

쓰레기 소각플랜트의 상태공간모델 규명에 관한 연구

황이철* · 전충환** · 이진걸**
(1999년 3월 8일 접수)

A Study on Identification of State-Space Model for Refuse Incineration Plant

I-Cheol Hwang, Chung-Hwan Jeon and Jin-Kul Lee

Key Words: Refuse Incineration Plant(쓰레기 소각플랜트), Automatic Combustion Control(ACC: 자동연소제어), AutoRegressive Model with Exogenous Input(ARX 모델), Instrumental Variable Identification Method(IV:보조변수 규명법), 상태공간모델(State-Space Model).

Abstract

This paper identifies a discrete-time linear combustion model of Refuse Incineration Plant(RIP) which characterizes steam generation quantity, where the RIP is considered as a MIMO system with thirteen-inputs and one-output. The structure of RIP model is described as an ARX model which are analytically obtained from the combustion dynamics. Furthermore, using the Instrumental Variable(IV) identification algorithm, model structure and unknown parameters are identified from experimental input-output data sets. In result, it is shown that the identified ARX model well approximates the input-output combustion characteristics given by experimental data sets.

기호설명

η_v : 휘발분 연소속도
 η_M : 수분 증발속도
 Q_c : 연소열량
 Q_{A1} : 1차 연소공기 열량
 Q_{A2} : 2차 연소공기 열량
 Q_{ash} : 재로 빠져나가는 열량
 Q_{latent} : 잠열로 흡수되는 열량
 P_x : 쓰레기 성분 x 의 퍼센트(%)량

H_x : 쓰레기 성분 x 의 고발열량(HHV)
 $C_{p,x}$: 쓰레기 성분 x 의 비열
 W_R : 노내 쓰레기량
 ΔW_R : 노내 쓰레기 변동량
 G_R : 쓰레기 투입량
 T_G : 노내 온도
 m_s : 증기발생량

1. 서론

쓰레기 소각로는 쓰레기의 감량이 주 목적이었으나, 최근 유해 배기가스를 규제치 이하로 억제하면서 소각 후의 폐열을 효과적으로 활용하는 것이 중요한 목적으로 부각되고 있다.^(1~3) 이는 완전연소를 통하여 보일러로부터의 증기발생량을

* 회원, 동의대학교 기계·산업시스템공학부
E-mail : ichwang@hyomin.dongueui.ac.kr
TEL : (051)890-1649 FAX : (051)890-1619

** 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

안정화하는 연소제어 기술 개발의 필요성을 의미하며, 즉 쓰레기 소각로에 있어 자동 연소 제어 (ACC:Automatic Combustion Control) 시스템의 역할이 점점 증가하고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 건설제어 알고리즘을 통하여 Fig. 1과 같은 스토커식 소각플랜트의 새로운 ACC 시스템 개발을 위하여 소각로 연소현상에 대한 제어모델 규명에 대한 연구를 목적으로 한다. 즉 소각플랜트의 디지털 건설 제어기 설계에 적합한 이산시간계 전달함수 또는 상태공간모델 형태의 연소 제어모델 개발에 대한 연구를 수행하고자 한다.

현재까지 소각로 내의 연소열량, 열전달, 그리고 온도분포 및 연소 진행 상태를 포함한 연소모델 구축은 열·유체공학적인 측면에서 플랜트의 설계와 최적 운전조건 설정을 위하여 국내외적으로 많은 연구가 진행되어 왔다.

Howard⁽⁴⁾는 쓰레기의 열분해와 연소시간에 대한 정량적인 예측을 실시하여 온도, 압력, 산소분압, 시료의 크기 및 형상, 연소가스 속도 등이 연소시간에 미치는 영향에 관한 도식모델을 제시하였다. Ahmed⁽⁵⁾ 등은 연소상(bed)면에서의 쓰레기 열분해 생성물에 대하여 열 및 물질 정산식을 적용하여 쓰레기의 연소상태, 온도 및 연소 생성물을 예측하는 모델을 제시하였다. 국내에서는 로타리 킬른식 폐기물 소각로에서의 연소상태나 전

열해석 등에 관한 연구^(6,7)와 스토커식(화격자식) 소각로의 연소 단순 다단계 모델에 관한 연구⁽⁸⁾가 발표되었다.

그러나 기존의 연소모델 대부분은 열·유체 공학적인 측면에서 플랜트 자체의 해석 및 설계를 위한 것으로서, 비선형 및 편미분 방정식을 포함하는 무한차원 비선형 시스템의 수학적모델의 형태로 기술하고 있다. 소각플랜트의 연소현상을 비선형이면서 무한차원 수학적모델로 표현할 경우, 제어기 설계는 매우 어려운 문제로 인식된다. 따라서 본 논문에서는 소각플랜트를 유한차원 선형 시스템으로 간주하여 수학적모델을 규명하기로 한다. 이는 소각플랜트의 ACC 시스템 개발에 선형 제어 특히 모델링 오차 및 외란등의 불확실성에도 바람직한 성능을 가지는 건설제어를 적용하기 위해서이다. 기존의 비선형 무한차원 수학적모델에 기초하여 선형 제어기를 해석적으로 설계하기 위해서는 여러 가지 선형화 이론 및 모델 근사화 이론을 통하여 선형 모델을 규명해야 하는 많은 노력이 수반된다. 동시에 실제 적용 소각플랜트의 모델 파라미터에 대한 실험적 추정 그리고 디지털 제어기 설계를 위해서는 이산화 과정에 대한 작업이 요구됨으로 인하여 많은 모델링 오차가 수반될 것으로 사료된다. 따라서 본 논문에서는 먼저 기존의 연소모델에 대한 지식을 기초로 이산시간 선형모델 구축의 타당성을 검증한 후,

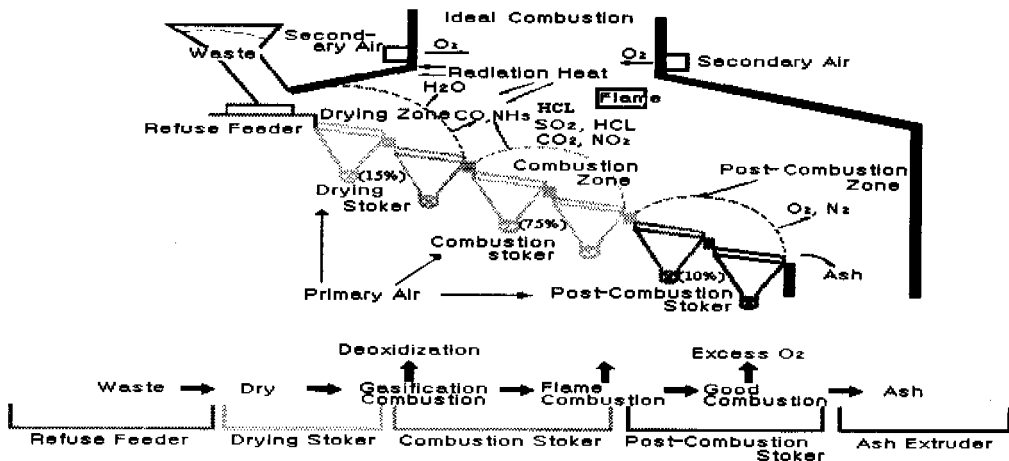


Fig. 1 Combustion process of stoker type refuse incineration plant

입출력 실험 데이터로부터 시불변 이산시간 상태공간모델 또는 전달함수 규명에 관한 연구를 수행한다.

본 논문의 주요 연구내용은 다음과 같이 요약된다. 첫째, 기존의 연구결과와 연소공학 이론을 기초로 하여, 소각로의 증기발생량에 관한 이산시간 상태공간모델을 구축한 후, 연소 특성에 관한 해석 및 선형 모델의 타당성을 보인다. 둘째, 보조변수 시스템 규명법을 이용하여 실측 입출력 데이터로부터 다변수 ARX 모델 또는 이산시간 상태공간모델의 구조 및 파라미터를 규명한다. 여기서 첫 번째의 연구내용은 연소현상에 대한 엄밀한 해석이라기보다는 여러 가지의 단순 가정하에서 상태공간모델의 구조를 개략적으로 도출하며, 그 결과는 소각로 내의 연소특성을 상태공간모델 즉 선형모델로 기술할 수 있는 이론적인 근거를 제공하고 있음에 주의하자. 실제 개략적인 상태공간모델 구조는 두 번째 단계인 모델 규명법으로부터 수정·보완되어 최종적인 구조가 결정된다.

규명대상인 소각로는 Fig. 1과 같이 6개의 화격자를 통하여 쓰레기가 이송되는 화격자식으로서 13-입력 1-출력 다변수 시스템으로 가정한다. 즉 입력변수로서는 쓰레기투입량, 램피더 속도, 각 롤러 그레이트의 이송속도, 각 롤러 그레이트 하부에서 공급되는 1차 연소공기량 그리고 2차 연소공기량이며, 출력변수는 증기발생량으로 설정하여 모델규명을 수행한다.

모델규명에 이용되는 연소모델의 형태는 이론적으로 도출된 상태공간모델을 유리 전달함수로 변환시킨 이산시간 ARX 다변수 선형모델로 설정한다. 결과적으로 증기발생량에 관한 상태공간모델이 명확히 규명되며, 여기에는 입출력 변수간에 존재하는 시간지연 크기에 대한 규명도 명확히 이루어진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다.

제2장에서는 소각로의 연소현상에 대한 이산시간 상태공간모델을 해석적으로 도출하며, 제3장에서는 연소모델의 규명에 적용되는 보조변수 규명법과 실측 입출력 데이터로부터 증기발생량에 대한 모델을 규명하여, 규명오차에 대하여 고찰한다. 마지막으로 본 논문의 결론과 향후 연구과제를 제4장에서 간략히 요약한다.

2. 연소모델의 이론적 규명

Fig. 1과 같은 스토커식(stoker) 소각로는 도시쓰레기와 같은 일반 폐기물 소각설비에 가장 많이 이용되는 것으로 알려져 있으며, 6개의 각 스토커가 독립적으로 조절되어 안정된 연소가 가능하다는 것이 큰 장점으로 들 수 있다.

소각과정은 생 쓰레기의 건조과정, 가스화 연소과정과 화염 연소과정의 주연소과정 그리고 후연소과정의 3단계에 걸쳐 일어난다. 실제 이들 과정은 폐기물의 종류, 성분, 수분함량 등의 영향에 따라 달라지는 매우 복잡한 특성을 가진다.

건조과정에서는 쓰레기에 함유되어 있던 수분의 상당량이 증발하게 되며, 이때 휘발분의 연소작용은 그다지 활발하게 일어나지 않는다.

주연소과정에서는 대부분의 휘발분이 연소되고, 건조단계에서 증발되지 않고 남아있던 나머지 수분은 이때 모두 증발하게 된다.

후연소과정에서는 주연소단계에서 연소되지 않고 남아있던 휘발분이 연소되며, 후연소단계 이후에 남아있던 재는 재병커로 빠져나간다.

본 장에서는 소각로를 1차원으로 단순화하여 열 및 물질 보존식으로부터 소각로 연소 특성을 해석하여 이산시간 상태공간모델을 구축한다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 쓰레기 투입량 및 연소 공기량에 따른 증기발생량을 해석한다.

2.1 쓰레기 질량평형 모델

소각로 내에서의 연소는 소각로 내의 전 영역에서 이루어지게 된다. 노내의 쓰레기량을 W_R , 쓰레기 변동량을 ΔW_R , 쓰레기 입력분(단위시간 동안 쓰레기 급진장치에 의해 소각로 내의 화격자위로 압송되어진 쓰레기)을 $U = G_{R,0}$, i분전의 쓰레기의 입력분을 $G_{R,i}$ 라 한다. 쓰레기중의 수분의 양을 P_M , 회분의 양을 P_A , 수분의 증발속도를 $\eta_{M,i}$, 휘발분의 연소속도를 $\eta_{v,i}$ 라고 하면, 노내의 쓰레기량은 질량보존의 법칙에서 식 (1)과 같다.

$$W_{R,n+1} = W_{R,n} + \Delta W_{R,n} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{R,n} = & U - G_{R,30} \times P_{A,30} \\ & - \sum_{i=1}^{30} G_{R,i} (1 - P_{A,i} - P_{M,i}) \eta_{v,i} \quad (2) \\ & - \sum_{i=1}^{30} G_{R,i} P_{M,i} \eta_{M,i} \end{aligned}$$

위의 식 (2)는 쓰레기 변동량을 나타내고 있다. 쓰레기의 노내 체류시간을 30분으로 가정하면, 30분 이내에 소각로 내로 투입된 쓰레기중 휘발분과 수분의 일부가 연소반응을 한다. 그리고 30분 이전에 소각로 내로 투입된 쓰레기 가운데 연소되고 남은 재는 재병커로 빠져나가고, 급진장치에 의해서 압송되어진 쓰레기가 소각로 내로 들어오고 있는 것으로 하면 식 (2)가 주어진다.

소각로 내로 투입된 쓰레기는 건조, 주연소, 후연소의 단계를 거치게 되며 실제 각 그레이트(grade)의 속도는 조금씩 다르다. 그러나 평균적으로 균일하다는 가정 하에서 건조, 주연소, 후연소 과정이 각각 10분씩 진행된다고 간주하여 노내 체류시간을 30분으로 설정한다. 즉 건조, 주연소, 후연소 단계의 각 구간 내에서 연소속도가 균일하다고 가정하여, 샘플링 시간이 1분일 경우 휘발분 연소속도 및 수분의 증발속도를 다음의 식 (3), (4)와 같이 설정한다.

- 휘발분 연소속도

$$\eta_{v,n} = \begin{pmatrix} 0.005 & 1 \leq n \leq 10 \\ 0.075 & 11 \leq n \leq 20 \\ 0.020 & 21 \leq n \leq 30 \end{pmatrix} \quad (3)$$

- 수분 연소속도

$$\eta_{M,n} = \begin{pmatrix} 0.07 & 1 \leq n \leq 10 \\ 0.03 & 11 \leq n \leq 20 \\ 0.00 & 21 \leq n \leq 30 \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 n이 의미하는 것은 어느 정도의 샘플링 주기 전에 소각로 내로 투입되어진 것인가를 의미하는 것으로, n = 1이란 1분전에 투입되었음을 의미한다. 그리고 위의 연소속도는 건조 단계에서 휘발분 5%, 수분 70%가 연소되고, 주연소 단계에서 휘발분 75%, 수분 30%가 연소되며, 후연소단계에서는 휘발분이 20% 연소된다는 가정 하에 설정된 값이다. Fig. 2는 샘플링 시간이 1분 단위일 때 소각로 내로 투입된 쓰레기의 시간에 따른 변동량을 나타낸 것으로 30분동안 각 연소 단계에서 질량이 감소해가는 모습을 보여준다.

본 연구에서 대상으로 잡은 소각로는 하루 소각량이 300ton/day(= 12.5ton/hr = 208.33kg/min)으로서, Fig. 2에서 초기질량이 225kg인 것은 압송

된 쓰레기의 입력시 질량 변동분을 고려하였기 때문이다. 그리고 사용된 쓰레기 물성치는 Table 1에서 기준 쓰레기로 설정한다.

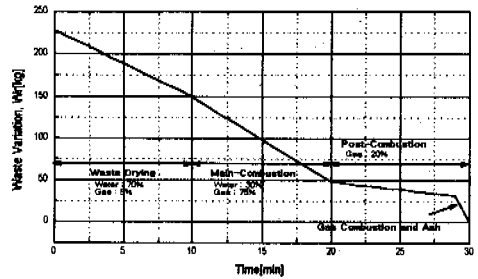


Fig. 2 Variation of waste mass

Table 1 Analysis of waste components

Classification	Wrong wastes	General wastes	Good wastes
Component (weight %)			
Water	55.16	48.73	42.69
Ash	18.50	13.70	8.50
Combustible wastes	26.34	37.57	48.81
Total	100.0	100.0	100.0
Compositional weight fractions of combustible wastes			
Carbon(C)	13.87	19.78	25.70
Hydrogen(H)	1.94	2.77	3.60
Oxygen(O)	10.10	14.40	18.70
Nitrogen(N)	0.32	0.43	0.54
Sulfur(S)	0.04	0.06	0.08
Chlorine(Cl)	0.07	0.13	0.19
Total	26.34	37.57	48.81
Heat of Combustion (kcal/kg)	1,000	1,600	2,200
Operation/year	2 months	9 months	1 months
Specific grav.(ton/m ³)	Bunker & crain capacity Design factor : 0.3		

2.2 쓰레기 열량평형 모델

소각로 내에서의 열손실이 5%라고 하면 소각로내의 발생 열량방정식은 에너지 보존의 법칙으로부터 아래와 같이 주어진다.

$$GC_{p, T_G}(T_G - 15.5) = 0.95(Q_C + Q_{A1} + Q_{A2}) - Q_{latent} - 0.2 \times \Delta A \times (T_G - 15.5) \quad (5)$$

위의 식에서 Q_c 는 연소열량, Q_{A1} 는 1차 연소공기의 열량, Q_{A2} 는 2차 연소공기의 열량, Q_{latent} 는 수분의 상변화 시의 잠열, Q_{ash} 는 회분이 소각로를 빠져나갈 때 가지는 열량 그리고 ΔA 는 재의 변동량을 각각 나타낸다.

식 (7)의 좌변은 온도 T_G 에서의 배기가스가 가지는 열량값으로, 우변의 결과로 나오는 순수발열량에 의해 결정되는 값이며, GC_{p, T_G} 는 배기가스중의 여러 가지 성분의 질량과 각각의 비열을 곱한 값의 합이다.

식 (5)에서 T_G 는 식 (6)과 같이 구해진다.

$$T_G = \frac{1}{(GC_{p, T_G} + 0.2 \times \Delta A) \times \{0.95(Q_C + Q_{A1} + Q_{A2}) - Q_{latent} + 3.1 \times \Delta A + 15.5 \times GC_{p, T_G}\}} \quad (6)$$

2.3 증기발생량

보일러에서 발생하는 증기량은 배기가스가 보일러를 거치는 동안의 열량감소분에 의해 결정이 되며, 보일러 출구측에서의 배기가스의 온도가 200℃, 보일러에서의 열손실 5%을 고려하면 증기량은 식 (7)과 같다.

$$m_s = \frac{0.95G}{Q_{ss}} (C_{p, T_G} T_G - C_{p, 200} \times 200) \quad (7)$$

여기서 Q_{ss} 는 보일러에 급수된 물 1kg이 2MPa의 압력에서 240℃로 되기 위해 필요한 열량값으로 상수값을 가진다. 다음 절에서는 위의 결과식들을 상태공간모델로서 표현한다.

2.4 상태공간모델

앞 절에서의 해석 결과를 통하여 소각로에서의 입출력 변수를 다음과 같이 설정한다.

$$u(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t)]^T$$

$$= [\text{램피더속도} \ 1\text{차공기량} \ 2\text{차공기량}]^T$$

$$y(t) = [\text{증기발생량}(m_s)]$$

여기서 쓰레기 투입량은 쓰레기 급진장치의 램

피더 속도로서 계산되며, 각 롤러 그레이트 하부에서 공급되는 1차공기는 모두 동일하다고 가정하였다. 그리고 전개의 단순화를 위하여 각 롤러 그레이트의 이송속도는 입력변수로 고려하지 않았음에 주의하자.

이때 현재 시각의 증기발생량은 아래와 같다.

$$y(k) = a_1 u_1(k) + a_2 u_1(k-1) + \dots + a_{10} u_1(k-9) + b_1 u_2(k) + b_2 u_3(k) \quad (8)$$

위의 식에서 k 는 kT ($k=0, 1, \dots, T$ 는 샘플링주기를 단순화하여 표기한 것이다. 그리고 새로운 상태변수를 다음과 같이 정의하면

$$X(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_9(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1(k-1) \\ u_1(k-2) \\ \vdots \\ u_1(k-9) \end{bmatrix}$$

식 (8)에 대한 상태공간모델은 식 (9), (10)과 같이 얻어진다.

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} X(k) + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ u_3(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$y(k) = [a_2 \ a_3 \ a_4 \ \dots \ a_{10}] X(k) + [a_1 \ b_1 \ b_2] u(k) \quad (10)$$

위의 식에서 각 파라미터는 다음과 같다.

$$a_n = \frac{0.95}{Q_{ss}} \times \left\{ \frac{P_W \eta_{M,n}}{18.016} (T_G \times C_{p, H_2O, T_G} - 200 \times C_{p, H_2O, 200}) + \frac{P_C \eta_{v,n}}{12.011} \{ T_G \times (C_{p, CO_2, T_G} - C_{p, O, T_G}) - 200 \times (C_{p, CO_2, 200} - C_{p, O, 200}) \} + \frac{P_H \eta_{v,n}}{2.016} \{ T_G \times (C_{p, H_2O, T_G} - 0.5 C_{p, O, T_G}) - 200 \times (C_{p, H_2O, 200} - 0.5 C_{p, O, 200}) \} + \frac{P_O \eta_{v,n}}{32} (T_G \times C_{p, O, T_G} - 200 \times C_{p, O, 200}) + \frac{P_N \eta_{v,n}}{28.014} (T_G \times C_{p, N, T_G} - 200 \times C_{p, N, 200}) - \frac{P_S \eta_{v,n}}{32.06} (T_G \times C_{p, O, T_G} - 200 \times C_{p, O, 200}) \right\}$$

$$b_n = \frac{0.95}{Q_{ss}} \left\{ T_G \times (0.79 C_{p,N,T_G} + 0.21 C_{p,O,T_G} + \frac{28.85 \times 0.008 \times C_{p,H_2O,T_G}}{18.016}) - 200 \times (0.79 C_{p,N,200} + 0.21 C_{p,O,200} + \frac{28.85 \times 0.008 \times C_{p,H_2O,200}}{18.016}) \right\}$$

2.5 소각로 동특성 결과 및 고찰

Fig. 3~5까지는 쓰레기 성분의 변동을 고려한 경우 수확모델의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3은 쓰레기 투입량, 노내 쓰레기량 및 변동량을 나타낸 것이며, 수분과 회분, 휘발분의 경우 최고 10%까지 변동하고 휘발분 내의 성분들도 최대 10%까지 변동이 되도록 고려하였다. 그리고 1차 연소공기량은 완전연소를 고려하여 과잉공기비가 1.8이 되도록 공급하였으며, 2차 공기량은 1차 연소공기량의 약 25%에 해당하는 양으로 가정하였다. 실제 2차 연소공기는 유해 배기가스 성분 CO를 줄이는데 주 목적을 두고 있으므로, 여기서는 중요하게 고려되고 있지 않다.

Fig. 4~5에서는 각각 연소 발열량, 배기가스 열량 그리고 증기발생량을 나타내고 있다. 실제 연소과정에서는 불완전연소를 포함한 다양한 연소 화학반응이 존재하지만, 연소반응을 단순화하였으므로 많은 모델링 오차가 발생할 것으로 생각한다. 특히 Table 1의 기준쓰레기 물성치가 실제 소각로에 투입되는 쓰레기의 성분과는 다소 차이가 날 것으로 예상된다. 그러나 이 장의 목적은 소각로 내 연소 이산시간 상태공간모델에 대한 구조를 개략적으로 설정하는 것이 목적인데, 이 장의 결과는 제 3장의 모델규명시 설정한 상태공간모델 또는 이에 상응하는 ARX 모델에 대한 이론적인 타당성을 부여하고 있다.

3. 소각로 증기발생량 모델규명 및 결과

시스템 규명은 시스템에 가해진 입력과, 가해진 입력에 대한 출력 데이터들로부터 동적 시스템의 수확모델을 결정하는 것으로서, 고전적인 시스템 규명은 최소자승법에 기초하며, 이는 미지의 모델 파라미터들을 추정하는 것과 거의 동일하게 인식되고 있다. 본 절에서는 최소자승법에 기초한 보조변수 규명법을 적용하여 소각로

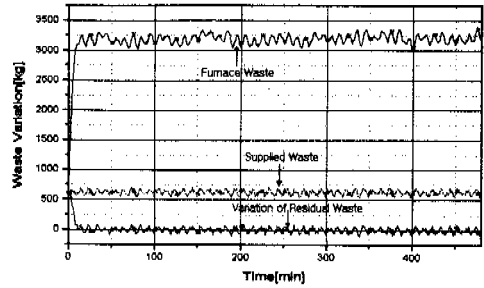


Fig. 3 Variations of residual and supplied wastes for random waste

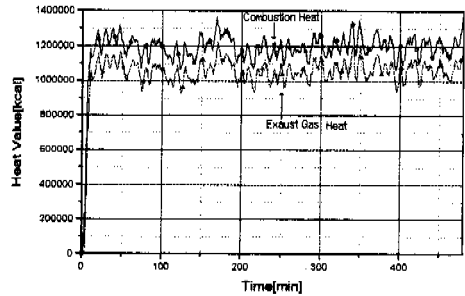


Fig. 4 Variation of combustion heat and flue gas heat for random waste

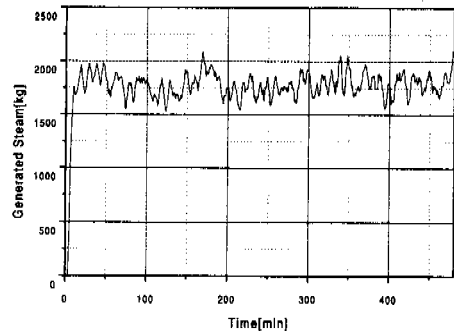


Fig. 5 Generated steam for random waste

상태공간모델을 규명한다. 소각로의 모델은 식 (9), (10)로부터 유도되는 전달함수에 잡음을 고려하여 이산시간 ARX 선형모델로 선정한다. 다음 절에서는 ARX모델의 파라미터 규명에 적용되는

보조변수 시스템 규명법⁽¹⁰⁾을 간략히 설명한다.

3.1 보조변수 시스템 규명법

다음과 같이 출력이 잡음 $e(k)$ 가 포함되는 단일 입력력 이산시간 ARX모형을 고려한다.

$$y(k) = G(z, \theta)u(k) + e(k) \quad (11)$$

위의 식에서 $G(z, \theta)$ 는 식 (12)와 같이 정의되는 규명대상의 유리전달함수라고 가정한다.

$$G(z, \theta) = \frac{b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (12)$$

$$= \frac{B(z, \theta)}{A(z, \theta)}$$

θ 는 규명대상의 미지의 파라미터 벡터이다.

$$\theta = [a_1 \dots a_n \ b_1 \dots b_m]^T \quad (13)$$

그리고 $e(k)$ 는 평균이 0, 분산이 σ^2 인 백색잡음을 나타낸다. 입력력 데이터로부터 구성되는 회귀벡터 φ 를 다음과 같이 정의하면,

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n) \ u(k-1) \dots u(k-m)]^T \quad (14)$$

식 (12)는 다음의 선형회귀모델로 표현된다.

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + v(k) \quad (15)$$

여기서 $v(k) = A(z, \theta)e(k)$ 를 나타낸다. 만약 $v(k)$ 가 평균이 0이면서 그리고 회귀벡터 $\varphi(k)$ 가 잡음벡터 $v(k)$ 에 무상관이지 않으면 최소자승법에 기초한 파라미터 추정치 $\hat{\theta}$ 는 참값 θ_0 에 수렴하지 않는다. 즉 $v(k)$ 가 백색잡음이 아니면 $E\{\varphi(k)v_0(k)\} \neq 0$ 가 되어 N개의 입력력 데이터로부터 추정한 최소자승 추정치 $\hat{\theta}(N)$ 는 θ_0 에 수렴하지 않는다.

보조변수법은 $v(k)$ 가 백색잡음이지 않는 경우, 참값에 수렴하는 일치추정치를 얻기 위한 규명법으로서, $v(k)$ 에 무상관인 새로운 상관변수 즉 보조변수 $\zeta(k)$ 를 도입함으로써 구해진다. 이는 식 (11)의 ARX 모델에 대하여 가중합수가 고려된 아래의 평가함수 V_N 에 대한 최소자승해를 구하는 문제로 귀착된다.

$$V_N = \sum_{k=1}^N \beta(k) [y(k) - \varphi^T(k)\theta]^2 \quad (16)$$

여기서 $\beta(k) = \zeta(k)\zeta(k)^T$ 로 주어진다. 따라서 식 (16)의 V_N 에 대한 최소자승해는 아래와 같다.

$$\hat{\theta}(N) = \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta(k)\varphi^T(k) \right)^{-1} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta(k)y(k)$$

위의 식에 식 (15)의 $y(k)$ 를 대입하면

$$\hat{\theta}(N) = \theta_0 + \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta(k)\varphi^T(k) \right)^{-1} \times \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta(k)v_0(k) \quad (17)$$

따라서 상관벡터 $\zeta(k)$ 를 아래의 두 가지 조건을 만족하도록 선정하면 보조변수법에 의한 최소자승 추정치 $\hat{\theta}$ 는 참값 θ_0 로 수렴된다.

$$(i) \quad p \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta(k)\varphi^T(k) \text{가 정칙}$$

$$(ii) \quad p \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \zeta(k)v_0(k) = 0$$

여기서 p 는 기대치를 나타낸다. 위의 두 가지 조건을 만족시키는 모든 $\zeta(k)$ 를 총칭하여 보조변수(IV) 벡터라 하며, 이는 IV 벡터 $\zeta(k)$ 는 $\varphi(k)$ 와는 종속이어야 하고, $v(k)$ 와는 독립이어야 함을 요구하고 있다. 이러한 IV벡터에 대한 선정법은 다수 제안되어 있지만 본 논문에서는 최적의 선정법으로 알려져 있는 Bootstrap 법⁽¹⁰⁾을 적용하였다. 그리고 수치계산은 MatLab의 System Identification Toolbox를 사용하여 수행하였다.

3.2 증기발생량 모델규명 결과

소각로의 증기발생량에 대한 모델 파라미터를 규명하기 위하여 사용한 입력력 데이터는 쓰레기 소각로의 실제 운전 데이터로서 3분 간격으로 샘플링된 약 8일간의 데이터이다. 그 가운데 정상 운전 상태의 데이터를 사용하여 모델을 규명하였다. 그리고 1, 2차 연소공기량의 예열온도는 각각 약 180°C이다. 소각 플랜트의 입력변수로서는 쓰레기 투입량(u_1), 램 피더 속도(u_2), 4개의 롤러 그레이트(1번~4번) 속도($u_3 \sim u_6$), 6개의 롤러 그레이트(1번~6번) 하부로부터 공급되는 1차 연소공기량($u_7 \sim u_{12}$), 2차 연소공기량(u_{13})의 13개 변수이며, 출력은 증기발생량(y)이다. 즉 소각로의 연소모델을 식 (18)과 같은 13입력-1출력 다변수 시스템(MISO system)으로 가정하여 각 파라미터 규명을 수행하였다. 식 (18)은 식 (11)의 다변수 모델 형태를 나타내고 있다. 그리고 입력변수가운데 롤러 그레이트 5, 6번의 속도를 고려하지 않은 것은 연소에 크게 영향을 미치지 않기 때문

이다.

$$A_i Y_i = BU + A_i E \quad (18)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{1m_1} \\ B_{2m_2} \\ \vdots \\ B_{13m_{13}} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_{1m_1} \\ U_{2m_2} \\ \vdots \\ U_{13m_{13}} \end{bmatrix}$$

$$A_i^T = \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n_i} \end{bmatrix}, \quad B^T_{im_i} = \begin{bmatrix} b_{i1} \\ b_{i2} \\ \vdots \\ b_{im_i} \end{bmatrix}$$

$$U_{im_i} = \begin{bmatrix} u_i(k-1) \\ u_i(k-2) \\ \vdots \\ u_i(k-m_i) \end{bmatrix}, \quad Y_i = \begin{bmatrix} y_i(k) \\ y_i(k-1) \\ \vdots \\ y_i(k-n_i) \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} e(k) \\ e(k-1) \\ \vdots \\ e(k-n_i) \end{bmatrix}$$

여기에서 $e(k)$ 은 0-평균 백색잡음을 나타낸다. 그리고 위의 식(18)의 모델 형태는 식 (9), (10)에서 주어진 상태공간모델의 출력에 잡음이 고려된 구조와 동일하다.

Fig. 6과 7은 각각 보일러의 증기발생량에 대한 규명결과와 규명오차를 나타내고 있다. Fig. 6에서 실선은 실제 출력 데이터이며, 점선은 규명모델의 출력으로서 평균치 (약 25.3 ton/hour)에 대한 변동치를 나타내고 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 매우 양호한 규명결과를 보이고 있으며, 규명오차는 약 $\pm 2(t/h)$ (평균치=25.3t/h에 대하여 약 8%)의 범위 내에 포함되고 있음을 Fig. 7에서 알 수 있다.

결과적으로 현재시각 ($t = kT$)의 출력 즉 증기 발생량 $y(k)$ 은 과거출력과는 무관하며, 단지 13개 입력에 대한 과거값과 출력데이터에 포함된 잡음의 함수로 주어지며, 각각의 입출력 변수간에 포함되는 시간지연은 약 샘플링 주기의 2배에 해당하는 크기를 가지고 있음을 알 수 있다.

위의 결과에서 특기할만한 사항은 입출력간의 시간지연이 그다지 크지 않고, 대체적으로 쓰레기 투입량에 많이 의존하는 특성을 보이고 있다는 사실이다. 그리고 5, 6번 롤러 그레이트 하부의 1차 공기량과 2차 공기량과는 그다지 밀접한 관계가 없음을 알 수 있다.

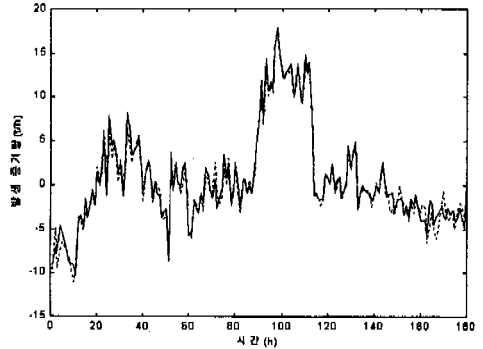


Fig. 6 Identification of generated steam (mean value=25.3t/h)

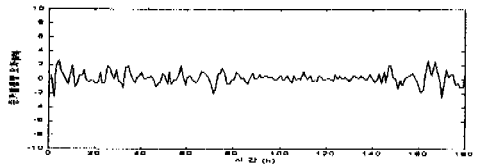


Fig. 7 Identification error of generated steam

제2장에서 이론적으로 도출된 시불변 선형인 이산시간 상태공간모델이 비선형성이 강하고 복잡한 연소현상을 기술하는데 있어 적합하다는 것을 알 수 있다. 동시에 소각로의 모델규명에 있어 IV 규명법의 유용성을 확인하였다.

그리고 실제 증기발생량뿐만 아니라 배기가스 성분 즉 O_2 , CO , NO_x , SO_x , 검댕(dust) 등도 본 논문에서 사용한 상태공간모델 또는 ARX모델 구조로 표현할 수 있음이 확인되었다.⁽⁹⁾

4. 결 론

본 논문에서는 소각로의 연소현상을 해석하여 증기발생량에 대한 이산시간 상태공간모델을 도출한 후, 보조변수 규명법을 이용하여 입출력 데이터로부터 ARX 모델을 규명하였다. 규명모델은 소각로의 실측 데이터를 양호하게 표현하고 있음을 보였으며, 그리고 보조변수 시스템 규명이 소각로의 시스템 파라미터 추정에도 유용함을 보였다. 그리고 본 논문의 향후 연구과제는 유해 배기가스를 최소한으로 억제하면서 증기발생량을 안정화하는 자동연소 제어시스템 설계이다.

후 기

본 연구에 대한 유익한 조언과 실험에 협조해주신 심사위원님과 현대중공업(주) 프랜트사업부 전장설계부 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Karl J. Thome-Kozmiensky, 1995, "화격자 소각로를 설계하기 위한 기초," 환경기술, pp. 22~26.
- (2) 최상민, 김성중, 김승기, 유영돈, 1994, "소각로 개발 관련 연구," 대한기계학회지, 제34권, 제8호, pp. 632~642.
- (3) 손진영, 1996, "폐기물 처리용 소각로 설계기술의 현황," 대한기계학회지, 제36권 제12호, pp. 1120~1134.
- (4) Howard, J. B., 1968, "Combustion of Solid Refuse," ASME. winter annual meeting and energy system exposition, N.Y, pp. 85~102.
- (5) Ahmed S., Kumer R. and Helt J. E., 1988, "Combustion Products Kinetics Model," CONF-8806176-4, DOE Thermochemical Conversion Review Meeting.
- (6) 박상일, 박영재, 1991, "로타리 킬른형 도시쓰레기 소각로의 전열해석," 대한기계학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 2100~2108.
- (7) 임태인, 장동순, 채재우, 1993, "로타리 킬른 소각로 고도 설계를 위한 연구 II : Dow chemical 소각로 운전변수 심층 수치분석," 한국폐기물학회지, 제10권, 제1호, pp. 9~23.
- (8) 김형래, 유영돈, 최상림, 1994, "도시폐기물 연소상의 단순다단계 모델," 한국폐기물학회지, 제11권, 제4호, pp. 526~533.
- (9) 이진걸, 황이철 외 2인, 1999, "쓰레기 소각로의 자동연소제어시스템 개발," 현대중공업 연구과제최종보고서.
- (10) 片山 徹, 1994, "システム 同定入門," 朝倉書店, 東京.