

# 쓰레기 소각로의 연소제어를 위한 퍼지모델 예측제어기 설계

Design of a fuzzy model predictive controller for  
combustion control of refuse incineration plant

박 종 진\*, 강 신 준\*, 남 의 석\*, 김 영 일\*\*, 우 광 방\*  
Jong-Jin Park\*, Shin-Jun Kang\*, Eui-Suck Nam\*, Young-Ill Kim\*\*,  
Kwang-Bang Woo\*

※이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 연구되었음

## 요 약

쓰레기 소각로는 다음과 같은 불명확한 요소들을 포함한다. 즉 연료로 사용되는 쓰레기의 물리적 특성의 변동 그리고 연소현상의 복잡성 등이다. 이것은 기존의 제어기법을 쓰레기의 연소제어에 적용하기가 매우 어렵게 만든다. 따라서 대부분의 쓰레기 소각로는 조작자의 운전에 의존한다. 본 논문에서는 쓰레기 소각로의 연소제어를 위한 다변수 퍼지모델 예측제어를 제안한다. 쓰레기 소각로의 모델을 구하기 위해 적응 네트워크에 기초한 퍼지추론시스템이 사용되고 동정된 퍼지 모델을 이용하여 다변수 퍼지모델 예측제어기가 설계된다. 그리고 제안된 제어기의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션이 수행되었다.

## ABSTRACT

Refuse incineration plant operations involve many kinds of uncertain factors, such as the variable physical properties of refuse as fuel and the complexity of the burning phenomenon. This makes it very difficult to apply conventional control methods to the combustion control of the refuse. So most of the refuse incineration plant are operated by operators. In this paper, an multi-variable fuzzy model predictive controller is proposed for the combustion control of the refuse. Adaptive network based fuzzy inference system is used for modeling of the refuse incineration plant and multi-variable fuzzy model predictive controller is designed based on the identified fuzzy model. And computer simulation was carried out to evaluate performance of the proposed controller.

\*연세대학교 전기공학과  
\*\*대림전문대 전기과

## I. 서 론

산업 사회의 발달로 인하여 소득수준이 향상됨에 따라 엄청난 양의 생활쓰레기가 발생하고 있으며 따라서 이를 효율적으로 처리하는 것이 심각한 과제로 떠오르고 있다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하는 방법 중 하나가 쓰레기의 소각하는 것이다. 쓰레기 소각로는 다음과 같은 종류의 불명확한 요소들을 포함한다. 즉 연료로 사용되는 쓰레기의 물리적 특성의 변동 그리고 연소현상의 복잡성 등이다.[1] 그러므로 소각로의 수학적인 모델을 얻기가 어렵고 기존의 제어기법을 적용하기가 어렵다. 현재 많은 경우, 소각로는 조작자에 의한 수동운전에 의존하고 있다. 따라서 쓰레기를 소각시키는 과정에서 발생되는 각종 유해 가스와 분진 등에 의한 대기오염과 쓰레기의 불완전 연소 등을 방지하고, 연소과정에서 발생되는 중발량과 로의 온도를 일정하게 유지하도록 하는 자동제어 시스템의 필요가 증가하고 있다. 이 중 중발량은 소각로에서 발생되는 열량과 동일한 것으로 발전 및 지역난방을 하는 경우 매우 중요한 변수가 된다.

Ono 등[1]은 이러한 복잡한 소각로에 대해 퍼지제어를 적용하여 자동제어 시스템을 구축하였고 Krause 등[2]은 서로 다른 특성을 가진 소각로의 제어를 위해 뉴로-퍼지 기법을 이용하여 적응제어 시스템을 구현하였다.

본 논문에서는 수도권의 소각 플랜트를 대상으로 여기서 얻어진 입, 출력 데이터를 가지고, 소각로의 효율적인 연소제어를 위한 다변수 퍼지모델 예측제어기를 설계한다. 이를 위해 적응 네트워크에 기초한 퍼지추론 시스템(ANFIS)을 이용하여 비선형이고 다변수 시스템인 소각로의 퍼지 모델을 구한다. 이것은

수렴속도가 빠르고 성능이 우수할 뿐만 아니라 퍼지 모델에서 각 규칙에 포함된 소속함수를 자동으로 동조함으로써 서로 다른 소각로의 모델링 및 적용제어 시스템 구축에 용이하다. 동정된 퍼지 모델은 후건부가 입출력 변수의 선형식인 퍼지규칙으로 구성된 Takagi-Sugeno 형의 퍼지 모델로서 이를 이용하여 공정의 출력을 예측하고 예측된 출력과 원하는 공정 출력의 차인 예측 오차가 최소가 되도록 제어 입력을 결정하는 퍼지모델 예측제어기를 설계한다. 제안된 다변수 퍼지모델 예측제어기는 소각로의 중발량을 일정하게 유지하는 것을 목적으로 한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기법의 성능을 검토한다.

## II. 쓰레기 소각 플랜트

쓰레기 소각로는 크게 유동상식 소각로와 스토파식 소각로로 분류된다. 이 중 스토파식 소각로가 현재 대다수이나 유동상식 소각로의 수도 점차 증가되고 있다. 스토파식 소각로는 로내에 쓰레기를 일정량 확보하면서 소각하는 “매스(Mass) 연소” 방식 때문에 연소가 안정되어 있어, 연소열량의 변동이 쓰레기의 질에 크게 좌우되지 않는다. 이 점에서 폐열 보일러에 의해 열을 회수하여 발전하는 경우 스토파식 소각로가 유리하다. 본 논문은 스토파식 소각로를 대상으로 한다. 그림 1은 쓰레기 소각의 전체적인 흐름도를 보여주고 그림 2는 스토파식 소각로의 구조를 나타낸다.

여기서, 쓰레기 소각의 순서는 다음과 같다. 1) 쓰레기 저장소에서 크레인에 의해 소각로에 투입된 쓰레기는 주입기(feeder)에 의해 크게 3단계로 이루어진 화격자 내로 이송된다. 2) 건조 화격자(drying grate)에

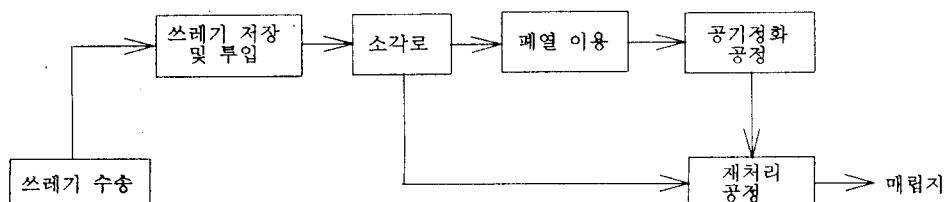


그림 1. 쓰레기 소각의 전체적인 흐름도  
Fig. 1 Overall flowchart of the refuse incineration plant

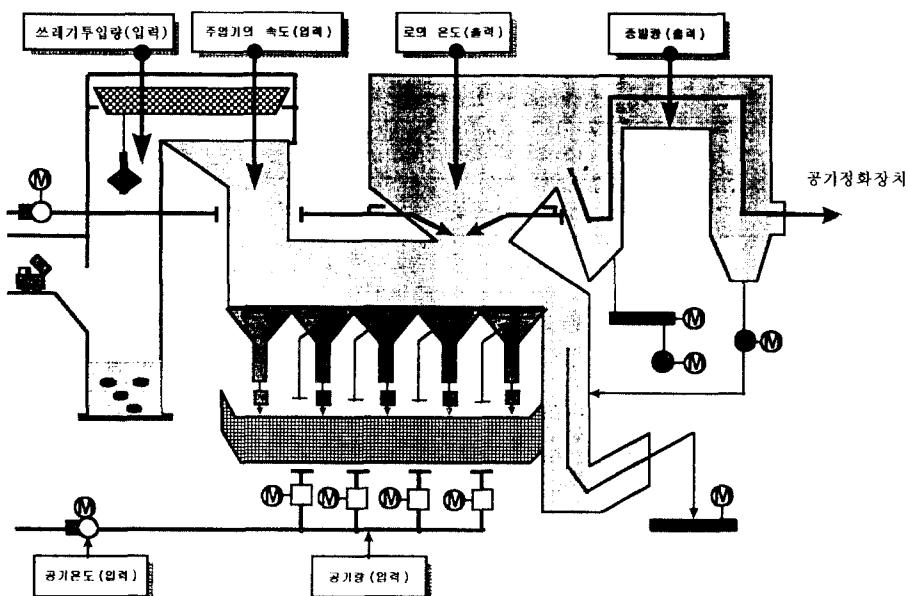


그림 2. 스토카식 소각로의 구조  
Fig. 2 Structure of a stocker-type refuse incineration plant

서는 투입된 쓰레기내에 포함된 수분이 열에 의해 건조되어 소각에 적합하도록 되고, 3)연소화격자(combustion grate)에서는 건조된 쓰레기가 실제로 연소되는 곳으로 적절한 양의 공기 주입과 온도조절이 중요하다. 마지막으로, 연소된 쓰레기는 4)소각재 화격자(burn-out grate)로 이송되어 최종적으로 소각되며 그 재(ash)는 재처리 장치로 보내어 진다. 그리고 더위진 공기는 보일러를 통해 증기와 열을 교환하고 공기정화장치를 거쳐 대기중으로 빠져 나가게 된다.

소각로는 다음과 같은 제어특성을 가진다.

- ① 제어변수간의 상호간섭이 심한 다변수 계통이고,
- ② 소각 등 현상이 복잡하며(Complex),
- ③ 부하의 변동이 심하며(쓰레기의 질이 매일 변함),
- ④ 여러 제어 목적을 만족시켜야 한다.

쓰레기 소각로에서 만족되어야하는 제어목적은 다음과 같다.

- ① 쓰레기가 충분히 공급되지 않거나 너무 많이 공급됨으로써 불완전 연소가 되거나 불이 꺼지지 않도록

#### 록 해야 함

- ② 배출되는 가스내의 산소 농도를 일정하게 유지하여야 함
- ③ 증발량이나 로내의 온도를 일정하게 유지해야 함

이러한 이유로 인해 소각로의 동특성 해석과 제어계 설계를 위한 적절한 모델이 충분히 개발되어 있지 않으며 기존의 제어 이론을 적용하기가 힘들어 대부분의 소각로는 운전자의 수동운전에 의해 운전되고 있다.

### III. 다변수 퍼지 모델 예측 제어기의 설계

#### 3.1 퍼지 모델링

본 논문에서는 소각로의 퍼지 모델을 구하기 위해 Jang[3]에 의해 제안된 적용 네트워크에 기초한 퍼지 추론 시스템(Adaptive Network Fuzzy Inference System)을 사용한다. 이것은 모든 형태의 퍼지 모델을 얻을 수 있으며 본 논문에서는 Takagi-Sugeno 형의 퍼지 모델을 동정한다. 적용 네트워크에 기초한 퍼지 추론 시스템의 구조 예가 그림 3에 보인다.

여기서, 입력은  $x, y$ 이고 출력은  $z$ 이다. 여기에 포함

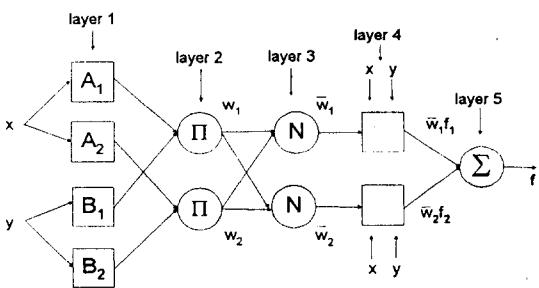


그림 3. 적응네워에 기초한 퍼지 추론 시스템의 구조 예  
Fig. 3 An example of the structure of ANFIS

된 퍼지 규칙은 다음과 같은 Takagi-Sugeno 형의 두 개의 규칙이다.

Rule 1 : If  $x$  is  $A_1$  and  $y$  is  $B_1$

$$\text{Then } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (1)$$

Rule 2 : If  $x$  is  $A_2$  and  $y$  is  $B_2$

$$\text{Then } f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$$

ANFIS가  $L$ 개의 층(layer)을 가지고  $k$ 번째 층은 #(k)개의 노드를 가졌다고 하면  $k$ 번째 층의  $i$ 번째 노드의 출력은  $O_i^k$ 로 표시된다. 이것의 출력값은 이전 층에서 들어오는 입력신호와 각 노드가 가지는 파라미터에 의해 계산된다. 즉,

$$O_i^k = F(O_{i-1}^{k-1}, \dots, O_{*(k-1)}^{k-1}, a, b, c, \dots) \quad (2)$$

여기서,  $a, b, c, \dots$ 는 각 노드에 속한 파라미터들이다. 각 층의 각 노드에서 수행되는 연산은 다음과 같다.

Layer 1 : 이 층의 각 노드  $i$ 에 의한 출력은 식 (3)와 같다.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (3)$$

여기서,  $x$ 는 노드  $i$ 의 입력,  $A_i$ 는 퍼지 언어변수이다.  $O_i^1$ 는  $A_i$ 의 소속함수 값으로 입력  $x$ 가  $A_i$ 를 만족하는 정도를 나타낸다.  $\mu_{A_i}(x)$ 로는 최소값이 0이고 최대값이 1인, 식 (4)로 표현되는 종 모양의 소속함수를 사용한다.

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + [(\frac{x - c_i}{a_i})^2]^{b_i}} \quad (4)$$

여기서,  $\{a_i, b_i, c_i\}$ 는 파라미터 집합이다. 이러한 파라미터들을 조정함으로써 소속함수의 모양을 변경시킨다. 이것이 조정되어야 할 전반부 파라미터이다. 각 파라미터는 일정한 물리적 의미를 지닌다.  $a$ 는 너비의 절반을 의미하고  $b$ 는  $a$ 와 함께 소속함수 값이 0.5가 되는 점의 기울기 그리고  $c$ 는 소속함수의 중심값을 결정한다. 그림 4는 이러한 각 파라미터들의 물리적 의미를 보여준다.

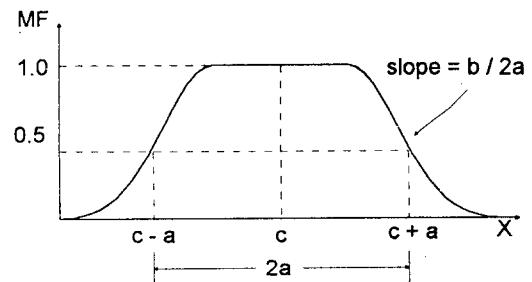


그림 4. 소속함수의 각 파라미터들의 물리적 의미  
Fig. 4 Physical meanings of the parameters in the membership function

Layer 2 : 여기에 속한 각 노드는 입력되는 신호들을 곱해서 출력한다. 예를 들면,

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

이것은 각 퍼지 규칙의 전반부의 적합도를 계산하는 것을 의미한다.

Layer 3 : 이 층에 속한 각 노드  $i$ 는  $i$  번째 규칙의 적합도에 대한 모든 규칙의 적합도의 합의 비를 계산한다.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

즉, 각 노드의 출력은 규준화된 적합도가 된다.

Layer 4 : 이 층에 속한 각 노드  $i$ 의 출력은 다음과 같다.

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (7)$$

여기서,  $\bar{w}_i$ 는 Layer 3의 출력이고  $\{p_i, q_i, r_i\}$ 는 동조되어야 할 파라미터 집합이다. 이 중에 속한 파라미터들이 전반부 파라미터이다.

Layer 5: ① 층의 노드는 모든 입력 신호를 합하여 전체 퍼지모델 출력을 계산한다.

$$O_i^5 = \hat{y} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (8)$$

ANFIS의 각 파라미터들을 동조하기 위해, gradient에 기초한 학습방법인 오차역전파(error back-propagation) 방법과 최소자승법(least square estimation)을 합성하여 사용한다. 이러한 하이브리드 학습 알고리즘의 전방향 패스(forward pass)에서 각 노드의 출력 신호는 layer 4까지 계산되고 전반부 변수가 고정된 상태에서 후반부 변수가 최소자승법에 의해 동정된다. 후방향 패스(backward pass)에서는 오차율이 출력노드에서 입력노드까지 역으로 전달되고 전반부 변수가 gradient descent에 의해 조정된다.[3] 표 1이 과정을 나타내고 있다.

표 1. 하이브리드 학습 알고리즘의 구성

Table 1. Structure of the hybrid learning algorithm

-	전방향 패스	후방향 패스
전전부 변수	고정	gradient descent
후전부 변수	최소자승법	고정
전달되는 신호	노드 출력	오차율

### 3.2 다변수 퍼지모델 예측제어 알고리즘

다중 입력-단 출력(MISO)의 퍼지 모델을 고려하자. ANFIS를 이용한 퍼지 모델링에 의해 동정된 시계열 형태의 퍼지규칙은 다음 식과 같다.

$$R^k: \text{If } y(t) \text{ is } A_0^k, y(t-1) \text{ is } A_1^k, \dots, y(t-n) \text{ is } A_n^k \quad (9)$$

$$\text{Then } y^k(t+1) = \sum_{i=0}^n a_i^k y(t-i) + \sum_{j=0}^l b_j^k u(t-j)$$

여기서,  $k: k\text{번째 } (k=1, \dots, M)$ ,  $b_j^k: 1 \times m$  파라미터

벡터,  $A_i^k$ : 퍼지 집합의 멤버십함수,  $y(t-i)$ 과  $u(t-j)$ 는 출력과  $m \times 1$  입력 벡터이다.

식 (9)의 규칙들에 의해 추정된 모델 출력 벡터  $\hat{y}(t+1)$ 은 다음과 같다.

$$\hat{y}(t+1) = \frac{\sum_{k=1}^M w_{t+1}^k y^k(t+1)}{\sum_{k=1}^M w_{t+1}^k} \quad (10)$$

여기서,  $w_{t+1}^k$ 는 시간  $t+1$ 일때 규칙  $R^k$ 의 적합도,  $M$ 은 퍼지 규칙의 수이다.

시점을 하나씩 증가시켜 N개의 미래 모델 출력을 구하고 과거의 공정 출력과 제어 입력으로 이루어진 항과 미래의 제어입력으로 이루어진 항으로 나누어 진 출력 예측식을 얻기 위해, 이전 시점의 출력들을 이후시점의 출력에 대입하여 정리하면 다음과 같은 일반적인 출력 예측식을 얻을 수 있다.

$$Y_F = G U_F + H U_P + F Y_P \quad (11)$$

$$\text{여기서, } Y_F = [\hat{y}(t+1) \ \hat{y}(t+2) \ \dots \ \hat{y}(t+N)]^T,$$

$$U_F = [A_u(t)^T \ \dots \ A_u(t+N_u-1)^T]^T,$$

$$U_P = [A_u(t-1)^T \ \dots \ A_u(t-l)^T]^T,$$

$$Y_P = [y(t) \ y(t-1) \ \dots \ y(t-n)]^T,$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_0^2 & g_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_0^{N_u} & g_1^{N_u} & g_2^{N_u} & \cdots & g_{N_u-1}^{N_u} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_0^N & g_1^N & \cdots & \cdots & g_{N_u-1}^N \end{bmatrix} (= N \times (N_u \times m)),$$

$$g_i^j = [g_i^{j1} \ g_i^{j2} \ \dots \ g_i^{jm}],$$

$$H = \begin{bmatrix} h_1^1 & h_2^1 & \cdots & h_l^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_1^N & h_2^N & \cdots & h_l^N \end{bmatrix}$$

$$h_i^j = [h_i^{j1} \ h_i^{j2} \ \dots \ h_i^{jm}]$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_0^1 & f_1^1 & \cdots & f_n^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_0^N & f_1^N & \cdots & f_n^N \end{bmatrix}$$

본 논문에서 시스템의 출력이 목표치를 따라가도록 최소화하는 비용함수로 다음을 사용한다.[4]

$$J = \sum_{l=1}^N \| \hat{y}(t+l) - w(t+l) \|^2 + \sum_{l=1}^{N_p} \| \Delta u(t+l-1) \|^2 \quad (12)$$

여기서,  $\|x\|_q = x^T Q x$ ,  $R$ 은  $m \times m$  대각행렬( $R = \text{diag } r_i$ ) 그리고  $w(t)$ 는 기준 입력신호이다. 식 (11)에 의해 앞의 비용함수는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} J &= \|Y_F - W\|^2 + \|U_F\|_R^2 \\ &= \|G U_F + H U_P + F Y_P - W\|^2 + \|U_F\|_R^2 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $R = \text{diag } r$ ,  $W = [w(t+1) \ w(t+2) \dots w(t+N)]^T$

식 (13)을 최소화하는 제어입력은 식 (14)와 같다.

$$U_F = (G^T G + R)^{-1} G^T (W - H U_P - F Y_P) \quad (14)$$

매 샘플링마다 식 (14)에 의해 다시 새로운 제어입력이 계산되지만, 이 중 처음  $m$ 개의 제어입력만 시스템에 인가되어 사용된다.

$$\Delta U(t) = L(W - H U_P - F Y_P) \quad (15)$$

여기서,  $L$ 은  $(G^T G + R)^{-1} G^T$ 의 첫 번째  $m$ 개의 행에 의해 만들어지는 행렬이다.

#### IV. 시뮬레이션 및 결과 고찰

제안된 퍼지모델 예측 제어의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 먼저 수도권 소각 플랜트에서 얻어진 입·출력 데이터를 통해 소각로의 퍼지모델을 구하였다. 본 논문에서는 발전이나 지역 난방에 중요한 증발량만을 소각로의 출력으로 하고, 입력에서 1차 공기의 온도와 2차 공기량은 일정한 값으로 하고 주입기의 속도는 쓰레기 투입량과 일정한 관계를 갖는다고 본다. 따라서 소각로는 입력은 1차

공기량과 쓰레기 투입량, 출력은 증발량인 2입력 1출력의 다변수 계통으로 생각한다. 그림 5는 쓰레기 소각로의 제어구조의 블록선도를 보여준다. 그림 6은 쓰레기 소각로의 퍼지 모델을 구하기 위해 사용된 ANFIS의 구조를 나타낸다. 전반부 변수로는 출력변수인 증발량  $y(t)$ ,  $y(t-1)$ 을 선택하였고 각각 3개의 퍼지 언어변수를 가진다. 따라서 그것의 조합에 의해 9개의 퍼지 규칙이 만들어졌다. 후반부 변수로는 제어입력  $u_1(t)$ ,  $u_1(t-1)$ ,  $u_1(t-2)$ 와  $u_2(t)$ ,  $u_2(t-1)$ ,

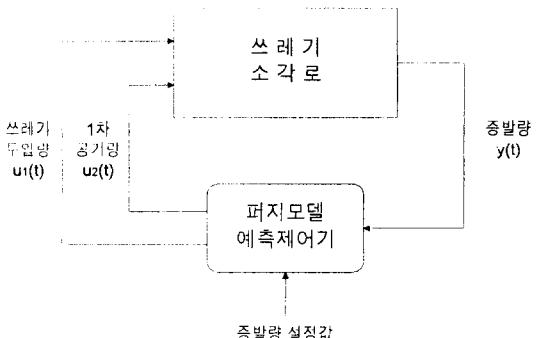


그림 5. 소각로의 블록선도

Fig. 5 Block diagram of a refuse incinerator

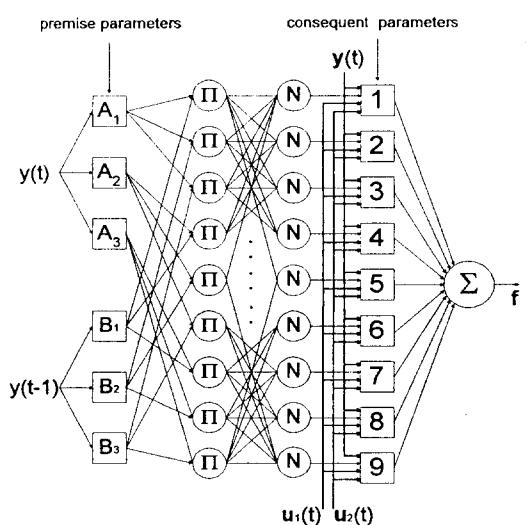
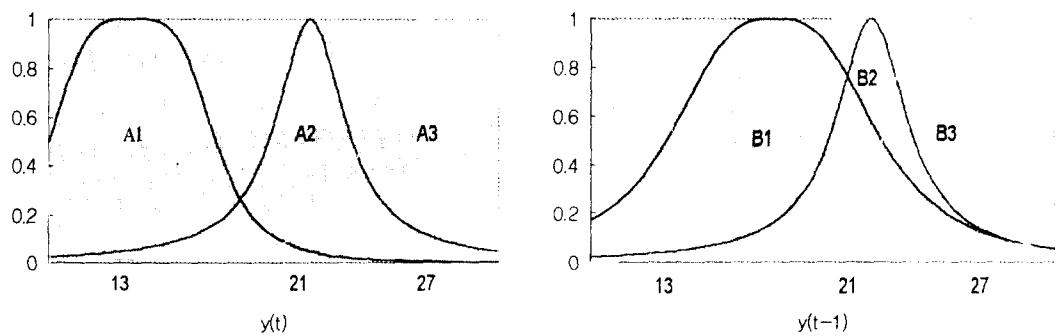


그림 6. 소각로의 퍼지 모델을 위한 ANFIS의 구조

Fig. 6 Structure of ANFIS for a fuzzy model of the refuse incinerator



If  $y(t)$  is A1 and  $y(t-1)$  is B1

$$\text{Then } y(t+1) = -10.3y(t) + 5.8y(t-1) - 20.4y(t-2) + 50.6u_1(t) + 11.4u_1(t-1) + 16.5u_1(t-2) \\ - 12u_2(t) + 14.1u_2(t-1) - 0.7u_2(t-2)$$

If  $y(t)$  is A1 and  $y(t-1)$  is B2

$$\text{Then } y(t+1) = 16.7y(t) - 0.9y(t-1) - 7y(t-2) + 21u_1(t) - 21.5u_1(t-1) - 7.8u_1(t-2) \\ - 10.6u_2(t) + 18.7u_2(t-1) - 1.3u_2(t-2)$$

If  $y(t)$  is A1 and  $y(t-1)$  is B3

$$\text{Then } y(t+1) = 13.7y(t) - 2.2y(t-1) - 12.5y(t-2) + 0.7u_1(t) + 8.0u_1(t-1) - 5.4u_1(t-2) \\ - 6.2u_2(t) - 4.7u_2(t-1) + 1.4u_2(t-2)$$

If  $y(t)$  is A2 and  $y(t-1)$  is B1

$$\text{Then } y(t+1) = -0.13y(t) + 0.07y(t-1) - 0.06y(t-2) + 0.16u_1(t) - 0.14u_1(t-1) + 0.006u_1(t-2) \\ + 0.019u_2(t) + 0.018u_2(t-1) - 0.005u_2(t-2)$$

If  $y(t)$  is A2 and  $y(t-1)$  is B2

$$\text{Then } y(t+1) = 0.013y(t) - 0.004y(t-1) - 0.078y(t-2) - 0.32u_1(t) + 0.11u_1(t-1) + 0.015u_1(t-2) \\ + 0.002u_2(t) - 0.009u_2(t-1) + 0.002u_2(t-2)$$

If  $y(t)$  is A2 and  $y(t-1)$  is B3

$$\text{Then } y(t+1) = -0.014y(t) - 0.05y(t-1) + 0.03y(t-2) + 0.09u_1(t) + 0.03u_1(t-1) - 0.02u_1(t-2) \\ - 0.004u_2(t) - 0.02u_2(t-1) + 0.005u_2(t-2)$$

If  $y(t)$  is A3 and  $y(t-1)$  is B1

$$\text{Then } y(t+1) = -16.9y(t) + 1.0y(t-1) + 4.5y(t-2) + 18.9u_1(t) - 3.0u_1(t-1) - 8.9u_1(t-2) \\ + 9.3u_2(t) - 8.1u_2(t-1) - 0.9u_2(t-2)$$

If  $y(t)$  is A3 and  $y(t-1)$  is B2

$$\text{Then } y(t+1) = 1.6y(t) - 29.4y(t-1) + 22y(t-2) + 31.5u_1(t) + 0.8u_1(t-1) + 5.3u_1(t-2) \\ - 15.8u_2(t) - 13.8u_2(t-1) - 2.5u_2(t-2)$$

If  $y(t)$  is A3 and  $y(t-1)$  is B3

$$\text{Then } y(t+1) = 15.3y(t) - 22.7y(t-1) - 1.7y(t-2) + 3.3u_1(t) + 26.4u_1(t-1) + 7.5u_1(t-2) \\ - 14.4u_2(t) - 26.6u_2(t-1) + 2.1u_2(t-2)$$

그림 7. 소각로의 퍼지모델

Fig. 7 Fuzzy model of a refuse incinerator

$u_2(t-2)$  그리고 증발량  $y(t)$ ,  $y(t-1)$ ,  $y(t-2)$ 를 선정하였다. 그림 7은 동정된 퍼지모델을 나타낸다. 그리고 표 2는 동정된 퍼지 모델의 멤버쉽함수의 파라미터 값들을 보여준다.

표 2. 소각로 퍼지모델의 멤버쉽 함수 파라미터

Table 2. Membership function parameters of the fuzzy model of a refuse incinerator

-	a	b	c
A1	4.1	2.0	13.3
A2	2.0	1.1	21.5
A3	3.3.	1.5	27.2
B1	5.0	1.5	17.5
B2	2.2	1.0	22
B3	2.1	1.5	24.5

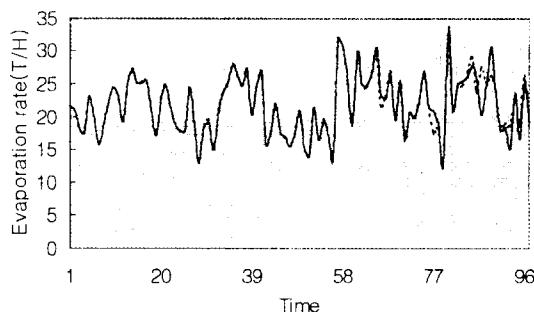


그림 8. 실 플랜트 출력과 퍼지 모델 출력의 비교  
Fig. 8 Comparison of the real plant outputs and fuzzy model outputs

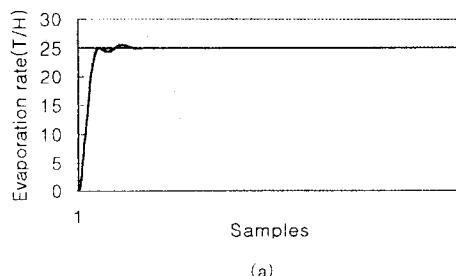


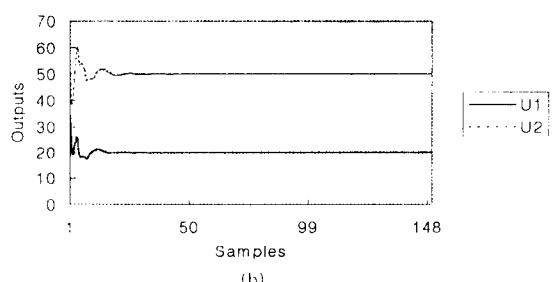
그림 9. 시뮬레이션 결과와 제어입력  
Fig. 9 Simulation result and control inputs

그림 8은 동정된 퍼지모델에 의한 출력과 실 플랜트의 출력을 나타낸다. 동정된 퍼지 모델이 실 플랜트를 잘 모사하는 것을 볼 수 있다. 실선은 실 플랜트의 출력을 나타내고 점선은 동정된 퍼지모델에 의한 출력을 나타낸다.

그림 9는 퍼지모델 예측제어에 의해 소각로를 제어한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 이 때의 제어입력들의 출력이다. 제어기의 설계변수인  $N$ ,  $Nu$  그리고  $R$ 은 5, 3 그리고 상수 100의 값을 가지는 대각행렬이다. 제안된 제어기는 소각로의 증발률을 일정한 값으로 잘 제어함을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 복잡하고 비선형 시스템인 쓰레기 소각로의 효율적인 연소제어를 위해 다변수 퍼지모델 예측제어기를 설계하였다. 수도권 소각로 플랜트를 대상으로하여 여기서 얻어진 입, 출력 데이터를 가지고 소각로의 퍼지 모델을 구하기 위해 사용된 적응 네트워크 기초한 퍼지추론시스템은 대상 플랜트를 거의 정확하게 모사하는 것뿐만 아니라 퍼지 모델의 각 규칙에 포함된 소속함수를 자동으로 동조한다. 따라서 서로 다른 소각로의 모델링에 이용될 수 있을 뿐 아니라 적용 제어시스템의 구축이 가능하다. 얻어진 퍼지 모델을 기반으로 다변수 퍼지모델 예측제어기를 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기는 발전 및 지역난방에 중요한 출력인 소각로의 증발률을 일정하게 유지하는 것을 볼 수 있었으며 실제 공정에 대한 실용화의 가능성을 확인할 수 있다.



## 참 고 문 현

1. H. Ono etc., "combustion control of refuse incineration plant by fuzzy logic", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 32, pp. 193-206, 1989.
2. B. Krause etc., "A neuro-fuzzy adaptive control strategy for refuse incineration plants", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 63, pp. 329-338, 1994.
3. J. S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, 1993.
4. M. Kinnaert, "Adaptive generalized predictive controller for MIMO systems", *Int. J. Control*, vol. 50, no. 1, pp. 161-172, 1989.
5. Tsuyoshi Goromaru, et. al., "Modeling of a refuse incineration plant and its application to combustion control problem", 計測自動制御學會論文集, vol. 26, no. 81, pp. 894-901, 1990.
6. Clarke, D.W., Mohtadi, C., and Tuffs, P.S., "Generalized Predictive Control", *Automatica*, vol. 23, (3) parts 1 & 2, pp 137-160, 1987.
7. Richalet, J., "Industrial applicatons of model based predictive control", *Automatica* 29, pp. 1251-1274, 1993.
8. J. Valente de Oliveira, J. M. Lemos, "Long-range predictive adaptive fuzzy relational control", *fuzzy sets and systems*, Vol. 70, pp. 337-357, 1995.
9. Nakamori, Y., Suzuki, K., and Yamanaka, T., "Model Predictive Control using Fuzzy Dynamic Models", IFSA '91 Brussels, pp 135-138, 1991.
10. T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.



**박 종 진(Jong-Jin Park)** 정회원  
1967년 4월 12일생  
1989년:연세대학교 전기공학과 졸업  
1991년:동 대학원 전기공학과 졸업(석사)  
현재:동 대학원 전기공학과 박사과정

**강 신 준(Shin-Jun Kang)**

정회원

1969년 5월 5일생  
1992년:연세대학교 전기공학과 졸업  
1994년:동 대학원 전기공학과 졸업(석사)  
현재:동 대학원 전기공학과 박사과정



**남 익 석(Eui-Suck Nam)** 정회원  
1968년 2월 1일생  
1991년:연세대학교 전기공학과 졸업  
1993년:동 대학원 전기공학과 졸업(석사)  
현재:동 대학원 전기공학과 박사과정

**김 영 일(Young-Ill Kim)**

정회원

1952년 10월 27일생  
1983년:충실대학교 전기공학과 졸업  
1985년:연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사)  
1989년:연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사)  
1987~1989년:LG 산전 연구소 선임 연구원  
1989~1992년:동해중앙연구소 수석 연구원  
1992년~현재:대림전문대 전기과 조교수

**우 광 방(Kwang-Bang Woo)**

정회원

1934년 1월 25일생  
1957년:연세대 전기공학과 졸업  
1962년:미국 Oregon State Univ. 전기공학과 졸업 (MS)  
1964년:미국 Oregon State Univ. 전기공학과 졸업 (Ph. D)  
1965년:Univ. of Michigan 박사 후 연구원  
1966년:Washington Univ (St. Louis) 전기공학과 조교수  
1971년:미 National Cancer Institute 책임연구원  
1979년:미 The Johns Hopkins Univ. School of Medicine Oncology Center 연구원  
1982~현재:연세대학교 전기공학과 교수  
1992~현재:연세대 자동화기술연구소장