

## 폐 루프 시간 상수를 설계 변수로 하는 비집중 제어기 설계 방법

정진희 · 최진영 · 이지태<sup>†</sup>

경북대학교 화학공학과  
(1998년 2월 9일 접수, 1999년 7월 30일 채택)

### A Decentralized Controller Tuning Method with One Design Parameter of the Closed-loop Time Constant

Jinhee Jung, Jinyoung Choi and Jietae Lee<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea  
(Received 9 February 1998; accepted 30 July 1999)

#### 요 약

단변수 IMC tuning법의 확장으로, 각 루프의 응답이 원하는 형태가 되는 다중 루프 제어기 설계 방법을 제안한다. 폐 루프 시간 상수에 해당하는 하나의 설계 변수로 tuning이 되어, 설계자의 부담을 최소로 할 수 있다. BLT tuning의 과도한 detuning으로 인한 매우 느린 응답과 sequential loop closing법의 비대칭적인 응답 같은 기존의 간략한 비집중 제어기 tuning법의 문제점들을 해결할 수 있다.

**Abstract** – Extending the IMC tuning method for single variable processes, one parameter tuning method for multivariable processes where closed loops follow desired responses is proposed. With the proposed method designer's effort can be minimized since multiloop control systems are tuned with only one design parameter of the closed loop time constant. Problems of simple decentralized controller design methods such as the very slow response by excessive detuning in the BLT method and the unsymmetrical response of the sequential loop closing method can be partially solved.

**Key words:** Multiloop Control System, PID Controller, One Design Parameter Method

#### 1. 서 론

실제 중요 공정은 적어도 2개 이상의 피제어 변수를 갖는 다변수 공정으로 보는 것이 타당하다. 이런 다변수 공정을 위한 여러 형태의 제어기와 설계 방법이 제안되어 있다. 이중 여러 개의 단변수 제어기를 이용하는 다중 루프 제어기가 다음과 같은 이유로 가장 많이 현장에 사용되고 있다.

- (i) 가장 간단한 제어기 구조로 운전자가 쉽게 이해할 수 있다.
- (ii) 매우 적은 수의 변수를 갖고 있어, 설계가 쉽고 tuning과 de-tuning이 가능하다.
- (iii) Loop failure tolerance 특성을 손쉽게 얻을 수 있다.

단변수 제어기를 이용하는 다중 루프 제어기 설계에 대한 여러 가지 방법들이 연구되고 있다. 그 중 가장 간단한 방법으로 BLT(biggest log modulus)법[1]과 sequential loop closing법[2]에 PID 제어기의 autotuning을 응용한 SAT(sequential autotuning)법[3, 4]을 들 수 있다.

BLT법은 먼저 상호작용을 고려하지 않고 Ziegler-Nichols법을 공정의 대각 요소에 적용한다. 그런 다음 상호작용을 고려하여 detuning을 하는데, 한 변수  $F$ 를 도입하여 제어기 이득에는 이것을 나누고 적

분인자에는 곱하는 방식을 취한다. 공정이 불안정해지는 데서 얼마나 떨어져 있는가에 관한 척도인 biggest log modulus가 원하는 값이 될 때까지  $F$ 를 1에서 점차 증가시킨다. 이 biggest log modulus의 계산도 쉽고 한 변수  $F$ 만 결정하면 되기 때문에 매우 간단한 설계가 이루어진다. 결점으로는 공정에 따라서는 과도한 detuning이 요구되어 매우 느린 응답이 종종 얻어진다's 것과, detuning 변수  $F$  혹은 biggest log modulus의 물리적 의미가 약해 어느 수준이 적정한지 알 수가 없는 것 등을 들 수 있다.

SAT법은 순차적으로 PID 제어기를 설계하는데, 이때 단변수 PID 제어기의 autotuning법 중 하나인 relay feedback[5]을 이용한다. 처음 pairing된 입출력에 relay feedback를 적용, PID 제어기를 설계하고 연결한다. 첫 번째 제어기가 연결된 상태에서 두 번째 pairing에 대한 PID 제어기에 relay feedback를 적용하여 구한다. 같은 방법을 사용하여 순차적으로  $n$  개의 제어기를 모두 구한다. 앞의 BLT법만큼 쉬운 방법이다. 단점은 어떤 제어기를 먼저 설계하는가에 따라 제어 성능이 크게 영향을 받는 것이다. 먼저 설계한 loop가 보다 빠른 응답을 주는 비대칭적 응답이 나타난다.

여기서는 BLT법과 같이 한 변수만으로 tuning되는 쉬운 다중 루프 제어기 설계 방법을 제안하고자 한다. BLT법보다 계산량은 많지만 현 PC의 계산 능력을 보면 별 문제가 되지 않을 것이며, tuning 변수가 폐루프 시간 상수에 해당하는 물리적 의미가 있는 것으로 선정이 쉬

<sup>†</sup>E-mail: jtlee@bh.kyungpook.ac.kr

위 더 빨리 우수한 제어 시스템의 설계에 이를 수 있다. 몇몇 공정 모델에 대한 모사로 본 방법이 앞의 두 다중 루프 제어기 설계 방법들의 단점을 보완하는 것을 볼 수 있었다.

본 방법과 BLT법은 근본적으로 independent design법[6]의 한 방법으로 볼 수 있다. 따라서 independent design법을 위한 많은 제어 시스템의 안정성 및 강인성에 관한 결과들[7-9]을 이용할 수 있다. 그러나 안정성이나 강인성에 관한 결과가 바로 다중 루프 설계에 이용되고 있지는 못하고, 설계가 이루어진 이후 검사를 하는 목적으로 주로 사용된다. 한 단적인 예로 Nyquist Array법을 들 수 있는데, 이 오래된 안정성 이론은 다중 루프 P 제어기 설계에 바로 이용될 수 있으나 PID 제어기 설계에는 많은 다른 설계자의 지식을 요구하는 것을 볼 수 있다. 따라서 제어 이론에 익숙하지 않은 설계자가 이를 이용하여 우수한 다중 루프 제어 시스템을 설계하기는 쉽지 않다. 이런 이유가 BLT법이 제안되었던 이유이고, 본 연구의 시작점이다.

제어 시스템의 성능과 강인성은 보통 서로 상충되는 요소이다. 본 방법은 성능을 결정하는 설계변수를 갖고 있다. 따라서 이를 적당히 선정함에 따라 강인성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 여기서는 원하는 성능이 나오는데 중점을 두었기 때문에 안정성이나 강인성의 분석은 간단하게 하였으며, 이들에 관한 결과는 다른 기회에 발표하고자 한다.

## 2. 비집중 제어기 계산

다음과 같은 다변수 공정을 고려한다.

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & \cdots & g_{1n}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & \cdots & g_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1}(s) & g_{n2}(s) & \cdots & g_{nn}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 어느 출력과 어느 입력을 연결할 것인가 하는 pairing 문제는 해결되었다고 가정하고 대각 요소로 이루어진 비집중 제어기를 설계하고자 한다.

$$C(s) = \begin{bmatrix} c_{11}(s) & & & 0 \\ & c_{22}(s) & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & c_{nn}(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Fig. 1은 이 공정의 구조를 나타내고 있다. 폐루프 관계식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$Y(s) = [I + G(s)C(s)]^{-1}G(s)C(s)R(s) \quad (3)$$

즉, 출력과 설정점 사이의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$H(s) \equiv [I + G(s)C(s)]^{-1}G(s)C(s) \quad (4)$$

$H(s)$  행렬의 대각 요소들은 각 설정점에 대한 짝 지워진 출력의 응답이 나타나는 형태를 결정한다. 나머지 행렬 요소들은 짝 지워지지 않은 출력에 미치는 영향을 나타낸다. 제어기  $C(s)$ 가 주어지면 식 (4)에 따라  $H(s)$ 가 계산되어지고, 각 설정점 변화에 대한 출력 응답을 얻을 수 있다. 역으로 원하는  $H(s)$ 가 주어지면  $C(s)$ 를 구할 수도 있다. 즉,

$$C(s) = G(s)^{-1}[H(s)^{-1} - I]^{-1} \quad (5)$$

단변수 공정일 경우 식 (5)를 이용하여 원하는 응답을 만족시키는 제어기 값을 쉽게 구할 수 있다[10, 11]. 그러나 다변수 공정일 경우  $H(s)$ 를 잘 선정하지 않으면  $C(s)$ 가 대각 행렬이 되지 못한다. 여기서

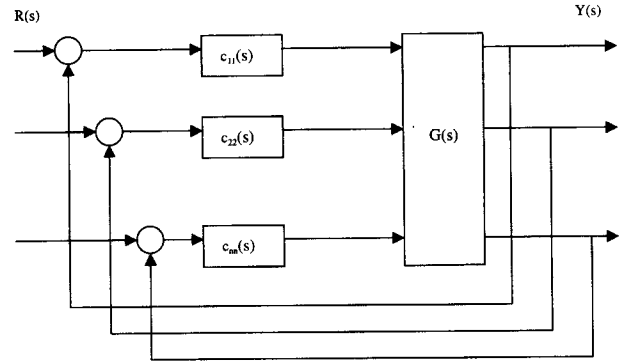


Fig. 1. Multiloop control scheme for the multivariable process.

는 이를 해결할 수 있는 방법을 제안한다. 실제  $C(s)$ 는  $n$ 개의 대각 행렬이기 때문에  $H(s)$ 의 모든 요소를 원하는 형태로 정할 수는 없다.  $H(s)$ 의  $n^2$ 개의 요소 중  $n$ 개만을 원하는 형태로 할 수 있다. 여기서는  $H(s)$ 의 대각 행렬이 원하는 형태로 되는  $C(s)$ 를 찾는다. 즉,

$$\tilde{H}(s) = \text{diag}[H(s)] = \text{diag}([I + G(s)C(s)]^{-1}G(s)C(s)) \quad (6)$$

가 원하는 형태가 되는  $C(s)$ 를 구한다. 여러 형태의  $\tilde{H}(s)$ 를 생각할 수 있으나 여기서는

$$\tilde{H}(s) = \text{diag}\left(\frac{e^{-\theta_{ii}s}}{\lambda s + 1}I\right)$$

으로 한다. 여기서  $\theta_{ii}$ 는 공정의 대각 행렬 요소들이 가지는 시간지연 항이고,  $\lambda$ 는 폐루프 공정의 시상수로 tuning factor 역할을 하게 된다.  $\lambda$ 를 크게 하면 응답이 느려지고, 작게 하면 응답이 빨라진다. 너무 작게 하면 진동이 심해질 수 있으며, 너무 크게 하면 진동은 없으나 응답이 느려진다. 단변수 공정에 관한 IMC 제어기의 tuning 변수와 같은 역할을 하는 것이다.

일반적으로 식 (6)에서의 제어기는 해석적으로 얻을 수 없다. 제어기  $C(s)$ 의 각 주파수 응답을 수치적으로 구한다. 즉,

$$\tilde{H}(j\omega) = \text{diag}([I + G(j\omega)C(j\omega)]^{-1}G(j\omega)C(j\omega)) \quad (7)$$

를 만족하는  $C(j\omega)$ 를 각 주파수  $\omega$ 에 대하여 수치적으로 구한다.

다행히  $2 \times 2$  공정의 경우 식 (7)은 제어기에 관해 해석적으로 풀리고 다음과 같이 정리된다.

$$c_1(s) = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad (8)$$

$$c_2(s) = \frac{-a\hat{h}_{22} - a\hat{g}_{11}h_{22}c_1}{\hat{A} + \hat{B}c_1} \quad (9)$$

여기서,

$$a = g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}$$

$$A = ag_{11}h_{11} - ag_{11}$$

$$B = a^2h_{11} - a^2$$

$$\hat{A} = ag_{22}h_{22} - ag_{22}$$

$$\hat{B} = a^2h_{22} - a^2$$

$$\alpha = A\hat{B} - aBg_{11}h_{22}$$

$$\beta = A\hat{A} - aBh_{22} - a^2g_{11}g_{22}h_{11}h_{22} + a\hat{B}h_{11}$$

$$\gamma = aAh_{11} - a^2g_{22}h_{11}h_{22}$$

이다.

이렇게 구한, 즉 설정점 변화에 대하여 출력 응답이 원하는 일차 시간지연 형태가 되는 제어기  $c_1(s)$ 와  $c_2(s)$ 는 PID 제어기 형태가 아니다.

### 3. PID 제어기로 근사

현장에서 사용되는 다중 루프 제어기의 형태는 일반적으로 PID 형태이다. 따라서 앞에서 구한 제어기를 다음과 같은 PID 제어기로 근사하여 사용한다.

$$c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) : \text{PI 제어기} \quad (10)$$

$$c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \frac{1}{\tau_f s + 1} : \text{filter를 가진 PID 제어기} \quad (11)$$

주파수 영역에서 fitting하여 근사 PID 제어기를 얻는다.

아주 작은 주파수 영역에선  $c_i(s)$ 가 식 (8)의 - 근을 따르지만 이후 + 근으로 다시 - 근으로 바뀌게 된다. 식이 바뀌는 각 주파수는 교차 값을 가지는 지점이다. Fig. 2(a)에선 5부분의 교차 지점이 나타나고 있다. 따라서 5번 식이 바뀌면 된다.  $c_2$ 는  $c_1$ 에 종속되어 있어서 교차지점과 상관없이  $c_1$ 만 구하면 계산되어 진다.

Fitting을 위해선 주파수 영역이 주어져야 한다. 높은 주파수 영역까지는 fitting이 잘 이루어지지 않는다. 제안된 방법에서 사용된 제어기인 PI(PID)를 Bode plot에 적용해 보면  $-90^\circ \sim -0^\circ (-90^\circ \sim +90^\circ)$ 까지 변화하므로 fitting의 범위도 이에 국한한다[Fig. 2(c)].

공정의 출력 응답이 일차 시간지연 형태를 나타내므로  $1/\lambda$ 의 각 주파수 지점에서 공정의 특징이 나타나게 된다. 따라서 fitting 범위 역시  $1/\lambda$  지점을 포함하여야 원하는 응답 형태를 얻을 수 있다.  $1/\lambda$  값이 fitting에 사용된 최대 각 주파수 이상일 경우, 즉  $\lambda$ 가 작은 값을 가지게 된다면 출력응답은 진동이 심하게 나타난다. 또한 일차 시간지연 형태를 가지지 않는다.

제안된 방법에 의해 구해진 PI(PID)의 값과  $\omega$ 의 범위가 Table 1에 나타나 있다. 제안된 방법에 의한 제어기 값들은 fitting 방법이나 목적함수 등에 따라서 달라질 수 있다. 하지만 fitting 영역만 동일하다면 유사한 형태의 응답을 보이게 된다.

Fitting에 사용되었던 목적 함수는

$$\text{Min.} \sum (|C(j\omega) - \hat{C}(j\omega)| + |\angle C(j\omega) - \angle \hat{C}(j\omega)|) \quad (12)$$

이다.

### 4. 예 제

제안된 방법의 모사 결과는 BLT법 및 SAT법과 비교되었다. 제안된 방법에 의해 구하여진 제어기 값들은 Table 1에 있다.

강건성의 정도를 나타내는  $[I+(GC)^{-1}]$ 의 minimum singular value 값들[12]은 각 방법과 적용된 column에 따라 Table 2와 같이 구해진다.

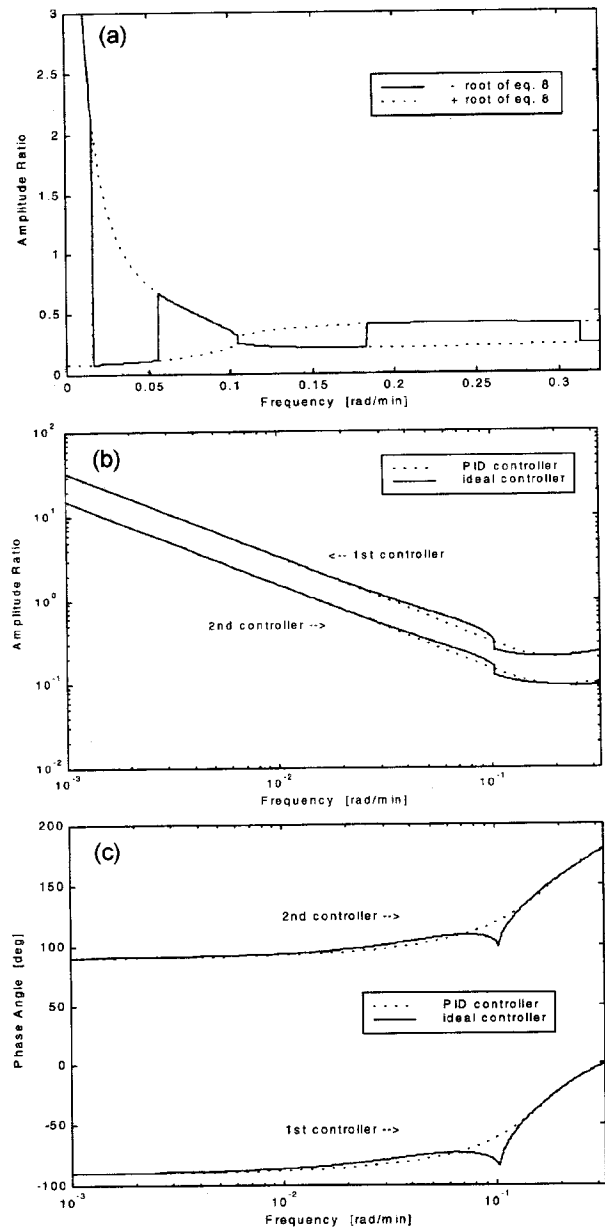


Fig. 2. (a) Amplitude ratio of the ideal controller calculated by the Eq. (8). (b) Amplitude ratios of the ideal controller and PID controller (Wood and Berry column,  $\lambda=3.7$ ). (c) Phase angles of the ideal controller and PID controller (Wood and Berry column,  $\lambda=3.7$ ).

Table 1. Control settings for each column

	Wood & Berry		Vinante & Luyben		Wardle & Wood	
	PI	PID with filter	PI	PID with filter	PI	PID with filter
$\omega$	0.001-0.336	0.001-0.325	0.001-1.00	0.001-1.00	0.001-0.115	0.001-0.105
$\lambda$	5.5	3.7	3	1.5	15	10
$K_c$	0.20	0.24	-0.76	-3.66	18.14	53.64
	-0.10	-0.11	0.56	2.94	-10.18	-52.09
$\tau_i$	8.22	7.24	4.10	12.36	22.83	40.75
	8.40	6.91	4.94	14.36	15.30	42.08
$\tau_d$		4.41		2.21		31.39
		3.88		2.20		27.72
$\tau_f$		3.20		6.54		56.64
		2.67		6.72		84.70

Table 2. Minimum singular values of  $[I+(GC)^{-1}]$

	BLT	SAT	Proposed PI	Proposed PID
Wood & Berry	0.606	0.328	0.539	0.699
Vinante & Luyben	0.720	0.403	0.828	0.711
Wardle & Wood	0.629	0.168	0.416	0.607

SAT 법은 다른 두 방법에 비해 모두 작은 값을 가지고 있고, 제안된 방법과 BLT법은 큰 차이를 보이지 않는다.

#### 4-1. 예제 1

다음과 같은 전달함수를 가지는 Wood and Berry column을 고려한다.

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s+1} & \frac{-18.9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s+1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(s) \\ R_2(s) \end{bmatrix}$$

PI(PID) 제어기를 사용한 모사 결과를 각각 Fig. 3(a)와 (b)에서 볼 수 있다.

PI 제어기는 두 개의 변수만을 가지고 있다. 따라서 네 개의 변수를 가진 PID 제어기 보다 fitting이 잘 되지 않는다. Fig. 3(a)와 (b)를 비교해 보면 PI 제어기 사용시 좀 더 심한 진동을 가지면서 설정점으로 수렴해 나간다. Fitting에 의해 이상적인 제어기를 따라 갈려고 하는 하지만 두 개의 변수만으로는 무리가 있다. PID 제어기는 진동이 적으며 일차 시간지연 형태를 잘 따라간다.

사용된 두 제어기 모두 느린 응답을 가지지 않고 설정점으로 다가간다. 특히 두 번째 출력 응답은 비교 대상인 다른 두 방법에 비해 정착시간이 빠르게 나타난다. PI 제어기를 사용하더라도 진동이 있을 뿐 느린 응답은 나타나지 않는다. PID 제어기의 경우 약간의 진동을 보이고 있지만 설정점에서 2% 정도의 오차가 있을 뿐이다.

Fig. 4는 공정 모델에 오차가 있을 경우 제안된 방법의 응답형태를 나타낸다. 대각행렬 요소들이 가지는 시간지연항 또는 시상수항이 20% 증가된 모델을 사용하였다. 시간지연항이 변화하였을 경우 제안된 방법은 오차 없는 모델과 큰 차이가 없으나 시상수항의 변화에 대해선 진동이 생기면서 정착시간이 늦어짐을 볼 수 있다. 하지만 그림에는 나타나지 않았지만 시상수항이 변화된 모델에 대해 다른 두 방법보다 두 번째 출력 응답은 빠른 정착시간을 가진다.

#### 4-2. 예제 2

다음은 Vinante and Luyben column에 대한 전달함수이다.

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2.2e^{-s}}{7s+1} & \frac{1.3e^{-0.3s}}{7s+1} \\ \frac{-2.8e^{-1.8s}}{9.5s+1} & \frac{4.3e^{-0.35s}}{9.2s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(s) \\ R_2(s) \end{bmatrix}$$

모사결과를 Fig. 4에 있다. PI 제어기를 사용한 경우 두 개의 응답 모두 진동없이 일차 시간지연 형태를 나타내고 있다. 두 개의 변수만으로도 fitting이 잘 되기 때문이다. 이상적인 제어기와 유사한 작용을 하여 일차 시간지연 형태를 잘 나타내는 것이다. PID 제어기에 사용된  $\lambda$  값은 PI 제어기에서 사용되어진 값보다 작다. 따라서 보다 빠른 오름시간을 나타내고 있다. 두 제어기 모두 첫 번째 요소의 응답은 다른 방법들에 비해 정착시간이나 오름시간이 빠르다.

#### 4-3. 예제 3

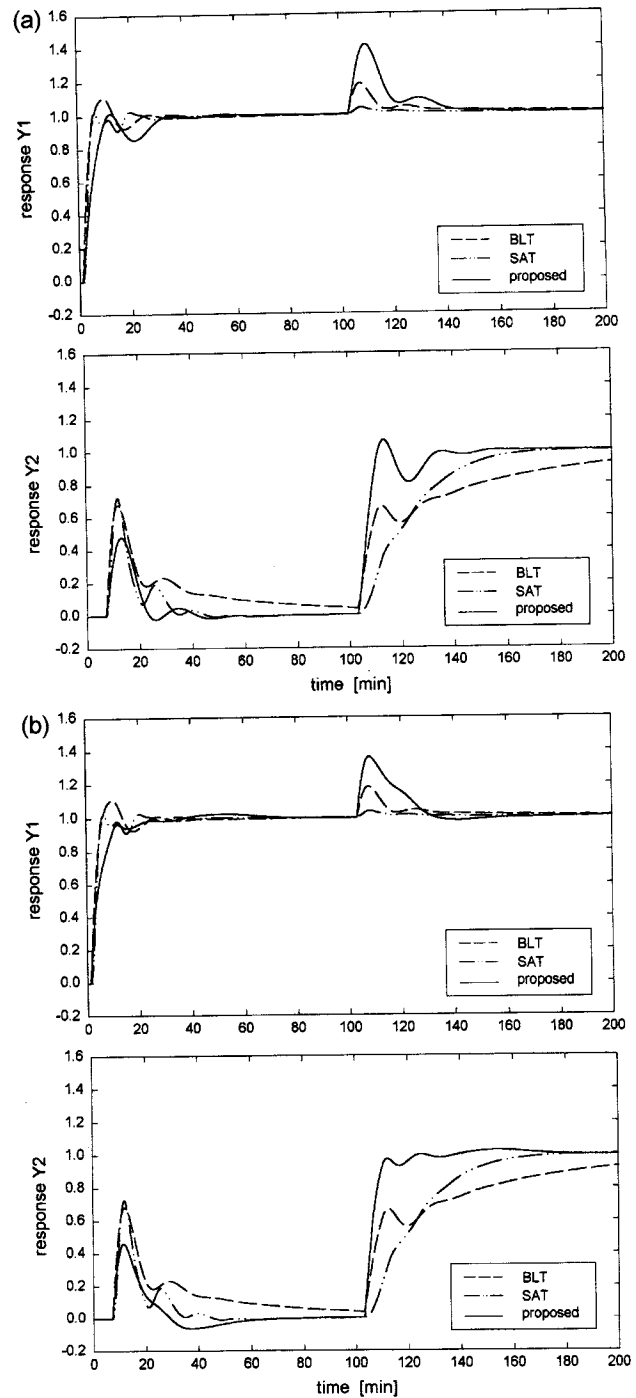


Fig. 3. (a) Set-point responses of the proposed PI controller for Wood and Berry column. (b) Set-point responses of the proposed PID controller for Wood and Berry Column.

다음은 Wardle and Wood column에 대한 전달함수이다.

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.126e^{-6s}}{60s+1} & \frac{-0.101e^{-12s}}{(48s+1)(45s+1)} \\ \frac{0.094e^{-8s}}{38s+1} & \frac{-0.12e^{-8s}}{35s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(s) \\ R_2(s) \end{bmatrix}$$

Fig. 5에 나타난 모사결과를 보듯이 다른 두 방법들에 비해 진동이 적으면서도 설정점을 빠르게 따라간다. 예제 3에서 사용되어진 공정은 두 개의 변수만을 가진 PI 제어기로는 만족할만한 fitting이 이루어

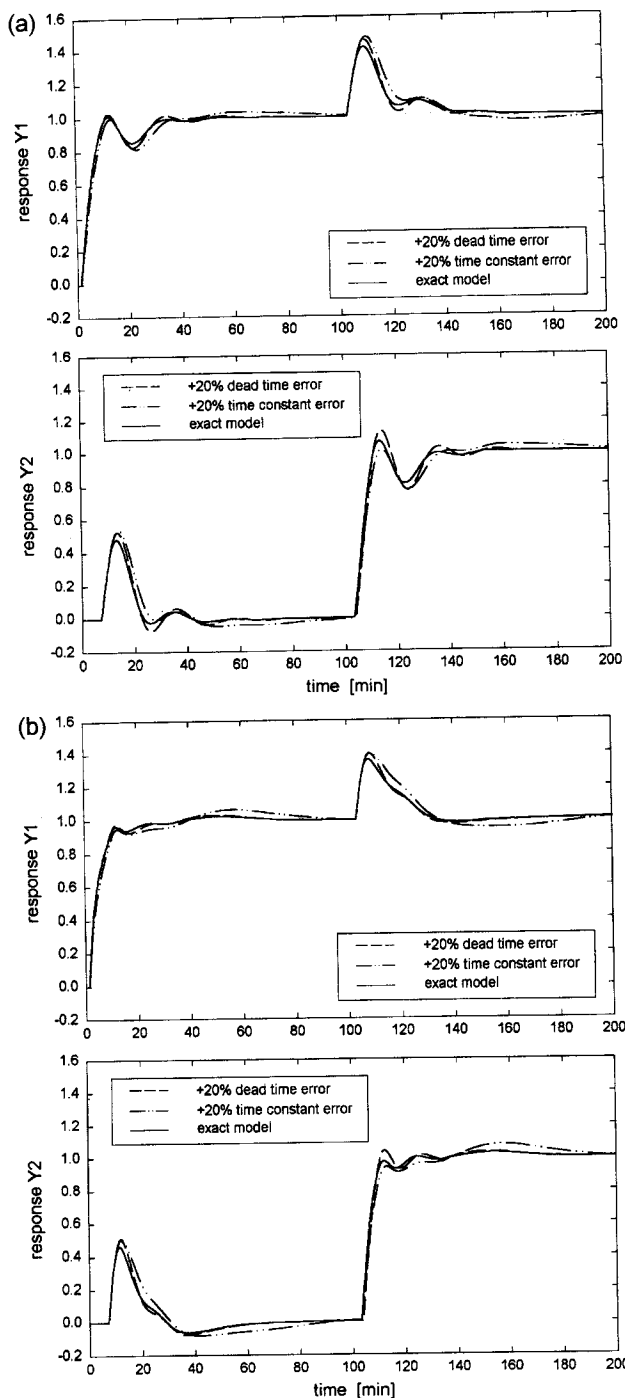


Fig. 4. (a) Set-point responses of the proposed PI controller for Wood and Berry column with +20% error. (b) Set-point responses of the proposed PID controller for Wood and Berry column with +20% error.

어지지 않는다. 하지만 다른 방법들에 비해 진동이 적고 정착시간도 빠르다. 따라서 정확한 fitting이 되지 않아도 어느 정도만 이상적인 제어기 값을 fitting하면 일차 시간지연 형태의 응답을 얻을 수 있음을 알 수 있다. BLT 방법은 두 개 응답 모두 느리게 나타나고, SAT 방법은 진동이 심하다. PID 제어기의 경우 일차 시간지연 형태를 잘 나타내고 진동없이 빠른 정착시간과 오름시간을 보여준다.

세 개 공정의 모사결과 부하 응답은 다른 비교 방법들에 비해 상대적으로 느린 경우가 있음을 볼 수 있다. 이는 모든 출력 응답이 설정

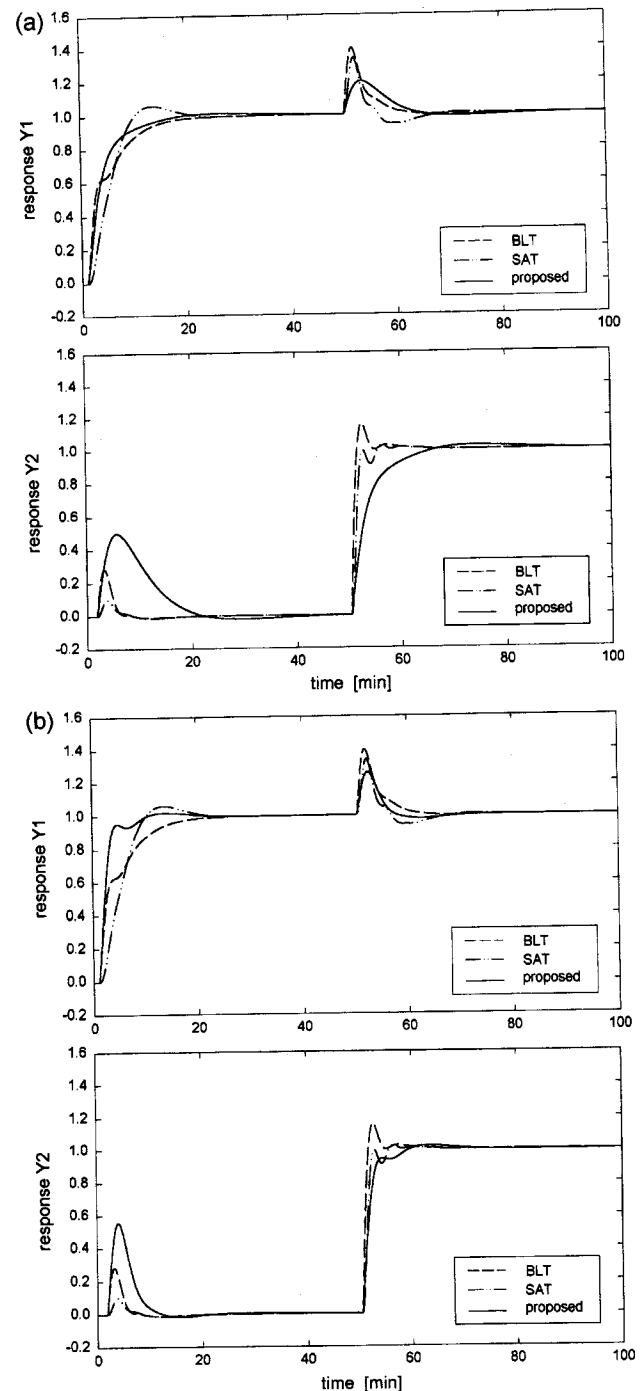


Fig. 5. (a) Set-point responses of the proposed PI controller for Vinante and Luyben column. (b) Set-point responses of the proposed PID controller for Vinante and Luyben column.

점에 같은 빠르기로 되도록 제어기가 설계되었기 때문이다. 다른 방법에서처럼 응답을 비대칭적으로 만들면 느린 부하 응답을 빠르게 할 수 있다. 즉,  $\lambda$  값을 루프 별로 각각 다르게 하면 되는데, 제안된 방법의 목적은 균형잡힌 응답을 얻는 것이었기 때문에 시도하지 않았다.

## 5. 결 론

하나의 변수를 이용하여 원하는 형태의 응답이 나타나도록 하는 다 변수 공정의 제어시스템 설계 방법을 제안하였다. 하나의 변수에 의

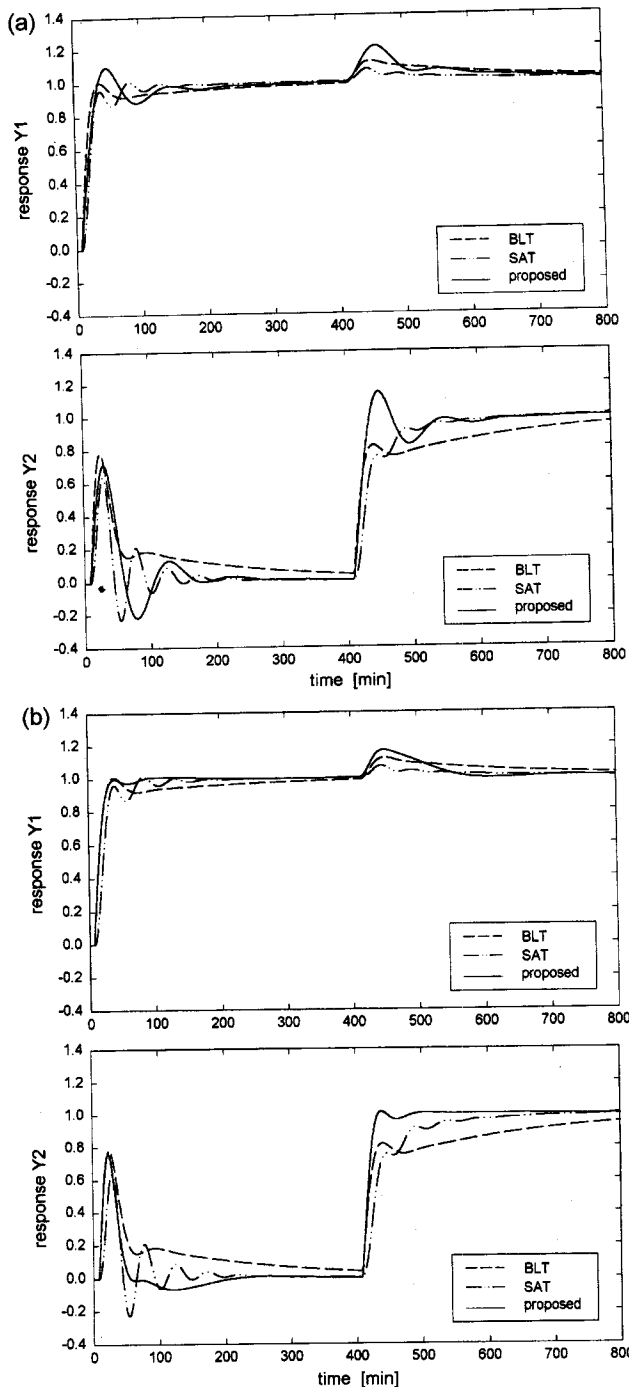


Fig. 6. (a) Set-point responses of the proposed PI controller for Wardle and Wood column. (b) Set-point responses of the proposed PID controller for Wardle and Wood column.

해 제어시스템이 설계되므로 계산과정이 빠르며, 원하는 형태의 응답이 나타나므로 설계자의 부담이 적다. 세 가지 모사 결과에서 보듯이 BLT 법이나 SAT 법에서 나타나는 느린 출력 응답 혹은 비대칭

적인 응답을 주는 등의 단점들이 없다.

3×3 이상의 공정을 위한 반복 계산법의 수렴성과 다중 루프 제어기로 쉽게 구현되는 loop failure tolerance 등의 특성을 갖도록 하는 것 등이 앞으로의 연구 과제로 보인다.

## 사용기호

- C : matrix of controller transfer function with diagonal elements
- $c_i$  : element of controller C
- G : matrix of open-loop process transfer functions
- $g_{ij}$  : element of open-loop process
- H : matrix of closed loop transfer functions with controllers and processes
- $\tilde{H}$  : matrix consisted of diagonal elements of H
- $h_{ii}$  : diagonal element of H
- I : identity matrix
- j : complex number,  $\sqrt{-1}$
- $K_C$  : controller gain
- R : vector of reference variables
- $\tau_I$  : integral time constant of controller
- $\tau_D$  : derivative time constant of controller
- $\tau_F$  : filter time constant of controller
- $\omega$  : angular frequency
- Y : vector of controlled variables
- a, A, B,  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  : defined complex variables to find ideal controllers

## 참고문헌

1. Luyben, W. L.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **25**, 654(1986).
2. Mayne, D. Q.: *Automatica*, **9**, 201(1973).
3. Loh, A. P., Hang, C. C., Quek, C. K. and Vasanani, V. U.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **32**, 1002(1993).
4. Shen, S. H. and Yu, C. C.: *AIChE J.*, **40**, 627(1994).
5. Åström, K. J. and Hagglund, T.: "Automatic Tuning of PID Controllers," Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina(1988).
6. Skogestad, S. and Morari, M.: *Automatica*, **25**, 119(1989).
7. Grosdidier, P. and Morari, M.: *Automatica*, **22**, 309(1986).
8. Lee, J. and Choi, J. Y.: *HWAHAK KONGHAK*, **31**, 272(1993).
9. Maciejowski, J. M.: "Multivariable Feedback Design," Addison Wesley, New York(1989).
10. Seborg, D. E., Edgar, T. F. and Mellichamp, D. A.: "Process Dynamics and Control," John Wiley, New York(1989).
11. Morari, M. and Zafiriou, E.: "Robust Process Control," Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ(1989).
12. Doyle, J. C. and Stein, G.: *IEEE Trans. Autom. Control*, **AC-26**, 1(1981).