

## 블록 계수화법에 의해 설계된 견실한 $H_\infty$ 제어기의 비선형 보일러 시스템에 대한 적용

### Robust $H_\infty$ Controller based on Convex Parametrization with Application to Nonlinear Boiler System

\*황준하\*, \*\*최광진\*\*, 권오규\*

\* 인하대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부(Tel: 032-860-7395; E-mail: okkwon95@dragon.inha.ac.kr)

\*\* LG정밀 연구소(Tel: 0331-284-4545-617; E-mail: kjchoi@mail.lgp.lg.co.kr)

**Abstract** In this paper, a control system using robust  $H_\infty$ controller based on convex parametrization is presented for a nonlinear system with uncertainty. Accounting for the time delay, noise and linearization error by frequency analysis, the suboptimal controller is designed to meet robust stability and performance for uncertainty. The designed control system is applied to a nonlinear boiler model to test its performances.

**Key words** Robust  $H_\infty$ control, linear matrix inequalities, convex parametrization, uncertainty

#### 1. 서론

보일러를 효과적으로 운용하기 위해서는 변화하는 부하의 요구에 상응한 증기를 발생시키는 증기발생 제어시스템의 성능 향상이 필수적이다. 규정된 압력과 온도를 갖는 증기를 원활히 공급할 수 있도록 보일러의 입출력 균형을 유지시켜주기 위해서는 다음과 같은 기본적인 요구사항을 만족해야 한다. 첫째로, 드럼내의 증기압력은 사용자의 증기량 요구의 변화에 관계없이 일정하게 유지되어야 한다. 둘째로, 드럼내의 물의 양은 드럼의 과열과 증기라인으로의 넘침을 방지하기 위해서 반드시 일정한 수위를 유지해야 한다. 셋째로, 연소로 내의 연료와 공기의 혼합비는 안정도, 효율성, 환경보호의 관점에서 적절히 유지되어야 한다.

그러나 보일러의 제어에는 거의 모든 출력에 대한 연료공급의 강한 영향, 연결관 내의 시간지연, 내구성, 침식, 연료열량의 변화, 드럼내의 비최소위상 특성과 불안정한 동특성, 플랜트의 동특성과 같은 주파수대의 잡음, 비선형성, 구동기의 제약조건등으로 인한 비선형 포함특성등과 같은 어려움이 있다. 더욱이 보일러는 최적의 동작상태를 유지하기 위해 운전중에 여러번 동작점이 변화한다. 따라서 보일러의 제어문제는 추종능력과 안정도 문제가 함께 고려되어야 한다.

이 논문에서는 다변수 보일러 시스템을 제어하기 위해 LMI(Linear Matrix Inequalities)를 이용한 블록(convex)계수화법에 의해 설계된 견실한  $H_\infty$ 제어기를 이용하여 보일러 제어 시스템을 설계한다. 제어기의 기본구조는 Gahinet[3]가 제시한 제어기와 같으며 제어시스템 설계시 불확실성을 고려하기 위해 적절히 변형되었다. 그리고 설계된 견실한 다변수 제어 시스템은 성능 확인을 위하여 산업용 보일러에 적용하는 모의실험을 수행한다. 보일러 모델로는 Pellegrinetti등[1]이 제안한 Abbott 발전소의 비선형 보일러 모델을 사용한다.

#### 2. 이론적배경

연속·이산형  $H_\infty$ 제어문제는 LMI에 의한 접근 방법에 의해서 풀려질수 있다. 이 접근 방법은 LMI의 형태를 사용하며 기존의  $H_\infty$ 제어기를 블록 상태공간 계수화법으로 개념을 확장시킨 것으로 기존의  $H_\infty$ 중심 제어기들이 지니고 있던 여러 단점들을 개선시킬 수 있다. 즉 제어기 설계시 적절한 앞먹임 항을 고려해 줌으로써 규칙성과 특이성 문제 모두를 풀어낼수 있으며 차수감소가 가능하고 기존의  $H_\infty$ 제어기보다 성능이 우수하다. 최적해의 존재조건은 기존의 부정 리카티 등식 대신 리카티 부동식으로 표현되며 이 조건은 세계의 LMI를 포함하는 체계로 표현된다. 이 체계는 블록 최적화 기법에 의해 풀려지고 구해진 해는 모든 준최적 제어기들을 계수화하고 제어기 차수와 페루프 리아프노프 함수에도 중요한 영향을 끼친다.

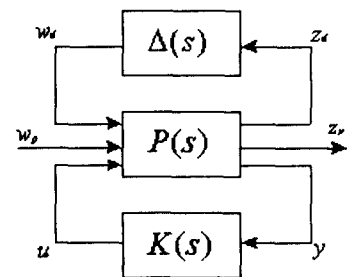


그림 1. 일반화된 표준형  $H_\infty$ 구조  
Figure 1. The generalized standard  $H_\infty$  structure

<그림1>은 표준형  $H_\infty$ 구조이다.  $P(s)$ 는 플랜트,  $K(s)$ 는 안정화제어기,  $\Delta(s)$ 는 불확실요소를 나타낸다. 그림에서의  $u$ 와  $y$ 는 각각 플랜트의 제어입력과 측정된 출력을 표시한다. 벡터  $w_p$ 와  $z_p$ 는 설계목적에 따라 실제 플랜트의 최적제어를 위해 설정되는 항이다. 또한  $w_d$ 와  $z_d$ 는 각각 불확실구조의 입력과 출력을 표시한다. 제어문제는 이와같은  $u$ 와  $z$ 의 설정을 설계명세에 따라 행하고  $\|F(P, K)\|_\infty$ 을 최소화하는 문제이다.

$w_p, w_d$  그리고  $z_p, z_d$ 를 묶어서 각각  $u$ 와  $z$ 로 정의하면  $P(s)$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \quad \text{단,} \quad \begin{matrix} z = P_{11}w + P_{12}u \\ y = P_{21}w + P_{22}u \end{matrix} \quad (2.1)$$

또는 일반적인 상태공간 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$P(s) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} (sI - A)^{-1} \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \end{bmatrix}$$

$$\equiv \left[ \begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right] \quad (2.2)$$

제어기 설계과정에서 볼록 계수화법을 적용시키기 위해 플랜트 계수에 대해 다음과 같은 가정이 필요하다.

- (A1)  $(A, B_2, C_2)$ 는 안정화 가능하며 검출 가능하다.
- (A2)  $D_{12}$ 는 전열계수를 가지며  $D_{21}$ 은 전행계수를 가진다.
- (A3)  $D_{22} = 0$

위와 같은 플랜트  $P(s)$ 와  $\gamma > 0$ 가 주어질 때 출력 도역임 제어기를  $K(s)$ 라 하면 즉,  $u = K(s)y$ 라 할 때, 아래와 같은 페루우프 전달함수를 얻을 수 있다.

$$z = F(P, K)w \quad (2.3)$$

$$F(P, K) = P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}$$

준최적  $H_\infty$  제어문제는 페루우프 전달함수의 최대특이값을  $\gamma$  이하로 설정할 때  $P(s)$ 를 안정화하는 제어기  $K(s)$ 를 찾는 문제이다.

$$K_\infty = \{K: K \text{ stabilizes } P(s), \|F_1(P, K)\|_\infty \leq \gamma\} \quad (2.4)$$

볼록 계수화법에 의해 설계하면 아래와 같이 플랜트의 차수보다 크지 않은 차수를 가지는 제어기를 구할수 있다.

$$K(s) = D_K + C_K (sI - A_K)^{-1} B_K; \quad A_K \in R^{k \times k}; \quad k \leq n \quad (2.5)$$

이때 페루우프 전달함수는 다음과 같이 구해진다.

$$F(G, K)(s) = D_{cl} + C_{cl} (sI - A_{cl})^{-1} B_{cl}$$

$$A_{cl} = \begin{pmatrix} A + B_2 D_k C_2 & B_2 C_k \\ B_k C_2 & A_k \end{pmatrix}; \quad B_{cl} = \begin{pmatrix} B_1 + B_2 D_k D_{21} \\ B_k D_{21} \end{pmatrix}$$

$$C_{cl} = (C_1 + D_{12} D_k C_2 \quad D_{12} C_k); \quad D_{cl} = D_{11} + D_{12} D_k D_{21} \quad (2.6)$$

$H_\infty$  제어문제를 풀기 위해 페루우프 전달함수의 간략화된 형태가 유계 실보조정리(Bounded Real Lemma)에 적용된다. 이 과정에서 사용되는 유계 실보조정리는 다음과 같다. [3]

$T(s) = D + C(sI - A)^{-1}B$ 로 실현되는 전달함수  $T(s)$ 에 대해 다음은 등가이다.

- (i)  $A$ 가 안정하고  $\|D + C(sI - A)^{-1}B\|_\infty \leq \gamma$

- (ii)  $\sigma_{\max}(D) < \gamma$ 이며 다음  $ARI$ 의 양 한정해가 존재한다.

$$A^T X + XA + \frac{C^T C}{\gamma^2} + \left( -\frac{C^T D}{\gamma^2} + XB \right) \left( I - \frac{D^T D}{\gamma^2} \right)^{-1} \left( -\frac{C^T D}{\gamma^2} + XB \right)^T < 0 \quad (2.7)$$

유계 실보조정리를 만족하는 기본 제어기 계수화법은 Gahinet [3]에 의해 두단계로 나누어져 유도되는데, 첫번째 단계에서는 제어기 계수를 포함하는 리카티 부등식으로 특성지워지고, 두번째 단계에서 보조변수들을 도입함으로써 제어기 계수들을 소거하고 플랜트 계수들만으로 이루어지는 볼록 계수화법이 유도된다. 즉  $H_\infty$  제어문제를 해결하기 위한 여러 제약요소는 다음과 같은 세개의 LMI로 표현 가능해지며 제어기 계수화 문제에서 이 세개의 식을 만족하는  $A$ 와  $S$ 의 쌍들을 이용하여  $\gamma$ -준최적 제어기들을 구성하게 된다.

$$\begin{pmatrix} \hat{A}R + R\hat{A}^T - \hat{B}_2\hat{B}_2^T & R\hat{C}_1^T & \gamma^{-1}\hat{B}_1 \\ \hat{C}_1R & -I & \gamma^{-1}\hat{D}_{11} \\ \gamma^{-1}\hat{B}_1^T & \gamma^{-1}\hat{D}_{11}^T & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (2.8)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{A}^T S + S\hat{A} - \hat{C}_2^T \hat{C}_2 & S\hat{B}_1 & \gamma^{-1}\hat{C}_1^T \\ \hat{B}_1^T S & -I & \gamma^{-1}\hat{D}_{11}^T \\ \gamma^{-1}\hat{C}_1 & \gamma^{-1}\hat{D}_{11} & -I \end{pmatrix} < 0 \quad (2.9)$$

$$\begin{pmatrix} R & \gamma^{-1}I \\ \gamma^{-1}I & S \end{pmatrix} \geq 0 \quad (2.10)$$

위의 세개의 LMI식은 플랜트의 차수보다 크지 않은 차수를 갖는  $\gamma$ -준최적 제어기들 집합 사이의 대응관계를 세우며 이 때 세 식을 만족시키는 정칙행렬의 쌍  $(R, S)$ 의 집합은 내부 안정도 대역이나 제어기 차수등을 결정짓는 중요한 특성을 지니며 대수리카티 방정식이 볼록 집합임을 정의해준다.

### 3. $H_\infty$ 제어 시스템 설계

보일러 제어시스템은 명령 추종 및 외란 제거 성능과 불확실 요소들에 대한 견실성을 갖추어야 한다. 이러한 설계 목적을 이루기 위하여 이 논문에서는 저역필터 역할을 하는 가중함수를 이용하여 루우프형성을 하고 불확실성을 고려한 다변수  $H_\infty$  제어를 설계하여 제어 시스템을 구성한다. 루우프형성의 원리는 성능과 견실성간의 상보성에 근거하며, 전보상기 혹은 추보상기를 사용하여 공칭플랜트의 특이값을 바라는 루우프의 형태로 설계하는 것이다. 이때 형성된 플랜트는 공칭플랜트와 보상기간의 결합에 의하여 구성된다. 하지만 개루우프 시스템의 형성화는 페루우프의 내적 안정도를 보장하지는 않는다. 따라서 내적 안정도의 만족을 위한 도역임제어기로 볼록 계수화법에 의해 설계된  $H_\infty$  제어기를 구현한다. 이러한 방법으로 설계된 제어기와 보상기는 서로 결합되어 보일러 제어를 위한 제어시스템을 구성하게 된다.

아래의 <그림2>는 비선형 보일러 시스템을 제어하기 위한 전체 제어 시스템의 구조이다. 제어기 설계를 위한  $u$ 와  $z$ 의 선정과 루우프형성 가중함수는 위의 그림과 같은 구조로 설정한다.  $z_1$  과  $z_2$ 는 불확정 입력에 대한 출력오차,  $z_3$ 는 목표 출력과 시스템 출력간의 정합오차를 만족하기 위해 설정되었으며, 구동기 포함 특성과 같은 제약조건을 만족하기 위해  $z_2$ 의 설정 및 입력치의 상하절단이 이루어졌다.  $r$ 는 기준입력,  $u_c$ 는 플랜트 입력,  $u_d$ 는 입력잡음과 부하 외란을 나타낸다. 플랜트의 임

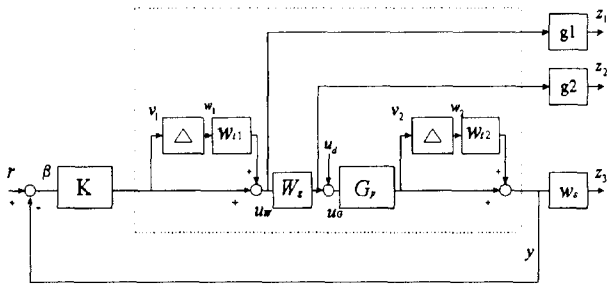


그림 2. 제어 시스템의 구조  
Figure 2. Control System Structure

력을 제어하는 신호는 기준입력  $\beta$ 와 센서 되먹임 신호이며 제어기는 볼록 계수화법에 의해 구해지는  $H_\infty$  제어기이다. <그림 2>를 바탕으로 식(2.1)과 같은 형태로 문제설정을 한 후 식(2.2)의 형태로 변환된 식이 볼록 계수화법에 적용된다.

보일러 시스템을 제어하기 위한 제어시스템 설계의 과정을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모델링 오차 분석 및 주파수특성 분석  
동작점에 따른 모델링 오차, 주요한 외란 및 잡음 등의 주파수특성을 분석한다.
- 2) 루우프 형성  
모델링 오차 분석에 의하여 가중함수  $W_s$ 를 선정하고 루우프형성을 한다.
- 3)  $g_1, g_2, w_s, w_n, w_e$  설정.
- 4) 식(2.2)와 같은 표준화된  $H_\infty$  구조로의 변환.
- 5) 볼록 계수화법에 의한 제어기 구성.

이렇게 해서 구해진 제어기  $K$ 는 선형화 모델에 대한 제어기이므로 비선형 모델에 적용하기 위해서는 실제 제어량은 동작점에서의 입력  $u_0$ 와 결합하여  $u = u_0 + \delta u$ 로 구해진다. 운전중에 출력의 변화가 필요한 경우에는  $\gamma$ 값을 조절하여 추종성을 조절할 수 있다.

#### 4. 모의 실험

설계된 제어 시스템의 성능을 확인하기 위해서 모의실험을 수행한다. 이 실험에서는 실제플랜트 대신 Pellegrinetti등이 제안한 아래와 같은 Abbott 발전소 보일러의 비선형 동특성 모델을 사용한다. [1]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= c_{11}x_4(t)x_1^{9/8}(t) + c_{12}u_1(t-\tau_1) - c_{13}u_3(t-\tau_3) + c_{14} \\ \dot{x}_2(t) &= c_{21}x_2(t) + \frac{c_{22}u_2(t-\tau_2) - c_{23}u_1(t-\tau_1) - c_{24}u_1(t-\tau_1)x_2(t)}{c_{25}u_2(t-\tau_2) - c_{26}u_1(t-\tau_1)} \\ \dot{x}_3(t) &= -c_{31}x_1(t) - c_{32}x_4(t)x_3(t) + c_{33}u_3(t-\tau_3) \\ \dot{x}_4(t) &= -c_{41}x_4(t) + c_{42}u_1(t-\tau_1) + c_{43} + c_{44}n_5(t) \\ y_1(t) &= c_{51}x_1(t-\tau_4) + n_1(t) \\ y_2(t) &= c_{61}x_2(t-\tau_5) + n_2(t) \\ y_3(t) &= c_{70}x_1(t-\tau_6) + c_{71}x_3(t-\tau_6) + c_{72}x_4(t-\tau_6)x_1(t-\tau_6) \\ &\quad + c_{73}u_3(t-\tau_3-\tau_6) + c_{74}u_1(t-\tau_1-\tau_6) \end{aligned}$$

$$+ \frac{[c_{75}x_1(t-\tau_6) + c_{76}][1 - c_{77}x_3(t-\tau_6)]}{x_3(t-\tau_6)[x_1(t-\tau_6) + c_{78}]} + c_{79} + n_3(t)$$

$$y_4(t) = [c_{81}x_4(t-\tau_7) + c_{82}]x_1(t-\tau_7) + n_4(t)$$

여기에서, 상태변수  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 는 각각 드럼 증기압 (kgf/cm<sup>2</sup>), 배기 가스내의 산소함유율(%), 시스템의 유체밀도 (kg/m<sup>3</sup>), 부하외란과 관련된 시스템 외부로부터의 변수이다. 제어입력  $u_1, u_2, u_3$ 는 각각 보일러 연료 조절기의 위치, 터빈으로 가는 증기의 양을 조절하는 밸브의 위치, 급수조절기의 위치이다. 제어입력들은 모두 정규화되었으며 다음과 같은 제한을 갖는다.

$$\begin{aligned} 0 < u_1 \leq 1, \quad |\dot{u}_1| &\leq 0.007/\text{sec} \\ 0 \leq u_2 \leq 1, \quad -2/\text{sec} \leq \dot{u}_2 &\leq 0.02/\text{sec} \\ 0 \leq u_3 \leq 1, \quad |\dot{u}_3| &\leq 0.05/\text{sec} \end{aligned} \quad (4.1)$$

출력  $y_1, y_2$ 는 각각 측정된 드럼압력과 배기가스 내의 산소량을,  $y_3$ 는 드럼의 수위 (in.)를,  $y_4$ 는 증기발생률 (kg/sec)을 나타내며,  $n_i$ 는 측정잡음으로서 영평균 백색잡음에 의해 구동되는 1차 모델의 유색잡음으로 설정된다. 잡음의 모델과 시간지연상수는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} W_n &= \text{diag}(n_1, n_2, n_3, n_4), \\ n_1 &= \frac{0.75s + 0.1}{s + 0.001} u_{m1}, \quad n_2 = \frac{0.019s + 0.001}{s + 0.024} u_{m2}, \\ n_3 &= \frac{0.105s + 0.038}{s + 0.01} u_{m3}, \quad n_4 = \frac{0.01s + 0.0001}{s + 0.001} u_{m4}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\tau_1 = 2, \tau_2 = 2, \tau_3 = 3, \tau_4 = 3, \tau_5 = 4, \tau_6 = 10, \tau_7 = 2 \quad (4.3)$$

여기에서  $u_{mi}$  ( $i = 1, \dots, 5$ )는 영평균 백색잡음으로 설정한다. 위의 비선형 모델은  $\dot{x} = f(x, u)$ 와  $y = g(x, u)$ 로 표시될 수 있다. 이 비선형 모델에 선형 제어기를 적용하기 위해서 Taylor 급수 근사를 이용하여 동작점에서 선형화시킨다. 선형화된 모델은 모델오차분석을 통해 얻은 주요 주파수정보를 이용하여 루우프형성의 과정을 통해  $W_s, G_s$ 의 주파수 특성이 <그림3>의 (b)와 같이 되도록 설정한다. 이때의 루우프형성 가중행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W_s &= \text{diag}(w_1, w_2, w_3) \\ w_1 &= \frac{(s+0.08)}{(s+0.1)(1.25s+0.0001)}, \quad w_2 = \frac{(s+0.1)}{(s+0.1)(1.25s+0.0001)}, \\ w_3 &= \frac{(s+1.5)}{(s+0.8)(1.25s+0.0001)} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$w_s$ 는 0.005의 크기를 가지는 단위행렬이고  $g_1, g_2, w_n, w_e$ 들은 각각 단위행렬로 정하였다. 이 행렬들의 값의 변화는 각각의 행렬에 가중치를 곱함으로써 행하고, 가중치 변화의 의미는 견실안정도와 견실성능간의 상호보완문제를 조정하는 것이다.

증기 발생량의 조절을 위한 부하의 조절 및 기타 출력의 변화는 수요 전력량의 변화에 따른 효율적인 보일러 운전을 위해 반드시 필요한 요소이다. 그리고 보일러 제어시에 가장 어려운 요소는 드럼의 수위 제어인데 그 까닭은 비최소위상 특성을 갖고 있기 때문이다. 본 실험에서는 여러 불확실적인 요소들과 동작점의 변화에 대한 성능 견실성과 안정도를 검토한다.

우선 모든 경우에 드럼 압력과 산소 함유율의 기준 입력을 단위계단형태로 변화 시켰을 때의 보일러 시스템의 임·출력의 변화를 보았고 불확실적인 요소에 대한 검토를 위해 다시 두가

지의 경우로 실험하였다. 유색잡음 형태의 측정잡음을 고려하는 경우와 이를 포함하며 보일러의 나머지 불확실적인 요소들(입·출력의 불확실성으로 간주하고 백색잡음의 형태로 더하여 실험하는 경우이다. 우선 드럼 압력은 320PSI 에서 330PSI로, 산소 함유율은 2.5%에서 4.0%로 기준입력을 변화시켰다. 그리고 불확실성 고려를 위해 측정잡음을 식(4.2)와 같은 유색잡음으로 주었다. 이 경우에 드럼 압력과 연소후 산소량은 기준 입력을 충실히 추종하며, 드럼의 수위는 동작점 변화시 얼마간 요동을 하지만 곧 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 그리고 제어 입력 신호는 그 크기와 변화율이 모두 제한된 범위내에서 동작된다(그림4).

다음은 측정잡음을 제외한 보일러의 다른 불확실 요소들 즉 녹승과 달음에 의한 계통 계수의 변화, 시간지연요소, 연료발열량의 변화, 드럼 동역학의 불확실성, 시스템의 비선형성등을 입·출력의 비구조화된 불확실성으로 보고 백색잡음을 입·출력 측에 줌으로써 측정잡음과 같은 구조화된 불확실성과 나머지에 대한 비구조화된 불확실성 모두가 동시에 존재할 경우에 대해 실험을 하였다. 이 경우에도 동작점 변화에 상관없이 드럼 압력과 연소후 산소량이 기준입력을 충실히 추종하며 드럼의 수위도 일정하게 유지됨을 알 수 있다.(그림5)

## 5. 결론

이 논문에서는 산업용 보일러 시스템을 효과적으로 운용하기 위한 제어시스템에 관해 다루었다. LMI를 이용하여 불룩 개념에서 설계된  $H_\infty$  제어를 이용한 이 제어시스템은 단일 제어 기임에도 불구하고 불확실성에 대한 견실 안정도를 유지하며 좋은 성능 또한 보임을 알 수 있다. 그러나 이 논문에서 제시하는 설계법의 문제점은 가중행렬 및 루우프 형성의 과정에서 많은 시행착오가 이루어진다는 점이다. 이러한 문제점은 앞으로 더 많은 연구를 통해 해결되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1]G.Pellegrinetti and J.Bentsman, " $H_\infty$  controller Design for Boilers," *Int. J. Robust and Nonlinear Control*, vol.4, pp. 645-671, 1994.
- [2]J.C.Doyle, K.Glover, P.P.Khargonekar and B.A.Francis, "State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems," *IEEE Trans. on Automat. Contr.*, vol. AC-34, pp. 831-847, 1989.
- [3]P.Gahinet, "A Convex Parametrization of  $H_\infty$  Suboptimal Controllers", *Proc. CDC*, pp.937-942, 1992.
- [4]P.Gahinet, "Reliable Computation of  $H_\infty$  Central Controller -s near the Optimum", *Proc. Amer. Contr. Conf.*, pp.738-742, 1992.
- [5]P.Gahinet and P.Apkarian, "A Linear Matrix Inequality Approach to  $H_\infty$  control", *Int. J. Robust Nonlinear Control*, pp. 421-448, 1994.
- [6]R.M.Redheffer, "On a certain linear fractional transformation," *J. Maths. Phys.*, pp.269-286, 1960.
- [7]R.B.Bell and K. J. Åström, "Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: data logs and parameter estimation for a 160MW unit," *Report TFRT-3192*, Lund

Institute of Technology, Sweden, 1987.

- [8]S.Skogestad and I.Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control*, John Wiley & sons, 1996.

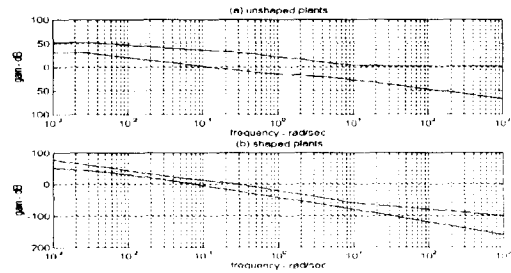


그림 3. 공칭모델과 형성화된 모델의 특이치선도  
Figure 3. Singular value Plots for the nominal plants and shaped plants

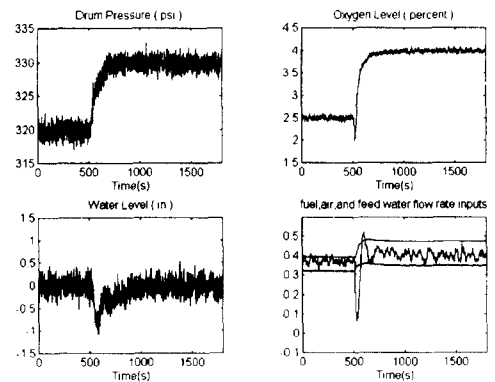


그림 4. 드럼압력과 산소함유정도의 기준입력을 바꾸고 구조화된 불확실성을 고려한 경우에 비선형 폐루우프 시스템의 시간응답.

Figure 4. Time response of nonlinear closed-loop system to a change in pressure and oxygen reference level and to a structured uncertainty.

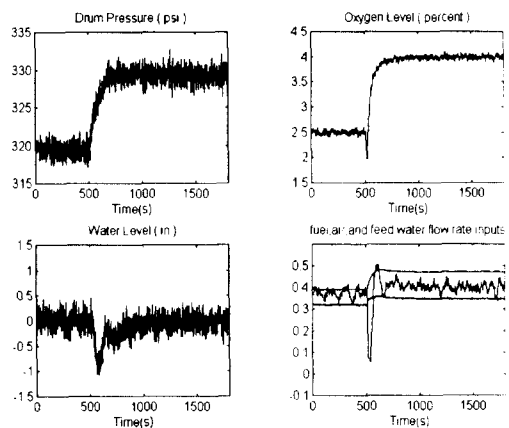


그림 5. 드럼압력과 산소함유정도의 기준입력을 바꾸고 구조화된 불확실성과 비구조화된 불확실성을 함께 고려한 경우에 비선형 폐루우프 시스템의 시간응답.

Figure 5. Time response of nonlinear closed-loop system to a change in pressure and oxygen reference level and to a structured and unstructured uncertainty.