

강인한 특성을 갖는 MIESF 제어기의 설계

朴 貴 泰* 李 起 常** 金 星 鎭*

* 高麗大 工大 電氣工學科 ** 檀國大 工大 電氣工學科

Design of Robust MIESF Controller

Gwi-Tae Park* Kee-Sang Lee** Sung-Ho Kim*

* Department of Electrical Eng., Korea University
 ** Department of Electrical Eng., Dan-Kook University

Abstract

The objective is to explore design concept for MIESF(Modified Integral error and State Feedback) controller. A method is outlined for designing MIESF controller that provides robust performance despite real parameter uncertainties in the process model. Insight into the design process is gained by viewing the MIESF from the perspective of IMC(Internal Model Control).

1. 서론

근래 제어분야에서의 가장 큰 연구주제중 하나는 모델차수 및 파라미터의 불확실성(Uncertainty)이 존재하는 경우에도 강인한 특성을 갖는 제어기 설계에 관한 것이다. 거의 모든 산업용 프로세스는 매개변수의 생략 및 프로세스의 운전 조건에 따른 계통 파라미터의 변화 등으로 인해 완벽한 모델링이 불가능하게 되므로 제어계의 강인성은 모든 제어기법에서 공통적으로 확보되어야 할 사항이다.

특히 대부분의 산업용 프로세스는 상당한 크기의 시간지연을 갖게 되며 이러한 계통의 강인한 제어를 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 지연시간을 갖는 프로세스의 강인한 제어기 설계와 관련된 최근의 연구는 Smith예측자를 이용한 PI(PID) 제어기법에 근거를 둔 것이다. 이 중 많은 연구는 제어기의 구조를 변경시키지 않은 상태에서 제어계의 강인성이 확보되도록 제어기 파라미터를 적절히 선정하는 방법을 이용하였다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 이들의 연구결과와 Laughlin 등의 언급처럼 제어 성능저하의 문제점을 갖고 있다.

최근 저자 등은 시간지연을 갖는 프로세스의 강인한 제어를 위해 Smith 예측자 기법과 IESF(Integral Error and State Feedback)기법을 결합하여 기존의 Smith 예측자를 갖는 PID 제어기보다 좋은 성능을 갖는 MIESF(Modified Integral Error and State Feedback) 제어기를 제안하고 그 유용성을 입증한 바 있다.⁽⁴⁾

MIESF 제어기는 일반적인 극점배치 알고리즘에 의해 간단히 설계될 수 있으며 프로세스와 모델 파라미터의 불

일치에도 좋은 제어성능을 갖는다. 그러나 극점배치기법을 이용하는 경우, 강인성이 보장되는 파라미터 불일치의 크기는 할당된 극점위치에 의존하게 되므로 모든 계통 파라미터의 불확실성에 대해 강인성을 보장하는 극점의 선정이 쉽지 않다는 설계상의 문제점이 있다.

본 연구에서는 지연시간을 갖는 페루우프 안정한 계통에 대한 MIESF 제어계의 강인성을 향상시키는 새로운 설계기법을 제안함에 그 목적이 있다.

2. MIESF 제어계의 구조

본 절에서는 지연시간을 갖는 개루우프(Open Loop) 안정한 계통의 제어를 위해 저자 등이 제안한 바 있는 MIESF 제어계의 극점배치 기법에 의한 설계 과정을 간단히 설명한다.

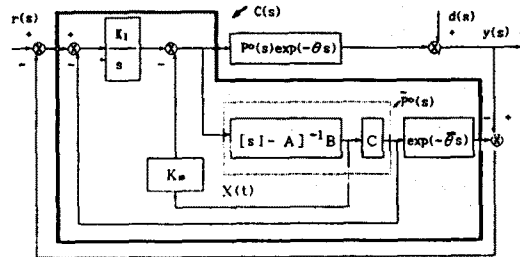


그림 1 MIESF 제어계의 구조

제안된 MIESF 제어계의 구조를 블록선도로 나타내면 그림 1과 같다. 그림에서 $P(s)\exp(-\theta s)$ 는 실제 프로세스의 전달함수이며 $\tilde{P}(s)\exp(-\bar{\theta}s)$ 는 이의 공칭모델이다. 행렬 A, B, C는 공칭모델의 $\tilde{P}(s)$ 를 상태공간 기법으로 표현할 때 나타나는 행렬이다.

극점배치 기법에 의한 MIESF 제어기의 설계는 제어 대상이 정확히 모델링되었다는 가정하에서 즉, $P(s) = \tilde{P}(s), \theta = \bar{\theta}$ 라는 가정하에서 수행된다. 결정해야 할 제어기 파라미터는 편차 적분기의 적분상수 K_i 와 지연시간을 고려하지 않은 $\tilde{P}(s)$ 로부터 정의되는 상태벡터 $X(t)$ 에 대한 변환이득행렬 K_* 이다. 공칭 모델과 프로세스간의 파라미터 불일치가 없을 경우, MIESF 제어기의 페루

우프 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s) \tilde{P}_o(s) \exp(-\bar{\theta}s)}{1 + K_m [sI - A]^{-1} B + G_c(s) \tilde{P}_o(s)} \quad (1)$$

여기서 $G_c(s)$ 는 전향경로에 있는 적분기의 전달함수이다. 식(1)에서 보듯이 특성 방정식에는 지연시간항이 포함되지 않으며 따라서 궤환이득 K_I, K_m 는 일반적인 극점 배치 기법에 의해서 간단히 결정할 수 있다. 제안된 MIESF 제어기 구조에서 프로세스와 모델간에 불일치가 없는 경우, 전 제어계의 안정도는 특성 방정식의 근을 조사함으로써 간단히 파악된다. 그러나 모델과 프로세스간에 파라미터 및 지연시간의 불일치가 발생한 경우, 제어 계통은 불안정하게 될 수도 있으며 안정도가 보장되는 계통 파라미터 불확실성의 정도는 할당된 극점 위치에 의존하게 된다. 따라서 극점배치 기법에 의한 MIESF 제어기 설계시, 모든 계통 파라미터의 불확실성에 대해 강인성을 보장하는 극점의 선정이 쉽지 않다는 설계상의 문제점이 있다.

다음 절에서는 전달함수의 계수가 기지의 한정된 범위 내에서 섭동(Perturbation)하는 경우에도 강인한 특성을 갖는 MIESF제어기 설계에 대하여 고찰한다.

3. 강인한 MIESF제어기의 설계

3.1 지연시간을 갖는 계통의 모델링

제어 계통을 설계하기 위해서는 물리적 계통을 모델링하여야 하며 효과적인 제어를 위해서는 제어 대상인 계통의 특성을 보다 정확히 표현하여야 한다. 따라서 계통의 모델에 모델링시의 불확실성을 포함시켜야 하며 이를 위해 계통 모델을 하나의 공칭 모델(Nominal Model)로 표현하지 않고 패밀리(Family) $\Pi = \{ P(s) \}$ 로 표현한다. 본 논문은 전달함수의 계수가 한정된 범위내에서 섭동하는 지연시간을 갖는 선형 시불변 계통에 대한 강인한 MIESF 제어기 설계에 관한 것이며 이러한 계통은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$P(s) = P_o(s) \exp(-\theta s) = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0} \exp(-\theta s) \quad (2)$$

$$a_i \in [a_{i\max}, a_{i\min}], b_i \in [b_{i\max}, b_{i\min}], \theta \in [\theta_{\max}, \theta_{\min}]$$

계통 모델의 불확실성을 정량적으로 취급하기 위해 $P(s)$ 를 다음과 같이 표현한다.

$$P(s) = \tilde{P}(s) [1 + l_m(s)] ; |l_m(i\omega)| < l(\omega) \quad (3)$$

여기서 $\tilde{P}(s)$ 는 계통에 대한 공칭 모델이며 $|l_m(i\omega)|$ 는 주파수에 따른 불확실의 정도를 나타내는 곱하기형의 노름(Multiplicative norm)이다. 식(3)은 임의의 주파수

에 대해 패밀리 Π 에 속하는 모든 모델이 복소 평면상에서 공칭모델을 중심으로 최대 반경 $|\tilde{P}(i\omega)|l(\omega)$ 인 원내에 존재함을 나타낸다.

3.2 MIESF 제어계의 안정도

계통 파라미터의 불확실성에 대해 MIESF 제어계가 안정되기 위해서는 Π 에 속한 모든 모델에 대해서 제어계가 안정되도록 설계되어야 한다. 그림 1의 제어계를 전형적인 궤환 제어계로 생각하면, $C(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$C(s) = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s) \tilde{P}_o(s) + K_m [sI - A]^{-1} B - G_c(s) \tilde{P}_o(s) \exp(-\bar{\theta}s)} \quad (4)$$

MIESF 제어계의 안정도는 Nyquist 판별법에 의해 Π 에 속한 모든 $P(s)$ 에 대해 $P(i\omega)C(i\omega)$ 의 궤적이 복소 평면상의 $(-1, 0)$ 점을 포함하지 않아야 하며 이를 복소 평면상에 도시하면 그림 2와 같다.

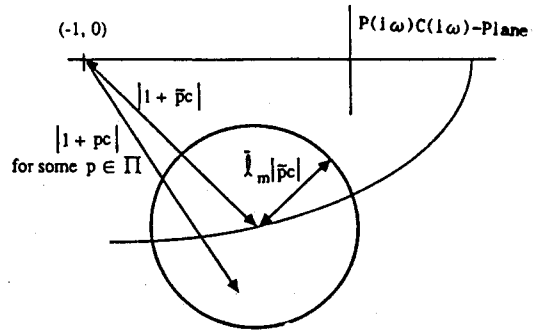


그림 2 MIESF제어계의 안정조건을 유도하기 위한 복소 평면상의 궤적

그림으로부터 공칭모델에 대한 $\tilde{P}(i\omega)C(i\omega)$ 의 궤적이 $(-1, 0)$ 점을 포함하지 않는다면 $l(\omega)$ 로 표현되는 계통 파라미터의 불확실성에 대해 MIESF 제어계가 안정되기 위해서는 항상 다음의 조건을 만족하여야 함을 알 수 있다.

$$|\tilde{\eta}(i\omega)|l(\omega) < 1, \quad \forall \omega \quad (5)$$

여기서 $\tilde{\eta}(s)$ 는 공칭 Complementary Sensitivity Function 이며 다음과 같다.

$$\tilde{\eta}(i\omega) = \frac{\tilde{P}C(i\omega)}{1 + \tilde{P}C(i\omega)} \quad (6)$$

3.3 MIESF 제어계의 성능

MIESF 제어계가 계통 파라미터의 불확실성에 대해 강인하기 위해서는 식(5)의 안정조건을 만족해야 할 뿐만 아니라 Π 에 속한 모든 모델이 규정된 제어 성능을 갖도록 설계되어야 한다. 일반적으로 제어계의 성능은 민감도 함수(Sensitivity Function) $\epsilon(s)$ ($y(s)/d(s)$)의 크기에 의해 평가된다. 따라서 MIESF 제어계의 성능은 Π 에

속한 모든 모델에 대해 $e(s)$ 의 크기에 제한을 줌으로써 다음과 같이 규정될 수 있다.

$$|e(i\omega)| = \left| \frac{1}{1 + PC(i\omega)} \right| < \left| \frac{1}{W(i\omega)} \right|, \forall \omega, \forall P \in \Pi \quad (7)$$

여기서 $W(i\omega)$ 는 성능하중(Performance Weight)이다. 식(7)로 표현되는 성능 규정은 Π 에 속한 모든 모델에 대한 민감도 함수의 크기를 모든 주파수에 대해서 $|1/W(i\omega)|$ 보다 작게 되도록 제어기 $C(s)$ 를 설계해야 함을 의미한다. 그러나 제어기 설계의 편의상 Π 에 속한 모든 모델에 대해서 고찰하기 보다는 가장 큰 민감도 함수를 갖는 모델에 대해서만 고려하면 (Hoo Optimal) 식(7)의 성능 규정은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\max_{P \in \Pi} \left| \frac{W(i\omega)}{1 + PC(i\omega)} \right| < 1, \forall \omega \quad (8)$$

또한 그림 2로부터 다음의 관계를 얻을 수 있으며

$$\left| \frac{1}{1 + PC(i\omega)} \right| \leq \frac{\tilde{\epsilon}(i\omega)}{1 - |\tilde{\eta}(i\omega)| |l(\omega)|}, \forall P \in \Pi \quad (9)$$

여기서 $\tilde{\epsilon}(s)$ 는 공칭 민감도 함수(Nominal Sensitivity Function)이며 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{\epsilon}(s) = \frac{1}{1 + \tilde{P}C(s)} \quad (10)$$

따라서 식(8)의 Hoo Optimal 성능 규정은 다음과 같이 표현된다.

$$|\tilde{\eta}(i\omega)| |l(\omega)| + |\tilde{\epsilon}(i\omega)W(i\omega)| < 1, \forall \omega \quad (11)$$

MIESF제어기가 모든 계통 파라미터의 불확실성에 대해 강인하기 위해서는 식(4)의 $C(s)$ 가 위의 조건(5), (11)을 만족하도록 제어기 파라미터 K_I 와 K_M 를 설계하여야 한다. 그러나 식(6), (10)으로부터 조건을 만족하도록 하는 제어기 파라미터 K_I 와 K_M 를 설계하는 것이 용이하지 않음을 알 수 있다. 본 연구에서는 MIESF 제어기가 IMC 제어기 구조로 변경될 수 있다는 사실에 착안하여 강인한 IMC 제어기 설계기법을 이용한 MIESF 제어기 설계방법을 제안함에 기본적인 목적을 두었으며 이의 설계방법을 다음 절에서 기술한다.

4. IMC 제어기의 설계⁽⁵⁾

IMC 제어기는 제어기 파라미터의 선정에 의해 제어계의 안정도와 요구되는 제어성능을 쉽게 달성할 수 있다는 장점을 갖는다. 식(2)로 표현되는 지연시간을 갖는 계통에 대한 IMC 제어기의 구조를 나타내면 그림 3과 같다.

그림에서 $P_o(s)\exp(-\theta s)$ 는 실제계통에 대한 전달함수이며 $\tilde{P}_o(s)\exp(-\tilde{\theta}s)$ 는 이의 공칭모델이다. 또한 공칭 모델을 포함한 IMC제어기의 전달함수 $C(s)$ 는 다음과 같다.

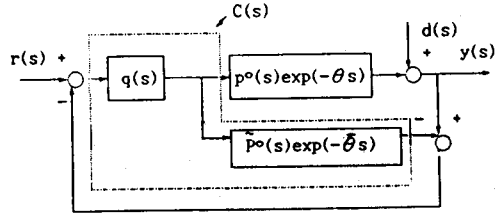


그림 3 IMC 제어계의 구조

$$C(s) = \frac{q(s)}{1 - \tilde{P}_o(s)\exp(-\tilde{\theta}s)q(s)} \quad (12)$$

IMC제어기가 Π 에 속한 모든 모델에 대해 안정도 및 요구되는 제어성능을 갖기 위해서는 전절에서 구한 조건(5), (11)을 만족하여야 하며 이들 조건은 아래와 같이 표현된다.

$$|\tilde{P}_o(i\omega)\exp(-\tilde{\theta}i\omega)q(i\omega)| |l(\omega)| < 1, \forall \omega \quad (13)$$

$$|\tilde{P}_o(i\omega)\exp(-\tilde{\theta}i\omega)q(i\omega)| |l(\omega)| + |1 - \tilde{P}_o(i\omega)\exp(-\tilde{\theta}i\omega)q(i\omega)| |W(i\omega)| < 1, \forall \omega \quad (14)$$

일단 계통 파라미터 불확실성의 크기를 나타내는 $l(\omega)$ 와 성능 하중 $W(i\omega)$ 가 선정된다면 위의 조건을 만족하도록 하는 IMC제어기 $q(s)$ 를 설계하는 것이 매우 간단하게 된다.

그 설계 과정은 모델 파라미터의 불확실성이 없다는 가정하에서 ISE(Integral Square Error)를 최소화 하는 $\tilde{q}(s)$ 를 구하는 단계와 $\tilde{q}(s)$ 와 곱해서 얻어지는 $q(s)$ ($q(s) = \tilde{q}(s)f(s)$)가 위의 조건들을 만족하도록 저역통과 필터 $f(s)$ 를 설계하는 단계로 구분된다.

위의 과정을 통해 얻은 IMC제어기의 형태는 다음과 같다.

$$q(s) = \tilde{q}(s) f(s) \quad (15)$$

(a) $\tilde{q}(s)$ 의 설계

우선 식(2)로 표현되는 지연시간을 갖는 계통에 대한 $q(s)$ 의 설계는 M.Morari⁽⁶⁾가 제시한 설계방법을 따른다. 일반적으로 프로세스 제어시 직면하게 되는 외란은 계단형태의 것으로 간주할 수 있으며 계단형태의 외란에 대해 ISE를 최소화 하는 $\tilde{q}(s)$ 는 다음과 같다.

$$\tilde{q}(s) = \tilde{P}_M(s)^{-1} \quad (16)$$

여기서 $\tilde{P}_M(s)$ 는 식(2)로 표현되는 계통의 공칭모델 $\tilde{P}(s)$ 의 시간지연항을 제외한 부분이다.

(b) 저역통과 필터의 설계

계통 파라미터 불확실성의 크기를 나타내는 $l(\omega)$ 는 일반적으로 고주파 영역에서 1보다 크게 되므로 위에서 구한 $\tilde{q}(s)$ 만으로는 안정조건(13)을 만족시킬 수 없다. 따라서 안정도 및 성능면에서 강인한 제어기를 구성하기

위해서는 우선 조건(13)을 만족하도록 저역통과 필터 $f(s)$ 를 $\tilde{q}(s)$ 에 추가하여야 한다. 또한 필터 $f(s)$ 는 계단 형태의 외란에 대해 제어계가 점근적 추적특성을 갖도록 설계되어야 하며 항상 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$f(0) = 1 \quad (17)$$

위의 조건을 만족하는 필터의 형태는 다양하나 본 연구에서는 IMC 제어계가 필터 차수의 선정에 따라 MIESF 제어기와 같도록 하기 위해 다음과 같이 선정한다.

$$f(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (18)$$

여기서 필터차수 n 은 $q(s)$ 의 분모차수가 분자차수보다 크거나 같도록 선정해야 하는 필터의 설계 인자이다. 또한 저역통과 필터 $f(s)$ 의 시정수 λ 는 $q(s)$ 가 조건(13), (14)를 만족하도록 선정되어야 한다.

5. IMC 설계기법을 이용한 MIESF 제어기 설계

본 절에서는 IMC 제어기 설계시 요구되는 필터의 차수 선정에 따라 IMC제어기가 MIESF 제어기와 같게 됨을 보이 고자 한다. IMC 제어기 설계 방법에 의한 MIESF제어기 설계는 시간지연을 갖는 개루우프 안정한 모든 계통에 대해 적용이 가능하지만 본 연구에서는 프로세스 모델링 시 자주 나타나게 되는 다음의 SOPDT(Second Order Plus Dead Time)계통에 대해서 고찰한다.

$$P(s) = P_0(s)\exp(-\theta s) = \frac{K \exp(-\theta s)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (19)$$

$$K \in [K_{max}, K_{min}], \tau_1 \in [\tau_{1max}, \tau_{1min}], \tau_2 \in [\tau_{2max}, \tau_{2min}], \theta \in [\theta_{max}, \theta_{min}]$$

$\bar{K}, \bar{\theta}, \bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2$ 은 각 섭동 파라미터의 평균값이며 $\delta K, \delta \theta, \delta \tau_1, \delta \tau_2$ 를 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} |\delta K| &\leq \Delta K = |K_{max} - \bar{K}| < |\bar{K}| \\ |\delta \theta| &\leq \Delta \theta = |\theta_{max} - \bar{\theta}| < |\bar{\theta}| \\ |\delta \tau_1| &\leq \Delta \tau_1 = |\tau_{1max} - \bar{\tau}_1| < |\bar{\tau}_1| \\ |\delta \tau_2| &\leq \Delta \tau_2 = |\tau_{2max} - \bar{\tau}_2| < |\bar{\tau}_2| \end{aligned} \quad (20)$$

계통 파라미터의 불확실성을 갖는 식(19)의 계통은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(s) = P_0(s)\exp(-\theta s) = \frac{(\bar{K} + \delta K) \exp(-(\bar{\theta} + \delta \theta) s)}{\{(\bar{\tau}_1 + \delta \tau_1) s + 1\} \{(\bar{\tau}_2 + \delta \tau_2) s + 1\}} \quad (21)$$

이에 대한 공칭 모델을 다음과 같이 선정할 경우,

$$\tilde{P}(s) = \tilde{P}_0(s)\exp(-\bar{\theta} s) = \frac{\bar{K} \exp(-\bar{\theta} s)}{(\bar{\tau}_1 s + 1)(\bar{\tau}_2 s + 1)} \quad (22)$$

IMC제어기 설계는 전 절에서의 설계과정을 따른다. 우선, 모델 파라미터의 불확실성이 없는 경우, 계단형태의 외란에 대해 ISE를 최소화하는 $q(s)$ 는 식(16)에 의해

$$\tilde{q}(s) = (\bar{\tau}_1 s + 1)(\bar{\tau}_2 s + 1)/\bar{K} \quad (23)$$

으로 된다. 또한 $\tilde{q}(s)$ 는 모델이 불확실성을 갖는 경우에도 제어계가 안정도와 요구되는 제어성능을 갖게 하기 위해 저역통과 필터를 필요로 한다. 만일 식(21)의 SOPDT 계통의 경우, 필터차수 n 은 $q(s)$ 의 분모차수를 분자차수보다 크도록 3으로 선정하면, IMC제어기 $q(s)$ 는 다음과 같다.

$$q(s) = \tilde{q}(s)f(s) = \frac{(\bar{\tau}_1 s + 1)(\bar{\tau}_2 s + 1)}{\bar{K}(\lambda s + 1)^3} \quad (24)$$

위에서 설계한 IMC제어기가 필터차수의 선정에 따라 MIESF 제어계와 같게 됨을 보이기 위해 식(21)의 SOPDT 계통에 대한 MIESF 제어계의 구조를 살펴 본다. 이에 대한 MIESF제어계의 구조는 그림 4와 같다.

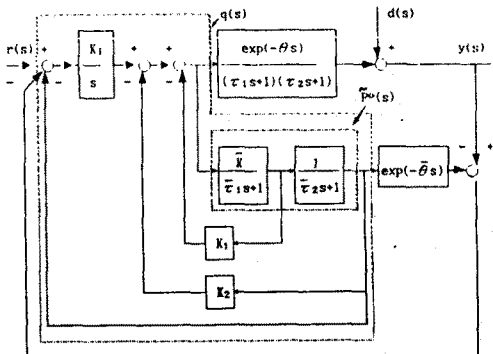


그림 4 2차 계통에 대한 MIESF 제어계

그림 3,4로부터 알 수 있듯이 MIESF 제어기는 IMC 제어기 $q(s)$ 와 다음의 관계를 갖는다.

$$q(s) = \frac{(\bar{\tau}_1 s + 1)(\bar{\tau}_2 s + 1)K_1}{\bar{\tau}_1 \bar{\tau}_2 s^3 + (\bar{\tau}_1 + \bar{\tau}_2 + K_1 \bar{\tau}_2 \bar{K})s^2 + (1 + K_1 \bar{K} + K_2 \bar{K})s + K_1 \bar{K}} \quad (25)$$

만일 식(25)의 분모다항식의 계수가 다음의 관계를 만족한다면 MIESF제어기는 IMC제어기와 같게 된다.

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_1 \bar{\tau}_2 &= \lambda^3 \bar{K}_1 \bar{K} \\ \bar{\tau}_1 + \bar{\tau}_2 + K_1 \bar{K} \bar{\tau}_2 &= 3\lambda^2 \bar{K}_1 \bar{K} \\ 1 + K_1 \bar{K} + K_2 \bar{K} &= 3\lambda \bar{K}_1 \bar{K} \end{aligned} \quad (26)$$

따라서 모델 파라미터의 불확실성이 존재할 경우, 강인한 MIESF제어기의 설계는 공칭 모델의 minimum phase부분 $\tilde{P}_M(s)$ 의 형태에 따라 IMC제어기 설계시 요구되는 필터의 차수를 적절히 선정함으로써 IMC제어기 설계방법에 의해 수행될 수 있다. 따라서 조건(13), (14)를 만족하도록 IMC제어기의 필터 시정수 λ 가 결정되면 모델 파라미터의 불확실성에 대해 강인한 특성을 갖도록 하는 MIESF제어기 이득 K_1, K_2 는 식(26)으로부터 구할 수 있다.

5. 수치예 및 시뮬레이션 결과

IMC 제어기의 설계 방법에 의한 MIESF 제어기의 설계과정을 다음의 수치예를 통해 고찰하고자 한다.

$$P_0(s)\exp(-\theta s) = \frac{K \exp(-\theta s)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (27)$$

$$K \in [11, 14], \theta \in [9, 11], \tau_1 \in [2, 8], \tau_2 \in [7, 13]$$

위의 계통에 대한 공칭모델은 다음과 같이 선정할 수 있으며

$$\tilde{P}_0(s)\exp(-\tilde{\theta}s) = \frac{12.5 \exp(-10s)}{(5s+1)(10s+1)} \quad (28)$$

이 경우 $|\Delta K|$, $|\Delta \theta|$, $|\Delta \tau_1|$, $|\Delta \tau_2|$ 는 식(20)에 의해 각각 1.5, 1, 3, 3으로 된다. 따라서 계통 파라미터 불확실의 정도를 나타내는 $l(\omega)$ 는 다음과 같이 선정할 수 있다.

$$l(\omega) = \left| 1.12 \frac{(51\omega+1)(101\omega+1) \exp(1\omega)}{(21\omega+1)(71\omega+1)} - 1 \right| \quad \forall \omega < 3.03$$

$$l(\omega) = \left| 1.12 \frac{(51\omega+1)(101\omega+1)}{(21\omega+1)(7\omega+1)} \right| + 1 \quad \forall \omega \geq 3.03 \quad (29)$$

우선 계단형태의 외란에 대해 ISE를 최소화 하는 IMC 제어기 $\tilde{q}(s)$ 는 식(23)으로부터

$$\tilde{q}(s) = (5s+1)(10s+1)/12.5 \quad (30)$$

이며 IMC제어기를 MIESF제어기와 함께 하기 위해 필터는

$$f(s) = \frac{1}{(\lambda s+1)^2} \quad (31)$$

로 선정한다.

계통 파라미터의 불확실성이 존재할 경우, $l(\omega)$ 에 속하는 모든 모델에 대해 IMC 제어기가 안정하며 요구되는 제어 성능을 갖기 위해서는 조건(14)를 만족하도록 필터 파라미터 λ 를 선정하여야 하며 수치예의 경우, 이 조건은 다음과 같다.

$$\frac{l(\omega)}{|\lambda 1\omega+1|^2} + |W(1\omega)| \frac{|(\lambda 1\omega+1)^3 \exp(-101\omega)|}{|(\lambda 1\omega+1)^3|} < 1 \quad \forall \omega \quad (32)$$

본 연구에서는 성능 하중인자 $|W(1\omega)|$ 를 상수 0.2로 선정하였다. 이 경우, 식(32)의 좌변의 λ 값에 따른

Bode선도는 그림 5와 같다.

위의 조건을 만족하는 IMC제어기의 필터 파라미터 λ 가 구해지면 같은 크기의 계통 파라미터 불확실성에 대해 강인한 특성을 갖는 MIESF제어기의 파라미터 K_1, K_1, K_2 는

식(26)으로부터 구할 수 있으며 $\lambda = 4$ 일 경우, 이들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= 0.063 \\ K_1 &= 0.18 \\ K_2 &= 0.49 \end{aligned} \quad (33)$$

위의 MIESF제어기 파라미터에 대해 각 계통 파라미터의 불일치가 최대 발생한 경우의 setpoint 추적특성은 그림 6과 같다.

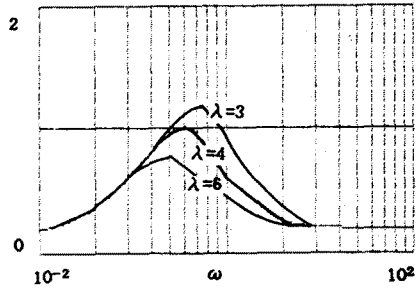


그림 5 λ 값에 따른 식(32)의 좌변에 대한 Bode선도

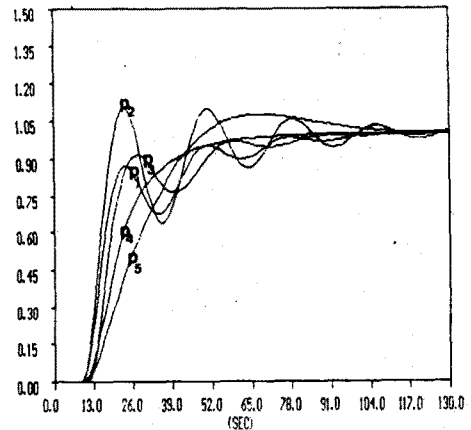


그림 6 각 계통 파라미터의 불일치가 최대 발생한 경우의 MIESF제어기의 setpoint 추적특성

그림 6에서 각 응답특성은 공칭 모델을 식(28)로 선정한 경우, 실 계통의 전달함수가 각각 다음과 같을 때의 응답이다.

$$P_1(s) = \frac{11 \exp(-9s)}{(2s+1)(7s+1)}$$

$$P_2(s) = \frac{14 \exp(-9s)}{(2s+1)(7s+1)}$$

$$P_3(s) = \frac{11 \exp(-11s)}{(2s+1)(7s+1)}$$

$$P_4(s) = \frac{11 \exp(-9s)}{(8s+1)(7s+1)}$$

$$P_5(s) = \frac{11 \exp(-9s)}{(8s+1)(13s+1)}$$

그림으로부터 알 수 있듯이 여하한 계통 파라미터의 불일치에 대해서도 MIESF 제어기는 안정한 응답특성을 갖게 된다.

6. 결 론

일반적인 극점배치 기법에 의한 MIESF제어기 설계는 모든 계통 파라미터의 불확실성에 대해 제어계를 강인하도록 하는 극점의 선정이 쉽지 않다는 설계상의 문제점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 MIESF제어기가 IMC제어기 구조로 변경될 수 있다는 사실에 근거하여 강인성을 갖는 MIESF제어기의 설계방법을 제시하였다. 제안된 설계기법에 의한 제어계의 성능은 시뮬레이션 결과로부터 알 수 있듯이 여하한 계통 파라미터의 불일치에 대해서도 강인한 특성을 갖음을 알 수 있다. 또한 제어기 설계시 요구되는 필터는 본 연구에서 사용한 형태만이 가능한 것이 아니며 따라서 다양한 필터 형태의 선정에 따른 제어계의 성능 검토가 요구된다.

7. 참 고 문 헌

- [1] Horowitz, I., "Some Properties of Delayed Controls(Smith Regulator)," *International Journal of Control*, 38, 1983, pp. 977-990.
- [2] Laughin, D.L., "Internal Model Control and Process Uncertainty: Mapping Uncertainty Regions for SISO Controller Design," *International Journal of Control*, 44, 1986, pp. 1675-1698.
- [3] Owens, D.H. and Raya, "Robust Stability of Smith Predictor Controllers for Time Delay Systems," *Proc. Inst. Elect. Engrs., Pt. D*, 1982, p. 298.
- [4] 박 귀태, 이 기상, "지연시간을 갖는 계통에 대한 강인한 제어기 설계," *전기 학회 논문지*, 39권, 9호, pp. 997-1005, 1990년.
- [5] Morari, M. with E. Zafiroiu, *Robust Process Control*, Prentice Hall International, 1989.
- [6] Palmor, Z.J., "Stability Properties of Smith Dead Time Compensator Controllers," *International Journal of Control*, 32, 1980, pp. 937-949.
- [7] Bhaya, A., and C.A. Desoer, "Controlling Plants with Delay," *International Journal of Control*, 41, 1985, pp. 813-830.
- [8] Garcia, C.E. and M. Morari, "Internal Model Control: A Unifying Review and Some New Results," *I & Ec Process Dev. Dev.*, 21, 1982, pp. 308-323.