

# 개선된 LQG/LTR방법에 의한 보일러-터빈 제어 시스템의 설계

## Design of a Boiler-Turbine Control System Using a Modified LQG/LTR Method

權 旭 鉉\* · 金 相 禹\*\* · 朴 符 堅\*\*\* · 金 恩 基\*\*\*  
 (Wook Hyun Kwon, Sang Woo Kim, PooGyeon Park, Eun-Ki Kim)

### 요 약

본 논문에서는 개선된 LQG/LTR방법을 이용하여 보일러-터빈 시스템에 대한 다변수 견실 제어를 설계한다. 비선형 모델로부터 입력 및 입력의 변화율에 제한을 갖는 선형화된 모델을 얻고 동작점의 변화에 따른 모델링 오차를 분석하여 그 크기가 20rad/sec 이 후 부터 커짐을 밝혔다. 또한 LQG/LTR제어기 설계시에 넓은 범위의 플랜트에 적용할 수 있는 새로운 동특성 첨가 방법을 제시였다. 이 방법을 이용하여 분석된 특성의 모델링 오차가 존재하여도 외란제거 및 기준입력 추종성이 양호하도록 제어기를 설계하였다. 여러상황에서의 시뮬레이션을 통하여 설계된 제어시스템이 설계사양을 잘 만족함을 보였다.

**Abstract-** In this paper, a multivariable robust controller for a boiler-turbine system is designed by using a modified LQG/LTR method. From the known nonlinear dynamic model, a linearized model is obtained with the saturations at both input magnitude and input varying rate. The modeling error is analyzed at various operating points. A new dynamics augmentation method in the LQG/LTR method is suggested which can be applied to LQG/LTR method to reject the input and output disturbances and to follow reference inputs under modeling errors. The good performance of the designed controller is shown by simulations in various conditions.

### 1. 서 론

전기적 출력과 드럼내의 증기압과 수위를 조절하는 보일러 터빈 제어 시스템은 안정된 부하 추

종과 발전소의 안전과 연료 절약을 위하여 필요하다. 안정된 부하 추종을 위하여는 외란의 영향이 적고 기준 입력을 잘 따라 갈 수 있도록 제어기가 설계 되어야 한다. 안전한 운전을 위하여 제어기

는 드림내의 증기압과 수위를 조절하여 보일러와 터빈을 보호할 수 있어야 한다. 제어기는 이러한 설계사양을 만족시킬 수 있게 설계되어야 한다.

현재 상용의 발전소 제어기들은 잘 동작하지만 체계적인 다변수 제어이론에 근거한 것이 아니다. 서로 강력하게 연관되어 있는 보일러-터빈 시스템의 변수들을 동시에 제어 해야 하므로 보일러-터빈 시스템은 다변수 제어 이론을 응용하기에 이상적인 시스템이다. 지금까지 보일러-터빈시스템에 적용된 다변수 제어 시스템 설계방법은 다음과 같은 몇 개의 방법으로 나뉘 수 있다[1]. 감결합(decoupling), 극배치(pole placement), 복소수 주파수 영역에서의 특성계적(Characteristic loci) 방법, LQ조절기, INA(inverse Nyquist array) 또는 DNA(direct Nyquist array) 방법 등이 있다. 감결합 방법은 단일 입력력 제어기 설계에 경험이 있는 사람들에게 호소력을 갖고 있지만 감결합 제어기가 매우 복잡하다는 데 문제가 있다. 극배치 방법의 본질적인 한계는 설계자가 결정할 수 없는 영점의 위치가 시스템 응답에 영향을 주기때문에 극점의 위치에 의해서 폐 루우프 시스템의 응답이 결정되지 않는다는 데 있다. 특성계적 방법은 전달함수 행렬의 주파수에 의존된 고유치와 고유벡터들을 처리하는데, 개 루우프의 전달함수 행렬과 제어기의 전달함수 행렬 사이에 교환법칙, 즉  $K(s)G(s) = G(s)K(s)$ 가 항상 성립해야한다[2]. INA방법의 목적은 루우프간의 상호작용이 단일 루우프 제어기 설계 방법이 사용 가능할 수 있을 정도로 작아지도록 하는 입력 또는 출력 제어기를 선정하는 것이다[3]. 그러나 이 방법은 개 루우프 시스템이 우대각 행렬(diagonally dominant matrix)이 아닌 경우 모델링 오차에 대하여 견실성이 없어질 수 있다[4]. LQ조절기는 아마도 가장 적절하고 철저하게 연구된 다변수 방법이다. 그러나 이방법도 다음과 같은 이유 때문에 공정 제어에서의 일반적인 용도에는 부적합하다. 첫째 LQ조절기는 변수 변화에 민감할 수 있다[5]. 둘째 LQ조절기가 관측자(observer)를 이용하여 구현될 경우 그 견실성이 나빠질 수 있다[6]. 셋째 보일러-터빈 시스템과 같은 비선형 플랜트에 대

서는 LQ조절기를 사용할 경우 동작점의 변화에 따른 이득 계획법(gain-scheduling)을 사용하기 때문에 제어구조가 매우 복잡하다.

위의 모든 방법들은 모델링 오차에 대한 견실성, 설계된 제어기의 복잡성 등에 문제점을 갖고 있다. 그러므로 이 방법들은 비선형 보일러-터빈 시스템에 대한 제어를 설계하는데 부적합하다.

비선형 플랜트의 선형화된 모델을 갖고 제어기를 설계할 때에 이득 계획법과 건설제어 방법이 사용될 수 있다. 전자가 비선형 플랜트에 더 적합한 것 같으나 동작점을 계속 감시하고 그 동작점에 따라 제어기의 이득을 계속 바꾸어 주어야 하므로 매우 복잡하다. 후자는 하나의 고정된 이득을 사용하므로 그 구조는 간단하나 모델링 오차를 충분히 고려하여 제어기의 이득을 설계하여야 한다. 본 논문에서는 건설한 제어기 설계 방법 중의 하나로 폐 루우프 시스템의 특이치 특성(loop shape)을 고려한 LQG/LTR방법을[7, 8] 채택했다. 이 방법에서는 제어기가 모델링 오차를 극복할 수 있도록 설계되기 때문에 앞에서 언급한 다른 방법들과 비교할 때 모델링 오차에 대하여 상대적으로 덜 민감하다. 또한 제한 이득이 고정되므로 이득 계획법을 사용하는 경우보다 덜 복잡하다.

선형 시스템에 LQG/LTR방법을 적용할 때 그 설계과정에서 원하는 특이치특성을 얻기 위하여 동특성 첨가(dynamics augmentation)가 필요하다. 일반적으로 첨가된 동특성  $G_a(s)$ 는  $G_a(s) = H/s$ 로 표시되며  $H = [G(0)]^{-1}$  또는  $H = I_m$ 으로 주어지며  $G(0)$ 는 개 루우프 시스템의 정상상태 이득을 나타낸다. 이 첨가된 동특성은 첨가된 시스템(augmented system)의 최대 최소 특이치를 지정된 주파수 범위에서 가능한 한 비슷하게 만드는 역할을 한다. 그러나 개루우프 시스템이 원점에 극점을 갖는 경우  $G(0)$ 가 특이행렬이 되기 때문에  $H$ 가 존재하지 않으며  $H = I_m$ 을 사용할 경우는 원하는 특이치 특성을 항상 보장할 수 없다. 본 논문에서는 지정된 주파수 범위에서 가상-대각선화(pseudo-diagonalization)방법을 이용하여  $H$ 를 얻는 방법을 제시한다.

본 논문에서는 Bell과 Astöm에 의하여 알려진 160MW용 화력 발전기의 보일러-터빈 시스템의 비선형 모델[9]을 이용하여, 모델링 오차나 입력 제한(input saturation)같은 비선형 요소가 있더라도 외란제거 및 기준입력 추종이 잘 되도록 제어기를 설계한다. 제어입력 크기 및 변화율에 제한이 있기 때문에 LQG/LTR방법에서 사용되는

\*正 會 員 : 서울대 工大 制御計測工學科 教授 · 工博

\*\*正 會 員 : 서울대 工大 制御計測工學科 · 博士課程

\*\*\*正 會 員 : 서울대 工大 制御計測工學科 · 碩士課程

接受日字 : 1989年 8月 18日

1次修正 : 1989年 11月 16日

표적 시스템(target system)을 설계할 때 제어량이 제한된 범위 안에 있도록 해야한다. 본 논문에서 이러한 제약을 만족하는 표적 시스템은 여러번의 시뮬레이션을 통하여 결정된다.

본 논문의 구성은 다음과 같은, 2절에서는 Bell과 Aström에 의하여 알려진 비선형 모델로부터 공칭(nominal)동작점에서 선형화된 모델을 얻고 동작점의 변화에 따른 모델링 오차를 분석한다. 3절에서는 LQG/LTR 방법을 이용한 제어기 설계시 새로운 동특성 첨가 방법을 제시하고 이 방법에 따라 보일러-터빈 제어 시스템을 설계한다. 4절에서는 여러 조건하에서의 시뮬레이션 결과가 주어지며 5절에서 결론을 맺는다.

## 2. 선형화 모델 및 모델링 오차 분석

보일러-터빈 시스템의 동특성을 나타내는 많은 비선형 모델 중에서 최근에 Bell과 Aström에 의하여 많은 시뮬레이션을 통하여 신뢰도가 입증된 160MW 화력 발전기용 보일러-터빈 시스템의 동특성 모델을 본 논문에서 채택하였다.

이 비선형 모델은 다음과 같이 주어진다[9].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 &= (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2 \\ \dot{x}_3 &= (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1)/85 \\ y_1 &= x_1, \quad y_2 = x_2 \\ y_3 &= 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e/9 - 67.975) \end{aligned} \quad (2.1a)$$

$$(2.1b)$$

여기서 상태변수  $x_1, x_2, x_3$ 는 각각 드림증기압(kg/cm<sup>2</sup>), 전기적 출력(MW), 드림내의 유체의 농도(kg/cm<sup>3</sup>)를 나타낸다. 제어입력  $u_1$ 은 보일러 연료 조절기의 위치이며,  $u_2$ 는 터빈으로 가는 증기의 양을 조절하는 밸브의 위치이고,  $u_3$ 는 급수(feedwater)조절기의 위치이다. 제어입력들은 모두 정규화(normalization)되었으며 다음과 같은 제한을 갖는다.

$$\begin{aligned} 0 < u_1 \leq 1, \quad |\dot{u}_1| \leq 0.007/sec \\ 0 \leq u_2 \leq 1, \quad -2/sec \leq \dot{u}_2 \leq 0.02/sec \\ 0 \leq u_3 \leq 1, \quad |\dot{u}_3| \leq 0.05/sec \end{aligned} \quad (2.2)$$

출력  $Y_3$ 는 드림의 수위(m)를 나타내며  $a_{cs}$ 는 증기의 질을 나타내는 계수이고  $q_e$ 는 증발률(Kg/s)을 나타내며, 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} a_{cs} &= \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \\ q_e &= (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \end{aligned}$$

이 비선형 모델은  $\dot{x} = f(x, u)$ 와  $y = g(x, u)$ 로 표

시될 수 있다. 이 비선형 모델은 제어기를 설계하기에 부적절하기 때문에 Taylor급수 근사를 이용하여 동작점에서 선형화 시킨다. 얻어진 선형 모델은 다음과 같은 상태 방정식으로 표시될 수 있다.

$$\delta \dot{x} = A\delta x + B\delta u \quad (2.3a)$$

$$\delta y = C\delta x + D\delta u \quad (2.3b)$$

여기서  $A = \partial f(x^0, u^0)/\partial x$ ,  $B = \partial f(x^0, u^0)/\partial u$ ,  $C = \partial g(x^0, u^0)/\partial x$ ,  $D = \partial g(x^0, u^0)/\partial u$ 이며  $\delta x = x - x^0$ ,  $\delta u = u - u^0$ ,  $\delta y = y - y^0$ 이고  $x^0, u^0, y^0$ 는 동작점에서 변수들의 값이다.

본 논문에서는 중간부하점(half load point)을 공칭 동작점으로 잡았으며 그때에 알 수 있는 변수값들은  $x_1^0 = 108, x_3^0 = 428$  그리고  $u_2^0 = 0.69$ 이다. 이 값들을 이용하면 식(2.1)로부터 정상상태에서 나머지 값들을 구할 수 있으며 그 값은  $x^0 = [108, 66.65, 428]^T, u^0 = [0.34, 0.69, 0.436]^T$  그리고  $y^0 = [108, 66.65, 0]^T$ 가 된다. 이 값들로부터 다음의 시스템 행렬들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -2.509E-3 & 0 & 0 \\ 6.940E-2 & -0.1 & 0 \\ -6.690E-3 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0.9 & -0.349 & -0.15 \\ 0 & 14.155 & 0 \\ 0 & -1.389 & 1.659 \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 6.34E-3 & 0 & 4.71E-3 \end{bmatrix}, \\ D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.253 & 0.512 & 0.014 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이 모델은 노화에 의한 매개변수의 변화나 외란, 매개변수 변화, 추종명령 등에 의한 동작점의 변화 때문에 변할 수 있다. 이러한 변화들은 모델링 오차로 간주할 수 있다. 본 논문에서는 외란이나 추종명령에 의하여 동작점이 공칭 동작점의 70%에서 130%사이에서 변화 한다고 가정하였다. 공칭동작점의 70%, 80%, 90%, 110%, 120%, 그리고 130%의 여섯개의 동작점에서의 변수 값들은 다음의 표1과 같다.

각각의 동작점에서 시스템 행렬  $\{A_i, B_i, C_i, D_i\}$ 들은 공칭 동작점에서의와 같은 방법으로 얻어진다. 여기서  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 이다. 각 동작점에서

**표 1** 여러 동작점에서의 변수 값  
**Table 1** The values of variables at various operating points

동작점	1 (70%)	2 (80%)	3 (90%)	4 (110%)	5 (120%)	6 (130%)
$x_1^0$	75.60	86.40	97.20	118.8	129.6	140.4
$x_2^0$	15.265	36.65	50.52	85.063	105.8	128.89
$x_3^0$	299.6	342.4	385.2	470.8	513.6	556.4
$u_1^0$	0.1559	0.2090	0.2706	0.4182	0.5046	0.5995
$u_2^0$	0.4830	0.5520	0.6210	0.7590	0.8280	0.8970
$u_3^0$	0.1830	0.2556	0.3400	0.5434	0.6625	0.7933

의 전달함수 행렬을  $G_i(s)$ 라 하고 곱하기형 모델링 오차를  $L_i(s)$ 라 하고 공칭 동작점에서의 전달함수 행렬을  $G_0(s)$ 라 하면 이들은 다음의 관계식을 만족한다.

$$G_i(s) = [I_m + L_i(s)]G_0(s) \quad (2.4a)$$

여기서  $m$ 은 입력의 수를 말하며 본 논문에서는 3이다.  $\delta G_i(s) = G_i(s) - G_0(s)$ 라 하면  $L_i(s)$ 는 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$L_i(s) = \delta G_i(s)[G_0(s)]^{-1} \quad (2.4b)$$

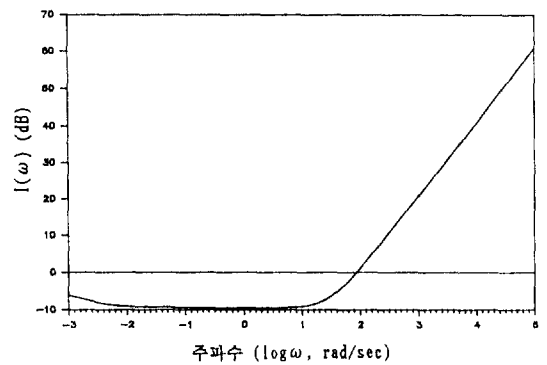
각 주파수에서  $L_i(s)$ 의 최대 특이치를 계산해 보면 모델링 오차의 특성을 알 수 있다. 각각의 주파수에서 각  $L_i(j\omega)$ 의 최대 특이치 중에서 최대값을  $l(\omega)$ 라 하면 즉,  $l(\omega) = \max\{\sigma_i[L_i(j\omega)]\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ 으로 정의하면 이것은 동작점의 변화에 따른 최대 모델링 오차를 나타내며 그 특성은 그림 1과 같다. 여기서  $\sigma_i[\cdot]$ 은 최대 특이치를 나타낸다.

이 그림으로부터 동작점의 변화에 따른 모델링 오차는 대략 20 rad/sec 이상의 주파수에서 커진다는 것을 알 수 있다. 모델링 오차의 또 다른 근원은 선형화 과정에서 무시된 고차항들과 비선형 모델을 얻는 과정에서 모델링 되지 않은 동특성 등이 있는데, 일반적으로 이 두항은 고주파수에서 큰 값을 갖는다. 그러므로 이들의 특성은 동작점의 변화에 따른 모델링 오차의 특성과 크게 다르지 않다. 제어기는 이들 모든 모델링 오차를 고려해서 설계되어야 한다.

### 3. 보일러-터빈 제어 시스템의 설계

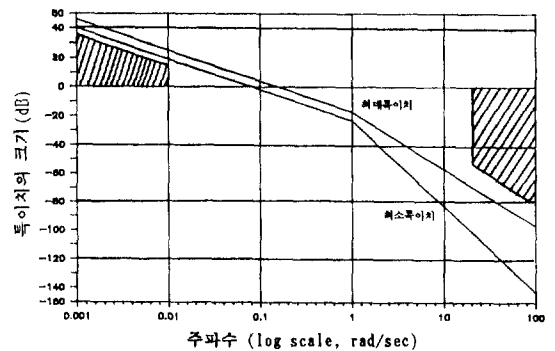
보일러-터빈 제어 시스템은 훌륭한 명령 추종성과 외란제거 능력과 모델링 오차에 대한 견실성 등을 갖추어야 한다. 이러한 설계목적은 얻기 위

하여 본 논문에서는 다변수 루우프 특성을 고려한 LQG/LTR방법을 사용했다. Bell과 Aström에 의하면 보일러-터빈 시스템은 매우 느리다[9]. 그러므로 외란의 유효(dominant)주파수 또한 낮은 것이기 때문에 그것을 0.01rad/sec이하로 가정할 수 있다. 또한 그림1로부터 모델링 오차의 유효 주파수는 20rad/sec이상으로 가정할 수 있다. 빠른 응답을 얻기 위해서는 넓은 주파수 대역이 요구되지만 제어 입력들과 그들의 변화율에 제한이 있기 때문에 루우프 전달함수의 모든 특이치는 0.05 rad/sec와 0.5rad/sec사이에서 이득 교차 주파수(gain crossover frequency)를 갖도록 결정하였다. 또한 계단입력에 대하여 정상상태 오차가 영이 되



**그림 1** 동작점의 변화에 따른 모델링 오차의 특성

**Fig. 1** Characteristics of the modeling error due to operating point variation



**그림 2** 루우프 전달행렬의 특이치의 가상적 특성 곡선

(빗금 친 부분은 피해야 함)

**Fig. 2** Hypothetical loop shapes of  $\sigma_i[K(j\omega)G_0(j\omega)]$ (Shaded regions should be avoided)

기 위하여는 각각의 입력 또는 출력 채널에 적분기가 있어야 한다. 이상의 모든 설계사양을 만족시키기 위해서는 제어기 전달함수  $K(s)$ 에 대하여  $K(j\omega) \cdot G_0(j\omega)$ 의 특이치는 그림 2의 가상적인 특성을 만족해야 한다.

이런류의 특성곡선은 LQG/LTR방법에 의하여 얻어질수 있다. 그림 3은 공칭 동작점에서 선형화된 모델의 전달함수의 특이치의 특성곡선이다.

이 그림으로부터 동특성 참가가 있어야만 LQG/LTR보상기  $[K_{LQG/LTR}(s)]$ 가 설계사양을 만족시킬수 있음을 알 수 있다[8]. 참가가 동특성은  $G_a(s)$ 로 표시되며 전체 보상기는  $K(s) = G_a(s)K_{LQG/LTR}(s)$ 로 표시된다. 설계사양에서 각 입력 채널에 적분기가 있어야 하므로  $G_a(s)$ 는 다음과 같은 형태가 되어야 한다.

$$G_a(s) = H/s, \quad H \in R^{m \times m} \quad (3.1)$$

여기서  $H$ 는 루우프 전달함수의 특이치 특성이

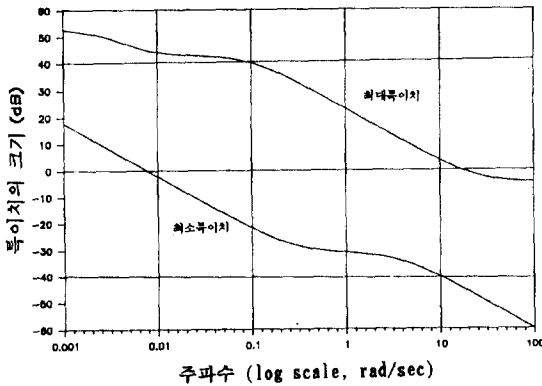


그림 3  $G_0(j\omega)$ 의 특이치 특성곡선  
Fig. 3 Loop shapes of  $\sigma_i[G_0(j\omega)]$

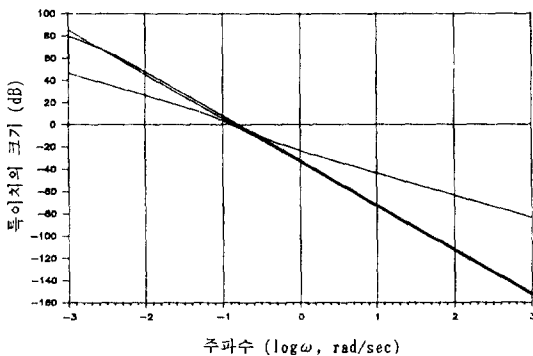


그림 4 동특성이 참가된 시스템의 특이치 특성곡선  
Fig. 4 Loop shapes of  $\sigma_i[C_a(j\omega I - A_a)^{-1} B_a]$

가상된 모습과 같아지도록 결정 되어야 한다. 일반적으로  $H$ 는  $[G_0(0)]^{-1}$ 나  $I_m$ 으로 주어진다. 그러나 본 논문에서  $G_0(0)$ 는 특이행렬이고  $H=I_m$ 으로 하면 원하는 특이치 특성을 얻을 수 없다. 이러한 경우에는 확장된 가상-대각화 방법과 열(column) 스케일링 행렬을 이용한 다음의 방법을 이용하면 원하는 특이치 특성을 얻을 수 있다.

1) 원하는 이득 교차 주파수 범위를 결정한다. 본 논문에서는  $[0.05, 0.5]$ 이다.

2) 지정된 이득 교차 주파수 범위에서  $G_0(s)H_c/s$ 가 열 우대각(diagonally column dominant)행렬이 되도록  $H_c$ 를 결정한다.

그러면 참가된 전체 시스템의 루우프 전달함수의 특이치는 결정된 이득 교차 주파수 범위 내에서는 대각요소에 의하여 근사적으로 결정된다. 그러므로  $G_0(s)H_c/s$ 의 대각요소의 크기가 같아지도록 각 열들을 스케일링 해주면 지정된 주파수 범위에서 원하는 특이치 특이성을 얻을 수 있다.  $H_c$ 를 얻는 방법은 주어진 시스템의 특성에 따라 행렬조작법(Elementary row or column operation), 가상-대각화 방법, 확장된 가상-대각화 방법[3]등이 있는데 본 논문에서는 세번째 방법을 이용하였다. 이 방법을 이용하면 열 우대각성이 성립해야 하는 주파수들이 결정되면 체계적인 방법에 의하여 유일한 해를 구할 수 있다.

3)  $H_s$ 를 열 스케일링 행렬이라 하면  $H = H_c H_s$ 가 된다.

이 방법은 특정한 주파수 영역에서만 열 우대각성을 얻으면 되기 때문에 넓은 범위의 플랜트에 적용할 수 있으며 최소한 INA나 DNA 방법을 적용시킬 수 있는 플랜트에는 적용할 수 있다. 본 논문에서 결정된  $H$ 는 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} -1.4996E-2 & 3.5248E-5 & 3.8681E-1 \\ 2.1046E-5 & -3.6134E-3 & -9.1354E-8 \\ 4.7698E-2 & 4.3928E-3 & 2.3210E-0 \end{bmatrix}$$

동특성이 참가된 시스템은 그림 4와 같은 특이치 특성곡선을 갖으며 다음과 같이 새로운 상태 방정식으로 표시될 수 있다.

$$\dot{x}_a = A_a x_a + B_a u_a \quad (3.2a)$$

$$\delta y = C_a x_a \quad (3.2b)$$

여기서  $x_a$ ,  $A_a$ ,  $B_a$ , 그리고  $C_a$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$x_a = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta u \end{bmatrix}, \quad A_a = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_a = \begin{bmatrix} 0 \\ H \end{bmatrix},$$

$$C_a = [C \ D]$$

그리고  $u_a$ 는 다음 식을 만족한다.

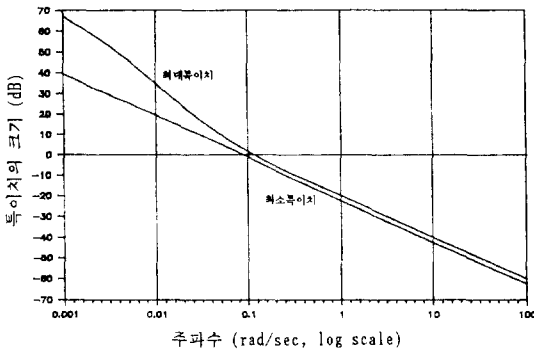


그림 5  $G(jwI - A_a)^{-1}B_a$ 의 특이치 특성곡선  
Fig. 5 Loop shapes of  $\sigma_i[G(jwI - A_a)^{-1}B_a]$

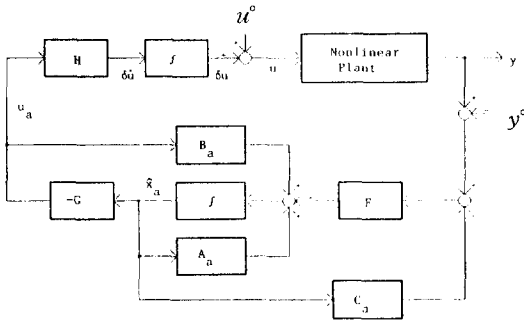


그림 6 설계된 제한 제어 시스템의 구조  
Fig. 6 The structure of the designed feedback system

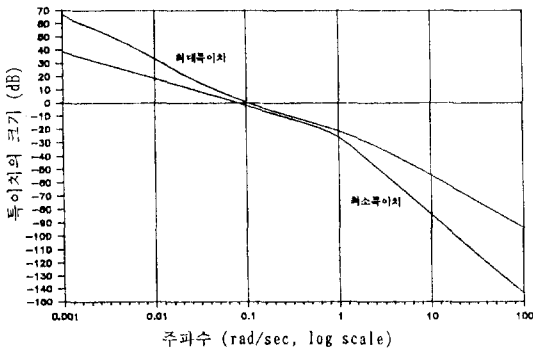


그림 7 설계된 제한 제어 시스템의 특이치 특성곡선  
Fig. 7 Loop shapes of  $\sigma_i[K(jw) G_o(jw)]$

$$\delta \dot{u}(t) = H u_a(t) \quad (3.3)$$

실제 플랜트에는 (2.2)식과 같이 제어입력 및 입력 변화율에 제한이 있다. 시스템(3.2)에 LQG/LTR 방법을 적용하면  $u_a(t) = -G \hat{x}_a(t)$ 로 주어지며 (3.3)식에 의하여  $\delta u(t)$  얻을 수 있고

실제 제어량은  $u(t) = u^o + \delta u(t)$ 로 구해진다. 여기서  $G$ 는 LQ 조절기의 이득이다.  $G$ 가 큰 값을 갖게 되면 제어량 역시 커져서 제한된 영역을 넘어가게 된다. 그러므로  $G$ 는 작은 값을 갖어야 한다. 그런데 LQG/LTR 방법에서는 조절기 이득과 필터의 이득 중 하나는 반드시 큰 값을 갖게 되므로 LQ 조절기는 표적 시스템이 되어야 하고 칼만 필터의 이득을 조절하여 루우프 전달함수를 표적 시스템의 루우프 전달함수로 회복 시켜야만 한다. 제어입력의 크기 및 변화율에 제한을 갖으면서 설계사양을 만족시키기 위하여, 여러번의 시뮬레이션을 통하여 선택된 LQ 조절기의 가중치 행렬  $Q_c$ 와  $R_c$ 는 다음과 같다.

$$Q_c = \text{diag}[Q_1, Q_2], R_c = \text{diag}[0.01, 0.01, 0.5]$$

여기서  $Q_1 = C^T C$ 이고  $Q_2 = \text{diag}[0.005, 0.005, 0.05]$ 이다.  $Q_c$ 와  $R_c$ 가 이렇게 주어지면 정칙 (positive definite) 행렬  $P$ 에 대하여 다음의 제어 대수 Riccati 방정식은 유일한 해를 갖는다.

$$A_a^T P + P A_a + Q_c - P B_a R_c^{-1} B_a^T P = 0 \quad (3.4)$$

그리고 조절기 이득은  $G = R_c^{-1} B_a^T P$ 로 주어진다. 그림5는 설계된 LQ 조절기의 특이치 특성을 보여준다.

루우프 전달함수 회복 (loop transfer recovery) 방법을 사용하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$\sigma_i[G_a(jw) K_{LQG/LTR}(jw) G_o(jw)] \longrightarrow \sigma_i[G(jwI - A_a)^{-1} B_a]$$

여기서  $\sigma_i[\cdot]$ 는  $i$ 번째 특이치를 나타낸다. 루우프 전달함수 회복은 상태잡음과 측정잡음의 공분산을 각각  $Q_f = B_a B_a^T$ 와  $R_f = 0.001 I_m$ 로 가정하여 필터의 이득을 구함으로써 근사적으로 이루어질 수 있다. 위의 공분산 행렬에 대하여 다음의 필터 대수 Riccati 방정식은 정칙행렬  $\Sigma$ 에 대한 유일한 해가 존재하며 필터이득은  $F = \Sigma C_a^T R_f^{-1} C_a \Sigma$ 로 주어진다.

$$A_a \Sigma + \Sigma A_a^T + Q_f - \Sigma C_a^T R_f^{-1} C_a \Sigma = 0 \quad (3.5)$$

조절기 및 필터의 이득  $\{G, F\}$ 가 결정되면  $K_{LQG/LTR}(s)$ 와  $K(s)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$K_{LQG/LTR}(s) = G(sI - A_a + B_a G + F C_a)^{-1} F \quad (3.6)$$

$$K(s) = G_a(s) K_{LQG/LTR}(s) \quad (3.7)$$

설계된 제한 제어 시스템의 구조는 그림6와 같고 이 시스템의 루우프 전달함수의 특이치 특성곡선은 그림7과 같다. 이 특이치 특성곡선은 모든 설계 사양에 맞추어 만들어진 가상 특성곡선인 그림2와 거의 비슷함을 알 수 있다.

### 4. 시뮬레이션 결과

설계된 제어 시스템이 설계목적 대로 잘 설계되

었는지를 확인하기 위하여 여러가지 상황에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 실제 플랜트 대신 비선형 동특성 모델 (2.1)을 사용했

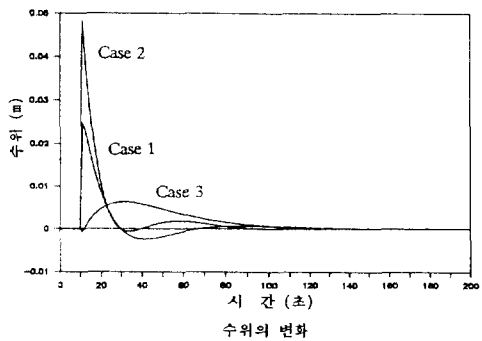
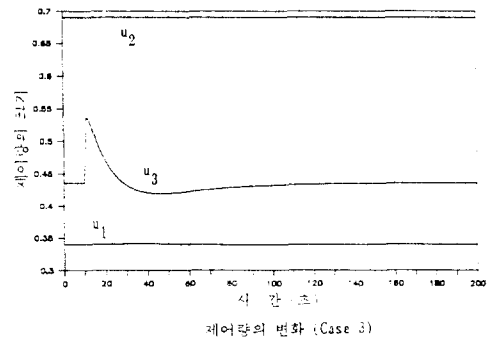
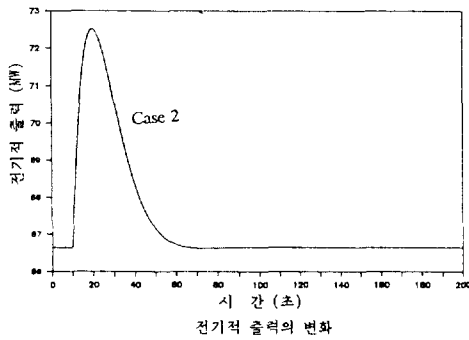
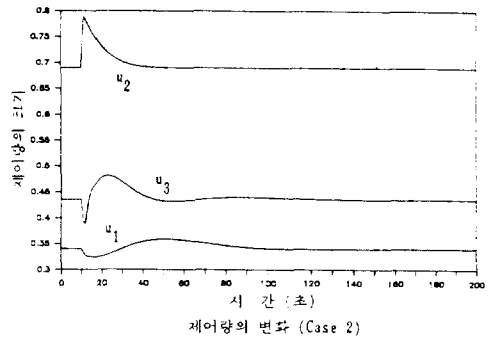
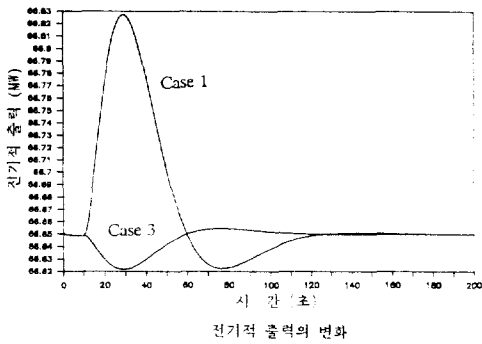
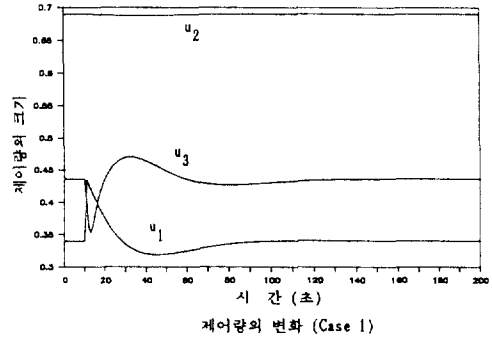
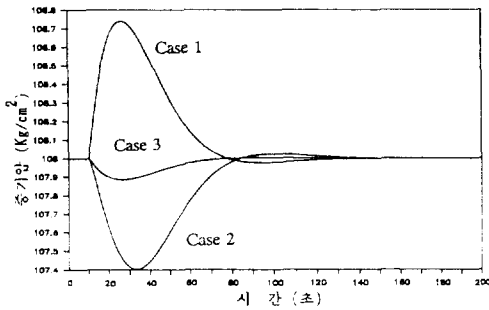


그림 8 입력 외란의 영향  
Fig. 8 Effects of input disturbances

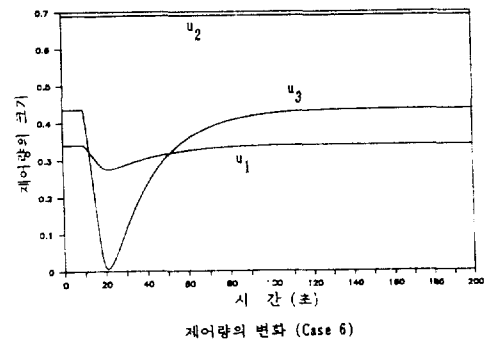
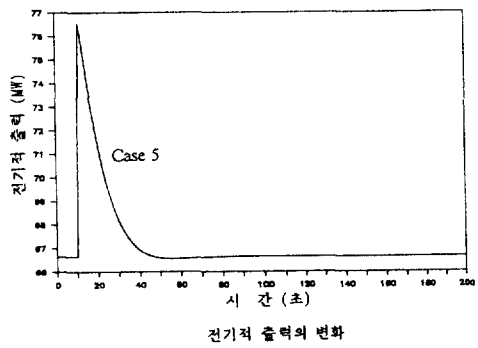
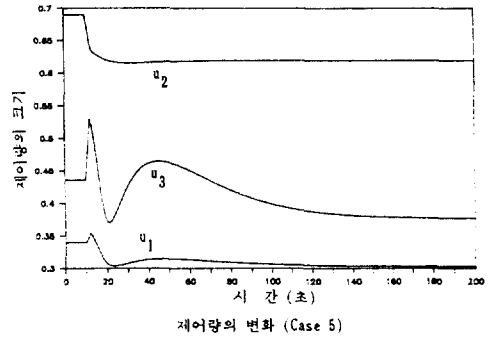
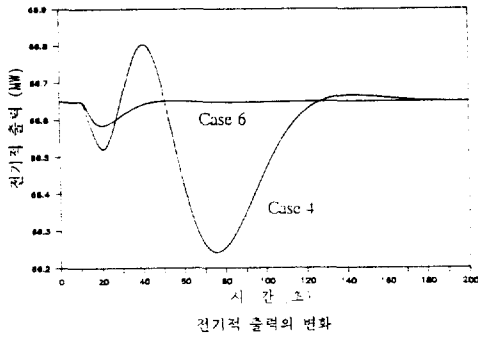
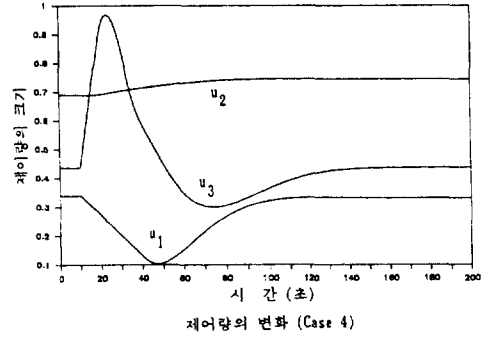
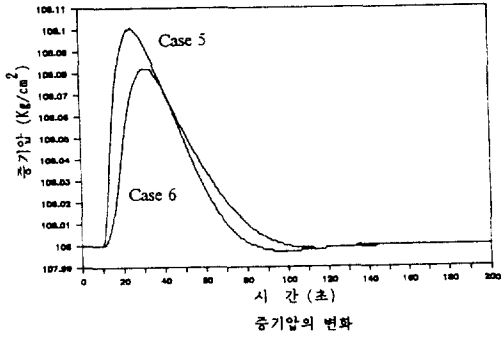
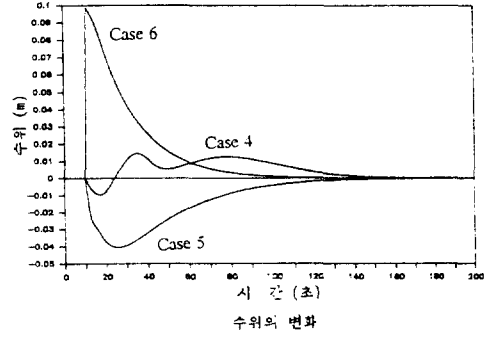
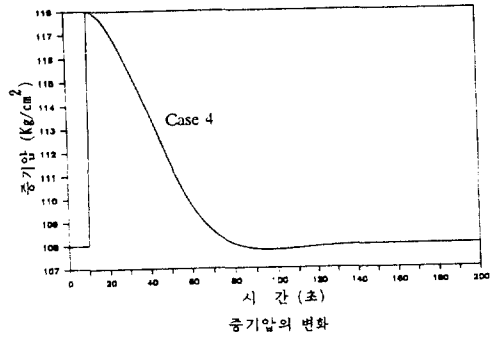


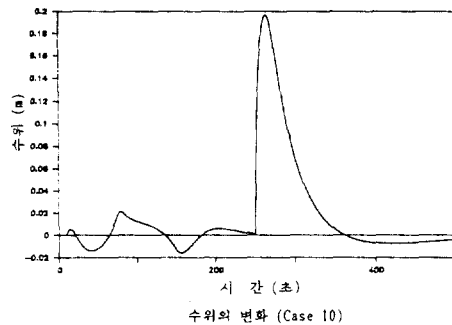
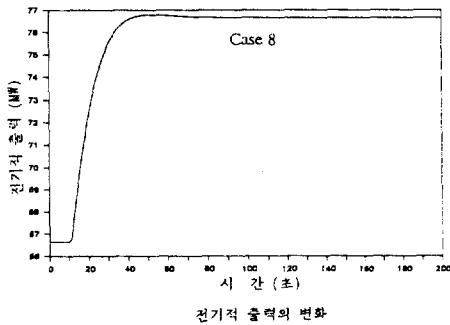
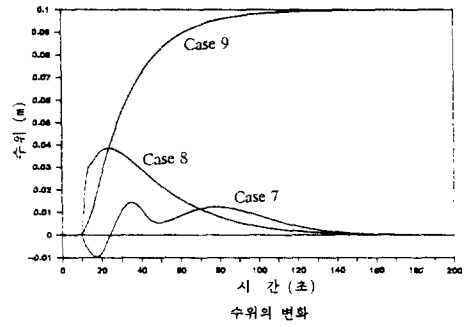
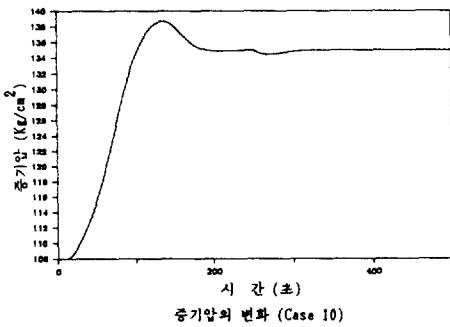
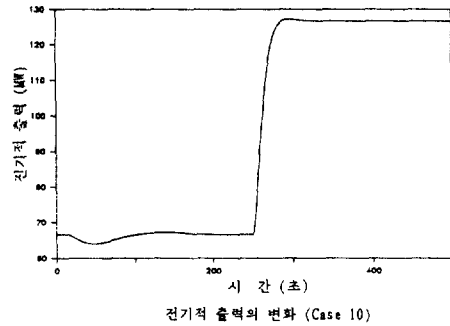
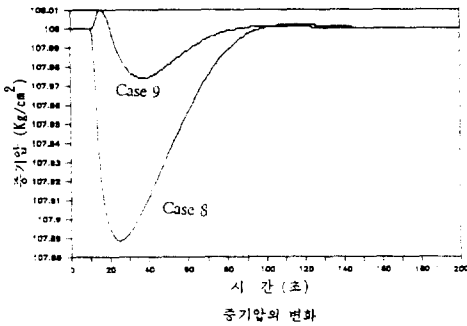
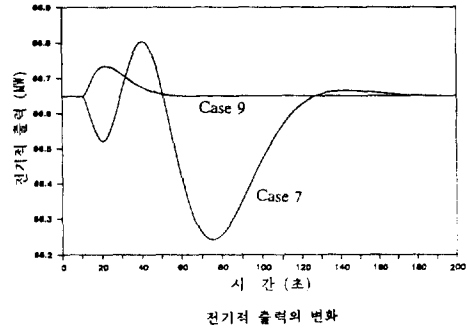
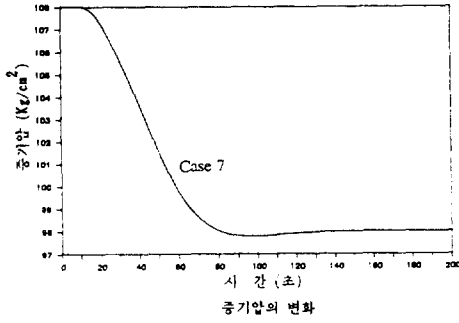
그림 9 출력 외란의 영향  
 Fig. 9 Effects of output disturbances



으며 제어입력의 크기 및 변화율에 있는 (2.2)식과 같은 제한을 고려하였다. 우선 입력단 및 출력단에 있을 수 있는 외란의 영향을 알아보기 위하여

다음과 같은 경우를 가정하였다.

$$\text{Case 1: } du_1(t) = 0.1u_0(t-10), \quad du_2(t) = 0, \quad du_3(t) = 0$$



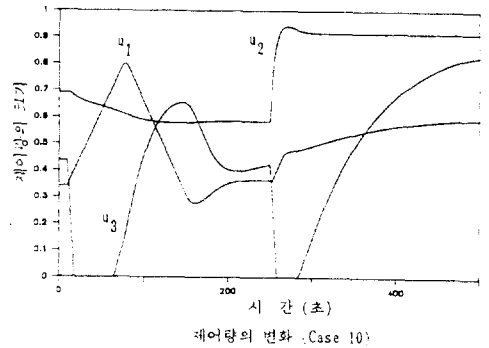
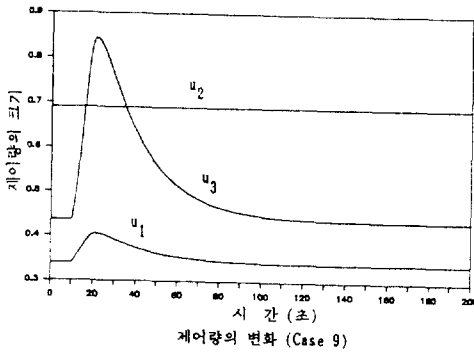
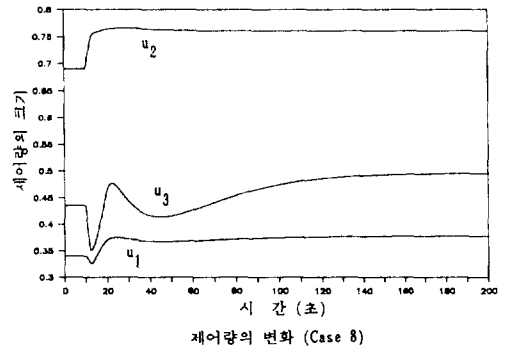
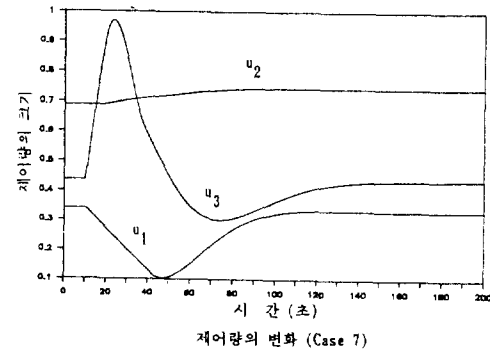


그림 10 기준입력에 대한 시간응답

Fig. 10 Time responses for reference inputs

Case 2 :  $du_1(t)=0, du_2(t)=0.1u_s(t-10), du_3(t)=0$

Case 3 :  $du_1(t)=0, du_2(t)=0, du_3(t)=0.1u_s(t-10)$

Case 4 :  $dy_1(t)=10u_s(t-10), dy_2(t)=0, dy_3(t)=0$

Case 5 :  $dy_1(t)=0, dy_2(t)=10u_s(t-10), dy_3(t)=0$

Case 6 :  $dy_1(t)=0, dy_2(t)=0, dy_3(t)=0.1u_s(t-10)$

여기서  $du_i(t)$ 와  $dy_i(t)$ 는 각각  $i$ 번째 입력 및  $i$ 번째 출력에 있는 외란이며  $u_s(t)$ 는 단위 계단함수를 나타낸다. 그림8은 Case 1에서 Case 3까지의 경우에 입력외란이 출력에 미치는 영향을 보여준다. 이 그림으로부터 입력외란의 영향은 작음을 알 수 있고 50초 이후에는 그 영향이 사라짐을 알 수 있다. 그림9는 Case 4에서 Case 6까지의 경우에 출력외란이 출력에 미치는 영향을 나타낸다. 이 그림으로부터 외란이 잘 감쇠됨을 알 수 있고 그 영향은 100초 이후에는 거의 나타나지 않는다. Case 1에서 Case 6까지의 모든 경우에 제어량은

제한된 영역 안에 머물며 전기적 출력 ( $y_2$ )이 가장 빠르게 드림 수위 ( $y_3$ )가 가장 늦게 공칭상태에 도달함을 알 수 있다.

기준입력에 대한 추종성을 확인하기 위하여 다음의 네가지 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Case 7 :  $y_{r1}(t)=y_1^o-10u_s(t-10), y_{r2}=y_2^o, y_{r3}=y_3^o$

Case 8 :  $y_{r1}(t)=y_1^o, y_{r2}=y_2^o+20u_s(t-10), y_{r3}=y_3^o$

Case 9 :  $y_{r1}(t)=y_1^o, y_{r2}=y_2^o, y_{r3}=y_3^o+0.1u_s(t-10)$

Case 10 :  $y_{r1}(t)=y_1^o+27u_s(t-10), y_{r2}=y_2^o+60u_s(t-250), y_{r3}=y_3^o$

여기서  $y_{ri}(t)$ 는 기준입력을  $y_i^o(t)$ 는 공칭 동작점에서의 출력 값이다. 그림10은 위의 각 경우의 시간응답을 보여준다. 이 그림으로부터 출력이 기준입력을 잘 따라가고 정상상태 오차가 영이 됨을 알 수 있다. 모든 제어입력에 제한이 있기 때문에, 공칭 동작점에서 전기적 출력을 크게 변화

시킬 경우 잘 따라가지 못한다. Case 7은 이러한 문제에 대한 하나의 해결책을 제시한다. 즉 증기압을 크게한 후 전기적 출력을 변화시키면 된다.

Case 1부터 Case 10까지의 모든 경우에 동작점이 변하였다. 특히 Case 8과 Case 10의 경우는 동작점이 상당히 많이 변하였다. 그러나 설계된 제어시스템은 이러한 동작점의 변화에도 잘 동작한다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 160MW 화력 발전소용 비선형 보일러-터빈 시스템에 대한 제어기를 설계하였다. 공칭 동작점에서 선형화된 모델을 얻고, 동작점의 변화에 따른 모델링 오차를 분석하여 모델링 오차의 특성을 얻었다. *LQG/LTR* 제어기 설계시에 필요한 새로운 동특성 첨가 방법을 제시하였는데, 이 방법은 *INA*나 *DNA* 방법이 적용되는 플랜트를 포함하는 넓은 범위의 플랜트에 적용할 수 있다. 이 개선된 *LQG/LTR* 방법을 이용하여, 분석된 모델링 오차에 대하여 견실하고, 계단 기준입력에 대하여 정상상태 오차가 영이되고, 입력단과 출력단에 있을 수 있는 외란에 대하여 영향을 적게 받도록 제어기를 설계하였다. 설계된 제어 시스템의 성능은 여러 상황에서의 시뮬레이션을 통하여 보여 졌는데, 시뮬레이션 결과로부터 외란의 영향은 작고 빨리 사라지며, 출력은 기준입력을 잘 따라감을 알 수 있다. 외란 및 기준입력이 가해질 경우 동작점들이 바뀌게 되므로 본 논문에서 수행한 모든 시뮬레이션의 경우에 동작점은 계속 변화한다. 그러므로 설계된 제어 시스템이 동작점의 변화에도 좋은 성능을 갖고 있음을 알 수 있다. 그러므로 설계된 제어 시스템은 모델링 오차가 있을 지라도 좋은 성능을 갖을 것이다. Bell과 Aström은 경험론에 입각한 PID 제어기를 사용하여 보일러-터빈 시스템을 제어하였으나 본 논문에서는 체계적인 다변수 제어기 설계방법을 사용하여 보일러-터빈 시스템을 제어할 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 Bell과 Aström에 의하여 신뢰도가 입증된 비선형 모델을 실제 플랜트로 가정하여

제어기의 성능을 확인하였다. 실제 플랜트가 이 비선형 모델과 많이 틀릴 경우에는 제안된 제어기의 성능을 실제 플랜트를 대상으로 확인할 필요가 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] H.K. Nam, Modeling and Control System design study of a coal fired power plant, Ph. D dissertation, The Univ. of Texas at Austin, 1986.
- [2] A. McFarlane and B. Koubaritakis, "A design technique for linear multivariable feedback system," Int. J. Contr., Vol. 25, pp. 837-879, 1977.
- [3] H.H. Resenbrock, Computer-aided control system design, Academic press inc., pp. 117-173, 1974.
- [4] J.C. Doyle and G. Stein, "Multivariable feedback design: concepts for a classical/modern synthesis," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-26, pp. 4-16, Feb. 1981.
- [5] E. Sorroka and U. Shaked, "On the robustness of LQ regulators," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-29, pp. 664-665, 1984.
- [6] J.C. Doyle, "Guaranteed margins for LQG regulators," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-23, pp. 756-757, Aug. 1978.
- [7] J.C. Doyle and G. Stein, "Robustness with observers," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. AC-24, pp. 607-611, Aug. 1979.
- [8] K. Kapasouris, M. Athans, and H.H. Spang III, "Gain-scheduled multivariable control for the GE-21 turbofan engine using the LQG/LTR methodology," Proc. of American Control Conference, pp. 109-118, June 1985.
- [9] R.B. Bell and K.J. Aström, "Dynamic models for boiler-turbine-alternators units: data logs and parameter estimation for a 160MW unit," Report TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.