염소 분해 특성을 파악하고 미생물학적 안전성을 확보할 수 있도록 적절한 잔류염소 농도를 유지할 필

요가 있다. 그러나 관말지역까지 충분한 잔류염소 농도를 유지하기 위해 정수지의 잔류염소량을 높이는 방법은 염소의 과량 주입으로 인해 맛과 냄새 문제 및 THMs이나 납과 구리의 농도 증가를 유발할 위험성이 있다. 이러한 양면적인 문제를 해결하기 위해 잔류염소의 분해 특성을 분석하고 적합한 잔류염소를 유지시키기 위한 방안이 필요하다(Levi and Mallevialle, 1996).

국내에서 상수도 배수시스템내 잔류염소 변화와 관련된 연구를 보면, 이현동 외(1997)는 상수도관망의 배수계통내 수질변화 조사에서 잔류염소의 감소에 가장 커다란 영향을 미치는 구역은 배수지, 가압장 그리고 저수조 등 관말지역의 정체구역이라고 보고하였다. 특히 저류시설은 체류시간의 증가와 함께 기·액경계면의 존재, 이물질의 유입가능성 등에 따라 관로내 정체구역에 비해 잔류염소의 감소 경향이 크게 나타난다. 또한 이목영 외(2000)에 의하면 서울시내 옥상 물탱크내 수질변화 조사 결과, 잔류염소가 평균 0.454mg/L 감소하고 조사지점의 40%에서 0.2mg/L 이하를 나타내었다. 현인환 외(2000)는 수돗물에 있어서 잔류염소농도 감소계수에 관한 연구에서 실제 배수지를 1/30로 축소한 모형배수지를 이용하

여 휘산과 수체에 의한 잔류염소분해 특성을 평가하여, 표면적/용적비(A/V)가 6.63m^{-1} 일 때 휘산에 의한 잔류염소분해계수는 0.0265hr^{-1} 로 수체에 의한 상수값 0.0554hr^{-1} 의 약 48%임을 제시하였다. 또한 현인환 외(2001)는 송배수시스템에서 잔류염소 변화의 계절적 특성 연구에서 실제 관로에서 염소농도 관리를 위해서는 여름철 물소비량이 적은 새벽에 관말 지역의 정체구역에 대한 모니터링 강화방안을 제시하였다. 또한 이현동 외(1999)는 상수도 배수시스템의 저류시설내 잔류염소분해 특성 연구에서 배수지내에서 온도, 초기 염소농도, 유기물질 등을 인자로 한 잔류염소분해 특성에서 수온이 $2.5\sim 25.4^{\circ}\text{C}$ 인 범위에서 $0.0257\sim 0.4301\text{day}^{-1}$ 로 큰 차이를 보여 염소분해 반응을 온도의 함수로 나타낸 이전의 연구(Gotoh, 1989)와 일치하는 결과를 제시하였다. 또한 아크릴 수조를 이용하여 여러 가지 수질 조건을 변화시켰을 때 잔류염소분해에 미치는 영향은 초기 잔류염소농도에 대해서는 5°C 에서 초기 잔류염소농도가 0.45mg/L 에서 1.0mg/L 로 높아졌을 때 0.4849 에서 0.1383day^{-1} 로 낮아져 음의 상관관계를 가지고, KMnO_4 소비량은 온도, 초기잔류염소농도에 비하여 잔류염소분해상수와 상관관계가 낮았으며 특히 낮은 온도에서는 영향을 미치지 않음을 보고하였다.

이와같이 배수시스템내에서 배수지 및 저류조 등의 정체구역에서 잔류염소 분해는 소독력의 지속성과 수질관리에 매우 중요한 인자로 작용한다. 또한 저류시설의 중요성은 수요량 변동의 완충작용 및 비상시 급수시설, 소비자가 공급받는 물에 대한 가장 근접한 정보 제

공, 긴 체류시간 및 외부오염원으로부터 수질 악화 가능성, 재염소 처리 등의 수질관리 장소 제공 등의 역할에서 잘 나타난다.

배수시스템의 관내 잔류염소분해에 미치는 영향인자에 대한 연구를 보면, 주대성 외(1988)는 상수관망내 잔류염소 농도 분포 예측에서 관벽의 염소분해상수는 배수구역 전체에 걸쳐 한가지 값을 대입하기보다 관경, 관재질, 관 매설 연한, 관 세척주기 등을 고려하여 세부구역으로 나누어 다른 값을 적용하는 것이 실측값과의 오차를 줄일 수 있는 방법이라고 하였다. 또한 수체내 염소분해상수(K_b)는 플라스크를 통해 쉽게 구할 수 있으나 관벽 염소분해상수(K_w)는 각 구간별 관내부 특성에 따라 특정한 값이 주어질 수 있는 관계식을 유도하는 것이 필요하다고 보고하였다. 최근 김성진 외(2003)는 상수도관내의 부식생성물에 의한 잔류염소 감소 특성 연구에서 동일한 관중에서 매설년도와 잔류염소농도의 감소는 커다란 상관관계가 없음을 보고하였다. 특히 아연도강관과 회주철관에서 채취된 시료의 성분비는 비슷하지만 동일조건에서도 회주철관에서 급격한 잔류염소의 감소를 나타내었는데 이는 높은 철의 농도와 DOC 농도가 잔류염소의 감소에 주된 인자로 작용한다고 보고하였다.

이와 같이 상수도 배수시스템내에서 수질관리의 지표가 되는 잔류염소농도의 변화에 대하여 많은 현장조사 및 실내실험이 수행되었으며, 연구자들에 따라 염소분해상수 K값은 다양한 영향인자를 가지고 있음을 보고하고 있다. 그러나 실제 관내 및 배수지에 대한 잔류염소 분해 거동을 분석한 연구는 부족한 실정이다. 특히

위의 많은 연구자들이 제시한 바와 같이 배수 시스템내 잔류염소 거동에 미치는 영향인자는 배수계통의 site-specific한 특성을 가지고 있으므로 현장 연구가 필요한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 관말지역에 위치한 소규모 가압장 및 배수지에서의 잔류염소 분해 거동을 파악하고, 수질관리 측면에서 소규모 배수지의 한계 잔류염소농도 관리 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 첫째, 실험실 및 현장 실험을 통해 관내 및 배수지내 잔류염소 분해 특성을 분석하여 잔류염소 분해상수 K값을 구하고, 둘째, 수질영향인자에 따른 잔류염소 분해 예측식을 도출하며, 마지막으로 배수지내 농도감소를 모의하여 혼화형태를 평가하고, 계절에 따른 수위조절 등의 배수지 수질관리방안을 제시하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 상수도 배수시스템내 잔류염소 분해

1) 관내 염소분해 특성

상수도관망내 잔류염소분해는 일반적으로 영차(zero-order), 일차(first-order), 2차(second-order) 반응으로 감소하는 것으로 알려져 있으나 대부분의 연구자들은 염소분해 모델이 단순한 일차반응으로 특징지어진다고 결론을 내렸으며 현재 국내외의 많은 도시들에서는 상수도관내의 잔류염소를 예측하는 데 있어 일차반응모델 혹은 변형 일차반응모델식을 적용하고 있다.

상수도관내에서의 염소분해는 초기 잔류염

소농도 외에 수온, 관경, TOC, 관재질, 관표면의 생물막형성여부, 관표면에서의 부식상태 등 여러 수질인자들에 의해 영향을 받게 된다. 그리고 Wable et al.(1991)의 실험에 의하면 같은 물을 플라스크와 회주철, 닥타일 주철관에 채우고 염소분해를 관측한 결과 각 재질별로 염소분해에 큰 차이가 나타났다고 한다. 이 실험에서 플라스크에서의 실험은 관벽의 영향이 없는 상태에서 수체에 의한 염소분해를 관측하기 위한 것으로서 일차반응으로 나타났다.

이와 같이 상수도관내에서 잔류염소의 분해 특성은 수질인자, 관중 및 관경, 그리고 정체 및 흐름의 수리학적 인자 등 여러 가지 영향인자가 복합적으로 작용하고 있다. 특히 수체 즉 bulk상의 반응은 수중의 유기물, 무기물 등 산화성소비물질에 따라 그 분해속도가 달라진다. 잔류염소의 대표적인 분해식은 일차(first-order) 속도방정식이 이용되며, 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{dC}{dt} = -kC \rightarrow C(t) = C_0 e^{-kt} \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서, k: 1차 감소속도 상수(d⁻¹),
- C(t): t에서의 염소농도(mg/L),
- C₀: 초기염소농도(mg/L),
- t: 관에서의 체류시간(days)

또한 잔류염소농도의 감소는 수체내 1차반응과 관벽에서의 1차 혹은 0차의 질량전달 제한반응으로 나타낼 수 있으며, 관벽의 반응속도상수는 관의 조도계수에 반비례한다(Vasconcelos

et al., 1997). 그러나 수체내 반응상수와 관벽의 반응상수는 현장의 특성에 따라 매우 다양하게 나타나므로 상수관망시스템의 특성 즉 관중 및 관벽의 영향, 수리학적 영향, 기타 수질영향에 따른 잔류염소분해 특성을 파악하는 것이 필수적이며, 관벽반응을 고려한 잔류염소 예측모델은 미국환경보호청(EPA)의 EPANET 모델이 있다(Rossmann, 1994). EPANET 모델에서는 잔류염소 농도를 모의하기 위해 일차 반응식의 관련인자들을 보정할 수 있도록 다음과 같이 k_t 값에 관벽 분해(k_w)와 Bulk상 분해(k_b)를 반영하고 있다(AWWARF, 1996).

잔류염소 분해 영향인자는 초기농도, k_t (분해상수), 체류시간, 수온, 오염물질량, 관경, 조도계수 등으로 알려져 있다. Johnson(1978), Murphy(1985) 등은 염소분해 모델을 단순한 일차반응으로 특징지우고 있으며, Trussell(1992)은 부식속도와 잔류염소소비의 양적인 관계를 제시하고 있으며, LeChevallier et al.(1990)은 bulk 흐름과 관벽간의 질량 전달을 주요 염소소비 영향 인자로 제시하였다. 또한 Biswas & Clark(1993)는 염소에 대하여 물의 흐름반응과 방사상 분산, 연속적인 관벽반응을 포함하는 정상상태 흐름조건 모델을 개발하였으며, Rossmann et al.(1994)은 질량전달 기초 모델을 제안하였는데 non-steady flow에 적용, 유체흐름에서 관벽으로 전달되는 염소의 속도에 영향을 받는 관벽반응의 전체속도를 이용하였다.

2) 배수지내 염소분해 특성

배수시스템에서 수송기능을 담당하고 있는

관로와는 달리 배수지는 공급량의 안정적 조절이라는 측면에서 매우 중요한 위치에 있으나, 수질적인 측면에서는 체류시간의 증가, 외기와의 접촉 등으로 2차적인 오염이 발생할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 특히 배수시스템에서 배수지의 중요성은 물수요량 변동의 완충작용 및 비상시 급수시설, 소비자가 공급받는 물에 대한 가장 근접한 정보 제공, 긴 체류시간 및 외부오염원에 의한 수질악화 가능성, 재염소투입 등 수질제어 장소 제공 등이 있다. 따라서 효율적인 배수지 관리를 위해서는 잔류염소분해 특성을 고려한 체류시간의 산정, 혼화형태 등을 배수지의 설계시 고려하고, 운영 및 유지관리시 활용하여야 한다.

細井由彦(1995)는 배수지내 혼화특성에 따른 잔류염소감소식을 제시하고 있으며, 배수지내 잔류염소분해상수 예측식을 다음과 같이 온도와 과망간산칼륨소비량의 함수로 나타내었다.

$$K = \exp[0.074 \times T + 0.20 \times (KMnO_4 \text{ 소비량}) - 6.49] \dots\dots\dots (2)$$

잔류염소분해에 미치는 유기물질의 영향은 식 (3)에서와 같이 k_b 값의 변화에 영향을 미칠 수 있다.

$$k_b = a[KMnO_4 \text{ demand}] \exp \left[\frac{-b}{T} \right] \dots\dots\dots (3)$$

여기서, T: 수온 (°K), a, b: 상수(무차원)

이와 같이 배수지에서는 혼화특성, 초기 잔류염소농도, 온도, 염소소비물질의 농도 그리고 체류시간이 잔류염소분해의 특성을 좌우한다. 실제 배수지는 완전혼합 반응조가 아니고 유입과 유출이 있으며 자유수면이 존재하므로 전체 잔류염소의 농도는 균일하지 않다. 따라서 배수지 역시 형태와 유입·유출에 따른 혼합 형태에 따라 농도 분포가 다르므로 이를 고려한 설계가 시행되어야 할 것으로 판단된다.

따라서 배수시스템에서 관내 및 배수지내의 잔류염소분해 속도상수 K값을 구하면 목표지점에 대한 잔류염소의 감소되는 농도를 예측할 수 있으나 잔류염소의 반응은 시스템에 따른 다양한 특성을 가지고 있으며 특히 K값에 미치는 영향 인자도 다양하다. Vasconcelos et al.(1997)은 다양한 연구자들의 결과를 정리하였는데 k값에 영향을 미치는 인자가 수질, 수온, 유속, 관재질, 관과의 접촉면적 또는 젖은 표면, 온도, 관내면 코팅 형태와 관계가 있다고 하며, 일부는 관경, 관재질, 유입유속의 함수라고 하였다.

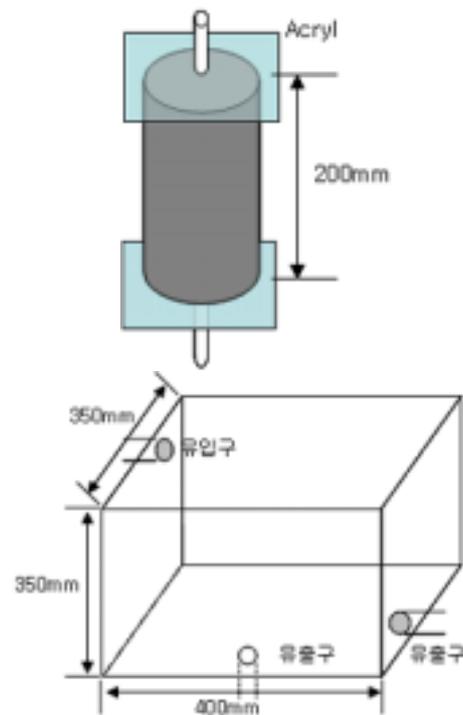
2. 실내 실험

1) 재료 및 장치

실험실내 실험은 관중 및 배수지내에서 다양한 영향인자에 따른 잔류염소 분해특성을 파악하기 위한 기초실험으로 Wall Effect 실험, 배수지 모형실험을 실시하였다. 본 연구에서 잔류염소 농도는 모두 유리 잔류염소를 의미하며, 분석은 HACH사의 Pocket Colorimeter를 이용하였다.

Wall Effect 실험은 관벽의 영향을 파악하기 위해 잔류염소 분해상수 중 k_w 값을 결정하기 위한 Batch Test 장치와 k_b 값의 결정을 위해 조도계수를 무시할 수 있는 삼각 플라스크를 사용하였다. k_b 값의 결정을 위한 Bulk 시험은 Erlenmeyer 20set를 이용하였다.

관중 및 관경에 따른 관벽에서의 잔류염소 분해 특성 파악을 위한 Wall Effect 실험에 이용된 장치는 DCIP($\varnothing 75$, $\varnothing 100$), PVC($\varnothing 75$), PE($\varnothing 75$) 등의 관중 및 관경을 길이 200mm로 제작하여 실험하였다. 또한 배수지 모형을 이용한 실내 실험은 아크릴을 가공하여 $350 \times 350 \times 400$ mm의 사각형 반응조를 제작하여 이용하였으며, <그림 1>에 각 모형장치의 개략도를 나타내었다.



<그림 1> 실내실험에 사용된 관 및 배수지 모형 장치

실험에 이용된 시수는 서울시 영등포 정수사업소 3공장에서 기존 정수처리공정으로 처리된 것으로 정수지에 연결된 송수관에서 분기하여 공급받았다. 시수의 초기 잔류염소농도는 계절에 따라 0.5mg/L~0.9mg/L의 농도를 보이며, 본 실험에서는 초기 잔류염소 농도를 실험조건에 따라 1.0~2.1mg/L로 조절하여 사용하였다. 시수의 수질특성은 <표 1>과 같다.

<표 1> 시수의 수질특성

항 목	농 도
Free-Chlorine	1.0~2.1
Alkalinity (mg/L)	45
Consumed KMnO ₄ (mg/L)	1.58
TOC (mg/L)	0.86
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.3
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	21.5
Cl ⁻ (mg/L)	7.97
pH	7.19
Temperature (°C)	2~28.2
NH ₃ -N (mg/L)	0.294
Cu (mg/L)	0.034
Mn (mg/L)	0.011
Fe (mg/L)	0.001
Zn (mg/L)	0.058

2) 실험 방법

잔류염소 분해상수를 도출하기 위한 실내 실험으로 Bulk Test 및 Wall effect 실험은 계절별 Batch Test를 수행하였으며, 아크릴 반응조 4조를 이용한 배수지 모형 실험은 운전인자로 잔류염소 영향인자인 염소소비물질(KMnO₄ 소비량), 온도, 초기 잔류염소농도를 조절하여 실험을 수행하였다. 염소소비물질의 농도 조절은 정수장 여과지 역세척수를 혼합하여 조절

하였으며, 배수지 모형실험에 이용된 배수지 모형 운전조건은 <표 2>에 나타났다.

잔류염소 분해상수 K값을 구하기 위한 시료의 분석은 30분 간격으로 채수하여 측정하였으며, 잔류염소 분해상수는 시료채취단계별과 누적단계별 값을 구하였고 계산식은 1st order exponential decay 방정식을 이용하였다.

<표 2> 배수지 모형 실험 운전조건

Parameter Reactor	Temperature (°C)	Initial free Chlorine (mg/L)	Consumed KMnO ₄ (mg/L)
			Backwashing Wastewater
R1	· Winter season 4~7	1st: 0.4~0.5	Non-Control
R2			3
R3	· Spring season 12~17	2nd: 0.6~0.8	4
R4			6
	· summer season 20~25	3rd: 1.0~1.1 4th: 1.3~1.5	

3. 현장 실험(Field Test)

1) 대상 가압장 및 배수지

현장에서 관내 및 배수지내 잔류염소 분해 특성을 분석하기 위한 실험 장소는 영등포 정수사업소 배수계통에 있는 화곡배수지로 용량은 1,300m³(20×16×4m)이고, 형태는 장방형으로 이루어져 있다. 배수지 유입수는 한신가압장에서 가압되며, 가압장의 펌프용량은 70HP, 170m³/h이다. 한신가압장과 화곡배수지까지 연결관로는 관경 300mm의 회주철관이며, 거리는 2km이다.

2) 실험 방법

가압장의 펌프운전 시간과 배수지의 유량변

화를 파악하고, 펌프 정지시와 가동시의 잔류염소 분해 특성을 파악하였다. 정지시는 펌프가 정지한 후 가압장에서의 잔류염소 농도 변화를 관찰하였으며, 펌프 가동시는 가압장과 배수지의 잔류염소 농도 변화를 이용하여 분해상수를 구하였다. 시료의 채수는 잔류염소는 1시간 간격, 기타 수질항목은 4시간 간격으로 24시간 실시하였으며, 8, 9, 10월 각각 1회(3차 수행) 실시하였다. 분석된 시료의 수질특성은 <표 3>과 같다.

<표 3> 현장실험 수질특성

항 목	1차 (8.15)	2차 (9.15)	3차 (10.15)
Water Temp.(°C)	26	18	16.6
pH	7.1	7.14	7.13
Conductivity(μS/cm)	136.3	150.2	138
Consumed KMnO ₄ (mg/L)	0.69	1.41	1.7
Akalinity(mg/L)	32	34	32
Hardness(mg/L)	50	53	50
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	18.2	19	17.3
Cl ⁻ (mg/L)	9.2	8.4	9.8

III. 결과 및 고찰

1. 실내실험에 의한 염소분해상수 도출

1) 관내 Wall Effect 특성

관벽과의 반응에 의한 잔류염소 분해 특성을 평가하기 위한 Wall effect 실험 결과를 <표 4>에 나타내었다. 환경에 따른 k_w 값은 100mm와 80mm에서 각각 0.1818803m/day와 0.3005847m/day로 나타나 환경이 적은 80mm관에서 잔류염소 분해가 활발하게 일어남을 알 수 있다.

<표 4> Wall Effect 실험 결과

k_b (/day)					
여름		겨울		봄	
1.34548		0.45426		0.918543	
k_w (m/day)					
여름(24°C)		겨울(6°C)		봄(15°C)	
DCIP100	DCIP80	DCIP100	DCIP80	DCIP100	DCIP80
0.1813803	0.3005847	0.0540287	0.1146543	0.1342635	0.1948982

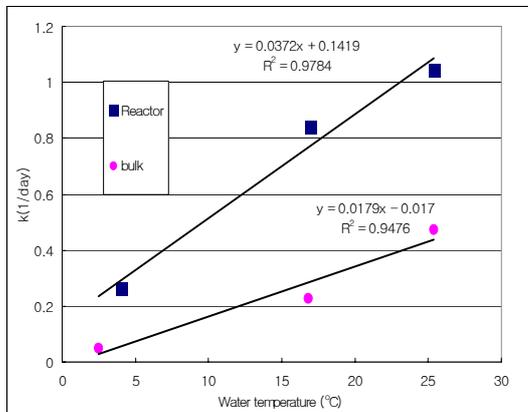
관내 잔류염소 분해 반응은 수체(bulk)내 반응과 관벽의 염소소비물질과의 반응에 의해 이루어지며, 관벽으로의 전달 반응은 수체와 관벽 사이의 염소농도차에 의해 지배된다. 따라서 환경이 적을수록 분해반응이 활발한 것은 수체내에서보다 관벽 접촉 부분의 염소분해 반응이 빠르고, 이에 따른 수체내에서보다 관벽 접촉부분의 낮은 염소농도에 의한 농도차에 의해 더 빠르게 감소하는 데 기인하여 나타난 차이라고 사료된다.

또한 계절별 온도에 따른 영향을 보면 여름철 수온이 높을 경우 겨울에 비해 염소분해상수의 감소경향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이는 온도가 잔류염소 분해에 가장 영향을 미치는 영향인자 중 하나라는 것을 증명하며, 여름철의 잔류염소 농도 관리에 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

2) 배수지 모형을 이용한 잔류염소분해 특성

실내 실험에서 수온에 따른 잔류염소 분해상수의 변화를 <그림 2>에 나타냈으며, 시료수를 이용하여 구한 수온변화에 따른 k_b 값은 0.0257~0.4301day⁻¹의 범위로 나타나 수온증가에 따라 직선적으로 증가한다는 것을 알 수 있

었다. 또한 아크릴 반응조에서는 온도가 증가할수록 더 큰 감소경향을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 상수 k_w 와 k_b 를 포함하는 K 값이 온도가 증가할수록 더 큰 값을 보였으며, 이는 기액경계면의 존재와 관벽반응에 기인하며, 특히 수체내 반응과 관벽으로의 물질전달 반응이 온도상승에 따라 급속하게 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

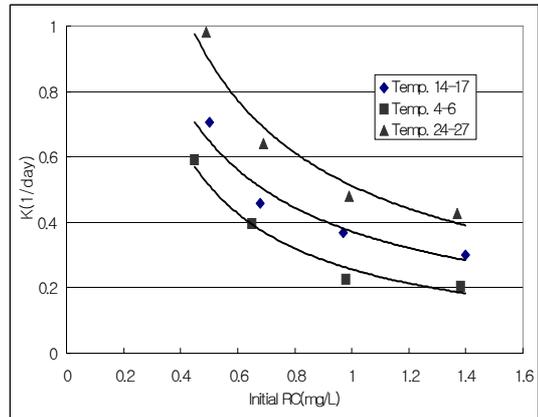


〈그림 2〉 수온에 따른 염소분해상수 변화

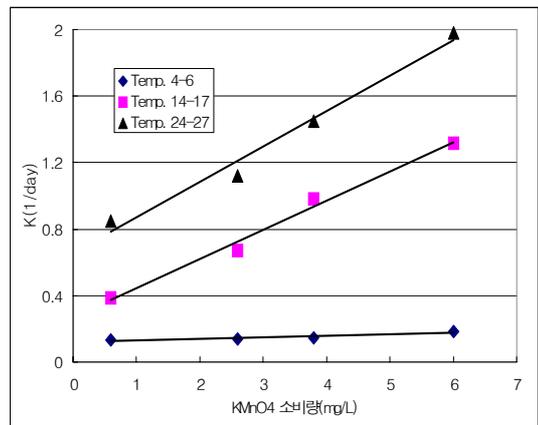
초기 잔류염소의 농도에 따른 반응특성을 분석하기 위해 아크릴 반응조에서 실험을 수행하였으며, 그 결과를 〈그림 3〉에 나타냈다. 관벽이나 기액경계면의 영향이 거의 없는 상태로 수체에 의한 반응이 주요 반응으로 초기 잔류염소의 농도가 0.45mg/L에서 1.4mg/L로 증가하였을 때 잔류염소 분해상수 k 값은 급격히 감소하는 경향을 나타냈으며, 온도차에 따른 변화는 크지 않았다.

〈그림 4〉에 유기물 농도에 따른 잔류염소 분해 특성을 평가하기 위하여 정수장내 여과지 역세척수를 이용하여 $KMnO_4$ 소비량을 조절한

실험 결과를 나타냈다. 본 실험에서 $KMnO_4$ 소비량은 수온, 초기 잔류염소농도에 비하여 잔류염소 분해상수에 미치는 영향이 낮게 나타났으며, 특히 낮은 온도에서는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 $KMnO_4$ 소비량의 영향은 수온변화에 따라 상대적으로 많은 영향을 받는 것으로 사료된다. 따라서 수온이 낮은 겨울철의 경우 잔류염소 소비성 물질의 농도는 전체적으로 k_b 값의 변화에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.



〈그림 3〉 초기염소농도에 따른 분해상수 변화



〈그림 4〉 $KMnO_4$ 소비량에 따른 분해상수 변화

3) 현장의 관내 및 배수지내 잔류염소분해 특성

현장실험은 수리학적 특성에 따른 관내 잔류염소 분해 특성을 파악하기 위하여 실시하였으며, 가압장과 배수지에서 펌프 정지시와 펌프 운전시의 잔류염소 농도 변화를 시간에 따라 분석하였다.

펌프 가동중의 가압장내 잔류염소 농도는 거의 일정하였으며, 배수지까지의 시간을 고려하여 배수지에서 채취한 잔류염소 농도를 이용하여 계산한 잔류염소 분해상수 K값은 1차 측정값이 0.005268min^{-1} , $7.58592/\text{day}$ 로 나타났으며, 2차와 3차 측정값은 각각 0.0038981min^{-1} ($5.613264/\text{day}$)와 0.0025647min^{-1} ($3.693168/\text{day}$)로 나타났다. 또한 펌프의 운전을 중지한 총 10시간 동안 1시간 간격으로 닥타일주철관(DCIP)으로 이루어진 가압장의 잔류염소 농도 감소를 측정한 결과는 1차, 2차, 3차에서 각각 $0.722821/\text{day}$, $0.616499/\text{day}$, $0.343716/\text{day}$ 로 나타났다. <표 5>에 현장에서 분석한 관내 유체의 흐름 및 정체시의 잔류염소 분해 상수 K값을 나타냈다.

<표 5> 관내 흐름 및 정체시 잔류염소 분해상수 K값의 분석 결과

구 분	정체시	흐름시
1차(8월 15일)	$0.722821/\text{day}$	$7.58592/\text{day}$
2차(9월 15일)	$0.616499/\text{day}$	$5.613264/\text{day}$
3차(10월 15일)	$0.343716/\text{day}$	$3.693168/\text{day}$

<표 5>에서 흐름상태일 때의 K값이 정체상태일 때보다 약 10배 이상 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 잔류염소가 이동 중에 수체 또는 관벽과의 반응에 의하여 감소되는 것보다

펌프 가동시 펌프의 영향에 의하여 더 큰 영향을 받는 것으로 사료된다. James(1991)는 미국 뉴저지주에서 행한 현장실측 실험에서 6인치 주철관의 경우 반응상수가 0.0054min^{-1} , 12인치 주철관의 경우 0.0040min^{-1} , 12인치 PVC관의 경우 0.0034min^{-1} 의 결과를 얻었다. 따라서 본 연구의 현장 결과 값인 $7.58592/\text{day}$ 와 비교할 때 6인치 주철관의 $7.776/\text{day}$ 과 비슷한 결과를 나타내었다.

또한 배수지내의 잔류염소 분해 상수 K값은 1차와 2차 그리고 3차에서 각각 $0.6096/\text{day}$, $0.6216/\text{day}$, $0.4968/\text{day}$ 로 나타났다. 배수지내의 잔류염소 분해상수 값은 관내 정체상태의 값과 비슷한 결과를 나타내고 있으나, 수온이 높은 여름인 1차 때는 배수지의 값이 작고, 가을인 2차와 3차일 때는 더 큰 값을 나타내었다. 이러한 결과는 수온이 높은 여름철에는 관벽 반응이 기액경계면의 존재보다 더 큰 작용을 하기 때문인 것으로 사료된다.

2. 잔류염소농도 감소 모의

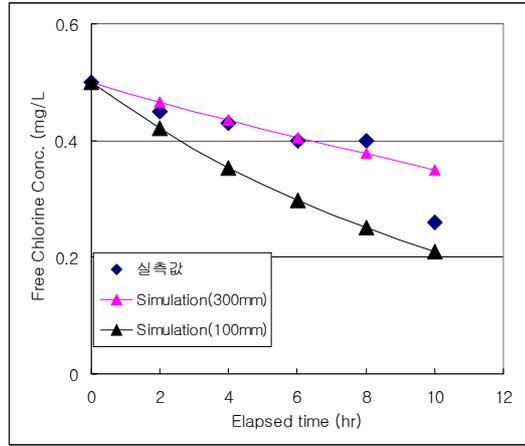
1) 관내 잔류염소농도 감소 모의

실험실에서 수행된 주요 수질인자, 온도, 초기 잔류염소농도, KMnO_4 소비량을 이용한 Batch Test 결과 도출된 관내 잔류염소 분해 상수(K) 예측식은 다음과 같다.

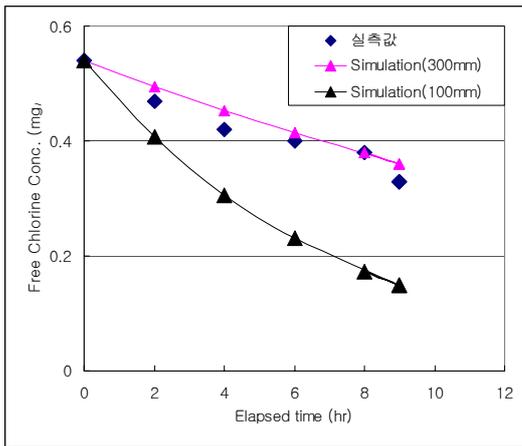
$$k = \exp(0.0476 \times T - 1.307 \times C_0 + 0.142 \times \text{ConsumedKMnO}_4 - 0.658)$$

예측식을 적용한 결과, 1차, 2차, 3차의 모의

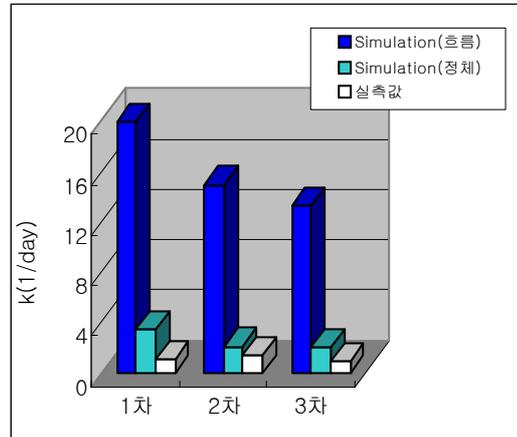
값(K)은 각각 3.405, 2.077, 2.056/day로 나타났으며, 실측값은 각각 1.0584, 1.3728, 0.8424/day로 나타나 모의 값이 상당히 큰 값을 나타내었다. 그러나 실제 모의된 K값 및 실측 K값을 이용하여 체류시간에 따른 잔류염소 농도의 감소경향을 모의한 결과를 <그림 5>에 나타냈는데, 환경이 동일한 300mm에 대한 예측값과 현장 실측값과는 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 흐름시의 K값은 정체 및 실측값과는 매우 큰 차이를 보이고 있어 현장의 특수성에 따라 많은 차이가 있을 것으로 판단된다.



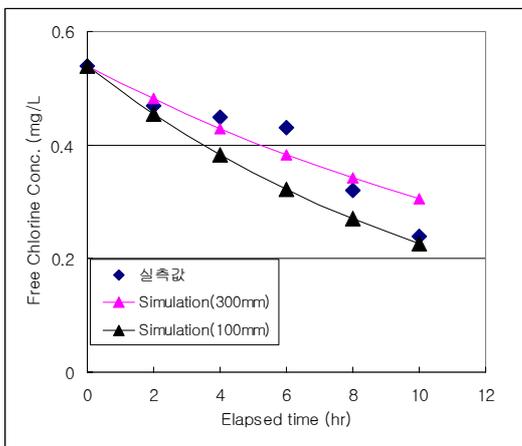
(c) 3차 실측값 적용시



(a) 1차 실측값 적용시



(d) 수리학적 영향 비교 결과



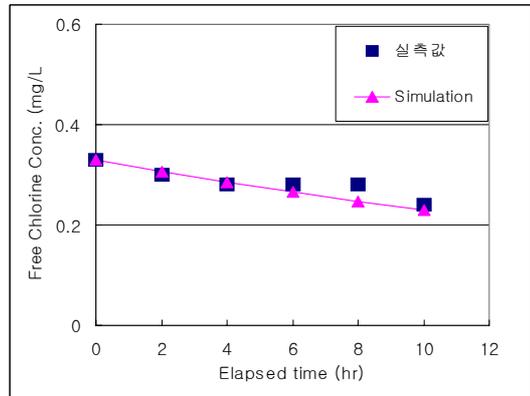
(b) 2차 실측값 적용시

<그림 5> 모의 및 실측 K값을 적용한 관내 잔류염소 농도 감소 예측 결과

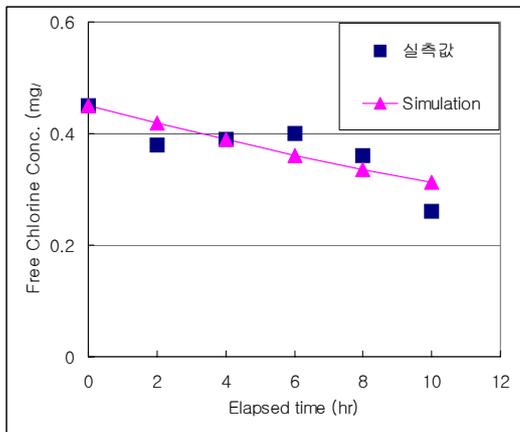
2) 배수지내 잔류염소농도 감소 모의
 현장실험 결과, 온도, 초기잔류염소농도, 과망간산칼륨소비량을 인자로하여 도출한 배수지내 잔류염소 분해상수(K) 값의 예측식은 다음과 같다.

$$k = \exp(0.1190 \times T - 3.130 \times C_0 + 0.509 \times ConsumedKMnO_4 - 4.993)$$

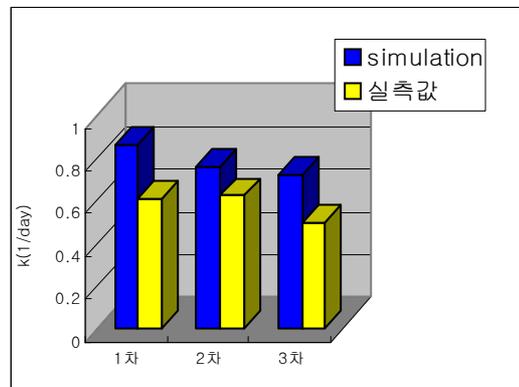
현장실험 예측식을 적용한 결과, 1차, 2차, 3차의 모의 값(K)은 각각 0.860, 0.754, 0.716/day로 나타났으며, 실측값은 각각 0.6096/day, 0.6216/day, 0.4968/day로 나타나 모의 값은 일정한 반면 실측값은 온도차에 따른 영향이 높은 것으로 나타났다. 모의된 K값 및 실측 K값을 이용하여 배수지내 체류시간에 따른 잔류염소 농도의 감소경향을 분석한 결과를 <그림 6>에 나타냈다.



(c) 3차 실측값 적용시

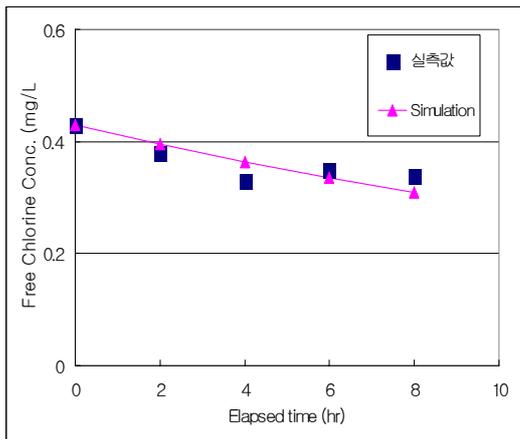


(a) 1차 실측값 적용시



(d) 모의값과 실측값 비교

<그림 6> 모의 및 실측 K값을 적용한 배수지내 잔류염소 농도 감소 예측 결과



(b) 2차 실측값 적용시

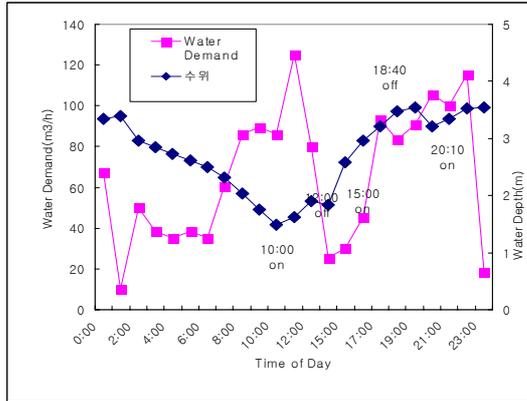
3. 배수지 잔류염소 분해특성 평가

1) 대상 배수지의 물수요 패턴

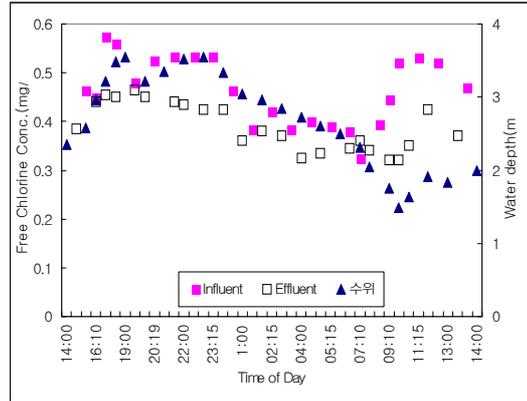
대상 배수지의 여름(1차)과 가을(3차)의 물수요 패턴을 <그림 7>에 나타냈으며, 물수요는 1차와 3차 모두 오전 9시부터 오후 3시까지 1차 피크, 오후 6시부터 9시까지 2차 피크의 경향을 보이고 있다. 이에 따라 배수지내 수위는 오전 10~11시에 최저 수심을 보이며, 이때 수위고는 약 1.5m이다. 가압장에서의 펌프 가동시간은 여름철은 약 3회 정도의 가동과 정지를

반복하고, 가을철의 경우 최저 수위고에서 가동을 시작하여 약 11시간 동안 가동후 정지하는 경향을 보인다.

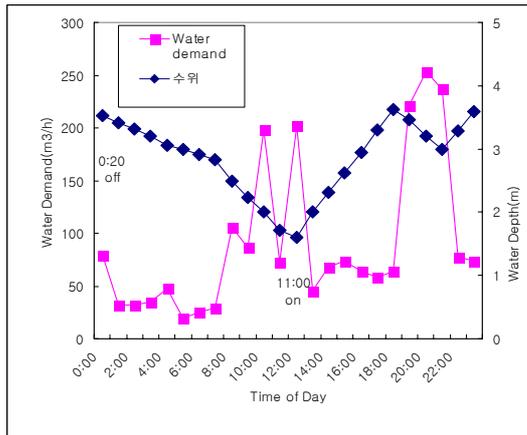
같이 잔류염소농도가 정수 수질인자뿐 아니라 수리학적인 인자들에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다.



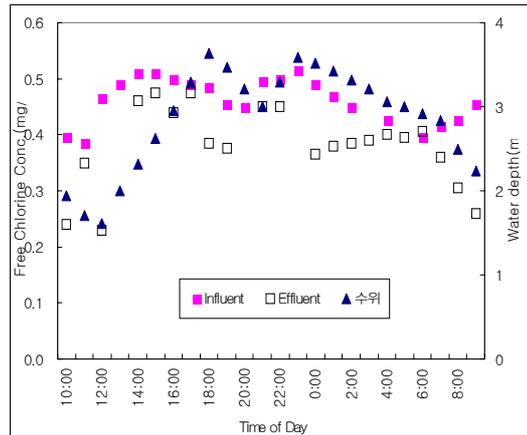
(a) 8월(1차)



(a) 8월(1차)



(b) 10월(3차)



(b) 10월(3차)

〈그림 7〉 대상 배수지의 물수요 패턴 및 수위

〈그림 8〉 수위변화 및 유입·유출수의 잔류염소 농도와의 관계

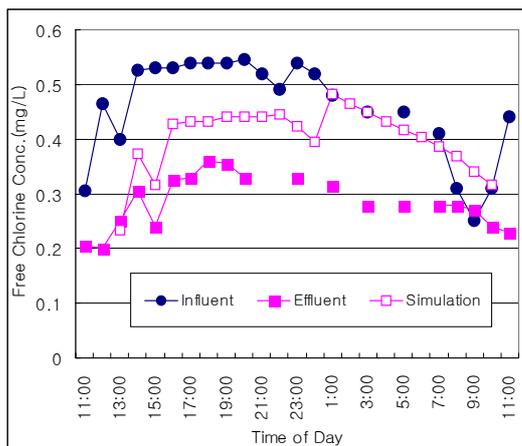
2) 배수지내 잔류염소농도 변화 모의

〈그림 8〉에 대상 배수지의 수위변화와 잔류염소 농도의 관계를 나타내었으며, 전체적으로 수위변화와 유입수 및 유출수의 잔류염소농도는 유사한 경향을 보이고 있다. 배수지 전후로 가장 근접한 수도전의 잔류염소농도 차는 최고 0.2mg/L로 나타났다. 또한 〈그림 8〉에서의

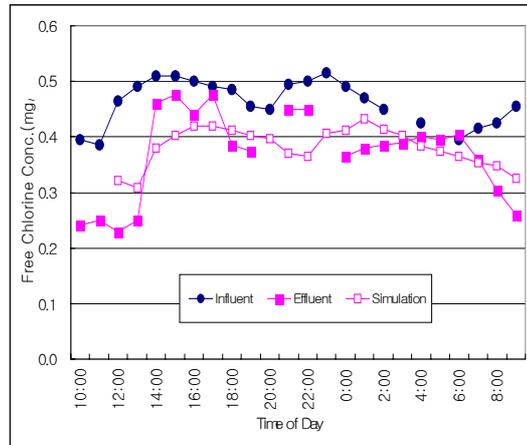
가압장에서 가압하는 시간대인 16시~18시, 20시~22시에는 높은 잔류염소를 나타냈으며 그 이후에는 점차로 감소하다가 다음날 펌프 가동 시간인 10시 이후부터 농도가 높아지기 시작하였다. 이는 펌프를 가동하는 동안에 배수지 내에서 정체된 물과 새로 유입된 물의 혼

합에 의하여 높은 농도가 나타나고 펌프가동이 정지되는 동안에는 정체되어 있던 물이 유출되기 때문에 사료된다. 그리고 대상 배수지의 경우 배수지내 유입수가 유입된 후 완전하게 혼합되는 것으로 판단된다.

대상 배수지의 혼화형태를 확인하기 위하여 배수지내 혼화형태를 완전혼합조로 가정하고, 유입량(Q)을 일정하다고 가정한 후 유출수의 잔류염소농도를 모의하고 실측값과 비교하였으며, 그 결과를 <그림 9>에 나타냈다. <그림 9(a)>는 여름철(1차)의 결과 값으로 배수지내에서 감소되어 유입 잔류염소농도에 비해 유출 잔류염소농도는 평균 0.17mg/L 정도 낮은 값을 보여주고 있으며, K값을 적용한 예측식으로 모의한 값은 유입농도와와의 차이가 평균 0.08mg/L 정도로 나타나 실측값과 차이를 보였다. <그림 9(b)>는 가을철(3차)의 결과 값으로 배수지내에서 감소되는 농도는 평균 0.1mg/L 정도인 것으로 나타났으며, 예측식을 이용한 모의값의 경우도 실측값과 유사한 경향을 보여주었다.



(a) 여름철(1차)



(b) 가을철 (3차)

<그림 9> 배수지의 유출 잔류염소농도 예측 (Q 일정, 완전혼합조로 가정시)

전체적으로 대상 배수지의 직경 대 높이가 4.5:1에서 잔류염소농도 변화는 0.01~0.13 mg/L의 범위를 보여, 직경 대 높이가 5.1:1인 배수지에서 0.04~0.1 mg/L의 범위를 보이는 경우 완전 혼합된다는 Kennedy(1993)의 보고와 일치하는 결과를 나타내었다.

따라서 본 대상 배수지의 경우 완전 혼합 배수지임을 알 수 있었으며, 배수지내 감소 농도는 0.1~0.17mg/L이고, 배수지 전후 최단 급수 전에서의 농도차가 최고 0.2mg/L이었다. 또한 배수지로 유입되는 잔류염소농도가 0.48~0.54 mg/L의 범위이고 배수지내 농도 감소와 배수지에서 급수전까지의 관내 감소 농도를 고려한다면 미생물학적 안전성의 기준이 되는 0.2 mg/L를 유지하기 위해서는 배수지내 유입 유출량의 조절이 필요할 것으로 사료된다. 이를 바탕으로 대상 배수지의 경우 수온이 높고 수요량이 증가하는 여름철의 경우 최대 5시간 간

격으로 펌프를 가동하고, 수온이 낮고 수요량이 감소하는 가을 및 겨울에는 일일 1회 또는 2회 정도의 펌프를 가동하는 것이 수질 및 에너지 관리측면에서 효율적인 펌프운전이 될 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 실험실과 현장의 잔류염소분해 실험을 통해 상수도 관로 및 배수지내 잔류염소 분해 특성을 분석하여 잔류염소 분해상수 K값을 구하고, 관내 및 배수지내 수질영향인자에 따른 잔류염소 분해 예측식을 도출하였다. 또한, 예측식을 이용하여 배수지내 잔류염소 감소를 모의하여 배수지의 혼화형태를 예측하고 이를 통해 배수지의 수질관리에 이용하고자 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실험실 및 현장의 잔류염소분해 특성 비교 결과, 현장에서 측정한 관내 및 배수지의 잔류염소분해상수(k)값은 각각 0.4968~0.6216(/day), 0.8424~1.0584(/day)로 나타나 실험실 값이 각각 2.4~3.2배와 1.2~1.4배 크고, 또한 관내(1.26배) 및 배수지(1.22배) 모두 수온이 높은 여름이 큰 것으로 나타났다.
- (2) 배수지내 잔류염소 분해에 미치는 주요 영향인자를 파악한 결과, 주요 영향인자는 수온, 초기 잔류염소농도, 유기물, 체류시간인 것으로 나타났다. 그러나 관내의 흐름상태시 분해특성에서 가압펌프가

매우 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

- (3) 잔류염소분해 특성 분석 결과, 실험대상 배수지는 유입수가 비교적 양호하게 혼합되는 것으로 판단되었으며, 또한 배수지는 전형적인 수요피크(2개)를 보이고 있어, 수위조절을 통해 효과적인 잔류염소농도 유지 및 저류의 역할을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 연구대상 배수지의 조사 결과를 고려할 때, 수온이 높고 수요량이 증가하는 여름철의 경우 최대 5시간 간격으로 펌프를 가동하고, 수온이 낮고 수요량이 감소하는 가을 및 겨울에는 일일 1회 또는 2회 정도의 펌프를 가동하는 것이 수질관리 및 에너지 관리측면에서 효율적인 배수지 운전이 될 것으로 판단된다.

또한 효율적인 잔류염소농도의 관리를 위해서는 잔류염소 분해가 빠른 여름철에는 주의 깊은 관리가 필요하다. 특히 시설적인 측면에서 가압장을 가능한 줄이고 자연 유하식으로 배수시스템을 구성하며, 배수지의 경우 수량적인 측면의 용량을 확보하는 한도내에서 체류시간을 줄일 수 있는 유입 유출량 조절이 이루어지도록 해야할 것이다.

참고문헌

김성진 · 홍성호 · 김정현, 2003, “상수도관내의 부식생성물에 의한 잔류염소 감소 특성”, 『상수도학회지』, 17(6): 898~905.
 이현동 · 정원식, 1997, “상수도관로 계통내 수질악화 원인분석 및 제어 방안에 관한 연구”, 『수도』, 24(2): 49~59.
 이현동 · 정미연 · 정원식, 1999, “저류시설내 잔류염소 분

- 해특성”, 『1999년 대한환경공학회 춘계학술발표회 논문집』, 259~260.
- 이목영·장현정·이의광·오세중·이채근·이현동, 2000, “옥상물탱크 경유에 따른 수도물 수질 변화 및 직결급수방식 도입에 의한 수질개선 효과 연구”, 『상하수도학회지』, 14(4): 328~336.
- 주대성·박노석·박희경·오정우, 1998, “상수관망내 잔류염소 농도 분포 예측”, 『상하수도학회지』, 12(3): 118~124.
- 현인환·이상준·강호, 2000, “수도물에 있어서 잔류염소 농도 감소계수에 관한 연구”, 『대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회논문집』, A-12.
- 현인환·김형준·강호, 2001, “송배수시스템에서 잔류염소 변화의 계절적 특성”, 『대한상하수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회논문집』, A-5.
- 相原重則, 1996, 『残留鹽素濃度管理に關する事業體事例集-管路内水質變化とその防止對策檢討會編』, JPRC, (財)水道管路技術センター, 技術レポート No. 22.
- AWWARF, 1996, *Characteristics and Modelling of Chlorine Decay in Distribution Systems*. USA: AWWA.
- Biswas, P., Lu, C. and Clark, R. M., 1993, “A Model for Chlorine Concentration Decay in Pipes”, *Water Research*, 27(12): 1715~1724.
- Clark, R. M. and Coyle, J. A., 1994, “Water Quality Changes in a Simulated Distribution System”, *Jour. Water SRT-AQUA*, 43(6): 263~277.
- Gotoh. K., 1989, “Residual Chlorine Decreasing Rate Coefficients for Various Pipe Materials”, *Water Supply*, 7: 164~172.
- Hanson, H. F., Mueller, L. M., Hasted, S. S., and Goff, D. R., 1987, *Deterioration of Water Quality in Distribution Systems*, AWWARF Research Report, Denver, CO.
- James, A. G., 1991, “Modeling in the Planning and Evaluation of a Field Study of Water Quality in a Distribution System”, *Water Quality Modeling in Distribution Systems Conference Proceedings*, 201~208.
- Johnson, J. D., 1978, *Measurement and Persistence of Chlorine Residuals in Natural Waters*, *Water Chlorination: Environmental Impact and Health Effects*. Ann Arbor Science. Mich.
- Joo, D. S., Park, N. S. and Park, H. K., 1997, “Chlorine Residual as an Indicator of Water Quality Changes in Water Distribution System”, *Proc. 6th IAWQ APRC, Seoul, Korea*, 1627~1636.
- Kennedy, M. S., 1993, “Effect of Storage Tank Design on Water Quality” *J. AWWA, WQTC part I*, 83~110.
- LeChevallier, M. W., Lowry, C. D. and Lee, R. G., 1990, “Disinfecting Biofilms in a Model Distribution System”, *J. AWWA*, 82(7): 87~98.
- Levi, Yves and Mallevialle, J., 1996, “Global Strategy and New Tools for Maintaining Water Quality in Distribution Systems”, *J. JWWA*, 100~108.
- Murphy, S. B., 1985, *Modeling Chlorine Concentrations in Municipal Water Systems*, Master’s thesis, Montana State University, Bozeman, Mt.
- Rossmann, L. A., Clark, R. M. and Grayman, W. M., 1994, “Modelling Chlorine Residual in Drinking Water Distribution Systems”, *J. Environ. Eng.* 120(4): 803~820.
- Rossmann, L. A., 1994, *EPANET Users Manual*, EPA-600/R-94/057, USEPA Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati.
- Trussell, R. R., 1992, *Impact of Corrosion on Chlorine Decay in Distribution Systems*, Memorandum presented at the project advisory committee for AWWARF project 815-92: Characterization and Modeling of Chlorine Decay in Distribution Systems, Toronto.
- Vasconcelos, J. J., Rossmann, L. A., Grayman, W. M., Boulos, P. F. and Clark, R. M., 1997, “Kinetics of Chlorine Decay”, *J. AWWA*, 89(7): 54~65.
- Wable, O., Dumoutier, N., Duguet, J. P., Jarrige, P. A., Gelas, G. and Depierre, J. F., 1991, “Modelling Chlorine Concentrations in a Network and Applications to Paris Distribution Network”, *Proceedings of the AWWARF and USEPA Conference on Water Quality Modelling in*

Distribution Systems, Cincinnati, Ohio, USA, 45
February, AWWA, 77~87.

Zhang, G. R., 1996, "The Analysis for the Pollution of
Water Quality in the Network of Pipes and It's
Solutions", *IWSA-Asia Pacific Region
Specialized Conference on Safety of Water*

*Supply in Transmission and Distribution
System*, Shanghai, P. R. China, 109~116.

원 고 접 수 일 : 2004년 2월 25일

최종원고채택일 : 2004년 4월 26일