

## 주파수 영역에서 Nyquist 선도를 이용한 모델 축소

### Model Reduction Algorithm Using Nyquist Curve in Frequency Domain

조준호, 김정철, 김진권, 최정내, 황형수  
(Joon-Ho Cho, Jung-Chul Kim, Jung-Nae Choi, Jin-Kwon Kim, Hyung-Soo Hwang)

**Abstract :** In this paper, a new model reduction method is proposed to obtain a reduced order model in the frequency domain. The method is developed based on the second-order plus dead time modeling technique. The initial value of the reduced model parameters can be obtained using this method coinciding four point(0,  $-\pi/2$ ,  $-\pi$ ,  $-3\pi/2$ ) on the Nyquist curve. The optimal parameters of the reduced model is obtained through calculation procedure with three steps. It is shown that Nyquist curves and unit step responses of the reduced models of numerical examples closely agree with those of original models.

**Keywords :** Nyquist curve, model reduction

#### I. 서론

새로운 제어기 설계 방법들이 많이 연구되어 제시되었으나, 비례-적분-미분(PID)제어기는 구조가 비교적 간단하여 이해하기 쉽고 설계가 간단하기 때문에 산업 현장에서 폭넓게 사용되고 있으며[1]-[4] 또한 최적의 성능을 얻을 수 있는 PID 제어기의 파라미터를 결정하는 방법에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있고, 그 중에서 Ziegler-Nichols 규칙, Cohen-Coon 방법, IAE, ITAE, 그리고 내부모델 제어 등의 PID제어기의 parameter를 동조하는 많은 방법들이 많이 연구되어 제시되었다[5]. 이러한 방법들은 특별한 공정이나 상황에서는 우수한 특성을 갖고 있으나, 일반적인 공정에 대하여서는 우수한 제어 결과를 기대하기 어려우며, 또한 시스템의 모델이 고차인 경우에 PID 제어기의 제어성능은 좋은 특성을 보이지 않는다[6][7].

최근 Wang 등은 주파수영역에서 원래의 고차 시스템과 축소모델의 Nyquist 선도가  $-\pi/2$  및  $-\pi$  점에서 일치하도록 2차의 낭비시간요소를 포함하는 축소모델을 구하는 방법을 제시하고 이 축소 모델을 이용하여 PID제어기를 설계하는 방법을 제시하여 고차 및 저차 그리고 낭비시간요소를 고려한 광범위한 공정의 효율적인 제어기 설계방법을 제시하였다[8][9].

이 방법은 일반적으로 대부분의 공정에서 우수한 특성을 보이나, 원래 모델의 Nyquist 선도의 모든 영역을 고려하지 않아 축소모델의 특성이 우수하지 않은 경우가 많다. 본 논문에서는 고차시스템과 저차의 축소 모델 사이의 오차를 줄이기 위하여 Nyquist 선도의 0,  $-\pi/2$ ,  $-\pi$ ,  $-3\pi/2$ 의 4점을 고려하여 2차의 지연시간항을 갖는 축소모델을 구하는 방법

을 제안하였다.

이 방법은 크게 3단계로 나누어져 계산되어진다. 1단계에서는 수학적 계산을 통하여 축소 모델의 파라미터값을 구해 이 값들을 초기 값으로 하여 이용한다.

2단계에서는 축소모델의 분모식의 상수항 파라미터인  $c$ 의 최적 값을 알고리즘을 통하여 구하며, 3단계에서는 반복 계산을 통하여 나머지 파라미터들의 최적 값을 구하여 축소모델을 구한다.

제안된 방법의 특성을 확인하기 위하여 수치 예를 들어 Nyquist 선도 및 단위 계단 응답을 구하고 Wang의 방법과 비교하였다.

본 논문의 구성은 II. 주파수 영역에서의 모델 축소방법, III. 수치 예 및 고찰, IV. 결론으로 구성되어 있다.

#### II. 주파수 영역에서의 모델 축소방법

##### 1. Wang의 모델 축소방법

미지의 공정에 대한 주파수 응답  $G(j\omega)$ 로부터 (1)과 같은 2차 지연모델로 모델링 할 수 있다. 이 방법은 고차계 시스템을 2차 지연모델로의 축소과정에 사용되는 방법이다.

$$\hat{G}(s) = \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + c} \quad (1)$$

여기서  $a, b, c, L$ 은 결정해야 할 미지수이며  $a, b, c, L$ 의 값에 따라

(1)의 모델은 실근 또는 허근을 가지므로 진동하는 공정의 동특성을 표현할 수 있다.

4개의 미지수를 결정하기 위해서는 4개의 식이 필요하다.

$\angle G(j\omega_c) = -\pi$ ,  $\angle G(j\omega_b) = -\frac{\pi}{2}$ 인 주파수  $\omega_c$ 와  $\omega_b$ 에서 원래 공정과 동조 모델의 주파수 응답이 일치하도록 함으로써 미지수를 결정할 수 있다.

즉,  $G(j\omega_c) = \hat{G}(j\omega_c)$ ,  $G(j\omega_b) = \hat{G}(j\omega_b)$ 인 조건으로부터 다음 식을 유도할 수 있다. 여기서  $\hat{G}(j\omega_c)$  및  $\hat{G}(j\omega_b)$ 는 축

논문접수 : 2001. 10. 22., 채택확정 : 2002. 2. 16.

황형수 : 원광대학교 제어계측공학과(hshwang@wonkwang.ac.kr)

김진권 : 원광대학교 제어계측공학과(jinpang@wonkwang.ac.kr)

최정내 : 원광대학교 제어계측공학과(cjn9828@wonkwang.ac.kr)

김정철 : 원광대학교 제어계측공학과(chul7@wonkwang.ac.kr)

조준호 : 원광대학교 제어계측공학과(cho11024@wonkwang.ac.kr)

※ 본 논문은 2001년도 원광대학교의 교내 지원에 의하여 연구됨.

소모델의  $-\pi/2$  및  $-\pi$ 에서 주파수 응답이다.

$$c - a\omega_c^2 + j b \omega_c = \frac{\cos(\omega_c L) - j \sin(\omega_c L)}{-|G(j\omega_c)|} \quad (2)$$

$$c - a\omega_b^2 + j b \omega_b = \frac{\cos(\omega_b L) - j \sin(\omega_b L)}{-j|G(j\omega_b)|} \quad (3)$$

위 식들을 풀면 아래와 같은 결과를 얻는다.

$$\frac{\sin(\omega_c L)}{\cos(\omega_b L)} = \frac{\omega_c |G(j\omega_c)|}{\omega_b |G(j\omega_b)|} = \theta \quad (4)$$

$$a = -\frac{1}{\omega_c^2 - \omega_b^2} \left[ \frac{\sin(\omega_b L)}{|G(j\omega_b)|} + \frac{\cos(\omega_c L)}{|G(j\omega_c)|} \right] \quad (5)$$

$$b = \frac{\sin(\omega_c L)}{\omega_c |G(j\omega_c)|} \quad (6)$$

$$c = \frac{1}{\omega_c^2 - \omega_b^2} \left[ \frac{\omega_c^2 \sin(\omega_b L)}{|G(j\omega_b)|} + \frac{\omega_b^2 \cos(\omega_c L)}{|G(j\omega_c)|} \right] \quad (7)$$

(4)는 비선형 방정식으로 직접적으로 해를 얻기 어렵다. 그렇지만 초기치를 잘 설정하면 Newton-Raphson 반복법을 사용하여 해를 구할 수 있다. 초기치를 설정하기 위해  $\sin(x)$  및  $\cos(x)$ 를 아래와 같이 근사화한다.

$$\sin(x) \approx px^2 + qx, \quad \cos(x) \approx px^2 + rx + 1$$

여기서,  $p = (8/\pi^2)(1 - \sqrt{2})$ ,  $q = (2/\pi)(\sqrt{2} - 1)$ ,

$$r = (2/\pi)(\sqrt{2} - 3) \text{이다.}$$

윗 식을 (5)에 적용하면 다음 식을 얻는다.

$$p(\omega_c^2 - \theta \omega_b^2)L^2 + (q\omega_c - \theta r\omega_b)L - \theta = 0 \quad (8)$$

여기서  $\theta = (\omega_c |G(j\omega_c)| / \omega_b |G(j\omega_b)|)$ 이다.

(9)의 근 중에서 절대값이 작은 근을 초기치로 설정하고 Newton-Raphson 방법을 적용한다.

$$L_2 = L_1 - \frac{f(L_1)}{f'(L_1)} \quad (9)$$

여기서,  $f(L) = \frac{\sin(\omega_c L)}{\cos(\omega_b L)} - \frac{\omega_c |G(j\omega_c)|}{\omega_b |G(j\omega_b)|}$

$$f'(L) = \frac{\omega_b \sin(\omega_b L) \sin(\omega_c L) + \omega_c \cos(\omega_b L) \cos(\omega_c L)}{\cos^2(\omega_b L)}$$

Wang이 제시한 Nyquist 선도로부터 축소 모델을 구하는 방법으로 실제의 고차의 실제 모델이 차수가 크면 클수록 고려되지 않은 Nyquist 선도에서 오차가 발생한다.

2. Nyquist 선도를 이용한 새로운 모델 축소 알고리즘

본 논문에서는 기존의 방법에서 오는 오차를 줄이기 위해서 Nyquist 선도의 0,  $-\pi/2$ ,  $-\pi$ ,  $-3\pi/2$ 의 4점을 고려하여 2차

의 지연시간항을 갖는 축소모델을 구하는 방법을 제안한다.

제안된 알고리즘은 크게 3단계로 나누어지며, 각 단계별 설명은 아래와 같다.

단계 1 : 수학적 계산을 통해 축소모델의 파라미터 값(  $a, b, c, L$ )을 초기 값으로 사용한다.

- 실제의 고차 모델은 (10)과 같다.

$$G(s) = \frac{\beta_0 s^m + \beta_1 s^{m-1} + \dots + \beta_{m-1} s + \beta_m}{s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n} \quad (10)$$

- 2차의 시간지연항을 갖는 축소모델은 (11)과 같다.

$$\widehat{G}(s) = \frac{e^{-Ls}}{as^2 + bs + c} \quad (11)$$

여기서 결정해야할 것은  $a, b, c, L$ 의 값이고, 결정하는 방법은

$$\angle G(j\omega_a) = 0, \quad \angle G(j\omega_b) = -\frac{\pi}{2},$$

$$\angle G(j\omega_c) = -\pi, \quad \angle G(j\omega_d) = -\frac{3\pi}{2} \text{인 주파수 } \omega_a, \omega_b, \omega_c, \omega_d$$

에서 원래의 고차모델과 축소모델의 주파수 응답이 일치하도록 함으로써 미지수를 결정할 수 있다. (11)의 지연시간  $e^{-sL}$ 을 Pade 근사식 사용하여 (11) 다시 정리하면 (12)과 같다.

$$\widehat{G}(s) = \frac{2 - Ls}{Las^3 + (2a + bL)s^2 + (2b + Lc)s + 2c} \quad (12)$$

여기서  $G(j\omega_a) = \widehat{G}(j\omega_a)$ ,  $G(j\omega_b) = \widehat{G}(j\omega_b)$ ,

$G(j\omega_c) = \widehat{G}(j\omega_c)$ ,  $G(j\omega_d) = \widehat{G}(j\omega_d)$ 인 조건으로부터 다음 식을 유도할 수 있다.

여기서  $\widehat{G}(j\omega_a)$ ,  $\widehat{G}(j\omega_b)$ ,  $\widehat{G}(j\omega_c)$ ,  $\widehat{G}(j\omega_d)$ 는 축소 모델의 0,  $-\pi/2$ ,  $-\pi$ ,  $-3\pi/2$ 의 주파수 응답이다.

- i)  $\angle G(j\omega_a) = 0$  일 경우 (13)과 같다.

$$2c - (2a + bL)\omega_a^2 + j\omega_a(2b + Lc - Law_a^2) = \frac{2 - jL\omega_a}{|G(j\omega_a)|} \quad (13)$$

- ii)  $\angle G(j\omega_b) = -\frac{\pi}{2}$  일 경우 (14)와 같다.

$$2c - (2a + bL)\omega_b^2 + j\omega_b(2b + Lc - Law_b^2) = \frac{2 - jL\omega_b}{-j|G(j\omega_b)|} \quad (14)$$

- iii)  $\angle G(j\omega_c) = -\pi$  일 경우 (15)와 같다.

$$2c - (2a + bL)\omega_c^2 + j\omega_c(2b + Lc - Law_c^2) = \frac{2 - jL\omega_c}{-|G(j\omega_c)|} \quad (15)$$

- iv)  $\angle G(j\omega_d) = -\frac{3\pi}{2}$  일 경우 (16)과 같다.

$$2c - (2a + bL)\omega_d^2 + j\omega_d(2b + Lc - Law_d^2) = \frac{2 - jL\omega_d}{j|G(j\omega_d)|} \quad (16)$$

(13)을 실수부와 허수부로 분리하여 나타내면 (13)' 및 (13)''과 같다.

$$\begin{cases} 2c - (2a + Lb)w_a^2 = \frac{2}{|G(jw_a)|} & (13)' \\ w_a(2b + Lc - Law_a^2) = \frac{-Lw_a}{|G(jw_a)|} & (13)'' \end{cases}$$

같은 방법으로 (5), (6), (7)식을 정리하면 (14)', (14)'', (15)', (15)'', (16)', (16)''과 같다.

$$\begin{cases} 2c - (2a + Lb)w_b^2 = \frac{Lw_b}{|G(jw_b)|} & (14)' \\ w_b(2b + Lc - Law_b^2) = \frac{2}{|G(jw_b)|} & (14)'' \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2c - (2a + Lb)w_c^2 = \frac{-2}{|G(jw_c)|} & (15)' \\ w_c(2b + Lc - Law_c^2) = \frac{Lw_c}{|G(jw_c)|} & (15)'' \end{cases}$$

$$\begin{cases} 2c - (2a + Lb)w_d^2 = \frac{-Lw_d}{|G(jw_d)|} & (16)' \\ w_d(2b + Lc - Law_d^2) = \frac{-2}{|G(jw_d)|} & (16)'' \end{cases}$$

(14)'와 (15)'와의 관계에서 (17)을 구할 수 있다.

$$(2a + Lb)(w_c^2 - w_b^2) = \frac{Lw_b}{|G(jw_b)|} + \frac{2}{|G(jw_c)|} \quad (17)$$

(14)'과 (16)' 관계에서 (18)를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{L}(2a + Lb)(w_d^2 - w_b^2) = \frac{Lw_b}{|G(jw_b)|} + \frac{Lw_d}{|G(jw_d)|} \quad (18)$$

(17)과 (18)의 관계에서 (11)의 미지값  $L$ 을 구하면 (19)와 같다.

$$L = \frac{(w_d^2 - w_b^2)|G(jw_c)|}{2(w_c^2 - w_b^2)} x_2 - \frac{w_b|G(jw_c)|}{2|G(jw_b)|} \quad (19)$$

여기서  $x_1, x_2$ 는 아래와 같다.

$$x_1 = \frac{Lw_b}{|G(jw_b)|} + \frac{2}{|G(jw_c)|}, \quad x_2 = \frac{w_b}{|G(jw_b)|} + \frac{w_d}{|G(jw_d)|}$$

(17)을 (15)'에 대입하여 정리하면  $c$ 값을 구할 수 있다.

$$c = \frac{(x_1 w_c^2)}{(w_c^2 - w_b^2)2} - \frac{1}{|G(jw_c)|} \quad (20)$$

(15)'과 (17)의 관계에서 아래와 같이  $a$ 값을 구할 수 있다.

$$a = \frac{1}{4 + L^2 w_c^2} \left( \frac{2x_1}{(w_c^2 - w_b^2)} - \frac{L^2}{|G(jw_c)|} + L^2 c \right) \quad (21)$$

마지막으로  $b$ 의 값은 (17)'에서 구할 수 있다.

$$b = \frac{1}{L} \left( \frac{x_1}{(w_c^2 - w_b^2)} - 2a \right) \quad (22)$$

지금까지 구한 수식은 지연시간 ( $e^{-sL}$ )을 Pade 근사식으로 하여 실제의 값과 오차가 발생한다. 따라서 수식에 의해 구한 값은 초기치로 활용할 수 있다.

단계 2 : 최적의  $c$ 값 결정

$\angle G(0)$ 일 때의 크기와  $\angle \hat{G}(0)$ 일 때의 크기가 같게 되는 것은 오직  $c$ 값에 의해 결정된다. 즉, 단계1)에서 구한  $a, b, L$  값은 고정하고,  $c$ 값만을 변화해 가면 최적의  $c$ 값을 알고리즘을 통해 찾는다.

단계 3 : 최적의  $a, b, L$ 값 결정

$L$ 값은 지연시간에 포함된 값이다. 그러므로  $L$ 값에 따라 Nyquist 선도의  $\angle G(-\frac{3\pi}{2})$ 와  $\angle \hat{G}(-\frac{3\pi}{2})$ 일 때의 크기가 같게 되는  $L$ 값에 의해 결정될 수 있다. 나머지 두 개의 값  $a, b$ 는 각각 Nyquist 선도의  $-\pi, -\frac{\pi}{2}$  지점의 크기를 각각 결정할 수 있다. 따라서  $-\frac{\pi}{2}, -\pi, -\frac{3\pi}{2}$  3점에서 각각  $\angle G(jw)$ 일 때의 크기와  $\angle \hat{G}(jw)$ 일 때의 크기를 비교해서 가장 큰 차이가 나는 것의 값을 변경하면서 이 세 개의 오차의 합이 정해진 오차범위 안으로 들어오게 하는 알고리즘을 통해 최적의  $a, b, L$  값을 찾는다.

지금까지 설명한 제안된 축소방법을 알고리즘으로 표현하면 그림 1과 같다.

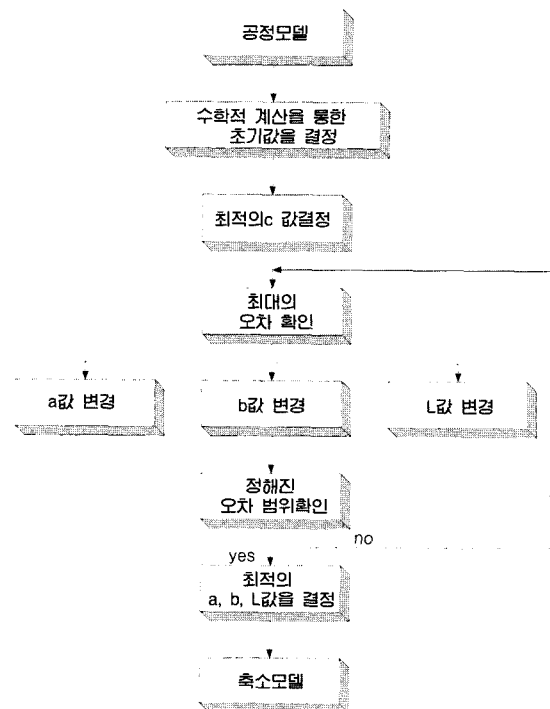


그림 1. 제안된 알고리즘.

Fig. 1. Proposed algorithm.

III. 수치 예 및 고찰

시뮬레이션을 통해 모델 축소 방법에 있어 기존의 Wang의 축소 방법과 제안된 알고리즘을 통한 축소 방법을 그래프를 통해 비교, 분석하였다.

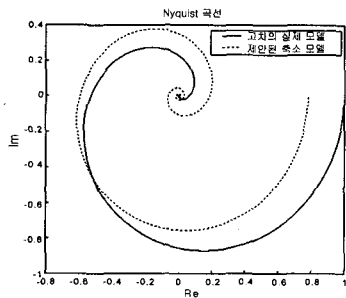
1. 제안된 방법의 단계별 Nyquist 선도

- 실제의 고차 모델

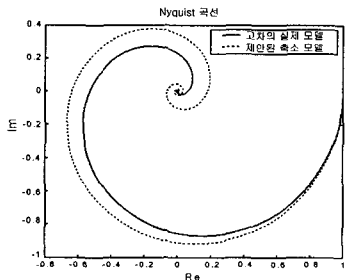
$$G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{(s+1)(s+5)^2}$$

- 2차의 축소모델

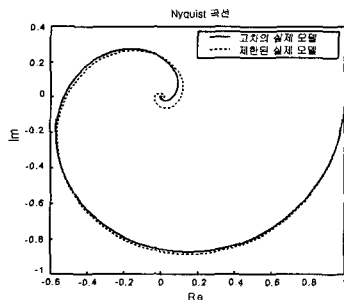
$$\hat{G}(s) = \frac{e^{-0.6072s}}{6.8622s^2 + 32.1506s + 25.0632}$$



(a)



(b)



(c)

그림 2.  $G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{(s+1)(s+5)^2}$  에 대한 축소모형을 찾는 과정. (a) 1단계(초기값에 의한 Nyquist 선도), (b) 2단계(최적의 c 값에 의한 Nyquist 선도), (c) 3단계(최적의 a, b, c, L 값에 의한 Nyquist 선도)

Fig. 2. Procedure of the model reduction to the process

$G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{(s+1)(s+5)^2}$ , (a) step 1(Nyquist curve by initial values), (b) step 2(Nyquist curve by the optimal parameter), (c) step 3 (Nyquist curve by the optimal parameters).

2. 제안된 방법과 Wang의 방법과의 비교 I

- 실제의 고차 모델

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^8}$$

- 제안된 2차의 축소모델

$$\hat{G}(s) = \frac{e^{-3.6006s}}{8.4030s^2 + 4.8632s + 1.0003}$$

- Wang의 축소 모델

$$\hat{G}_w(s) = \frac{e^{-3.4904s}}{7.4413s^2 + 4.5129s + 1.0447}$$

3. 제안된 방법과 Wang의 방법과의 비교 II

- 실제의 고차 모델

$$G(s) = \frac{e^{-0.1s}}{(s^2 + s + 1)(s + 2)^2}$$

- 제안된 2차의 축소모델

$$\hat{G}(s) = \frac{e^{-0.9836s}}{6.7159s^2 + 5.9684s + 4.01}$$

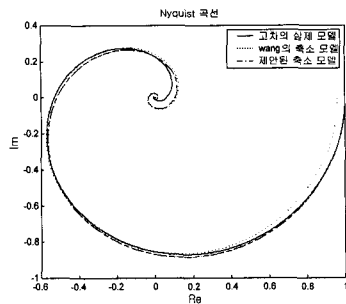
- Wang의 축소 모델

$$\hat{G}_w(s) = \frac{e^{-0.837s}}{5.648s^2 + 4.950s + 4.497}$$

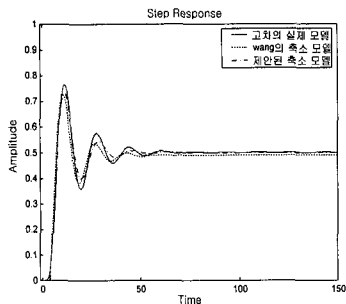
그림 2는 축소모형을 찾는데 있어서의 단계도를 나타낸 것이며, 그림에서 보인 것처럼 단계 1에서 구한 초기 파라미터를 이용하여 Nyquist 선도를 보면 실제의 고차 모델과 축소된 모델과의 차이가 많음을 알 수 있고, 단계 2를 보면 최적의 c 값에 의해  $\angle G(0)$  일 때의 크기와  $\angle \hat{G}(0)$  일 때의 크기가 같아짐을 보이며, 단계3에서는  $-\pi/2, -\pi, -3\pi/2$  3점에서 각각  $\angle G(j\omega)$  일 때의 크기와  $\angle \hat{G}(j\omega)$  일 때의 크기가 같아짐을 알 수 있다. 그림 3,4 에서는 Wang의 방법과 비교한 것으로, Wang의 축소 모델은 원 모델의 형태에 따라 실제의 모델과 Nyquist 응답에서 오차가 많이 발생함을 알 수 있고, 또한 시간영역에서의 단위계단응답에서는 과도상태 뿐만 아니라 정상상태에서도 오차가 있음을 알 수 있다. 하지만 제안된 방법은 고차 모델에 대해서 Nyquist 응답 및 시간영역에서 단위계단응답에서도 축소 모델과 실제모델이 과도상태 및 정상상태에서 비슷한 응답을 나타남을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문은 고차모델과 축소모델의 오차를 최소화 하기 위해 고차모델의 Nyquist 선도의 4점(0,  $-\pi/2, -\pi, -3\pi/2$ )의 값이 축소 모델의 값과 일치하도록 하더 모델을 축소하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 먼저 수학적 계산을 통하여 축소모델의 파라미터 값들을 구해, 이 값들을 초기 값으로 하고, 축소모델의 분모식의 상수항 파라미터(c)를 제시된 알고리즘을 통하여 구한 후, 반복 계산을 통하여 나머지 파라미터들의 최적 값을 구하는 3단계의 계산 과정을 갖는 모델축소 방법이다. 지금까지 연구된 방법들 중에서 가장 우수한 방법으로 평가되는 Wang의 방법과 본 논문에서 제시한 방법을 비교한 결과 Wang의 방법은 모델의 형태에 따라 많은 오차가 발생할 수 있으나, 본 논문에서 제시한 방법은 낭비시간요소를 포함하는 모든 제어계에 적용할 수 있으며, Nyquist 선도 및 단위 계단 응답에서 원 모델과 축소모델의 응답이 거의 일치하는 우수한 특성을 보였다.



(a)



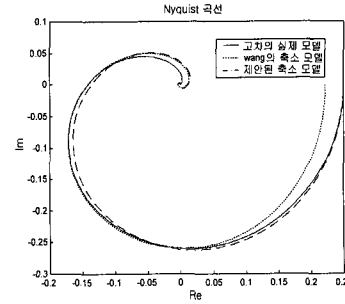
(b)

그림 3.  $G(s) = \frac{1}{(s+1)^8}$  에 대한 축소 모델의 Nyquist 응답 및 step 응답과의 비교, (a) Nyquist 선도의 비교, (b) step 응답 비교.

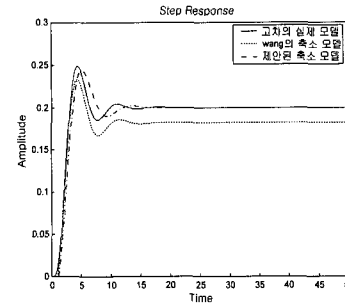
Fig. 3. Comparison by Nyquist and Step responses of the reduction model to the process  $G(s) = \frac{1}{(s+1)^8}$ , (a) Comparison of Nyquist curves, (b) Comparison of step responses.

참고문헌

[1] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins," *Automatica*, vol. 20, no. 5, pp. 645-651, 1984.  
 [2] W. K. Ho, C. C. Hang, W. Wojsznis, and Q. H. Tao, "Frequency domain approach to self-tuning PID control," *Contr. Eng. Practice*, vol. 4, no. 6, pp. 807-813, 1996.  
 [3] W. K. Ho, O. P. Gan, E. B. Tay, and E. L. Ang, "Performance and gain and phase margins of well-known PID tuning formulas," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 4, pp. 473-477, 1996.  
 [4] M. Zhuang and D. P. Atherton, "Automatic tuning of optimum PID controllers," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 140, pt. D, no. 3, pp. 216-224, May 1993.



(a)



(b)

그림 4.  $G(s) = \frac{e^{-0.1s}}{(s^2 + s + 1)(s + 2)^2}$  에 대한 축소 모델의 Nyquist 응답 및 step 응답과의 비교, (a) Nyquist 선도의 비교, (b) step 응답 비교.

Fig. 4. Comparison by Nyquist and Step responses of the reduction model to the process  $G(s) = \frac{e^{-0.1s}}{(s^2 + s + 1)(s + 2)^2}$ , a) Comparison of Nyquist curves, b) Comparison of step responses.

[5] K. J. Astrom, "Automatic tuning of PID regulators," *Instrument Soc. Amer.*, 1998.  
 [6] W. K. Ho, C. C. Hang, and L. S. Cao, "Tuning of PID controllers based on gain and phase margin specifications," *Automatica*, vol. 31, no. 3, pp. 497-502, 1995.  
 [7] K. Y. Kong, S. C. Goh, C. Y. Ng, H. K. Loo, K. L. Ng, W. L. Cheong, and S. E. Ng, "Feasibility report on frequency domain adaptive controller," *Dept. Elect. Eng., Nat. Univ. Singapore, Internal Rep.*, 1995.  
 [8] Q. G. Wang, T. H. Lee, H. W. Fung, Q. Bi and Y. Zhang, "PID tuning for improved performance," *IEEE Trans. Contro. Syst. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 457-465, July 1999.  
 [9] Y. Shamash, "Model reduction using the Routh stability criterion and the Pade approximation technique," *Int. J. Control*, vol. 21, no. 3, pp. 475-484, 1975.



**황형수**

1955년 8월 2일생. 1981년 전북대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1992년 University of Ottawa, Canada (Post-Doc).

1988~현 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 교수. 관심분야는 퍼지 및 지능제어, 이산사건시스템 및 제어 등.



**김진권**

1972년 5월 7일생. 1998년 원광대 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 제어계측공학과 졸업(석사). 2000년~동 대학원 전기공학과 박사과정. 관심분야는 지능제어, 이산사건시스템 및 제어 등.



**최정내**

1974년 1월 15일생. 1997년 원광대 제어계측공학과 졸업. 1999년 동 제어계측공학과 졸업(석사). 2000년~동 대학원 전기공학과 박사과정. 관심분야는 지능제어 및 하드웨어 설계 등.



**조준호**

1974년 10월 24일생. 2000년 원광대 제어계측공학과 졸업. 2002년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 제어계측공학과 박사과정. 관심분야는 퍼지 및 지능제어 및 모델링 분야 등.



**김정철**

1974년 3월 30일생. 2000년 원광대 제어계측공학과 졸업. 2000년~동 대학원 제어계측공학과 석사과정. 관심분야는 지능제어 및 이산사건시스템, 모델링 및 제어 등.