

논문 2009-5-27

쓰레기 소각 플랜트 연소 제어를 위한 다변수 퍼지 모델링

Multi-variable Fuzzy Modeling for Combustion Control of Refuse Incineration Plant

박종진*, 최규석**, 안인석***

Jong-Jin Park, Gyoo-Seok Choi, Ihn-Seok Ahn

요 약 본 논문에서는 쓰레기 소각로의 효율적인 연소 제어를 위해 쓰레기 소각 플랜트의 다변수 퍼지 모델을 구한다. 먼저 복잡하고 비선형 시스템인 소각로의 모델을 구하기 위해 다변수 퍼지 모델링을 수행한다. 얻어진 다변수 퍼지 모델은 주어지는 입력에 대해 소각로의 출력을 정확하게 예측한다. 그리고 얻어진 퍼지 모델은 시뮬레이터 구현에 사용되어 소각로의 출력예측에 의한 제어전략의 구축 및 운전자의 훈련 등에 사용되는 운전보조 시뮬레이션 시스템을 구현할 수 있다.

Abstract In this paper, multi-variable fuzzy model for efficient combustion control of refuse incineration plant is obtained. First, to obtain model of incineration plant which is complex and nonlinear multi-variable fuzzy modeling is performed. Obtained multi-variable fuzzy model predicts outputs of incinerator almost exactly. Then using multi-variable fuzzy model we can build simulator which is used as operation simulator for building of control strategy and training of operator.

Key Words : 쓰레기 소각 플랜트, 연소 제어, 다변수 퍼지 모델링

I. 서 론

쓰레기 소각로는 연료로 사용되는 쓰레기의 물리적 특성의 변동 그리고 연소현상의 복잡성(Complexity) 등으로 인해 매우 복잡한 공정으로 다음과 같은 제어특성을 가진다. 첫째, 제어변수간의 상호간섭이 심한 다변수 계통이고, 둘째, 소각 등 현상이 복잡하며, 셋째, 부하의 변동이 심하며(쓰레기의 질이 매일 변함), 넷째, 여러 가지 제어 목적을 동시에 만족시켜야 한다. 그러므로 소각로의 수학적인 모델을 얻기가 힘들고, 수학적인 모델에 기초한 제어기의 설계에 의해 원하는 제어 성능을 얻기가 힘들다. 또한 요즘 쓰레기 소각로의 배출가스에 대

한 환경 기준치가 갈수록 엄격해 지고 있는 상황에서 쓰레기의 불완전 연소에 의한 공해요인 발생의 억제나 후처리 정화공정의 비용을 낮추기 위해서 쓰레기의 완전연소의 필요성은 더욱 증가되는 실정이다.

기존의 소각로는 많은 경우 운전자의 경험에 의한 수동운전에 의존하고 있다. 따라서 쓰레기의 불완전 연소에 의한 대기오염 방지와 연소과정에서 발생하는 증발량과 로의 온도를 일정하게 유지하는 최적의 운전이 가능하도록 새로운 제어 시스템의 필요성이 대두된다. 최근 들어 선형 상태공간 모델이나 퍼지 이론 및 신경회로망을 이용한 소각로의 연소제어 및 자동제어 시스템의 최적화에 관한 연구가 있어 왔다. Ono 등[1]은 복잡한 소각로에 대해 퍼지 이론을 이용하여 증발량을 일정한 구간 내에 유지하는 퍼지 제어 시스템을 구현하였다. 이는 운전자의 관찰에 의해 얻어지던 입, 출력 변수의 질적인 정

*정회원, 청운대학교 인터넷학과

**중신회원, 청운대학교 컴퓨터학과(교신저자)

***정회원, 위덕대학교 에너지전기공학부

접수일자 2009.8.18, 수정일자 2009.9.26

보를 퍼지 센싱을 통해 얻고 이것과 미리 얻어진 퍼지 규칙을 이용하여 제어를 행한다. Krause 등[3]은 서로 다른 특성을 가진 소각로의 연소 제어 및 시스템 최적화를 위해 뉴로-퍼지 기법을 이용하여 적응 제어시스템을 구현하였다. 그러나 앞의 두 방법은 적절한 퍼지 규칙을 얻기 위하여 많은 시간이 소요되고 다른 소각로에 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 황이철[4]은 스토커(stoker)식 소각로의 증기발생량 안정화와 유해 배기가스를 줄이기 위한 선형 제어기 설계에 대한 기초 연구로서, 소각 플랜트의 입출력 실험데이터로부터 선형 제어모델을 얻는 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 다변수 시스템인 소각로의 비선형 모델을 얻기 위해 기존의 방법에 비해 적절한 퍼지 모델을 얻기 쉽고 이를 다변수 퍼지모델로 쉽게 확장할 수 있는 Sugeno에 의해 제안된 퍼지 모델링[5, 6]을 이용하여 쓰레기 소각로의 다변수 퍼지 모델을 구한다. 얻어진 퍼지 모델은 쓰레기 소각로의 연소제어를 위한 운전 보조 시스템 구축을 위해 사용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 스토커식 소각로를 가지는 소각 플랜트의 처리 과정과 연소제어에 대해 설명하고 입출력 실험 데이터를 통해 소각로의 특성을 해석하고 입출력 변수를 설정한다. 3장에서는 Takagi-Sugeno 퍼지 모델링에 기초하여 소각 플랜트의 퍼지 모델링을 기술하고 다변수 퍼지 모델로의 확장에 대해 설명한다. 4장에서는 소각로의 다변수 퍼지 모델을 구하기 위해 소각로의 입, 출력 데이터를 가지고 퍼지 모델링을 행하고, 얻어진 퍼지 모델에 의한 결과와 실험 결과와 비교, 고찰한다. 끝으로 5장에서는 이 논문의 결론과 향후 소각로 운전 보조 시스템을 설계에 관한 내용을 간략히 기술한다.

II. 쓰레기 소각 플랜트

2.1 쓰레기 소각로의 처리 공정

쓰레기를 대량, 연속적으로 소각 처리하는 방식으로 스토커식 소각로는 내열 주물체의 화격자 위에 쓰레기를 공급하여 화격자의 아래쪽에서 공기를 흡입하면서 연소시키는 방식으로 연소가 안정되어 있고, 연소열량의 변동이 쓰레기의 질에 크게 좌우되지 않는다. 따라서 소각로에 반입된 쓰레기를 별도의 분리, 처리 과정없이 대량

으로 소각할 수 있는 특성을 가진다. 본 논문은 스토커식 소각로를 대상으로 한다.

소각로에서의 쓰레기의 처리는 사전분리 및 혼합, 연소에 의한 제어 그리고 후처리 설비에 의한 처리의 3개 공정으로 구성되어 있다. 그림 1은 이를 나타낸다. 사전분리란 소각 대상이 되는 폐기물 중 비닐, 플라스틱, 깡통 등 불완전한 소각으로 공해 물질이 발생할 소지가 있거나 불완전 연소의 가능성이 있는 물질을 사전에 분리, 처리하는 방안이다. 혼합이란 쓰레기 성분을 균일하게 함으로써 원활한 연소가 가능하도록 소각로에 투입하기 전에 쓰레기를 서로 섞는 것을 의미한다.

후처리는 소각 후 발생하는 가스에 포함된 오염물질을 별도의 설비를 이용하여 제거하는 방안을 말한다.

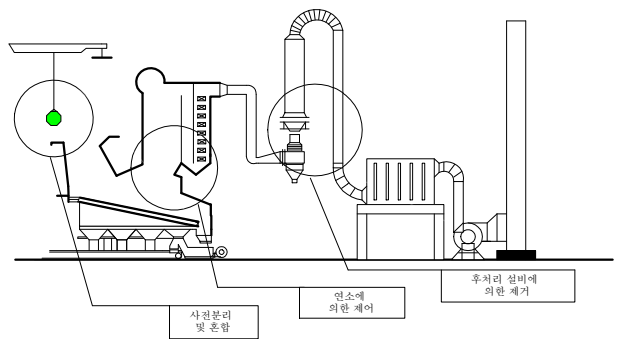


그림 1. 쓰레기 소각처리 과정
Fig. 1. Procedure of refuse disposal

연소에 의한 제어는 소각로 내에서 쓰레기가 완전연소 하도록 하고, 에너지의 효율적 활용의 관점에서 일정한 열량의 증기 발생량을 유지하며, 이미 생성된 공해물질은 분해시키는 환경을 제공하도록 연소상태를 조절하는 것을 뜻한다. 연소조건은 흔히 3T라고 불리는 온도, 시간 그리고 난류의 인자를 중심으로 결정된다. 독성 유기물은 고온 상태에서 일정시간 이상 유지시키면 파괴되는, 소위 열분해가 가능하다. 연소로 내에서 독성 유기물이 파괴되고, 불완전 연소에 의한 중간 생성물이 산화되기 위해서는 고온의 연소기체를 추가로 공급되는 공기와 잘 혼합시켜 일정 이상의 반응시간을 확보할 수 있도록 설계하고 운전하여야 한다.

2.2 소각로의 연소제어

그림 2는 스토커식 소각로의 구조를 나타낸다. 여기서, 쓰레기 소각의 순서는 다음과 같다. 1) 쓰레기 저장소에

서 크레인에 의해 소각로에 투입된 쓰레기는 주입기(feeder)에 의해 크게 3단계로 이루어진 화격자 내로 이송된다. 2) 건조 화격자(drying grate)에서는 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 보내어진다. 그리고 더워진 공기는 보일러를 통해 증기와 열을 교환하고 공기정화장치를 거쳐 대기 중으로 빠져 나가게 된다. 그림 3은 소각로의 입, 출력 변수를 나타내는 블록 선도를 보여준다.

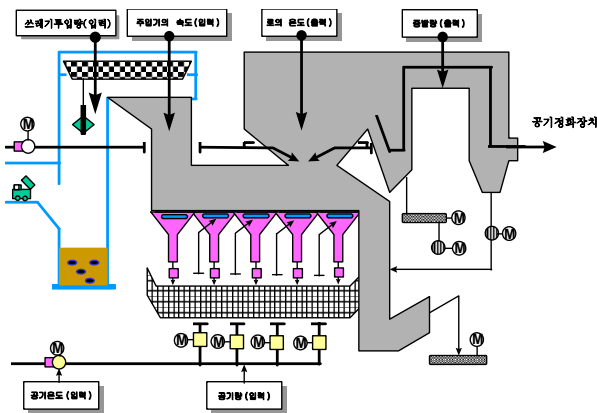


그림 2. 스톡카형 소각로의 구조
Fig. 2. Structure of Stocker type incinerator

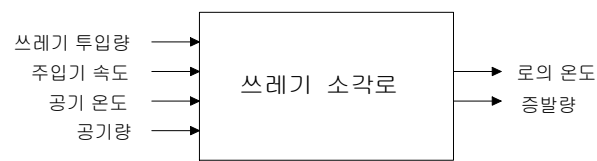


그림 3. 소각로 입-출력관계 블록선도
Fig. 3. Block-diagram of Inputs-outputs of incinerator

- 그림 3의 각 변수들의 물리적 의미는 다음과 같다.
- 노의 온도(°C) : 연소 시 소각로 내의 온도로서 적절한 로내 온도 유지는 소각의 안정화 및 클링커(clinker) 현상 방지 그리고 대기 오염 유해물질로 알려진 산화질소 화합물(NOx)의 대량 생성 방지에 필수적이다.
 - 증발량(ton/hour) : 연소에 의해 소각로에서 발생되

는 증기량으로 발생 열량과 동일하며 폐열 보일러에 의해 열을 회수하는 경우 에너지 회수의 관점에서 매우 중요한 변수이다.

- 쓰레기 투입량(ton) : 쓰레기 저장소에서 크레인에 의해 소각로의 화격자 위로 투입되는 쓰레기의 양으로 적절한 연소를 위해 중요하고 이것은 주입기의 속도에 의해 조절될 수 있다.
- 공기량(m³/hour) : 연소를 위해 소각로 내에 송풍되는 공기량으로 완전 연소를 위해 이것의 적절한 조절은 매우 중요하다.
- 공기의 온도(°C) : 송풍되는 공기의 온도로서 에너지를 절약하고 효율적인 소각을 위해 소각 시 발생하는 증기를 이용하여 로내에 투입되는 공기를 적절한 온도로 데워준다.
- 주입기의 속도(m/hour) : 크레인에 의해 소각로 안으로 투입된 쓰레기를 화격자 위로 밀어 넣어주는 주입기의 속도로서 연소에 필요한 쓰레기의 양을 조절하고 적절한 쓰레기 두께를 유지하기 위해 조절한다.

쓰레기 소각로의 효과적인 연소 제어는 다음의 제어 목적을 만족시킴으로써 이루어진다. 즉, 쓰레기가 충분히 공급되지 않거나 혹은 과다하게 공급됨에 따라 발생하는 불완전 연소를 방지하고, 배출되는 가스내의 산소 농도를 일정하게 유지하며, 증발량과 로내 온도를 일정하게 유지하는 것이다.

III. 쓰레기 소각로 퍼지 모델링

3.1 소각로의 퍼지 모델링

퍼지 모델링[5, 6]은 입력 공간을 퍼지 부분 공간으로 할하여 각 부분 공간의 입-출력 관계를 선형식으로 나타내고 가중치를 고려한 이들의 합에 의해 비선형 시스템의 입출력 관계를 나타내는 것으로 전반부 구조 동정과 파라미터 동정 그리고 후반부 구조 동정 그리고 파라미터 동정의 4단계로 구분된다.

다음의 그림 4는 퍼지 모델링의 구성도를 나타낸다.

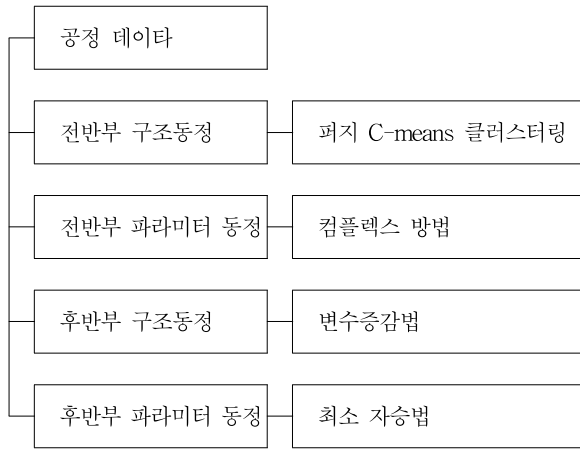


그림 4. 퍼지 모델링의 구성도
Fig. 4. Schematic diagram of fuzzy modeling

앞의 단계들에 의해 동정된 퍼지 모델은 식(1)의 표현으로 구성된다.

$$R^k: \text{If } y(t) \text{ is } A_0^k, y(t-1) \text{ is } A_1^k, \dots, y(t-n) \text{ is } A_n^k \\ u(t) \text{ is } B_0^k, u(t-1) \text{ is } B_1^k, \dots, u(t-m) \text{ is } B_m^k \\ \text{Then } y^k(t+1) = \sum_{i=0}^n a_i^k y(t-i) + \sum_{j=0}^m b_j^k u(t-k-j-d) \quad (1)$$

여기서, k : k 번째 퍼지규칙 ($k=1, \dots, N$),
 n : 출력의 차수 ($=Na$),
 m : 제어 입력의 차수 ($=Nb$),
 A_i^k, B_j^k : 퍼지 집합의 멤버쉽함수,
 d : 플랜트의 지연시간.

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

$$\hat{y}(t+1) = \frac{\sum_{k=1}^N w_{t+1}^k y^k(t+1)}{\sum_{k=1}^N w_{t+1}^k} \quad (2)$$

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

단계 4의 후반부 파라미터는 오프-라인과 온-라인으로 동조될 수 있다. 오프-라인으로 동조하는 경우, m 개의 데이터를 가지고 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$XA = Y \quad (3)$$

여기서, $A^T = [a_{10}, \dots, a_{n0}, a_{11}, \dots, a_{n1}, a_{1k}, \dots, a_{nk}]$,

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T,$$

$$x_i^T = [w_i^1, \dots, w_i^n, w_i^1 x_{1i}, \dots, w_i^n x_{1i}, w_i^1 x_{ki}, \dots, w_i^n x_{ki}]$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1^T \\ x_2^T \\ \vdots \\ x_m^T \end{bmatrix}$$

이 때, 자승오차 $\|XA - Y\|^2$ 를 최소화하는 A^* 는 식(4)와 같다.

$$A^* = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

3.2 다변수 퍼지 모델링

다변수 입·출력 퍼지 모델은 다중 입력-단일 출력 퍼지 모델로부터 쉽게 확장될 수 있다. 먼저 m 개의 입력과 q 의 출력을 가지는 MIMO 시스템(Multi Input Multi Output System)을 위한 퍼지 규칙 R 을 생각하자.

$$R = \{ R_{MIMO}^1, R_{MIMO}^2, \dots, R_{MIMO}^N \} \quad (5)$$

여기서, R_{MIMO}^i 는 MIMO 퍼지 모델의 i 번째 규칙을 나타내고 다음과 같은 형태를 지닌다.

$$R_{MIMO}^i: \text{If } u_1 \text{ is } A_i, \dots, \text{and } u_m \text{ is } B_i \\ \text{Then } y_1 \text{ is } C_i^1, \dots, \text{and } y_q \text{ is } C_i^q \quad (6)$$

R_{MIMO}^i 가 다음과 같은 퍼지 규칙으로 나타내어진다 고 하자.

$$R_{MIMO}^i: (A_i \times \dots \times B_i) \rightarrow (C_i^1 + \dots + C_i^q) \quad (7) \\ = \bigcup_{k=1}^q (A_i \times \dots \times B_i) \rightarrow C_i^k$$

식 (7)을 통해 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \left\{ \bigcup_{i=1}^N R_{MIMO}^i \right\} \\ = \left\{ \bigcup_{i=1}^N [(A_i \times \dots \times B_i) \rightarrow (C_i^1 + \dots + C_i^q)] \right\} \\ = \left\{ \bigcup_{k=1}^q \bigcup_{i=1}^N [(A_i \times \dots \times B_i) \rightarrow C_i^k] \right\} \\ = \{ RB_{MISO}^1, RB_{MISO}^2, \dots, RB_{MISO}^q \} \quad (8)$$

식 (8)은 MIMO 시스템의 퍼지 규칙 R이 q개의 부 (sub)규칙 베이스 RB_{MISO}^k 로 이루어짐을 나타낸다. 따라서 m개의 입력과 q개의 출력을 가진 MIMO 시스템은 m개의 입력과 하나의 출력을 가지는 q개의 부 시스템으로 나눌 수 있다. 그러므로 RB_{MISO}^k 는 MIMO 퍼지 시스템의 규칙 베이스 R의 부 규칙 베이스이다.

IV. 모의 실험 및 결과 고찰

소각로의 다변수 퍼지 모델을 얻기 위해 경기도의 쓰레기 소각장에서 구한 입출력 데이터를 이용하여 소각로의 각 출력에 대해 퍼지 모델을 구하였다. 소각로의 출력은 발전이나 지역 난방에 중요한 증발량과 소각의 안정과 공해방지 측면에서 중요한 소각로 온도로 하고, 소각로의 입력은 1차 공기량과 쓰레기 투입량으로 하였다. 표 1은 대상 소각 플랜트에서 사용되는 각종 입·출력 변수 값들이다.

표 1. 소각로의 입출력 변수들
Table 1. Input-output variables of incinerator

변 수	설정 범위
소각로 온도(°C)	850~1050
증발량(Ton/Hour)	26~28
공기량(Ton/Hour)	가변
1차공기온도(°C)	160~180
쓰레기량(Ton/Hour)	가변

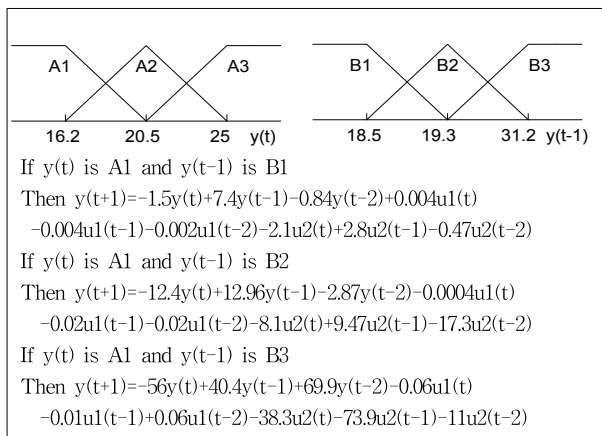


그림 5. 소각로의 퍼지 모델 일부(증발량이 출력)
Fig. 5. Parts of fuzzy model of incinerator (amount of evaporation)

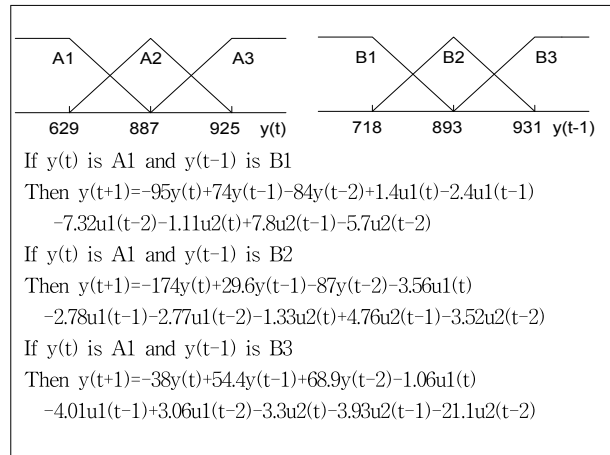


그림 6. 소각로의 퍼지 모델 일부(로내 온도가 출력)
Fig. 6. Parts of fuzzy model of incinerator (temperature of incinerator)

동정된 퍼지 모델의 성능 평가지수 ISE는 0.015로 매우 우수하며 실 시스템을 거의 정확하게 모사함을 볼 수 있다. 얻어진 각각의 퍼지 모델을 이용하여 앞 장에서 설명한 대로 다변수 입·출력 퍼지 모델은 다중 입력-단일 출력 퍼지 모델로부터 쉽게 확장될 수 있으므로 소각로에 대한 다변수 퍼지 모델을 구할 수 있다. 이것은 운전자가 현재의 소각로의 입력변수 값들을 입력하면 그에 대한 공정 출력 값들을 예측하므로 시뮬레이터를 만들어 제어전략을 구축하거나 연소제어의 모의실험을 통한 운전기술의 숙련을 가져올 수 있다. 다음 그림은 얻어진 퍼지 모델에 의한 각 출력과 실 플랜트 출력의 결과이다.

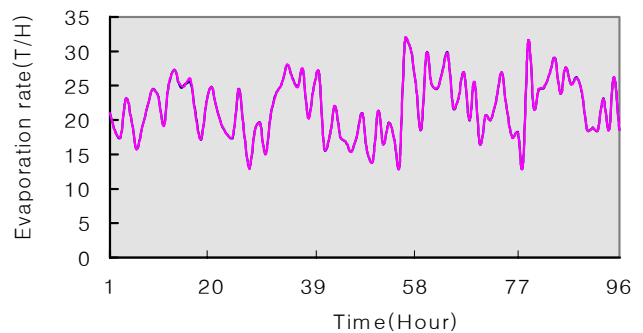


그림 7. 실 플랜트 출력과 퍼지 모델 출력 (증발량이 출력인 경우)
Fig. 7. Outputs of real plant and fuzzy model (amount of evaporation)

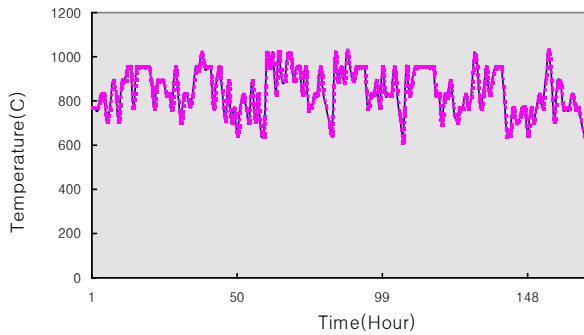


그림 8. 실 플랜트 출력과 퍼지 모델 출력
(로내 온도가 출력인 경우)
Fig. 8 Outputs of real plant and fuzzy mode
(temperature of incinerator)

V. 결론

본 논문에서는 복잡하고 다변수 비선형 시스템인 쓰레기 소각로의 효율적인 연소제어를 위해 소각로의 입, 출력 데이터를 가지고 퍼지 모델링을 통해 적절한 퍼지 모델을 얻고 이를 다변수 퍼지모델로 확장하여 우수한 소각로의 퍼지 모델을 구했다. 얻어진 퍼지 모델은 쓰레기 소각로의 연소제어를 위한 운전 보조 시스템 구축을 위해 사용될 수 있다. 증발량과 로내 온도를 출력으로 하는 동정된 소각로의 퍼지모델은 적은 수의 규칙을 가지고 소각로를 매우 정확하게 모사하는 것을 볼 수 있으며 성능지수 ISE는 0.015로 매우 우수하였다.

추후 얻어진 퍼지 모델에 의해 예측된 출력과 원하는 출력으로 이루어진 성능 평가지표를 최소로 하도록 시뮬레이터를 구현하고 이를 바탕으로 소각로의 출력을 예상할 수 있는 운전 보조 시스템을 설계할 수 있다. 운전 보조 시스템은 퍼지 모델의 출력예측에 의한 제어전략의 구축 및 운전자의 훈련 등에 사용될 수 있다. 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 통해 운전자에 의한 수동운전 훈련에 사용가능함을 보였다.

참고 문헌

- [1] H. ONO etc., "combustion control of refuse incineration plant by fuzzy logic", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 32, pp. 193-206, 1989.
- [2] M. Fuziyoshi, " A Fuzzy automatic combustion control System of refuse incineration plant," *Proc. of the 2nd Inter. Conf on Fuzzy Logic & Neural Networks*, pp.469-472, 1992
- [3] B. Krause etc., "A neuro-fuzzy adaptive control strategy for refuse incineration plants", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 63, pp. 329-338, 1994.
- [4] 황이철, "소각 플랜트의 증기발생 및 배기가스에 대한 파라메트릭 ARX 모델 규명", *제어·자동화·시스템공학 논문지*, vol. 8, pp 556-563, 2002.
- [5] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE SMC*, vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [6] M. Sugeno and Kang, G. T., "Fuzzy Modeling and Control of Multilayer Incinerator", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 18, pp 329-346, 1986.
- [7] 김민석, 김경희, 이인범, "발전소의 대기오염물질 배출 예측 모델 개발", *제어·자동화·시스템공학 논문지*, vol. 4, pp 543-550, 1998.

※ 본 논문은 2009년도 청운대학교 교내연구비로 수행되었습니다.

저자 소개

박 종 진(정회원)

· 제9권 1호 참조
· 현 청운대학교 인터넷학과 교수
<주관심분야 : 지능시스템, 임베디드시스템, 인터넷 프로그래밍>

최 규 석(중신회원)

· 제9권 2호 참조
· 현 청운대학교 컴퓨터학과 교수
<주관심분야 : 인공지능, 이동통신, ITS, 이동컴퓨팅>

안 인 석(정회원)

· 제9권 2호 참조
· 현 위덕대학교 에너지전기공학부 교수
<주관심분야 : 제어시스템설계, 로봇틱스, 임베디드시스템>