

퍼지 모델과 유전 알고리즘을 이용한 쓰레기 소각로의 연소 제어

박종진[†] · 최규석^{††}

요 약

본 논문에서는 퍼지 모델과 유전 알고리즘을 이용한 쓰레기 소각로의 연소 제어를 제안한다. 먼저 복잡하고 비선형 시스템인 소각로의 퍼지 모델을 얻기 위해 퍼지 모델링이 수행된다. 얻어진 퍼지 모델은 주어진 입력에 대해 소각로의 출력을 예측한다. 그리고 유전 알고리즘을 이용하여 원하는 소각로 출력에 대해 모든 가능한 해 집합 안에서 최적 제어입력 값을 탐색하고 얻어진 최적 제어입력은 소각로에 인가되어 제어가 행해진다. 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해, 증발량을 출력으로 하는 소각로 연소제어의 컴퓨터 시뮬레이션이 수행되었다. 그 결과 소각로의 퍼지 모델의 성능 평가지수 ISE(오차제곱적분)는 0.015로 매우 작았으며, 연소제어 시 증발량은 설정값 주위에서 일정하게 유지되고, 제안된 방법에 의한 성능지수 ITAE는 352로 수동운전에 의한 결과 1275보다 우수하였다.

Combustion Control of Refuse Incineration Plant using Fuzzy Model and Genetic Algorithms

Jong-Jin Park[†] · Kyu-Seok Choi^{††}

ABSTRACT

In this paper we propose combustion control of refuse incineration plant using fuzzy model and genetic algorithm. At first fuzzy modelling is performed to obtain fuzzy model of the refuse incineration plant and obtained fuzzy model predicts outputs of the plant when inputs are given. Fuzzy model can be used to obtain control strategy, and train and enhance operators' skill by simulating the plant. Then genetic algorithms search and find out optimal control inputs over all possible solutions in respect to desired outputs and these are inserted to plant. In order to testify proposed control method, computer simulation was carried out. As a result, ISE of fuzzy model of refuse incineration plant is 0.015 and ITAE of control by proposed method, 352 which is better than that by manual operation.

1. 서 론

쓰레기 소각로는 연료로 사용되는 쓰레기의 물리적 특성의 변동 그리고 연소현상의 복잡성(Complexity) 등으로 인해 매우 복잡한 공정으로 다음과 같은 제어 특성을 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 대한 환경 기준치가 갈수록 엄격해지고 있는 상황에서 쓰레기의 불완전 연소에 의한 공해요인 발생의 억제나 후처리 정화공정의 비용을 낮추

* 본 연구는 1998년도 청운대학교 교내연구비로 수행되었음.
[†] 정 회 원 : 청운대학교 인터넷컴퓨터학과 교수
^{††} 정 회 원 : 청운대학교 컴퓨터학과 교수
논문접수 : 1999년 11월 12일, 심사완료 : 2000년 6월 27일

기 위해서 쓰레기의 완전연소의 필요성은 더욱 증가되는 실정이다.

기존의 소각로에는 ACC(Automatic Combustion Control)가 있어 PID제어기나 시퀀스 제어기가 내장되어 있으나 거의 사용되지 않고, 많은 경우 소각로의 제어는 운전자의 경험에 의한 수동운전에 의존하고 있다. 따라서 쓰레기의 불완전 연소에 의한 대기오염 방지와 연소과정에서 발생하는 중발광과 로의 온도를 일정하게 유지하는 최적의 운전이 가능하도록 새로운 제어시스템의 필요성이 대두된다. 일본에서는 이러한 연소 제어시스템을 구현하기 위해 쓰레기 소각로의 동특성을 잘 나타내는 수학적인 모델을 얻고 이를 바탕으로 자동제어시스템을 설계하는 방법이 연구되었다. 그러나 선형 시스템 이론에 기초한 이러한 방법은 소각로가 매우 복잡한 비선형 시스템의 특성을 가지므로 모델을 얻기가 쉽지 않고 만족할 만한 성능의 제어시스템을 구현하기가 어렵다[9].

따라서, 최근 들어 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 중발광을 일정한 구간 내에 유지하는 퍼지 제어 시스템을 구현하였다. 이는 운전자의 관찰에 의해 얻어진 입, 출력 변수의 질적인 정보를 퍼지 센싱을 통해 얻고 이것과 미리 얻어진 퍼지 규칙을 이용하여 제어를 행한다. Fujiyoshi[2]는 앞의 연구와 유사한 방법을 통해 퍼지 자동 연소제어 시스템을 구축하였다. 또한 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.

본 논문에서는 기존의 방법에 비해 적절한 퍼지 모델을 얻기 쉽고 최적의 쓰레기 소각로 연소제어를 위해 Sugeno에 의해 제안된 퍼지 모델[5,6]과 유전 알고리즘을 이용한 최적 운전 방법을 제안한다. 이는 다음의 두 단계로 구성된다. 먼저 소각로의 퍼지 모델을 구하기 위해 소각로의 입, 출력 데이터를 가지고 퍼지 모델링을 행하고 이를 통해 공정의 출력을 예측한다. 그리고 예측된 출력과 원하는 출력으로 이루어진 성능 평가지표를 최소로 하도록 유전 알고리즘에 의해 최적의 제어 입력을 탐색하고 이를 소각로에 인가한다. 퍼

지 모델링은 몇 개의 퍼지 규칙으로 비선형 시스템을 매우 정확하게 나타낼 수 있다고 알려져 있고 얻어진 퍼지모델은 소각로의 출력예측에 의한 제어전략의 구축 및 운전자의 훈련 등에 사용될 수 있다. 또한 플랜트의 특성이 변하는 경우, 순환 퍼지 모델링에 의해 온-라인 후반부 파라미터 동적함으로써 적응 제어시스템의 구현이 가능하다. 유전 알고리즘은 자연 도태와 유전적 성질에 기초한 탐색 알고리즘으로 제한을 가지는 비선형 시스템의 최적화 문제에 뛰어난 성능을 가진다[8]. 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 행하고 그 결과를 운전자에 의한 수동운전 결과와 비교하였다.

2. 쓰레기 소각로

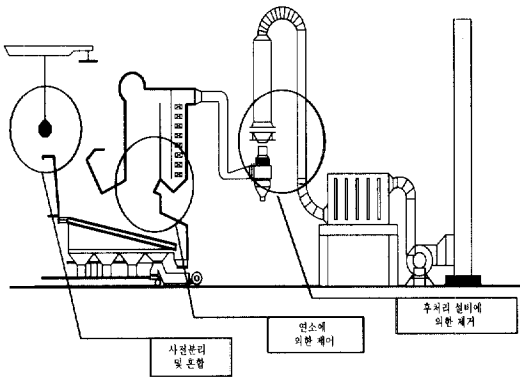
2.1 쓰레기 소각로의 처리 공정

쓰레기를 대량, 연속적으로 소각 처리하는 방식으로는 스토카식, 유동상식, 회전로(Rotary Kiln) 방식 그리고 열분해(고온 용융)식 등이 실용화 되어있다. 이 중 스토카식 소각로가 많이 사용되고 있으나 다른 방식의 소각로의 사용도 증가 추세에 있다. 스토카식 소각로는 내열 주물제의 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 대량으로 소각할 수 있는 특성을 가진다. 본 논문은 스토카식 소각로를 대상으로 한다.

소각로에서의 쓰레기의 처리는 사전분리 및 혼합, 연소에 의한 제어 그리고 후처리 설비에 의한 처리의 3개 공정으로 구성되어 있다. (그림 1)은 이를 나타낸다. 사전분리란 소각 대상이 되는 폐기물 중 비닐, 플라스틱, 강통 등 불완전한 소각으로 공해 물질이 발생할 소지가 있거나 불완전 연소의 가능성이 있는 물질을 사전에 분리, 처리하는 방안이다. 이는 매우 효과적인 방안으로 생각될 수 있으나 오염물질을 분리한다는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 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.

소각로에서 발생하는 연소 가스의 후처리에는 건, 습식 스크러빙, 백필터 등의 기법이 쓰이고 있는데 건설 및 운전 비용이 많이 소요된다. 후처리 설비 비용을 낮추려면 설비에 반입되는 연소가스 중 오염물질의 배출을 낮추거나 처리 후 배출 허용한계가 높아져야 한다. 하지만 오염물질 배출 허용한도는 점차 엄격해지고 있으며 구체적인 기준을 법규로 정해가고 있는 실정이다.



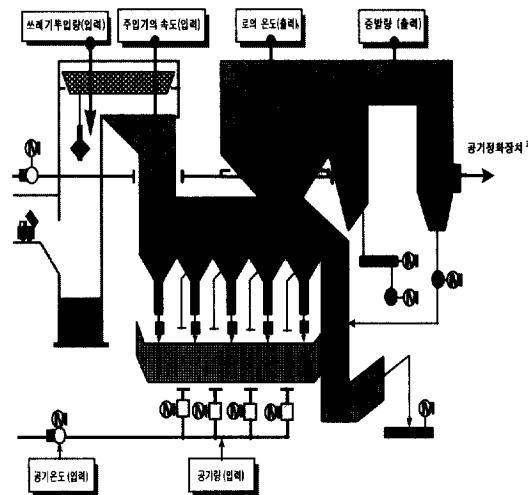
(그림 1) 쓰레기 소각처리의 과정

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.

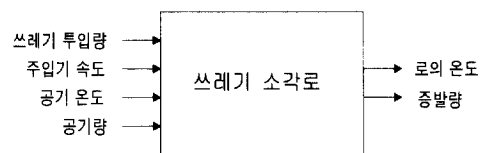
2.2 소각로의 연소제어

(그림 2)는 스토카식 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)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 보내어 진다. 그리고 더워진 공기는 보일러를 통해 증기와 열을 교환하고 공기정화장치를 거쳐 대기중으로 빠져 나가게 된다. (그림 3)은 소각로의 입, 출력 변수를 나타내는 블록선도를 보여준다.



(그림 2) 스토카형 소각로의 구조



(그림 3) 소각로 입·출력관계 블록선도

(그림 3)의 각 변수들의 물리적 의미는 다음과 같다.

- 노의 온도(℃) : 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 발생하는 증기량으로 발생 열량과 동일하며 폐열 보일러에 의해 열을 회수하는 경우 에너지 회수의 관점에서 매우 중요한 변수이다.

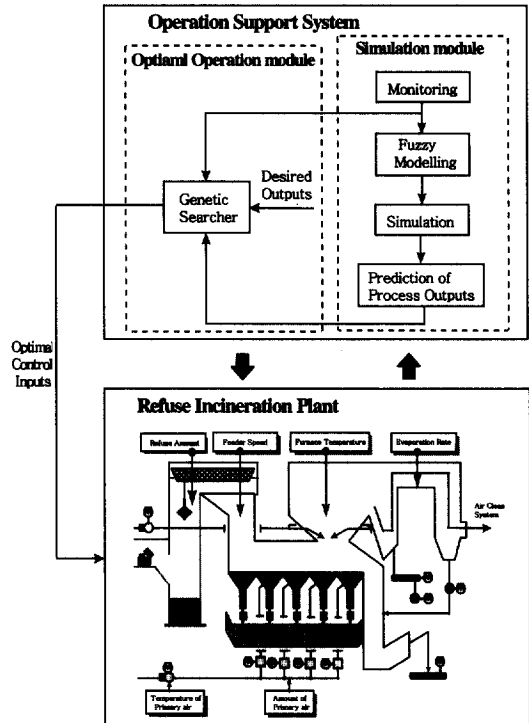
- 쓰레기 투입량(ton) : 쓰레기 저장소에서 크레인에 의해 소각로의 화격자 위로 투입되는 쓰레기의 량으로 적절한 연소를 위해 중요하고 이것은 주입기의 속도에 의해 조절될 수 있다.
- 공기량(m³/hour) : 연소를 위해 소각로 내에 송풍되는 공기량으로 완전 연소를 위해 이것의 적절한 조절은 매우 중요하다.
- 공기의 온도(℃) : 송풍되는 공기의 온도로서 에너지를 절약하고 효율적인 소각을 위해 소각 시 발생하는 증기를 이용하여 로내에 투입되는 공기를 적절한 온도로 데워준다.
- 주입기의 속도(m/hour) : 크레인에 의해 소각로 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. 쓰레기가 충분히 공급되지 않거나 혹은 과다하게 공급됨에 따라 발생하는 불완전 연소를 방지하고, 배출되는 가스내의 산소 농도를 일정하게 유지하며, 증발량과 로내 온도를 일정하게 유지하는 것이다.

이러한 목적들은 안정한 운전지점에서의 최적화된 연소에 의해서만 이루어질 수 있다. 기존 제어시스템이나 조작자는 화격자로 주입되는 쓰레기의 피할 수 없는 국부적이고 간헐적인 쓰레기의 질적 변동에 반응할 수 없다. 이것은 쓰레기의 변하는 열량과 연소 성질에 의한 것이다. 결과적으로 연소 공정에서의 변화를 피하는 것은 불가능하고 그러한 변동에 의해 원하지 않는 배출 결과를 낳게 된다. 앞의 목적들 중 소각 플랜트에서 가장 중요한 제어변수는 증발량과 로내 온도이다. 이것은 소각로에 투입되는 쓰레기 량과 여러 개의 화격자 밑에서 제공되는 1차 공기량에 의해 주로 영향을 받는다. 이 때 국부적인 지점에서 쓰레기의 이질적인 성분으로 인해 외란이 발생한다. 그러므로 1차 공기량은 각 화격자의 필요에 계속적으로 맞아야 한다 [4]. 따라서 쓰레기의 불완전 연소에 의한 대기오염 방지와 연소과정에서 발생하는 증발량과 로의 온도를 일정하게 유지하는 최적의 운전이 가능하도록 새로운 제어 시스템의 필요성이 대두된다.

3. 쓰레기 소각로의 퍼지 모델링 및 최적 운전 제어

본 절에서는 쓰레기 소각로의 효율적인 연소제어를 위해 소각로의 퍼지 모델링과 이에 기초한 최적 제어 입력 탐색을 기술한다. 복잡한 비선형 시스템인 소각로는 수학적인 모델을 얻기가 매우 어렵다. 따라서 몇 개의 퍼지 규칙으로 비선형 시스템을 매우 정교하게 나타낼 수 있는 퍼지 모델링을 통해 소각로의 퍼지 모델을 구한다. 구해진 퍼지 모델은 주어진 입력에 대한 공정 출력을 예측하기 위해 사용된다. 또한 부하 변동에 의한 공정 파라미터 변화 시에는 온-라인 퍼지 모델링을 행한다. 그리고 예측된 공정 출력과 유전 알고리즘을 이용하여, 원하는 공정 출력에 대해 가능한 해집합 안에서 최적의 운전 제어입력을 탐색한다. 얻어진 최적 제어입력은 운전자에 의해 소각로에 가해짐으로써 제어가 실행될 수 있다. (그림 4)는 제안된 방법의 도식적 개요를 나타낸다.



(그림 4) 제안된 소각로 연소제어의 개요도

3.1 소각로의 퍼지 모델링

퍼지 모델링[5, 6]은 입력 공간을 퍼지 부분 공간으

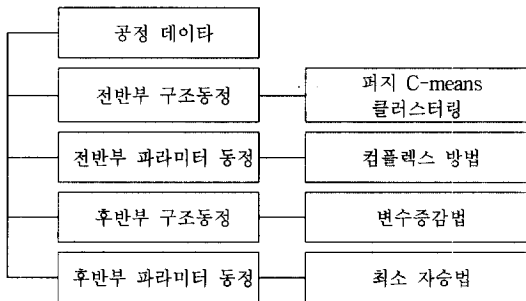
로 분할하여 각 부분 공간의 입-출력 관계를 선형식으로 나타내고 가중치를 고려한 이들의 합에 의해 비선형 시스템의 입출력 관계를 나타내는 것으로 전반부 구조 동정과 파라미터 동정 그리고 후반부 구조 동정 그리고 파라미터 동정의 4단계로 구분된다.

단계 1 : 전반부 구조동정은 비선형 시스템의 입출력 관계를 최적으로 나타내기 위한 퍼지규칙을 찾아내는 것으로 입력변수들의 선택과 퍼지 분할을 의미하며 퍼지 c-means 클러스터링 방법을 사용한다.

단계 2 : 전반부 파라미터 동정이란 구조 동정에 의해 결정된 입력 퍼지 변수의 멤버십 함수의 최적 파라미터를 찾는 것을 의미한다. 이를 위해 비선형 최적화 프로그래밍 기법인 complex 방법을 사용한다.

단계 3 : 후반부 구조 동정은 입출력 변수중 어떤 변수가 성능지수(PI)를 최적으로 하는데 필요하지 않는가를 찾아내는 것이다.

단계 4 : 후반부 파라미터 동정은 전반부 구조와 파라미터, 후반부 구조가 결정되었다면 주어진 성능지수를 최소로 하는 파라미터들을 결정하는 것으로 최소자승법(least square method)이 사용된다. 다음의 (그림 5)는 퍼지 모델링의 구성도를 나타낸다.



(그림 5) 퍼지 모델링의 구성도

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

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

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

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

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

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

시스템의 특성이 변하거나 적응제어시스템을 위해서는 온-라인으로 파라미터를 동조해야 한다. 사용된 퍼지 모델에서 온-라인으로 동조해야 할 파라미터는 전반부 파라미터와 후반부 파라미터가 있다. 그러나 여기서 전반부 파라미터를 온-라인으로 동조하는 것은 어려우므로 오프-라인 동조 시 전반부의 구조와 파라

미터를 잘 설정했다고 가정하고 후반부 파라미터만을 동조하기로 한다. 이미 인식된 퍼지 모델에서 시스템 파라미터의 변화에 따라 후반부 파라미터들을 조정하는 방법은 다음과 같다[7]. 식 (2)를 다시 쓰면, 다음 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+1) &= \sum_{k=1}^N \hat{w}^k y^k(t+1) \\ &= a_0^1 g_0^1 + a_1^1 g_1^1 + \dots + a_n^1 g_n^1 \\ &\quad + b_0^1 f_0^1 + b_1^1 f_1^1 + \dots + b_m^1 f_m^1 \\ &\quad + \dots \\ &\quad \vdots \\ &\quad + a_0^N g_0^N + a_1^N g_1^N + \dots + a_n^N g_n^N \\ &\quad + b_0^N f_0^N + b_1^N f_1^N + \dots + b_m^N f_m^N \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,
$$g_i^k = \frac{w_{i+1}^k y(t-i)}{\sum_{k=1}^N w_{i+1}^k}$$
,

$$f_j^k = \frac{w_{i+1}^k u(t-j)}{\sum_{k=1}^N w_{i+1}^k}$$

위 식에서 보듯이, 출력 $\hat{y}(t+1)$ 는 후반부 파라미터들의 한개의 선형식으로 표시된다. 그러므로 후반부 파라미터들은 선형시스템에서 사용되는 순환 파라미터 추정법(Recursive Least Square Estimation, RLSE)을 통해 조정될 수 있다.

3.2 소각로의 최적 제어입력 탐색

원하는 공정 출력에 대해 최적 제어입력을 찾기 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithms)이 사용된다. 본 논문에서는 Goldberg에 의해 제시된 유전 알고리즘(simple GA)을 사용한다[8]. 유전 알고리즘은 자연 도태와 유전적 성질에 기초한 탐색 알고리즘으로 복잡한 최적화 문제에 뛰어난 성능을 가진다. 자연 도태에서 각 개체는 재생산을 위한 기회를 얻기 위해 경쟁하고 돌연변이에 의해 각 개체에 새로운 형질이 도입된다. 유전 알고리즘을 이용하여 문제를 푸는 경우, 각 개체는 풀고자 하는 문제의 해에 관련된 정보를 가지며 이는 일련의 비트, 정수, 혹은 실수 스트링으로 표현된다. 이러한 스트링은 염색체(chromosome)라고 불려진다. 각 개체가 풀고자 하는 문제에 얼마나 적합한지는 적합도(fitness)에 의해 평가되며 이 적합도에 따라 집단

내에서 그 개체의 생존 여부가 결정된다. 일반적으로 적합도는 풀고자 하는 문제에 관련된 목적 함수에 의해 결정되며 주로 목적 함수의 지수나 역수 형태를 취한다. 이러한 개체들의 모임인 개체군을 세대(generation)라고 하며 유전 알고리즘은 재생산(reproduction), 교배(crossover) 그리고 돌연변이(mutation) 연산자로 구성되어 있다.

1) 재생산 연산자: 재생산은 자연 생태계의 적자생존의 원리를 이용하여 높은 적합도를 가진 개체에 대해 다음 세대로 복제될 확률을 높게하여 랜덤하게 부모 세대의 개체를 선택하여 동일한 개수의 세대를 재구성한다. 고전적 유전 알고리즘에서는 재생산을 위한 부모 개체의 선택 방법으로 룰렛 선택 방법을 많이 사용한다. 룰렛 선택 방법은 룰렛 게임에서와 같이 적합도 값이 좋은 개체에게 많은 선택 확률을 부여하고 나쁜 개체에는 적은 선택 확률을 부여함으로써 확률적 랜덤 탐색이 가능하도록 하는 방법이다.

2) 교배 연산자: 교배는 부호화된 스트링으로 표현된 한 개체내에서 랜덤하게 일부 비트열을 선택하여 그와 대응되는 다른 개체의 비트열과 교환하는 것을 말한다.

3) 돌연변이 연산자: 돌연변이는 스트링 공간을 통한 랜덤 작업으로 개체내의 임의의 비트 또는 비트열을 변환시키는 것을 말한다. 이는 생물체의 돌연변이 효과와 같으며 재생산 및 교배와 함께 사용될 때 중요한 개체 정보의 조기 손실을 막아준다.

유전 연산자를 통한 세대 교체 시 최고의 적합도 함수 값을 가지는 개체는 다음 세대에서 보존하는 최우수 개체 보존을 통해 적합도 함수의 수렴을 보장한다. 이러한 유전 알고리즘의 최적해 탐색 과정은 다음과 같다.

단계 1: 부호화 및 초기화

문제에 대한 가능해를 이진 스트링(개체)으로 표현하여 초기 해 집단을 구성한다. 여기서는 개체는 소각로의 제어입력 값들이 된다.

단계 2: 평가

각 개체를 디코딩하고 목적 함수를 사용하여 적합도를 계산함으로써 각 개체를 평가한다.

단계 3: 종료 조건 검사

종료 조건에 도달하였으면 탐색 과정을 중단하고 아

니면, 다음 과정을 계속한다.

단계 4: 선택 및 유전 연산자

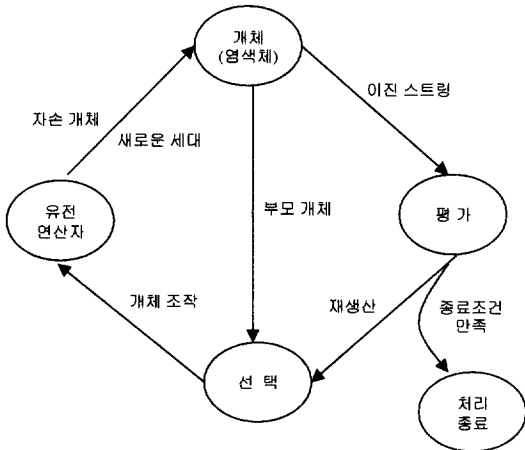
적합도에 비례하여 선택이 이루어지고 교배와 돌연변이에 의해 새로운 세대를 구성한다.

이 과정에서 최고의 적합도 함수 값을 갖는 개체는 보존된다.

단계 5: 단계 2의 과정으로 복귀

새로운 세대에 대한 적합도를 평가하기 위해 단계 2로 돌아가고 단계 3과 4를 반복한다.

(그림 6)은 유전 알고리즘의 도식적 개요를 보여준다.



(그림 6) 유전 알고리즘의 도식적 개요

4. 모의 실험 및 결과 고찰

제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 모의 실험을 행하였다. 먼저 주어진 시스템의 입, 출력 데이터를 가지고 소각로의 퍼지 모델을 구하고, 다음으로 유전 알고리즘을 이용한 최적 제어입력 탐색을 통해 제안된 소각로 연소제어 방법의 효율성을 입증한다. 시뮬레이션 결과는 운전자의 수동 운전결과와 비교된다.

4.1 소각로의 퍼지 모델

소각로 퍼지모델의 출력은 발전이나 지역 난방에 중요한 증발량으로 하고, 퍼지모델의 입력에서 1차 공기의 온도와 2차 공기량은 일정한 값으로 하며 주입기의 속도는 쓰레기 투입량과 일정한 관계를 갖는다고 본다. 따라서 소각로의 입력은 1차 공기량과 쓰레기 투

입량으로 하였다. <표 1>은 대상 소각 플랜트에서 사용되는 각종 입·출력 변수값들이다.

<표 1> 소각로의 입·출력 변수들

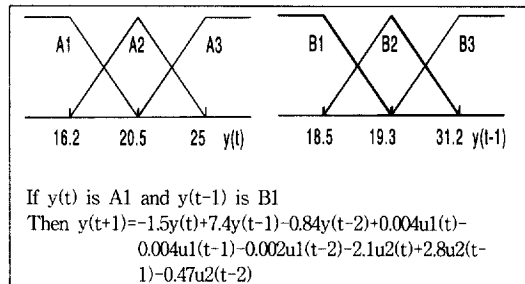
변 수	설정 범위
소각로 온도(℃)	850~1050
증발량(Ton/Hour)	26~28
공기량(Ton/Hour)	가변
1차공기온도(℃)	160~180
쓰레기량(Ton/Hour)	가변

(그림 7)은 동정된 소각로의 퍼지 모델을 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 제어 입력인 쓰레기 투입량, $u_1(t)$, $u_1(t-1)$, $u_1(t-2)$, 1차 공기량, $u_2(t)$, $u_2(t-1)$, $u_2(t-2)$ 그리고 증발량 $y(t)$, $y(t-1)$, $y(t-2)$ 를 선정하였다. (그림 8)은 동정된 퍼지 모델의 출력과 실 시스템의 출력을 나타낸다. 모델의 성능을 나타내는 성능지수(Performance Index)로는 다음 식과 같은 오차제곱 적분(ISE, Integral of the Square of the Error)을 사용한다.

$$ISE = \sum_{i=0}^n e_i^2 \quad (6)$$

여기서, e_i 는 소각로의 출력-소각로 퍼지모델의 출력, n 은 모델링에 사용된 실공정 데이터의 개수.

동정된 퍼지 모델의 성능 평가지수 ISE는 0.015로 매우 우수하며 실 시스템을 거의 정확하게 모사함을 볼 수 있다. 이것은 운전자가 현재의 소각로의 입력변수 값들을 입력하면 그에 대한 공정 출력 값들을 예측하므로 시뮬레이터를 만들어 제어전략을 구축하거나 연소제어의 모의 실험을 통한 운전기술의 숙련을 가져올 수 있다.



If y(t) is A1 and y(t-1) is B2
 Then $y(t+1) = -12.4y(t) + 12.96y(t-1) - 2.87y(t-2) - 0.0004u_1(t) - 0.02u_1(t-1) - 0.02u_1(t-2) - 8.1u_2(t) + 9.47u_2(t-1) - 17.3u_2(t-2)$

If y(t) is A1 and y(t-1) is B3
 Then $y(t+1) = -56y(t) + 40.4y(t-1) + 69.9y(t-2) - 0.06u_1(t) - 0.01u_1(t-1) + 0.06u_1(t-2) - 38.3u_2(t) - 73.9u_2(t-1) - 11u_2(t-2)$

If y(t) is A2 and y(t-1) is B1
 Then $y(t+1) = 2.73y(t) - 5.88y(t-1) - 0.23y(t-2) + 0.003u_1(t) + 0.006u_1(t-1) - 0.006u_1(t-2) - 1.73u_2(t) - 1.64u_2(t-1) - 0.55u_2(t-2)$

If y(t) is A2 and y(t-1) is B2
 Then $y(t+1) = -17.5y(t) + 5.25y(t-1) - 4.57y(t-2) - 0.0008u_1(t) - 0.006u_1(t-1) + 0.01u_1(t-2) + 32.5u_2(t) + 8.02u_2(t-1) - 3.62u_2(t-2)$

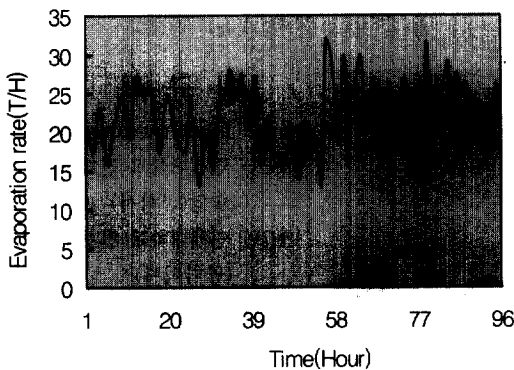
If y(t) is A2 and y(t-1) is B3
 Then $y(t+1) = -0.53y(t) + 12.6y(t-1) - 0.86y(t-2) - 0.0001u_1(t) + 0.002u_1(t-1) - 0.01u_1(t-2) - 16.6u_2(t) - 8.09u_2(t-1) + 6.97u_2(t-2)$

If y(t) is A3 and y(t-1) is B1
 Then $y(t+1) = 5.4y(t) + 12.3y(t-1) - 2.2y(t-2) - 0.04u_1(t) + 0.03u_1(t-1) + 0.003u_1(t-2) + 5.2u_2(t) + 10.2u_2(t-1) - 1.6u_2(t-2)$

If y(t) is A3 and y(t-1) is B2
 Then $y(t+1) = -2.0y(t) + 2.3y(t-1) + 1.4y(t-2) - 0.001u_1(t) + 0.0007u_1(t-1) + 0.0001u_1(t-2) - 1.2u_2(t) - 1.4u_2(t-1) + 1.07u_2(t-2)$

If y(t) is A3 and y(t-1) is B3
 Then $y(t+1) = 0.9y(t) - 0.6y(t-1) - 0.1y(t-2) + 0.0006u_1(t) - 0.0002u_1(t-1) + 0.0008u_1(t-2) - 0.82u_2(t) - 0.01u_2(t-1) - 0.76u_2(t-2)$

(그림 7) Takagi-Sugeno 방법에 의한 소각로의 퍼지 모델



(그림 8) 실 플랜트 출력과 Takagi-Sugeno 방법에 의한 퍼지 모델 출력

4.2 유전 알고리즘을 이용한 최적 제어입력 탐색

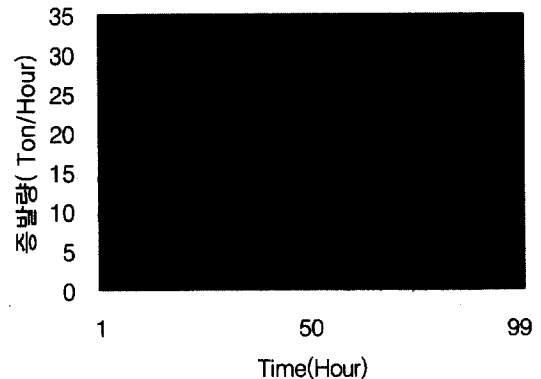
앞에서 얻어진 소각로의 퍼지 모델과 유전 알고리즘을 이용하여 소각로 연소의 최적 운전 제어를 위한 최적 제어입력을 탐색한다. 이를 위해 소각로의 출력변수인 증발량의 목표값을 정하고, 이것과 공정 출력값의 차인 적합도를 최소로 하는 최적제어입력을 찾는다. 본 논문에서는 증발량의 목표값을 26(T/H)으로 하였다. 이는 대상 소각 플랜트에서 통상 정하는 목표값이다. (그림 9)는 유전 알고리즘을 이용한 최적 제어입력 탐색에 의한 소각로의 연소제어 결과와 운전자의 수동운전 결과를 비교한 것이다. 여기서 점선은 제안된 방법에 의한 결과를 나타내고 직선은 수동운전에 의한 결과를 나타낸다.

제어시스템의 성능을 나타내는 성능지수(Performance Index)로는 다음 식과 같은 절대오차 시간곱 적분(ITAE, Integral of Time multiplied by the Absolute Error)을 사용하였다.

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (7)$$

여기서, e(t)=원하는 소각로의 목표; 값-소각로의 출력.

제안된 방법과 수동운전에 의한 제어의 성능 평가지수 ITAE는 각각 352와 1275로 제안된 방법에 의한 결과가 수동운전에 의한 결과보다 우수하고 설정값 주위에서 안정적으로 제어되는 것을 알 수 있다. 수동운전의 경우, 제어결과는 연소제어 시의 증발량의 허용범위 24~28(Ton/Hour)를 벗어나 큰 폭으로 요동하는 것을 볼 수 있다. 이는 연소가 불안정함을 의미하며 운전자의 경험적 지식에 의한 소각로의 운전은 근본적인 한계와 위험성을 내포함을 나타낸다.



실선 : 수동운전에 의한 제어결과,
 점선 : 제안된 방법에 의한 제어결과

(그림 9) 쓰레기 소각로 연소제어의 결과

5. 결 론

본 논문에서는 복잡하고 비선형 시스템인 쓰레기 소각로의 효율적인 연소제어를 위해 퍼지 모델링과 유전 알고리즘을 사용하였다. 쓰레기 소각로는 연료로 사용되는 쓰레기의 물리적 특성의 변동 그리고 연소현상의 복잡성 등으로 인해 매우 복잡한 시스템으로 동특성 해석과 제어계 설계를 위한 적절한 모델을 얻기가 어렵고 따라서 현재 대부분의 소각로는 수동운전에 의존하는 실정이다. 이러한 특성의 쓰레기 소각로의 연소제어를 위해 먼저 퍼지 모델링에 의해 퍼지모델을 구하고 동정된 퍼지모델과 유전 알고리즘을 이용하여 최적 운전 제어를 위한 최적 제어입력을 탐색하였다. 증발량을 출력으로 하는 동정된 소각로의 퍼지모델은 적은 수의 규칙을 가지고 소각로를 매우 정확하게 모사하는 것을 볼 수 있으며 성능지수 ISE는 0.015로 매우 우수하였다. 그리고 퍼지모델은 시뮬레이터를 구현하여 소각로의 출력예측에 의한 제어전략의 구축 및 운전자의 훈련 등에 사용될 수 있다. 또한 플랜트의 특성이 변하는 경우, 순환 퍼지 모델링에 의해 온라인으로 후반부 파라미터를 동정하고 적용 제어시스템의 구현이 가능하다. 그리고 유전 알고리즘을 이용하여 최적 제어입력을 탐색하였고 이 값들은 소각로에 인가되어 제어를 행하였다. 제안된 방법에 의한 제어의 성능 평가지수 ITAE는 352로 수동운전에 의한 1275보다 우수하고 출력인 증발량이 목표값 주위에서 안정적으로 제어되는 것을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

[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] 연세대학교 신에너지 시스템 연구소, *21세기를 대비한 친환경 기술과 관리*, 1995.

[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] 장용줄, 이원장, 강근택, "안정성을 고려한 퍼지적용 제어기의 설계", 한국 퍼지 시스템 학회 1994년도 춘계 학술대회 논문집, pp.178-184, 1994.
 [8] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989.
 [9] T. Goromaru etc., "Modeling of a Refuse Incineration Plant and Its Application to Combustion Control Problem," 計測自動制御學會 논문집, Vol.26, No.8, pp.42-49, 1990.(in japanese)



박 종 진

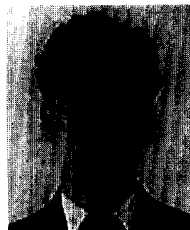
e-mail : jjpark@www.cwunet.ac.kr

1989년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1991년 연세대학교 대학원 전기공학과(공학석사)

1997년 연세대학교 대학원 전기공학과(공학박사)

1997년~현재 청운대학교 인터넷컴퓨터학과 전임강사
 관심분야 : 퍼지시스템, 지능제어, 인터넷 컴퓨팅, 객체 지향프로그래밍



최 규 석

e-mail : lionel@www.cwunet.ac.kr

1982년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1987년 연세대학교 전기공학과(공학석사)

1997년 연세대학교 전기공학과(공학박사)

1990년~1997년 한국이동통신 중앙연구원 책임연구원
 1997년~현재 청운대학교 컴퓨터학과 교수
 관심분야 : 인공지능, GIS, Mobile Computing 등