

991

소각로의 NOx제어용 SCR시스템의 암모니아 공급량 제어

- 모델링을 중심으로 -

Ammonia Flow Control for NOx Reduction in SCR(Selective Catalytic Reduction) System of Refuse Incineration Plant

김 인규*, 여 태경**, 김 환성***, 김 상봉***

In Kyu Kim*, Tae Kyung Yo**, Hwan Seong Kim***, Sang Bong Kim***

* 부경대학교 산업대학원 기계공학과, ** 부경대학교 기계공학과 학부과정, *** 부경대학교 기계공학과

Tel : (051) 620-6457, Fax : (051) 621-1411, E-mail : memcl@dolphin.pknu.ac.kr

ABSTRACT

This paper describe a modelling method for SCR(selective catalytic reduction) system in refuse incineration plant. We consider the SCR system as a single input 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(NH₃), and taken an outlet NOx as an output. From these two relations, we design the ARX model with 45 second delay time and transform to discrete system with 0.5 sampling time. Using the obtained SCR model, we simulate the SCR system to reduce the outlet NOx content by a conventional PID control method.

Key words : SCR(Selective Catalytic Reduction), ARX(Auto Regressive eXogenous)modelling, White Noise Input, Outlet NOx, PID Control

1. 서 론

수질오염, 대기오염, 소음공해, 해양오염 뿐만 아니라 급속한 경제성장과 더불어 국민의 생활수준 향상, 도시의 인구증가 등으로 인하여 쓰레기의 양이 급속하게 증가되어 도시생활쓰레기의 적절한 처리방안에 대한 중요성이 크게 부각되어 지고 있다. 지금까지 대부분의 생활쓰레기를 매립에 의존해 왔으나, 매립지의 부족과 확보에 어려움으로 인하여 정부에서는 선진외국에서 널리 쓰이고 있는 쓰레기 소각 방식에 착안하여 쓰레기의 소각율을 1997년까지 20%, 2001년까지 30%, 2005년까지 50%를 확보하기 위하여 도시지역에 대규모 쓰레기 소각장을 설치할 계획을 세우고 있다.

그러나, 사회적으로 넘비(Not in my backyard)현상의 확대로 해당지역 주민들은 혐오시설이 들어서는 것에 대한 강한 반대와 더불어, 소각장을 운영함으로써 발생하는 2차적인 환경오염인자에 의해 주변 환경이 나빠진다는 인식이 깊이 심어져 있다.

따라서, 쓰레기 소각로의 소각처리 공정에 고도의 제어기술을 적용하여 시스템의 안정화와 처리 효율을 높임으로서 2차적인 환경오염인자에 대한 인식을 개선하고 신뢰성을 향상시켜 많은 소각장의 유치를 가능하게 하는 것이 당면한 문제이다.

소각처리 시스템에서 최근 다이옥신이라는 물질이 문제시 되면서 소각처리공정이 더욱 중요시 되는 배가스 처리 시스템중 질소 산화물(NOx)의 제거 설비인 SCR반응탑에서 반응탑 내부를 통과하는 배가스 중의 NOx성분을 환원반응시켜 질소와 수분으로 전환시키는데 필요한 NH₃량을 제어하는 방법이 논의되고 있으나, 정확한 NH₃량을 제어하는데는 문제가 된다^[1].

본 논문에서는 먼저 SCR 시스템의 모델링에 관한 연구로서 ARX(Auto Regressive eXogeneous)법에 기초하여 SCR 시스템의 모델을 세워, Stack으로 배출되는 배가스중의 NOx성분 및 다이옥신 성분의

제거 효율을 기하는데 최적의 제어 알고리즘의 개발에 기초 자료가 되고자 한다.

2. SCR 시스템의 개요

도시 쓰레기 소각 플랜트는 시민생활로부터 배출되고 있는 각종의 폐기물을 소각처리하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 질소 산화물(이하 NO_x라 부른다)은 소각과정에서 발생하여 연돌로부터 대기중으로 배출되는데, 국내외 환경보호법령에 따르면 각 지방자치단체마다 소각로 건설시 자체적으로 기준을 강화하고 있는 실정이다. 부산 광역시에서는 본 소각 플랜트 설계기준으로 50ppm이하로 설정하고 있으며^[1,2], 소각처리공정의 일반적인 모델은 다음 그림과 같이 나타낸다.

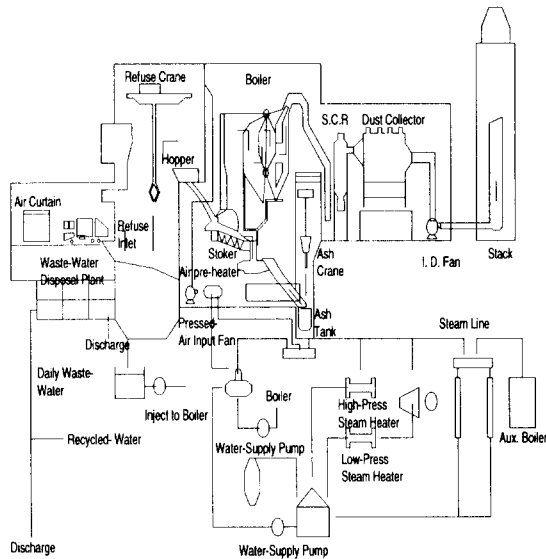


Fig. 1 도시쓰레기 소각처리공정의 일반적인 모델

배가스중의 NO_x성분을 저감시키기 위해서는, 2단 연소에 맞는 설계 및 연소의 자동화, 저 NO_x발생 Burner의 채택, 연소실 온도를 물분무 등에 의해 낮추는 법, 배기 가스를 노내로 재순환하는법 등의 방법이 채택되기도 하지만 근래에는 보다 적극적으로 발생된 NO_x를 제거하는 방법을 적용하고 있다.

NO_x 제거 방법으로는 촉매탈질법(SCR)과 무촉매 탈질법(SNCR)으로 구분되는데 모두 암모니아와 NO_x와의 반응이 기본이며, 촉매 탈질법은 비교적 낮은 온도(210~350℃)에서 촉매를 이용한 반응이고, 무촉매 탈질법은 온도 700℃ 이상(보통800~900℃)에

서 촉매없이 반응시키는 방법이다.

NO_x를 환원시켜 무해한 질소, 수분으로 전환시킴에 있어서는 일산화탄소(CO), 수소(H₂), 암모니아(NH₃)등 환원성 가스가 고려되겠지만, CO, H₂등은 고온에서 특히 산소(O₂)가 존재하는 분위기에서 NO_x와 반응하기 보다는 산소와의 반응이 더 빨리 진행되기 때문에 선택성이 없다. 그러나 암모니아는 그와같은 분위기에서도 선택적으로 NO_x와 반응하여 환원시키는 능력이 있다는 사실에 입각하여 선택적 촉매환원법이 개발되었다.

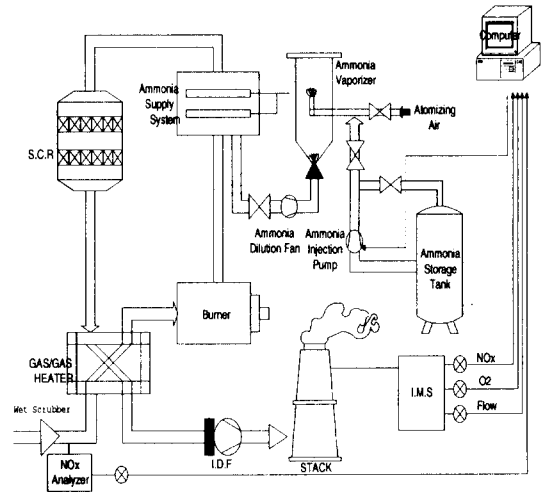
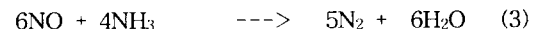
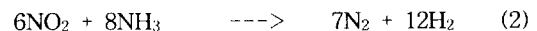


Fig. 2 SCR NO_x 제거 시스템

따라서, 촉매환원법은 연소 배기 가스중에 암모니아가스, 암모니아수등 아미노기(NH₂)를 함유하고 있는 환원제를 첨가하여 촉매층상에서 다음식과 같은 반응을 유도하여 무해한 N₂와 H₂O로 분해제거하는 방법이다^[2].

(반응식)



쓰레기 소각로의 경우 발생 NO_x의 95% 정도가 NO이고, 나머지 5%정도가 NO₂ 인접과 O₂가 존재하는 분위기에서 탈질반응이 진행된다는 점에서 전술(1)식이 지배적이라고 생각된다. 따라서, 이론적으로는 암모니아와 NO_x의 동몰방응(Equal Molarity Reaction)으로 탈질 반응이 진행된다고 말할 수 있다.

3. SCR 시스템의 모델링

제 2절에서는 SCR 시스템의 기본 개념과 선택적 촉매 환원법에 의거한 NOx 제거법에 대해 설명하였으나, 실제 쓰레기 소각과정중에서는 ① 연소상황변동에 의한 NOx 변동, ② NOx 변동에 따른 암모니아수의 적절한 공급, ③ SCR 시스템의 암모니아수 공급의 시간지연, ④ 화학반응시간 조건의 변동, ⑤ Stack측의 NOx의 시간지연 등으로 인하여 기준치 NOx치로 감소시키기 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 시스템은 입력과 출력을 지닌 블랙박스로서 고려하자.

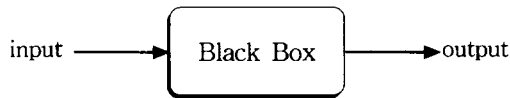


Fig. 3 시스템의 표현

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

먼저, ARX모델은 다음식으로 나타내어진다^[3].

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) \quad (4)$$

여기서,

$$A(q) = 1 + a_1(q)^{-1} + a_2(q)^{-2} + \dots + a_{na}(q)^{-na}$$

$$B(q) = b_1(q)^{-1} + b_2(q)^{-2} + \dots + b_{nb}(q)^{-nb}$$

이며, 위의 ARX모델의 계수를 구하는 것을 시스템의 동정이라 한다. 이때, 시스템의 입력 $u(k)$ 을 인가하여 이로부터 얻어진 시스템 출력 $y(k)$ 로부터 ARX 모델의 다항식 $A(q)$ 와 $B(q)$ 의 계수를 구하기 위해서는 시스템의 입력은 주기성을 지니지 않아야 한다. 즉 백색잡음(White Noise)입력이어야 한다. 그러나 이상적인 백색잡음은 실현불가능하므로 인위적인 규칙에 따라 생성된 불규칙 신호를 이용하여야

한다. 이러한 불규칙 신호를 얻기 위해서는 널리 이용되고 있는 M계열(Maximum-length linear shift register sequence)이 있으며, M계열의 자기상관함수는 δ 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 표현을 이용한다면,

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

의 관계로 되며, 이를 합으로 고치면

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

으로 되며, 다음식이

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

M계열을 생성하는 식이 된다. 여기서 \oplus 는 2진수의 배타적논리합을 나타낸다. 위의 M계열 발생회로는 다음과 같다.

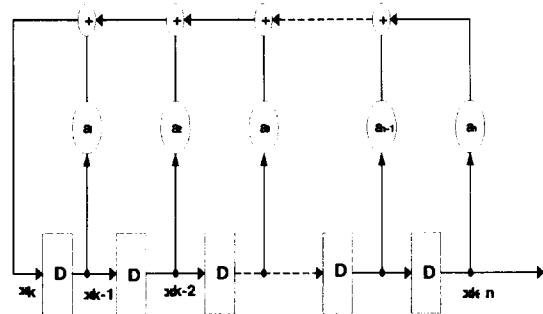


Fig.4 n개 shift register를 이용한 M계열 발생회로

M계열 신호를 시스템의 입력으로 인가할 때 M계열의 갯수와 시스템의 샘플링주기 결정은 중요한 문제로서, SCR 시스템에서는 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. 여기서 T_{95} 는 스텝응답의 95% 도달시간을 나타낸다. 위에서 의거하여 샘플링주기는 0.5 초로 하였으며, 이에 의해 구해진 백색잡음입

위의 두 구간을 근거로 하여 화격자 사이클과 Inlet측의 NOx치를 분석하여 보면, A구간과 같이 일정주기로 발생하는 곳은 화격자의 왕복운동을 하는 구간이며, B구간은 스팀 발생량이 23000kg/hr이상으로 증가되어 화격자가 정지되고 있는 구간으로 스팀이 23000kg/hr이하로 감소되면 다시 A구간과 같이 왕복운동을 행하는 것을 보여주고 있다.

4. SCR 시스템 모델에 기초한 PID 제어

3절에서 구한 SCR 시스템의 모델은 차수가 큰 관계로 처차원화의 방법 및 다변수 제어이론에 의한 제어기 설계법을 고려할 수 있으나 차후 과제로 남겨둔다. 또한, 소각 조건 및 연소성능에 따라 Inlet측의 NOx량은 3절에서 논한 바와 같이 크게 변동하나 대체적으로 주기성을 띄고 있으므로, 이에 대한 제어계 설계도 차후 중요한 과제가 될 것이다.

본 절에서는 간단하게 PID 제어를 통해 SCR의 일정 NOx량 제어에 대해 검토하고자 한다. 입력측의 NOx량은 Fig. 8의 패턴이 반복된다는 가정하에 PID 제어를 행한다. 이때 샘플링 주기는 0.5초로 행하며 PID 제어 입력은 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 NOx량과 Outlet측의 출력 NOx량에 대한 편차를 나타내며, PID 계인은 $K_P = 0.008$, $K_I = 0.00015$, $K_D = 0.06$ 으로 설정하였다. PID 제어결과는 Fig. 9 와 Fig. 10에 각각 출력과 입력을 나타낸다.

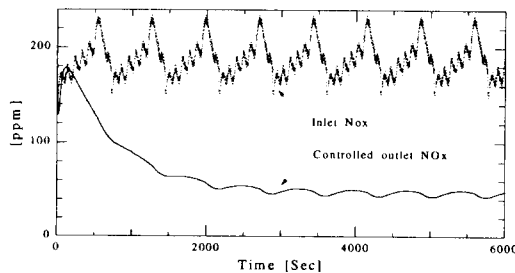


Fig. 10 Inlet NOx량과 제어된 Outlet NOx량

Outlet측의 NOx량은 40~50 ppm으로 만족할만한 수준으로 제어되고 있으나, 맥동형으로 되고 있으므로 이는 Inlet측의 NOx량 변동과 관계되고 있음을 알수 있다. 이러한 맥동을 줄이기 위해서는 새로운 제어알고리즘 및 로바스트성 이론에 근거한 제어계

설계가 요구된다.

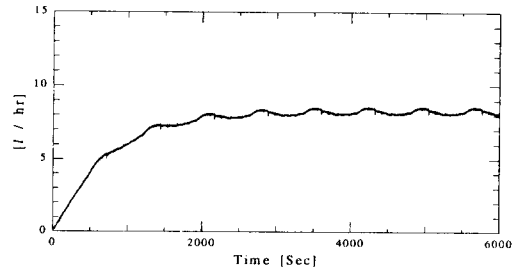


Fig. 9 PID 제어기의 NH3의 입력량

5. 결 론

본 논문에서는 부산광역시 해운대 신시가시내에 위치한 쓰레기 소각로의 연소가스 처리 설비중 질소산화물(NOx)의 제거 설비인 SCR시스템을 ARX 모델법을 바탕으로 한 동정법을 제시하였고, 얻어진 모델을 바탕으로 PID 제어 시뮬레이션을 하여 유용성을 확인하였다.

앞으로의 연구과제로써, 다변수제어이론을 바탕으로 한 제어알고리즘의 개발과 더불어 시간지연 시스템에 대한 안정성에 대한 검토가 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 환경관리공단, “도시 쓰레기 소각처리시설 운영관리 지침서”, 1994
- [2] 신생플랜트, “부산 해운대 소각로 시운전 조작 설명서”, 삼성건설, 1996
- [3] 足立修一, “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, 1993
- [4] “System Identification Toolbox user’s Guide”, The Math Works, Inc. 1991
- [5] 방 종진, 강 신준, 이 병진, 우 방광, “쓰레기 소각로의 효율적인 연소제어를 위한 적응 퍼지 모델 예측제어기 설계”, 한국자동제어학회, pp. 134-137, 1996
- [6] 박 익수, 문 병희, “시간지연이 큰 미지의 시스템에 대한 최적 PID제어기 설계”, 한국자동제어학회, pp. 164-167, 1996
- [7] 윤 명현, 신 창훈, 박 익수, “시간 지연을 가진 발전소 제어 시스템의 자동동조를 위한 System Identification 방법”, 한국자동제어학회, pp. 1008-1011, 1996