

지연시간을 갖는 계통에 대한 강인한 제어기 설계

Design of Robust Controller for Systems with Time Delay

朴 貴 泰* · 李 起 常** · 金 星 鎬***
(Gwi-Tae Park · Kee-Sang Lee · Sung-Ho Kim)

요 약

상태공간 기법의 기본 제어형태인 상태피환과 고전 제어이론의 적분동작을 병합한 IESF(Integral Error and State Feedback) 제어기는 선형 시불변계에 대하여 기존의 PID제어방식 보다 좋은 과도 특성을 가진다.

IESF제어기의 기본 구조는 모든 상태변수의 측정을 요구하며, 극점배치가 가능한 지연시간이 없는 선형 시불변계에서만 적용이 가능하다. 그러나 실제의 산업용 프로세스는 큰 시간지연을 갖고 있으며 이러한 계통에 IESF제어기의 직접 적용은 불가능하게 된다.

본 연구에서는 지연시간을 갖는 프로세스의 효과적인 제어를 위한 새로운 제어기 구조(Modified Integral Error and State Feedback)를 제안하고 그 성능을 분석, 검토하여 그 유용성을 확인하였다.

제안된 제어기는 편차적분 상태피환(IESF)개념을 배경으로 한 출력피환 방식으로서 대상 프로세스 모델의 차수에 관계없이 상태피환에 의한 극점배치기법에 의해 간단히 설계될 수 있다.

MIESF제어기는 오버슈트가 없는 Setpoint추적특성을 가지며 지연시간 불일치와 그 외의 프로세스-모델 파라미터 불일치에 대하여 Smith Predictor를 갖는 PI(D)제어방식보다 훨씬 강인할 뿐 아니라 의도적인 지연시간 불일치에 의한 제어성능 개선도 가능하다는 특징을 갖는다.

Abstract- Integral Error and State Feedback(IESF) controller which incorporates state feedback as a modern control scheme and integral action as a classical control scheme has better performance than that of conventional PID controller in linear time invariant system. But the structure of the IESF controller requires all the state variables of the system and is applicable only to pole assignable linear time invariant systems without time delay. Many industrial processes have large time delay and it is impossible to directly apply IESF control scheme to those processes. In this paper, a new controller structure, Modified Integral Error and State Feedback(MIESF) has been suggested in order to effectively control processes having time delay and its performance has been analyzed and its effectiveness has also been confirmed. As the proposed controller uses output feedback scheme based on integral error and state feedback (IESF) method, it can be simply designed by pole assignment algorithm irrespective of the order of the process. The MIESF controller can follow setpoint changes without overshoot. It is robuster than conventional Smith-Predictor plus PI(D) controller in case of occurring time delay mismatch and extra parameter mismatches between the process and the model. It can enhance control performance by intentional time delay mismatch.

1. 서 론

산업용 제어기 설계와 관련된 최근의 연구동향은 강인한 제어기 설계, FTCS(Fault Tolerant Control System), Integrity를 가진 제어계의 제안과 기존 기법의 적용범위 확장에 집중되어 있다.

[1] 이들 중 본 연구에서 다루고자 하는 강인한 제어기 설계문제는 프로세스 모델의 차수 및 파라미터의 불확정성이 존재하는 경우에도 제어계의 안정도 및 요구되는 제어성능을 보장하기 위한 대책을 제시하는 것으로 J.C. Doyle[2], M. Vidyasagar[3], M. Morari[4] 등을 중심으로 대단히 많은 연구가 진행되었으며 최근에는 일반 선형제어계는 물론 적응제어계, 비선형제어계 등에서 강인성 확보를 위한 제어 알고리즘이 다수 제안되었다.

1986년 C.J. Maday는 이러한 연구 결과의 하나로 상태공간기법의 기본 제어형태인 상태제환과 고전 제어이론의 적분동작을 병합한 IESF(Integral Error and State Feedback)를 제안한 바 있다. [5] 이 제어기는 단순한 상태제환만으로는 달성할 수 없는 Setpoint추적성능과 외란에 대해 기존의 PID방식보다 좋은 과도 특성을 갖고 있지만 시간지연이 없는 선형 시불변계통에 대해서만 그 적용이 가능하고 모든 상태변수들이 측정가능해야 한다는 문제점을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 기본 IESF제어방식의 직접적용이 불가능한 시간지연을 갖고 있는 계통의 제어와 관련하여 지연시간의 불일치 및 프로세스-모델간의 파라미터 불일치에 대하여 강인한 특성을 가질 뿐 아니라 일반적인 극점배치 알고리즘에 의해 간단하게 설계될 수 있는 MIESF(Modified Integral Error and State Feedback)제어기를 제안하고 성능을 분석 검토하여 유용성을 입증함으로써 기본 IESF 제어기의 적용범위의 확장에 목적을 두었다.

제안된 MIESF제어기는 IESF제어기와 Smith Predictor를 병합한 구조이다. 이 구조내에서 Smith Predictor는 지연시간 보상이라는 기존의 용도외에도 전달함수로 주어진 프로세스에 대한 상태 제환 정보를 제공하며 임의의 극점배치에 의한 MIESF제어기의 설계를 가능하게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 MIESF제어계의 구조와 기본특징을 설명하고 3절에서는 제안된 제어계의 제반 특성인 Setpoint추적기능과 모델-프로세스간의 지연시간 불일치의 안정도, 기타 파라미터 불일치의 영향등을 종합적으로 검토한다. 4절에서는 수치예를 들어 MIESF 제어계를 설계하고 그 성능을 지연시간을 갖는 프로세스에 일반적으로 사용되고 있는 방법, 즉 PID 제어기에 Smith Predictor를 갖는 제어기와 비교 고찰하며 5절에는 결론을 기술한다.

2. MIESF 제어계구조 및 기본특성

2.1 IESF 제어계의 구조.

본 절에서는 고전적 제어 이론과 현대 제어 이론을 병합한 IESF 제어계의 구조 및 특징에 대하여 고찰한다. 복잡한 대다수의 산업용 프로세스는 FOPDT(First Order Plus Dead Time) 또는 SOPDT(Second Order Plus Dead Time) 모델로 표현이 가능하며 지연시간을 무시할 수 있는 경우, 계통은 지연시간 항이 없는 1차 또는 2차 계통으로 근사화할 수 있다. [6]

따라서 본 절에서는 2차 계통에 대한 IESF제어계의 설계를 고려하기로 한다. 먼저, 2차 계통에 대한 상태제환 제어계의 구조를 나타내면 그림1과 같으며 이 경우 출력은 식(1)과 같이 표현된다.

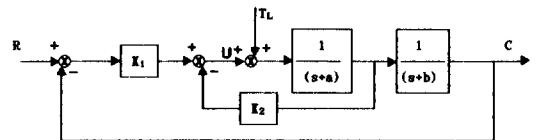


그림 1 2차 계통에 대한 상태제환 제어계
Fig. 1 State feedback controller for second order process

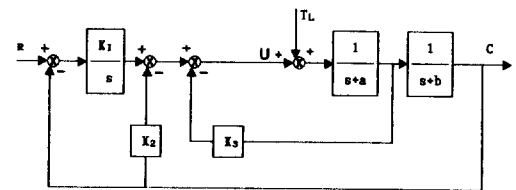


그림 2 2차계통에 대한 IESF제어계
Fig. 2 IESF controller for second-order system

*正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 檀國大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
 ***正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 博士課程
 接受日字 : 1990年 4月 30日
 1次修正 : 1990年 8月 17日

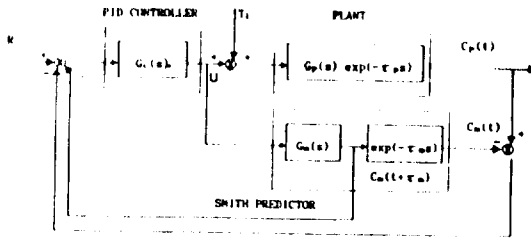


그림 3 Smith Predictor를 갖는 PID제어계의 구조

Fig. 3 Structure of PID controller with Smith Predictor

$$C(s) = \frac{K_1 R(s) + T_L(s)}{s^2 + s(K_2 + a + b) + (K_1 + K_2 b + ab)} \quad (1)$$

식(1)에서 계환이득 K_1 , K_2 는 극점배치 알고리즘에 의해 구할 수 있다. 계단입력 R 에 대해 정상상태 편차가 0이 되기 위해서는 K_2 는 $-a$ 이어야 한다. 그러나 이 경우 단위 계단형태의 입력외란 T_L 에 대해서는 항상 $1/K_1$ 의 정상상태 편차를 갖게 된다. 이러한 편차를 제거하기 위해서는 편차보상용 적분기의 도입이 필요하며, 그림1의 계통에 적분기를 도입한 IESF제어계통을 나타내면 그림 2와 같다.

IESF제어계의 출력을 구하면 식(2)와 같다.

$$C(s) = \frac{K_1 R(s) + s T_L(s)}{s^3 + s^2(K_3 + a + b) + s(K_2 + K_3 b + ab) + K_I} \quad (2)$$

상태계환 이득 K_2 , K_3 , 적분기이득 K_I 는 일반적인 극점배치 알고리즘으로부터 구할 수 있다. IESF제어기는 계단형태의 입력 R 및 외란 T_L 에 대하여 정상상태 편차를 갖지 않음을 알 수 있다.

IESF제어기를 설계하기 위해서는 모든 상태변수가 측정 가능해야 하며 상태변수의 측정이 불가능한 경우, 관측기로부터의 상태벡터를 사용하면 된다. 그러나 지연시간이 존재하는 계통의 경우, IESF제어계의 특성방정식은 시간지연항을 포함하게 되므로 극점배치기법에 의한 설계가 불가능하게 된다. 따라서 지연시간이 존재하는 경우, Smith Predictor의 도입이 요구된다. 다음 절에서는 지연시간을 갖는 계통의 제어를 위해 PID제어기에 Smith Predictor를 도입한 제어기에 대해서 간단히 언급한다.

2.2 Smith Predictor를 갖는 PID 제어기[7]

Smith Predictor를 갖는 PID 제어계의 구조는

그림3과 같다. 여기서 $G_p(s)\exp(-\tau_p s)$ 는 지연시간을 갖는 제어대상의 실제 전달함수이며 $G_m(s)\exp(-\tau_m s)$ 는 프로세스 모델링 기법에 의해 얻어진 제어대상의 전달함수이다. 즉, 전달함수로 $G_p(s)\exp(-\tau_p s)$ 를 갖는 제어계통을 $G_m(s)\exp(-\tau_m s)$ 로 모델링 한 것이다. T_L 는 계통에 투입되는 외란이다. 위와같은 제어계통에서 $T_L=0$ 인 경우, 전체 제어계의 폐루우프 전달함수는 식(3)과 같다.

$$\frac{C_p(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)\exp(-\tau_p s)}{1 + G_c(s)G_m(s) - G_c(s)G_m(s)\exp(-\tau_m s) + G_c(s)G_p(s)\exp(-\tau_p s)} \quad (3)$$

만일 $G_m(s)=G_p(s)$, $\tau_m=\tau_p$ 인 경우, 즉 계통이 정확히 모델링된 경우, 그림3에서 최외각 루우프는 사라지게 되며 이때의 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{C_p(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)\exp(-\tau_p s)}{1 + G_c(s)G_m(s)} \quad (4)$$

식(4)에서 보듯이 폐루우프 전달함수의 특성방정식은 이제 지연시간항을 포함하지 않게 된다. 따라서 전 제어계의 응답특성은 특성방정식 $1 + G_c(s)G_m(s)=0$ 의 극점위치에 의해 결정된다.

모델과 플랜트가 완전히 일치한 경우, 외란 T_L 에 대한 출력 C_p 의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{C_p(s)}{T_L(s)} = \frac{G_p(s)\exp(-\tau_p s)[1 + G_m(s)G_c(s)(1 - \exp(-\tau_m s))]}{1 + G_c(s)G_m(s)} \quad (5)$$

마찬가지로 폐루우프 전달함수의 특성방정식은 지연시간항을 포함하지 않게 된다. 따라서 제어계의 설계는 계통에 존재하는 지연시간과 무관하게 이루어 질 수 있음을 알 수 있다.

2.3. MIESF 제어계의 구조

본 절은 본 논문의 핵심으로서 지연시간을 갖는 계통의 제어기 설계를 위해 기존의 방법, 즉 Smith Predictor를 갖는 PID 제어기 대신 2.1절에서 설명한 IESF 제어기에 Smith Predictor를 도입한, 새로운 방법 즉 MIESF 제어계를 제안한다.

본 논문에서 제안한 MIESF제어계의 구조를 블록선도로 나타내면 그림4와 같다. 그림4에서

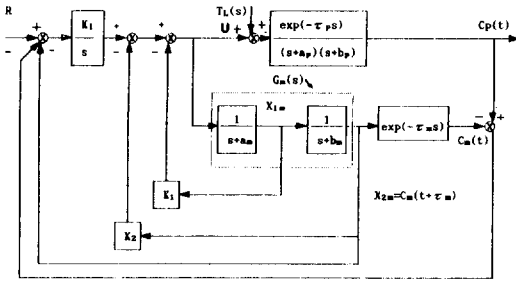


그림 4 MIESF 제어계의 구조
Fig. 4 Structure of MIESF control system

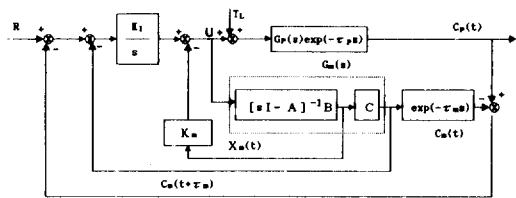


그림 5 2차계통에 대한 MIESF제어계
Fig. 5 MIESF control system for the second-order system

$G_p(s)\exp(-\tau_p s)$ 는 프로세스의 실제 전달함수이며 $G_m(s)\exp(-\tau_m s)$ 는 수학적 모델이다. 행렬 A, B, C는 전달함수 $G_m(s)$ 를 상태공간기법으로 표현할 때 나타나는 행렬이다.

제어기의 설계는 먼저 제어대상계가 정확히 모델링되었다는 가정하에서 즉 $G_m(s) = G_p(s)$, $\tau_m = \tau_p$ 라는 가정하에서 수행된다. 그러나 실제로는 계통을 정확히 모델링할 수 없으며, 따라서 이 구조에서 최외각 루우프는 프로세스와 모델간의 파라미터불일치로 인한 출력편차를 보상하는 역할을 한다.

결정해야 할 제어기 파라미터는 편차적분기의 적분상수 K_I 와 지연시간을 고려하지 않은 $G_m(s)$ 로부터 정의되는 상태벡터 $X_m(t)$ 에 대한 게환이득행렬 K_m 이다. MIESF제어계는 상태벡터 $X_m(t)$ 를 게환시키며 이는 Smith 오디क्टर를 갖는 PID제어기가 $G_m(s)$ 의 출력 $C_m(t + \tau_m)$ 만을 게환시킨 점을 고려할 때 제안된 제어계의 매우 큰 특징이다.

일반적으로 프로세스제어에 가장 많이 사용되고 있는 2.2절의 Smith Predictor를 갖는 PI(또는 PID)구조는 PI의 경우 FOPDT 모델의 경우에만 임의의 극점배치가 가능하고 PID의 경우에는

SOPDT 모델인 경우에만 극점배치에 의한 설계가 가능하다. 그러나 제안된 MIESF 제어기법은 상태벡터를 게환시킴으로서 모델 차수에 관계없이 임의의 극점배치가 가능하다.

모델의 전달함수 $G_m(s)$ 에 대한 상태변수의 선정은 임의성이 있으며 따라서 물리적 의미를 갖는 변수일 수도 있고 순수한 수학적 필요성에 의해 위상변수 표준형으로 부터 정의될 수도 있다. 따라서 모델과 프로세스간에 불일치가 없을 경우, 제안된 MIESF제어기의 페루우프 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{C_p(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)\exp(-\tau_p s)}{1 + K_m[sI - A]^{-1}B + G_c(s)G_m(s)} \quad (6)$$

여기서 $G_c(s)$ 는 전향경로에 있는 적분기의 전달함수이며 K_m 과 적분기이득 K_I 는 일반적인 극점배치 알고리즘에 의해 구해진다.

MIESF 제어기는 지연시간을 갖는 모든 계통에 적용가능하지만 제안된 제어계의 설계과정을 구체적으로 설명하기 위해 다음과 같은 전달함수를 갖는 SOPDT프로세스를 고려한다.

$$G_p(s)\exp(-\tau_p s) = \frac{\exp(-\tau_p s)}{(s + a_p)(s + b_p)} \quad (7)$$

위와 같은 프로세스가 다음과 같은 전달함수로 모델링 되었다고 하자.

$$G_m(s)\exp(-\tau_m s) = \frac{\exp(-\tau_m s)}{(s + a_m)(s + b_m)} \quad (8)$$

이와 같은 2차 계통에 대한 MIESF 제어계의 구성은 그림5와 같으며 실제 계통의 초기조건은 0이라고 가정한다.

전술한 바와 같이 설계는 모델링이 정확하다는 가정하에서, 즉 $a_m = a_p$, $b_m = b_p$, $\tau_m = \tau_p$ 인 상태에서 수행되며 이 경우, 전체 제어계의 전달함수 $C_p(s)/R(s)$ 는 다음과 같다.

$$\frac{C_p(s)}{R(s)} = \frac{K_I \exp(-\tau_m s)}{s^3 + (a_m + b_m + K_I)s^2 + (a_m b_m + b_m K_I + K_2)s + K_I} \quad (9)$$

식(9)에서 보듯이 특성방정식에는 지연시간항이 포함되지 않는다. 따라서 극점배치기법에 의해서 게환이득 K_I , K_1 , K_2 를 결정할 수 있다.

식(9)로 주어진 전달함수는 "1"인 DC 이득을 갖는다. 따라서 MIESF 제어계는 계단형태의 Setpoint변화를 정확히 추적하며 그 과도특성은

폐루우프 계통의 극점에 의존한다.

또한 외란에 대한 특성을 알아보기 위해 그림5의 제어계에서 입력외란과 출력간의 전달함수 $C_p(s)/T_L(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{C_p(s)}{T_L(s)} = \left[1 - \frac{K_I \exp(-\tau_m s)}{s^3 + (a_m + b_m + K_1)s^2 + (a_m b_m + b_m K_1 + K_2)s + K_I} \right] \left[\frac{\exp(-\tau_p s)}{(s + a_p)(s + b_p)} \right] \quad (10)$$

이 식으로 부터 계단형태의 입력외란이 계통에 투입된 경우, 최종치 정리에 의해 정상상태편차를 갖지 않음을 알 수 있다.

3. MIESF 제어계의 안정도

제안된 MIESF 제어기구조에서 프로세스와 모델간에 불일치가 없는 경우의 안정도해석은 특성방정식의 근을 조사함으로써 간단히 파악된다. 그러나 모델과 프로세스간에 파라미터 및 지연시간의 불일치가 발생한 경우, 전 제어계통은 불안정하게 될 수도 있다. [8] 따라서 불일치가 발생한 경우의 안정도 해석은 매우 중요하다. Z. Palmor 등의 연구결과를 이용하면 제안된 MIESF 제어계의 안정도해석은 다음과 같다. [9]

해석적 편의를 위해 모델과 프로세스간의 불일치정도를 나타내는 함수 $I(s)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$I(s) = 1 - \frac{G_p(s)}{G_m(s)} \exp(-(\tau_p - \tau_m)s) \quad (11)$$

불일치가 발생한 경우, MIESF 제어계 특성다항식 $P(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$P(s) = 1 - Q_o(s) I(s) \exp(-\tau_m s) \quad (12)$$

여기서

$$Q_o(s) = \frac{K_I}{s^3 + (a_m + b_m + K_1)s^2 + (a_m b_m + b_m K_1 + K_2)s + K_I} \quad (13)$$

이며, 이것은 불일치가 없는 경우, 전제어계의 전달함수 식(9)에서 지연시간항 $\exp(-\tau_m s)$ 을 제외한 부분이다.

이제 MIESF 제어계의 안정도 해석은 $P(s)$ 의 근의 위치를 조사함으로써 수행되며, 이를 위해

Nyquist안정도 판별법을 이용한다. 이 판별법에 의하면 식(12)에서 $\exp(-\tau_m s)$ 항의 영향은 $Q_o(j\omega)I(j\omega)$ 에 대한 Nyquist선도를 시계 방향으로 $\omega\tau_m$ 만큼 회전시키는 것이므로 전 제어계가 안정하기 위해서는 $Q_o(j\omega)I(j\omega)\exp(-\tau_m j\omega)$ 의 궤적과 실축과의 교점이 항상 $(-1, j0)$ 점의 우측에 존재해야 된다. 따라서 모든 주파수에 대해서 다음의 조건이 만족되어야 한다.

$$|Q_o(j\omega)I(j\omega)| < 1 \quad \forall \omega \geq 0 \quad (14)$$

다음 절에서는 프로세스와 모델간의 지연시간 불일치와 파라미터 불일치가 발생한 각각의 경우에 대해서 안정도를 해석한다.

3.1 지연시간의 불일치가 발생한 경우의 안정도 해석

지연시간간의 불일치가 발생한 경우 ($G_p(s) = G_m(s)$, $\tau_p \neq \tau_m$), 식(11)의 $I(s)$ 는 다음과 같다.

$$I(s) = 1 - \exp(-\Delta\tau s) \quad (15)$$

(단, $\tau_p - \tau_m = \Delta\tau$)

이 경우 $I(s)$ 는 항상 다음을 만족하게 된다.

$$|I(j\omega)| \leq 2 \quad \forall \omega \geq 0 \quad (16)$$

따라서 식(14)를 만족하기 위해서는 $Q_o(s)$ 가 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$|Q_o(j\omega)| < 0.5 \quad \forall \omega \geq 0 \quad (17)$$

SOPDT계통의 경우, $Q_o(s)$ 는 식(13)으로 주어

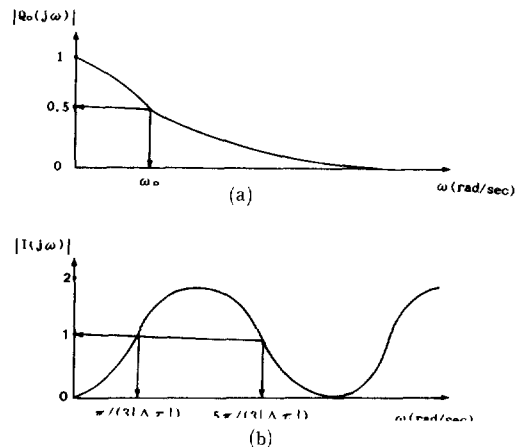


그림 6 (a) $Q_o(s)$ 에 대한 Bode 선도

(b) $I(s)$ 에 대한 Bode 선도

Fig. 6 (a) Bode diagram for $Q_o(s)$

(b) Bode diagram for $I(s)$

지며, 이의 진폭선도를 나타내면 그림6(a)와 같다. 이 그림에서 보듯이 모든 주파수에 대해서 항상 식(17)이 만족되지는 않으며 다만 ω 가 ω_0 보다 큰 주파수 영역에서만 성립한다. 즉

$$|Q_o(j\omega)| < 0.5 \quad \forall \omega \geq \omega_0 \quad (18)$$

한편 $I(j\omega)$ 의 진폭선도는 그림 6(b)와 같다. 이 그림으로부터

$$1 \leq |I(j\omega)| \leq 2, \pi/(3|\Delta\tau|) \leq \omega \leq 5\pi/(3|\Delta\tau|) \quad (19)$$

이므로 모든 주파수에 대해서 식(14)가 만족되기 위한 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\omega_0 < \pi/(3|\Delta\tau|) \quad (20)$$

이때 ω_0 가 주어지면 전 제어계통이 안정할 최대 지연시간의 불일치는 다음과 같다.

$$|\Delta\tau|_{max} = \pi/(3\omega_0) \quad (21)$$

3.2 파라미터 불일치가 발생한 경우의 안정도 해석

지연시간은 일치하나 파라미터만 불일치가 발생한 경우, 즉 $G_p(s) \neq G_m(s)$, $\tau_p = \tau_m$ 이면, $I(s)$ 는 식(22)로 된다.

$$I(s) = 1 - \frac{G_p(s)}{G_m(s)} \quad (22)$$

마찬가지로 임의의 τ_p 에 대해 전체 제어계가 안정하기 위해서는 식(14)를 만족해야 한다. 제안된 제어기의 경우, $Q_o(s)$ 는 식(23)을 만족하게 되며 따라서 식(14)가 만족되기 위해서는 $I(s)$ 가 식(24)를 만족하여야 한다.

$$|Q_o(j\omega)| \leq 1 \quad \forall \omega \geq 0 \quad (23)$$

$$|I(j\omega)| < 1 \quad \forall \omega \geq 0 \quad (24)$$

SOPDT제어계에서 $a_m \neq a_p$, $b_m \neq b_p$ 인 불일치가 발생한 경우, $I(s)$ 는 다음과 같다.

$$I(s) = \frac{(a_p + b_p - a_m - b_m)s + (a_p b_p - a_m b_m)}{(s + a_p)(s + b_p)} \quad (25)$$

식(25)가 식(24)를 만족하기 위해서는 $I(s)$ 의 영점이 가장 작은 극점보다 크면 된다. 따라서 계통이 안정하기 위한 파라미터 불일치의 정도는 다음과 같다.

$$\min(a_p, b_p) < \frac{a_m b_m - a_p b_p}{a_p + b_p - a_m - b_m} \quad (26)$$

3.3 지연시간 불일치와 제어성능

제안된 MIESF제어계의 과도특성과 관련된 성능은 일차적으로 할당된 극점의 위치에 의해 지배

된다. 그러나 과도특성은 지연시간 불일치의 의도적 도입에 의해서 개선될 수도 있다. 이것은 Smith Predictor를 도입한 제어계의 공통된 특징이다. [10]

K. Walton, R.D. Hocken 등은 프로세스 지연시간을 정확하게 안다는 가정하에 성능개선을 위한 지연시간(τ_m)의 산정방법을 제시하였다. [11][12] 1차계의 경우 프로세스 지연시간 보다 작은 모델 지연시간을, 2차계의 경우에는 프로세스 지연시간에 따라 작거나 또는 큰 모델 지연시간을 사용함으로써 제어계의 성능을 개선시킬 수 있음을 보였다. 그러나 본 연구에서 다루는 FOPDT모델 또는 SOPDT 모델은 고차계통에 대한 근사화된 모델이므로 해석적 근거에 의한 모델의 지연시간 선정은 큰 의미를 갖는다고 할 수는 없다.

따라서 본 연구에서는 모델링시 주어진 지연시간값을 기준으로 MIESF를 설계한 후 운전 또는 시뮬레이션 결과에 근거하여 가장 좋은 제어성능을 나타내는 지연시간 값을 선정토록 하였다.

4. 수치예

제안된 MIESF제어기의 성능을 검토하기 위하여 다음과 같은 전달함수를 갖는 SOPDT프로세스를 선정하였다.

$$G_p(s) \exp(-\tau_p s) = \frac{\exp(-0.26s)}{(s+0.27)(s+3.73)}$$

이 전달함수는 시정수 및 지연시간을 모두 분(min) 단위로 정규화시킨 것이다. MIESF제어기는 일반적인 극점배치 알고리즘에 의해 설계하였으며 페루우프 극점은 -4, -5, -6으로 선정하였다. 이 경우 제어기 이득은 각각 다음과 같다.

$$\text{편차적분이득} : K_I = 120$$

$$\text{상태제환이득} : K_1 = 11, K_2 = 31.97$$

상태제환시 요구되는 두 개의 상태변수는 프로세스에 대한 모델에서 시간지연항을 제외한 전달함수

$$G_m(s) = \frac{1}{(s+0.27)(s+3.73)} \text{로부터}$$

$$X_1(s) = \frac{1}{s+0.27} U(s)$$

$$X_2(s) = \frac{1}{s+3.73} X_1(s)$$

로 선정하였다.

전술한 바와 같이 상태변수의 선정은 임의성이 있으며 상태변수의 선정 방식에 따른 제어성능의

차이는 없다. MIESF제어기와와의 성능비교를 위해 지연시간을 포함한 프로세스제어에 일반적으로 사용되고 있는 Smith Predictor를 갖는 PID제어기를 채택하였다. PID제어기의 이득들은 MIESF제어기와 같은 극점을 갖도록 설계하였으며 각 이득의 값은 다음과 같다.

- 비례이득 : $K_p=73$
- 적분기 이득 : $K_i=120$
- 미분기 이득 : $K_d=11$

MIESF제어기와 Smith Predictor를 갖는 PID제어기의 성능은 (I) Setpoint 추적 및 외란처리특성

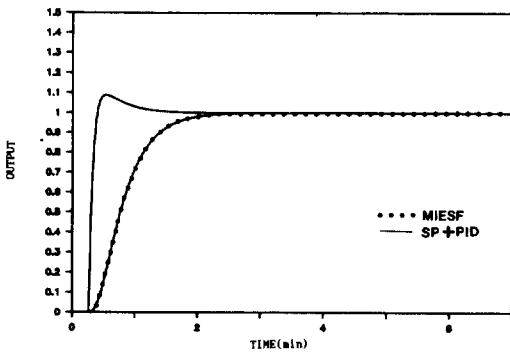


그림 7 프로세스와 모델간의 불일치가 없을 경우의 Setpoint추적 특성

Fig. 7 The setpoint tracking characteristic when there is no parameter mismatch between process and model

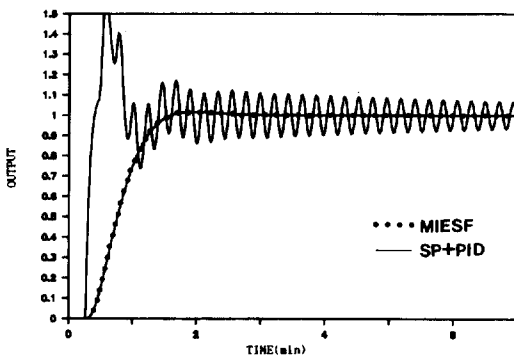


그림 8 프로세스와 모델간의 지연시간 불일치가 발생한 경우의 Set Point 추적특성

Fig. 8 The set point tracking characteristic when time delay mismatch is occurred between process and model

(II) 안정도의 관점에서 비교하였다.

(I) Setpoint추적 특성

그림 7은 프로세스와 모델간의 파라미터 불일치가 없는 경우, MIESF제어계와 Smith Predictor를 갖는 PID제어계의 Setpoint추적 특성을 보인 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 MIESF 제어계는 오버슈트가 전혀 발생하지 않는 장점을 갖기는 하지만 상승시간, 정정시간등의 전반적인 과도특성은 PID제어기가 우월함을 알 수 있다. 그러나 실제의 모든 경우에 프로세스와 모델간의 파라미터불일치는 필연적인 것이므로 제어계의 성능평가는 프로세스와 모델간의 파라미터불일치를 고려한 상태에서 이루어져야 한다. 특히 본 연구에서 다룬 지연시간을 포함한 모델은 그 자체가 고차 계통에 대한 근사적 모델인 경우가 대부분이므로 파라미터 불일치시의 강인성 분석은 더욱 중요한 의미를 갖는다.

그림8, 그림9는 프로세스와 모델간에 불일치가 발생한 경우에 대한 성능 비교이다. 그림8은 지연시간의 불일치가 발생한 경우의 추적특성으로 $\tau_p=0.26(\text{min})$, $\tau_m=0.20(\text{min})$ 일때 MIESF 제어계와 Smith Predictor를 갖는 PID 제어계의 응답이다. 그림에 나타난 바와 같이 PID 제어계는 큰 오버슈트를 가질 뿐 아니라 진동특성을 나타내는 반면 제안된 MIESF제어계는 불일치가 없는 경우보다 더 나은 추적특성을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 특징은 MIESF제어계가 강인성면에서 기존의 여러 제어방식에 비해 우월하며, MIESF와

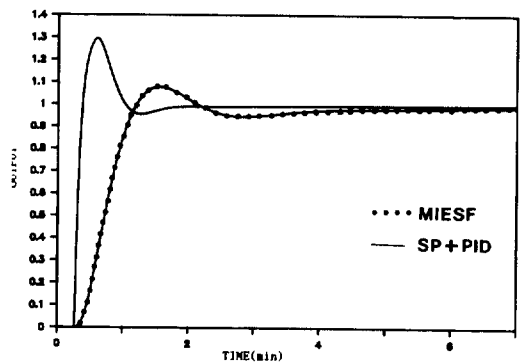


그림 9 프로세스와 모델간의 파라미터 불일치가 발생한 경우의 Setpoint 추적특성

Fig. 9 The setpoint characteristic when parameter mismatch is occurred between process and model

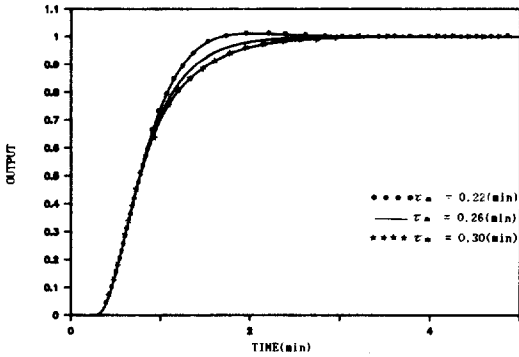


그림 10 지연시간 불일치의 의도적인 도입시의 Setpoint 추적성
 Fig. 10 The set point tracking characteristic in case of intentional time delay mismatch

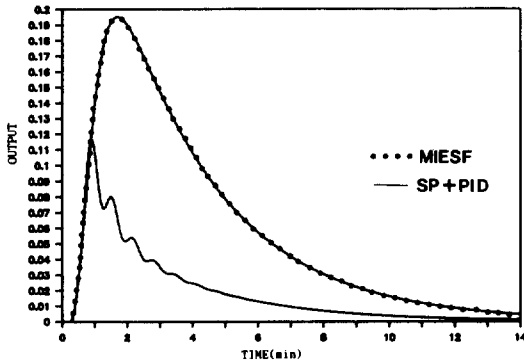


그림 11 프로세스와 모델간의 불일치가 없을 경우의 입력외란 처리특성
 Fig. 11 The input disturbance rejection characteristic when there is no parameter mismatch between process and model

Smith Predictor를 갖는 PID제어계가 모두 출력 제한방식임을 고려할 때 제안된 MIESF제어계의 유용성을 입증해 주는 주요한 특성이다.

그림9는 실제 프로세스의 분모 다항식 s^2+3s+1 이 s^2+4s+1 로 모델링 된 경우의 응답으로 Smith Predictor를 갖는 PID제어계와 MIESF제어계는 모두 성능이 저하되지만 오버슈트의 입장에서 MIESF제어계가 우월함을 알 수 있다. 특히 지연 시간 불일치와 시정수 불일치가 동시에 발생하는 경우, MIESF제어계의 지연시간불일치로 인한 성능향상 특성은Smith Predictor를 갖는 PID제어계

에서는 기대할 수 없는 것이다.

그림10은 지연시간 불일치를 의도적으로 도입함으로써 제어계의 성능개선을 하기위한 시도로 실선은 $\tau_m=0.26$, 파선은 $\tau_m=0.3$, 점선은 $\tau_m=0.22$ 인 경우의 특성이다. 그림으로부터 보듯이 프로세스에 대한 제어성능은 지연시간을 실제값 보다 작게 설정함으로써 향상될 수 있다.

그림11은 계단형태의 입력외란이 계통에 투입된 경우의 응답이다. 그림에서 보듯이 MIESF제어계는 정상상태편차를 갖지는 않으나 외란처리속도는 Smith Predictor를 갖는 PID제어기에 비해 낮다. 제안된 제어계의 외란처리성능은 미분동작을 갖는 필터에 의해서 향상시킬 수 있으며 필터설계에 관한 연구가 요구된다.

(II) 3장에서 기술한 안정도해석을 수치예에서 고려한 계통에 적용한 결과는 다음과 같다.

지연시간의 불일치가 발생한 경우, 제안된 제어기가 임의의 τ_p 에 대하여 안정하기 위한 최대 지연시간불일치량 ($|\Delta\tau|_{max}$)은 식 (21)로부터 구할 수 있다. ω_o 는 $Q_o(j\omega)$ 에 대한 Bode 선도로부터 구할 수 있으며 수치예와 같은 계통의 경우, ω_o 는 3.75(rad/sec)로 된다. 따라서 $|\Delta\tau|_{max}$ 는 다음과 같다.

$$|\Delta\tau|_{max}=0.279(\text{min})$$

$|\Delta\tau|_{max}$ 은 $Q_o(s)$ 의 극점위치에 의존하게 되며, $Q_o(s)$ 의 극점위치를 복소평면의 허축에 가깝게 할수록 $|\Delta\tau|_{max}$ 의 값이 크게됨을 알 수 있다. 그러나 Smith Predictor를 갖는 PID제어계는 식 (14)를 만족하는 불일치의 크기가 MIESF제어계 보다 매우 작으며 따라서 프로세스-모델간 파라미터 불일치에 대한 강인성은 MIESF제어계가 Smith Predictor를 갖는 PID제어계 보다 우월하다. 일반적으로 Smith Predictor를 갖는 PID제어방식에서 불일치에 대한 전 제어계의 안정도를 보장하기 위해서는 미분동작을 포함치 않는 것이 바람직하다. [8]

5. 결론

IESF제어방식의 적용이 불가능한 시간지연계통에 직접 적용될 수 있는 MIESF제어계를 제안하여 그 특성을 분석하고 수치예를 들어 그 유용성을 입증했다. 제안된 MIESF제어계는 Smith Predictor와 IESF제어방식을 조합한 것이며 모델의 상태변수를 제한시킴으로써 실질적으로는 출력 제한방식임에도 불구하고 지연시간이 없는 계통에

대한 상태계환 제어기 설계시와 마찬가지로 일반적인 극점배치기법에 의해 간단히 설계될 수 있다.

제안된 제어계는 IESF에서 요구되는 모든 상태의 측정이 불필요하다는 특징을 갖는다. 이러한 특징은 극점배치에 의한 Smith Predictor를 갖는 PID제어기 설계의 제한성을 고려할 때 설계의 융통성과 성능개선에 기여하는 인자이다.

제안된 제어기의 성능은 시뮬레이션 결과에 보인 바와 같이 Setpoint추적능력에 있어 Smith Predictor를 갖는 PID제어기 보다 우수하며 성능은 할당된 페루우프제어계의 극점위치의 조정 및 의도적인 지연시간 불일치의 도입에 의해 개선될 수 있다. 그러나 제안된 제어계의 외란처리 특성은 좋지 않으며 효과적인 외란처리를 위한 필터의 도입이 요구된다.

참 고 문 헌

[1] "Challenges to Control: A Collective View", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-32, No. 4, 1987.

[2] J.C. Doyle, J.E. Wall and G. Stein, "Performance and robustness results for structured uncertainty", Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 628-632, 1982.

[3] M. Vidyasagar, Control System Synthesis, MIT Press, 1985.

[4] M. Morari, Robust Process Control, Prentice-Hall Inc., 1989.

[5] C.J. Maday, Computer-Aided Design of Feedback Control Systems for Time Response, Instrument Society of America, 1987.

[6] Carlos A. Smith, Principles and Practice of Automatic Process Control, John Wiley & sons, Inc., 1985.

[7] A. Terry Bahill, "A simple Adaptive Smith-Predictor for Controlling Time-Delay Systems", Control Systems Magazine, May, 16-22, 1983.

[8] A.C. Ioannides, "Stability limits of a Smith controller in simple systems containing a time delay", Int. J. Control, 29, 557~563, 1979.

[9] Z. Palmor, "Stability properties of Smith dead-time compensator controllers", Int. J. Control, 32, 937~949. 1980.

[10] K. Walton, "Mismatch in a predictor control scheme: Some closed-form solutions", Int. J. Control, 40, 403~419, 1984.

[11] R.D. Hocken, "Time-delay mismatch and the performance of predictor control schemes", Int. J. Control, 38, 433~447, 1983.

[12] K. Yamanaka, "Effects of mismatched Smith controller on stability in systems with time-delay", Automatica, Vol. 23, No. 6, 787~791, 1987.