

# 자동 학습 퍼지 제어를 이용한 발전용 보일러 시스템 제어에 관한 연구

論 文

50A-11-3

## A Study on the Boiler System Control of Fossil-Power Plant Using a Self-organizing Fuzzy Logic Control

文 雲 哲\*  
(Un-Chul Moon)

**Abstract** - This paper presents an application of a on-line self-organizing fuzzy logic controller to a boiler system of fossil-power plant. A boiler-turbine system is described as a MIMO nonlinear system in this paper. Then, three single loop fuzzy logic controllers are designed independently. The control rules and the membership functions of proposed fuzzy logic control system are generated automatically without using plant model. The simulation shows successful results for wide range operation of boiler system of fossil-power plant.

**Key Words** : Fuzzy Logic Control, Self-Organizing, Boiler System Control.

### 1. 서 론

화력 발전의 보일러 시스템은 고압의 스팀을 터빈에 공급하여, 터빈에 기계적인 회전력을 제공하는 역할을 한다. 드럼(Drum) 보일러의 경우, 밀폐된 드럼에 연소열을 가하여 드럼 내부에 공급된 물을 고온 고압의 스팀으로 전환하게 한다. 그 후, 제어밸브를 통하여 고온 고압의 스팀을 터빈에 공급하여 전력을 발생시키게 된다. 이와 같은 화력 발전용 보일러 시스템의 제어는 드럼내의 압력과 수위를 유지하면서, 시시각각 변화하는 전력부하의 증감에 대응하도록 발전소의 전기적 출력을 조절하는 것을 그 목적으로 한다. 이러한 보일러 시스템은 입출력 상호간이 강하게 연관된 다변수 비선형 시스템으로 묘사되고 있다 [1]-[3].

보일러 시스템의 심한 비선형성과 다중 입출력 특성을 극복하면서, 넓은 동작영역에서의 효과적인 제어를 위하여 많은 연구들이 수행되어왔다. 권옥현 등은 비선형 모델로부터 선형화된 모델을 구하고, 이에 따른 모델 오차를 고려하는 LQG/LTR 제어 방법을 제시하였다 [4]. Hogg와 Ei-Rabaie는 일반 예측 제어 (Generalized Predictive Control, GPC) 기법을 적용하였으며 [5], Rovnak과 Corlis는 동역학 행렬 제어 (Dynamic Matrix Control, DMC) 기법을 적용하였는데[6], 이 두 방법은 이동구간(Receding Holizon)을 최적화한다는 관점에서는 동일하지만, [5]에서는 실시간으로 대상 시스템 모델을 구하는 반면에, [6]에서는 미리 구해 놓은 계단 응답 모델을 사용하는 방식이다. 이러한 기법들은 기본적으로 선형시스템을 바탕으로 하여 제어하는 방식이다.

보일러 시스템의 효율적인 제어를 위하여 다양한 지능제어

기법 또한 제시되었는데, 이들은 대부분 대상 플랜트의 비선형성을 극복하는 것에 초점이 맞춰졌다. Ray와 Majumder는 대상시스템을 입출력 케환선형화에 의하여 비결합화시킨 후, 이를 바탕으로 퍼지제어를 구성하는 방식을 제안하였다 [7]. Prasad 등은 인공 신경망 모델을 바탕으로 한 예측제어를 제시하였다 [8]. 여기에서 그들은 off-line으로 학습시킨 인공신경망 모델을 이용하여, 실시간으로 이동구간을 최적화하는 방식을 제시하였다. Dimeo와 Lee는 넓은 동작영역에서의 효과적인 제어를 위하여, 유전자 알고리즘을 이용하여 기존의 PI 제어기와 LQR 제어기의 설계변수를 결정하였다 [9]. Alturki와 Abdennour는 신경망-퍼지 시스템 제어를 제시하였다 [10]. 여기에서 그들은 각 동작영역에서 설계된 여러 개의 LQR 제어기를 하나의 신경망-퍼지 시스템에 학습시키는 방식을 제시하였다. Cheung과 Wang은 보일러 시스템에 대하여 퍼지 제어기와 PI 제어기의 비교 결과를 제시하였다 [11]. 그들은 대부분의 공정 제어시스템이 PI제어기로 구성되어 있음을 지적한 후, 특히 목표값 추정 문제에서 퍼지제어의 우월한 결과를 제시하였다.

본 논문에서는 [12]에서 저자들이 제시한 퍼지 자동회귀 이동평균 (Fuzzy Auto-Regressive Moving Average, FARMA) 제어기를 화력 발전의 보일러 시스템에 적용하였다. 저자들은 [12]에서 대상시스템의 수식적 모델을 이용하지 않는 실시간 퍼지 적응 제어를 제시하였다. 제시된 제어기는 선형 일기무한모선(One-machine Infinite-Bus) 및 비선형 2기5모선(Two-machine Five-Bus) 모형에 대한 전력계통 안정화 문제에 성공적으로 적용되었다 [13],[14]. 기존의 퍼지제어기가 전문가에 의해 형성된 퍼지 제어 룰을 사용하는데 반하여 FARMA 제어기는 실시간으로 퍼지 제어 룰을 형성하고 개선해나가는 구조이다. 따라서 제어룰을 형성하는데 전문가의 의존하지 않게 되는 장점이 있다.

이러한 FARMA 제어기를 보일러에 적용하기 위하여, 먼저 일반적으로 사용되는 비선형 3 입력 3 출력 모델을 대상 시스템으로 선정하였다. 그 후, 단일 루프 (Single loop) 케환을 위하여, 중요한 연관성을 갖는 3개의 입출력 쌍을 선정하

\* 正 會 員 : 又石大 電氣工學科 專任講師  
接受日字 : 2001年 7月 14日  
最終完了 : 2001年 11月 14日

였다. 선정된 3개의 단일 케환 루프는 3개의 FARMA 제어기가 독립적으로 적용된다. 즉, 3개의 단일 케환 루프를 통하여 3 입력 3 출력의 다변수 시스템을 제어하는 구조이다. 제시된 제어시스템의 성능을 확인하기 위하여 넓은 동작 영역을 대상으로 한 컴퓨터 모의 실험 결과를 제시하였다.

2장에서는 기존의 FARMA 제어기의 개요를 소개한다. 3장에서는 본 논문에서 적용한 보일러 시스템 모델을 소개하고, FARMA 제어기의 적용 방식을 설명한다. 4장에서는 모의실험 결과를, 그리고 5장에서는 결론을 제시한다.

## 2. 퍼지 자동회귀 이동평균(FARMA) 제어기

2장에서는 저자들이 제시한 퍼지 FARMA 제어기의 개요를 소개한다 [12].

### 2.1. FARMA 제어규칙

일반적으로 하나의 입력과 출력을 갖는 이산시간 단일 입력 출력(Single-Input Single-Output, SISO) 시스템은 다음과 같이 과거 입출력의 함수로써 표현될 수 있다.

$$y(k+1)=f(y(k), y(k-1), \dots, u(k), u(k-1), \dots), \quad (1)$$

여기서  $y(k)$ 와  $u(k)$ 는 각각  $k$ 번째 이산시간에서 플랜트의 출력과 입력이다. 그런데, 제어의 목적은 플랜트의 출력을 임의의 목적값  $y_{ref}$ 로 유도하는 입력  $u(k)$ 를 결정하는 것이므로, (1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u(k)=g(y_{ref}, y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots), \quad (2)$$

즉, (2)는 (1)의 역동역학(Inverse Dynamics)으로 볼 수 있다.

(1)과 (2)로부터, (1)과 같은 형태의 플랜트의 입출력을 기억함으로써, (2)와 같은 제어 규칙을 결정할 수 있다. 즉,  $k$ 번째 이산시간  $y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots$ 의 상황에서 플랜트에  $u(k)$ 를 인가하여  $y(k+1)$ 을 얻었다고 가정한다면 이러한 결과는, 같은  $y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots$ 의 상황에서 출력을  $y(k+1)$ 로 보내려면  $u(k)$ 를 인가해야 한다는 제어 규칙으로 표현될 수 있다. 따라서, FARMA 제어규칙은 다음과 같은 형태로 정의된다.

IF  $y_{ref}$  is  $A_{1i}$ ,  $y(k)$  is  $A_{2i}$ ,  $y(k-1)$  is  $A_{3i}, \dots, y(k-n+1)$  is  $A_{(n+1)i}$ , AND  $u(k-1)$  is  $B_{1i}$ ,  $u(k-2)$  is  $B_{2i}, \dots, u(k-m)$  is  $B_{mi}$ , THEN  $u(k)$  is  $C_i$ , ( $i$ -번째 제어규칙) (3)

여기서,  $n, m$ : 입출력 변수의 개수,

$A_{ij}, B_{ij}$ :  $i$ -번째 제어규칙의 전건부 언어변수,

$C_i$ :  $i$ -번째 제어규칙의 후건부 언어변수.

이때, 언어적인 퍼지 변수  $A_{ij}, B_{ij}$ , 와  $C_i$ 는 미리 적절하게 가정한 입출력 범위를 바탕으로 하여, 해당되는 crisp 입출력 값을 이용한 퍼지화(Fuzzification)로써 지정된다. 만일 주어진 입력 혹은 출력범위가  $[a, b]$ 라면 crisp값  $x_1$ 의 언어변수  $A_1(x)$ 는 다음과 같은 삼각형의 형태로 지정된다.

$$\mu_{A_1}(x) = \begin{cases} 1 + (x - x_1)/(b - a) & \text{if } a \leq x < x_1 \\ 1 - (x - x_1)/(b - a) & \text{if } x_1 \leq x < b \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

(4)와 같은 형태의 제어규칙은 매 이산시간마다 생성되어 제어규칙베이스에 저장된다.

### 2.2. 퍼지 추론(Inference) 및 역퍼지화(Defuzzification)

새로운 플랜트의 입출력쌍이 제어기에 입력되면, 먼저 각 제어규칙 전건부와 의 적합도(Truth value)가 계산된다. FARMA 제어기에서는 다음과 같이 적합도와 제어규칙 후건부  $C_i$ 의  $\varphi$ -연산[15]을 이용하여 제어기의 출력 퍼지집합  $C_n$ 을 계산한다.

$$C_n = \bigcap_i (\omega_i \varphi \mu_{C_i}) \quad (5)$$

$$\omega_i \varphi \mu_{C_i} = \begin{cases} 1 & \text{if } \omega_i \leq \mu_{C_i} \\ \mu_{C_i} & \text{if } \omega_i > \mu_{C_i} \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $C_n$ : 출력 퍼지집합,

$\omega_i$ :  $i$ -번째 제어규칙의 적합도,

$\mu_{C_i}$ :  $C_i$ 의 소속정도(membership degree).

역퍼지화는 일반적으로 출력 퍼지집합  $C_n$ 으로부터 crisp한 제어기의 출력  $u(k)$ 를 결정하는 과정이다. FARMA 제어기에서는 (5)과 같이 추론된 출력퍼지집합  $C_n$ 에 대하여 그 최대값인  $\alpha = \max(C_n)$ 로  $\alpha$ -cut을 시행한 후, 이를 순수제어범위(Net Control Range, NCR)로 정의한다. NCR은 가정한 출력범위  $[a, b]$ 의 부분집합으로써, "가장 높은 가능성을 갖는  $u(k)$ 의 범위"라는 물리적인 의미를 갖는다.

최종적인 제어기의 출력  $u(k)$ 는 플랜트의 예상 출력  $\hat{y}(k+1)$ 과  $k+1$  시간에서의 목표값  $y_r(k+1)$ 을 비교함으로써 구해진다. 즉, 플랜트 출력  $y(k), y(k-1), \dots$ 에 대하여 뉴턴의 후방향 차분 공식(Newton's backward difference formula)을 이용한 외삽(Extrapolation)을 통하여 플랜트 출력  $\hat{y}(k+1)$ 을 계산한 후, 다음과 같이  $k+1$  번째 시간에서의 임시 목표값  $y_r(k+1)$ 을 생성한다.

$$y_r(k+1)=y(k)+\beta(y_{ref}-y(k)), \quad (7)$$

여기서  $\beta$ 는 목표추종상수(Target Ratio Constant)로써 0에서 1사이의 고정된 값을 갖는다. 예를 들어,  $\beta$ 가 1로 선정된 경우에는  $y_r(k+1)=y_{ref}$ 가 되어, 다음  $k+1$  시간에서 목표값  $y_{ref}$ 를 곧바로 추종하도록 제어하게 된다.  $\beta$ 가 0.5로 선정된 경우에는  $y_r(k+1)=y(k)+0.5*(y_{ref}-y(k))$ 가 되어, 다음  $k+1$  시간에는 출력  $y(k)$ 로부터 목표값의 50%만을 추종하도록 제어하게 된다. 즉, (7)은 이산시간 선형 1차 역동역학(Dynamics)의 구조를 갖는, 출력의 "이상적인 동역학"(Desired Dynamics)이다. 이때,  $\beta$  값은 "출력이 목표값을 추종하는 속도"라는 물리적인 의미를 가지며,  $\beta$  값이 작으면 긴 안정시간(Settling Time)을 가지고 천천히 목표값을 추종하게 된다. 이는 플랜트의 특성을 고려하여 주어진 목표값을 적절한 속도로 추종

하도록 사용자에게 의하여 선정된다.

$\hat{y}(k+1)$ 이  $y_r(k+1)$  보다 큰 경우에는 제어량이 감소되어야 하며, 반대의 경우에는 제어량이 증가되어야 한다. 따라서, 플랜트의 출력이 증가하는 경우에는 제어량이 이전보다 감소하도록 하며, 반대의 경우에는 제어량이 증가하도록 한다. 이를 위하여,  $u(k)$  ( $=u(k)-u(k-1)$ )의 부호가  $(y_r(k+1)-\hat{y}(k+1))$ 의 부호와 같도록 NCR을 조정한다. 따라서 최종적인 제어기의 출력  $u(k)$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$u(k) = \begin{cases} (u(k-1)+q)/2 & \text{for } y_r(k+1) > \hat{y}(k+1) \\ (p+u(k-1))/2 & \text{for } y_r(k+1) < \hat{y}(k+1), \end{cases} \quad (8)$$

여기서,  $p$ 와  $q$ 는 각각 NCR의 하한과 상한이다.

### 2.3. 제어규칙 베이스의 자동 구성

앞장에서 기술된 FARMA 제어규칙은 매 이산시간마다 생성된다. 생성된  $i$ -번째 제어규칙은  $(n+m+1)$ 차원 제어규칙 공간(Rule space)  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{(n+m+1)i})$ 에서 하나의 점으로 표현될 수 있다. 제어규칙 베이스를 개선하기 위해서 다음과 같은 평가함수가 정의된다.

$$J = |y_r(k+1) - y(k+1)|, \quad (9)$$

여기서,  $y(k+1)$ 은  $k+1$  번째 이산시간에서 실제 측정된 플랜트의 출력이며,  $y_r(k+1)$ 은  $k$  번째 이산시간에서의 임시 목표값이다. 따라서,  $J$ 는  $k$  번째 이산시간에서의 제어 결과로서,  $k+1$  번째 이산시간에서 계산된다.

각 변수  $x$ 에 대하여 몇 개의 구간으로 분할함으로써, 퍼지 제어규칙 공간은 유한한 부공간(Subspace)들로 분할되게 한다. 만일 동일한 부공간에 더 작은  $J$ 를 갖는 제어규칙이 생성되면, 기존의 제어규칙은 새로운 제어규칙으로 대체된다. 따라서, 시간이 지날수록 대상 플랜트를 학습하는 것이 가능하게 된다. 그림 1은 이러한 FARMA 제어기의 구성도를 나타낸다.

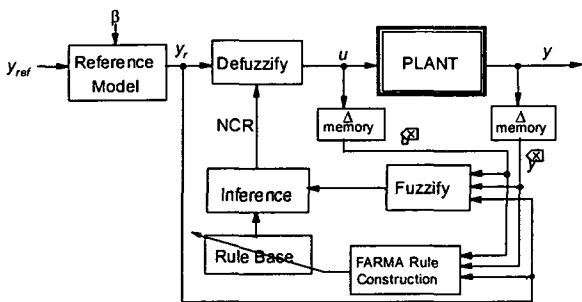


그림 1. FARMA제어기의 구성도.  
Fig. 1. The FARMA control system architecture.

### 3. 발전용 보일러 시스템 제어

#### 3.1. 보일러 시스템 모델

본 논문에서는 비선형 보일러 시스템의 동역학을 위하여

가장 널리 사용되는 벨과 웅스트롬의 모델을 선정하였다. 벨과 웅스트롬 모델은 넓은 동작 영역에서 동작하는 드럼형 보일러 터빈 시스템을 모델링 한 것으로 160 [MW]의 유류연소형 보일러 모델이다. 이의 3차 비선형 다변수 상태방정식은 다음과 같다 [1].

$$\dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3, \quad (10)$$

$$\dot{x}_2 = [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{9/8} - x_2]/10 \quad (11)$$

$$\dot{x}_3 = [141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]/85 \quad (12)$$

$$y_1 = x_1 \quad (13)$$

$$y_2 = x_2 \quad (14)$$

$$y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100\alpha_{cs} + q_e/9 - 67.975) \quad (15)$$

여기서,

$$\alpha_{cs} = \frac{(1-0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \quad (16)$$

$$q_e = (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (17)$$

상태변수  $x_1$ ,  $x_2$  와  $x_3$ 는 각각 드럼내 증기압력 ( $P$ , [kg/cm<sup>2</sup>]), 전기적 출력 ( $E$ , [MW]) 그리고 드럼내부의 증기-물 유체밀도 ( $\rho_f$ , [kg/m<sup>3</sup>])이다. 출력  $y_1$ ,  $y_2$  와  $y_3$ 는 각각 드럼내 증기 압력 ( $x_1$ ), 전기적 출력 ( $x_2$ ) 그리고 드럼내 유체의 높이 ( $L$ , [m]) 이다. 드럼내 유체 높이  $y_3$ 는, (16)와 (17)에서 계산된 증기의 질(quality)  $\alpha_{cs}$  와 증발율  $q_e$  를 이용한 대수 방정식에 의하여 계산된다. 입력  $u_1$ ,  $u_2$  그리고  $u_3$ 는 제어 밸브의 위치로서, 각각 연료의 양, 터빈에 공급되는 증기의 양 그리고 드럼내의 물 공급량이다. 이러한 밸브의 위치는 [0, 1] 사이의 값으로 규정되며, 각각의 변화량은 다음과 같이 제약된다.

$$-0.007 \leq du_1/dt \leq 0.007 \quad (18)$$

$$-2.0 \leq du_2/dt \leq 0.02 \quad (19)$$

$$-0.05 \leq du_3/dt \leq 0.05 \quad (20)$$

#### 3.2. 퍼지 자동회귀 이동평균 제어기의 적용

본 논문에서는 단일입출력 시스템에 적용된 FARMA 제어기를 보일러 시스템에 직접 적용한다. 입력과 출력의 관점에서 보면, 벨과 웅스트롬의 보일러 모델 (10)~(17)은 3-입력 3-출력 시스템이다. 따라서, FARMA 제어기가 적용된 3개의 단일 제어루프를 독립적으로 적용한다.

단일 제어루프를 구성하기 위해서는, 먼저 입-출력들간의 상호 연관관계를 파악해야 한다. (10)으로 부터,  $x_1$ 은  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ 로 제어될 수 있음을 알 수 있다. 그런데, 정상적인 운전범위에서  $x_1$ 의 크기가 약 100 정도임을 고려하면,  $u_2$ 항이나  $u_3$ 항이  $u_1$ 항보다 작기 때문에, 드럼내 증기 압력  $y_1$ 은 연료의 양  $u_1$ 에 의하여 주도적인 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서, 출력  $y_1$ 을 입력  $u_1$ 으로 케환하는 하나의 단일 제어 루프를 구성한다. 또한, (11)로 부터, 전기적 출력  $y_2$ 는 터빈에 공급되는 증기의 양  $u_2$ 에 의하여 제어 될 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 출력  $y_2$ 를 입력  $u_2$ 로 케환하는 두번째 단일 제어 루프

를 구성할 수 있다. 또한, 드럼 보일러의 물리적인 특성에 의하여, 드럼내 유체의 높이는 드럼에 공급되는 물의 양으로 제어한다. 따라서, 출력  $y_3$ 를 입력  $u_3$ 로 변환하는 세번째 단일 제어 루프를 구성한다.

그림 2는 발전용 보일러 시스템의 전체적인 제어 시스템 구성도이다. 그림 2에서 FARMA FLC I, II 그리고 III는 각각  $u_1$  (연료의 양),  $u_2$  (증기의 양) and  $u_3$  (물 공급양)을 이용하여  $y_1(P)$ ,  $y_2(E)$  그리고  $y_3(L)$ 를 제어하기 위하여 구성된 제어기들이다.

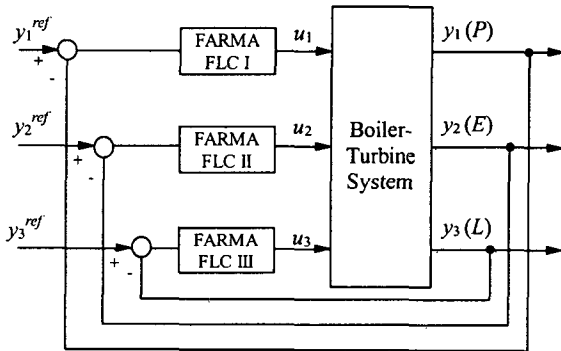


그림 2. 보일러 제어 시스템 구성도.  
Fig 2. The Boiler-Turbine Control System.

(3)에서의  $n$ 과  $m$ 은 세개의 독립적인 제어기에서 모두 2와 1로 선정하였다. 따라서, (3)의 제어규칙은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{IF } y_{ref} \text{ is } A_{1i}, y(k) \text{ is } A_{2i}, y(k-1) \text{ is } A_{3i}, \text{ AND } u(k-1) \text{ is } B_{1i} \\ \text{THEN } u(k) \text{ is } C_i, \text{ (for the } i\text{-th rule)} \quad (21)$$

(4)에서의 퍼지 소속함수를 결정하기위한 출력범위는, 보일러 시스템의 물리적인 동작영역을 고려하여,  $y_1$ 의 출력범위는  $[70, 150]$   $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ ,  $y_2$ 의 출력범위는  $[10, 190]$   $[\text{MW}]$  그리고  $y_3$ 의 출력범위는  $[-0.5, 0.5]$   $[\text{m}]$ 로 선정하였고, 입력범위는 세 개의 제어기 모두  $[0, 1]$ 로 선정하였다. 또한, (7)의  $\beta$  값은 보일러 모델의 물리적인 특성을 고려하여, 세 개의 제어기 모두 출력의 안정시간(Settling Time)이 약 50초가 되도록 선정하였다.

#### 4. 모의 실험 결과

제시된 제어기와 보일러 시스템은 개인용 컴퓨터에서 c-언어를 이용하여 구현되었다. 모의실험을 위한 이산시간구간은 0.5초이다. [16]에서 Abdennour 등은 드럼 증기압력  $y_1$ 의 목표값이 전기적 출력  $y_2$ 의 목표값에 따라 연동하여 결정되어야 함을 지적하였다. 따라서 본 모의실험에서도,  $y_2$ 의 목표값이 증가함에 따라  $y_1$ 의 목표값도 적절히 증가하도록 지정하였다.

시스템이 초기에  $X = (100, 50, 449.5)$ ,  $Y = (100, 50, 0)$ ,  $U = (0.271, 0.604, 0.336)$ 의 정상상태에 있다고 가정하여, 다음과 같은 4가지 경우를 고려하였다.

사례 1):  $y_1^{ref} = 110, y_2^{ref} = 80, y_3^{ref} = 0,$

사례 2):  $y_1^{ref} = 120, y_2^{ref} = 100, y_3^{ref} = 0,$

사례 3):  $y_1^{ref} = 130, y_2^{ref} = 120, y_3^{ref} = 0,$

사례 4):

$$\begin{cases} y_1^{ref} = 110, y_2^{ref} = 80, y_3^{ref} = 0, & \text{for } 0 < t < 400 \\ y_1^{ref} = 120, y_2^{ref} = 100, y_3^{ref} = 0, & \text{for } 400 \leq t < 800 \\ y_1^{ref} = 130, y_2^{ref} = 120, y_3^{ref} = 0, & \text{for } 800 \leq t \leq 1200. \end{cases}$$

사례 1)은  $y_1, y_2, y_3$ 가  $(100, 50, 0)$ 의 정상상태에서, 목표값이 각각  $(110, 80, 0)$ 으로 지정되었을 경우이다. 즉, 전기적 출력과 드럼 압력을 높이면서 드럼 수위는 일정하게 유지시키는 경우이다. 사례 2)는  $y_1, y_2, y_3$ 가  $(100, 50, 0)$ 의 정상상태에서, 목표값이 각각  $(120, 110, 0)$ 으로 지정되었을 경우이다. 사례 3)은 넓은 동작영역의 사례로써  $y_1, y_2, y_3$ 가  $(100, 50, 0)$ 의 정상상태에서  $(130, 120, 0)$ 으로 목표값이 지정되었을 경우이다. 즉, 전기적인 출력이 50에서 120으로 2배 이상 증가한 경우이다. 사례 4)는 제시된 제어기의 학습 특성을 확인하기 위하여,  $y_1, y_2, y_3$ 가  $(100, 50, 0)$ 의 정상상태에서, 0초에서 목표값이  $(110, 80, 0)$ , 400초에서  $(120, 100, 0)$  그리고 800초에서  $(130, 120, 0)$ 으로 단계적으로 변화하였을 경우이다. 따라서 플랜트 제어 경험이 제어규칙 베이스에 저장되어 가는 효과를 확인할 수 있도록 하였다.

사례 1), 2), 3), 4)의 모의실험 결과를 플랜트의 입력과 출력으로 구분하여, 그림 3에서 10까지로 나타내었다. 그림 3, 5, 7, 9는 각 사례별 플랜트의 출력으로써, 가로축은 시간 [second]이며, 세로축은  $y_1$ 에 대해서는  $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ ,  $y_2$ 에 대해서는  $[\text{MW}]$ ,  $y_3$ 에 대해서는  $[\text{cm}]$ 이다. 그림 4, 6, 8, 10은 각 사례별 플랜트의 입력으로써, 가로축은 시간 [second]이며, 세로축은 모두 밸브의 위치이다.

그림 3은 사례 1)의 결과이다.  $y_1$ 은 약 80초 이후부터 목표값인 110으로 추종하며,  $y_2$ 는 약 50초 이후부터 목표값인 80에 추종함을 알 수 있다.  $y_3$ 는 초기에 약 20까지 증가하지만 150초 이후부터는 원래의 수위를 유지함을 알 수 있다. 그림 4는 이 경우의 플랜트 제어량을 나타낸다. 그림 5는 사례 2)의 결과이다.  $y_1$ 은 약 80초 이후부터 목표값인 120으로 추종하며,  $y_2$ 는 약 50초 이후부터 목표값인 100에 추종함을 알 수 있다.  $y_3$ 는 초기에 약 22까지 증가하지만 180초 이후부터는 원래의 수위를 유지함을 알 수 있다. 그림 6는 이 경우의 플랜트 제어량을 나타낸다. 그림 7은 사례 3)의 결과이다.  $y_1$ 은 약 160초 이후부터 목표값인 130으로 추종하며,  $y_2$ 는 약 80초 이후부터 목표값인 120에 추종함을 알 수 있다.  $y_3$ 는 초기에 약 22까지 증가하지만 250초 이후부터는 원래의 수위를 유지함을 알 수 있다. 따라서, 전기적인 출력이 50에서 120으로 2배 이상 증가한 경우에도 목표값을 추종함을 알 수 있다. 그림 8은 이 경우의 플랜트 제어량을 나타낸다. 그림 9는 사례 4)의 결과이다.  $y_1$ 과  $y_2$ 가 약 100초 안에 주어진 목표값들을 추종함을 알 수 있다.  $y_3$ 는 초기의 목표값을 추종하는 동안에는 약 20까지 증가하지만, 두번째와 세번째의 목표값을 추종하는 동안에는 약 10정도로 수위의 변동이 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이는 초기에는 제어규칙이 존재하지 않기 때문에 비교적 심하게 흔들리지만, 두번째부터는, 제어 경험이

제어규칙베이스에 저장되어 이용됨에 따라 흔들리는 정도가 줄어들었기 때문이다. 따라서, 플랜트에 대한 제어 경험이 축적될수록 좀 더 효과적인 제어를 기대할 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 10은 이 경우의 플랜트 제어량을 나타낸다.

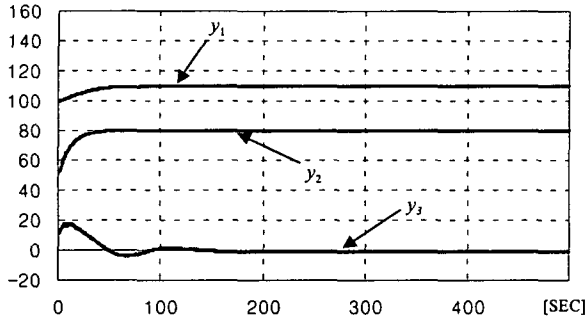


그림 3. 사례 1)의 출력.  
Fig. 3. Outputs of Case 1.

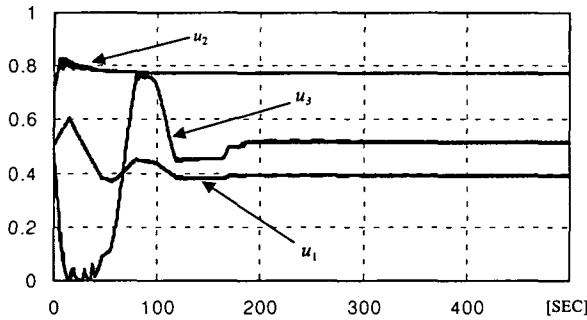


그림 4. 사례 1)의 입력.  
Fig. 4. Inputs of Case 1.

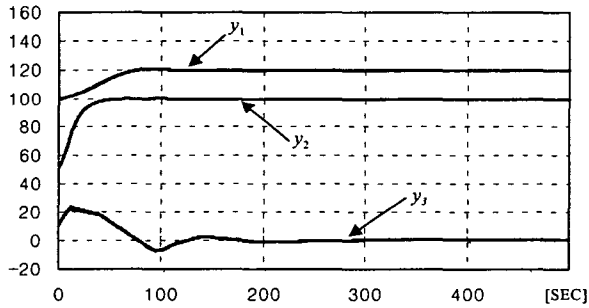


그림 5. 사례 2)의 출력.  
Fig. 5. Outputs of Case 2.

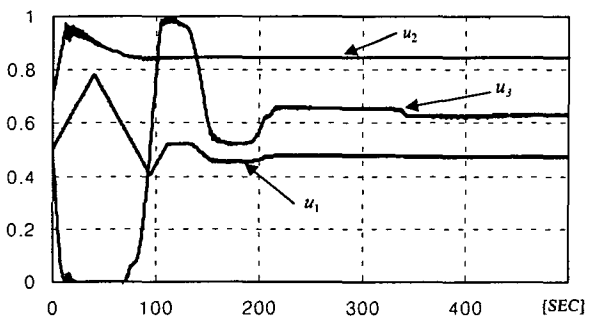


그림 6. 사례 2)의 입력.  
Fig. 6. Inputs of Case 2.

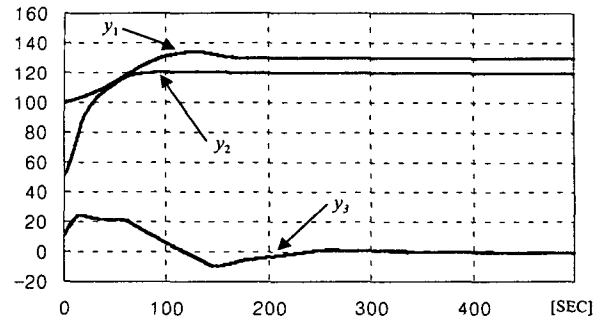


그림 7. 사례 3)의 출력.  
Fig. 7. Outputs of Case 3.

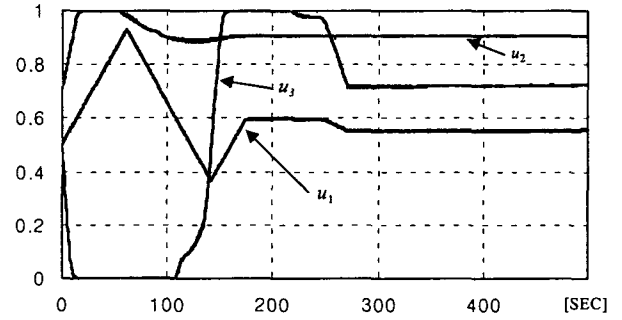


그림 8. 사례 3)의 입력.  
Fig. 8. Inputs of Case 3.

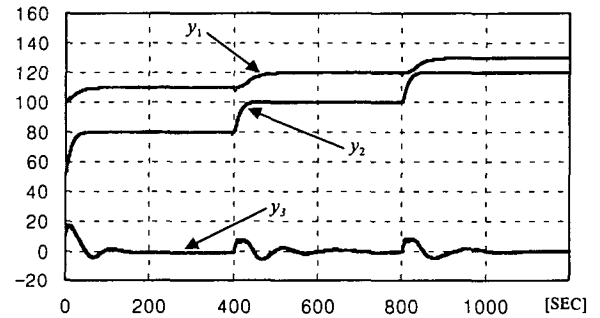


그림 9. 사례 4)의 출력.  
Fig. 9. Outputs of Case 4.

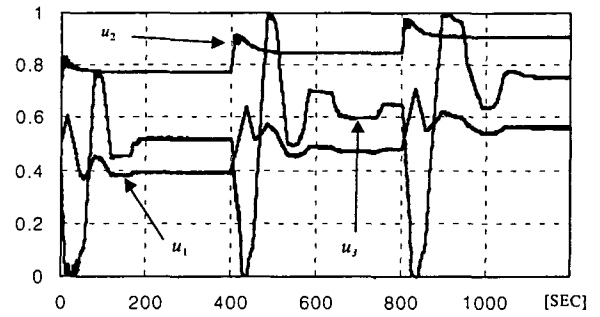


그림 10. 사례 4)의 입력.  
Fig. 10. Inputs of Case 4.

### 5. 결 론

본 논문에서는 자동 학습 퍼지제어기를 발전용 보일러 시스템에 적용한 결과를 제시하였다. 제시된 퍼지 자동화귀 이

동평균 (Fuzzy Auto-Regressive Moving Average, FARMA) 제어기의 제어규칙과 언어적인 퍼지 변수는 플랜트의 구체적인 수식을 사용하지 않고 자동적으로 생성된다. 생성된 제어규칙은 퍼지 제어규칙 베이스에 저장되며, 플랜트에 대한 경험이 축적됨에 따라 개선된다. 퍼지 자동회귀 이동평균 제어기를 보일러 시스템에 적용하기 위하여, 주요한 상관 관계를 갖는 3개의 입출력 쌍들을 결정하고, 각 입출력에 대하여 세 개의 단일 제한 루프를 구성하였다. 여러 경우의 모의실험을 통하여 제시된 제어 시스템의 성능을 확인하였다.

**감사의 글**

본 연구는 우석대학교 교내 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

**참 고 문 헌**

[1] R. D. Bell and K. J. Astrom, Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160 MW unit, Report: TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden. 1987.

[2] F. P. de Mello, "Boiler Models for System Dynamic Performance Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 1, pp. 66-74, February 1991.

[3] R. D. Bell and K. J. Astrom, "A Fourth Order Nonlinear Model for Drum-Boiler Dynamics", IFAC 13th Triennial World Congress, San Francisco, USA, 1996.

[4] 권육현, 김상우, 박부건, 김은기, "개선된 LQG/LTR 방법에 의한 보일러-터빈 제어 시스템의 설계", 대한전기학회 논문지, 39권 2호, pp. 199-209, 1990년 2월.

[5] B. W. Hogg and N. M. Ei-Rabaie, "Multivariable Generalized Predictive Control of a Boiler System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 282-288, June 1991.

[6] J. A. Rovnak and R. Corlis, "Dynamic Matrix based Control of Fossil Power Plant", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 320-326, June 1991.

[7] K. S. Ray and D. D. Majumder, "Fuzzy Logic Control of a Nonlinear Multivariable steam generating unit using Decoupling Theory", IEEE Transactions On SMC, Vol, 15, No. 4, pp. 539-558, 1985.

[8] G. Prasad, E. Swidenbank and B. W. Hogg, "A Neural Net Model-based Multivariable Long-range Predictive Control Strategy Applied in Thermal Power Plant Control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 2, pp. 176-182, March 1991.

[9] R. Dimeo and K. Y. Lee, "Boiler-Turbine Control System Design using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, pp. 752-759, December 1995.

[10] F. A. Alturki and A. B. Abdennour, "Neuro-Fuzzy

Control of a Steam Boiler-Turbine Unit", Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, pp. 958-962, Hawaii, U.S.A., 1999.

[11] K. P. Cheung and L. X. Wang, "Comparison of Fuzzy and PI controllers for a Benchmark Drum-Boiler Model", Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, pp. 958-962, Trieste, Italy, 1998.

[12] Y. M. Park, U. C. Moon and K. Y. Lee, A Self-Organizing Fuzzy Logic Controller for dynamic systems using a Fuzzy Auto-Regressive Moving Average (FARMA) Model, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 75-82, February 1995.

[13] Y. M. Park, U. C. Moon and K. Y. Lee, A Self-Organizing Power System Stabilizer using Fuzzy Auto-Regressive Moving Average (FARMA) Model, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, pp. 442-448, June 1996.

[14] U. C. Moon, Y. M. Park and K. Y. Lee, "A development of Power System Stabilizer with a Fuzzy Auto-Regressive Moving Average Model", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 102, pp. 95-101, Feb. 1999.

[15] W. Pedrycz, Fuzzy Control and Fuzzy Systems, John Wiley & Sons, 1989.

[16] A. Ben-Abdenour and K. Y. Lee, "A Decentralized Controller Design for a Power Plant Using Robust Local Controllers and Functional Mapping", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, pp. 394-400, June 1996.

**저 자 소 개**



**문운철 (文雲哲)**

1968년 10월 1일 생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 석사 및 1996년 동 대학원 박사. 1996년-2000년 까지 삼성SDS 재직. 2000년-현재까지 전주 우석대 전기공학과 전임강사. 관심분야는 전력계통 및 지능제어.  
Tel : 063-290-1475  
E-mail : ucmoon@woosuk.ac.kr