

# 유전 알고리즘을 이용한 모델 추종형 최적 보일러-터빈 H<sub>∞</sub> 제어 시스템의 설계

## A Design on Model Following Optimal Boiler-Turbine H<sub>∞</sub> Control System Using Genetic Algorithm

\* 황 현 준\* · 김 동 완\*\* · 정 호 성\*\*\* · 박 준 호\* · 황 창 선\*

\* 부산대학교 전기공학과(Tel:+82-51-510-2367; Fax:+82-51-513-0212; E-mail:hhj@hyowon.pusan.ac.kr)

\*\* 동명전문대학 전기과(Tel:+82-51-620-3416; Fax:+82-51-620-3415; E-mail:dongwan@yongma.dmj.ac.kr)

\*\*\* 연암공업전문대학 전자과(Tel:+82-591-751-2057; Fax:+82-591-751-2053; E-mail:jhs0121@bjo.yonam-c.ac.kr)

**Abstracts** The aim of this paper is to suggest a design method of the model following optimal boiler-turbine H<sub>∞</sub> control system using genetic algorithm. This boiler-turbine H<sub>∞</sub> control system is designed by applying genetic algorithm with reference model to the optimal determination of weighting functions and design parameter  $\gamma$  that are given by Glover-Doyle algorithm which can design H<sub>∞</sub> controller in the state space. The first method to do this is that the gains of weighting functions and  $\gamma$  are optimized simultaneously by genetic algorithm. And the second method is that not only the gains and  $\gamma$  but also the dynamics of weighting functions are optimized at the same time by genetic algorithm. The effectiveness of this boiler-turbine H<sub>∞</sub> control system is verified and compared with LQG/LTR control system by computer simulation.

**Keywords** Model Following Optimal Boiler-Turbine H<sub>∞</sub> Control System, Genetic Algorithm, Weighting Functions, Design Parameter  $\gamma$ , Glover-Doyle Algorithm, LQG/LTR Control System

### 1. 서 론

1980년대 초반 G. Zames에 의해 개발된 H<sub>∞</sub> 제어이론은 모델링 오차에 대한 시스템의 안정성을 보장하며 설계사양에 따른 만족스러운 명령추종성을 가지는 강인한 제어를 설계하는 것이다. 또한 1988년 K. Glover와 J. C. Doyle<sup>[1]</sup>은 상태공간에서 두개의 대수 리카티 방정식(algebraic Riccati equation)을 풀어 강인한 안정성 문제의 해를 구하는 Glover-Doyle 알고리즘을 제시하였다.

최근까지 H<sub>∞</sub> 제어를 설계하기 위한 적절한 가중치 함수(weighting function)와 설계 파라메타  $\gamma$ 의 선정은 최적의 가중치 함수와  $\gamma$ 를 선정하기 위한 다수의 방법들<sup>[2,3]</sup>이 발표되었음에도 불구하고 실제 적용상의 어려움 등으로 인하여 시행착오(trial-and-error)적인 방법<sup>[3,4]</sup>에 크게 의존하고 있다. 실제로 최적의 가중치 함수와  $\gamma$ 를 선정하기 위한 대부분의 방법들은 특정한 조건하에서 복잡한 최적화의 과정을 요구하고 있으며 가중치 함수들과  $\gamma$ 사이의 상호의존성<sup>[5]</sup>에도 불구하고 어느 한쪽을 고정시키고 최적화를 행하므로 동시최적화를 할 수 없는 결점이 있다.

1970년대 초반 J. Holland에 의해 제시된 유전 알고리즘(genetic algorithm)<sup>[6]</sup>은 자연계에 존재하는 적자생존의 원리를 이용하여 적합도가 큰 문자열(string)을 다음 세대에 복제함으로써 진역해를 찾아가는 최적화 기법중의 하나이다. 유전 알고리즘은 기존의 최적화 이론들과는 근본적으로 다른 중요한 특징들을 가지고 있다. 즉 목적함수에 연속미분조건이 없으며 다수의 변수들을 하나의 문자열로 부호화(coding)함으로써 병렬연산 및 동시최적화가 가능하다. 이러한 이 유들로 인해 유전 알고리즘은 최근 주목받는 최적화 기법중의 하나가 되었으며 특히 공학적인 분야에서 지능제어(intelligence control)와 결합하여 많은 적용사례들이 발표되고 있다.

본 연구에서는 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수와 설계 파라메타  $\gamma$ 를 동시에 최적화함으로써 동작점의 변화에 따른 시스템의 모델링 오차 및 상태 변수들의 결합에도 불구하고 강인한 안정성과 기준모델에 따른 최적의 명령추종성을 가지는 모델 추종형 보일러-터빈 H<sub>∞</sub> 제어 시스템을 설계한다. 이를 위한 첫 번째 방법은 강인

한 안정성을 가지는 해집단내에서 유전 알고리즘을 사용하여 설계사양에 따른 기준모델의 출력을 최적으로 추종하도록 가중치 함수의 게인(gain) 및 설계 파라메타  $\gamma$ 를 동시에 최적화하는 것이고 두 번째 방법은 게인 및 설계 파라메타  $\gamma$ 와 함께 가중치 함수의 동특성(dynamics)을 최적화하는 것이다. 끝으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 설계된 보일러-터빈 H<sub>∞</sub> 제어 시스템의 성능을 LQG/LTR 제어 시스템과 비교고찰하고 그 유용성을 확인한다.

### 2. 다변수 보일러-터빈 시스템

본 연구에서는 160MW급 화력발전소용 보일러-터빈 시스템에 대한 Bell과 Åström의 비선형모델을 사용하여 다변수 보일러-터빈 H<sub>∞</sub> 제어를 설계한다. 주어진 시스템은 상태변수들의 결합으로 비선형성이 강하며 일반적인 공정 시스템(process system)으로써 시스템의 응답속도가 비교적 느리다. 보일러-터빈 시스템의 비선형모델은 식(2.1)과 같다.

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

여기서  $x_1, x_2, x_3$ 는 각각 드럼 증기압[kg/cm<sup>2</sup>], 전기적 출력[MW], 드럼내의 유체밀도[kg/cm<sup>3</sup>]를,  $u_1, u_2, u_3$ 는 보일러 연료 조절기의 위치, 증기 조절밸브의 위치, 급수 조절기의 위치를 나타낸다. 또한 출력  $y_3$ 는 드럼수위[m]를 나타내며  $a_{cs}$ 는 증기의 질을 나타내는 계수이고  $q_e$ 는 증기의 증발률[kg/sec]이다. 한편 H<sub>∞</sub> 제어를 설계하기 위한 선형모델은 비선형 모델에 대한 공칭동작점(nominal operation point)에서의 Tayer 급수 근사화를 통하여 얻는다. 본 연구에서는 중간부하점(half load point)을 공칭동작점으로 잡았으며 이 때의 상태공간모델은 참고문헌[7]에 제시되어있으므로 이를 생략한다.

### 3. 보일러-터빈 $H_\infty$ 제어 시스템의 설계

$H_\infty$  제어이론은 주어진 가격함수의  $\infty$ -노름(norm)을 최소화하여 모델링 오차에 대한 시스템의 안정성을 보장하며 만족스러운 명령추종성을 가지는 강인한 제어를 설계하는 것이다. 여기서 플랜트 및 구동기 등으로 이루어진 일반화 플랜트  $P(s)$ 에 대해 외부입력과 오차신호를 각각  $w(s)$ ,  $z(s)$ 로 정의하고 제어기  $K(s)$ 를 사용하여  $w(s)$ 와  $z(s)$ 사이의 전달함수를 구하면 다음과 같은 선형분수변환(linear fractional transformation)식  $F(P, K)$ 를 얻을 수 있다.

$$z(s) = F(P, K)w(s) = [P_{11} + P_{12}K(1 - P_{22}K)^{-1}P_{21}]w(s) \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \text{단 } P_{11}(s) &: p_1 \times m_1, P_{12}(s) : p_1 \times m_2 \\ P_{21}(s) &: p_2 \times m_1, P_{22}(s) : p_2 \times m_2 \end{aligned}$$

따라서  $H_\infty$  제어문제는 일반화 플랜트  $P(s)$ 와 제어기  $K(s)$ 로 이루어진 전체 폐루프 시스템을 안정하게 하고 외부입력과 오차신호사이의 전달함수인 선형분수변환식  $F(P, K)$ 의  $H_\infty$ -노름을 최소화하는 제어기  $K(s)$ 를 찾는 문제가 된다. 즉  $H_\infty$  제어문제는 식(3.2)와 같다.

$$\text{minimize } \|F(P, K)\|_\infty \quad (3.2)$$

$$\text{여기서 } F(P, K) \in RH_\infty$$

그런데 일반적으로  $\infty$ -노름을 정확히 계산할 수 없으므로 다음과 같이 적절한 상한치  $\gamma (> 0)$ 를 주고 안정한 제어기  $K(s)$ 를 찾는다.

$$\|F(P, K)\|_\infty < \gamma \quad (3.3)$$

본 연구에서는 상대공간에서 두개의 대수 리카티 방정식을 풀어 일반화 플랜트와 같은 차수의 제어기를 조직적으로 구할 수 있는 Glover-Doyle 알고리즘<sup>[1]</sup>을 사용하여 보일러-터빈  $H_\infty$  제어를 설계한다. 한편 선형분수변환식  $F(P, K)$ 에 대한 혼합감도문제(mixed sensitivity problem)<sup>[5]</sup>를 풀어 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템을 구성하기 위해서는 시스템의 충분한 해석을 통해 적절한 가중치 함수들을 선정하는 것이 중요하다. 일반적으로 가중치 함수는 외란  $D_d(s)$ 와 모델링 오차  $E_m(s)$ 에 대해 식(3.4)와 식(3.5)를 만족하도록 모델링한다. 여기서  $W_1(s)$ 와  $W_2(s)$ 는 각각 외란과 모델링 오차에 의해 결정되는 감도(sensitivity)함수  $S(s)$  및 상보(complementary)감도함수  $T(s)$ 의 가중치 함수이다.

$$|D_d(j\omega)| \leq |W_1(j\omega)|, \text{ at low frequencies} \quad (3.4)$$

$$|E_m(j\omega)| \leq |W_2(j\omega)|, \text{ at high frequencies} \quad (3.5)$$

식(2.5)로 주어지는 보일러-터빈 시스템의 모델링 오차  $E_m(s)$ 는 20 [rad/sec]이상의 고주파수역에서 에너지를 가진다. 한편 시스템의 응답 속도가 느리므로 외란의 유효주파수도 0.05[rad/sec]이하로 비교적 낮다고 가정할 수 있다. 따라서 외란  $D_d(s)$ 는 식(3.6)과 같이 가정한다.

$$D_d(s) = 0.02 \times \frac{1}{s} \times 1_3 \quad (3.6)$$

본 연구에서는 시스템의 응답속도와 외란제거 및 강인한 안정성 등을 고려하여 0.15[rad/sec](0.05 < 0.15 < 20[rad/sec])정도에서 게인교차 주파수(gain crossover frequency)  $\omega_c$ 를 가지도록 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템을 설계한다. 그리고 설계된 제어 시스템은 정상상태값의 10%이내에서 최대 오버슈트를 가지도록 한다. 여기서 혼합감도문제에 따른 가중치 함수의 조건식 식(3.4), 식(3.5) 및 위의 설계 사양들을 동시에 만족하도록 여러번의 시행착오를 거쳐 선정된 가중치 함수  $W_1(s)$ ,  $W_2(s)$  및 설계 파라메타  $\gamma$ 는 각각 다음과 같다.

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} 0.0010 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0011 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0012 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\times \frac{(s-5)}{s^2 + (0.0001+0.05)s - (0.0001 \times 0.05)} \in RH_\infty$$

$$W_2(s) = \frac{50 \times (s+10)}{s+1000} \times 1_3 \in RH_\infty \quad (3.8)$$

$$\gamma = 1.5 \quad (3.9)$$

### 4. 유전 알고리즘을 이용한 모델 추종형 최적 보일러-터빈 $H_\infty$ 제어기의 설계

최근까지  $H_\infty$  제어를 설계하기 위한 적절한 가중치 함수의 선정은 다수의 방법들이 발표되었음에도 불구하고 실제 적용상의 어려움 등으로 인하여 3장에서와 같은 시행착오적인 방법에 크게 의존하고 있다. 그런데 감도 및 상보감도함수 사이의 구속조건(trade-off)으로 인해 가중치 함수들사이에도 구속조건이 존재<sup>[4]</sup>한다. 즉  $W_1(s)$ 의 게인을 크게하면 시스템의 성능이 향상되지만 안정성이 저하된다. 반대로  $W_2(s)$ 의 게인을 크게하면 안정성이 향상되고 성능은 저하된다. 한편 설계 파라메타  $\gamma$ 도  $W_2(s)$ 와 비슷한 특성을 가지며 이를 세가지 요소들이 시스템의 성능과 안정성에 미치는 영향의 정도도 각각 상이하다. 그러므로  $H_\infty$  제어를 설계할 때 시행착오법에 의해 어느 한 쪽을 고정시키고 단지 게인조정만을 통해 최적의 가중치 함수와  $\gamma$ 를 선정한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 또한 이런 이유로 가중치 함수  $W_1(s)$ ,  $W_2(s)$  및 설계 파라메타  $\gamma$ 의 동시 최적화가 필요하다. 따라서 본 장에서는 병렬연산 및 동시 최적화가 가능한 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수와 설계 파라메타  $\gamma$ 를 선정함으로써 기준모델에 따른 최적의 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템을 설계한다.

#### 4.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘(simple genetic algorithm, SGA)은 자연 유전학에 기초한 최적화 기법중의 하나로서 적자생존에 따른 확률적인 방법에 의해 최적해를 찾아가므로 기존의 최적화 방법들과는 다른 중요한 특징들을 가지고 있다. 유전 알고리즘에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌[6]에 제시되어 있으므로 본 연구에서는 이를 생략한다. 또한 유전 알고리즘의 각 단계에서 필요한 문자열의 길이(m), 해집단의 크기(n), 세대수(z) 그리고 교배 확률( $P_c$ ) 및 돌연변이 확률( $P_m$ ) 등은 경험적인 방법에 의해 적절히 선정하기로 한다.

#### 4.2 가중치 함수 및 설계 파라메타 $\gamma$ 의 동시 최적화

##### 방법 1 : 가중치 함수의 게인과 $\gamma$ 의 동시 최적화

3장에서 선정한 가중치 함수에 다음 식들과 같이 게인 파라메타( $g_{w1}$ ,  $g_{w2}$ ),  $i = 1, 2, 3$ 을 변수로 주고  $\gamma$ 와 함께 동시에 최적화한다.

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & 0 & 0 \\ 0 & w_{12}(s) & 0 \\ 0 & 0 & w_{13}(s) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$= \frac{g_{w1} \times (s-5)}{s^2 + (0.0001+0.05)s - (0.0001 \times 0.05)} \times 1_3$$

$$W_2(s) = \frac{g_{w2} \times (s+10)}{s+1000} \times 1_3 \quad (4.2)$$

여기서 각각의 탐색구간(search domain)  $D_1 \sim D_3$ 는 식(4.3) ~ 식(4.5)와 같이 선정하였으며 특히 하한치  $L_1$ 과  $L_2$ 는 식(3.4)와 식(3.5)를 만족하도록 결정하였다.

$$D_1 : L_1 = 0.0005 \leq g_{w1} \leq 0.01 = U_1 \quad (4.3)$$

$$D_2 : L_2 = 30 \leq g_{w2} \leq 100 = U_2 \quad (4.4)$$

$$D_3 : 0 < L_3 = 0.5 \leq \gamma \leq 3 = U_3 \quad (4.5)$$

**방법 2 : 가중치 함수의 개인, 동특성 및  $\gamma$ 의 동시 최적화**  
 개인 파라메타와 함께 가중치 함수의 형태를 결정하는 동특성 파라메타( $D_{w1i}, D_{w2i}, D_{w3i}$ ),  $i = 1, 2, 3$ 을 다음 식들과 같이 변수로 주고  $\gamma$ 와 함께 동시에 최적화한다.

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & 0 & 0 \\ 0 & w_{12}(s) & 0 \\ 0 & 0 & w_{13}(s) \end{bmatrix} \\ = \frac{g_{w1} \times (s + p_{w1})}{s^2 + (0.0001 + p_{w2})s + (0.0001 \times p_{w2})} \times I_3 \quad (4.6)$$

$$W_2(s) = \frac{g_{w2} \times (s + p_{w3})}{s + 100 \times p_{w3}} \times I_3 \quad (4.7)$$

여기서 동특성 파라메타  $p_{w1i}, p_{w2i}, p_{w3i}$ 의 탐색구간  $D_4 \sim D_6$ 는 식(4.8) ~ 식(4.10)과 같다.

$$D_4 : L_4 = 0.1 \leq p_{w1} \leq 10 = U_4 \quad (4.8)$$

$$D_5 : 0 < L_5 = 0.01 \leq p_{w2} \leq 0.5 = U_5 \quad (4.9)$$

$$D_6 : 0 < L_6 = 0.1 \leq p_{w3} \leq 20 = U_6 \quad (4.10)$$

방법 1(방법 2)에 따라 도입된 가중치 함수의 개인, 동특성 파라메타 및  $\gamma$ 를 동시에 최적화하기 위해 이들 5개(12개의 변수를 하나의 문자열에 적절한 크기( $m_j, j = 1, 2, \dots, 5(12)$ )의 비트(bit)수(5 ~ 8bits)로 부호화한다. 비트수  $m_j$ 로 부호화된 임의의  $j$ 번째 파라메타  $X_j$ 에 대하여 탐색구간  $D$ 와의 관계식을 유도하면 식(4.11)과 같다. 여기서  $x$ 는  $m_j$ 의 비트수를 가지는 2진수의 현재 정수값이며  $D$ 의 상·하한치는 각각  $U$ 와  $L$ 이다.

$$X_j = L + \frac{x}{2^{m_j} - 1} (U - L) \quad (4.11)$$

한편 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템이 가중치 함수들 및 설계 파라메타  $\gamma$ 와의 구속조건에도 불구하고 강인한 안정성을 보장하며 외란 제거 및 설계사양에 따른 만족스러운 응답속도를 가지기 위해서는 주어진 탐색구간의에도 최적화에 따른 실질적인 제한조건들이 필요하다. 이를 위해 외란  $D_d(s)$ 와 모델링 오차  $E_m(s)$  및 루프전달함수(loop transfer function)  $L(s)$ 에 대해 식(4.12) 및 식(4.13)과 같은 제한조건(constraint)<sup>[5]</sup>들을 주어 최적화를 행한다.

$$D_d(j\omega) \leq \underline{a}(L(j\omega)), \quad \text{at } \omega \leq \omega_l \quad (4.12)$$

$$\bar{a}(L(j\omega)) \leq E_m^{-1}(j\omega), \quad \text{at } \omega_h \leq \omega \quad (4.13)$$

여기서 상·하한치  $\omega_l$ 와  $\omega_h$ 는 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템의 응답속도( $\omega_c = 0.15[\text{rad/sec}]$ )와 외란 및 모델링 오차의 유효주파수를 고려하여 식(4.14)와 같이 선정하였다.

$$\omega_l = 0.05 < \omega_c < 0.2 = \omega_h \quad (4.14)$$

본 연구에서는 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템이 설계사양에 따른 최적의 명령추종성을 가지도록 식(4.15)와 같이 적절한 기준모델(reference model)을 선정된 후 그림 1과 같이 유전 알고리즘을 사용하여 플랜트의 출력이 기준모델의 출력을 추종하도록 하였다. 기준모델은 최적의 명령추종성 및 설계사양에 따른 시스템의 응답속도 등을 고려하여 대역폭(bandwidth)  $\omega_b$ 가  $0.15[\text{rad/sec}]$ ( $\cong \omega_c = 0.15[\text{rad/sec}]$ )정도이며 오버슈트가 없는 1차모델로 선정하였다.

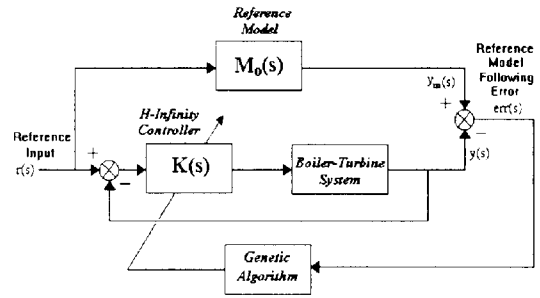


그림 1 유전 알고리즘을 이용한 모델 추종형 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템

Fig. 1 Model following boiler-turbine  $H_\infty$  control system using genetic algorithm

$$M_0(s) = \frac{0.15}{s + 0.15} \times I_3 \quad (4.15)$$

또한 시스템의 출력  $y_i(k(t))$ 와 기준모델의 출력  $y_{mi}(k(t))$ 와의 차이를 기준모델 추종오차  $err_{ij}(k(t)) = \text{abs}(y_{mi}(k(t)) - y_i(k(t)))$ 로 하여 적합도  $fit$ 를 구하면 식(4.16) 및 식(4.17)과 같다. 단  $\text{abs}(\cdot)$ 는 절댓값을,  $i, j = 1, 2, 3$ 은 각각  $i$ 번째 입력과  $j$ 번째 출력을 나타낸다. 여기서  $k(t+1) = k(t) + T_s$ ,  $k(1) = 0[\text{sec}]$ 이며  $T_s = 3.5[\text{sec}]$ 는 샘플링 시간(sampling time)을 나타낸다.

$$err_{fit} = \frac{1}{9} \times \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left( \sum_{k=1}^{30} \text{abs}(err_{ij}(k(t))) \right) \\ = \frac{1}{9} \times \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left( \sum_{k=1}^{30} \text{abs}(y_{mi}(k(t)) - y_i(k(t))) \right) \quad (4.16)$$

$$fit = \frac{1}{1 + err_{fit}} \quad (4.17)$$

## 5. 시뮬레이션 및 비교고찰

본 장에서는 4장에서 제시한 설계 방법 1과 방법 2에 따라 모델 추종형 최적 보일러-터빈  $H_\infty$  제어를 설계하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 성능을 비교고찰한다. 유전 알고리즘에서 사용된 파라메타 및 적합도와 이에 따라 선정된 가중치 함수의 개인 및 동특성 파라메타 그리고 설계 파라메타  $\gamma$ 는 표 1과 같다. 단 표 1에서는 비교고찰을 위하여 보일러-터빈 LQG/LTR 제어 시스템<sup>[7]</sup>과 3장에서 시행작업법에 따른 각각의 적합도를 함께 나타내었다.

그림 2 ~ 그림 4는 설계된 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템의 3개의 출력( $y_1$ : 드럼 증기압[ $\text{kg/cm}^2$ ],  $y_2$ : 전기적 출력[MW],  $y_3$ : 드럼수위[m])에 대한 각각의 단위 계단응답과 기준모델 추종오차를 함께 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 방법 2의 경우가 방법 1에 비해 상대적으로 %오버슈트가 작음을 알 수 있다. 따라서 적합도가 가장 높은 방법 2( $fit = 0.8826$ )의 경우가 기준모델의 응답에 가장 잘 추종하며 이에 따라 과도응답 특성이 LQG/LTR<sup>(7)</sup>( $fit = 0.5050$ ) 및 시행작업법( $fit = 0.6970$ )의 경우 뿐만 아니라 방법 1( $fit = 0.7678$ )의 경우에 비해 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 유전 알고리즘을 사용하여 가중치 함수와 설계 파라메타  $\gamma$ 를 동시에 최적화하는 2가지 방법을 각각 제시하고 시스템의 모델링 오차에 대한 강인한 안정성과 기준모델에 따른 최적의 명령추종성을 가지는 모델 추종형 보일러-터빈  $H_\infty$  제어 시스템을 설

표 1 유전 알고리즘에서 사용된 파라메타 및 적합도 그리고 선정된 게인 및 동특성 파라메타와  $\gamma$   
 Table 1 Parameters in SGA, fitness and gain, dynamics params and  $\gamma$  selected by SGA

	$g_{w1}$	$g_{w2}$	$g_{w3}$	$g_{w4}$	$\gamma$	$m/n/z$	$err_{\mu}/ft$
LQG/LTR <sup>(1)</sup>	.	.	.	.	.	.	0.9802/ 0.5050
Trial-&-Error	0.0010	0.0011	0.0012	50.0000	1.5000	.	0.4347/ 0.6970
Method1	0.0015	0.0012	0.0032	89.5276	1.2647	36/30/50	0.3024/ 0.7678
Method2	0.0030	0.0078	0.0024	35.0000	1.0556	75/30/50	0.1330/ 0.8826
	$D_{w1}$	$D_{w2}$	$D_{w3}$	$D_{w4}$	$D_{w5}$	$D_{w6}$	$D_{w7}$
Trial-&-Error	5.0000	5.0000	5.0000	0.0500	0.0500	0.0500	10.0000
Method1	5.0000	5.0000	5.0000	0.0500	0.0500	0.0500	10.0000
Method2	7.0378	0.8735	4.6992	0.3688	0.1373	0.1036	5.4276

계하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 설계된 보일러-터빈  $H_{\infty}$  제어 시스템의 성능을 LQG/LTR 제어 시스템과 비교고찰하고 그 유용성을 확인하였다. 가중치 함수의 게인만을 고려한 방법 1 및 시행착오법 그리고 LQG/LTR 제어 시스템의 경우는 동특성까지 고려한 방법 2의 경우보다 기준모델 추종오차가 상대적으로 크다. 따라서 설계사양에 따른 좀 더 나은 출력특성을 얻기 위해서는 방법 2와 같이 게인과 함께 가중치 함수의 동특성을 최적화하는 것이 필요하다. 또한 제시된 설계 방법은 최적화에 따른 제한조건 및 복잡한 최적화의 과정이 없으므로 실제의 제어 시스템 설계에 이를 보다 쉽게 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] K. Glover, J. C. Doyle, "State-Space Formulate for All Stabilizing Controllers That Satisfy An  $H_{\infty}$ -norm Bound and Relations to Risk Sensitivity", Systems & Control Letters, Vol. 11, pp. 167-172, 1988.
- [2] F. B. Yeh, T. S. Hwang, "Optimal Sensitivity Bound Estimation and Controller Design", Int. J. Control, Vol. 47, No. 4, pp. 979-984, 1988.
- [3] C. D. Yang, H. S. Ju, S. W. Liu, "Experimental Design of  $H_{\infty}$  Weighting Functions for Flight Control Systems", Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 17, No. 3, pp. 544-552, May-June, 1994.
- [4] S. Pannu, H. Kazerooni, G. Becker, A. Packard, " $\mu$ -Synthesis Control for a Walking Robot", IEEE Control Systems, pp. 20-25, February, 1996.
- [5] J. M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [6] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [7] W. H. Kwon, S. W. Kim, P. G. Park, E. K. Kim, "Design of a Boiler-Turbine Control System Using a Modified LQG/LTR Method", Trans. KIEE, Vol. 39, No. 2, pp. 199-209, February, 1990.

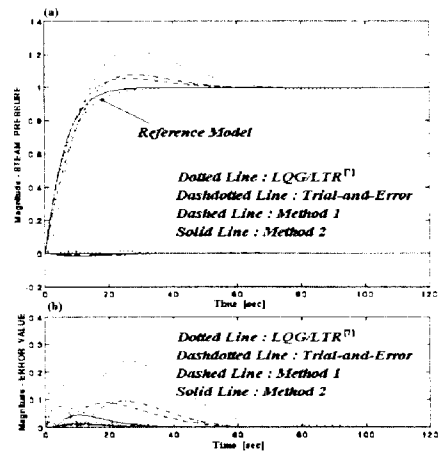


그림 2 (a) 드럼 증기압에 대한 단위 계단응답과 (b) 기준 모델 추종오차  
 Fig. 2 (a) Unit step response and (b) reference model following error of steam pressure

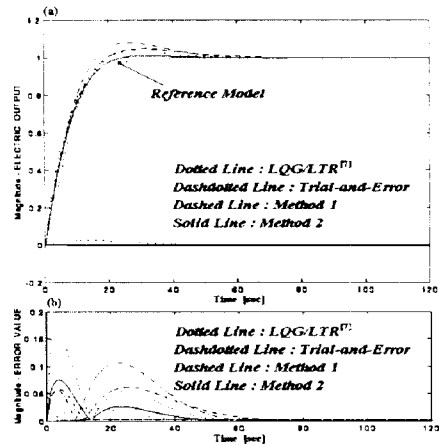


그림 3 (a) 전기적 출력에 대한 단위 계단응답과 (b) 기준 모델 추종오차  
 Fig. 3 (a) Unit step response and (b) reference model following error of electric output

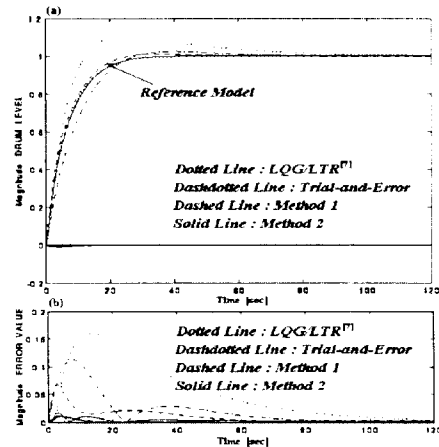


그림 4 (a) 드럼수위에 대한 단위 계단응답과 (b) 기준 모델 추종오차  
 Fig. 4 (a) Unit step response and (b) reference model following error of drum level