

보일러-터빈 시스템을 위한 다변수 퍼지 제어기 설계

Design of a Multivariable Fuzzy Controller for the Boiler-Turbine System

조 경 완, 김 상 우, 김 종 욱

(Kyoung Wan Cho, Sang Woo Kim, and Jong-Wook Kim)

Abstract : The demand for steam generators is increasing in industrial systems in which the design strategy should be implemented for safe and efficient operation of steam generators. It is, however, difficult to design a controller by the conventional method because of the nonlinear dynamics of the steam generator and influences by the set value or disturbance. This paper presents an automatic parameter optimization technique for a multivariable fuzzy controller using evolutionary strategy. At first, we use the steady state information such as a steady state gain matrix(SSGM) and a relative gain matrix(RGM). We can obtain much information on the control inputs and the outputs of the boiler-turbine system from the matrices. In order to determine the structure of the controller by using RGM and SSGM, the fuzzy rules are trained by evolutionary strategy. The good performance of the proposed multivariable fuzzy controller is verified through simulations.

Keywords : boiler-turbine system, multivariable fuzzy controller, evolutionary strategy, SSGM, RGM

I. 서론

다양한 환경에서 동작하는 화력 발전소의 보일러-터빈 시스템의 안정적 제어는 부하 추종, 안전 운전, 연료 절약 등에 필수적이다. 즉, 사용자의 전력 수요량을 외란에 상관 없이 잘 추종해야 하며 보일러 드럼을 보호하기 위해서 드럼내의 증기압과 수위를 잘 조절해야 한다. 이러한 목적을 이루기 위하여 많은 선형 제어 기법들이 사용되었다. 그러나 보일러 터빈은 시시각각으로 변하는 설정치나 외란 등에 영향을 많이 받으며, 변수들의 결합성이 큰 비선형 다변수 시스템이기 때문에 기존의 선형 제어 방식으로 제어하기에는 한계가 있다.

현재까지 연구된 제어 방식은 감결합(decoupling), 극배치(pole placement), 복소수 영역에서의 특성곡적 방법(characteristic loci), LQ조절기, INA(Inverse Nyquist Array), LQG/LTR 제어 등이 있다. 감결합 방법은 단일 입출력으로 설계가 용이한 반면 제어기가 복잡해지는 문제가 발생하며, 극배치 방법의 본질적인 한계는 설계자가 결정할 수 없는 영점의 위치가 시스템 응답에 영향을 주기 때문에 극점의 위치에 의해서 페루우프 시스템의 응답이 결정되지 않는다는데 있다. LQ 조절기는 관측자에 의해서 구현될 경우 그 견실성이 나빠질 수 있다는 문제점이 있다. 이상의 방법들의 가장 큰 특징은 특정 동작점에서 선형화된 모델을 이용한다는 것으로 동작점이 광범위하게 변하는 경우에는 적용 불가능하다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 이득 계획법이나 적응제어 방식을 사용할 수

있으나 제어기의 구조가 복잡해지는 단점이 생긴다[1][2].

선형제어 기법의 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서 퍼지 제어기 설계에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 퍼지 제어 방식은 숙련된 기술자로부터 얻어진 시스템에 대한 언어적 정보를 바탕으로 구현함으로써 수학적 모델링이 불가능하거나 비선형성이 강한 시스템에 대한 제어 방식으로 널리 사용되어 왔다[3]. 보일러-터빈 시스템의 퍼지 제어 방식으로 감결합 방식을 이용한 퍼지 제어기[4], 환산계수 동조기법을 이용한 퍼지 제어기[5], 기준 모델을 이용한 모델 추종형 퍼지 제어기[6], 신경회로망과 퍼지를 결합한 뉴로퍼지 제어기[7] 등이 연구되었다. 연구된 퍼지 제어기들은 모델의 비선형성을 극복하기 위하여 퍼지 제어기법을 사용하였을 뿐 퍼지 규칙과 멤버십 함수의 특성을 설계자가 직접 결정해야 하므로 많은 시간과 노력이 필요하다. 또한 현재까지 연구된 제어기는 대부분 SISO(Single-Input Single-Output)의 형태로 설계되었기 때문에 변수 상호간의 결합성이 큰 보일러-터빈 시스템의 동특성을 효율적으로 제어하기 힘들다. 특히, 터빈의 출력인 전력량과 보일러의 증기압은 밀접한 관계를 갖고 있으며 보일러의 수위도 증기압과 어느 정도 연관을 가지고 있다. 그러므로 이들의 연관성이 제어기 설계시 고려되어야만 한다. 예를 들면 요구되는 전력량이 갑자기 대규모로 증가할 경우 증기압도 동시에 증가시켜야 한다.

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 다변수 퍼지 제어 시스템을 설계하였다. 보일러-터빈 시스템의 입출력을 분석하여 제어기의 구조를 전력-증기압 제어기와 수위 제어기로 나누고 각각의 제어기를 다변수 퍼지 제어 기법을 이용하여 설계하였다. 다변수 퍼지 제어기의 경우 퍼지 규칙이 대단히 많기 때문에 설계자가 직접 이들 규칙을 일일이 설계하는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 많은 퍼지 규칙의 학습을 위하여 진화전략(evolutionary strategy)을 이용하였다. 컴퓨터 모의 실험을 통하여 설계

접수일자 : 2000. 7. 20., 수정완료 : 2001. 1. 3.

조경완 : 현대정보기술 컨설팅팀(wandil@postech.ac.kr)

김상우, 김종욱 : 포항공과대학교 전자·컴퓨터공학부(swkim@postech.ac.kr/kjwooks@postech.ac.kr)

※ 본 논문은 BK21 사업을 통하여 포항공과대학교 전자·컴퓨터공학부에 주어진 교육부의 재정지원과 한국전력공사(기초전력공학공동연구소 주관)의 지원에 의하여 연구하였습니다.

된 제어기의 성능을 검증하였으며 3개의 독립된 단일 입출력(SISO) 뉴로 퍼지 제어기[7]에 비하여 우수한 성능을 가짐을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 Bell과 Åström에 의하여 입증된 160MW 보일러-터빈 모델을 기술하였다. 3장에서는 상대이득행렬(Relative Gain Matrix, RGM)에 의한 입출력 변수 결합과 진화 전략을 이용한 다변수 퍼지 제어기 학습에 대해서 설명하였다. 4장에서는 컴퓨터 모의 실험을 통해서 제안된 제어기를 평가하였다. 끝으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 보일러-터빈 모델

보일러-터빈 시스템의 동특성은 설정치나 외부의 외란 등에 크게 영향을 받으며, 주요 변수들이 상호 결합되어 있는 다변수 비선형 모델로 묘사된다. 이러한 특성을 잘 나타내는 많은 비선형 모델 중에서 Bell과 Åström에 의하여 많은 시뮬레이션을 통하여 신뢰도가 입증된 160 MW 화력 발전소용 보일러-터빈 시스템의 동특성 모델을 본 연구에서 채택하였다[8]. 사용된 보일러-터빈의 사양과 대략적인 구조를 표 1과 그림 1에 나타냈다.

표 1. 보일러 터빈 시스템의 사양.

Table 1. Specification of a boiler-turbine system.

Rated power 160 MW	oil fired
Steam flow at rated load	140 Kg/sec
Drum steam pressure	140 Kg/cm ²
Superheated steam temperature	535 °C
Volume of drum	40 m ³
Volume of downcomers	11 m ³
Volume of risers	38 m ³
Mass of water in system at normal operating conditions	40,000 Kg
Mass of steam in system at normal operating conditions	2,000 Kg
Feedwater temperature	300 °C

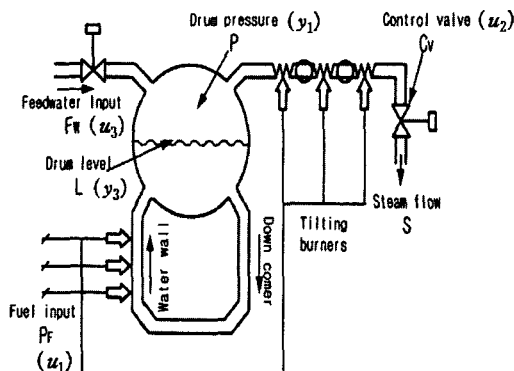


그림 1. 보일러 모델.

Fig. 1. Boiler-turbine system model.

이러한 보일러-터빈 시스템 모델은 다음과 같은 비선형 상태변수 방정식으로 묘사된다.

여기에서 상태변수 x_1, x_2, x_3 는 각각 드럼 증기압 (kg/cm^2), 전력량(MW), 드럼내의 유체의 농도(kg/cm^3)를 나타낸다. 제어 입력 u_1 은 보일러 연료 조절 밸브의 개도이며, u_2 는 터빈으로 가는 증기의 양을 조절하는 밸브의 개도이고, u_3 는 급수의 양을 조절하는 밸브의 개도이다. 제어 입력들은 모두 정규화 되었으며 다음과 같은 제한을 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\ \dot{x}_2 &= (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2 \\ \dot{x}_3 &= (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1)/85 \end{aligned} \quad (1)$$

$$y_1 = x_1, \quad y_2 = x_2$$

$$y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100a_{cs} + q_e/9 - 67.975)$$

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

출력 y_3 는 드럼의 수위(m)를 나타내며 a_{cs} 는 증기의 질을 나타내는 계수이고 q_e 는 증발률(kg/s)을 나타내며, 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} a_{cs} &= \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \\ q_e &= (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \end{aligned} \quad (3)$$

보일러-터빈의 중간 부하점 일 때 상태 변수는 $x_1^0 = 108$, $x_2^0 = 428$, $u_2^0 = 0.69$ 이고 이 때 입력값과 출력값은 $u^0 = [0.34 \ 0.69 \ 0.436]^T$, $y^0 = [108 \ 66.65 \ 0]^T$ 가 된다.

III. 진화 전략을 이용한 보일러-터빈 다변수 퍼지-제어기 설계

보일러-터빈 시스템은 입력이 3개, 출력이 3개인 다변수 비선형 시스템이다. 보통 퍼지 제어기 설계시 퍼지 입력은 기준 입력과 시스템 출력 사이의 오차와 오차에 대한 변화량이고 퍼지 제어기의 출력 변수는 제어량이다. 이런 방식으로 다변수 퍼지 제어기를 설계하게 되면 입력 변수는 모두 6개가 되고 출력 변수는 모두 3개가 된다. 입력 변수가 6개가 됨으로 인해서 퍼지 입력 영역을 각 5개로 구분하고 설계하면 모두 $5^6 \times 3$ 의 퍼지 규칙이 생성된다. 이와 같이 생성된 규칙 수가 너무 많기 때문에 설계자가 각각의 규칙을 직접 설계하는 것은 거의 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 다변수 퍼지 제어기의 구조를 유지하면서 규칙의 수를 줄이는 방법들과 학습에 의한 규칙 설정 방법들이 연구되어 왔다. 본 논문에서는 보일러-터빈 시스템의 입출력 특성을 분석하여 시스템을 두 개의 부시스템으로 나누어 규칙의 수를 줄이고 줄어든 규칙을 진화 전략을 이용하여 학습시켰다.

1. 상대이득행렬을 이용한 다변수 퍼지 제어기 구조결정
일반적으로 다변수 시스템에서는 제어 입력과 상태 변수간의 강한 결합성이 제어 성능에 큰 영향을 미치게 된다.

특히 시스템이 비선형일 경우나 외란이 존재하는 경우에는 영향 정도가 심하게 되어서 모든 출력에 영향을 미치게 된다. 이러한 다변수 시스템의 변수 상호간에 미치는 영향을 해석하기 위해서 본 논문에서는 Bristol에 의하여 제안된 RGM을 이용하였다[6]. RGM은 정상상태 정보만으로 입력변수와 출력변수간의 영향을 평가하는 수단이며 이때의 영향은 상대적인 정상상태이득을 의미한다. 개루우프 정상상태이득 요소 K_{ij} 는 j 번째 입력변수 u_j 를 제외한 모든 입력이 일정할 때 j 번째 입력변수에 대한 i 번째 출력변수의 비를 의미하며 $n \times n$ 정상상태이득행렬(Steady State Gain Matrix, SSGM)을 구성한다. 입력변수와 출력변수 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta y = K \Delta u \quad (4)$$

여기서 Δy 는 출력의 편차변수벡터이고, Δu 는 입력의 편차변수벡터이며 K 는 SSGM으로 (6)으로부터 계산되지만 (7)과 같이 근사적으로 구하는 경우도 많다. 보일러-터빈 시스템은 3입력 3출력이므로 다음과 같이 표현된다.

본 논문에서는 각각의 제어 입력에 계단함수를 입력하고 그 때의 각 출력 변수의 변화량을 측정하여 SSGM 값들을 근사적으로 구하게 되며 계산된 SSGM으로부터 가장 큰 절대값을 갖는 짝을 선택한다. 그러나 SSGM의

$$\Delta y = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}, \quad \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K_{11} = \left. \frac{\Delta y_1}{\Delta u_1} \right|_{u_2, u_3}, \quad K_{12} = \left. \frac{\Delta y_1}{\Delta u_2} \right|_{u_1, u_3}, \quad K_{13} = \left. \frac{\Delta y_1}{\Delta u_3} \right|_{u_1, u_2}$$

$$K_{21} = \left. \frac{\Delta y_2}{\Delta u_1} \right|_{u_2, u_3}, \quad K_{22} = \left. \frac{\Delta y_2}{\Delta u_2} \right|_{u_1, u_3}, \quad K_{23} = \left. \frac{\Delta y_2}{\Delta u_3} \right|_{u_1, u_2} \quad (6)$$

$$K_{31} = \left. \frac{\Delta y_3}{\Delta u_1} \right|_{u_2, u_3}, \quad K_{32} = \left. \frac{\Delta y_3}{\Delta u_2} \right|_{u_1, u_3}, \quad K_{33} = \left. \frac{\Delta y_3}{\Delta u_3} \right|_{u_1, u_2}$$

$$K_{ij} \approx \frac{y_i(u_1, u_2, \dots, u_j + \Delta u_j, \dots) - y_i(u_1, u_2, \dots, u_j, \dots)}{\Delta u_j} \quad (7)$$

각 요소는 단위가 다르기 때문에 크기에 대한 비교를 할 수 없게 된다. 따라서 단위에 무관하도록 한 RGM을 이용하여 입력 변수와 출력 변수 간의 짝을 결정하는데 사용한다. 이 때 RGM의 식은 (8)과 같이 정의한다.

$$\lambda_{ij} = \frac{\left. \frac{\Delta y_i}{\Delta u_j} \right|_{u_k=0, k \neq j}}{\left. \frac{\Delta y_i}{\Delta u_j} \right|_{y_k=0, k \neq i}} = \frac{\text{gain when the other loops are open}}{\text{gain when the other loops are closed}} \quad (8)$$

(8)의 의미를 살펴보면 분자항은 정상상태이득으로 Δu_j 이외의 다른 변수들을 상수로 고정시키고 Δu_j 에 대한 Δy_i 의 비를 구한 것이다. 분모는 Δy_i 를 제외한 다른 출력 변수들이 출력 설정 값으로 안정화 된 상태에서 얻어진 이득

비이다. 따라서 λ_{ij} 가 1에 가장 근접하는 입출력 짝을 선정하면 된다. λ_{ij} 가 1에 가까운 것이 없을 때는 비례환 상태 또는 제환 상태에서 계통 변수들간의 결합 정도가 매우 강한 것을 의미하므로 변수들은 짝을 이루기가 어렵다. RGM에서 음의 값을 보이는 것은 제어 입력을 크게 하면 관련된 출력은 오히려 감소함을 의미하므로, 음의 값을 가지는 짝은 배제한다. (4)와 (8)에 의하여 얻은 SSGM과 RGM은 다음과 같다.

$$SSGM = \begin{bmatrix} 352.0000 & -130.434 & -62.7907 \\ 235.6000 & 43.4782 & -28.2608 \\ 0.2353 & 0.5072 & 32.7294 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$RGM = \begin{bmatrix} 0.3360 & 0.6685 & -0.0046 \\ 0.6630 & 0.3331 & 0.0039 \\ 0.0010 & -0.0016 & 1.0006 \end{bmatrix} \quad (10)$$

RGM의 (1,1), (1,2), (2,1), (2,2)번째 원소들의 값을 보면 드럼 증기압(y_1)과 전력량(y_2)은 연료 및 증기 조절 밸브의 개도(u_1, u_2)와 상당한 연관성을 가지고 있음을 알 수 있으며, RGM의 (3,3)번째 원소의 값으로부터 드럼 내의 수위(y_3)는 수위 조절 밸브의 개도(u_3)에 상당한 관련성을 가짐을 알 수 있다. RGM은 위에서 언급했듯이 정상상태의 결과로만 얻은 결과이기 때문에 약간의 문제점을 가지고 있다. 드럼 내의 수위의 동특성은 ‘Shrink Swell’이란 현상[8]으로 인해 앞의 두 출력에 비해 다른 퍼지 규칙을 필요로 한다. 드럼 내의 급수를 증가시킬때 증가하는 초기에는 순간적으로 드럼내의 증기 방울이 응축되고 이 때문에 일시적으로 수위가 저하(shrink)되고 일정시간 이후에 수위는 다시 급수에 비례하여 증가를 보이게 된다. 마찬가지로 연료량의 증가는 증기 발생을 증가시켜 일시적으로는 증기 방울이 많아져 일시적으로 수위가 상승하게 되는 현상(swell)이 발생하고 이후 점차 증발량에 의한 수위감소가 나타나게 된다. 수위의 이러한 현상으로부터 드럼 내의 수위는 드럼 내의 증기압과 매우 밀접한 연관성을 지니고 있음을 알 수 있다. 따라서 최종적으로 다변수 퍼지

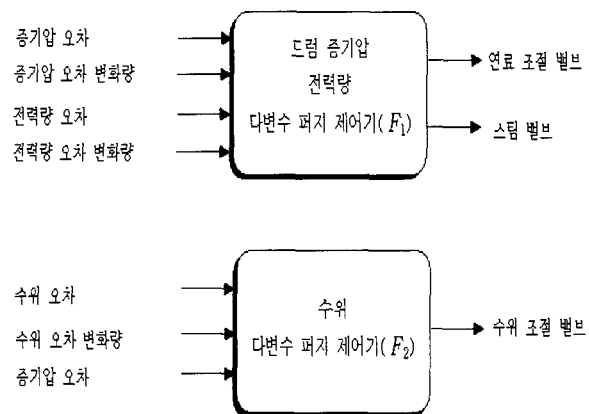


그림 2. 다변수 퍼지 제어기 입출력의 구성.

Fig. 2. Structure of input and output of multi-variable fuzzy controller.

제어기는 드럼 증기압과 전력량 제어를 위한 퍼지 제어기와 수위 조절을 위한 퍼지 제어기로 설계하였다. 각 다변수 퍼지 제어기의 구조는 그림 2와 같다.

2. 퍼지 제어기(fuzzy logic controller)

본 논문에서는 Sugeno-type으로 이루어진 퍼지 논리 시스템을 채택하였다[3].

$$\begin{aligned}
 R^1 &: \text{IF } a_1 \text{ is } A_1^1 \text{ and } \dots a_n \text{ is } A_n^1 \text{ THEN } \bar{y}^1 \\
 R^2 &: \text{IF } a_1 \text{ is } A_1^2 \text{ and } \dots a_n \text{ is } A_n^2 \text{ THEN } \bar{y}^2 \\
 &\vdots \\
 R^M &: \text{IF } a_1 \text{ is } A_1^M \text{ and } \dots a_n \text{ is } A_n^M \text{ THEN } \bar{y}^M
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

예를 들어 그림 2의 다변수 퍼지 제어기(F_1)의 퍼지 규칙을 간략히 표현하면 다음과 같다.

IF the error of drum pressure(y_1) is Negative Small(a little bit high) and **IF** the change of error of drum pressure is Postive(drum pressure is increasing) and **IF** the error of elcteric power(y_2) is Negative Medium(high) and **IF** the change of error of electric power is Positive(electric power is increasing), **THEN** close the fuel valve(output 0.2 to u_1) and close the steam valve(output 0.3 to u_2).

위의 Fuzzy implication에 대하여 singleton fuzzifier, product inference rule, 그리고 무게중심법을 이용한 비퍼지화를 적용하는 퍼지 논리 시스템은 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$f(a) = \frac{\sum_{L=1}^M \bar{y}^L \left[\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^L}(a_i) \right]}{\sum_{L=1}^M \left[\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^L}(a_i) \right]}
 \tag{12}$$

위의 식에서 M 은 퍼지 규칙 수이며, n 은 입력 변수의 수, $\mu_{A_i^L}$ 은 조건부의 멤버십 함수, \bar{y}^L 은 결론부의 실수값이다.

각각의 제어기는 출력에 대한 오차와 오차에 대한 변화량을 입력 값으로 가지며 그에 따라 밸브 값을 출력시킨다. 각 퍼지 제어기의 오차와 오차에 대한 변화량의 입력 멤버십 함수는 그림 3, 4와 같이 오차에 대해서는 5개의 삼각형 멤버십 함수로, 오차의 변화량에 대해서는 3개의 삼각형 멤버십 함수로 구성하였으며 가장 자리의 멤버십 함수는 넓은 영역을 포함하도록 설계하였다.

오차에 관한 각 멤버십 함수의 영역은 a_0 와 a_4 의 값이 각 오차가 0에서 양과 음의 방향으로 중간 부하점의 10%에 해당할 때의 값을 설정하였다. 오차 변화량에 관한 각 멤버십 함수의 영역은 여러 입력 변수들을 변화시켰을 때 보일러-터빈 시스템의 각 출력 오차가 변화된 결과를 이용하였다. 여기서 오차 e_i 에 대한 정의는 $e_i(t) = r_i(t) - y_i(t)$, 이다. $r_i(t)$ 는 i 번째 기준 입력이고 $y_i(t)$ 는 (1)에서 표현된 보일러-터빈의 i 번째 출력이다. 오차의 변화량 Δe_i 에 대한 정의는 $\Delta e_i(t) = -(e_i(t) - e_i(t-1))$, $i = 1, 2, 3$ 이다.

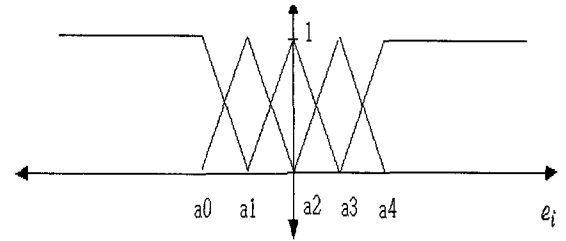


그림 3. 오차에 관한 입력 멤버십 함수.
Fig. 3. Input membership function of error.

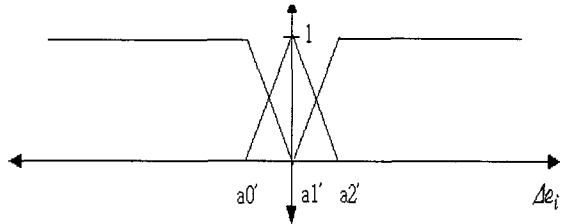


그림 4. 오차 변화량에 관한 입력 멤버십 함수.
Fig. 4. Input membership function of change of error.

3. 진화 전략(Evolutionary strategy)을 이용한 보일러-터빈 제어기 설계

진화 알고리즘은 자연 선택과 유전학에 기초를 둔 탐색 방법이다. 진화 알고리즘은 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 염색체(chromosomes)로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 생성한다. 본 논문에서는 여러 가지 유전 알고리즘 중에서 진화전략을 이용하여 최적의 퍼지 규칙을 설계하고자 하였다. 진화 전략(evolutionary strategy)은 돌연변이(mutation)와 선택(selection) 과정만을 가지는 무성생식(asexual reproduction)의 진화를 모의한다. 본 논문에서는 Schwefel에 의해 소개된 (μ, λ) -strategy 방식을 사용하였다[10]. 이 방식은 세대 t 에서의 μ 개의 모집단을 $P(t)$ 라 하고 돌연변이에 의해서 얻은 λ 개의 자손을 $P(t)'$ 라 하면 다음과 같이 행해진다[11].

- ① 최적화 하고자 하는 대상의 모집단 $P(t)$ 을 얻는다.
- ② 모집단을 적합도 함수를 이용하여 평가한다.
- ③ 돌연변이 연산자를 이용하여 자손 $P(t)'$ 을 번식시킨다.
- ④ 얻어진 자손들을 평가한다.
- ⑤ 부모세대와 자손들 중에서 우수한 개체를 선택하여 다음 세대의 부모 세대로 채택한다.
- ⑥ 원하는 적합도나 최대의 세대수가 될 때까지 ②부터 ⑤의 과정을 반복적으로 수행한다.

진화 전략을 이용해서 탐색할 대상은 그림 2에서 나타낸, 드럼 증기압과 전력량을 제어할 다변수 퍼지 제어기 (F_1)와 드럼 내의 수위를 제어할 다변수 퍼지 제어기 (F_2)의 퍼지 규칙들이다. 퍼지 제어기 F_1 은 연료 조절 밸브와 증기 조절 밸브를 조절하여 드럼 증기압과 전력량을 제어하므로 $450(=2 \times (5 \times 3 \times 5 \times 3))$ 개의 퍼지 규칙을 가지도록

설계를 하였으며, 퍼지 제어기 F_2 는 수위 조절 밸브 값을 출력으로 가지므로 $45(=5 \times 3 \times 3)$ 개의 퍼지 규칙을 갖도록 설계하였다.

3.1 개체군(population)의 결정

먼저 다변수 퍼지 제어기 설계를 위해서 부모 세대를 설정해 주어야 한다. F_1 제어기는 퍼지 규칙수가 각 225개로 구성되어 있으며 이 퍼지 제어기의 출력은 보일러-터빈의 입력, 즉 연료 조절 밸브의 개도와 증기 조절 밸브의 개도이므로 모두 450개의 규칙을 가진다. 450개의 규칙은 임의의 랜덤 함수를 이용하여 (2)의 입력 제한을 만족시키도록 실수값으로 생성한다. 반면 F_2 제어기는 45개의 규칙을 가지며 출력은 수위 조절 밸브의 개도이다. F_1 과 F_2 의 부모 세대의 개체는 모두 20개를 만들어 다음 세대 번식에 사용한다. 초기의 규칙의 값들은 임의의 값으로 설정하는 것이 아니라, 알고있는 입력 변수와 출력 변수 사이의 관계를 이용하여 적당한 퍼지 규칙 값들을 정해준다. 이렇게 함으로써 진화 전략을 통한 학습의 시간을 단축시킬 수 있게 된다.

3.2 돌연변이(mutation) 연산

자손 번식의 수단으로 돌연변이 연산자를 이용하여 수행한다. 본 논문에서는 실수형의 개체 $d \in R^n$ 를 구성하는 값 $d_i \in R$ ($1 \leq i \leq n$)마다 평균값 0, 표준편차 σ 의 정규 분포 $N(0, \sigma)$ 를 확률 밀도 함수로 가지는 난수(random variable)를 더해주는 방법을 사용한다. $N_j(0, \sigma)$ 는 j 인덱스 마다 새롭게 샘플링 되는 난수를 나타낸다.

$$d_j' = d_j + \sigma_j \cdot N_j(0, \sigma) \quad (13)$$

진화 알고리즘에서 표준편차 σ_i 를 step size라 부르고 이를 제어하는 방법에 따라 진화 알고리즘의 성능이 좌우된다. 본 논문에서는 각 제어 밸브가 한계치를 가지고 있으므로 일정한 상수를 가지도록 하여 자손을 번식시켰다. F_1 과 F_2 의 번식시킨 자손의 수는 100개로 결정을 하였다.

3.3 선택(selection)

부모 개체 20개와 자손 개체 100개 모두를 적합도 함수(fitness function)를 이용하여 적합도(fitness value)를 구한다. 이렇게 구한 세대의 값을 순서대로 나열한 후 상위 20개의 개체를 선택하여 다음 세대의 부모로 채택한다.

3.4 적합도 함수(fitness function)의 결정

일반적으로 퍼지 제어기의 최적화는 목적 함수값을 최소화시키거나 최대화시키는 퍼지 규칙을 찾아내는 것이다. 진화 알고리즘에서는 개체군 내의 각 개체에 대해서 진화 알고리즘을 적용하기 위해서는 풀고자 하는 문제에 대해 그 개체가 어느 정도 적합한가를 평가하는 적합도 함수를 사용한다. 적합도 함수는 최적화 하고자 하는 문제에 따라 특정하게 결정되며 본 논문에서는 시스템 출력이 기준 입력에 빨리 도달하고 정상 상태의 오차가 최소가 되도록 적합도 함수를 설정하였다. F_1 제어기를 위한 적합도 함수는 드럼 내의 증기압과 전력량에 대해서 기준 입력과의 오차로 나타내었다. F_2 는 드럼 내의 수위와 기준 수위 그리고 드럼 증기압의 오차로 표현하였다[14].

$$f_1(x) = \frac{1}{\sum_{i=0}^L \{t \times \alpha \times E1 \times E1 + t \times \beta \times E2 \times E2\}} \quad (14)$$

$$f_2(x) = \frac{1}{\sum_{i=0}^L \{t \times \alpha \times E1 \times E1 + t \times \beta \times E3 \times E3\}} \quad (15)$$

여기서 $E1$ 은 드럼 증기압의 오차, $E2$ 는 전력량의 오차, $E3$ 은 수위의 오차, 그리고 α, β 는 임의의 상수값이다.

한 세대의 진화는 돌연변이, 평가, 선택의 과정을 거치게 된다. 진화 과정을 끝마치는 기준은 세대수 100에서 200 사이 정도로 선택해서 진화시켰다. 다변수 퍼지 제어기의 전체적인 학습은 그림 5와 같은 형태로 수행한다.

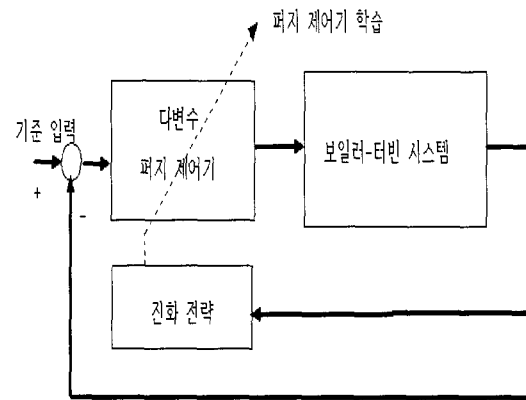


그림 5. 진화 전략을 이용한 퍼지 제어기 학습.
Fig. 5. Training of fuzzy controller with evolutionary.

F_1 제어기는 드럼 내의 증기압과 전력량을 제어하도록 하기 위해서 4가지 모드로 나누어서 학습을 행하도록 하였다. 각 모드는 $5 \times 3 \times 5 \times 3$ 의 제어기를 가지고 있다. 여기서 4가지 모드는 (양의 드럼 증기압 추적(tracking), 양의 전력량 추적), (드럼 증기압 레귤레이션(regulation), 양의 전력량 추적), (드럼 증기압 레귤레이션(regulation), 음의 전력량 추적), (음의 드럼 증기압 추적(tracking), 음의 전력량 추적)이다. 이렇게 4가지 모드로 나누어서 학습을 시키는 이유는 퍼지 규칙에서 중복되는 부분에서 문제가 발생되기 때문이다. 퍼지 규칙에서 보면 하나의 보일러-터빈 출력이 중간 부하점에 있고 기준 입력보다 큰 값으로 주었을 때 퍼지 규칙에서 절반 이상은 학습이 되고 절반 이상은 학습이 되지 않는다. 하나의 퍼지 제어기를 양의 오차에 대해서 학습 후 다시 음의 오차에 대해서 학습을 수행해서 보일러-터빈 시스템에 장착하여 동작시키면 음의 오차에 대해서는 우수한 성능을 보이지만 양의 오차에 대해서는 원치 않은 방향으로 출력이 변화됨을 확인할 수 있다. 이것은 퍼지 제어 규칙에서 중복되는 부분이 존재하기 때문이다.

오차가 0이 되는 부분에서 초기에 양의 오차에 최적으로 대처하도록 학습이 되었지만 나중에 다시 음의 오차에 최적으로 대응하도록 학습이 되기 때문이다. 따라서 최적의 우수한 제어기 설계를 위해서는 중간 부하점에서 원하

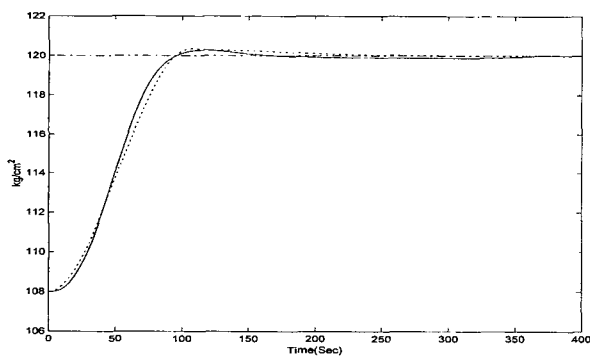
는 기준 입력을 평가해서 원하는 모두의 퍼지 제어기가 작동하도록 설계를 하였다.

F_2 의 제어기는 2가지 모드로 나누어서 학습을 수행하였다. 각 모드는 $5 \times 3 \times 3$ 의 제어기를 가지고 있으며 2가지 모드는 (양의 수위 추적), (음의 수위 추적) 이다.

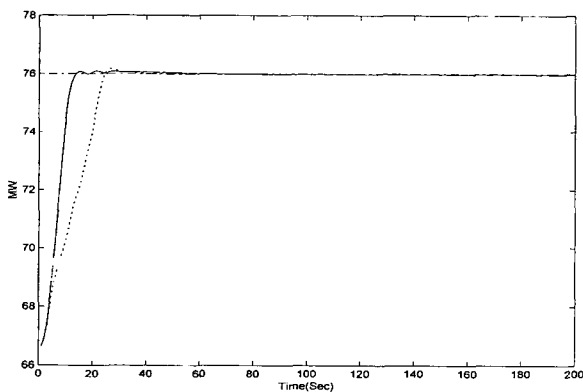
IV. 시뮬레이션 결과

설계된 제어기의 성능을 평가하기 위해서 컴퓨터 모의 실험을 실시하였다. 모의 실험에서는 실제 플랜트를 사용한 것이 아니라 Bell과 Åström의 모델을 사용하였다. 중간 부하점에서 드럼 증기압에 대해 계단함수 파형의 기준 입력력(reference input)을 주었을 때의 응답을 나타낸 것은 그림 6의 (a)이고, 전력량에 대해 계단함수 기준입력을 주었을 때의 응답은 (b)이고, 수위에 대해 계단함수 기준입력을 주었을 때의 응답은 (c) 이다. 그리고 (a)와 (b)와 (c)의 기준 입력의 변화에 상응하는 제어 밸브의 개도들을 각각 (d)와 (e)와 (f)에 나타냈다. 이 때의 계단 입력함수는 중간 부하점의 10%를 증가한 경우이다.

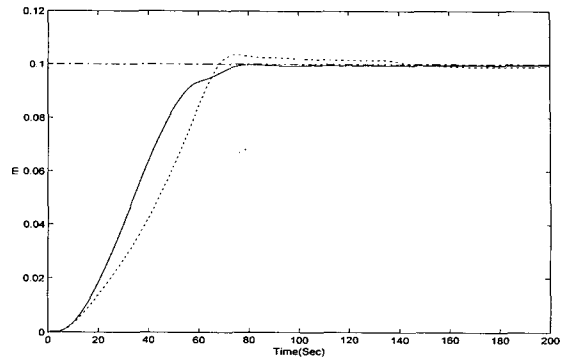
응답 그림 6 (a), (b), (c)에서 실선은 다변수 퍼지 제어기의 응답을 나타내며 점선은 드럼 증기압은 연료 조절 밸브로, 전력량은 증기 조절 밸브로, 드럼 내의 수위는 수위 조절 밸브로만 제어한 SISO 형태의 뉴로퍼지 제어기의 응답 곡선이다[7]. 두 응답을 비교하면 드럼 증기압은 두 제어기가 거의 차이가 없지만 전력량(b)과 드럼 내의 수



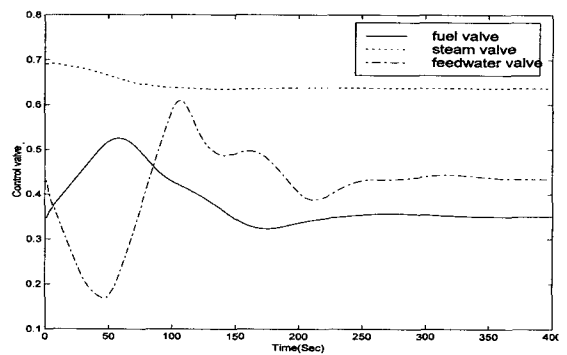
(a) 드럼 증기압



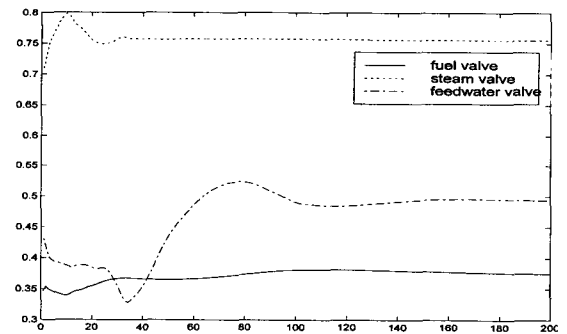
(b) 전력량



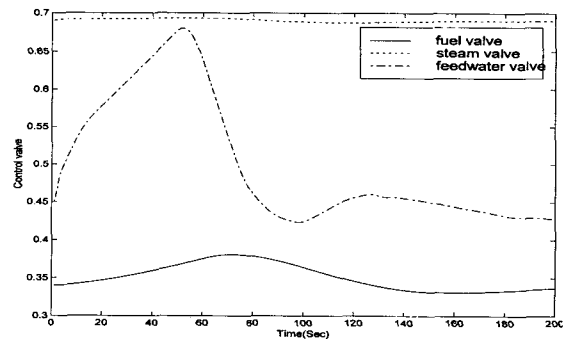
(c) 수위



(d) 제어 밸브의 개도

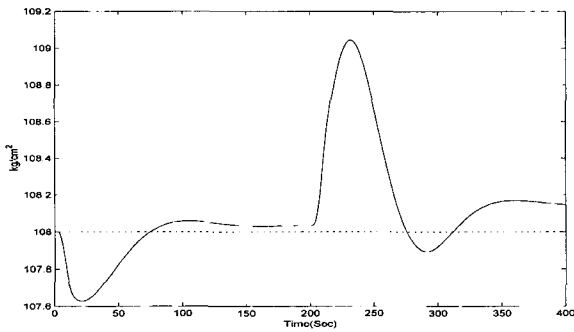


(e) 제어 밸브의 개도

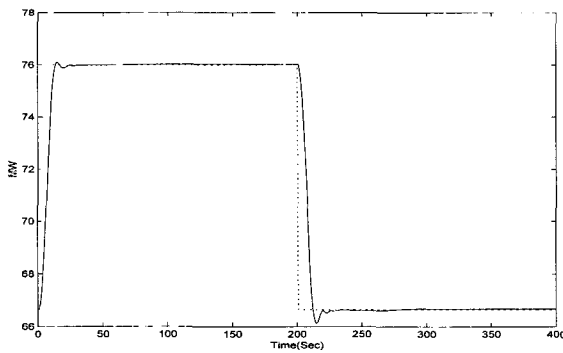


(f) 제어 밸브의 개도

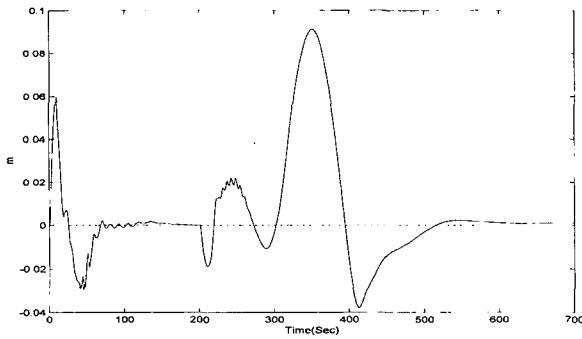
그림 6. 기준 입력에 대한 응답.
Fig. 6. Responses of reference input.



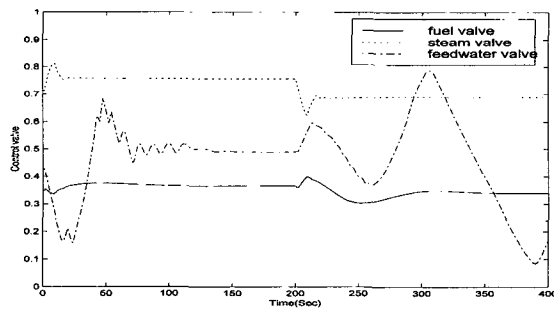
(a) 드럼 증기압



(b) 전력량



(c) 수위

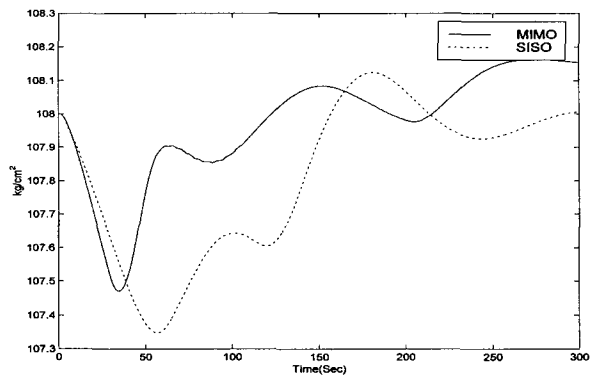


(d) 제어 밸브의 개도

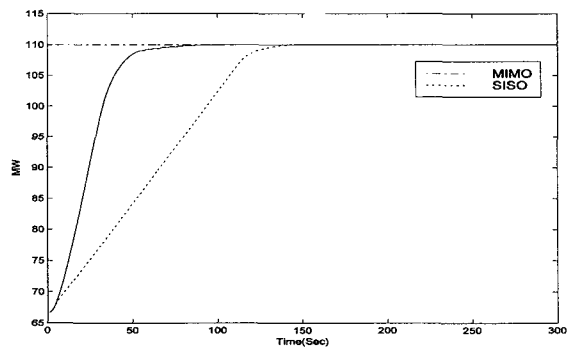
그림 7. 전력량의 변화 추종 능력.
Fig. 7. Tracking of electric power.

위(c)는 다변수 퍼지 제어기의 경우가 좀 더 빠른 반응성을 가짐을 확인할 수 있었다.

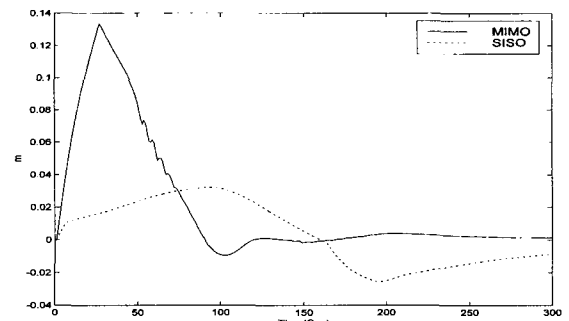
보일러-터빈 본래의 목적은 수요자에게 다양하고 안정적인 전력을 공급하는 것이다. 이와 같은 목적에 맞도록 제어기는 설계되어야만 한다. 본 논문에서는 원하는 전력 공급을 위해서 드럼 증기압과 전력량을 제어 할 다변수 퍼지 제어기는 여러 모드에서 작동하도록 설계를 하였다. 여러 모드에서 퍼지 제어기가 잘 작동하는지 컴퓨터 모의 실험을 실시하였다. 그림 7은 전력량의 기준 입력이 도중에 변화할 때 안정하게 유지되는 드럼 증기압과 전력량의 반응을 보여준다.



(a) 드럼 증기압



b) 전력량



(c) 수위

그림 8. 드럼 증기압 중간 부하점 유지시 전력량.

Fig. 8. Electric power maintaining the half load of drum pressure.

발전량의 변화는 증기 조절 밸브를 조정하여 터빈에 공급되는 증기의 양에 의해서 조절된다. 이 때 증기 조절 밸브는 최대 한계치가 1이므로 그 이상 개방하는 것은 불가능하다. 많은 양의 발전이 필요할 때 증기 조절 밸브만으로 원하는 발전을 얻을 수 있지만 효과적으로 제어하기 위해서는 드럼 증기압도 함께 제어해 주어야 한다. 드럼 증기압을 중간 부하점에 유지시키면서 얻을 수 있는 최대 전력량은 110MW이다. 그림 8에서 점선은 SISO형태의 뉴로퍼지 제어기의 응답이고 실선은 MIMO형태의 전력량 응답이다. 드럼 증기압과 수위가 중간 부하점을 유지하면서 빠른 전력량을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

110MW이상의 전력량을 얻고자 하면 드럼 증기압을 중

간 부하점으로 유지시켜서는 원하는 전력량을 얻을 수 없다. 드럼 증기압을 전력량에 비례해서 함께 증가시켜 주어야만 한다. 그런데 초기 드럼 증기압의 증가는 일시적인 수위의 증가(Swell)를 발생시키고 이 때 수위 조절 밸브를 닫아 수위를 조절하게 되면 유체의 농도가 급격히 증가하는 현상이 발생한다[8]. 유체의 농도를 적절히 유지하기 위해서 수위도 함께 증가시켜 주어야 한다. 그림 9에서 점선은 SISO 형태의 뉴로퍼지 제어기의 응답이고 실선은 MIMO 형태의 제어기의 응답인데 MIMO 제어기의 경우가 드럼 증기압과 전기적 출력에서 좀 더 안정되고 빠른 응답을 보임을 알 수 있다.

V. 결론

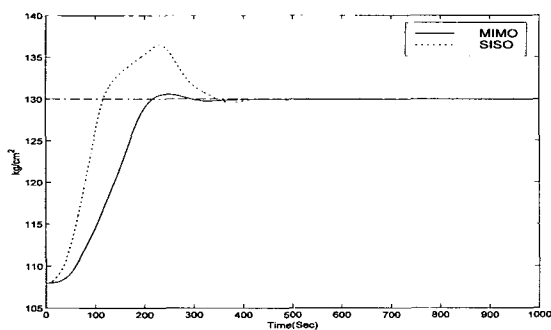
본 논문에서는 다변수 퍼지 제어 기법을 이용하여 변수 상호간 깊은 관련을 가지는 다변수 비선형 시스템인 보일러-터빈의 제어기를 설계하였다. 다변수 퍼지 제어기는 많은 퍼지 규칙을 가지기 때문에 퍼지 규칙 수를 줄이기 위하여 시스템의 상대적인 정상상태이득(RGM)을 이용하여 제어기를 두 개로 나누었다. 각각의 다변수 퍼지 제어기의 퍼지 규칙은 진화 전략을 이용하여 학습시켰다. 설계된 다변수 퍼지 제어기를 160MW 보일러 동특성 모델에 적용하여 컴퓨터 모의 실험을 통해서 성능을 살펴보았다. 설계된 제어기의 성능은 빠른 추종 능력을 가지면서 거의 과도응답이 발생하지 않음을 시뮬레이션을 통해서 확인할 수 있었다. 또한 넓은 영역에서도 안정하게 작동하는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 다변수 퍼지 제어기의 구조를 4입력 2출력, 3입력 1출력으로 설계를 하였다. 4입력 2출력의 퍼지 제어기의 경우 퍼지 규칙수가 450개이다. 이 때 실제 제어 시 사용되는 규칙은 전체 규칙 중에서 일부분만이 사용된다. 사용되지 않는 규칙을 적절히 제거하고 적은 규칙을 가지면서 신뢰성이 보장되는 제어기의 설계에 대한 연구가 더 필요하다. 또한 보일러-터빈 시스템은 3입력 3출력 이므로 하나의 제어기가 3입력 3출력 형태가 되도록 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

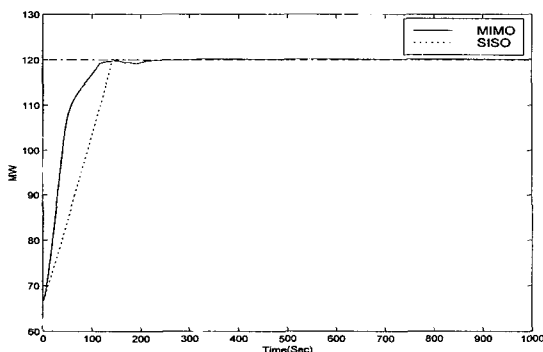
본 논문에서 제시한 진화 전략을 이용한 다변수 퍼지 제어기 설계 기법을 보일러-터빈 시스템 뿐만 아니라 다양한 비선형 다변수 시스템에 잘 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

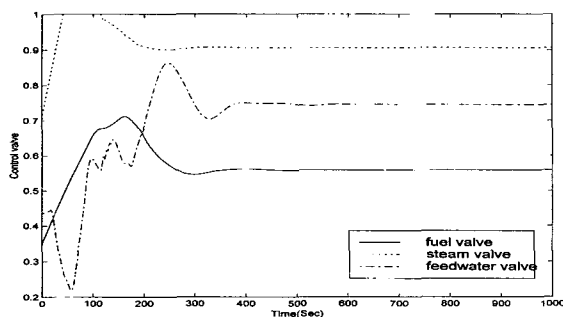
[1] 권옥현, 김상우, 박부건, 김은기, "개선된 LQG/LTR 방법에 의한 보일러-터빈 제어 시스템의 설계," *Trans. KIEE*, vol. 39, no. 2, pp. 199-209, Feb., 1990.
 [2] Gordon Pellegrinetti, Joseph Bentsman, " H_{∞} controller design for boilers," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 4, pp. 645-671. 1994.
 [3] Li-Xin Wang, "A course in fuzzy systems and control," Prentice Hall, 1997.
 [4] Kumar S. Ray and D. Dutta Majumder, "Fuzzy logic control of a nonlinear multivariable steam



(a) 드럼 증기압



(b) 전력량

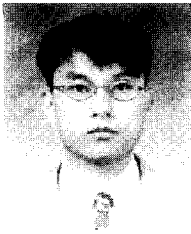


(c) 제어 밸브의 개도

그림 9. 고출력시 반응과 제어 밸브의 개도.

Fig. 9. Responses and the value of controlled valve in high output power.

- generating unit using decoupling theory," *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 4, pp. 539-558, Jul/Aug., 1985.
- [5] 이성환, 우천희, 강신준, 주영훈, "발전용 보일러 시스템을 위한 퍼지 제어기의 지능형 환산계수 동조기법에 관한 비교 연구," 대한전기학회 논문지, 제 46권, 10호, pp. 509-1520. Oct., 1997.
- [6] 정호성, 황현준, 황창선 "퍼지 제어를 이용한 다변수 모델 추종 보일러-터빈 제어시스템의 설계," 대한전기학회 논문지 제46권, 7호, pp. 1074-1083, 7, 1997.
- [7] 조경완, 김상우, "보일러-터빈 시스템을 위한 뉴로퍼지 지능제어기 설계," 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 B, pp. 474-476, 1998.
- [8] R. B. Bell and K. J. Åström, "Dynamic models for boiler-turbine-alternators units: data logs and parameter estimation for a 160MWunit," *Report TFRT-3192*, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
- [9] Pierre Grosdidier, Manfred Morar, "Closed-loop properties from Steady-State gain information," *Ind. Eng. Chem. Fundam*, vol. 24, pp. 221-235, 1985.
- [10] Thomas Back, Hans-Paul Schwefel "Evolutionary computation : An overview," *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 20-29, May, 1996.
- [11] Thomas Back, "Evolutionary algorithms in theory and practice," Oxford University Press, 1996.
- [12] F. Herrera and J. L. Verdegay, "Genetic algorithms and soft computing," Physica-Verlag, 1996.
- [13] 박세희, 김용호, 심관보, 전홍태, "유전 알고리즘을 이용한 퍼지 규칙 베이스의 자동 생성," 전자공학회논문집, 제 29권, B편, 제 2호, pp. 172-179.
- [14] G. J. Gray, Y. Li, D. J. Murray-Smith, and K. C. Sharman, "Specification of a control system fitness function using constraints for genetic algorithm based design methods," *Technical report*, TR-Control-950329, Univ of Glasgow, 1995.



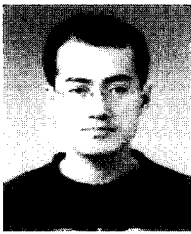
조 경 완

1972년 10월 8일생. 1996년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전자전기공학과 석사. 1998년~현재 현대정보기술 컨설팅팀 재직중. 관심분야는 지능제어 및 전자 상거래.



김 상 우

1983년, 1985년, 1990년 서울대학교 공과대학 제어계측공학과에서 학사, 석사, 박사학위를 받음. 1991년 제어 계측신기술 연구센터 연구원. 1993년 호주 국립대학교 방문교수. 1992년 ~ 현재 포항공과대학교 전자전기공학과 조교수. 주요 관심 분야는 강인제어, 추차모델링, 공정자동화, 무인화 운행기법 등임.



김 종 욱

1970년 10월 24일생. 1997년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 전자전기공학과 석사. 2000년~현재 동대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 지능제어 및 시스템 식별.