

교차추정법에 의한 역류식추출기 비선형체계동정의 한가지 방법

김명철, 주혁철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《전자공학부문에서는 전자재료를 개발하고 그 순도를 높이며 집적회로를 비롯한 전자요소와 전자계산기를 개발하는데서 나서는 과학기술적문제를 풀며 자동화공학부문에서는 자동조종리론을 발전시키고 자동화요소와 장치, 자동조종체계를 개발하는데서 나서는 과학기술적문제를 풀어야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 138페이지)

공정운영구간을 분할하고 평형접근방에서 비선형대상을 가변파라미터국부선형모형으로 동정하는 방법[1-3]은 대상의 출력예측에는 적합하지만 조종기설계에는 불합리하다.

론문에서는 역류식추출기의 조종기설계에 필요한 모형을 작성하기 위하여 입출력측정자료에 기초하여 대상을 정적비선형성을 가진 동적비선형체계로 놓고 대상의 파라미터를 반복추정하는 방법에 의하여 수학적모형을 작성하는 한가지 방법을 제기하였다.

1. 역류식추출기에 관계되는 인자평가

용매의 침투 및 확산에 의하여 약재를 추출하는 엑스생산공정의 기본대상인 역류식추출기(이하 간단히 추출기)는 원료와 용매를 서로 반대방향에서 넣고 마주 흐르게 하여 원료속의 유효성분을 추출하는 설비이다.

추출기는 원료투입부분, 용매와 증기주입부분, 유효성분을 추출하는 탱크, 응축수배출부분으로 되어있다.

엑스생산공정의 생산성은 추출기에서의 유효성분의 추출률로 평가되며 그것은 추출기의 내부상태(혼합상태, 추출액의 농도와 온도 등)와 원료의 품질, 추출시간 등에 관계된다.

원료의 절단크기가 균일하고 용매의 밀도와 열용량, 추출기의 열전달계수들은 상수로 보며 추출기내부의 혼합상태가 균등하다고 가정하면 추출률에 영향을 미치는 기본인자는 추출액온도이다.

추출률을 최대로 보장하기 위한 조종체계설계에 필요한 모형을 결정하기 위하여 공정이 전형적인 분포정수체계이지만 공정의 현실적인 운영조건을 고려하여 집중정수체계로 근사시켜 논의한다.

공정에 관계되는 인자들은 많지만 제한된 개수의 측정수단을 리용하는 현장조건에 따르는 측정인자(물리적량)들로서는 증기전동발브의 열림도($v_1(\times 100\%)$), 증기압력(10^5 Pa), 용매전동발브의 열림도($v_2(\times 100\%)$), 용매류량(l/min), 추출액의 온도($^{\circ}\text{C}$)이다.

원료종류에 따라 원료투입량과 용매류량을 비롯한 일부 변수들을 일정하게 유지해 주고있는 현재 현장운영실태와 물리적량들사이 관계 그리고 조종목적의 견지에서 입출력변수들을 다음과 같이 선택한다. 즉 입력을 증기전동발브의 열림도 u , 출력을 증기압력 y_1 , 추출액온도 y_2 로 선택하여 공정을 1입력 2출력체계의 모형구조로 논의한다.

공정이 정상운영되는 상태에서 표본화주기를 30s로 하고 반복측정실험($n=6$)을 진행하여 측정자료를 MATLAB의 mat파일로 보관한 다음 동정상요구에 맞게 표본화주기를 5s로 재표본화하였다. 공정의 임펄스그래프를 그려보면 입력과 추출액온도사이의 관계에 부의 지연특성이 나타나며 이것은 공정이 대상의 출력에 맞게 입력을 조절하는 방법으로 운영되는 현실운영사항과 잘 맞는다.

입력에 대한 출력들의 정상상태값을 직관적으로 보면 대상의 입출력특성 u 와 y_1 사이의 특성에는 무시할수 없는 비선형성이 존재한다는것을 알수 있다.(그림 1)

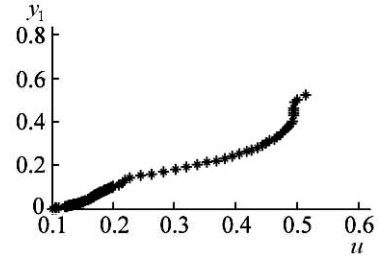


그림 1. 입력 u 와 출력 y_1 사이의 정특성곡선

전동발브가 전형적인 비선형요소이기때문에 공정을 입력측에 정적비선형성을 가진 동적비선형체계로 특징지을수 있으며 컴퓨터조종에 편리하게 표현하면 다음과 같다.

$$y_1(t) = \frac{B(q)}{A(q)} f(u(t)) \quad (1)$$

$$y_2(t) = \frac{C(q)}{D(q)} g(u(t)) \quad (2)$$

문제는 측정한 입출력자료로부터 체계 (1), (2)의 동적선형부분과 정적비선형부분의 미지파라미터를 추정하여 조종기설계에 필요한 합리적인 수학적모형을 얻는것이다.

2. 교차추정법에 의한 역류식추출기의 수학적모형작성

추출기모형의 파라미터추정문제론의를 간단히 하기 위하여 체계 (1)의 동정만을 보자. 정적비선형요소 $f(\cdot)$ 이 다항식이면 식 (1)은 다음과 같은 합머스테인체계로 표시할수 있다.

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= \frac{B(q)}{A(q)} f(u(t)) + e(t) \\ A(q) &= 1 + \sum_{i=1}^{na} a_i q^{-i}, \quad B(q) = \sum_{i=1}^{nb} b_i q^{-i} \\ f(u(t)) &= \mu_0 + \mu_1 u(t) + \mu_2 u^2(t) + \cdots + \mu_r u^r(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서 다항식들의 차수 na , nb , r 는 기지이며 $e(t)$ 는 령평균가우스백색잡음, a_i , b_i , μ_i 들은 구하려는 미지파라미터들이다.

문제는 입출력측정자료 $\{u(t), y(t), t=1, N\}$ 가 주어졌을 때 평가함수

$$J = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t|t-1)]^2 \quad (4)$$

을 최소화하는 선형동적체계와 정적비선형요소의 파라미터들을 반복추정하는것이다.

먼저 k 째 반복의 추정량들을 $\hat{A}(q)$, $\hat{B}(q)$, $\hat{f}(u(t))$ 로 표시하고 비선형고정모형을 리용하여 동적선형모형을 보조변수법(IV법)으로 동정한다.

고정된 정적비선형모형의 파라미터 $\hat{\mu}_i$, $i=1, \overline{r}$ 들에 대하여 그것의 출력을 다음과 같이 표시한다.

$$w(t) = f(u(t)) = \hat{\mu}_1 u(t) + \hat{\mu}_2 u^2(t) + \cdots + \hat{\mu}_r u^r(t) \quad (5)$$

체계 (3)을 ARX형모형구조로 표현하고 그것을 비선형요소의 고정파라미터 $\hat{\mu} = (\hat{\mu}_1, \dots, \hat{\mu}_r)^T$ 에 대하여 회귀모형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= \varphi_1^T(t, \hat{\mu}) \rho + e(t) \\ \rho &= (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n)^T \\ \varphi_1^T(t, \hat{\mu}) &= (-y(t-1), \dots, -y(t-n), w(t-1), \dots, w(t-n)) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

한편 자료 $\{y(t), w(t), t=1, \overline{N}\}$ 에 최소2제곱법(LS법)을 적용하여 다음의 추정량을 얻는다.

$$\hat{\rho} = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi_1(t, \hat{\mu}) \varphi_1^T(t, \hat{\mu}) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi_1(t, \hat{\mu}) y(t) \quad (7)$$

추정한 파라미터 $\hat{\rho}$ 을 리용한 예측기 $\hat{y}(t) = \varphi_1^T(t, \hat{\mu}) \hat{\rho}$ 의 출력에 의하여 다음의 보조변수들을 발생시킨다.

$$\zeta^T(t, \hat{\mu}) = (-\hat{y}(t-1), \dots, -\hat{y}(t-n), w(t-1), \dots, w(t-n)) \quad (8)$$

보조변수들과 식 (6)의 자료를 리용하여 다음과 같은 IV추정량을 얻는다.

$$\hat{\rho} = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \zeta(t, \hat{\mu}) \varphi_1^T(t, \hat{\mu}) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \zeta(t, \hat{\mu}) y(t) \quad (9)$$

다음으로 선형고정모형을 리용하여 비선형요소모형을 LS법으로 동정한다.

이를 위해 고정된 $\hat{A}(q)$ 를 리용하여 다음과 같은 려과자료를 만든다.

$$y_F(t) = \frac{1}{\hat{A}(q)} y(t), \quad u_{Fi}(t) = \frac{1}{\hat{A}(q)} u^i(t), \quad i=1, \overline{r} \quad (10)$$

고정된 $\hat{A}(q)$, $\hat{B}(q)$ 와 려과된 자료를 리용하여 식 (3)을 다음과 같이 표시한다.

$$\left. \begin{aligned} \hat{A}(q) y_F(t) &= \hat{B}(q) w_F(t) + e(t) \\ w_F(t) &= \mu_1 u_{F1}(t) + \mu_2 u_{F2}(t) + \cdots + \mu_r u_{Fr}(t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

한편 새로운 자료

$$\tilde{y}(t) = \hat{A}(q) y_F(t), \quad \tilde{u}_i(t) = \hat{B}(q) u_{Fi}(t), \quad i=1, \overline{r} \quad (12)$$

를 만들고 식 (11)을 다시 표시하면 다음과 같다.

$$\tilde{y}(t) = \mu_1 \tilde{u}_1(t) + \cdots + \mu_r \tilde{u}_r(t) + e(t) \quad (13)$$

이 식을 고정파라미터 $\hat{\rho}$ 에 대하여 회귀형식

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}(t) &= \varphi_2^T(t, \hat{\rho})\mu + e(t) \\ \mu &= (\mu_1, \dots, \mu_r)^T, \quad \varphi_2^T(t, \hat{\rho}) = (\tilde{u}_1(t), \dots, \tilde{u}_r(t)) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

로 표현하고 LS추정하면 추정량은 다음과 같다.

$$\hat{\mu} = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi_2(t, \hat{\rho}) \varphi_2^T(t, \hat{\rho}) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi_2(t, \hat{\rho}) \tilde{y}(t) \quad (15)$$

앞의 단계들을 수렴할 때까지 반복한다.

같은 방법으로 체계 (2)의 동적선형부분과 정적비선형부분의 미지파라미터들을 추정한다.

측정자료를 동정의 요구에 맞게 2개의 토막자료부분들로 분할한 다음 파라미터추정 자료로는 첫 부분자료를, 모형검증자료로는 두번째 부분자료를 선택하였다.

대상이 비록 비선형이지만 선형이라는 가정밑에서 체계의 차수를 선택하였다. 먼저 선형동적부분의 모든 파라미터들이 2차라고 가정하고 지연차수를 [0, 10]에서 변화시키면서 지연차수 nk 를 결정한 다음 파라미터차수들의 원소들을 [1, 5]에서 변화시키면서 손실함수가 최소가 되도록 파라미터차수들을 계산하였다. 다음으로 입력과 출력의 정특성곡선에 근사한 비선형모형의 차수를 LS법으로 추정하였다. 체계의 모형차수를 계산한 결과는 $na=2$, $nb=2$, $nk=1$, $r=3$ 이다. 추정한 모형차수를 가지고 추출기모형을 동정한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{M1}(t) &= \frac{0.613q^{-1} - 0.093 \, 1q^{-2}}{1 - 0.656 \, 8q^{-1} + 0.170 \, 7q^{-2}} (0.515u(t) - 3.25u^2(t) + 7.476u^3(t)) \\ y_{M2}(t) &= \frac{1.124q^{-1} - 0.127 \, 2q^{-2}}{1 - 1.629q^{-1} + 0.644 \, 1q^{-2}} (10.04u(t) - 25.61u^2(t) + 23.67u^3(t)) \end{aligned} \quad (16)$$

모형검증자료를 리용하여 LS법과 제안한 방법으로 동정한 모형들의 적합성을 비교하였을 때 결과는 그림 2와 같다.

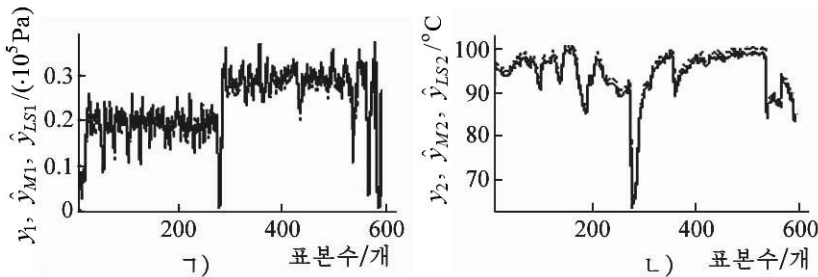


그림 2. 추정출력과 동정모형들의 비교결과
 ㄱ) 압력, ㄴ) 온도

그림 2에서 모형검증자료의 출력 y_i , 제안한 방법과 LS방법에 의한 동정모형들의 1 걸음앞섬예측출력 \hat{y}_{Mi} , \hat{y}_{LSi} 로부터 계산된 적합도는 $\text{Fit}_{M1} = 90.05\%$, $\text{Fit}_{LS1} = 77.89\%$ 이고 $\text{Fit}_{M2} = 82.55\%$, $\text{Fit}_{LS2} = 76.34\%$ 이다.

비교결과로부터 제안한 동정법으로 추정한 모형이 실제출력을 높은 정확도로 추정한다는 것을 알 수 있다.

맺 는 말

유한개의 입출력측정자료로부터 역류식추출기의 모형구조를 합머스테인모형으로 결정하고 정적비선형부분과 선형부분을 독립파라미터화하여 파라미터들을 교차추정하는 한 가지 반복추정방법을 적용하여 대상의 조종에 적합한 모형을 동정하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. Isermann; Identification of Dynamic System, Springer, 630~640, 2011.
- [2] T. Ogunfunmi; Adaptive Nonlinear System Identification, Springer, 187~212, 2007.
- [3] A. Janczak; Identification of Nonlinear Systems using Neural Networks and Polynomial Models- A Block-Oriented Approach, Springer, 117~141, 2005.

주체104(2015)년 5월 5일 원고접수

A Method of Nonlinear System Identification of Reflux Extractor using a Bootstrap Method

Kim Myong Chol, Ju Hyok Chol

We proposed a bootstrap method that the estimated polynomial of linear part was used as a filter, and the parameter estimation of linear and nonlinear parts was iterative.

Based on the proposed method, we identified a model of a reflux extractor of which model structure had been selected as Hammerstein model from input-output measurement data and validated its efficiency by numerical simulation.

Key words: bootstrap method, Hammerstein model, reflux extractor