소각 프랜트의 증기발생 및 배기가스에 대한 파라메트릭 ARX 모델규명

Identification of a Parametric ARX Model of a Steam Generation and Exhaust Gases for Refuse Incineration Plants

황 이 철
(I-Cheol Hwang)

Abstract : This paper studies the identification of a combustion model, which is used to design a linear controller of a steam generation quantity and harmful exhaust gases of a Refuse Incineration Plant(RIP). Even though the RIP has strong nonlinearities and complexities, it is identified as a MIMO parametric ARX model from experimental input-output data sets. Unknown model parameters are decided from experimental input-output data sets, using system identification algorithm based on Instrumental Variables(IV) method. It is shown that the identified model well approximates the input-output combustion characteristics.

Keywords : refuse incineration plant, model identification, auto regressive model with exogenous input(ARX model), instrumental variable method(IV)

I. 서론

최근 쓰레기 소각 프랜트에 있어 쓰레기 발열량의 지속적인 증가로 인하여 연소 후 발생되는 증기량을 효율적으로 이용하기 위한 증기발생량의 안정화 기술과 심각한 환경오염 문제로 인한 유해 배기가스(CO, NO_x, SO_x, 검뎅 등)의 저감 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[3]. 이 논문에서는 스토커(stoker)식 소각로의 증기발생량 안정화와 유해 배기가스를 줄이기 위한 선형 제어기 설계에 대한 기초 연구로서, 소각 프랜트의 입출력 실험 데이터로부터 선형 제어모델의 규명을 목표로 한다. 즉 소각로를 하나의 블랙박스로 간주하고, 소각로에 관한 사전 물리적인 정보와 입출력 실험 데이터를 이용하여 이산시간 선형 상태공간 모델 규명에 관한 연구를 수행한다.

소각로의 연소모델은 소각로 설계와 최적 운전조건 설정을 위하여 현재까지 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 연소상태나 전열해석 등에 관한 연소 생성물을 예측하는 모델을 제시하였다. 그리고 열유체학 및 열전달 해석을 통한 연소모델에 관한 이론적 연구가 다수 발표되었다[6]. 국내에서는 로타리 킬른식과 스토커식 소각로의 단순 다단계 연소모델에 관한 연구[7]-[9]를 포함한 다수의 연구결과들이 발표되었다.

논문접수 : 2001. 10. 15., 채택확정 : 2002. 3. 12
황이철 : 동의대학교 메카트로닉스공학과(ichwang@hyomin.dongeui.ac.kr)
※ 본 논문은 2001학년도 동의대학교 교내 학술연구조성비의 지원하에 수행되었음.

위에서의 기존 연구들은 주로 소각로 내의 연소 열량, 열전달, 온도분포, 연소 진행 상태 그리고 배기가스 등의 소각로 특성을 엄밀히 해석하기 위한 것이므로, 비선형 편미방의 형태로 주어져 제안된 수학모델을 이용해서 유한차원 선형 제어기를 설계하는 것이 매우 어렵다. 따라서 일반화되어 있는 선형제어 기법을 통하여 연소 제어시스템을 설계하기 위해서는 소각로 내의 복잡한 연소특성을 단순하면서도 정확히 기술할 수 있는 전달함수나 상태공간방정식으로 주어지는 파라메트릭 수학모델 규명에 관한 연구가 필요함을 알 수 있다. 이 논문의 저자는 소각로의 증기발생량에 관한 이산시간 상태방정식의 이론적 도출 방법과 실험적으로 측정된 입출력 데이터를 통해서 상태방정식에 포함된 미지의 시스템 파라미터들을 규명한 연구결과을 제안하였다[10]. 그러나 문헌 [10]에서는 입출력 데이터의 특성과 유해 배기가스에 대한 모델규명에 관한 연구가 수행되지 않아, 소각 프랜트의 제어시스템을 설계하는데 아직 부족한 점이 많은 것으로 판단된다. 따라서 이 논문에서는 소각로의 연소해석을 기초로 하여 유해 배기가스의 모델규명을 주 목적으로 한다.

이 논문의 주요 내용은 다음과 같다. 제2장에서는 6개의 화격자를 가진 스토커식 소각로의 입출력 실험 데이터를 통하여 소각로의 특성을 해석하고 입출력 변수를 선정한다. 여기서 소각로는 13-입력 7-출력 다변수 시스템으로 고려되며, 입력변수로서는 쓰레기 투입량, 램피더 속도, 1-4번 롤러 그레이트의 이송속도, 1-6번 롤러 그레이트 하부로부터의 1차 연소공기량, 그리고 2차 연소공기량이며, 출력변수로는 보일러 출구의 O_2, CO, NO_x, SO_x, 검뎅, 증기발생량 그리고 소각로의 연소실 온도로 주어진다. 제3장에서는 최소자승법에 기초를 둔 보조변수 규명법을 이용하여 소각로의 이산시간 다변수 ARX모델을 규명하고 그 결과를 고찰한다. 여기서 규명된 이산시간 ARX 모델은 소각로의 입출력 데이터를 양호하게 기술함을 보이고, 규명모델이 소각로의

이산시간 선형 제어기 설계에 유용함을 확인할 수 있다. 끝으로 제4장에서는 이 논문의 결론과 향후 제어기 설계에 있어 보완되어야 할 규명모델의 문제점을 간략히 기술하기로 한다.

II. 소각 프랜트 및 입출력 데이터

1. 스토커식 소각 프랜트

그림 1과 같은 스토커(stoker)식 소각로는 도시 쓰레기와 같은 일반 폐기물 소각설비에 가장 많이 이용되는 것으로 알려져 있으며, 6개의 각 스토커가 독립적으로 조절 가능하여 안정된 연소가 가능하다는 것이 큰 장점으로 들 수 있다. 각 스토커는 건조용 스토커, 연소용 스토커, 후 연소용 스토커로 구성되어 있으며, 소각과정은 건조, 가스화 및 화염 연소과정, 후 연소과정 세 부분으로 구분되며, 이들 과정은 각각 독립적으로 조절되어 안정한 연소가 이루어지게 된다.

쓰레기 소각과정은 다음과 같다. 수분이 함유되어 있는 쓰레기가 소각로 내로 압송되어지면 본격적인 연소가 일어나는 것이 아니고 제 1, 2스토커 상에서 건조 단계가 시작된다. 이때 쓰레기에 함유되어 있던 수분의 상당량이 증발하게 되며, 휘발분의 연소작용은 그다지 활발하게 일어나지 않는다. 건조 단계를 지나간 쓰레기는 제 3, 4스토커 상에서 주 연소가 일어나며, 이 단계에서 대부분의 휘발분이 연소된다. 건조 단계에서 증발되지 않고 남아있던 나머지 수분은 주 연소 단계에서 모두 증발하게 된다. 주 연소 단계에서 연소되지 않고 남아있던 휘발분은 제 5, 6스토커 상의 후 연소 단계에서 연소되며, 후 연소 단계 이후에 남아있던 재는 벙커로 빠져나간다. 위의 3단계에서는 매우 복잡한 연소현상이 발생하며, 특히 연소에 대한 화학반응과 열전달 현상으로 연소 열량이나 유해 배기가스에 대한 선형적인 수학 모델식을 얻기가 매우 어렵다. 그래서 이 논문의 저자는 몇 가지의 단순 가정 하에서 보일러 출구에서 발생하는 증기량 모델에 대한 이론적인 연구를 통하여 상태공간방정식을 도출한 후, 입출력 실측 데이터로부터 이산시간 선형 제어모델의 도출 가능성을 확인하였다[10]. 이에 대한 구체적인 내용은 문헌[10]을 참고하기 바란다. 다음 절에서는 이러한 연소과정에 관한 수학모델을 규명하기 위한 입출력 변수의 선정과 실측 데이터를 통하여 스토커식 소각로의 연소특성을 간략히 설명하기로 한다.

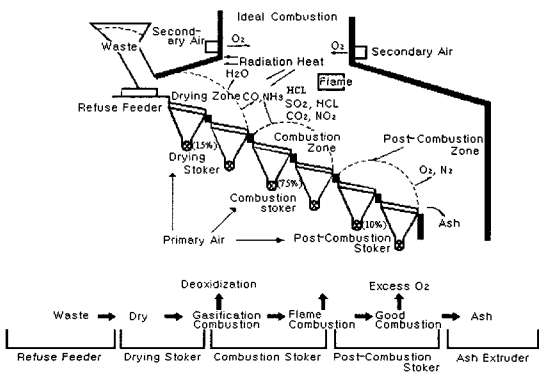


그림 1. 스토커식 쓰레기 소각 프랜트의 연소과정.

Fig. 1. Combustion process of a stoker-type refuse incineration plant.

2. 입출력 변수 및 실험 데이터 획득

이 절에서는 모델규명에 필요한 입출력 변수를 선정하고, 규명 시에 이용되는 실험 운전 데이터들이 소각로의 실제 운전특성을 잘 나타내고 있는지를 고찰한다.

2.1. 입출력 변수 선정

13-입력과 7-출력 변수들은 각각 다음의 표 1과 2와 같다. 특히 입력변수 선정에서 각 화격자 하부에서 공급되는 1차 연소공기량은 서로 많은 양의 차이가 있으므로 이를 독립적으로 고려하였고, 또한 각 롤러 그레이트의 쓰레기 이송속도가 모두 다르므로 이들을 모두 입력변수로 고려하였다. 단 롤러 그레이트 5, 6번의 이송속도는 거의 변동이 없으며, 또한 연소 및 증기발생량에 커다란 영향을 미치지 않으므로 입력변수에서 제외하였다. 그리고 출력변수는 증기발생량, 보일러 출구의 배기가스 성분 그리고 연소실 온도를 포함하여 7개로 선정하였다.

2.2. 소각로의 입출력 데이터 특성

규명을 위한 입출력 실험 데이터는 정상적인 운전상태인 경우의 10일분 데이터로서 샘플링 주기는 1시간 간격으로 하였다. 여기서 샘플링주기를 1시간으로 한 이유는 기존의 데이터 획득 시스템이 1시간마다 데이터를 기록하고 있기 때문이다. 실제 경험적으로 샘플링주기를 3~5분 정도의 간격으로 해서 얻은 데이터와 1시간 간격으로 해서 얻은 데이터의 경향은 거의 유사함을 확인할 수 있었는데, 이는 소각 프로세스가 매우 느린 응답 특성을 가지고 있기 때문이다. 실제 시스템 규명에서는 샘플링주기를 정상상태 도달시간의 1/4배에서 1/15배 사이의 값을 취하는 것이 일반적이지만, 기존 설비의 하드웨어 제약으로 인한 어려운 점이 있어, 1시간 간격의 샘플링 주기로 데이터를 획득하였다. 그래서 이 절에서는 측정된 입출력 데이터가 소각로의 실제 연소특

표 1. 입력 변수의 기호 및 정의.

Table 1. Nomenclature of input variables.

기호	입력변수명	기호	입력변수명
u_1	쓰레기 투입량	u_8	그레이트2의 1차 연소공기량
u_2	램피더 속도	u_9	그레이트3의 1차 연소공기량
u_3	그레이트1 속도	u_{10}	그레이트4의 1차 연소공기량
u_4	그레이트2 속도	u_{11}	그레이트5의 1차 연소공기량
u_5	그레이트3 속도	u_{12}	그레이트6의 1차 연소공기량
u_6	그레이트4 속도	u_{13}	2차 연소공기량
u_7	그레이트1의 1차 연소공기량		

표 2. 출력 변수의 기호 및 정의.

Table 2. Nomenclature of output variables.

기호	출력변수명	기호	출력변수명
y_1	증기발생량	y_5	보일러출구 SO_x
y_2	보일러 출구 O_2	y_6	보일러벽의 검뎅
y_3	보일러 출구 CO	y_7	연소실 온도
y_4	보일러 출구 NO_x		

성을 정확히 기술하고 있는지 즉 규명 데이터로서 적합한지를 고찰하였다.

모델규명 시 사용한 각종 입출력 데이터는 그림 2~11에 나타내고 있다. 전체적으로 그림 6의 증기발생량 데이터에서 소각로 운전상태가 두 부분으로 나뉘어져 있음을 알 수 있다. 즉 약 90시간에서 110시간에서는 이외의 다른 시간역보다 많은 양의 증기량이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이는 정상운전의 특성뿐만 아니라 과도상태의 특성까지도 나타내는 양호한 입출력 데이터 조건이라 사료된다. 그리고 이론적으로 만족해야 하는 입력 신호의 지속적 기진조건(PE 조건)이 대략 200차이므로 규명에 필요한 충분한 입력 데이터임을 알 수 있다. 다음에는 각각의 입출력 데이터 특성을 통하여 소각로의 운전특성을 간략히 해석하기로 한다.

2.2.1 쓰레기 투입량

그림 2에서 전체 쓰레기 투입량의 평균은 8.9t/h이며, 약 90시간에서 110시간 사이에는 다소 많은 양의 쓰레기가 투입되며, 평균치에 대하여 약 ±100%정도의 변동폭을 보인다. 그리고 쓰레기의 종류는 주로 산업 폐기물이다.

2.2.2 램 피더 속도

그림 3에서 램 피더 속도는 1(mm/s)에서 2(mm/s)의 범위로 작동하고 있다. 초기시간에서 약 140시간까지는 평균속도가 1.4(mm/s) 정도이며 약 ±30% 가량의 변동폭을 보이고 있다, 그 후에는 약 1mm/s의 속도 근처에서 완만한 변화를 보이면서 작동하고 있음을 보인다. 램 피더 투입 횟수는 스트로크당 3~6회 정도이다.

2.2.3 롤러 그레이트 속도

그림 4에서는 롤러 그레이트 1번에서 4번까지의 이송속도를 각각 나타내고 있으며, 여기서 단위는 단위시간당 회전수(RPH)이다. 각각의 그림에서 특기할만한 사항은 간혹 급격한 속도 감소 현상을 보이는 것인데, 이는 롤러 그레이트가 리턴할 경우 공극현상을 방지하기 위한 운전에서 비롯되는 것으로 해석된다.

특히 이러한 현상은 1번 롤러 그레이트에서 많이 발생되고 있음을 알 수 있다. 1번에서 4번까지의 롤러 그레이트 평균속도는 각각 약 1.64, 2.22, 2.03, 1.15(RPH)이며, 최대 및 최소 변동폭은 약 ±30%이다. 전체적으로 초기시간에서 약 130시간까지는 빠른 속도를 보이다가 그 후에는 속도가 감

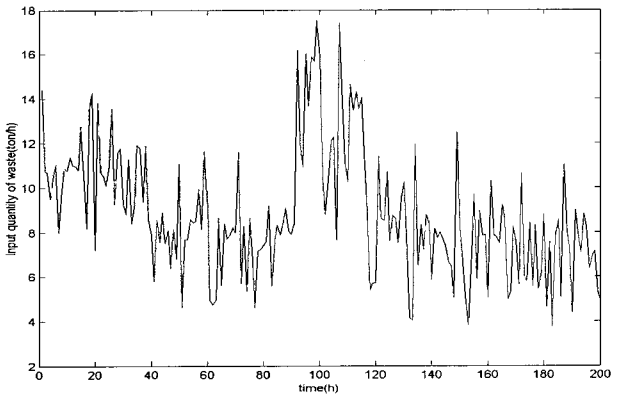


그림 2. 소각로 쓰레기 투입량.
Fig. 2. Input quantity of wastes.

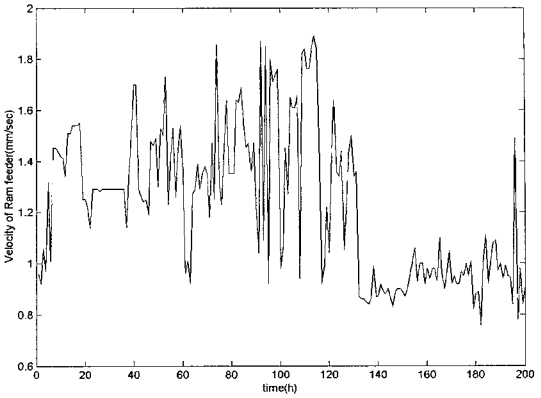


그림 3. 램 피더(쓰레기 급진장치) 이송속도.
Fig. 3. Moving velocity of ram feeder.

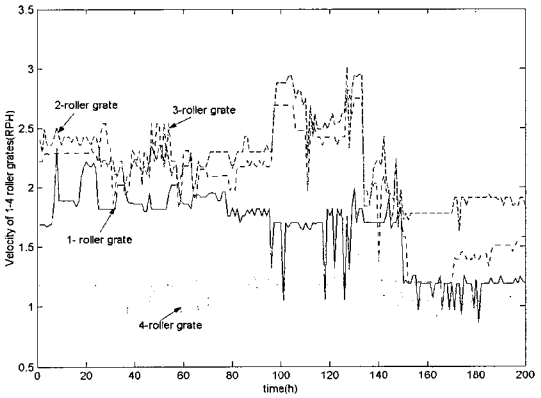


그림 4. 1-4번 롤러 그레이트의 속도.
Fig. 4. Velocity of 1-4 roller grates.

소하여 다소 작은 변동폭으로 작동하고 있다. 그리고 롤러 그레이트 2, 3번은 1, 4번보다 다소 많은 변동폭을 보이고 있다. 실제 적은 양의 유해 배기가스를 가지면서 안정된 연소를 하기 위해서는 접화지역 및 주연소지역에서의 롤러 그레이트 속도 조절이 중요함을 알 수 있다. 여기서는 후연소지역의 5, 6번 그레이트는 고려하지 않았다. 이는 속도변동이 그다지 크지 않았고 특히 6번 그레이트는 거의 정지된 상태를 보이고 있기 때문이다. 경험적으로 실제 6개의 롤러 그레이트 가운데 2개 정도가 고장이 나더라도 소각로 운전에는 그다지 문제가 되지않는 것으로 알려져 있으므로 건조 및 점화, 주 연소 영역의 그레이트만을 고려하였다.

2.2.4 1, 2차 연소공기량

소각과정에서 증기발생량과 유해 배기가스를 줄이기 위해서는 적절한 연소공기량 제어가 필요하다. 연소공기란 소각로 내에서의 연소작용을 돕기 위하여 노 내로 투입되는 공기이며, 잉여공기비로서 그 양을 나타낸다. 잉여공기비가 1이라는 것은 탄소가 연소반응을 하여 모두가 CO_2 가 되기 위해 필요한, 즉 탄소가 완전연소를 하기 위해 필요한 산소량을 말하는 것으로 대개 소각로에서의 잉여공기비는 1.5~1.9이다. 그리고 주 연소와 후 연소 단계에서 각각 공급되는 1차 연소공기량의 역할과 중요성에 대하여 간략히 설명한다.

1차 연소공기량은 증기발생량의 안정화 및 연소의 안정화에 중요한 역할을 담당한다. 증기발생량의 안정화를 위하

여 1차 연소공기량의 기본값은 발생증기량의 출력값에 따라 결정되는 것으로, 즉 발생증기량이 목표치보다 낮은 경우는 연소공기량을 증가하고 그 반대인 경우는 연소공기량을 감소시키는 것이 일반적이다.

1차 연소공기량의 증감에 따른 연소현상을 안정화하기 위하여 건조과정(예비 연소과정), 가스 및 화염 연소과정(주 연소과정), 후 연소과정으로 분류하여 각각 화격자의 댐퍼 개도를 다르게 한다. 댐퍼 개도의 정도는 1차 연소공기량의 증감에 따라 변화되지만 일반적으로 발생증기량이 목표치보다 낮은 경우는 연소공기가 화격자상의 주 연소영역에 집중될 수 있도록 댐퍼 개도를 조정한다. 이와 반대로 발생증기량이 목표치보다 높을 경우에는 연소공기를 화격자면 전체에 분산시켜 주 연소영역에서의 연소공기를 감소시키도록 댐퍼 개도를 결정하게 된다. 이러한 댐퍼 조작을 통해 연소공기량을 크게 변화시키지 않으면서 연소 안정화를 기할 수 있다.

2차 연소공기는 가스혼합실 온도, 노내의 O_2 농도 그리고 노외에 배출되는 NO_x 및 CO 농도에 많은 영향을 미친다. 즉 2차 연소공기량이 적은 영역에서는 2차 공기가 연소공기로서 작용하면서 가스혼합실의 온도가 상승하게 되고(2차 연소영역), 2차 연소공기량이 많아지면 냉각공기로 작용하여 가스혼합실 영역(냉각영역)의 온도가 저하된다. 2차 연소영역에 있어 2차 연소공기량을 감소해 나가면 점차 불완전연소로 되어 CO 농도가 상승하게 된다. 냉각영역에서 2차 연소공기량을 증가시켜 나가면 과냉각에 의해 가스혼합실 온도가 저하되고 배기가스중의 CO 등의 미연분의 2차 연소가 억제되어 CO 농도가 증가하게 된다. 따라서 쓰레기의 공급량, 열량, 수분 함유량 등이 변동하면 불완전연소가 발생하므로 투입쓰레기의 양과 성상에 따라 2차연소에 필요한 공기를 적절한 타이밍에 맞춰 공급하는 것이 완전연소, 즉 CO 발생을 억제하는 필수조건이 된다.

그림 5는 각각 1번에서 6번 롤러 그레이트 하부에서 공급되는 1차 연소공기량과 Fan 입구에서의 2차 연소공기량을 각각 나타내고 있다. 연소공기량 단위는 정상상태에서 단위시간당 입방미터(m^3/h)로서, 1차 연소공기량 각각의 평균유량은 3014.8, 5588.4, 5343.0, 3034.6, 1004.5, 901.5, 총 평균유량은 18886.8이다. 그리고 1차 연소공기량의 전체량에 대한 상대적인 비율은 각각 15.96%, 25.59%, 28.29%, 16.07%, 5.32%, 4.77%정도이다. 즉 2번과 3번 그레이트 하부에서 가장 많은 1차 공기가 공급되고, 1번과 4번이 두 번째로, 그리고 후 연소지역에서는 가장 적은 1차 공기가 투입되고 있음을 보인다. FAN 입구에서의 2차 연소공기량의 평균치는 약 4998정도로서, 이것은 1차 연소공기량에 대하여 약 26.4%에 해당하는 값이며, 변동량은 최대 약 100%에서 최소 70%정도 임을 보인다. 또한 110~150시간과 그외 시간에서의 공기량은 큰 차이가 있음을 보인다. 이는 그림 2의 쓰레기 투입량 또는 그림 6의 증기발생량에서 알 수 있듯이 110~150시간 사이에는 많은 공기가 공기가 공급되고 있음을 알 수 있다. 그리고 1, 2차 연소공기의 예열온도는 약 200℃, 180℃이다.

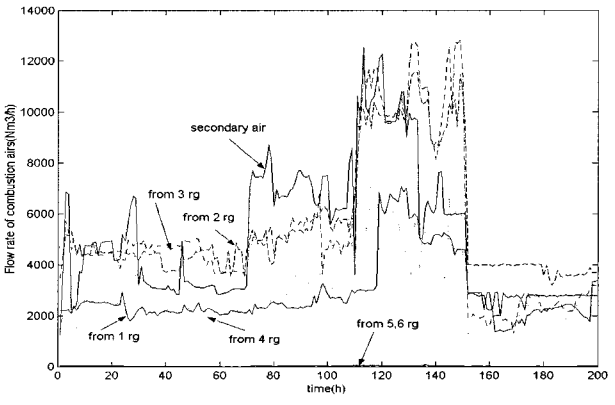


그림 5. 1-6번 롤러 그레이트 하부의 1차 연소공기량과 2차 연소공기량.

Fig. 5. Quantity of first and secondary combustion airs from 1-6 roller grates.

2.2.5 증기발생량

그림 6은 보일러에서 발생되는 증기량을 나타낸다. 단위는 단위시간당 톤(t/h)으로 나타내며, 평균치는 약 25.3t/h이며, 특히 110~140시간 사이에는 평균치보다 10t/h이상 많은 증기량이 발생하고 있음을 나타낸다. 전체적으로 최대 60%까지의 변동폭을 보이고 있다. 그러나 안정한 시간역에서는 최대 약 35% 정도의 변동을 보이고 있다. 증기발생량은 입력변수인 쓰레기 투입량과 1, 2차 연소공기량에 따라 크게 좌우되고 있음을 명확히 알 수 있다.

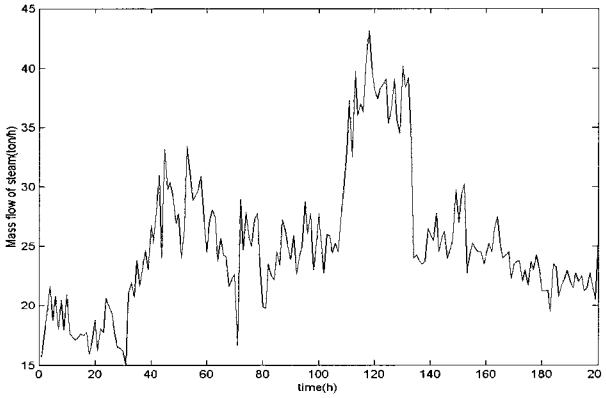


그림 6. 보일러 증기발생량.

Fig. 6. Steam generation of boiler.

2.2.6 보일러 출구 배기가스 성분

그림 7~10은 보일러 출구에서 측정된 유해 배기가스 성분을 나타내고 있다. 그림 7에서 산소(O_2) 발생량은 약 8(%)에서 12(%)사이의 값을 나타내고 있으며, 그림 8의 일산화탄소는 전체적으로 40(ppm)이하의 값으로서, 초기에 매우 많이 발생한 후부터는 매우 낮은 발생량을 보이고 있다. 이는 스토커식 소각로가 가지는 특성으로 해석할 수 있다. 그림 9의 NO_x는 약 130시간까지 거의 미미한 발생량을 보이다가 갑자기 150(ppm)까지 증가하여 많은 양이 발생되고 있음을 보인다. 이는 공기량의 증가에 기인하는 것으로 사료된다. SO_x는 Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 약 20(ppm)에서 60(ppm) 사이의 값으로 발생되고 있음을 보인다.

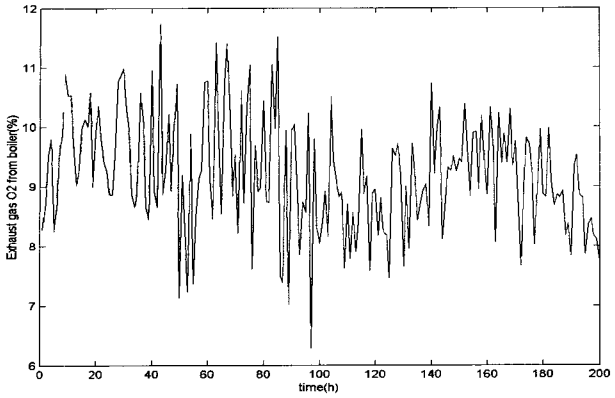


그림 7. 보일러 출구 산소량.
Fig. 7. O_2 quantity from boiler outlet.

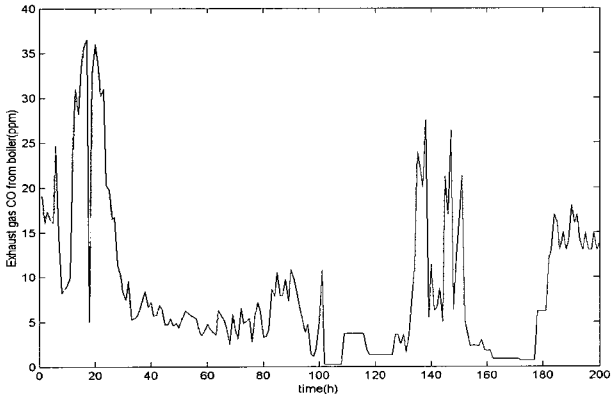


그림 8. 보일러 출구 일산화탄소량.
Fig. 8. CO quantity from boiler outlet.

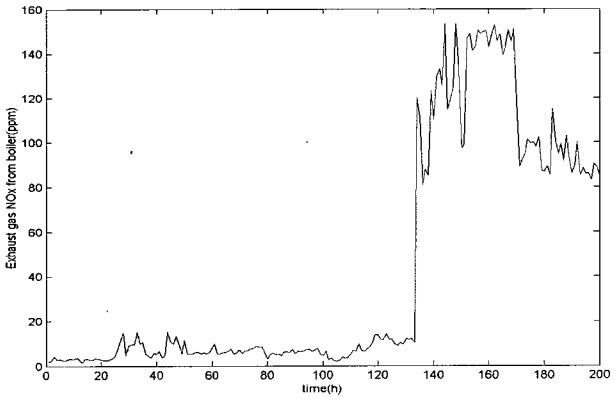


그림 9. 보일러 출구 산화질소량.
Fig. 9. NO_x quantity from boiler outlet.

2.2.7 소각로 연소실 온도

그림 11은 소각로 연소실 출구온도를 나타내고 있다. 평균온도는 약 942.7(℃)로서, 최대 ±16%로 변동하고 있다. 이는 증기발생량과의 관계를 생각하면 그다지 관련이 없는 것으로 보인다.

이것은 소각로 연소실 온도에 관한 이론적인 결과 즉 문헌 [10]에서 언급한 경향과는 다소 차이를 보이고 있는데, 그 이유로서는 보일러의 열손실 그리고 고유의 특성을 충분히 고려하지 않았기 때문으로 사료된다.

이상으로 소각로 연소모델의 파라미터 규명시 사용될 입

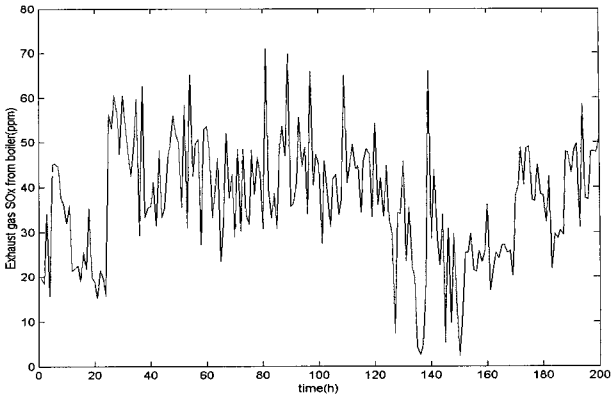


그림 10. 보일러 출구 황산화물량.
Fig. 10. SO_x quantity from boiler outlet.

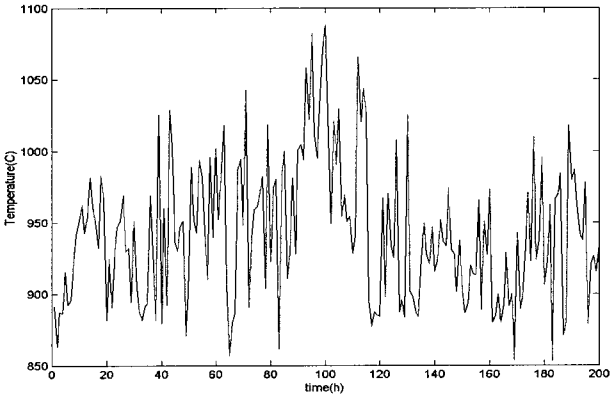


그림 11. 소각로 연소실 온도.
Fig. 11. Temperature of combustion chamber.

출력 데이터들의 특성을 고찰하였다. 전체적으로 샘플링주기가 1시간이란 점에서 다소 무리가 있지만 각 변수들은 소각로의 특성을 내포하고 있음을 알 수 있었다. 특히 소각로의 주요 입력변수로는 쓰레기 투입량 또는 램 피더 속도와 1, 2차 연소공기량임을 알 수 있다. 즉 화격자식 소각로에서는 소각로 내에서 쓰레기를 이송시키는 각각의 롤러 그레이트의 속도가 매우 중요한 변수로서 작용하고, 동시에 각각의 롤러 그레이트 하부에서 독립적으로 공급되는 각 그레이트 1차 연소공기량이 중요한 영향인자임을 알 수 있었다. 전체적으로 점화단계와 주연소 단계에 있는 화격자의 이송속도와 공급 공기량이 중요함을 확인하였다. 이는 앞으로 소각설비의 운전에 정량적인 정보를 제공할 것으로 기대된다. 그리고 증기발생량은 쓰레기량이나 공기량의 입력변수만의 함수로 충분히 기술할 수 있으나, 유해 배기가스 성분들은 입력변수만으로 기술하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 즉 유해 배기가스 성분들은 온도와 압력, 주위환경의 변화 등에 많은 영향을 받기 때문으로 해석된다. 이러한 연구결과는 소각로를 실험적으로 해석하는데 중요한 기초를 제공해 줄 것으로 기대되며, 특히 소각로 프로세스의 각 입출력 변수들간에 존재하는 시간지연의 크기를 파악하는데도 많은 도움이 될 것으로 사료된다. 다음 장에서는 이산시간 상태공간모델 형태의 모델규명 결과와 특성을 고찰하기로 한다.

III. 소각로 제어모델 규명

모델규명은 잡음에 오염된 입출력 데이터들로부터 동적 시스템의 수학모델을 결정하는 문제로서, 입력신호 및 샘플링 주기의 결정, 모델구조 및 시스템 변수 값의 결정 그리고 모델 타당성의 검증 등에 관한 내용을 포함한다. 이 장에서는 제2장의 입출력 데이터에 최소자승법을 기초로 하는 보조변수 규명법(IV법)을 적용하여 규명된 소각로의 파라메트릭 ARX 모델의 결과 및 그 특성을 고찰한다. 보조변수 규명법에 관한 기초 이론 및 알고리듬에 관해서는 지면관계상 생략하며, 이에 관한 구체적인 내용은 문헌 [10]을 참고하기 바란다. 참고로 규명결과는 MatLab의 System Identification toolbox를 이용하였다.

1. 규명모델의 구조 및 검증

이 논문에서는 모델구조를 결정하기 위하여 먼저 저차의 ARX 모델에 대하여 상관 검증법(cross validation)을 적용하여 입출력 데이터간의 지연시간을 결정한 후, ARX 모델의 차수를 변화시켜가면서 최적의 차수를 결정하였다. 그리고 차수가 고차일 경우를 피하기 위하여 극영점 상쇄법을 적용하여 차수를 조정하였다. 이러한 일련의 과정은 Matlab의 Identification Toolbox를 이용하여 수행하였다.

소각로의 연소 규명모델은 아래의 (1)과 같이 13입력-7출력 파라메터릭 ARX 다변수모델로 선정하였다.

$$AY = BU + AE \tag{1}$$

$$A=\begin{bmatrix} A_{1n_1} \\ B_{2n_2} \\ \vdots \\ A_{7n_7} \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} B_{1m_1} \\ B_{2m_2} \\ \vdots \\ B_{13m_{13}} \end{bmatrix}, E=\begin{bmatrix} e(t) \\ e(t-1) \\ \vdots \\ e(t-n_i) \end{bmatrix}$$

$$U=\begin{bmatrix} U_{1m_1} \\ U_{2m_2} \\ \vdots \\ U_{13m_{13}} \end{bmatrix}, Y=\begin{bmatrix} Y_{1n_1} \\ Y_{2n_2} \\ \vdots \\ Y_{7n_7} \end{bmatrix}$$

$$A^T{}_{in_j}=\begin{bmatrix} 1 \\ a_{i1} \\ \vdots \\ a_{in_j} \end{bmatrix}, Y_{in_j}=\begin{bmatrix} y_i(t) \\ y_i(t-1) \\ \vdots \\ y_i(t-n_j) \end{bmatrix},$$

$$B^T{}_{im_j}=\begin{bmatrix} b_{i1} \\ b_{i2} \\ \vdots \\ b_{im_j} \end{bmatrix}, U_{im_j}=\begin{bmatrix} u_i(t-1) \\ u_i(t-2) \\ \vdots \\ u_i(t-m_j) \end{bmatrix}$$

단, $e(t)$는 0-평균 백색잡음을 나타낸다.

(1)의 모델에 있어 현재 시점의 한 출력변수는 과거 입력변수에만 영향을 받는 것이 아니라, 다른 출력변수들의 현재와 과거의 값에도 영향을 받고 있다는 것을 나타내고 있다. 이와 같은 다변수 모델구조를 고려한 것은 증기발생량 모델규명보다는 배기가스에 대한 모델을 정확히 규명하고자 위함이다. 즉 유해 배기가스 성분들은 물리·화학적으로 서로 깊은 상관관계를 가지며, 동시에 소각로 연소실 온도와도 밀접한 관계를 가지므로 독립적으로 고려하기는 무리가 있다고 할 수 있다.

다음 절에서 기술될 각 출력변수의 ARX 규명모델의 차수는 1차에서 3차 정도이며, 각 입력변수에 대한 파라미터 개수 b_{ij}는 각각 10개 전 후이고, 출력변수에 대한 파라미터 a_{ij} 개수는 0~2개, 각각 입출력 데이터간의 시간지연은 대략 샘플링주기의 1배 내지 2배 크기 사이의 값으로 결정하였다. 또한 각 규명결과는 평균값에 대한 변동치를 나타내고 있으며, 규명오차는 절대값을 나타내고 있다. 그리고 규명모델을 검증을 위해서는 AIC(Akaike's Information Criterion)법을 적용하였으며, 대체적으로 AIC값이 매우 작아 모델이 양호하게 규명되었음을 알 수 있다. 다음 절에서는 각 입출력변수들에 규명결과들을 나타내고 그 특성을 고찰하기로 한다.

2. 모델규명 결과 및 고찰

2.1. 증기발생량 모델 규명

그림 12와 13은 각각 보일러의 증기발생량에 대한 규명결과와 규명오차를 나타내며, 그림에서 실선과 점선은 각각 측정 데이터와 규명모델의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 매우 양호한 규명결과를 보이고 있으며, 규명오차는 약 ±2(t/h)(평균치=25.3t/h에 대하여 약 8%)의 범위내에 포함되고 있음을 알 수 있다. 그리고 현재시각의 증기발생량은 과거의 출력에 영향을 받지 않고 단지 과거의 입력들, 약 샘플링주기 15번째까지의 입력들에만 크게 영향을 받으며, 입출력 변수간의 시간지연은 약 샘플링주기의 2배에 해당하는 크기를 가진다. 특히 입출력간의 시간지연이 그다지 크지 않고, 대체적으로 쓰레기 투입량에 많이 의존하는 특성을 보이고 있다는 사실이다. 그리고 5, 6번 롤러 그레이트 하부의 1, 2차 연소공기량과는 그다지 밀접한 관계가 없음을 알 수 있다.

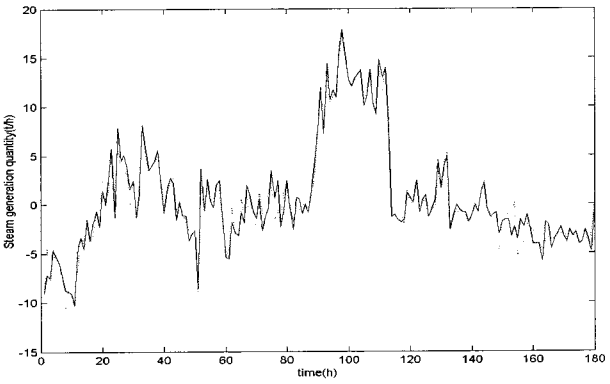


그림 12. 증기발생량 규명(평균값=25.3t/h).
Fig. 12. Identification of steam generation quantity(mean value=25.3t/h).

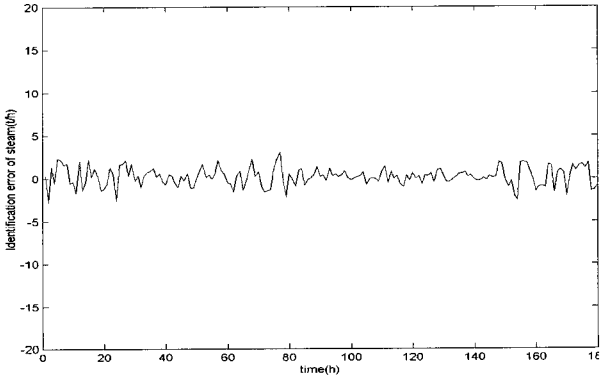


그림 13. 증기발생량 규명 오차.
Fig. 13. Identification error of steam generation.

2.2. 보일러 출구 산소 모델규명

그림 14와 15는 각각 보일러 출구에서의 산소 발생량에 대한 모델규명과 규명오차를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 매우 양호한 규명결과를 보이고 있으며, 규명오차는 약 ±1(%)(평균치 9.1%에 대하여 약 11%)의 범위 내로 억제되고 있어, 전체 영역에서 안정된 규명결과를 보이고 있다. 결과적으로 산소 발생량에 소각로 연소실온도와 일산화탄소량이 미치는 영향이 충분히 고려되었음을 알 수 있다. 향후 이 사실에 대해서는 명확한 이론적 해석이 필요하리라 사료된다.

2.3. 보일러 출구 일산화탄소 모델규명

그림 16과 17은 각각 보일러 출구에서의 일산화탄소 발생량에 대한 모델규명과 규명오차를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 대체적으로 양호한 규명결과를 보이고 있으며, 규명오차는 약 ±5(ppm)(평균치 9.34ppm에 대하여 약 45%)의 범위 내에서 발생함을 알 수 있다. 다소 규명오차가 크다고 할 수 있는데, 이는 모델구조의 불완전함과 산소량과 연소실 온도 등의 다른 출력변수와 상관관계가 존재함으로 생기는 것으로 사료된다. 규명모델의 차수는 산소 발생량 모델과 거의 동일하지만, 입출력간에 존재하는 시간지연이 산소 발생량 모델보다는 짧다는 것이 특징적이다. 특히 쓰레기 투입량과 램 피더 속도와의 시간지연은 다른 모델보다 짧다는 것을 알 수 있었다.

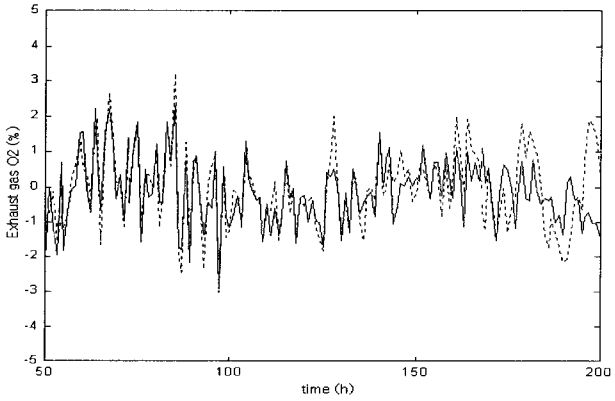


그림 14. 보일러 출구 산소량 규명(평균=9.1%).

Fig. 14. Identification of O_2 from boiler outlet(mean value =9.1%).

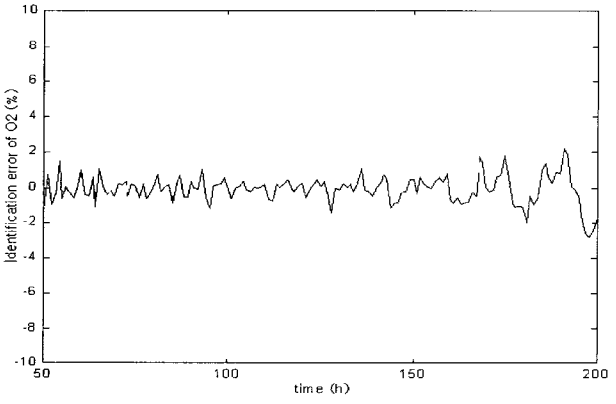


그림 15. 보일러 출구 산소량 규명오차.

Fig. 15. Identification error of O_2 from boiler outlet.

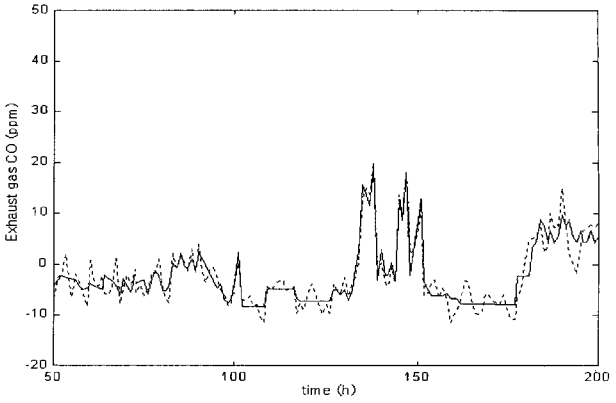


그림 16. 일산화탄소량 규명(평균=9.34ppm)

Fig. 16. Identification of CO from boiler outlet(mean value =9.34ppm)

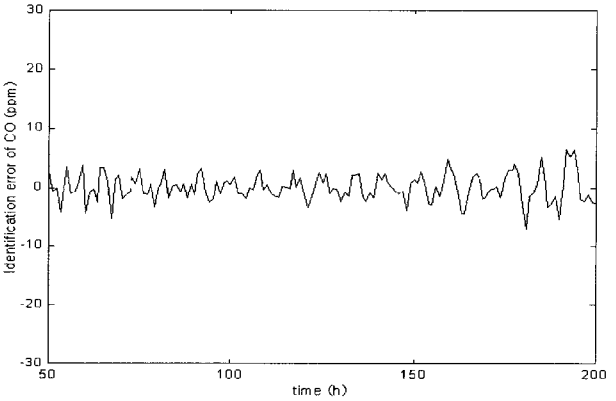


그림 17. 일산화탄소량 규명 오차.

Fig. 17. Identification error of CO from boiler outlet.

2.4. 그 밖의 유해 배기가스 성분 모델

그림 18과 19는 각각 보일러 출구의 질소산화물, 황산화물에 관한 규명결과를 나타내고 있다. 규명오차는 각각 다음과 같다. 질소산화물 규명오차는 ±20(ppm)(평균=37.5ppm의 약 ±50%), 황산화물 규명오차는 ±15(ppm)(평균=42.6ppm의 약 ±35%)이다. 모델구조를 앞의 규명모델 결과와 거의 유사하게 설정하였으나, 대체적으로 규명오차가 크게 발생하였다. 이는 모델구조 선정의 부족함에서 기인되는 것으로 판단되며, 향후 모델구조에 관한 이론적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 지금까지 표 1에 주어진 출력변수에 대한 소각로 연소모델의 규명결과를 고찰하였다. 단 보일러 출구의 검뎅과 연소실 온도에 관한 규명 결과는 지면 관계상 생략하기로 한다.

지금까지의 규명결과에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 양호한 규명결과를 보이고 있으며, 특히 증기발생량의 규명모델은 매우 양호한 결과임을 알 수 있었다. 반면에 유해 배기가스 성분모델에 대한 결과는 아직 충분하다고 할 수 없으며, 이에 대하여 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 앞에서 언급한 바와 같이 모델구조의 적절한 선정과 다른 출력변수와의 상관관계에 대한 이론적인 연구와 또한 각 롤러 그레이트의 속도나 하부 공급 1차 연소공기량에 대한 명확한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

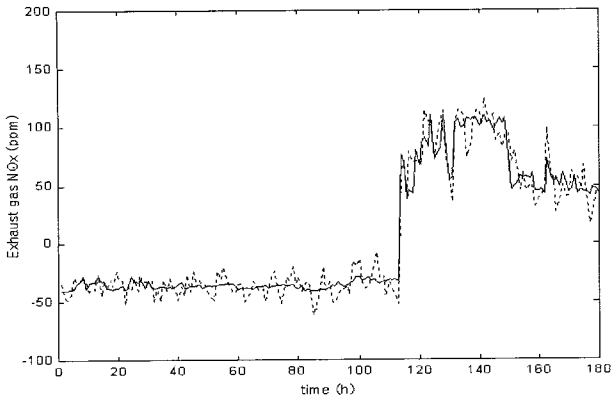


그림 18. 질소산화물 규명모델(평균=37.5ppm).
Fig. 18. Identification of NO_x from boiler outlet(mean value =37.5ppm).

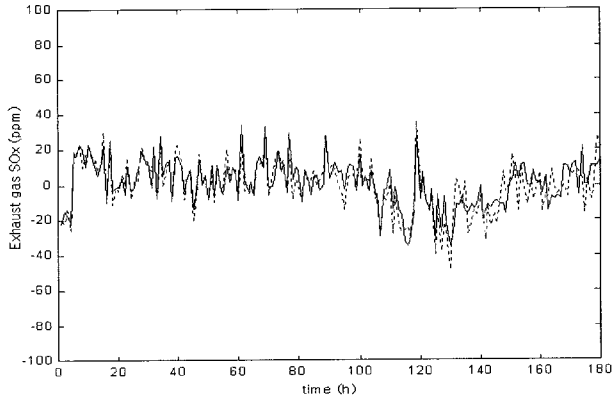


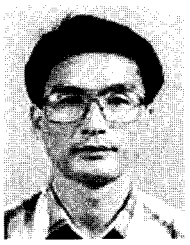
그림 19. 황산화물 규명(평균=42.6ppm).
Fig. 19. Identification of SO_x from boiler outlet(mean value =42.6ppm).

Ⅳ. 결론

이 논문에서는 스토커식 쓰레기 소각로의 자동연소 제어 시스템 설계를 위한 선형 제어모델 규명에 관한 연구를 수행하였다. 소각로의 연소모델을 규명하는데 있어 최소자승법에 기초한 보조변수 모델규명 알고리듬의 유용성 확인을 확인할 수 있었다. 그리고 증기발생량 및 유해 배기가스 성분 규명모델은 자동 제어시스템 설계 적합한 형태로 규명되었음을 알 수 있다. 그리고 규명오차로 발생된 모델링 오차의 불확실성을 고려한 견실 제어기 설계를 통하여 규명모델의 유용성을 확인하는 것이 이 논문의 향후 연구과제이다.

참 고 문 헌

[1] Karl J. Thome-Kozmiensky, "화격자 소각로를 설계하기 위한 기초," 환경기술, pp. 22-26, 1995.
[2] 최상민, 김성중, 김승기, 유영돈, "소각로 개발 관련 연구," 대한기계학회지, 제34권, 제8호, pp. 632-642, 1994.
[3] 손진영,"폐기물 처리용 소각로 설계기술의 현황," 대한기계학회지, 제36권, 제12호, pp. 1120-1134, 1996.
[4] J.B. Howard, "Combustion of solid refuse," *ASME. Winter Annual Meeting and Energy System Exposition,* N.Y, Dec1-5, pp. 85-102, 1968.
[5] S. Ahmed, R. Kumer and J.E. Helt, "Combustion products kinetics model," *CONF-8806176-4,* DOE Thermochemical Conversion Review Meeting, 1988.
[6] W.R. Nissen, "Combustion and incineration process," *Marcel Dekker, Inc.,* 1995.
[7] 박상일, 박영재, "로타리 킬른형 도시쓰레기 소각로의 전열해석," 대한기계학회논문집, vol. 15, no. 6, pp. 2100-2108, 1991.
[8] 엄태인, 장동순, 채재우, "로타리 킬른 소각로 고도 설계를 위한 연구 Ⅱ : Dow chemical 소각로 운전 변수 심층 수치분석," 한국폐기물학회, vol. 10, no. 1, pp. 9-23, 1993.
[9] 김형래, 유영돈, 최상림, "도시폐기물 연소상의 단순다단계 모델," 한국폐기물학회, vol. 11, no. 4, pp. 526-533, 1994.
[10] 황이철, 전충환, 이진걸, "쓰레기 소각플랜트의 상태공간모델 규명에 관한 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제3호, pp. 354-362, 2000.
[11] 片山 徹, "システム同定入門," 朝倉書店, 東京, 1994.



황 이 철

1961년 10월 28일생. 1987년 부산대학교 기계설계공학과 졸업(공학사). 1991년 동 대학원 기계설계공학과 졸업(공학석사). 1996년 일본 오사카대 전자제어기계공학과 졸업(공학박사). 1986년~1988년 삼성중공업 근무. 1996년~1998년 부산대학교 기계공학부 국책교수. 1998년 3월~현재 동의대학교 메카트로닉스공학과(전공) 교수. 관심분야는 견실제어, 모델규명, 모델근사화 등의 시스템 제어이론, 메카트로닉스 시스템 설계.