

論 文

上水관망내 잔류염소농도 분포 예측

Prediction of Chlorine Residual in Water Distribution System

주대성* · 박노석* · 박희경** · 오정우***

Dae-Sung Joo* · No-Suk Park* · Heek-Yung Park** · Jung-Woo Oh***

Abstract

To use chlorine residual as an surrogate parameter of the water quality change during the transportation in the water distribution system(WDS), the correct prediction model of chlorine residual must be established in advance. This paper shows the procedure and the result of applying the water quality model to the field WDS. To begin with, hydraulic model was calibrated and verified using fluoride as an tracer. And chlorine residual was predicted through simulation of water quality model. This predicted value was compared with the observed value. With adjusting the bulk decay coefficient(k_b) and the wall decay coefficient(k_w) according to the pipewall environment, the predicted chlorine residual can represent the observed value relatively well.

1. 서 론

국민의 생활수준 향상으로 수도수에 대한 소비자의 욕구가 단순히 정수된 물을 공급받는다는 개념에서 맛과 냄새 등의 문제까지 배제된 완전한 정수수를 요구하고 있다. 따라서 수도수에서 발생되는 불쾌한 맛과 냄새 등의 문제까지 배제된 상수 수질을 얻기 위해서는 기존 정수장의 처리공정을 개선해 나가는 노력과 더불어 배급수관로를 통하여 운반되는 동안 발생

할 수 있는 수질의 변화를 사전에 예방하고 사고 발생시 긴급히 대처해 나갈 수 있는 방안의 강구가 요구된다. 관로내 수질변화의 주요 원인으로 상수관망내 잔류염소 농도가 부족하면 상수가 정수장에서 최종 소비지에 운반되는 동안 관망내에서 미생물이 재성장할 수 있다. 잔류염소 농도가 너무 낮아 미생물 발생이 우려될 경우는 정수처리장에서 염소 주입량을 증가시키거나 상수관망내 여러지점에 염소를 추가 주입하는 주입장 설치가 요구된다.

수질기준에서는 평소에 수도전에서 0.2mg/l 이상, 미생물의 재성장이 우려되는 시기에는 0.4mg/l 이상의 잔류염소 농도 유지를 기준으로 정하고 있다. 상수관망 내에서의 잔류 염소 농도를 적정 수준으로 유지하고 잔류염소농도

* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 한국과학기술원 토목공학과 교수

*** 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

가 지나치게 낮은 지역에 보조 염소 주입 장치를 설치 운영하기 위해서는 잔류 염소 농도 분포를 시뮬레이션 할 수 있는 모델의 개발이 요구된다. 최근 상수공급관로내에서의 수질변화를 추적하기 위한 효과적인 수단으로 컴퓨터 기술에 기초한 수학적 모델링 기법이 급격히 발달하고 있다. 이와같은 모델은 Hardy-Cross 방법에 의해 손으로 유량을 계산하던 시기에서 1970년대와 1980년대 초반의 컴퓨터에 기초한 수리해석용 모델의 개발과 활용(Wood and Raves, 1981) 그리고 1980년대 중반에 들어와서 관로내 수질 모델의 출현에까지 이르렀다 (Chun and Selznick, 1985, Clark and Males, 1986). 오염물질이동을 예측하는 수질 모델은 수리학적 모델과 연계되어 관로내에서 일어나는 화학반응, 생물반응, 그리고 수리적 변화를 모사하여 관로시스템내 오염물질의 시공간 분포를 예측할 수 있도록 한다(Clark and Coyle, 1990, Clark et al, 1991, Clark et al, 1993). 현재는 모델링 시스템과 맵핑 시스템이 통합되어 관로내 수리 및 수질 변화를 해석하고 그 결과를 그래픽으로 표현해 주는 사용자 편의 위주의 시스템으로까지 발전했다(Deininger, 1992). 이러한 모델은 다양한 운전 방식과 설계 인자를 결정하고 관로내로 오염물이 유입되었을 때 오염물의 거동을 파악하는 데 사용되어지며 개선된 수질 분석용 시료채취 프로그램의 계획에도 활용할 수 있다.

본 연구에서는 관로내 수질 모델링 프로그램으로 U.S EPA에서 개발한 EPANET(U.S EPA, 1994)을 이용하여 대상관로내 잔류염소 농도의 분포를 예측하고 이를 실측한 잔류염소 농도와 비교하여 모델을 검증하고 보정하는 과정을 제시한다.

2. 상수관로내 수질 모델링

동적 수질 시뮬레이터는 관망을 따라 흐르는 용존물질의 변화를 추적한다. 이는 수리해석의 결과 얻어진 유량을 이용하여 각 절점을 잇는 각 관로내의 용존물질의 물질수지식을 풀게 된다:

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

여기서, c_{ij} = 거리와 시간의 함수로서 관로 i, j 간의 용존물질 농도
 x_{ij} = 관로 i, j 간의 이동거리
 q_{ij} = 시간 t 에서 관로 i, j 간의 유량
 A_{ij} = 관로 i, j 의 단면적
 $\theta(c_{ij})$ = 관로 i, j 내의 용존물질의 반응 속도

식 (1)는 시간 0의 초기 조건과 시작 절점 i 즉 $x_{ij} = 0$ 에서의 경계조건에서 해를 구한다.

경계조건:

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

합(Summations)은 관로 i, j 의 선두 절점 (i)로 유량을 갖는 모든 관로 k, i 에 대하여 더하였다. 한편 L_{ki} 는 관로 k, i 의 길이, M_i 는 절점 i 에서 외부로부터 유입된 물질, Q_{si} 는 외부 유입원의 유량이다. 관로 i, j 에 대한 경계조건은 관로 i, j 로 유량을 전달하는 모든 관로 k, i 의 끝 절점 농도에 의존한다. 따라서 식 (1)와 (2)은 관망의 모든 관로에 걸쳐 서로 결합된 미분 대수방정식을 이룬다.

위의 식은 유량이 일정한 각각의 수리 시간 간격내에 더 짧은 수질 시간 간격을 계산하고 각 관로를 많은 수의 완전 혼합 구간으로 나누어 계산한다. 각 수질 시간 간격내에 각 관로 구간의 물질은 우선 인접한 다음 구간으로 전달되고, 인접 구간이 절점일 때는 절점으로 유입된 질량과 유량이 다른 관로에서 이미 받은 질량과 유량에 더해진다. 이러한 전달과정이 모든 관로에 대해 완료되고 나면 각 절점에서 혼합된 농도가 계산되고 절점을 떠나는 유량과 함께 관로의 선두 구간으로 방출된다. 그리고 나서 각 관로구간의 물질이 반응한다. 이러한 단계가 새로운 수리 조건이 발생하는 시점까지

반복되고 이후 구간이 새로 정해지고 계산은 지속된다.

위의 계산 방법에 사용된 수질 시간 간격은 어떤 관로의 유량이 물리적 부피를 초과하지 않는 범위에서 가능한 크게 잡는다. 따라서 수질 시간 간격 dt_{wq} 는 관망내 어떤 관로의 유달 시간보다 더 클 수는 없다:

$$\text{즉 } dt_{wq} = \text{Min} \frac{V_{ij}}{q_{ij}} \text{ for all pipes } i, j \quad (\text{Eq. 3})$$

여기서 V_{ij} 는 관로 i, j 의 부피이고 q_{ij} 는 유량이다.

3. 반응 속도 모델

수질모델의 식 (1)는 용존물질이 관망내에서 이동시 일어나는 반응에 의해 소실되거나 증가하는 것을 고려하기 위한 기작을 제공한다. 반응은 수체내에서 혹은 관벽에서 동시에 일어날 수 있다. EPANET 모델은 1차 반응식을 사용해서 두가지 형태의 반응을 모두 반영한다. 일 반적으로 수체내의 물질은 다음과 같은 속도로 감소할 것이다:

$$\theta(c) = -k_b c - \frac{k_f}{R_H} (c - c_w) \quad (\text{Eq. 4})$$

여기서, k_b = 1차 수체 반응상수

c = 수체에서의 물질농도

k_f = 수체와 관벽사이의 물질 전달 상수

R_H = 관로의 수리 반경

c_w = 관벽에서의 물질농도

식 (4)에서 첫항은 수체(Bulk) 반응을 나타내고, 두 번째 항은 새로운 미지수 c_w 를 포함하여 관벽과 수체사이의 물질 전달 속도를 반영한다. 관벽에서의 반응이 관벽에서의 물질농도에 대하여 1차식으로 표현 가능하고 반응속도가 관벽으로 물질이 전달되는 속도와 같다고 가정하면 관벽에서 일어나는 반응에 대하여 다

음과 같이 반응식을 쓸 수 있다:

$$k_f(c - c_w) = k_w c_w \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서, k_w 는 관벽에서의 반응상수이다. c_w 에 대하여 전개하고 식 (4)에 치환하면 다음식이 된다:

$$\theta(c) = -Kc \quad (\text{Eq. 6})$$

여기서, K 는 전체 반응의 1차 속도 상수로서 다음과 같다:

$$K = k_b + k_w \frac{k_f}{R_H(k_w + k_f)} \quad (\text{Eq. 7})$$

결국 관로내의 반응을 나타내기 위하여 3개의 계수가 사용되는데 수체내 반응상수 k_b 와 관벽에서의 반응상수 k_w 는 실험을 통해 모델에 입력해 주어야 한다. 물질전달계수 k_f 는 다음과 같이 무차원의 Sherwood Number를 사용하여 내부적으로 계산된다:

$$k_f = \frac{ShD}{d} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$Sh = 0.023Re^{0.83} Sc^{0.333} \text{ for } Re \geq 2300 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668(d/L)ReSc}{1 + 0.04[(d/L)ReSc]^{0.67}} \quad \text{for } Re < 2300 \quad (\text{Eq. 10})$$

여기서, Re = Reynolds Number

Sc = Schmidt Number

d = pipe diameter

L = pipe length

q = flow rate

A = cross-sectional flow area of pipe

D = molecular diffusivity of substance in fluid

식 (9)는 물질전달계수가 관로 위치와는 독

표 1. 실측유달시간과 보정결과 얻어진 유달시간 비교

불명수 비율	지점1의 유달시간	지점2의 유달시간	지점3의 유달시간
불명수 10%	19분 15초 (-21%)	1시간 29분 (-15%)	2시간 17분 (-9.9%)
불명수 20%	21분 30초 (-10%)	1시간 39분 (-5.7%)	2시간 32분 (0%)
불명수 30%	25분 12초 (+5.4%)	1시간 55분 (+9.5%)	2시간 55분 (+15%)
불명수 40%	28분 40초 (+20%)	2시간 12분 (+26%)	3시간 27분 (+36%)
불소 실험	24분	1시간 45분	2시간 32분

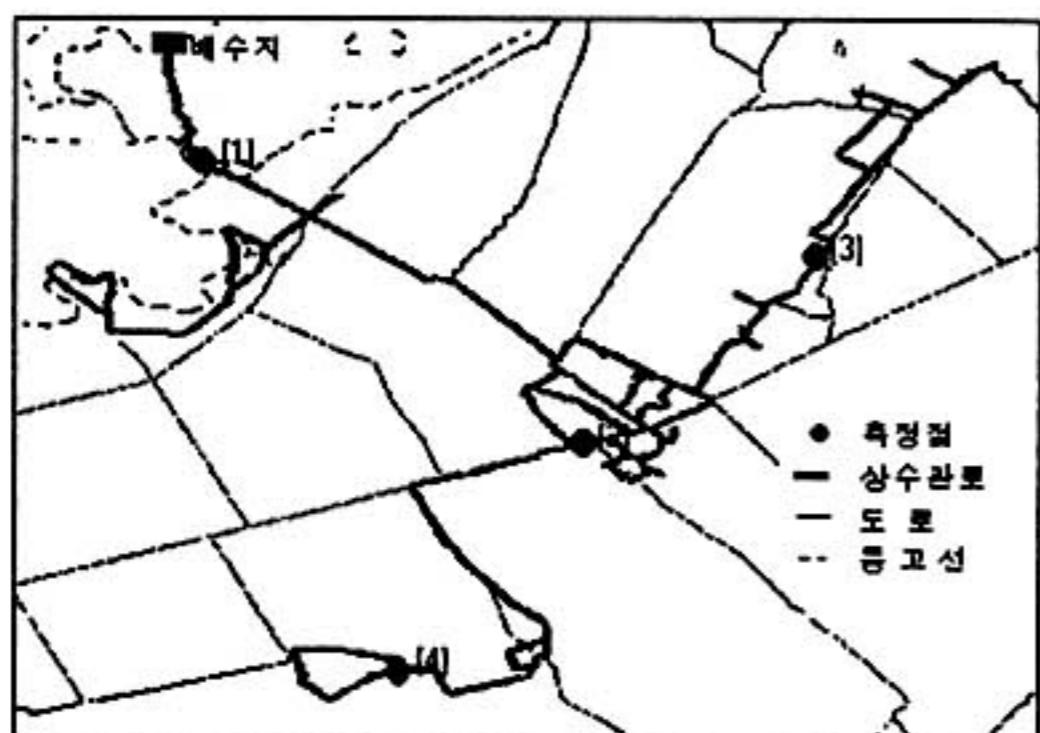


그림 1. K면 급배수 관망도

립된 난류에 적용되고 식 (10)은 관로 길이를 따라 물질전달계수의 평균을 이용하는 충류에 사용한다.

4. 실험 절차

4. 1. 대상관로에 대한 수리해석

대상관로에 대한 수리해석의 결과로 얻어진 유속과 수압이 실측값과 비교하여 유사한 결과를 얻지 못한다면, 식 (1)의 물질수지식에서 물질전달에 가장 중요한 요소인 유속(q_{ij}/A_{ij}) 값이 잘못 계산되어 수질 모델링의 물질 농도 예측은 신뢰성을 잃게 된다. 따라서 수리 모델을 이용해 상수관망내의 유속을 정확히 해석해 내는 것은 수질모델링에서 물질의 농도를 예측하는 예비단계로 필수적이다. 본 연구는 충북 청원군 K면을 연구대상관로로 정하였다. K면은 다른 지역에 비해 비교적 양호한 관로체계 및

관망도를 보유하고 있으며, 관로가 수리 및 수질거동 해석에 필요한 수지상, 환상이 혼재되어 있어, 수리해석과 수질변화를 다양한 각도에서 분석할 수 있다. 충북 청원군 K면의 대상 관로에 대하여 수리해석하고 불소를 이용하여 유달시간을 실측하여 수리모델을 검증하고 불명수 비율을 조정하면서 보정한 결과는 표 1과 같다(KAIST, 1997).

4. 2. 대상관로내 잔류염소농도 실측

청주정수장에서 송수관로를 통해 정수를 공급받는 K면의 배수구역내 관망도는 그림 1과 같다. 잔류염소를 측정하기 위하여 배수구역내 4곳의 시료채취지점을 정하였다. 1번 지점은 배수지로 잡았다. 2번 지점은 K면사무소의 옥외수도전이다. 3번 지점은 서평마을의 한 가정 수도전에서 시료를 채취하였다. 4번 지점은 3번 지점과 반대방향인 오송 4구의 가정 수도전이다.

시료채취는 수도꼭지를 열고 약 3분간 방류 시킨 다음 시료를 채취함으로서 급수관에서 수도꼭지사이에 정체되어 있던 물을 배제시켰다. 시료채취후 현장에서 직접 유리잔류염소와 총 잔류염소를 측정하였다. 측정장비는 DPD 방법을 이용한 휴대형 염소농도분석장치인 DR7000을 이용하였다. 각 시료채취지점에서의 유리잔류염소농도는 표 2와 같다.

4. 3. 수질모델을 이용한 잔류염소농도 분포 예측

수질모델을 수행하기 위해 필요한 수리모델 해석 결과는 KAIST(1997)의 보고서 자료를

표 2. 시료취지점별 잔류염소 농도

시료채취지점	배수지	면사무소[2]	오송4구[3]	서평마을[4]
유리잔류염소(mg/L)	0.98	0.76	0.71	0.50
총잔류염소(mg/L)	1.04	0.83	0.87	0.79

이용하였다. 일간 수요량 변화에 따른 동적 수리, 수질 변화를 파악하기 위하여 배수지에서 배수구역으로 나가는 관의 유속을 측정하여 각 시간별 유속변화를 일간 수요량 변화 패턴으로 사용하였다 (그림 2).

반응속도모델에서 언급한 바와 같이 염소의 분해반응에 관여하는 반응상수인 수체(bulk)에서의 염소분해상수 k_b 와 관벽에서의 염소분해상수 k_w 를 실험을 통해 구해서 모델에 입력하여야 한다. 우선 수체(bulk)에서의 염소분해상수를 구하기 위해 대상관로에서 시료를 채취하여 마개가 있는 유리병에 담고 아이스박스와 같은 직사광선을 피할 수 있는 장소에서 매시간 잔류염소농도를 측정한다.

일차분해반응식인 식 (11)을 이용하여 구한 반응상수(k_b)는 $-2.0/\text{day}$ 이었다.

$$C(t) = C_0 \exp(-k_b t) \quad (\text{Eq. 11})$$

반응시간동안 분해된 전체 염소소모량에서 수체내에서 일어나는 염소분해반응에 의하여 소모되는 염소량을 빼고 남은 부분이 관벽에서 일어나는 염소분해량이다. 현장에서 관측한 잔류염소량과 수질 모델에서 예측한 잔류염소량을 비교하여 실측값에 보다 근접한 수질모델의 예측값을 얻기 위하여 염소분해 반응상수의 입력방법을 네가지로 구분하여 시뮬레이션해 보았다(Vasconcelos, 1997): 1) 수체에서의 염소분해상수만을 적용 ($k_b = -2.0/\text{day}$), 2) 수체에서의 염소분해상수와 관벽에서의 염소분해상수를 적용 ($k_b = -2.0/\text{day}$, $k_w = -0.1\text{m}/\text{day}$), 3) 실측값에 더욱 가까운 결과를 얻기 위해 관벽에서의 염소분해상수를 재조정 ($k_b = -2.0/\text{day}$, $k_w = -0.05\text{m}/\text{day}$), 4) 관벽에서의 염소분해상수를 관경에 따라 재조정 ($k_b = -$

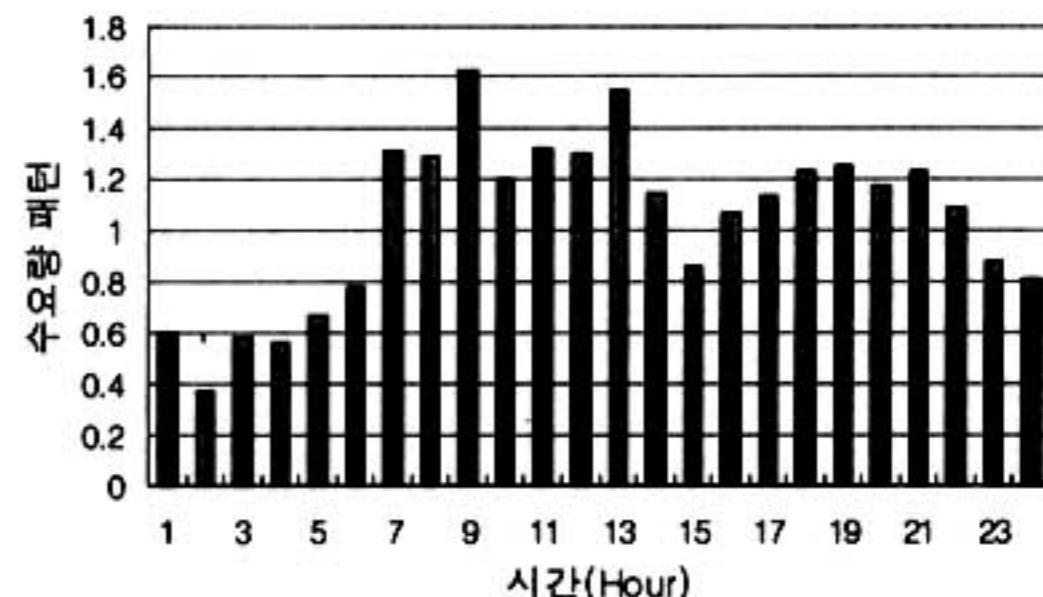


그림 2. K면 일간 수요량 변화 패턴

2. $0/\text{day}$, $-0.1 \leq k_w \leq -0.05$)

반응상수 입력방법에 따라 다르게 얻어진 잔류염소농도의 실측값과 예측값은 다음 표 3과 같다.

1) 수체에서의 염소분해상수만을 적용한 경우 측정점 세 곳 모두에서 실측값보다 0.08에서 0.19mg/l 까지 높은 잔류염소농도를 보였다. 이와 같이 높은 예측값을 얻게 된 이유는 관벽에서 실제 일어나는 염소분해기작이 시뮬레이션과정에서 무시되었기 때문이다.

2) 수체에서의 염소분해상수는 일정하게 고정하고 관벽에서의 반응상수를 전체 배수구역에 걸쳐 동일한 값을 적용하되, 여러 값들로 바꾸면서 시행착오를 거쳐 실측값과 유사한 결과를 얻었다. 그러나 배수지에서 가까운 두 지점(2번, 3번 시료채취지점)은 실측값보다 낮게 나오고 배수지에서 가장 먼 거리에 있는 4번 시료채취지점에서는 오히려 실측값보다 높게 예측하였다.

3) 관벽에서의 염소분해상수를 -0.1 에서 $-0.05\text{m}/\text{day}$ 로 바꾸어 적용해 본 결과 배수지에서 가까운 두 지점의 예측값은 실측값과 유사해졌으나 가장 먼 위치에 놓여 있는 관측점에서는 실측값보다 0.12mg/l 더 높게 예측하였

표 3. 반응상수 입력방법에 따른 잔류염소농도 변화

시료채취지점	실측값	방법 1	방법 2	방법 3	방법 4
면사무소	0.76	0.84	0.70	0.77	0.73
오송4구	0.71	0.82	0.67	0.74	0.72
서평마을	0.50	0.74	0.52	0.62	0.57

다. 1), 2)와 3)의 결과로부터 관경의 변화를 무시하고 배수구역 전체에 걸쳐서 한가지 관벽 분해상수를 적용할 경우, 배수구역에서 가까이에 놓여 있는 관경이 비교적 큰 관과 배수지에서 멀리 떨어져 있는 관경이 작은 관이 배치되어 있는 각 절점에서의 잔류염소 농도를 제대로 예측할 수 없음을 확인할 수 있었다.

4) 관망 입력자료의 관경을 파악하여 관경이 150mm 이상인 관에 대해서는 관벽에서의 염소분해상수를 -0.05m/day 로 관경이 150mm 미만인 관에 대해서는 관벽에서의 분해상수를 -0.1m/day 로 구분하여 입력하고 모델의 예측값을 보면 배수지에서 가까운 지점과 배수지에서 멀리 떨어진 지점에서의 실측값과 예측값이 유사해지는 결과를 얻을 수 있었다.

그러나, 현장관로를 대상으로 실측한 잔류염소농도와 모델의 시뮬레이션 결과 얻은 예측농도값이 더욱 유사해지도록 하기 위해서는 세부 구간별 관경, 관재질, 관 매설년한, 관세척주기 등이 파악되어 관벽에서의 염소분해상수값에 반영될 수 있도록 하여야 할 것이다.

5. 결 론

배급수관로내에서 잔류염소농도의 분포를 올바로 예측하고 이를 기반으로 현장 관로의 잔류염소농도를 상시 감시함으로서 배급수관로의 이상유무를 진단할 수 있다. 본 연구는 잔류염소농도 분포 모델을 현장관로에 적용할 때 실측한 값과 모델의 예측값과의 차이를 최소화하여 모델이 현장의 잔류염소농도를 제대로 반영할 수 있도록 하기 위한 수질모델 검증 및 보정 단계를 제시한다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 수체에서의 염소분해상수(k_b)만을 염소분해반응식에 적용하여 시뮬레이션 한 결과 실측값보다 높은 예측값을 얻게 된 것은 관로내에서 일어나는 염소분해반응은 수체(bulk)에 존재하는 염소소모성 물질과의 반응과 더불어 관벽에서도 염소분해반응이 활발히 일어남을 보여준다.

2. 관벽에서 일어나는 염소분해상수(k_w)는 현장에서 실측한 값과 모델의 예측값이 유사하게 될 때까지 시행 착오를 통해 조정해 주는 과정을 거쳐 얻게 된다.

3. 관벽의 염소분해상수(k_w)는 배수구역 전체에 걸쳐 한가지 값을 대입하기보다 관경, 관재질, 관 매설년한, 관 세척주기 등을 고려하여 세부구역으로 나누어 다른 값을 적용하는 것이 실측값과의 오차를 줄일 수 있는 방법이다.

4. 수체 염소분해상수(k_b)는 amber glass bottle 실험을 통해 쉽게 구할 수 있으나, 관벽 염소분해상수(k_w)는 각 구간별 관내부 특성에 따라 특정한 값이 주어질 수 있는 관계식을 유도하는 것이 필요하겠다.

감사의 글

본 연구는 국립환경연구원의 '96 G-7 "수돗물의 2차오염 방지기술"에 의한 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

Chun, D. G., and Selznick, H. L. (1985) Computer modeling of distribution system system water quality, Computer Applications in Water Resources, ASCE, New York, N. Y., pp. 448-456.

- Clark, R. M., Grayman, W. M. Goodrich, J. A., Deininger, R. A. and Hess A. F. (1991) Field-testing distribution water quality models, *J. AWWA*, 83(7), July, 67-75.
- Clark, R. M., Grayman, W. M., Males, R. M. and Hess A. F. (1993), Modeling contaminant propagation in drinking water distribution systems, *J. Environ Eng ASCE*, 119(2), 1-16.
- Clark, R. M., and Coyle, J. A. (1990) Measuring and Modeling variations in distribution system water quality, *J. AWWA*, 82(8), Aug., 46-53.
- Clark, R. M., and Males, R. M. (1986) Developing and applying the water supply simulation model, *J. AWWA*, 78(8), Aug., 61-65.
- Cross, H. (1936) Analysis of Flow in Networks of Conduits or Conductors, Univ. of Ill. Eng. Experiment Station Bulletin 286, Urbana, IL.
- Deininger, R. A., Clark, R. M., Hess, A. F. and Bernston E. V. (1992) Animation and visualisation of water quality in distribution systems, *J. AWWA*, 84(7), July, 48-52.
- Kennedy, S. M., Sarikelle, S., and Suravallop, K. (1991), Calibrating Hydraulic Analyses of Distributin Systems Using Fluoride Tracer Studies, *J. AWWA*, July, 54-59.
- KAIST (1997) Development of water quality monitoring system in Water Distribution System.
- USEPA Risk Reduction Eng. Lab. (1994) EPANET Users Manual, Cincinnati, Ohio, Jan.
- Vasconcelos, J. J., Rossman, L. A., Grayman, W. M., Boulos, P. F., and Clark, R. M., (1997) Kinetics of chlorine decay, *J. AWWA*, July, 54-65.
- Wood, D. J., and Raves, A. G. (1981) Reliability of algorithms for pipe network analysis, *J. Hydr. Div., ASCE*, 107(110), 1145-1161.