

Prediction of Chlorine Concentration in a Pilot-Scaled Plant Distribution System

Pilot 규모의 모의 관망에서의 염소 농도 예측

Kim, Hyun Jun · Kim, Sang Hyun*

김현준 · 김상현*

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학부

Abstract : The chlorine's residual concentration prevents the regrowth of microorganism in water transport along the pipeline system. Precise prediction of chlorine concentration is important in determining disinfectant injection for the water distribution system. In this study, a pilot scale water distribution system was designed and fabricated to measure the temporal variation of chlorine concentration for three flow conditions ($V = 0.88, 1.33, 1.95$ m/s). Various kinetic models were applied to identify the relationship between hydraulic condition and chlorine decay. Genetic Algorithm (GA) was integrated into five kinetic models and time series of chlorine were used to calibrate parameters. Model fitness was compared by Root Mean Square Error (RMSE) between measurement and prediction. Limited first order model and Parallel first order showed good fitness for prediction of chlorine concentration.

Key words : chlorine, decay model, optimization, flow velocity, decay coefficient

주제어 : 염소, 감쇠모형, 최적화, 유속, 감쇠상수

1. 서론

현대사회에서 안정적이고 안전한 수돗물의 공급은 기본적으로 보장되어야 할 사회적 요구이다. 수돗물을 생산하기 위해 상수원으로부터 취수된 물은 탁도와 세균류 같은 유해 불순물을 제거하기 위해 정수처리를 한다. 여과 및 침사과정을 통해서 정수된 물은 수돗물으로써 일상생활에 사용하기 가능하거나 먹는물로 가능한 수준의 품질로 생산이 된다. 이렇게 처리된 물은 가정에서 사용할 수

있도록 이송된다. 처리장으로부터 배수지까지 또 배수지로부터 각 가정까지 이어지는 관망은 미생물의 유입, 관망의 파손 등의 원인으로 정수장에서 확보된 수질이 가정까지 전달하는데 상당한 위험요소이다. 이와 같은 위험요소로 인한 피해를 최소화하기 위해 지속성이 있는 소독 물질을 정수의 마지막 단계에 투입하고 배수를 한다. 소독과정에서 사용되는 염소는 강력한 소독물질일 뿐만 아니라 지속성이 있어서 이송 단계에서 잔류 소독제로 널리 사용된다. 소독의 효과를 위한 최소 염소농도뿐만 아니라 소독부산물로 인한 국민보건에 위해를 막기 위해 최대 잔류 염소 또한 규정이 되어있는데 국내 수질 기준으로는 관망 내 잔

* Received 28 September 2012, revised 4 December 2012, accepted 7 December 2012.

* Corresponding author: Tel.: 051-510-2168, E-mail: kimsangh@pusan.ac.kr

류염소의 농도를 최소 0.1 mg/L로 최대 4 mg/L의 범위로 유지하도록 하고 있다. 수돗물이 정수장에서부터 가정으로 전달될 때까지 규정 농도 범위의 염소를 유지하기 위해서는 관망 내부에서의 염소 소비량을 정확히 예측해서 정수장에서의 염소량을 조절하거나 추가 염소 투입지를 선정해서 배수과정 중간에 염소를 추가적으로 투입해야한다. 하지만 이러한 염소의 농도는 (1) 물속 염소와의 반응물질에 의해 (2) 관 벽의 생물 막 및 관 벽과의 마찰에 의해 정수장으로부터 가정으로 이동하며 감소하게 되어 정수장에서 투입해야하는 염소의 정확한 양을 산정하는 것에 어려움이 많다.

정확한 염소의 투입량을 결정하기 위해 정확한 염소 감쇠 모형이 필요했고, 많은 연구자들이 정확한 염소 감쇠 모형을 개발하기 여러 방법들을 사용하여 연구를 하였다. 실제의 염소 감쇠를 측정하고, 제안하는 모형의 모사결과와 비교하여 모형의 적합성을 나타내거나 여러 후보모형을 열거하고 실제 염소 감쇠 결과와 비교하여 가장 잘 모사하는 모형을 선정하는 연구들이 많이 이루어 졌다(Feben, 1951; Qualls and Johnson, 1983; Haas and Karra, 1984). 하지만 하수를 이용하여 염소를 주입하고 그 감쇠 거동을 살펴본 실험이 대부분이어서 상수관망에서의 직접적인 적용은 불확실성이 존재한다. 비교적 최근에는 염소의 감쇠 거동을 물속의 유기물과 반응하여 감쇠하는 체적감쇠 (Bulk decay)와 관 벽 또는 관벽에 붙어있는 생물막과의 반응에 의해서 감쇠하는 관벽감쇠 (Wall decay)로 나눠 각각의 감쇠 상수 (Decay coefficient)에 영향을 주는 인자들에 대한 연구들이 수행되어왔다 (Hua et al., 1999; Digiano, 2005; Powell et al., 2000; Hallam et al., 2003; A.O, 2007). 이와같은 기존의 대다수 연구는 1차 감쇠 상수 (1st order decay coefficient)와 영향인자들의 관계에 집중하고 있어서, 염소 농도 변화의 거동이 1차 감쇠의 형태가 아닐 때의 적용성에서 한

계를 가지고 있다. 국내에서는 염소의 소비와 온도, 초기염소농도, 유기물 농도와의 관계를 밝히는 연구가 있었다.

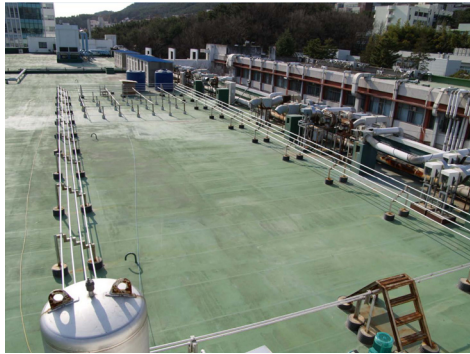
본 연구에서는 위와 같은 기존연구의 진행과 적용성의 한계를 고려하여 Pilot plant 규모의 염소 감쇠 모니터링 모의 관망을 설계하여 염소 감쇠 거동을 측정하고, 선행연구에 의해서 제안되었던 5개의 모형을 9개의 모형으로 확장하여 검토한다. 이 과정에서 매개변수의 최적화를 위해서 총괄 염소 상쇠 상수 (Overall Chlorine Decay Coefficient)를 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)을 이용하여 최적화한다. 최적화한 상수를 모형에 다시 대입하여 실제의 염소 감쇠 거동과 모형의 예측 값을 비교하고 모형의 적합도를 결정계수 (Determine Coefficient)를 이용해 비교하여 가장 결정 계수가 높아 실제의 염소 감쇠 거동을 잘 모사하는 모형을 도출한다.

2. 재료 및 방법

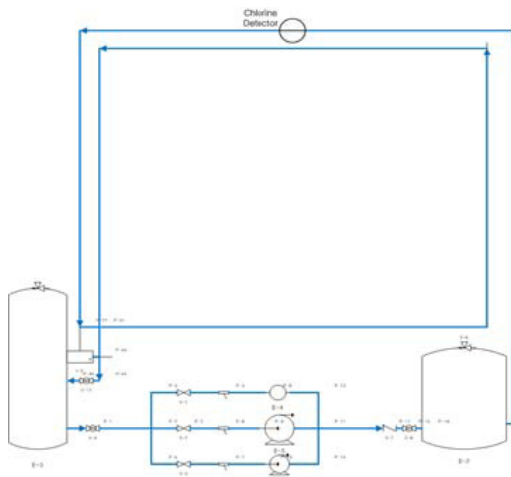
2.1 염소 감쇠 관측 관망의 설계와 제작

염소 감쇠 관측을 위한 Pilot 규모의 시스템이 설치 되었다. 실험 관망은 Fig. 1과 같이 총 길이 125 m의 관망이 두 개의 루프로 구성되어있다. 관의 재질은 스테인레스 스틸이고, 내경은 0.02 m, 굵기는 0.0003 m이다. 관망의 각 끝은 두 개의 저장탱크가 연결되어있고 저장 탱크와 가압 탱크로 활용된다. 저장탱크는 높이가 2 m이고, 지름이 0.65 m이며, 저장용량은 약 660 l 인 원통형 구조이며, 가압탱크는 높이가 0.98 m이고 지름이 1.22 m이며, 저장용량이 약 1000 l 인 원통형 구조이다. 저장 탱크 와 가압탱크 사이에 설치된 3개의 펌프를 조작하여 저장탱크로부터 가압탱크로 물을 전달하고 가압탱크로부터 나간 물은 관망을 지나 다시 저장탱크로 돌아오게 된다. 가운데 설치되어있는 3개의 펌프는 각각 최대 0.72 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s의

유속을 발생시킬 수 있고, 펌프 앞뒤로 설치되어 있는 밸브를 조절하여 레이놀즈수 2,000에서부터 80,000까지의 수리적 조건을 만들 수 있다.



(a) Experimental pipe line system



(b) The schematic of pipe line system

Fig. 1. The pilot scale experimental pipe system

Fig. 1(a)은 실험 관망의 실제 모습이고, Fig. 1(b)는 실험 관망의 계략적인 구조이다. 위와 같이 설계한 Pilot plant 실험 장치로부터 잔류 염소 데이터를 획득하기 위한 실시간 염소 농도 데이터 획득 시스템 (Real Time Chlorine Data Acquisition System) 설계되었다. 가압탱크로부터 관을 따라 33 m부분에 염소 농도 측정을 위한 Prominent Inc.의 잔류 염소 센서가 설치되어 있다. 잔류염소 센서의 측정범위는 0.02 ppm ~ 2 ppm이고, 오차 범위는 ± 0.02 ppm이다. 측정된 염소는 NI (National Instrument)사의 자료획득 시스템을 통해 디지털 신호로 변환되어 획득되어진다. Fig. 2는 염소 데이터가 획득되어지는 과정을 나타낸 계략도이다. 관망 실험 장치에 설치되어진 염소 센서로부터 자료 획득 시스템 (DAQs)는 실시간 염소 데이터를 획득하게 된다. 이때 센서로부터 측정되어지는 데이터는 실제 염소 값이 아니라 그에 상응하는 전류 (mA)값이므로 이를 실제 염소 값으로 보정해주는 작업과 잡음을 제거해주는 과정을 필요하다. 센서로부터 측정된 염소 데이터는 자료 저장 장치에 저장되어지고, 이동평균 (Moving Average) 방법을 이용해서 잡음을 제거한다. 잡음이 제거된 데이터는 다시 변환기 (Converter)를 통해 보정되어져서 실제의 염소농도 (ppm)으로 변환된다.

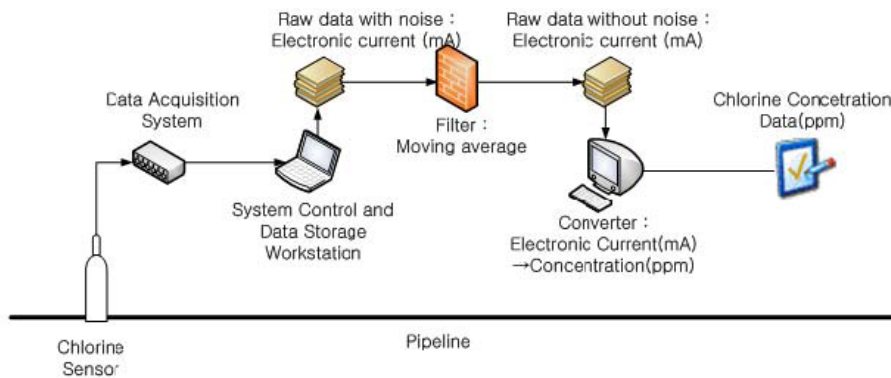


Fig. 2. Schematic flowchart of data acquisition system

2.2 염소 감쇠 모형

본 연구에서는 총괄 염소 감쇠를 예측하기 위해 선행연구들에 의해 제안된 다양한 염소 감쇠 모형을 적용하고, 그 중 Pilot Plant 관망의 운영을 통해서 확보된 염소 감쇠를 가장 잘 모사하는 모형을 선정한다. 본 연구에서는 Table 1과 같이 5가지 모형을 이용하여 염소 감쇠를 예측한다.

Table 1의 모형 1은 1차 감쇠 모형 (First Order Decay Model)으로 염소의 소비율이 현재의 염소 농도와 비례한다고 가정된 모형이다. 이 모형은 조절 가능한 변수가 1차 염소 감쇠 상수 (1st Order Decay Coefficient)인 k (day^{-1}) 하나이고 간단하게 적용가능하다는 장점이 있는 반면에 반응을 하지 않고 장시간이 흐른 후에도 남아있는 물질에 대한 설명을 하기에는 적합하지 않다는 단점이 있다. 모형 2는 n차 감쇠 모형 (nth Order Decay Model)으로 염소의 소비는 현재의 염소 농도의 n승과 비례 한다는 가정을 바탕으로 한 모형이다. 반응차수 n에 민감하게 반응하여 반응 농도가 급격하게 변화하게 되는 모형이다. 모형 3은 제한적인 1차 감쇠 모형 (Limited First Order Model)은 충분한 반응 시간이 지나도 안정적으로 남아있는 즉 반응을 하지 않는 염소농도 (C^*)가 있다고 가정하여 실제 염소 소비는 $C_0 - C^*$ 만큼만 반응하는 기작을 표현한 모형이다. 하지만 안정적인 염소의 농도 C^* 의 값이 잔류 염소 농도를 측정하는 장비의 검

출한계 이하일 경우 모형을 통해 실제의 거동을 예상하기 쉽지 않다는 면에서 모형의 정확도가 측정 장비의 영향을 많이 받는다는 단점이 있음을 알 수 있다. 모형 4는 제한적인 n차 감쇠 모형 (Limited nth Order Model)으로 제한적인 1차 감쇠 모형과 동일한 가정을 바탕으로 한 반응차수가 n차인 모형이다. 모형 5는 평행 1차 감쇠 모형 (Parallel First Order Model)으로 염소가 감쇠할 때 여러 가지 반응물과 반응을 하는데 이때 염소와 빠른 반응 속도로 반응하는 물질과 느린 반응 속도로 반응하는 물질이 나눠져 있다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 빠른 반응과 느린 반응의 비율을 각각 x , $1-x$ 로 나누고 각각이 독립적인 반응 속도 k_{fast} , k_{slow} 로 같은 시간에 동시에 진행됨을 설명하는 모형이다. 모형의 조작 가능한 변수가 x , k_{fast} , k_{slow} 로 3개이고, 이것은 앞서 제시한 나머지 4개의 모형에 비해 많은 수이다. Haas and Karra (1984)의 연구에서는 평행 1차 감쇠 모형이 실제 염소 농도의 거동을 가장 잘 모사한다고 보고했지만, 매개 변수가 많아 모형의 적합도는 높지만 그 모형의 복잡성으로 계산의 부담이 증가한다는 단점이 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 정상상태에서의 염소 감쇠 거동 실험 결과

본 연구에서는 0.88 m/s, 1.33 m/s, 1.95 m/s의 세가지 유속 조건에 대하여 잔류 염소 농

Table 1. Bulk chlorine decay kinetic models

Model #	Model Description	Equation
1	First Order	$C = C_0 \exp(-kt)$
2	nth Order	$C = \frac{C_0}{1 + kt(n-1)C_0}$
3	Limited First Order	$C = C^* + (C_0 - C^*) \exp(-kt)$
4	Limited nth Order	$C = C^* + (kt(n-1) + (1/(C_0 - C^*)^{n-1}))^{1/(n-1)}$
5	Parallel first order	$C = C_0 \exp(-k_{fast}t) + C_0(1-x) \exp(-k_{slow}t)$

C : Chlorine concentration(mg/l), C_0 : Initial chlorine concentration,
 C^* : Limited chlorine concentration, k : Chlorine decay coefficient, t : Time(day),
 k_{fast} : Chlorine decay coefficient of fast reaction,
 k_{slow} : Chlorine decay coefficient of slow reaction.

도를 측정하였다. 각각의 레이놀즈 수는 17,600, 26,600, 39,000이다. 본 연구에서는 체적 감쇠(Bulk decay)의 영향을 제외한 관벽 감쇠(Wall decay)만의 영향만을 고려하기 위해 한번도 사용하지 않아 생물막이 없고, 고압의 상태로 세척된 관만을 이용해서 실험을 수행하였다. 또한 염소 감쇠의 온도영향을 고려하여 시스템 내부를 순환하는 물의 온도를 보온. 단열재 및 항온조를 활용하여 18 ~ 20°C로 유지하였다. 또한 각각의 유속에서의 실험은 3회 이상 수행되었다.

실험 결과 0.2 ppm에서 0.02 ppm 까지 감쇠하는 동안 보인 잔류 염소 농도의 거동은 Fig. 3 과 같다. 관망내의 유속이 0.88 m/s인 경우 염소가 모두 감쇠 되는데 까지 5일 12시간이 걸렸고, 전체 농도의 50 %인 0.1 ppm으로 농도가 감쇠하는데 까지 걸린 시간은 20시간이었다. 관망내의 유속의 순환 속도가 1.33 m/s인 경우에는 0.2 ppm의 염소 농도가 0.02 ppm으로 감소하는데 4일 16시간인 소요되었다. 앞의 0.88 m/s의 결과와 비교해 봤을 때 염소 감쇠에 소요된 시간은 차이가 많이 나고, 전체 농도의 절반인 0.1 ppm으로 감소되는데 걸린 시간도 8시간 30분으로 0.88 m/s의 조건과 비교해 볼 때 많은 차이가 있다. 유속 조건이 1.95 m/s로 관망을 순환 시킨 경우 0.2 ppm의 잔류 염소 농도가 0.02 ppm으로 감소되는데 까지 걸린 시간은 4일 이고, 0.1

ppm 이 될 때 까지 소요된 시간은 8시간 이었다. 이 결과는 0.88 m/s와 1.33 m/s와 비교하여 빠른 속도로 염소가 감쇠하였음을 보여준다. 실험의 결과 관망 내 전체 잔류 염소가 감쇠하는 반응은 유속과 관계가 있음을 알 수 있다.

유사한 연구로 Menaia (2003)는 연구를 통해 유속 변화가 염소의 체적 감쇠(Bulk Decay)에 영향이 있다는 것을 검증하기 위해 사용기록이 없어 생물막 또한 존재하지 않는 PVC 파이프를 사용하여 다양한 유속조건을 시험한바 있는데 그 결과 유속이 달라짐에 따라 실험결과는 바뀌지 않았다. 이는 유속조건이 염소 감쇠에 영향을 미치는 기작이 관벽감쇠 (Wall Decay)보다는 체적감쇠 (Bulk Decay)에 기인한다는 것을 의미한다. 하지만 Menaia (2003)의 실험은 약 8시간의 감쇠거동 결과를 대상하였다는 점과 상대적으로 낮은 유속(0.56 m/s)을 대상으로 하였다는 점에서 본 연구의 결과보다 제한적이다. 또한 Ginasiyo (2007)는 층류와 난류상태의 낮은 조건의 유속과 관벽 감쇠(Wall decay)에 직접적인 영향을 끼치는 물질 전달계수(Mass transfer coefficient)의 거동을 살펴본 바가 있는데, 층류에서 난류로 발전하는것에 따라 그 감쇠 상수가 급격히 변하는 거동을 볼 수 있었다. 본 연구의 경우 난류상태에서의 실험만을 수행하여 층류 상태에서의 거동에 대해서는 연구가 추가적으로 필요할 것이다. 실제의 관망 시스템에서의 염소 감쇠 상수를 모형화 한 연구도 있다 (Nagatani, 2008). 염소 감쇠 상수에 영향을 주는 온도나 초기 염소 농도에 대한 연구는 수행되었으나, 실제 관망에서의 염소 감쇠와 유속과의 관계는 일정한 유속을 조건으로 실험을 수행하지 못한다는 한계에 의해서 수행되지 않았다.

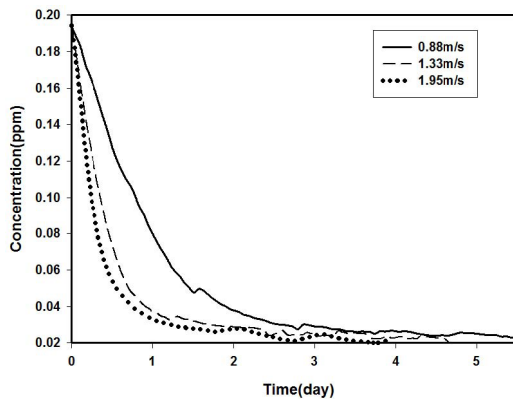


Fig 3. Residual chlorine concentration in flow velocity of 0.88m/s, 1.33m/s and 1.95m/s in Reynolds number 17,600, 26,600 and 39,000

3.2 염소 감쇠 모형화 결과

염소 감쇠의 거동을 모형화 하기 위해 실험을 통해 후보 모형의 다양한 매개변수를 추정하는 것이 필요하다. 이를 위해 유전자 알고리즘(Genetic

Algorithm)과 염소 감쇠 모형을 결합하여 최적화 (Optimization) 모형 도구를 구축하였다. Fig. 4 는 유전자 알고리즘과 염소 감쇠 모형의 연계과정 의 모형도이다. 센서로부터 획득한 원자료를 프로그 램상의 배열로 입력받은 후 이 데이터를 이동평 균법(Moving Average)를 이용하여 잡음(Noise) 를 줄여준다. 매개변수를 찾을 모형을 선택한 후 잡음을 제거한 데이터를 입력받고 RMSE 적합도 함수(Fitness Function)로 하여 GA 알고리즘의 실행을 통해서 적합도 함수가 최소가 되도록 하는 매개변수(Parameter)를 찾아낸다. Eq. (1)은 지 점 i 에서 모형과 실제 측정값의 차이의 제곱한 값 의 합의 평균을 나타내는 RMSE의 수식이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{m,i} - C_{o,i})^2} \quad (1)$$

여기서 $C_{m,i}$ 는 모형화된 염소농도의 시계열이 고, $C_{o,i}$ 는 관측된 염소농도의 시계열이다.

Table 1은 5개 모형의 범주에서 n 차 감쇠 모형을 2, 3, 4차 모형으로 나누어 총 9개의 후보 모형을 대상으로 한 매개변수 최적화의 결과이다. Table 2은 각 모형의 최적화 한 감쇠 상수이다. 유속 조건에 관계 없이 모든 유속에서 감쇠상수 (Decay Coefficient)는 반응 상수가 커질수록 높 아지는 경향을 보였고, 같은 차수일 경우 제한적 인 모형(Limited Model)의 감쇠상수가 다른모형 에 비해 높은 경향을 보였다. 유속이 증가할수록 모형의 상관없이 감쇠상수 역시 증가하는 경향이 보였지만, 모형의 종류에 따라서 그 변화의 정도는 달랐다. 특히 1차 감쇠 모형(First Order Decay Model)의 경우 유속과 비례하는 모습을 볼 수 있 다. 유속이 빨라 질수록 평형 1차 모형(Paralle First Order Model)에서의 빠른 반응과 느린반응 의 비율을 결정하는 x 의 값이 증가하는 경향이 보 이고, 빠른 감쇠 상수(Fast Decay Coefficient) k_{fast} 역시 유속과 함께 증가하는 모습을 보인다.

Table 2와 같이 최적화 되어진 감쇠 상수를 이 용하여 모형화를 시키고 모형이 염소의 실제거

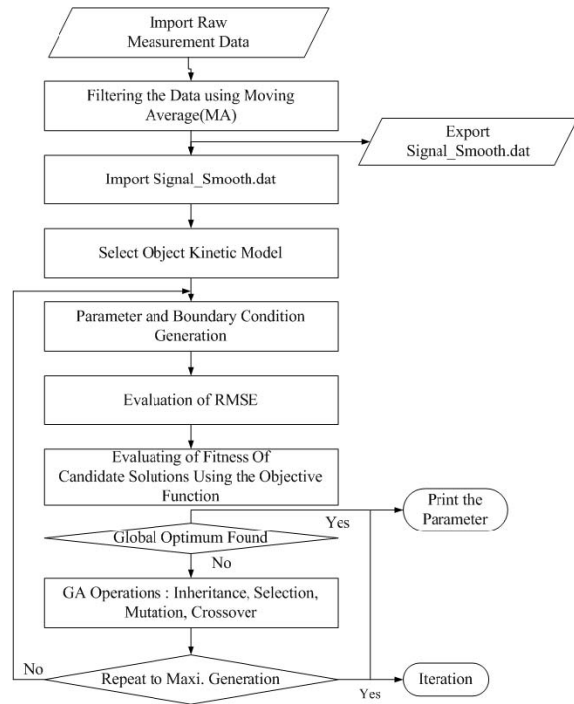


Fig. 4. A flowchart of the integration between RMSE and GA

동을 예측하는 정도를 알아보기 위해 결정 상수 (Coefficient of Determination) R^2 를 계산하여 그 결과를 Table 3에 정리하였다. Eq. (2)는 결 정 상수 R^2 를 구하는 수식으로 전체 제곱합(Total Sum of Square) SS_{tot} 와 회귀 제곱합(Regression Sum of Square)의 비로 표현되어진다.

$$R^2 = \frac{SS_{reg}}{SS_{tot}} \quad (2)$$

여기서 SS_{reg} 는 $\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 로 \hat{y}_i 는 i 번째 지점에서의 회귀식에 의한 y 값이고, \bar{y} 는 측정된 데이터 의 평균값이며, SS_{tot} 는 $\sum(y_i - \bar{y})^2$ 로 y_i 는 i 지점 에서 실제 측정값이다.

세가지의 유속 조건 모두에서 제한된 1차 모형(Limited First Order Model), 평형 1차 모형(Parallel First Order Model), 2차 모형 (Second Order Model) 등이 실제의 염소 거동 을 잘 예측했다.

Fig. 5는 각각의 유속 0.88 m/s, 1.33 m/s,

Table 2. Decay coefficient of various kinetic models with various velocity

Scenarios	Flow Velocities			0.88 m/s			1.33 m/s			1.95 m/s		
First Order Decay	0.74			1.42			1.95					
Second Order Decay	7.84			14.94			20.31					
Third Order Decay	86.17			187.51			255.59					
Fourth Order Decay	1015.81			2631.61			3726.77					
Limited 1st Order Decay	1.05			2.17			3.01					
Limited 2nd Order Decay	13.30			28.90			40.10					
Limited 3rd Order Decay	89,8129			505.08			725.36					
Limited 4th Order Decay	3150.27			11985.08			18664.51					
Parallel First Order Component	x	k_{fast}	k_{slow}	x	k_{fast}	k_{slow}	x	k_{fast}	k_{slow}	x	k_{fast}	k_{slow}
	0.75	1.24	0.19	0.81	2.66	0.13	0.86	3.36	0.052			

Table 3. Determinant coefficient of various kinetic models with various velocity

Scenarios	Flow Velocities			0.88 m/s			1.33 m/s			1.95 m/s		
First Order Decay	0.92			0.74			0.71					
Second Order Decay	0.93			0.94			0.95					
Third Order Decay	0.81			0.87			0.90					
Fourth Order Decay	0.68			0.74			0.76					
Limited 1st Order Decay	0.98			0.97			0.98					
Limited 2nd Order Decay	0.86			0.90			0.92					
Limited 3rd Order Decay	0.69			0.71			0.73					
Limited 4th Order Decay	0.54			0.55			0.57					
Parallel First Order Decay	0.97			0.97			0.99					

1.95 m/s에서 염소 감쇠를 잘 모사하는 모형들을 실제의 감쇠와 비교한 그래프이다. 평형 1차 감쇠 모형(Parallel First Order Decay Model)과 제한된 1차 감쇠 모형(Limited First Order Decay Model)의 모형의 결정계수(Determinant Coefficient) R^2 값이 0.97 이상으로 실제의 염소 감쇠를 성공적으로 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

평형 1차 모형(Parallel First Order Model)은 염소와 반응을 일으키는 물질이 염소와 빠르게 반응을 하는 물질과 느리게 반응을 하는 물질로 나누어져있다는 가정을 배경으로 하는 모형이

다. 이 모형은 x, k_{fast}, k_{slow} 의 세가지 변수를 이용을 하는데, 일반적으로 1개의 변수만을 이용하여 최적화를 하는 다른 모형에 비해 상대적으로 적합도(Fitness)를 높이는데 유리하다. 또한 제한된 1차 모형(Limited 1st Order Model)의 경우 1차 모형(1st Order Model)과 비교하여 높은 적합도(Fitness)를 보인다. 이는 관망내부의 염소 감쇠가 상수에 존재하는 모든 염소의 농도와 반응을 하는 것이 아니라 반응에 참가하지 않는 형태의 염소농도가 존재하고 그 농도와는 반응을 하지 않는다는 가정이 실제의 염소 감쇠 반응과 잘 부합하는 부분이 있다는 것을 의미한다.

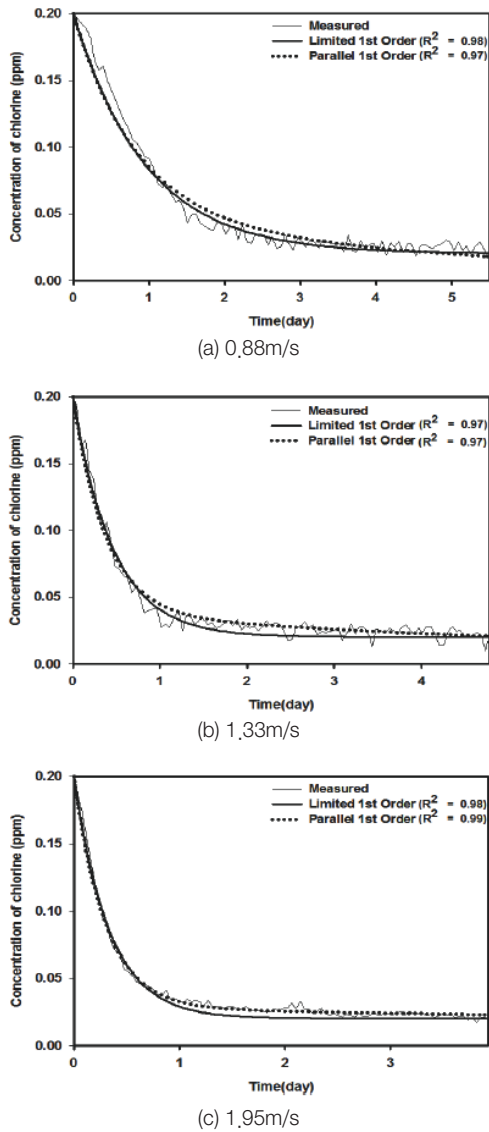


Fig. 5. Proper models for predicting chlorine decay

4. 결론

본 연구는 상수가 관망 시스템에서 잔류성 소독제로 흔히 사용되어지는 염소의 거동을 Pilot Plant 규모의 실험관망에서 실험과 모의수행 하였다. 그 결과, 관망내 잔류 염소의 농도를 예측하기 위해 5가지 모형을 9가지 세분화된 모형 시나리오에 적용해 보았고, 각각 모형의 감쇠

상수(Decay Coefficient)를 최적화 방법을 통해 찾고, 실제의 염소 감쇠 거동과 비교하여 가장 적합한 모형을 선정하였다. 모형의 선정과정을 통해서 얻을 수 있는 결론은 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 실험의 결과 Pilot 규모의 실험장치에서는 유속이 증가함에 따라 염소의 감쇠 속도 역시 증가하였다. 이는 과거 다른 연구 결과를 통해 관벽감쇠(Wall Decay)에 기인한다고 예상할 수 있지만 본 연구의 결과의 빠른 유속과 긴 시간동안의 측정 결과를 비춰 볼 때 기존의 연구와 다른 결과를 보여 주고 있다.
2. 시스템의 유속에 관계없이 반응의 차수가 증가할수록 감쇠상수(Decay Coefficient) 역시 증가하는 모습을 보였다. 또한 제한된 모형(Limited Model)의 경우 그렇지 않은 모형에 비해 높은 감쇠상수가 도출되었다.
3. 유속이 증가함에 따라 같은 반응 차수일 때 모형의 감쇠상수가 증가하는 경향을 보였다. 하지만 제한된 유속 조건을 대상으로 수행한 실험 결과여서 층류 및 난류 조건에서의 결과 차이에 대한 고찰을 불가능하다. 본 연구에서는 유속의 증가에 따른 감쇠속도 증가의 결과를 정량적으로 보여주기는 하지만 유속조건과 감쇠상수(Decay Coefficient) 관계 및 영향을 끼치는 기작에 대해 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.
4. 본 연구의 결과 유량에 관계없이 평형 1차 감쇠모형(Parallel First Order Decay Model)과 제한된 1차 감쇠모형(Limited First Order Decay Model)이 가장 실제의 염소 감쇠 거동을 잘 모사한다. 평형 1차 감쇠 모형의 경우 모형에 사용되어지는 매개변수(Parameter)의 수가 x , k_{fast}

k_{slow} 로 다른 변수에 비해 많아서 좋은 결과를 얻은 것으로 보여지고, 제한된 1차 감소 모형의 경우 실제로 잔류염소 농도 증반응하지 않는 염소의 농도가 있을것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션기술개발사업(GT-11-G-02-001-1)”으로 지원 받은 과제입니다.

참고문헌

- A.O, A.-J. (2007) Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. *Water Research*, Vol. 41(2), pp. 387-396.
- Digiano, F. A. Z., Weidong (2005) Pipe Section Reactor to Evaluate ChlorineWall Reaction. *Journal AWWA*, Vol. 97(1), pp. 74-85.
- Feben D, T. M. (1951) Studies on chlorine demand constant. *Journal of American Water Works Association*, Vol. 43(11), pp. 10.
- Ginasiyo Mutoti, J. D. D., Jorge Arevalo, James S. Taylor (2007). “Combined chlorine dissipation : Pipe material, water quality and hydraulic effects. *Journal of American Water Works Association* Vol. 99(10), pp. 96-106.
- Haas, C. N. and Karra, S. B. (1984) Kinetics of wastewater chlorine demand exertion. *Journal of Water Pollution Control Federation*, Vol. 56(2), pp. 4.
- Hallam, N., Hua, F., West, J., Forster, C. and Simms, J. (2003). Bulk Decay of Chlorine in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129(1), pp. 78-81.
- Hua, F., West, J. R., Barker, R. A. and Forster, C. F. (1999). Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. *Water Research*, Vol. 33(12), pp. 2735-2746.
- Menaia, J., S. T. C., A. Lopes, E. Fonte and J. Palma (2003). Dependency of bulk chlorine decay rates on flow velocity in water distribution networks. *Water Science and Technology : Water Supply*, Vol. 3(1-2), pp. 209-214.
- Nagatani, T., Yasuhara, K., Murata, K., Takeda, M., Nakamura, T., Fuchigami, T. and Terashima, K. (2008). Residual chlorine decay simulation in water distribution system. *International Symposium on Water Supply Technology*.
- 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*, Vol. 34(1), pp. 117-126.
- Qualls, R. G. and Johnson, J. D. (1983). Kinetics of the short-term consumption of chlorine by fulvic acid. *Environmental Science & Technology*, Vol. 17(11), pp. 692-698.