

물소독공정의 잔여염소농도에 대한 종속적응 조종기설계의 한가지 방법

김룡일, 리준일

선행연구[1]에서는 정수탱크에서의 잔여염소농도변화과정을 고찰하지 못한데로부터 혼합염소조종을 위한 적응조종체계를 설계하는데 그치었다. 선행연구[2]에서는 적응조종리론과 설계수법들에 대하여 고찰하였으며 선행연구[3]에서는 종속조종체계의 설계사상과 방법들을 고찰하였다.

본문에서는 불확정성 파라미터들을 가지는 수원지물소독공정모형에 대한 잔여염소농도종속적응조종기를 설계하고 모의실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

1. 소독공정에 대한 적응조종체계의 설계

수원지물소독공정의 수학적모형은 다음과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{s}_p = -\frac{1}{\tau_p} \cdot s_p + \frac{1}{\tau_p} \cdot u_p \\ \dot{I} = -DI + Z's_p \\ \dot{c}_4 = -(Q_I G + T_3)c_4 + G'I \\ \dot{c}_{50} = -(Q_O T_1 + T_3)c_{50} + Q_I T_1 c_4 \\ \dot{c}_{51} = -(Q_O T_2 + T_3)c_{51} + Q_O T_3 c_{50} \\ \dot{c}_{52} = -(Q_O T_3 + T_3)c_{52} + Q_O T_2 c_{51} \\ \dot{c}_{53} = -(Q_O T_3 + T_3)c_{53} + Q_O T_2 c_{52} \end{array} \right. \quad (1)$$

여기서 s_p 는 정량펌프행정길이, I 는 전해조총전류, c_4 는 혼합염소농도, c_{50} , c_{51} , c_{52} , c_{53} 은 정수탱크안에서의 염소농도들이며 u_p 는 정량펌프행정길이목표값이고 τ_p 는 정량펌프의 시정수이다. 또한 Q_I 는 려파지에서 정수탱크로 들어오는 단위시간당 물량, Q_O 는 정수탱크에서 배수지로 나가는 단위시간당 물량이다. 그리고 D , G , G' , Z' , T_1 , T_2 , T_3 은 바다물의 소금농도와 원수수질, 전해조 및 정량펌프, 관로와 정수탱크의 특성들을 반영하는 파라미터들이다.

종속조종체계를 설계하기 위하여 모형 (1)을 아래의 두 부분체계 Σ_1 과 Σ_2 로 분할하자.

$$\Sigma_1 : \begin{cases} \dot{s}_p = -\frac{1}{\tau_p} \cdot s_p + \frac{1}{\tau_p} \cdot u_p \\ \dot{I} = -DI + Z's_p \\ \dot{c}_4 = -(Q_I G + T_4)c_4 + G'I \end{cases} \quad (2)$$

$$\Sigma_2 : \begin{cases} \dot{c}_{50} = -(Q_O T_1 + T_3)c_{50} + Q_I T_1 c_4 \\ \dot{c}_{51} = -(Q_O T_2 + T_3)c_{51} + Q_O T_2 c_{50} \\ \dot{c}_{52} = -(Q_O T_2 + T_3)c_{52} + Q_O T_2 c_{51} \\ \dot{c}_{53} = -(Q_O T_2 + T_3)c_{53} + Q_O T_2 c_{52} \end{cases} \quad (3)$$

이때 $x_1 = [s_p \ I \ c_4]^T$ 와 $x_2 = [c_{50} \ c_{51} \ c_{52} \ c_{53}]^T$ 를 각각 체계 Σ_1 과 Σ_2 의 상태로, 입력을 각각 $u_1 = u_p$, $u_2 = c_4$ 로, 출력을 $y_1 = c_4$, $y_2 = c_{53}$ 으로 놓으면 두 체계는 다음과 같은 상태공간모형으로 각각 표시할수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1 \\ y_1 = C_1 x_1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 \\ y_2 = C_2 x_2 \end{cases} \quad (5)$$

여기서

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_1 = [0 \ 0 \ 1],$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} a'_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a'_{21} & a'_{22} & 0 & 0 \\ 0 & a'_{32} & a'_{33} & 0 \\ 0 & 0 & a'_{43} & a'_{44} \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

이며 이때 $a_{11} = -1/\tau_p$, $a_{21} = Z'$, $a_{22} = -D$, $a_{32} = G'$, $a_{33} = -(Q_I G + T_3)$, $b_1 = 1/\tau_p$, $a'_{11} = -(Q_O T_1 + T_3)$, $a'_{21} = Q_O T_2$, $a'_{22} = -(Q_O T_2 + T_3)$, $a'_{32} = Q_O T_2$, $a'_{33} = -(Q_O T_2 + T_3)$, $a'_{43} = Q_O T_2$, $a'_{44} = -(Q_O T_2 + T_3)$, $b_2 = Q_I T_1$ 이다.

론문에서 구성하려는 종속조종체계의 구성도는 그림 1과 같다.

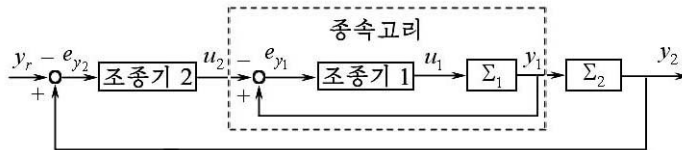


그림 1. 종속조종체계의 구성도

한편 물소독공정모형은 느리게 변하는 변동파라미터들을 가지고있으므로 적응조절기 설계수법을 리용하여 조종기를 구성할수 있다.

먼저 체계 Σ_1 에 대한 적응조종기를 설계하자.

조종기설계목적은 Σ_1 의 출력 y_1 이 기본고리의 입력 u_2 를 추종하도록 하는것이다.

이러한 Σ_1 에 적응조절기설계수법을 적용하자면 체계는 다음의 두 가정을 만족시켜야 한다.[2]

가정 1 체계가 ASPR(거의 강정실)조건을 만족시켜야 한다.

가정 2 행렬 $M_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & 0 \end{bmatrix}$ 은 정칙이다.

그러나 체계 Σ_1 는 위의 첫 조건을 만족시키지 않으므로 다음과 같은 PFC(병렬정결합 보상기)를 도입하여야 한다. 즉

$$\begin{cases} \dot{\xi} = -\alpha\xi + \beta u_1 \\ y_\xi = \gamma\xi \end{cases} \quad (6)$$

이로부터 새로운 확대체계에 관한 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = \bar{A}_1 \bar{x}_1 + \bar{B}_1 u_1 \\ \bar{y}_1 = \bar{C}_1 \bar{x}_1 \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $\bar{x}_1 = [x_1^T, \xi]^T$, $\bar{y}_1 = y_1 + \gamma\xi$ 이며

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_1 = \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \\ \beta \end{bmatrix}, \quad \bar{C}_1 = [0 \quad 0 \quad 1 \quad \gamma]$$

이다.

이때 확대체계 (7)에 반결합 $u_1 = k_1^* \bar{y}_1 + y_{r1}$ 을 실시하여 얻은 닫힌체계의 전달함수 $\bar{G}_1(s)$ 는 $\alpha > 0$, $\beta > 0$, $\gamma < 0$, $k_1^* > 0$ 인 적당한 α , β , γ , k_1^* 에 의하여 강정실함수로 되므로 확대체계 (7)은 ASPR조건을 만족시킨다.

한편 가정 2의 요구조건을 고찰하면

$$M_1 = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{B}_1 \\ \bar{C}_1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha & \beta \\ 0 & 0 & 0 & \gamma & 0 \end{bmatrix}, \quad \det(M_1) \neq 0$$

이므로 확대체계 (7)은 가정 2의 조건을 만족시킨다.

이제 적응조종기설계를 위하여 m 차($m \leq 2$)의 기준모형을 다음과 같이 주자.

$$\begin{cases} \dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_m \\ y_m = C_m x_m \end{cases} \quad (8)$$

여기서 A_m 은 안정이다.

그러면 기준모형 (8)의 출력은 다음의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_m(t) = y_{r1} \quad (9)$$

이때 γ 를 매우 작게 주면 $\bar{y}_1 \approx y_1$ 이므로 다음식이 성립한다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{y_1}(t) := \bar{y}_1(t) - y_m(t) = y_1(t) - y_m(t) = y_1(t) - y_{r_1}(t) = 0 \quad (10)$$

따라서 식 (10)을 만족하는 조종력을 구하는것은 조종력구성목적에 부합된다.

가정 1, 2를 만족시키는 확대체계 (7)에 대하여 식 (10)의 조종목적을 달성하는 적응조종법칙 u_1 을 아래와 같이 구성할수 있다.[2]

$$u_1(t) = k_e(t)e_{y_1}(t) + k_x^T(t)x_m(t) + k_u(t)u_m \quad (11)$$

이때 파라메터의 적응법칙은 다음과 같이 결정된다.

$$\dot{k}_e = -\gamma_1 e_{y_1}^2(t), \quad \dot{k}_x = -\gamma_2 x_m e_{y_1}(t), \quad \dot{k}_u = -\gamma_3 u_m e_{y_1}(t), \quad \gamma_1 > 0, \quad \gamma_2 > 0, \quad \gamma_3 > 0$$

혼합염소농도는 잔여염소농도에 비해 그 변화속도가 훨씬 빨라 종속고리의 혼합염소농도적응조종기가 정상과정에 들어섰다고 하면 종속고리출력 y_1 은 설정값 y_{r_1} 을 완전히 추종하게 되며 따라서 y_{r_1} 은 Σ_2 의 조종력으로 되므로 기본고리의 잔여염소농도적응조종기는 우와 같은 방법으로 다음과 같이 구성할수 있다.

$$y_{r_1}(t) = k'_e(t)e_{y_2}(t) + k'_x{}^T(t)x'_m(t) + k'_u(t)u'_m \quad (12)$$

여기서 $\dot{k}'_e = -\lambda_1 e_{y_2}^2(t)$, $\dot{k}'_x = -\lambda_2 x'_m e_{y_2}(t)$, $\dot{k}'_u = -\lambda_3 u'_m e_{y_2}(t)$, $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$, $\lambda_3 > 0$ 이며 이때 x'_m , u'_m 는 적응조종기설계를 위하여 식 (8), (9)와 같은 방법으로 받아들인 기준모형의 상태와 입력이며 e_{y_2} 는 Σ_2 의 출력과 기준모형출력사이의 오차이다.

이상의 고찰로부터 음료수생산을 위한 물소독공정의 종속적응조종체계의 구성도는 그림 2와 같다.

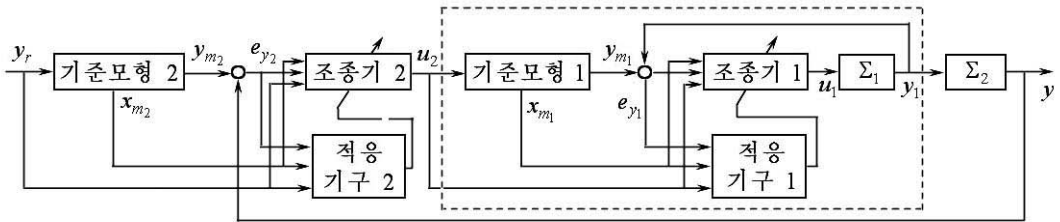


그림 2. 종속적응조종체계의 구성도

2. 제안한 물소독공정종속적응조종기에 대한 모의실험 및 결과분석

모의실험을 위해 2개의 조종기의 기준모형을 시정수가 각각 $T_{S1} = 20$, $T_{S2} = 1200$ 인 1차관성분조로 주었다. 그리고 병렬정결합보상기의 결수는

$$\alpha = 30, \quad \beta = 1, \quad \gamma = 0.001,$$

적응법칙의 파라메터들은

$$\lambda_1 = 0.003, \quad \lambda_2 = 0.005, \quad \lambda_3 = 0.001, \quad \gamma_1 = 55, \quad \gamma_2 = 65, \quad \gamma_3 = 70$$

으로 주었다.

모의과정에 1h만에 잔여염소목표값을 0.35로부터 0.4%로 높이고 2h만에는 전해조 3호의 가동을 정지시켰으며 3h만에는 려과지를 세척하여 소독공정에 들어오는 류량을 급격히 변화시켰다. 그리고 4h만에는 바다물의 농도를 14%로부터 16%로 높여주었으며 5h만에는

전압을 그전에 비하여 30V정도 낮추었다.

모의실험결과는 그림 3과 같다.

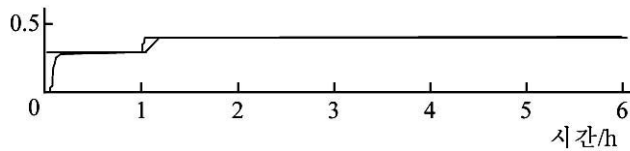


그림 3. 잔여염소농도곡선

그림으로부터 잔여염소농도는 설정값의 변화를 거의 50min만에 추종하고 그밖에 체계에 가해진 섭동들의 영향은 억제되었으며 따라서 파라미터변동과 섭동의 영향속에서도 잔여염소변화가 매우 적다는것을 알수 있다.

맺 는 말

미지의 변동파라미터를 가지는 물소독공정모형에 대한 종속적응조종체계를 설계하고 그 유효성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 57, 12, 26, 주체100(2011).
- [2] 리준일; 적응조종원리, 김일성종합대학출판사, 166~171, 주체100(2011).
- [3] Ibrahim Kaya; Journal of Process Control, 17, 3, 2007.

주체103(2014)년 3월 5일 원고접수

A Method on Design of Cascade Adaptive Control System of Residual Chlorine Concentration in Disinfection Process in Reservoir

Kim Ryong Il, Ri Jun Il

We have designed a cascade system which controls the residual chlorine concentration using adaptive controllers.

A parallel feedforward compensator was attached for ASPR for the plant.

Through simulation and field experiments, effectiveness of proposed method is confirmed.

Key words: chlorine concentration, adaptive control