

# 소각로의 NO<sub>x</sub> 제어용 SCR 시스템의 암모니아 공급량제어

김인규\* · 여태경\* · 김환성\*\*\* · 김상봉\*\*\*

(1997년 8월 11일 접수)

## Ammonia Flow Control for NO<sub>x</sub> Reduction in SCR System of Refuse Incineration Plant

I. K. Kim, T. K. Yo, H. S. Kim and S. B. Kim

**Key Words :** Selective Catalytic Reduction(SCR : 촉매환원법), Auto Regressive Exogeneous Model(ARX : 자동회귀모델), White Noise Input(백색잡음 입력), Outlet NO<sub>x</sub> (출구측 질소산화물), PID Control(PID 제어)

### Abstract

This paper describes a modelling method for SCR(selective catalytic reduction) system in refuse incineration plant. We consider the SCR system as a single input and single output system. For modelling the SCR system, an auto regressive exogeneous(ARX) modelling method is used. In this case, we should design the white noise input for modelling and put it on the system as an input(NH<sub>3</sub>), and take an outlet NO<sub>x</sub> as an output. From these two relations, we design the ARX model with 45 second delay time and transform to a discrete system with sampling time of 0.5 second. Using the obtained SCR model, we verify that the outlet NO<sub>x</sub> is deeply related with stoker's moving in boiler of refuse incineration plant.

### 1. 서 론

수질오염, 대기오염, 소음공해, 해양오염 뿐만 아니라 급속한 경제성장과 더불어 국민의 생활수준 향상, 도시의 인구증가 등으로 인하여 쓰레기의 양이 급속하게 증가되어 도시 생활쓰레기의 적절한 처리방안에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다. 지금까지 대부분의 생활쓰레기를 매립에 의존해 왔으나, 매립지의 부족과 확보의 어려움으로 인하여 정부에서는 선진외국에서 널리 쓰이고 있는 쓰레기 소각방식을 도입하여 쓰레기의 소각률을 1997년까

지 20%, 2001년까지 30%, 2005년까지 50%를 확보하기 위하여 도시지역에 대규모 쓰레기 소각장을 설치할 계획을 세우고 있다.

그러나, 사회적으로 님비(not in my backyard) 현상의 확대로 해당지역 주민들은 혐오시설이 들어서는 것에 대한 강한 반대와 더불어, 소각장을 운영함으로써 발생하는 2차적인 환경오염인자에 의해 주변환경이 나빠진다는 인식이 깊이 심어져 있다. 따라서, 쓰레기 소각로의 소각처리 공정에 고도의 제어기술을 적용하여 시스템의 안정화와 처리의 효율을 높임으로서 2차적인 환경오염인자에 대한 인식을 개선하고 신뢰성을 향상시켜 많은 소각장의 유치를 가능하게 하는 것이 당면한 문제이다.

현재까지의 소각로제어에 관한 연구로서는 퍼지 제어에 의한 연소제어<sup>(1)</sup> 및 퍼지-뉴로제어를 이용

\*부경대학교 대학원

\*\*회원, 부경대학교 해양산업개발연구소

\*\*\*회원, 부경대학교 기계공학과

한 효율적인 연소제어<sup>(2,3)</sup> 등 연소에 관한 제어와 동적 모델법을 이용한 소각로의 모델화법 및 이를 이용한 시뮬레이터의 개발<sup>(4,5)</sup>에 관한 연구만이 행해지고 있다.

그러나, 최근 소각처리 시스템에서 다이옥신이라는 물질이 문제시 되면서, 소각장에서 배가스 처리 공정이 더욱 중요시되고 있다. 이들 처리 시스템 중 질소산화물(NOx)의 제거설비로서, SCR 반응탑에서 반응탑 내부를 통과하는 배가스 중의 NOx 성분을 환원·반응시켜 질소와 수분으로 전환시키는데 필요한 NH<sub>3</sub>량을 제어하는 방법이 논의되고 있으나, 정확한 NH<sub>3</sub>량을 제어하는 데는 어려움이 있다.<sup>(6,7)</sup> 이는 NOx 문제를 연소문제를 통해 해결하려고 하였을뿐, 발생된 배가스를 처리하는 후처리 공정에 관한 연구는 거의 진행되지 않았기 때문이다. 또한, SCR 시스템은 화학반응 공정을 포함하고 있으므로, 비선형성에 의해 지배를 받기 때문에 선형화에 의한 모델화가 불가능하고, 또한 모델 오차가 커지게 되기 때문에 정확한 모델을 얻는 것이 곤란하다.

따라서, 본 논문에서는 SCR 시스템의 모델링에 관한 연구로서 ARX(Auto Regressive eXogeneous) 법에 이용하여 SCR 시스템의 모델을 세우며, 모델에 의해서 NOx 발생에 관해 해석하기로 한다. 주 결과로서는, 굴뚝 출구측으로 배출되는 NOx 성분은 보일러의 쓰레기의 운반을 담당하는 화격자(stoker)의 이동에 깊이 관계하고 있는 것을 밝히며, 본 모델을 기초로 하여 NOx 제거를 위한 제어 알고리즘의 개발에 기초 자료가 되고자 한다.

## 2. SCR 시스템의 개요

도시 쓰레기 소각플랜트는 시민생활로부터 배출되고 있는 각종의 폐기물을 소각 처리하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 질소산화물(이하 NOx라 부른다)은 소각과정에서 발생하여 굴뚝으로부터 대기 중으로 배출되는데, 국내외 환경보호법령에 따르면 각 지방자치단체마다 소각로 건설시 자체적으로 기준을 강화하고 있는 실정이다. 부산광역시에서는 본 소각 플랜트 설계기준으로 50 ppm 이하로 설정하고 있다.<sup>(6,7)</sup>

도시 쓰레기 소각처리공정은 크게 ① 쓰레기 공급공정, ② 소각공정, ③ 세탄출공정, ④ 연소가스 냉각공정, ⑤ 연소가스 처리공정으로 나눌 수 있으

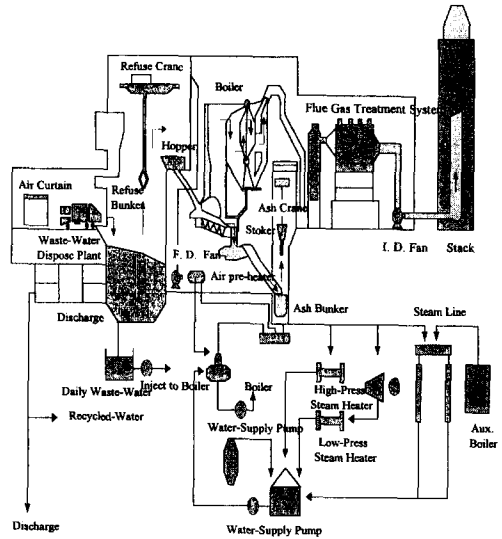


Fig. 1 Generalized model of incineration plant.

며, 이에 대한 일반적인 모델은 Fig.1과 같이 나타난다.

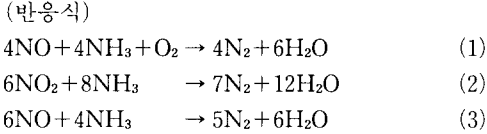
배가스 중의 NO<sub>x</sub> 성분을 저감시키기 위해서는, 2단 연소에 맞는 설계 및 연소의 자동화, 저 NO<sub>x</sub> 발생 Burner의 채택, 연소실 온도를 물분무 등에 의해 낮추는 법, 배기가스를 소각로내로 재순환하는 법 등의 방법이 채택되기도 하지만, 근래에는 보다 적극적으로 발생된 NO<sub>x</sub>를 제거하는 방법을 적용하고 있다.

NO<sub>x</sub> 제거방법은 촉매환원법(SCR)과 무촉매환원법(SNCR)으로 구분되는데, 모두 암모니아와 NO<sub>x</sub>와의 반응이 기본이며, 촉매환원법은 비교적 낮은 온도(210~350℃)에서 촉매를 이용한 반응이고, 무촉매환원법은 온도 700℃ 이상(보통 800~900℃)에서 촉매없이 반응시키는 방법이다.

NO<sub>x</sub>를 환원시켜 무해한 질소, 수분으로 전환시킬 때 있어서는 일산화탄소(CO), 수소(H<sub>2</sub>), 암모니아(NH<sub>3</sub>) 등 환원성 가스가 고려되겠지만, CO, H<sub>2</sub> 등은 고온에서 특히 산소(O<sub>2</sub>)가 존재하는 분위기에서 NO<sub>x</sub>와 반응하기보다는 산소와의 반응이 더 빨리 진행되기 때문에 선택성이 없다. 그러나 암모니아는 그와 같은 분위기에서도 선택적으로 NO<sub>x</sub>와 반응하여 환원시키는 능력이 있다는 사실에 입각하여 선택적 촉매환원법이 개발되었다.

따라서, 촉매환원법은 연소 배기가스중에 암모니아가스, 암모니아수 등 이미노기(NH<sub>2</sub>)를 함유하고 있는 환원제를 첨가하여 촉매층상에서 다음식과

같은 반응을 유도하여 무해한 N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 분해 제거하는 방법이다.<sup>(7)</sup>



쓰레기 소각로의 경우에 발생 NOx의 95% 정도가 NO 이고, 나머지 5% 정도가 NO<sub>2</sub> 인 점과 O<sub>2</sub> 가 존재하는 분위기에서 탈질반응이 진행된다는 점에서 (1)식이 지배적이라고 생각된다. 따라서, 이론적으로는 모니아와 NOx의 등몰반응(equal molarity reaction)으로 탈질반응이 진행된다고 말할 수 있다.

Fig. 2는 본 논문에서 모델로 한 SCR 시스템으로, 소각과정에서 발생된 850°C 이상의 연소공기는 연소가스 냉각공정(폐열보일러, 절탄기)과 연소가스 처리공정(습식 세정탑)을 거치면서 70°C 정도로 온도가 낮추어진다. 이 연소공기를 SCR 반응탑에서 암모니아와 연소가스중의 NOx 성분과 환원반응하기 위한 적정온도인 320°C 까지 승온시켜 주기 위한 설비로서 GAS/ GAS/Heater, Burner가 있으며, 이 승온설비에 의해 승온된 연소가스는 암모니아 공급설비(저장탱크, 주입펌프, 증발기, 회석용 Fan)에 의해 SCR 반응탑으로 공급된 암모니아와 반응하여 NOx, 다이옥신 성분이 제거되어진다. 그리고, SCR 입구측의 NOx Analyzer, SCR 출구측

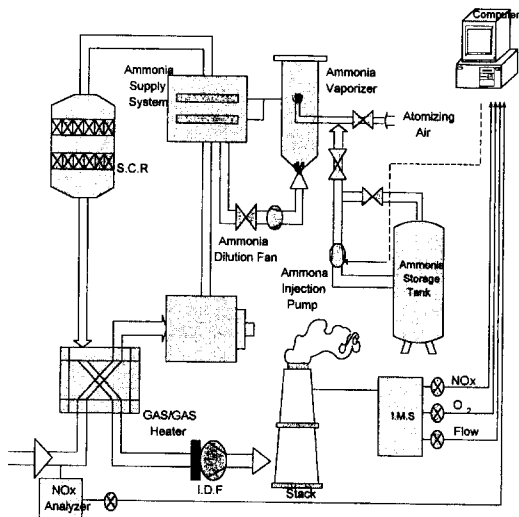


Fig. 2 SCR system.

의 배출가스측정장치(TMS), 주입펌프의 서보유니트, 인버터, Position Setter, Controller 등에 의해 NOx 성분이 계측되고 암모니아 주입량이 제어되는 시스템이다.

### 3. SCR 시스템의 모델링

제 2절에서는 SCR 시스템의 기본 개념과 선택적 촉매환원법에 의거한 NOx제거법에 대해 설명하였으나, 실제 쓰레기 소각과정중에서는 ① 연소 상황변동에 의한 NOx 변동, ② NOx 변동에 따른 암모니아수의 적절한 공급, ③ SCR 시스템의 암모니아수 공급의 시간지연, ④ 화학반응시간 조건의 변동, ⑤ 굴뚝 출구측의 NOx의 시간지연 등으로 인하여 출구측의 NOx치를 기준 NOx치로 저감시키기 위한 정확한 암모니아수의 공급을 예측할 수 없다. 이러한 문제점에 근거로 하여, 본 논문에서는 SCR 시스템의 모델링에 관한 연구에 중점을 두고자 한다.

#### 3.1 ARX법에 의한 SCR 시스템의 동정법

다음과 같이 SCR 시스템을 입력과 출력을 갖는 블랙박스로서 고려하자. (Fig. 3 참조)

위의 블랙박스를 기지의 입력에 대하여 센서로부터 얻어진 출력을 통하여 수식화하는 방법로서는, 스텝응답에 의한 동정법, 주파수영역에서의 동정법, ARX법에 의한 동정법 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 ARX법에 의한 동정법을 이용하기로 한다.

먼저, ARX모델은 다음 식으로 나타내어진다.<sup>(3)</sup>

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k) \quad (4)$$

여기서,

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + b_{na}q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nb}q^{-nb}$$

윗식에서 ARX 모델의 계수를 구하는 것을 시스템의 동정이라 한다.

시스템의 입력  $u(k)$ 을 인가하여 이로부터 얻어진 시스템 출력  $y(k)$ 로부터 ARX 모델의 다항식

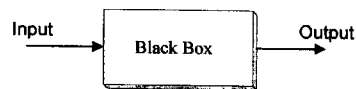


Fig. 3 Description of system.

$A(q^{-1})$ 와  $B(q^{-1})$ 의 계수를 구하기 위해서는 시스템의 입력은 주기성을 지니지 않아야 한다. 즉, 백색잡음(white noise) 형태의 입력을 인가하여야 한다. 그러나 이상적인 백색잡음은 실현 불가능하므로 인위적인 규칙에 따라 생성된 불규칙 신호를 이용하여야 하며, 이러한 불규칙 신호를 얻기 위해서는 널리 이용되고 있는 M계열(Maximum-length linear shift register sequence 혹은 M sequence)이 이용되고 있다. M계열의 자기상관함수는  $\delta$ 함수에 근접되어, 근사적 백색잡음으로 간주하여 제어·계측분야에 이용되고 있다. 여기서, 주기가  $N$ 인 M계열을 만들려고 한다면, shift register의 갯수를  $n$ 으로 할 때 주기는  $N=2^n-1$ 으로 된다. 또한 다음의 기약다항식(irreducible polynomial) 표현을 이용한다면,

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i = 1 + a_1 x + \dots + a_n x^n = 0 \quad (5)$$

또는

$$\sum_{i=0}^n a_i x_{k-i} = 0 \quad (6)$$

으로 되며, 다음 식이

$$x_n = a_1 x_{k-1} \oplus a_2 x_{k-2} \oplus \dots \oplus a_n x_{k-n} \quad (7)$$

으로, M계열을 생성하는 식이 된다. 여기서  $\oplus$ 는 2진수의 배타적 논리합을 나타낸다. 위의 M계열

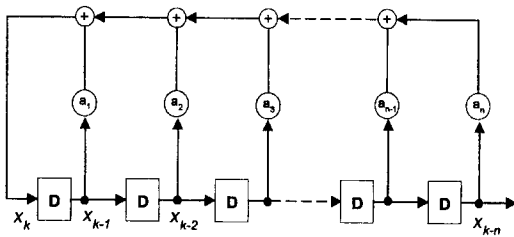


Fig. 4 Generating circuit for M sequence.

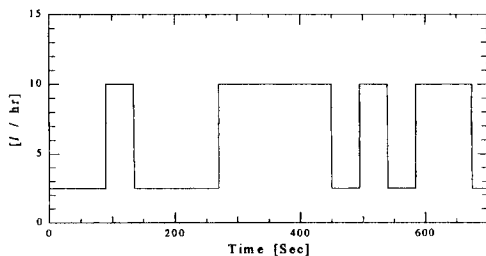


Fig. 5 White noise input pattern.

발생회로는 다음과 같다.

이때, Fig. 4에 의해 구해진 백색잡음 입력은 Fig. 5와 같다.

여기서, M계열 신호를 시스템의 입력으로 인가할 때 M계열의 갯수와 시스템의 샘플링주기 결정은 중요한 문제가 되는데, SCR 시스템에서 M계열 갯수는  $N=64$ 로 하였으며, 시스템의 샘플링주기는 스텝응답으로부터

$$\frac{1}{15} T_{95} \leq T \leq \frac{1}{4} T_{95}$$

가 되도록 정하였다. 이때,  $T_{95}$ 는 스텝응답의 95% 도달시간을 나타낸다. 그러나, 본 논문에서는 화격자의 이동특성을 고려하기 위해 샘플링주기는 0.5초로 비교적 짧게 선택하였다.

### 3.2 SCR 시스템의 데이터측정 및 모델링

Fig. 5의 백색잡음 입력으로서  $NH_3$ 을 SCR 시스템의 입력으로 하여 굴뚝 출구측의  $NO_x$  데이터를 구하여, 이로부터 시스템을 동정하는 방법에 대해 고려하자. 이때 얻어진 출력  $NO_x$  데이터는 Fig. 6과 같다. 여기서, 백색잡음 입력주기는 90초로 하였다.

위의 백색잡음형의  $NH_3$  입력에 대한 SCR 시스템의 굴뚝 출구측  $NO_x$ 량의 데이터로부터 MATLAB Identification Toolbox<sup>(9)</sup>를 이용하여 동정을 수행하였다. 동정을 수행할 때, SCR 시스템의 특성상 출력지연시간은 45초로 하고, 동정 모델차수를  $na=91$ ,  $nb=79$ 로 정하였다. ARX 동정법에 의해 구해진 모델을 바탕으로 MATLAB을 이용하여 이산계 시스템으로 변환한 결과 다음과 같이 표현된다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (8a)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (8b)$$

여기서, 동정된 SCR 모델의 차수는 108이며, 시

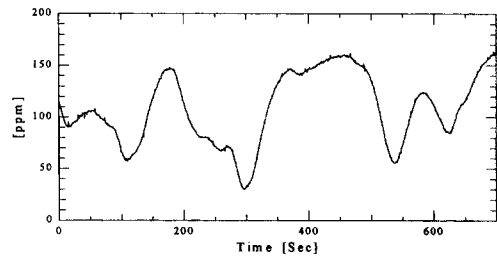


Fig. 6 Outlet  $NO_x$  by white noise input.

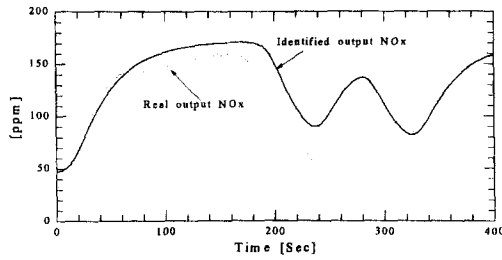


Fig. 7 Simulation result of identified SCR model.

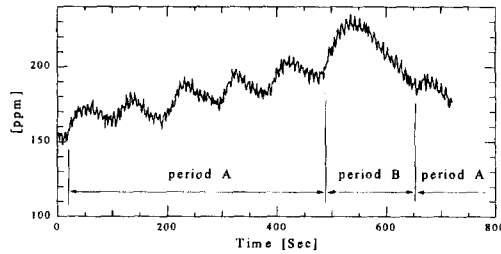


Fig. 8 Inlet NOx by stoker moving pattern.

시스템의 고유치는 부록으로서 나타낸다.

ARX법에 의해 구해진 SCR 시스템의 모델의 유효성을 확인하기 위해 동일한 입력을 모델에 가하여 시뮬레이션을 행하여 보았다. 이때, SCR 동정 모델에 의한 시뮬레이션결과는 Fig. 7과 같이 나타낸다.

동정된 모델에 의한 시뮬레이션결과, 동정모델과 실제 시스템 사이에는 다소 오차가 존재하나, 이는 시스템의 비선형성과 입구측의 NOx량을 시스템의 섭동으로 고려하여 동정한 것에 기인한다. 또한, 입구측의 NOx에 대해 살펴보면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서는 A구간과 B구간으로 나뉘고 있다. 위의 두 구간을 근거로 하여 보일러의 화격자(stoker) 사이클과 입구측의 NOx치를 분석하여 보면, A구간과 같이 일정주기로 발생하는 곳은 화격자가 왕복운동을 하는 구간이며, B구간은 스팀 발생량이 23000 kg/hr 이상으로 증가되어 화격자가 정지되고 있는 구간으로 스팀이 23000 kg/hr 이하로 감소되면 다시 A구간과 같이 왕복운동을 행하는 것을 보여주고 있다.

#### 4. SCR 시스템 모델에 기초한 PID 제어

3절에서 구한 SCR 시스템의 모델은 차수가 큰 관계로 저차원화의 방법 및 다변수 제어이론에 의한 제어기 설계법을 고려할 수 있으나, 차후 연구

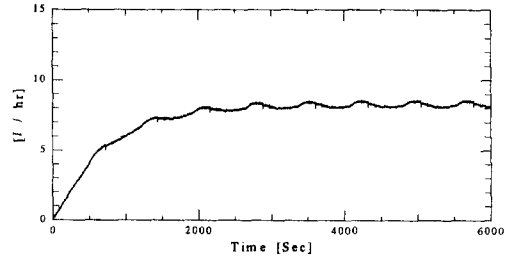


Fig. 9 NH<sub>3</sub> input by PID controller.

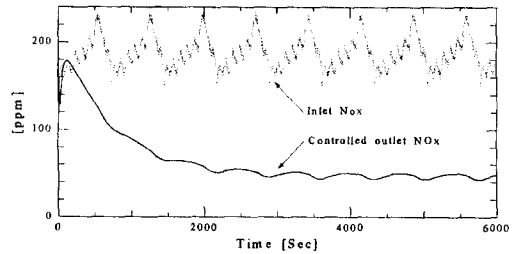


Fig. 10 Inlet NOx and controlled outlet NOx.

과제로 남겨둔다. 또한, 소각 조건 및 연소성능에 따라 입구측의 NOx량은 3절에서 논한 바와 같이 크게 변동하나 대체적으로 주기성을 띄고 있으므로, 이를 고려한 제어계 설계법도 차후 중요한 과제가 될 것이다.

본 절에서는 간단하게 PID 제어를 통해 SCR의 일정 NOx량 제어에 대해 검토하고자 한다. 입력측의 NOx량은 보일러의 화격자의 계속되는 왕복운동에 의해 입력측의 NOx량이 Fig. 8과 같이 된다고 볼 수 있으므로, 이러한 입력측의 NOx량에 대해 PID 제어를 행한다. 이 때 샘플링주기는 0.5 초로 정하였으며, PID 제어입력은 다음과 같이 한다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

여기서,  $e(t)$ 는 목표 NOx치와 출구측의 출력 NOx치에 대한 편차를 나타내며, PID 계인은  $K_p = 0.008$ ,  $K_I = 0.00015$ ,  $K_D = 0.06$ 으로 설정하였다. 이때, 목표치는 45 ppm으로 설정하였다. PID 제어 결과는 Figs. 9, 10에 각각 입력과 출력값을 보이고 있다.

출구측의 NOx량은 40~50 ppm으로 만족할만한 수준으로 제어되고 있으나, 맥동형으로 되고 있으므로 이는 입구측의 NOx량 변동과 관계되고 있음을 알 수 있다. 이러한 맥동을 줄이기 위해서는 입

력 NOx량 패턴을 고려한 제어알고리즘 및 강인성 이론에 근거한 제어기 설계가 요구된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 부산광역시 해운대 신시가 시내에 위치한 쓰레기 소각로의 연소가스 처리설비중 질소산화물(NOx)의 제거설비인 SCR 시스템을 ARX 모델법을 바탕으로 한 동정법을 제시하였고, 얻어진 모델을 바탕으로 입구측 NOx 변동은 화격자의 이동 패턴에 깊은 관계가 있음을 확인하였다.

차후의 연구과제로서는, 다변수 제어이론을 바탕으로 한 제어알고리즘의 개발과 더불어 시간지연 시스템에 대한 안정성에 대한 검토가 필요하다고 사료된다.

## 후 기

본 연구는 1997년 부경대학교 해양산업개발연구소의 Post-Doc. 연구지원에 의해 수행된 연구결과 의 일부임을 밝혀두며, 관계자 여러분께 감사의 뜻을 포함합니다.

## 참고문헌

(1) Ono H., etc., 1989, "Combustion Control of

Refuse Incineration Plant by Fuzzy Logic," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 32, pp. 193~206.

(2) Krause B., etc., 1994, "A Neuro-Fuzzy Adaptive Control Strategy for Refuse Incineration Plants," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 63, pp. 329~338.

(3) 방종진, 강신준, 이병진, 우방광, 1996, "쓰레기 소각로의 효율적인 연소제어를 위한 적응 퍼지모델 예측제어기 설계," 한국자동제어학술대회, pp. 134~137.

(4) Miyamoto, Y., etc., 1997, "Development of Simulator for Refuse Incineration Plants," *The Society of Inst. and Cont. Engineers*, pp. 1049~1052, Japan.

(5) Miyamoto, Y., etc., 1

997, "Development of Operation Support System for Refuse Incineration Plant," *The Society of Inst. and Cont. Engineers*, pp. 1053~1056, Japan.

(6) 환경관리공단, 1994, "도시 쓰레기 소각처리시설 운영관리 지침서"

(7) 신생플랜트, 1996, "부산 해운대 소각로 시운전 조작 설명서," 삼성건설.

(8) 足立修一, 1993, "ユーザのためのシステム同定理論," 社団法人計測自動制御學會.

(9) 1991, "System Identification Toolbox user's Guide," The Math Works, Inc.

## 부 록

### A. SCR 시스템의 고유치

$$\lambda_i = \{ -9.7984166e-001, -9.7523123e-001, -9.7523123e-001, -9.6870350e-001, \\ -9.6870350e-001, -9.6988378e-001, -9.6988378e-001, -9.3757064e-001, \\ -9.3757064e-001, -9.1331749e-001, -9.1331749e-001, -8.9282154e-001, \\ -8.9282154e-001, -8.4318514e-001, -8.4318514e-001, -8.3851982e-001, \\ -8.3851982e-001, -8.0155368e-001, -8.0155368e-001, -7.6424405e-001, \\ -7.6424405e-001, -7.0568403e-001, -7.0568403e-001, -6.6303555e-001, \\ -6.6303555e-001, -5.7986898e-001, -5.7986898e-001, -5.3115374e-001, \\ -5.3115374e-001, -4.8387688e-001, -4.8387688e-001, -4.2953298e-001, \\ -4.2953298e-001, -3.1998591e-001, -3.1998591e-001, -3.0252855e-001, \\ -3.0252855e-001, -2.3708120e-001, -2.3708120e-001, -1.4716964e-001, \\ -1.4716964e-001, -8.9729302e-002, -8.9729302e-002, -1.3276698e-002, \\ -1.3276698e-002, 8.6554690e-002, 8.6554690e-002, 1.3427995e-001, \\ 1.3427995e-001, 2.2727911e-001, 2.2727911e-001, 3.1464314e-001, \}$$

3.1464314e-001,	2.1866446e-001,	2.1866446e-001,	3.9186721e-001,
3.9186721e-001,	4.5242846e-001,	4.5242846e-001,	4.9787294e-001,
4.9787294e-001,	5.7043591e-001,	5.7043591e-001,	6.3258055e-001,
6.3258055e-001,	6.7930900e-001,	6.7930900e-001,	7.5800216e-001,
7.5800216e-001,	9.9069213e-001,	9.9069213e-001,	9.8196880e-001,
9.8196880e-001,	9.8207686e-001,	9.8207686e-001,	9.5900707e-001,
9.5900707e-001,	9.4360044e-001,	9.4360044e-001,	9.1635197e-001,
9.1635197e-001,	8.0552958e-001,	8.0552958e-001,	8.0259263e-001,
8.0259263e-001,	8.6595276e-001,	8.6595276e-001,	7.9494978e-001,
7.9494978e-001,	1.3781286e-001,	1.3781286e-001,	0.0000000e+000,
0.0000000e+000,	0.0000000e+000,	0.0000000e+000,	0.0000000e+000,
0.0000000e+000,	0.0000000e+000,	0.0000000e+000,	0.0000000e+000,
0.0000000e+000,	0.0000000e+000,	0.0000000e+000,	0.0000000e+000,
0.0000000e+000,	0.0000000e+000,	0.0000000e+000,	0.0000000e+000 }