

EPANET을 이용한 상수도 관망의 잔류염소 거동 예측

유희종 · 김주원 · 정효준*[†] · 이흥근**

인천광역시 상수도 사업본부, *한국원자력연구소 원자력환경연구부
**서울대학교 환경보건학과

Chlorine Residual Prediction in Drinking Water Distribution System Using EPANET

Hee Jong Yoo · Ju Weon Kim · Hyo Joon Jeong*[†] · Hong Keun Lee**

Water Quality Research Institute of Waterworks Headquarter of Incheon Metropolitan City

*Nuclear Environmental Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

**Dept. of Environmental Health Science, Graduate School of Public Health, Seoul National University

(Received January 4, 2003; Accepted February 20, 2003)

ABSTRACT

In this study, chlorine dose at water storage tank was predicted to meet the recommended guideline for free chlorine residual in drinking water distribution system, using EPANET which is a computer program that performs extended period simulation of hydraulic and water quality behavior within pressurized pipe networks. The results may be summarized as follows. The decay of chlorine residual by season varied considerably in the following order; in summer (25°C) > spring and fall (15°C) > winter (5°C). For re-chlorination at water storage tank by season, season-varying chlorine dose was required at its maximum of 1.00 mg/l in summer and minimum of 0.40 mg/l in winter as free chlorine residual. The decay of chlorine residual through out the networks increased with water age spent by a parcel of water in the network except for some points with low water demand. In conclusion, the season-varying chlorine dose as well as the monitoring of water quality parameters at the some points which showed high decay of chlorine residual may be necessary to deliver the safe drinking water.

Keywords: EPANET, Chlorine residual, Microbial contamination, TOC, Drinking Water Distribution System, THMs

I. 서 론

최종 소비자인 시민들이 마시는 수도물의 수질은 원수의 수질특성, 정수처리공정 그리고 정수처리 수도물의 수송경로인 배·급수시설에 의해 결정된다. 수도물 수질의 안전성을 확보하기 위해서는 취수원으로 사용하고 있는 호소나 하천 등의 상수원관리, 유입된 원수를 정수 처리하는 정수처리시스템의 최적운영 그리고 정수 처리후 각 수용가까지 안전하게 전달하는 송·배수 시설 등을 효율적으로 관리하는 것이 무엇보다도 중요하다. 취수원으로 사용되는 호소에서 조류발생시에 조류경보제 발령과 같은 적극적인 원수 수질관리를 비

롯하여 미생물 등에 의한 정수처리시의 문제점 등을 해결하기 위해 선진국의 정수처리기술 도입 등 원수관리와 정수처리공정에는 많은 관심을 기울여 왔지만 송·배·급수 계통에서의 수도물의 수질변화에 관해서는 상대적으로 소홀하였던 것이 사실이다. 송·배수시스템의 긴 체류시간으로 인해 관로 내에서 바이러스나 원생동물(Cryptosporidium, Giardia) 등 미생물의 재성장을 막아주는 잔류염소감소와 더불어 수중에 존재하는 잔류염소와 소독부산물 전구물질인 용존성 유기물이 서로 반응 후 소독부산물(DBPs)이 과다생성될 우려가 있다¹⁻³⁾.

현재까지 우리 나라에서는 배·급수 계통에서의 생물학적 측면에서 수질오염방지를 위해 각 수용가의 수도전에서 잔류염소농도 하한기준으로서 유리잔류염소농도가 동절기 0.20 mg/l 이상, 하절기 0.40 mg/l 이상을 유지하도록 권고하고 있으며 소독부산물 중에서 트

[†]Corresponding author : Nuclear Environmental Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute
Tel: 82-42-868-2087, Fax: 82-42-868-2370
E-mail : jeong1208@kaeri.re.kr

리할로메탄(THMs)농도를 0.10 mg/l 이하로 설정하여 관리하고 있다.⁴⁾ 지하수를 취수원으로 사용하고 있는 외국과 달리 우리 나라의 경우 지표수를 취수원으로 사용하고 있고 고도 정수처리시스템이 설치되지 않은 재래식 응집·침전·여과 소독으로 이루어진 정수처리공정과 관로 길이가 긴 송·배수 시스템하에서는 수돗물의 2차오염에 대비한 잔류염소 적정관리가 어려운 실정이다. 따라서 저농도의 잔류염소는 수온이 높은 여름철의 경우 미생물의 재생장(regrowth)과 같은 미생물학적 안전성이 의심되며 고농도는 송·배수 관로의 내부 부식 촉진으로 인한 중금속 용출, 수중에 용존하는 유기물과의 지속적인 반응에 의해 과량의 소독부산물 형성 등의 문제를 야기할 수 있다.^{5,7)}

송·배수 연장관로 길이가 짧은 정수장 인근 지역은 잔류염소가 필요이상으로 높게 유지되어 물의 맛이나 냄새 등으로 인한 민원발생 등의 문제점이 제기되고 있으며, 연장관로 길이가 긴 원거리 지역은 관 내면부식과 긴 체류시간 등으로 인해 잔류염소가 적정농도를 유지하지 못해 미생물학적 오염 및 소독부산물 과다생성 등의 문제가 발생하고 있어 적정 잔류염소농도 유지가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 정수처리 후 긴 체류시간을 갖는 송·배수 관로를 거쳐 배수지에서의 재 염소 주입 후 각 수용가에 보급되는 수돗물을 대상으로 미국 환경보호청(EPA)에서 개발한 EPANET 모형을 이용하여, 모든 배수관로의 소독능확보를 위해 배수지에서 염소 주입량을 달리하여, 각 계절별 적정 잔류염소 주입량을 예측하였다.

II. 연구 방법

배수관로 시스템 내에서 수리특성 및 수질변화를 예측할 수 있는 EPANET은 미국 환경보호청에서 개발하였고, 관로 내의 물리적 특성인 관경, 길이, 조도계수, 수도 사용량 등을 이용하여 관로 내 각 지점별·시간별로 수리학적 특성인 유량, 유속, 수압, 손실수두와 관망에서의 수질변화를 예측할 수 있고 예측한 결과를 텍스트 혹은 그림화일 형태로 출력할 수 있어 전체 관로 내에서 수리 및 수질변화특성을 손쉽게 파악할 수 있다.^{8,9)}

EPANET의 “Water Quality Module”은 총류 흐름 조건에서 반경방향의 물질전달의 예측에는 미흡한 점이 있으나 관내 유체의 반응, 관 내벽 반응, 그리고 관 내벽과 유체간의 물질확산을 고려한 관로 시스템에서 수질변화를 예측할 수 있는 장점이 있다.¹⁰⁻¹²⁾ EPANET

의 동력학적 수질예측 모형은 시간의 경과에 따라 관로 속을 흐르는 용존물질의 변화 모의가 가능하다. 수리학적 모형으로부터 얻은 유량을 사용하여 노드(node) i, j 로 연결된 각 관로(link) 사이의 물질변화를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial c_{ij}}{\partial t} = \frac{q_{ij}}{A_{ij}} \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_{ij}} + \theta(c_{ij}) \quad (1)$$

여기서 c_{ij} : 관로(link) i, j 에서의 물질의 농도(mass/ft³)
 x_{ij} : 관로(link) i, j 사이의 거리(ft)
 q_{ij} : 시간 t 에서 관로(link) i, j 사이의 유속(cfs)
 A_{ij} : 관로(link) i, j 사이의 단면적(ft²)
 $\theta(c_{ij})$: 관로(link) i, j 사이의 용질반응속도(mass/ft³/day)

식 (1)은 초기시간에 주어진 각 관로(link)의 경계조건(node i 에서 $x_{ij}=0$)등의 계산식인 식 (2)을 연립하여 계산한다. 식 (1)의 미분방정식 해를 구하면 각 지점에서의 잔류염소 농도를 구할 수 있다.

$$c_{ij}(0, t) = \frac{\sum_k q_{kj} c_{ki}(L_{ki}, t) + M_i}{\sum_k q_{ki} + Q_{si}} \quad (2)$$

여기서 L_{ki} : 관로(link) k, i 사이의 길이
 M_i : Node i 에서 외부에서의 물질유입
 Q_{si} : 유입원의 유량

한편, 관로 속을 통과시 물질의 감소를 가져오는 반응은 유체내부와 관벽 재질에 의해서 일어나고 양쪽 모두 1차 반응만 고려한다(식 3).

$$\theta(c) = -k_b c - \frac{k_f}{R_H} (c - c_w) \quad (3)$$

여기서, k_b : 1차 수체반응상수(1/sec)
 c : 수체에서의 물질농도(mass/ft³)
 k_f : 수체와 관벽 사이의 물질전달상수(ft/sec)
 R_H : 관로의 수리반경(ft)
 c_w : 관벽에서의 물질농도(mass/ft³)

관벽에서의 반응은 관벽에서의 물질농도에 대하여 1차방정식으로 표현 가능하고 반응속도가 관벽으로 물질이 전달되는 속도와 같다고 가정하면 관벽에서 일어나는 반응에 대하여 다음과 같이 반응식을 쓸 수 있다(식 4-6).

$$k_f(c - c_w) = k_w c_w \quad (4)$$

$$\theta(c) = -K_c \quad (5)$$

$$K = k_b + \frac{k_w k_f}{R_H(k_w + k_f)} \quad (6)$$

여기서, k_w : 관벽에서의 반응상수(ft/sec)
 K : 전체 일차반응속도상수

관로내의 염소반응은 3개의 계수가 주요한 작용을 하게 되는데, 수체 내 반응상수 k_b 와 관벽에서의 반응상수 k_w 및 물질전달계수 c_f 등이 여기에 해당된다. 물질전달계수 c_f 는 다음과 같이 무차원의 Sherwood Number를 사용하여 계산된다(식 7-9).

$$k_f = \frac{S_h D}{d} \quad (7)$$

$$S_h = 3.65 + \frac{0.0668(d/L)(R_e S_c)}{1 + 0.04[(d/L)(R_e S_c)]^{0.67}},$$

for $R_e < 2,300$ (8)

$$S_h = 0.023 \times R_e^{0.83} \times S_c^{0.333}, \text{ for } R_e \geq 2,300 \quad (9)$$

여기서, k_f : 물질전달계수(ft/sec)
 S_h : Sherwood Number
 R_e : Reynolds Number
 S_c : Schmidt Number

D : molecular diffusion of substance in fluid (ft²/sec)

L : pipe length(ft)

식 (8)은 물질전달계수가 관로 위치와는 독립된 난류에 적용되고 식 (9)는 관로 길이를 따라 물질전달계수의 평균을 이용하는 층류에 사용된다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 연구대상 지역

본 연구의 대상지역은 인천광역시 K군을 대상으로 하였으며, 인구는 23,525명, 급수인구 18,915명으로 급수 보급률 80.4%이며, 업종별 수도전의 수는 가정용 1,761개, 업무용 293개, 영업용 345개, 옥탕용 5개로서 총 2,404개이다. 여기에 위치한 K-정수장의 취수량은 1972년 1,500 m³/day 규모로 통수한 이래로 취·정수 시설 용량 5,000 m³/day을 보유하고 있으나 현재 취수장 계통 수질악화로 가동 중단하여 지하수계통 800 m³/day만이 운영 중에 있으며 1993년 4월부터 수도권 광역상수도 4단계 계통으로부터 정수 4,000 m³/day을 공급받아오던 것을 1996년부터 G-정수장으로부터 10,000 m³/day의 정수를 공급받는 시설을 설치하여 용수공급 부족을 완화하였다. 정수시스템은 침전시설이

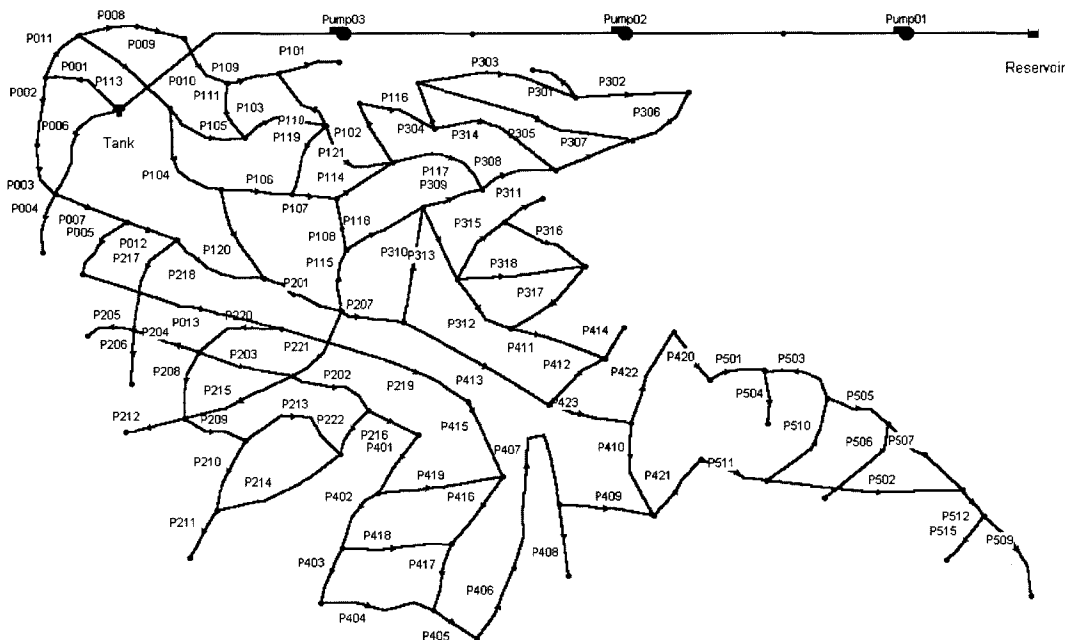


Fig. 1. Map of drinking water distribution system.

설치되어 있지 않다. 여과시설로는 완속여과지 1,500 m³/day과 고속침전여과기 3,500 m³/day로 되어 있으며 응집약품은 폴리염화알루미늄(PAC: poly aluminium chloride), 소독제는 염소를 사용한다. 고속침전여과기는 시설이 노후되고 저수지 원수폐쇄로 시설을 가동하고 있지 않다. K군의 배수관로를 나타내고 있는 Fig. 1을 보면 G-정수장에서 보급된 수돗물에 염소를 재주입 후 K군 각 가정에 수돗물을 공급하고 있는 실정이다. K-정수장은 G-정수장에서 공급받은 수돗물을 염소 재투입 후 시내 각 가정에 공급하는 배수지 역할을 하고 있다. 송·배수시설로는 G-정수장부터 K-정수지까지 송수관로 45,336 m, 배수관로는 35,890 m로서 송·배수관로의 관종은 강관 또는 주철관이 부설되었으며 급수관 관종은 아연도금 강관이 주로 부설되었다.¹³⁾ G-정수장 및 K-정수지의 수질현황은 Table 1과 같다.

Table 1. Results of water quality analysis at reservoir and tank

Parameters	Value	
	G-Reservoir	K-Tank
pH	7.04	7.14
Alkalinity	41	37
Turbidity(NTU)	0.09	0.19
Fe	ND ¹⁾	0.035
Al	0.033	0.019
TDS ²⁾	90	95
Temperature(°C)	15	15
TOC ³⁾	1.30	1.28

1)ND : Non detected, 2)Total dissolved solid, 3)Total organic carbon.

Table 2. Operational parameters in water distribution system

Condition	Value	Condition	Value
Number of pipes	108	Maximum trials	40
Number of nodes	82	Minimum travel time	6.00 min
Number of tanks	1	Minimum segments/pipe	100
Number of pumps	0	Specific gravity	1.00
Headloss of formula	Hazen-Williams	Kinematic viscosity	1.02e-06 sq m/sec
Hydraulic timestep	1.00 hr	Diffusivity	1.21e-09 sq m/sec
Hydraulic accuracy	0.001	Total duration	48.00 hr

Table 3. The k_b and k_n by the season and pipe diameter

Seasons	k_b (hr ⁻¹)	k_n (m/day)		
		> ψ 200 mm	ψ 200-100 mm	< ψ 100 mm
Summer(25°C)	0.0851	0.1350	0.2114	0.3316
Winter(5°C)	0.0254	0.0450	0.0850	0.1457
Spring, fall(15°C)	0.0557	0.0905	0.1743	0.2251

2. EPANET모형의 구축

1) EPANET 모형의 입력자료

모형의 구축을 위해 2002년 3월부터 2002년 6월까지 G-정수장에서 정수 처리된 수돗물을 송수관로(ψ 350 mm)를 통해 약 35 km 떨어진 K-배수지에서 적정 농도로 염소 재 주입 후 각 가정에 공급되는 과정인 배수관을 대상으로 먹는물 수질오염 공정시험방법을 이용하여 Hack사의 Pocket Colorimeter를 이용하여 유리 잔류염소를 측정하였다. EPANET모형을 구축을 위하여 K시를 Fig. 1과 같이 단순화하였다. 배수관로 시스템은 pipe 108개, node 82개, tank 1개로 구축하였으며, K군의 수도정비 기본계획서를 토대로 하여 지반고, 급수량 등 수리적 자료를 입력하였다(Table 2).

2) EPANET모형의 보정 및 검증

송·배·급수관을 구성하는 관종 및 관경별로 각 잔류염소분해상수를 규정하기 위하여 2002년 3월의 수돗물(수온 15°C)을 대상으로 실측한 잔류염소농도가 모형의 계산 잔류염소농도에 근접하도록 시행오차법에 의하여 모형의 보정을 실시하였다. Table 3은 계절에 따른 모형의 주요계수들을 표시한 것이다. k_n 는 환경이 작을수록, k_b 는 수온이 높을수록 증가하는 경향을 보였다. 하루 중 유량변화는 배수량의 시간별 유량자료를 이용하여 평균유량에 대한 시간별 최소 및 최대유량 비율의 값은 0.12와 1.72를 사용하였다. Hazen-williams 유속공식의 유속계수 C는 100으로 고정하여 모의하였다. 잔류염소에 대한 모형의 계산값과 실측값을 Table 4에 제시하였으며, 상관계수는 0.96의 값을 나타냈다.

Table 4. Comparison between the computed and observed concentration for calibration

Node No.	Chlorine Observed chlorine residual(mg/l)	Computed chlorine residual(mg/l)
P001	0.78	0.77
P005	0.76	0.75
P101	0.52	0.64
P111	0.73	0.71
P201	0.76	0.74
P216	0.58	0.64
P301	0.40	0.48
P313	0.72	0.69
P408	0.22	0.30
P419	0.48	0.41
P501	0.30	0.38
P509	0.22	0.30

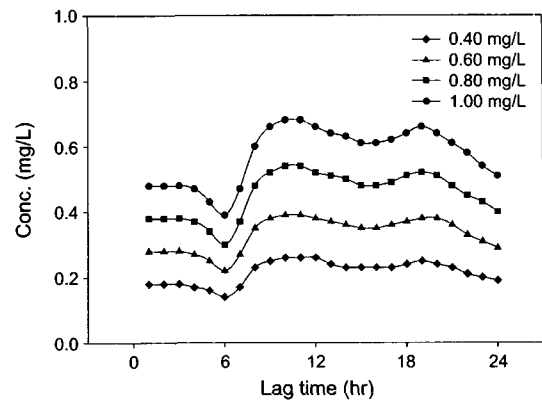
Table 5. Comparison between the computed and observed concentration for verification

Node No.	Chlorine Observed chlorine residual(mg/l)	Computed chlorine residual(mg/l)
P001	0.77	0.78
P005	0.76	0.74
P101	0.60	0.69
P111	0.68	0.65
P201	0.74	0.71
P216	0.51	0.62
P301	0.25	0.30
P313	0.60	0.68
P408	0.33	0.30
P419	0.30	0.37
P501	0.32	0.35
P509	0.20	0.27

Table 5는 모형의 검증에 위하여 2002년 6월 수돗물(수온 22°C)의 잔류염소를 자료를 이용하여 모형의 검증을 실시한 결과이며 상관계수는 0.97의 값을 나타내었다.

3. 봄과 가을철의 염소주입농도에 따른 수도전에서의 잔류염소농도 예측

봄과 가을철(수온 15°C)에 배수지에서 염소주입농도를 달리하여 수도전 최연장 관로인 P510에서 하루 중 유리잔류염소 농도변화는 Fig. 2와 같이 나타났다. 배수지에서 염소농도를 0.40 mg/l로 유지하였을 경우 06:00시에는 0.14 mg/l, 12:00에는 0.25 mg/l, 18:00에는 0.24 mg/l, 24:00에는 0.19 mg/l로 예측되어 체류시간이 길고 급수량인 적은 새벽과 자정무렵에 봄·가을철 유

**Fig. 2.** Daily variation of chlorine residual in spring and fall.

리잔류염소 권장기준인 0.20 mg/l을 충족하지 못하는 것으로 나타났다. 배수지농도를 0.60 mg/l로 유지하였을 경우는 급수량이 많은 정오무렵을 제외하고는 잔류염소의 권장기준인 0.20 mg/l을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 배수지농도가 0.80 mg/l에서는 06:00(0.30 mg/l), 12:00(0.52 mg/l), 18:00(0.51 mg/l), 24:00(0.40 mg/l)로 나타나 모든 지점에서 봄과 가을철 잔류염소 권장기준을 만족하였으나, 12:00시와 18:00시에 0.50 mg/l 이상으로 다소 높은 농도를 보였다. 배수지농도를 1.00 mg/l로 유지하였을 경우, 새벽시간을 제외하고는 대체로 높은 농도를 나타냈다. 배수지의 주입염소농도를 최소값인 0.40 mg/l로 유지하였을 때 하루 중 잔류염소가 최저농도를 보이는 오전 6시에서의 각 수도꼭지에서의 유리잔류염소 농도분포를 Fig. 3에 제시하였다. 잔류염소 권장기준치(유리잔류염소 : 0.20 mg/l) 이하를 보인 지점은 P3xx지역 중 급수량이 적은 고지대 4개 지점과 P4xx지역 중의 9개 지점, 그리고 P5xx지역 중 9개 지점으로 나타났으며, 그 외 지역에서는 0.20-0.40 mg/l 사이의 농도분포를 보였다.

4. 여름철 잔류염소 예측결과

여름철(수온 25°C) 배수지에서 염소주입농도를 달리하여 수도꼭지 최연장 관로인 P510에서의 일일 유리잔류염소 농도변화는 관찰하였다(Fig. 4). 배수지의 염소주입농도를 0.40 mg/l로 유지하였을 때 06:00(0.13 mg/l), 12:00(0.23 mg/l), 18:00(0.22 mg/l), 24:00(0.17 mg/l)로 나타나 봄·가을철 잔류염소 변화경향과 비슷하게 정오와 오후에 잔류염소가 다소 증가하는 양상을 보였으나 모든 시간대에 걸쳐 잔류염소 권장기준(0.40 mg/l)을 만족하지 못하였다. 배수지 농도를 0.60 mg/l로 유지하였을 때 06:00(0.20 mg/l), 12:00(0.36 mg/l), 18:00

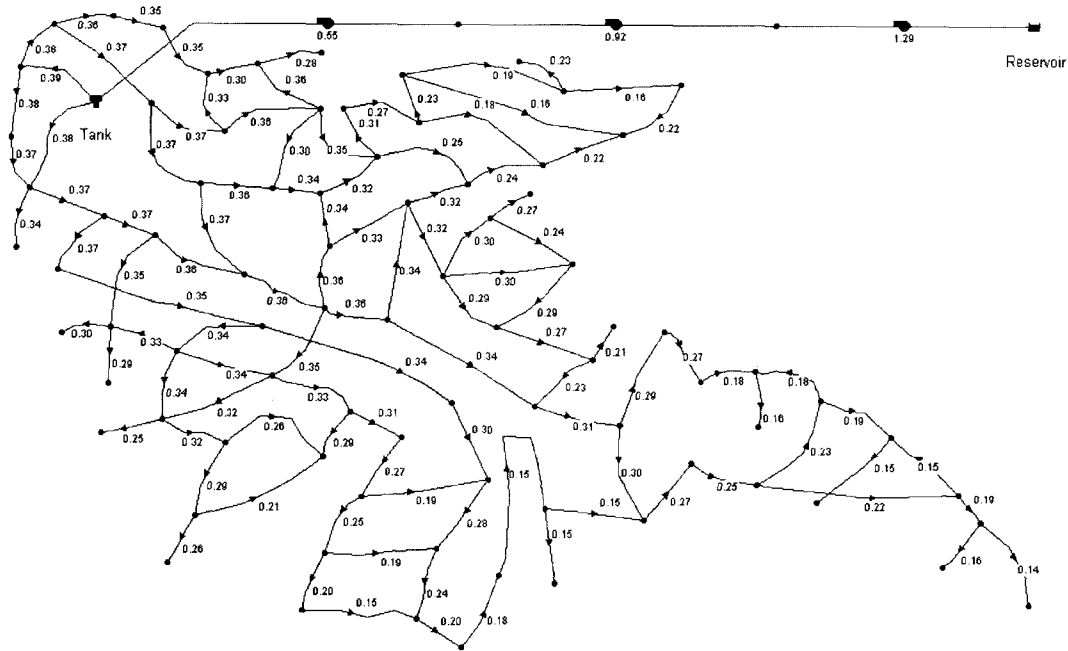


Fig. 3. Distribution of chlorine residual for 0.40 mg/l at 6 AM in spring and fall.

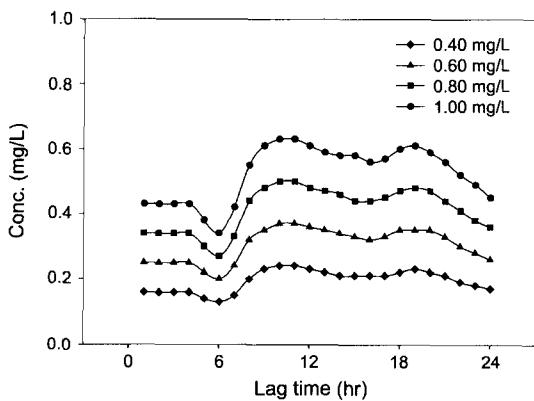


Fig. 4. Daily variation of chlorine residual in Summer.

(0.35 mg/l), 24:00(0.26 mg/l)로 나타나 0.40 mg/l로 유지하였을 때와 마찬가지로 권장기준(유리잔류염소농도: 0.40 mg/l)을 만족하지 못했다. 한편 배수지농도를 0.80 mg/l로 유지하였을 때 06:00(0.27 mg/l), 12:00(0.48 mg/l), 18:00(0.47 mg/l), 24:00(0.36 mg/l)로 나타나 새벽을 제외하고는 대체로 0.40 mg/l 이상을 유지하였다. 배수지농도를 1.00 mg/l로 유지하였을 경우에 새벽시간을 제외하고 정오와 오후에는 0.60 mg/l 이상의 농도분포를 보였다. 배수지의 주입염소농도를 최소값인 0.40 mg/l로 유지하였을 때 하루 중 잔류염소가 최저농

도를 보이는 오전 6시에서의 각 수도꼭지에서의 유리 잔류염소 농도분포를 Fig. 5에 제시하였다.

5. 이송거리별 잔류염소예측

모든 수도전에서 유리잔류염소 권장치 0.20 mg/l을 만족시키는 봄·가을철(수온 15°C)의 배수지에서 잔류염소농도를 0.60 mg/l로 유지하였을 경우에 이송거리별 유리잔류염소 농도분포를 조사하였다. 배수지로부터 반경 1.00 km 내외는 잔류염소농도 0.55 mg/l 이상으로 나타난 것으로 보아 관경이 300 mm 정도로 비교적 크고 체류시간이 짧아 농도감소가 적었으며, 반경 1.00~1.50 km 사이는 급수량이 비교적 많은 시내지역으로 대부분 0.50 mg/l 정도, 관경이 작고 급수량이 적은 고지대에서는 0.30 mg/l 정도를 보였으며, 2.00 km 이상인 원거리 지역의 경우, 관경이 200 mm 이상인 주 배수관로 인근지역에서는 0.40 mg/l 이상을 유지하였으나 관경이 150 mm 이내로 작아지면서 급수량이 적은 수도전 말단지점으로 갈수록 줄어들어 최연장 지점인 P509 관로에서는 0.23 mg/l로 예측되었다. 한편 여름철에도 전체적인 잔류염소 감소경향은 이와 비슷하였으나 계절별 잔류염소 분포에서 알 수 있듯이 여름철에는 감소경향이 연장길이가 길수록 관경이 작을수록 급수량이 작을수록 봄·가을철에 비해 크게 나타났다. 한편, 블록식으로 구성되지 않은 일부 고지대 배수관로에서

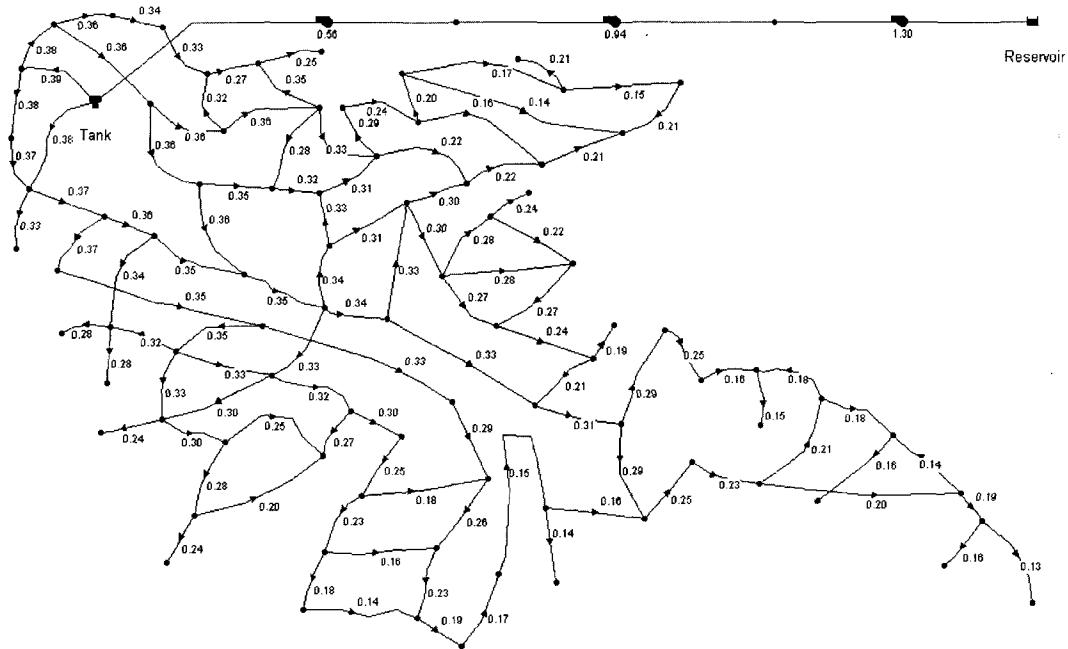


Fig. 5. Distribution of chlorine residual for 0.40 mg/l at 6 AM in Summer.

는 체류시간의 증가로 인해 감소폭이 훨씬 커서 지속적인 잔류염소 모니터링이 필요한 것으로 판단되었다.

IV. 결 론

본 연구는 정수처리 후 긴 체류시간을 갖는 송수관로를 거친 후 K-배수지에서 염소 재 주입 후 배수관로를 거쳐 각 수용가에 보급되는 수도물을 대상으로 하여 미국 환경보호청(EPA)에서 개발한 EPANET모형을 이용하여, 모든 배수관로의 소독능(CT)확보를 위해 배수지에서 염소 주입량을 달리하여, 각 계절별 적정 잔류염소 주입량을 예측하여 본 결론은 다음과 같다.

1. 계절별로 배수지 염소주입 농도변화에 따른 잔류염소 감소율은 여름철(수온 25°C)이 봄·가을철(수온 15°C)에 비해 큰 것으로 나타났다.
2. 봄·가을철의 경우, 배수지 농도를 0.60 mg/l 정도로 유지하였을 경우, 모든 지점에서 유리잔류염소 권장기준인 0.20 mg/l 이상으로 나타났으며, 여름철의 경우, 배수지농도를 0.80 mg/l 정도로 유지하였을 때 새벽시간을 제외하고는 대체로 유리잔류염소 권장기준인 0.40 mg/l 이상으로 나타났다.
3. 이송거리별 잔류염소 감소율에서는, 대체로 거리별로 환경이 좁아짐에 따라 감소경향을 보였으며, 특히

여름철에 더욱 뚜렷한 경향을 보였다.

4. 블록식으로 구성되지 않은 일부 고지대 배수관로에서는 체류시간의 증가로 인해 감소폭이 훨씬 커서 지속적인 잔류염소 모니터링이 필요한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. National Academy of Science, Drinking water and health : Disinfectants and disinfection by-products. Washington. DC: National Academy Press, 25-33, 1987.
2. Simth, D. B., Hess, A. F. and Opheim, D. : Control of distribution system coliform regrowth, Proc. AWWA Water Quality Tech. Conf., Philadelphia, PA, AWWA, Denver, CO. 65-69, 1989.
3. Snead, M. C., Olivieri, V. P., Kawata, K. and Kruse, C. W. : The effectiveness of chlorine residuals in inactivation of bacteria and viruses introduced by post-treatment contamination. *Water Res.*, **14**, 403-411, 1980.
4. 환경부, 상수도시설기준(유지관리편), 수도전에서의 음용수의 잔류염소, 1998.
5. Clark, T. F. : Chlorine-tolerant bacteria in water distribution system. *Public Works*, **115**, 65-67, 1984.
6. Levi, Y. and Mallevalle, J. : Global Strategy and New Tools for Maintaining Water Quality in Distribution System, IWSA-APRSC on "Safety of Water Supply in Transmission and Distribution System". *Shanghai*,

- P.R. China*, 100-108, 1996.
7. Clark, R. M. *et al.* : Water Quality Changes in a Simulated Distribution System. *J. Water SRT-AQUA*, **43**(6), 263-277, 1994.
 8. Rossma, L. A. : EPANET User Manual, Risk Reduction Eng. Lab., U. S Envir. Protection agency(EPA), Cincinnati, Ohio, 1994.
 9. 최재호, 왕창근 : EPANET모형을 이용한 도시 상수도 관망에서의 수리 및 수질 Simulation, *대한환경공학회지*, **19**(7), 915-928, 1997.
 10. American Water Works Association, Characterization and Modeling of Chlorine Decay in Distribution Systems, 1999.
 11. Rossma, L. A., Clark, R. M. and Grayman, W. M. : Modeling Chlorine Residuals in Drinking-Water Distribution Systems. *J. Environmental Engineering*, **120**(4), 803-820, 1994.
 12. Wayne, W., Sharp, J. P. and Morgan, M. : In-situ chlorine decay testing, Proc. AWWARF/EPA Conf. on Water Quality Modeling in Distribution System", Cincinnati, OH, Feb. 45-50, 1991.
 13. 인천광역시 상수도사업본부 : 수도정비 기본계획 보고서. 277-287, 1998.