

정수장 후염소 공정제어를 위한 예측모델 개발

Prediction Models to Control Pro-chlorination in Water Treatment Plant

신강욱 · 이경혁*

Gang-wook Shin · Kyung-Hyuk Lee*

한국수자원공사 수자원연구원

(2008년 2월 12일 접수 ; 2008년 3월 13일 채택)

Abstract

Prediction models for post-chlorination require complicated information of reaction time, chlorine dosage considering flow rate as well as environmental conditions such as turbidity, temperature and pH. In order to operate post-chlorination process effectively, the correlations between inlet and outlet of clear well were investigated to develop prediction models of chlorine dosages in post-chlorination process. Correlations of environmental conditions including turbidity and chlorine dosage were investigated to predict residual chlorine at the outlet of clear well. A linear regression model and autoregressive model were developed to apply for the post-chlorination which take place time delay due to detention in clear well tank. The results from autoregressive model show the correlation of 0.915~0.995. Consequently, the autoregressive model developed in this study would be applicable for real time control for post chlorination process. As a result, the autoregressive model for post chlorination which take place time delay and have multi parameters to control system would contribute to water treatment automation system by applying the process control algorithm.

Key words : post-chlorination, linear regression model, autoregressive model

주 제 어 : 후염소, 선형회귀 모형, 자기회귀 모형

1. 서론

소독은 수중의 박테리아, 바이러스, 원생생물이나 예기치 못한 배수계통의 오염으로 보호하고 각종 수인성 질병으로부터 음용수의 안전성을 확보하기 위해 이뤄지며, 적정 소독능 값 [CT Value : Disinfectant Concentration(농도 mg/L) * Contact Time(접촉시간 min)] 즉, 지아디아와 바

이러스를 안전한 정도까지 제거하기 위해 만족 시켜야 하는 수치 유지가 필수적이다. 현재의 정수처리과정에 쓰이는 소독물질로는 염소, 클로라민, 이산화염소, 오존, 자외선 등이 있지만 강한 산화력으로 우수한 소독효과, 잔류효과, 저렴한 비용 그리고 대량 수처리에 용이한 염소가 소독제로 쓰이고 있으며, 모든 정수 처리 공정은 미생물에 대한 안정성 확보를 위하여 모든 소독공정은 '먹는물 수질기준 및 검사 등에

*Corresponding author Tel :+82-42-870-7526, FAX: +82-42-870-7549, E-mail:kh.lee@kwater.or.kr(Lee, K.H.)

관한 규칙'에 의거 국내 정수장은 수돗물에서 잔류염소가 4.0 mg/L이하 검출되어야 하며, '수도시설의 청소 및 위생 등에 관한 규칙'에 의거 국내 정수장은 수돗물에서 잔류염소가 0.1 mg/L이상 검출되어야 한다고 명시되어 있다. 하지만 과도한 염소의 투입은 수중의 유기물과 반응하여 196종의 소독부산물의 발생한다는 것으로 알려져 있으며, 소독과정에 발생하는 소독 부산물 중 일부는 인체에 잠재적 위험성을 갖고 있다.

일반적인 소독공정운영 현황은 염소 투입률 산정을 통하여 중앙조정실 시스템 입력 설정값으로 투입률을 입력하여 유량변동에 추종하여 제어하는 방식을 채택하고 있으나 원수수질 변동 시 염소요구량의 변동함에 따라 운영기준에 적절한 잔류염소량을 유지하기 위해 근무자가 경험치를 고려하여 가감시킴으로써 정수의 적정 잔류염소 농도를 유지하는데 어려움을 겪고 있다.

지금까지 정수장 염소 소독 공정중 전염소 투입량을 예측하기 위한 침전지 유출수의 잔류염소 농도예측모델 개발(이 등, 2007)을 비롯하여, 배급수 관망에서의 잔류염소 예측모델 개발(Broad et al., 2005)이 진행되었다.

그러나, 후염소 공정에 있어서의 예측모델은, 탁도를 비롯한 환경영향인자 뿐만 아니라 염소투입량에 따른 반응시간, 유량에 따른 염소주입량 등의 복잡한 상관관계 분석이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 후염소공정에서의 효율적 운영을 위하여, 정수지 전단과 후단에서의 상관관계를 분석하고 이를 이용한 최적 공정제어가 가능한 후염소 공정의 예측모델을 개발 하고자 한다.

2. 후염소 공정 분석

2.1 후염소 공정 일반

정수장에서의 염소처리 공정 중 후염소 공정제어의 개념도는 그림 1과 같으며, 일반적인 정수장 운영프로그램을 위한 취득 데이터는 여과지 전·후 잔류염소 농도값, 여과지 유출 유량값, 정수지 전·후 잔류염소 농도값, 그리고 염소 투입량을 적용하고 있다. 정수지 유출 잔류염소 농도값이 목표 잔류염소농도이며, 염소투입지점으로부터의 시간지연은 약 1시간에서 4시간까지 긴 지연시간을 가지고 있다. 그러나, 긴 지연시간에 대한 안정적인 제어를 위하여 정수지 유입지점에서 잔류염소농도를 측정할 수 있도록 하드웨어를 구성함으로써 지연시간을 약 10분에서 30분사이로 대폭 단축시킬 수 있다. 이런 장점을 이용하여 현장에서 운영되는 자동제어시스템에서는 목표잔류염소농도와 정수지 유입 잔류염소농도를 비교하여 여과유량과 비례되는 염소투입량으로 후염소 공정제어를 적용하고 있다.

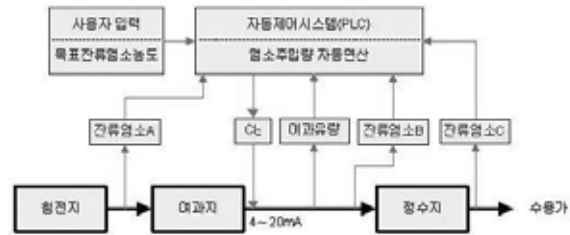


Fig. 1. 후염소 공정제어 개념도.

2.2. 운영자료 분석

본 연구에서는 국내 S정수장에서 운영된 후염소공정 데이터를 이용하여 예측모델을 개발하고자 2007년 1월부터 10월까지 10개월간 일일 1분 간격으로 수집된 운영 자료를 월별로 2일을 택하여 총 20일의 운영 데이터를 수집하였다. 그리고, S정수장의 경우 정수지 유입 및 유출 지점에 각각 잔류염소농도를 측정할 수 있도록 구성되어 있기 때문에 이 지점들에서의 잔류염소 측정에 영향을 미치는 인자를 도출하고자 탁도, 온도, 유입유량, 염소 투입량, 여과유출 잔류염소, 정수지 수위, 정수지 유출 유량 등에 대하여 조사 분석하였다. 이는 정수장에서 실시간 모니터링이 가능하고 염소의 소비 특성과 관련 있는 측정 인자들을 선정하여야 함은 물론, 염소투입량 산정을 위한 기준 잔류염소를 측정하는 정수지 유입과 유출 지점에서의 영향인자를 도출할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 각 지점에서의 데이터를 1분 단위로 분석하고 계절에 따른 잔류염소 농도 변화의 영향을 확인하기 위하여 월별 자료를 동시에 분석하였다.

그림 2에서와 같이 월별 탁도 변화량은 최소 변화량은 연간 0.8 ~ 17.6 NTU이며, 최대변화량은 연간 3.7 ~ 300 NTU 임을 알 수 있으며 9월의 경우 이상데이터로 분류하여 처리될 필요가 있다. 따라서, 연간 평균 탁도 변화량은 2.5 ~ 50 NTU로서 운영되고 있음을 알 수 있다.

수온의 월별 변화량은 최소 수온이 1월에 측정된 3.7 °C이며, 최대 수온은 8월에 나타난 약 29 °C이다. 평균적인 연간 수온변화량은 4 ~ 26 °C이다. 또한, 그림 3은 여과지 유출 지점에서의 잔류염소 농도값의 월별 추이를 나타낸 것으로 4월과 9월의 경우 가장 잔류염소농도가 높게 나타났음을 알 수 있다. 전체적인 연간 변화량은 0.2 ~ 0.6 ppm 이다.

또한, 염소투입량의 변화량은 그림 4에서와 같이 8월과 9월 가장 많이 투입량을 기록하였으며, 평균적으로는 1.2 ~ 2.5 kg/h 를 나타내었다.

일반적인 염소투입량의 결정은 유량에 비례적으로 투입되도록 구성되어 있다. 그러나 유량값이 일정하지 못함에 따라 염소투입기의 제어성능에 따라 많은 오차요인을 가지고 있다. 그림 5는 후염소 공정운영 데이터 중 유량의 변화량에 따

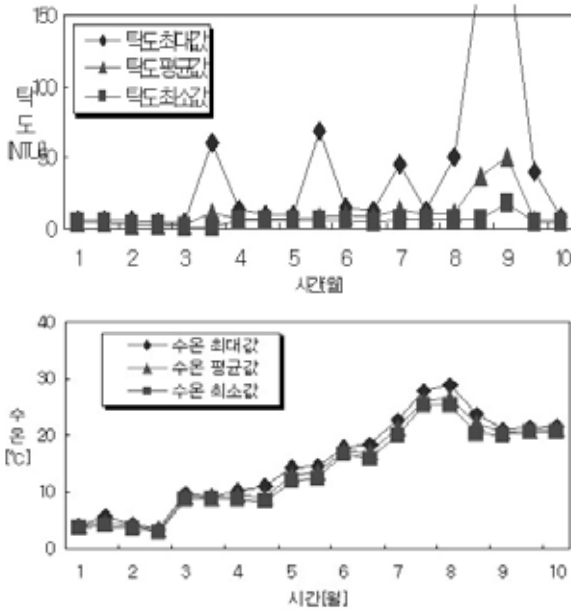


Fig. 2. 월별 탁도 및 수온 변화.

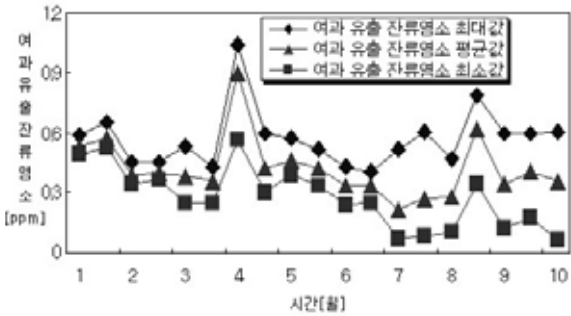


Fig. 3. 월별 여과유출 잔류염소농도 변화량.

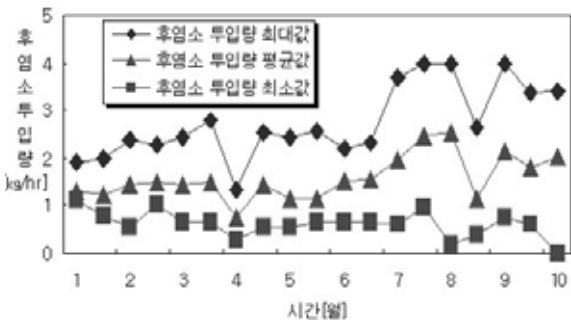


Fig. 4. 월별 후염소 투입량.

른 염소 투입률과 설정값간의 비교 데이터를 나타낸 것으로 설정값과 실제 투입률의 오차값이 존재함을 알 수 있다. 이는 염소투입기의 특성에 따라 안정적으로 운영되지 못함에 따라 발생하는 오차요인이다.

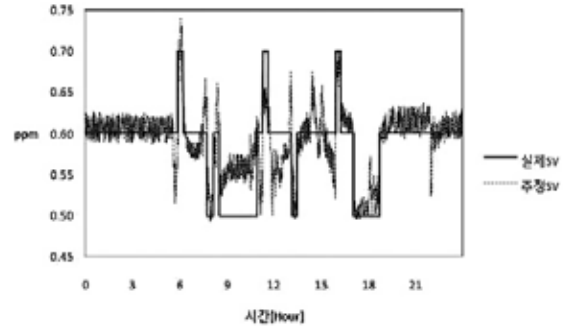


Fig. 5. 목표값과 실제 투입률 비교 그래프.

3. 예측모델 개발

본 연구에서는 다변수 선형회귀 모형과 자기회귀 모형을 이용하여 후염소 공정의 최적 예측모델을 개발하였다. 각각의 모형에 사용된 파라메타는 탁도, 온도, 유입유량, 여과지 유출 잔류염소농도, 염소 투입량, 정수지 유입 잔류염소 농도, 정수지 유출 잔류염소 농도, 정수지 수위, 그리고 정수지 유출유량 등이다.

3.1. 선형 회귀 모형

선형 회귀모형을 위한 종속변수와 독립변수 사이의 관계에 대한 수학적 식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 종속 변수의 변화를 설명하기 위하여 두개 이상의 독립변수가 사용되어 종속변수와의 관계를 선형으로 가정하는 회귀모형을 다중선형 회귀모형이라고 한다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

여기서, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 회귀모수들로서 고정된 상수이며, X_1, X_2, \dots, X_k 는 각각 독립변수이며, ε 은 오차항이다. 위 식 (1)을 일반적인 선형모형이라 부르며, 회귀모수들을 추정하기 위한 최소제곱 절차를 이용한다. 여기서 최소제곱 추정값을 얻기 위해서는 식 (2)를 최소화 시킨 값으로 구할 수 있다.

$$\Sigma = (y - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 X_1 - \dots - \hat{\beta}_k X_k)^2 \quad (2)$$

모수 β_0 와 β_1 의 추정값 $\hat{\beta}_0$ 와 $\hat{\beta}_1$ 은 최소제곱 기준에 의해서 구해지며, 하나의 예측변수만 있을 때 $\hat{\beta}_0$ 와 $\hat{\beta}_1$ 에 대한 추정 공식은 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\beta}_1 = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}}, \quad \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (3)$$

여기서,

$$SS_{xx} = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}, \quad \bar{X} = \frac{\sum X}{n}$$

$$SS_{yy} = \sum XY - \frac{(\sum X) \cdot (\sum Y)}{n}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum Y}{n}$$

위의 선형회귀 모형을 이용하여 정수지 유입 잔류염소농도를 기준으로 각 파라메타에 대한 상관계수를 도출하였다. 본 연구에서 정수지 유입 잔류염소농도에 영향을 미치는 파라메타의 상관성을 얻기 위하여 탁도, 온도, 유입유량, 여과유출 잔류염소, 염소 투입량 등에 대하여 매 1분 데이터를 사용하였으며, 분석에 적용한 실제 데이터는 1일 1440개 총 20일 데이터를 사용하였다.

그림 6에서는 탁도를 비롯한 입력 파라메타에 대한 월별 상관계수를 구하여 그래프로 나타낸 것으로 전체 상관계수가 약 0.01에서 약 0.8까지 일정하지 못한 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다.

아래 식 (4)는 탁도, 수온, 여과지 유출 잔류염소 농도, 그리고 염소 투입량을 입력 파라메타로 엑셀프로그램을 이용하여 구한 선형 회귀모형의 결과식을 나타낸 것이다. 식 (4)로부터 구한 정수지 유입기준 월별 상관계수에 대한 결과값은 그림 7과 같이 최소 0.4부터 0.9까지 분포됨을 알 수 있다.

$$y(n) = 0.049480859x_1(n) + 0.590030253x_2(n) + 0.047419411x_3(n) - 0.000157098x_4(n) + 0.390007144 \quad (4)$$

정수지 유출 잔류염소 농도를 기준으로 탁도, 수온, 여과지 유출 잔류염소 농도, 염소 투입량, 정수지 유입 잔류염소 농도, 정수지 수위 등에 대하여 1분 데이터를 적용하여 각각의 상관계수를 구하였다. 정수지 유입 잔류염소 농도의 결과와 유사하게 각 파라메타별 상관계수는 일정한 패턴을 나타내지 못하고 있음을 알 수 있었다. 전체 6개의 파라메타를 이용한 선형 회귀모형의 결과식을 식 (5)와 같이 구하였으며, 정수지 유출기준 월별 상관계수에 대한 결과는 그림 7의 정수지 유입기준의 결과값과 유사하게 최소 0.5부터 0.9까지 분포됨을 알 수 있었다.

$$y(n) = 0.022434119x_1(n) + 0.044265339x_2(n) + 0.028314414x_3(n) - 0.040749047x_4(n) + 0.08373767x_5(n) - 0.010732442x_6(n) + 0.4871 \quad (5)$$

3.2. 자기 회귀 모형

자기회귀모형(autoregressive model)이란 선형 회귀모형과 같은 형태를 취하지만 자기회귀모형의 독립변수들이 종속

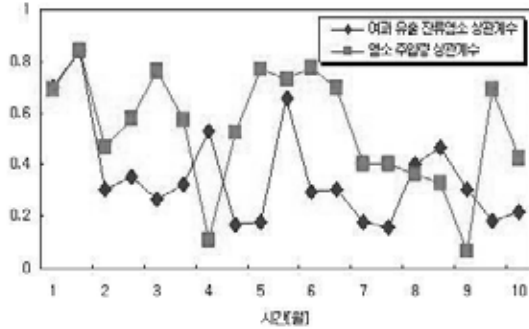
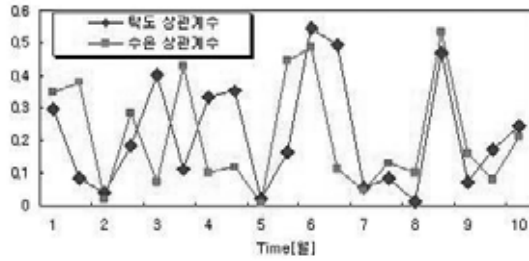


Fig. 6. 탁도, 수온 및 여과지 유출 잔류염소와 염소 투입량 월별 상관계수.

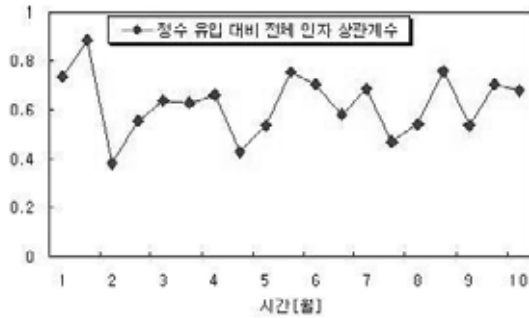


Fig. 7. 정수지 유입기준 월별 상관계수.

변수인 Y_t 와 시차가 각각 1, 2, ..., p 인 시차변수들로 이루어져 있다. 즉, 자기회귀모형은 다음과 같다.

$$Y_t = \psi_1 Y_{t-1} + \psi_2 Y_{t-2} + \dots + \psi_p Y_{t-p} + a_t \quad (6)$$

여기서, Y_t 는 종속변수이고, $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p}$ 들은 독립변수이며 a_t 는 확률오차로서 관측오차 등의 확률적인 요소가 포함된다.

현재(t) 시점의 시계열 값(Y_t)은 바로 전기 ($t-1$)값으로부터 ψ_1 만큼, 2기전 ($t-2$)의 값으로부터 ψ_2 만큼 등으로 영향을 받는다고 할 수 있다. 그러므로 과거 p 기 까지의 값들이 Y_t 에 영향을 준다고 할 경우의 식(6)을 p 차 자기회귀모형이라고 부르며, AR(p)라고 표현한다. 물론, 바로 전기의 값이 현재의 값에 중요하게 영향을 주는 경우, AR(1)모형이 되며

$$Y_t = \Psi_1 Y_{t-1} + a_t \quad (7)$$

으로 표현된다.

식 (6)을 일반적인 ARX(Auto Regression eXogenous) 모델 방정식인 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며 여기서 d는 시간지연항을 나타낸다.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d} B(q^{-1})u(t-1) \quad (8)$$

본 절에서의 자기회귀모형에 대한 예측모델을 구하기 위하여 MATLAB 프로그램을 사용하였다. 이를 이용하여 ARX 모델의 예측 파라메타 중 염소투입량에 대한 정수지 유입 잔류염소 농도변화와 정수지 유출 잔류염소 농도변화에 따른 시간지연항을 구할 수 있다. 정수지 유입지점과 유출지점에서의 시간지연값을 아래 결과식에서와 같이 각각 10분과 50분으로 얻을 수 있다. 이를 통하여 정수지 유입 잔류염소 농도와 정수지 유출 잔류염소 농도를 기준으로 각각에 대한 예측모델과 상관계수를 구하였다. 먼저 정수지 유입 잔류염소 농도를 기준으로 구한 예측 모델의 파라메타는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 - 0.9753q^{-1} - 0.06857q^{-2} - 0.04425^{-3} + 0.1654^{-4} \\ B_1(q^{-1}) &= -0.000531 - 0.002424q^{-1} \\ B_2(q^{-1}) &= -0.003707 - 0.01038q^{-1} \\ B_3(q^{-1}) &= 0.2942 - 0.2021q^{-1} \\ B_4(q^{-1}) &= 0.007105q^{-10} - 0.002798q^{-11} \end{aligned}$$

여기서, $A(q^{-1})$ 다항식은 종속변수인 정수지 유입 잔류염소 농도를 의미하며, $B_1(q^{-1})$, $B_2(q^{-1})$, $B_3(q^{-1})$, 그리고 $B_4(q^{-1})$ 는 입력 파라메타 중 탁도, 수온, 여과지 유출 잔류염소농도, 그리고 염소 투입량을 각각 나타낸다.

정수지 유출 잔류염소 농도를 기준으로 구한 예측모델의 입·출력 파라메타의 다항식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 - 0.4138q^{-1} - 0.2126q^{-2} - 0.2095^{-3} - 0.117q^{-4} \\ B_1(q^{-1}) &= -0.003547 - 0.002297q^{-1} \\ B_2(q^{-1}) &= +0.005601 - 0.002329q^{-1} \\ B_3(q^{-1}) &= -0.1439 - 0.1996q^{-1} \\ B_4(q^{-1}) &= 0.0009049q^{-50} + 0.006163q^{-51} \end{aligned}$$

여기서, $A(q^{-1})$ 다항식은 종속변수인 정수지 유출 잔류염소 농도를 의미하며, $B_1(q^{-1})$, $B_2(q^{-1})$, $B_3(q^{-1})$, 그리고 $B_4(q^{-1})$

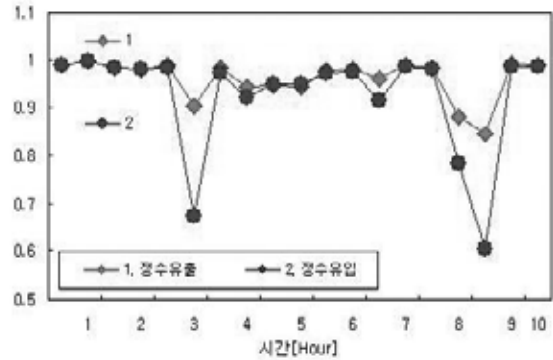


Fig. 8. 자기회귀모형 상관계수.

는 입력 파라메타 중 탁도, 수온, 침전지 유출 잔류염소농도, 그리고 염소투입량을 각각 나타낸다.

정수지 유출 잔류염소농도 기준과 정수지 유입 잔류염소농도 기준으로 각각 구한 결과 그림 8에서와 같이 정수지 유출 잔류염소농도를 기준으로 구한 경우 정수지 유입 잔류염소농도 기준보다 양호한 결과를 얻었다.

3.3. 특성 비교 분석

후염소 공정에 대한 선형회귀모형과 자기회귀모형을 이용하여 각각의 예측모델을 개발하였다. 선형회귀모형을 이용한 예측모델에서의 상관계수의 범위는 0.4에서 0.9까지의 범위를 갖고 있음을 알 수 있었다. 이와 달리 자기회귀모형을 이용한 예측모델의 경우 이상 탁도가 발생한 3월과 9월을 제외하면 최소 0.915부터 최대 0.995까지 양호한 결과를 얻었다.

그림 9는 자기 회귀모형에 의한 예측모델을 이용한 예측 데이터와 실제 운영데이터와의 유효성을 나타낸 1일간의 시계열 데이터이며, 결과값이 아주 양호한 특성을 갖는 것을 알 수 있었다. 또한, 그림 10에서와 같이 정수지 유입 및 유출 잔류염소농도를 기준으로 구한 결과값의 경우 95% 신뢰구간에

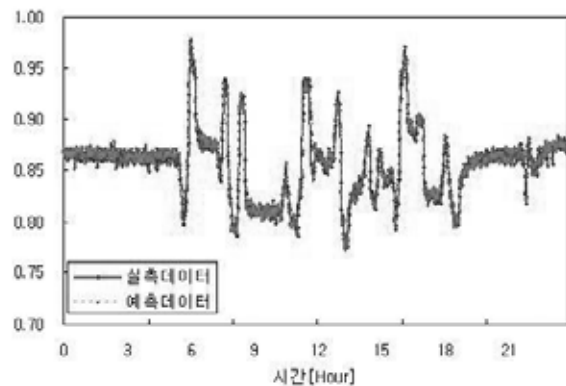


Fig. 9. 자기 회귀모형에 의한 예측 데이터.

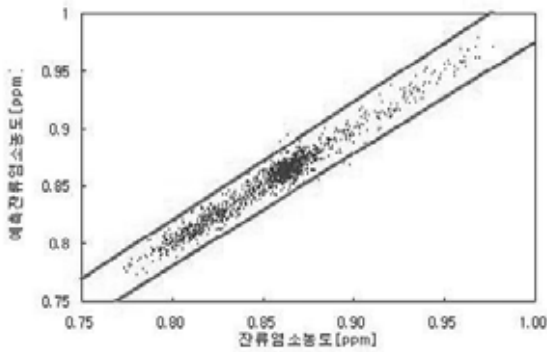


Fig. 10. 정수지 유입기준 상관 분포도.

서의 잔류염소 농도 예측 특성이 아주 양호함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 후염소 공정제어에 있어서 정수지 후단의 잔류염소 농도를 예측하기 위하여 탁도를 비롯한 환경인자와 염소투입량에 따른 반응시간 등의 상관성을 각각 분석하였다. 또한, 시간지연이 큰 후염소공정의 효율적 염소투입량 제어를 위하여 선형 회귀모형과 자기 회귀모형을 이용한 예측 모델을 개발하였다. 정수장 운영을 통하여 취득된 1분 단위 데이터를 이용하여 자기 회귀모형에 의한 최적의 예측모델을 얻었다. 자기 회귀모형에 의한 예측모델에 대한 평가를 실측값과의 상관성으로 분석한 결과 최소 0.915부터 최대 0.995 까지 매우 높은 상관성을 보였다. 따라서, 본 연구에서 개발한 예측모델을 통하여 시간지연이 큰 후염소 공정 제어를 위

한 실시간 공정모델로 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구 결과를 통하여 향후 염소투입기의 최적 제어를 통한 시간 지연공정과 다변수공정인 후염소 공정제어 알고리즘을 개발하여 정수장 자동화 및 수처리 시스템의 안정적인 운영에 적용하고자 한다.



참고문헌

1. 이경혁, 김주환, 임재립, 채선하 (2007) 정수장 전염소 공정 제어를 위한 침전지 잔류염소 농도 예측모델 개발, *상하수도학회지*, 21(5), pp. 1-436.
2. Broad, D.R., Dany G.G., and Maier H.R. (2005) Water Distribution System Optimization Using Metamodels, *Water Resources Planning and Management*, 131(3), pp. 172-180.
3. Ljung, L. (1987), *System identification: Theory for the user*, New Jersey, USA:Prentice Hall.
4. Qin, S.J. and Badgwell, T.A. (2003) A survey of industrial model predictive control technology, *Control Engineering Practice*, 11, pp. 733-764.
5. Duran, M.J., Cros, Daniel, and Riquelme, Jesus (2007), Short-term wind power forecast based on ARX models, *Journal of Energy Engineering*, 133, pp. 172-180
6. Chang, Ho and Tzenog, P.K. (2008) Analysis of the dynamic characteristics of pressure sensors using ARX system identification, *Sensors and Actuators A:Physical*, 141(2), pp.367-375.