

# 반복제어법을 이용한 소각장 NOx 저감용 SCR 시스템의 제어

김인규\* · 여태경\* · 김환성\*\* · 김상봉\*\*\*

(2000년 3월 7일 접수)

## Control of SCR System for NOx Reduction in a Refuse Incineration Plant Using Repetitive Control Method

In Kyu Kim, Tae Kyeong Yeu, Hwan Seong Kim and Sang Bong Kim

**Key Words:** SCR(Selective Catalytic Reduction, 촉매환원법), Repetitive Control(반복제어), PID Control(PID 제어), Refuse Incineration Plant(소각장), NOx(질소산화물), NH3(암모니아), NH3 slip(암모니아 슬립량)

### Abstract

The refuse incineration plant has an important role in saving the combustion energy for local heating system. But harmful combustion gas (NOx etc.) leads to some serious environmental problem. To reduce the gas, a SCR(Selective Catalytic Reduction) system is installed and it is controlled by adjusting the flow of ammonia gas(NH3). In this paper, we apply a repetitive control method to reduce NOx by adjusting the flow of ammonia gas for SCR system in a refuse incineration plant which is located in Haeundae, Pusan. Firstly, we analyze the inlet NOx period by FFT method, and verify its periodic variations. Secondly, we design a repetitive control system by using state space model method. Lastly, the effectiveness of repetitive control system is shown by comparing to a conventional PID control in simulation and experimental results.

### 기호설명

### 1. 서론

- $P(s)$  : 제어대상 플랜트 ( $A_P, B_P, C_P, 0$ )
- $C(s)$  : 안정화 보상기
- $G(s)$  : 안정화 보상기 + 제어 대상 플랜트
- $L$  : 반복 주기
- $F(s)$  : 저대역 통과필터
- $H_F(s)$  : 반복제어 보상기
- $H$  : 칼만필터의 게인
- $K$  : 상태 피드백 게인

급속한 경제성장으로 인한 공업단지 증가 및 도시 인구의 증가로 인하여 발생하는 엄청난 쓰레기들을 기존의 매립방식으로는 해결할 수가 없게 되어, 정부에서는 이미 선진 외국에서 널리 사용하고 있는 쓰레기 소각장 건설을 통하여 매립지 부족문제를 해결하려 하고 있다.

그러나 대규모의 쓰레기 소각장 설립계획은 주변 환경오염에 대한 불신감으로 해당지역 주민들의 강한 반대에 직면하고 있다. 또한 쓰레기의 소각과정에서 발생하는 여러 유해물질들이 대기 중에 배출되어 배기가스의 규제에 따른 엄격한 소각로의 배기가스 전처리 및 후처리 공정제어가 요구되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

최근까지의 소각로 제어는 대부분 연소공정제

\* 부경대학교 대학원

\*\* 회원, 한국해양대학교 물류시스템공학과

\*\*\* 회원, 부경대학교 기계·자동차공학부

E-mail : memcl@dolphin.pkn.ac.kr

TEL : (051)620-1606 FAX : (051)621-1411

어를 바탕으로 한 퍼지제어에 의한 연소제어,<sup>(3)</sup> 퍼지-뉴로 제어를 이용한 효율적인 연소제어<sup>(4)</sup> 및 소각로 시뮬레이터 개발에 관한 연구<sup>(5)</sup>가 행해지고 있으나, 쓰레기의 함유물질의 변화 및 연소공정의 비선형성으로 유해한 배기가스는 필연적으로 발생되며, 이와 같이 발생된 유해한 배기가스를 처리하는 후처리 공정이 중요한 문제로 부각되고 있다.<sup>(1,2,6,7)</sup>

배기가스의 후처리 공정중의 하나인 SCR 시스템은 배기가스중의 질소산화물 및 다이옥신류를 제거하는 공정으로, 암모니아를 공급하여 질소산화물과 환원반응을 일으켜 제거하고 있다. 그러나, 과도한 암모니아의 공급은 충분한 환원반응을 일으키지 못하여 대기 중에 배출되므로 2차적인 대기오염을 가져오고, 또한 배기가스 처리비용을 가중시킨다.

이에 대해, 최근 본 저자는 ARX 동정법<sup>(13)</sup>을 이용하여 SCR 시스템을 모델화하였으며, 발생하는 질소산화물이 화격자의 운동에 비례하여 주기적으로 발생됨을 보였다.<sup>(6)</sup> 그러나, SCR 시스템으로 입력되는 질소산화물이 화격자의 운동에 따른 주기성을 지니고 있으므로 현재 소각장에서 이용되고 있는 종래의 PID 제어법으로는 암모니아량을 정확히 제어하는 데는 많은 어려움이 있다. 이에 대해서, 진상·지상 보상기를 지닌 반복제어법을 SCR 시스템에 적용시켜 시뮬레이션에 의해 그 유용성을 검토를 행한 바가 있다.<sup>(7)</sup> 그러나, 시뮬레이션의 고찰만을 행하였을 뿐, 실제 실험을 통한 검증 및 고찰은 행하여지지 않았다.

본 논문에서는, 소각장의 배기가스 처리 시스템 중에서 질소산화물의 제거설비인 SCR 시스템을 대상으로 반복제어계를 구현하여 실험 및 이에 대한 고찰을 행하고자 한다. SCR 시스템에 입력되는 질소산화물이 주기적인 점을 고려하며, 이를 정확히 제어를 행하고자 반복제어계를 구성하였으며, 제어계 실현을 위해 입력측 NOx 양을 측정 후, 이 데이터를 FFT를 이용하여 주파수 분석을 행하였다. 또한 이 주기를 이용하여 SCR 시스템의 동정 모델링과 시뮬레이션으로서 검증된 연구<sup>(6,7)</sup>들을 바탕으로 하여 반복제어계를 구성하였다.

반복제어계의 설계는 상태공간에 기초하여 행하였으며, 시뮬레이션과 실제 실험을 통하여 종래의 PID 제어보다 우수함을 확인하였다. 또한

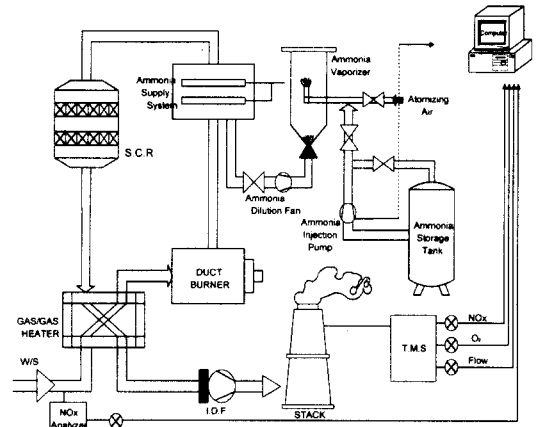


Fig. 1 SCR system

암모니아 슬립량이 적정량으로 유지되고 있음으로서 2차적인 대기오염방지에도 효과적임을 보였다. 따라서, 반복제어계를 이용함으로써 소각장의 배기가스 처리 시스템의 안정화와 처리 효율을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 소각장 SCR 시스템의 구조

### 2.1 SCR 시스템의 질소 산화물 제거원리

도시 쓰레기 소각 플랜트의 처리공정은 크게 ① 쓰레기 공급공정, ② 소각공정, ③ 제반출 공정, ④ 연소가스 냉각공정, ⑤ 연소가스 처리공정으로 나눌 수 있다.<sup>(1,2)</sup> 소각로의 연소가스는 연소가스 냉각공정(폐열 보일러, 절탄기)을 거친 후 연소가스 처리공정으로 유입되어 연소가스중의 먼지 (Dust)와 유해성 가스인 염화수소 (HCl), 황산화물 (SOx), 질소산화물 및 다이옥신류 (Dioxins)가 제거되는 공정이다.

본 논문에서 다루는 SCR 시스템은 질소산화물 및 다이옥신류가 제거되는 공정으로서 질소산화물은 암모니아 (NH<sub>3</sub>)와 환원 반응이 일으켜 질소산화물이 제거되고, 다이옥신류는 연소가스가 SCR 시스템 내부를 통과하면서 촉매와 접촉이 이루어질 때 연소가스중의 산소(O<sub>2</sub>)에 의해 부수적으로 제거되어진다.

질소산화물 제거방법은 촉매환원법(SCR)과 무촉매환원법(SNCR)으로 분류되며, 두 가지법 모두 암모니아와 NOx와의 반응이 기본으로 촉매환원법은 비교적 낮은 온도(210~350℃)에서 촉매를 이용한 반응이고, 무촉매 환원법은 온도 700℃

이상(보통 800~900℃)에서 촉매 없이 반응시키는 방법이다. 촉매환원법은 연소 배기 가스중에 암모니아 가스, 암모니아수 등 아미노기(NH<sub>2</sub>)를 함유하고 있는 환원제를 첨가하여 촉매층상에 반응식 (1)과 같이 무해한 질소(N<sub>2</sub>)와 물(H<sub>2</sub>O)로 분해 제거하는 방법이다.<sup>(1,2)</sup>

(반응식)



따라서, 이론적으로는 암모니아와 질소산화물의 등몰반응(Equal Molarity Reaction)으로 탈질 반응이 진행된다고 말할 수 있다.

### 2.2 SCR 시스템의 구조

Fig. 1는 본 논문에서 모델로 하는 SCR 시스템으로, 소각과정에서 발생된 850~1000℃ 이상의 연소공기는 연소가스 냉각공정(폐열 보일러, 절탄기)과 연소가스 처리공정(Air Cooler, 습식 세정탑, 가스 예열기)을 거치면서 145℃ 정도로 온도가 낮추어진다. 이 연소가스를 SCR 반응탑에서 암모니아와 연소가스중의 NOx 성분과의 환원 반응의 적정온도인 210~350℃까지 승온시키기 위한 설비로서 Gas/Gas Heater, Duct Burner가 장착되어 있으며, 실험에서는 TiO<sub>2</sub> 재질로 만들어진 벌집형(Honeycomb Type)의 촉매를 사용하였으며 TiO<sub>2</sub> 재질의 촉매가 94%이상 탈조율 보이는 최적온도 315℃까지 SCR 반응탑 입구온도를 강제 승온시킨다.<sup>(2,8)</sup> 이 승온설비에 의해 승온된 연소가스는 암모니아 공급설비(Storage Tank, Injection Pump), 증발설비 및 용해설비(Vaporizer, Dilution Fan)에 의해 SCR 반응탑으로 공급된 암모니아와 반응하여 질소산화물, 다이옥신 성분이 제거되어진다.

그리고, SCR 시스템 입구측의 NOx Analyzer, SCR 시스템 출구측인 Stack에 설치된 배출가스 측정장치(TMS: Tele Monitoring System), 주입펌프의 서보 유닛, 인버터, Position setter 및 Controller 등에 의해 질소산화물이 계측되고 암모니아 주입량이 제어되는 시스템이다. 단, 대부분의 암모니아 슬립량(NH<sub>3</sub> Slip: Excess of ammoniac escaping the reactor) 측정은 센서리스(Sensorless) 문제로 하고 있으며, 슬립량 보증치를 5ppm 으로 시공되고 있다

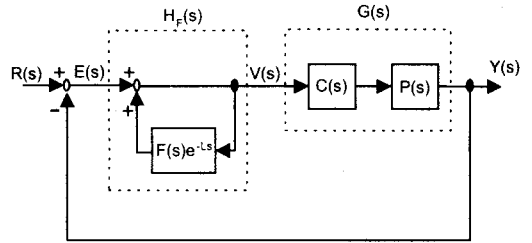


Fig. 2 Repetitive control system

## 3. 반복제어계의 설계법

### 3.1 반복제어계의 구성

임의의 주기 L의 목표신호에 추종 또는 임의의 주기 L의 외란신호를 제거하는 경우, 각각 내부모델원리<sup>(9)</sup>에 의해 고정주기 L을 가지는 주기신호 전체를 발생하는 기구를 만든다. 그리고, 이것을 내부모델로 해서 대응하는 모델을 페루프내에 삽입하면 주기 L을 가진 목표신호에 추종 혹은 주기 L을 가진 외란을 제거시킬 수 있다. 주기 L을 가진 임의의 주기함수는 한 주기에 대응하는 각 함수값을 기억시켜 놓은 뒤, 주기 L마다 반복해서 보상할 수 있다. 이러한 주기함수 보상기를 반복 보상기 (Repetitive compensator)라고 하고, 반복 보상기를 이용하여 구성한 제어계를 반복제어계(Repetitive control system)라고 한다.<sup>(10~12)</sup>

일반적인 반복제어계의 페루프계 블록선도를 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 P(s)는 제어대상 플랜트, C(s)는 제어기를 안정화하기 위한 보상기이며 F(s)는 주기적인 입력의 필터링을 위한 필터로서 각각 사용된다.

### 3.2 반복제어계의 설계법

Fig. 2에서 반복제어 보상기는 다음과 같이 나타내어진다.

$$H_F(s) = \frac{1}{1 - F(s)e^{-Ls}} \quad (2)$$

보상기와 제어대상을 포함하는 G(s)는

$$G(s) = P(s)C(s) \quad (3)$$

으로 Fig. 2의 반복제어계가 지수적으로 점근 안정하기 위해서는,<sup>(10)</sup>

- (i)  $[I + G(s)]^{-1}G(s)$ 는 안정한 유리함수 행렬이고,  $P(s)$ 와  $C(s)$ 사이의 불안정한 극영점 상쇄는 없으며,

- (ii)  $Q_F(s) \cong F(s)(I + G(s))^{-1}$ 에 대해  $\|Q_F\|_\infty < 1$ 가 만족되어야 한다.

여기서 (i)의 조건은 제어계가 내부 안정하다는 것과 동가이며, (ii)의 조건에서

$$\begin{aligned} \| (I + G(j\omega))^{-1} \| &\cong \bar{\sigma} [ (I + G(j\omega))^{-1} ] \\ &= \frac{1}{\underline{\sigma} [ I + G(j\omega) ]} \end{aligned} \quad (4)$$

$\| (I + G(j\omega))^{-1} \|$  값이 적으면 적을수록  $|F(j\omega)|$ 가 크게 되어, 추종 성능이 좋은 반복제어계가 구성될 수 있다는 것을 나타내고 있다. 즉,  $F(j\omega) \approx 1$ 인 대역이 넓을수록 정상편차는 적게되므로, 위와 같이  $F(s)$ 를 선택하면 추종 성능을 향상시킬 수 있다.

위의 안정조건에 기초하여 Fig. 2의 반복제어계를 다음과 같은 상태공간표현법으로 설계하였다.

먼저, 제어대상을  $P(s)$ 라 하면 다음과 같은 상태공간표현으로 주어진다.

$$P(s) : \begin{cases} \dot{x}(t) = A_p x(t) + B_p u(t) \\ y(t) = C_p x(t) \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R^m$ ,  $y(t) \in R^p$ 이며,  $(A_p, B_p)$ 는 가제어,  $(C_p, A_p)$ 는 가관측이다.

또한,  $P(s)$ 는 최소위상계로 가정한다. 즉,

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI - A_p & B_p \\ C_p & 0 \end{bmatrix} = n + p, \forall Re s \geq 0 \quad (6)$$

<< 상태공간에서의 설계법 >>

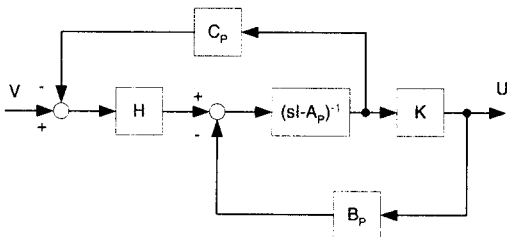


Fig. 3 Block diagram of compensator for repetitive control

**Step 1:** 제어대상  $P(s)$ 의 최소실현을 확인한다.

**Step 2:** 보상기  $C(s)$ 를 Fig. 3과 같이 구성한다. 여기서, 보상기의 게인  $H$ 와  $K$ 를 다음과 같이 구한다.

- (i)  $Q$ 를  $(Q^{1/2}, A_p)$ 가 가관측이 되는 적당한 반정정 대칭행렬로 선택한다. 그러면, 칼만 필터 게인  $H$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H = \Sigma C_p^T \quad (7)$$

여기서,  $\Sigma$ 는 다음의 리카치 방정식의 정정 대칭해를 나타낸다.

$$A_p \Sigma + \Sigma A_p^T + Q - \Sigma C_p^T R C_p \Sigma = 0 \quad (8)$$

- (ii) 게인  $K$ 는 최적 레귤레이터법에 의해 다음과 같이 구한다. 먼저 제어대상 (5)식에 대해 다음과 같은 2차 평가함수를 설정한다.

$$J = \int_0^\infty (\rho y(t)^T \Phi y(t) + u(t)^T u(t)) dt$$

단,  $\Phi$ 는 정정 대칭행렬이다.

위의 평가함수를 최소화 하는 상태 피드백 게인  $K$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = B_p^T P_\rho \quad (9)$$

여기서  $P_\rho$ 는 다음의 리카치방정식의 해를 나타낸다.

$$A_p^T P_\rho + P_\rho A_p + \rho \Phi - P_\rho B_p B_p^T P_\rho = 0 \quad (10)$$

단, 파라미터  $\rho$ 는 주어진 추종대역내에서 다음 식을 만족하는 충분히 큰  $\rho$ 를 택한다.

$$\underline{\sigma} [ I + G(j\omega) ] > 1$$

**Step 3:** 보드 선도상에서  $\underline{\sigma} [ I + G(j\omega) ]$ 이  $[F(j\omega)]$ 보다 아래에 위치하도록  $F(j\omega)$ 를 정한다. 즉,

$$\underline{\sigma} [ I + G(j\omega) ] > [F(j\omega)] \quad (11)$$

### 4. SCR 시스템의 반복제어계 설계

#### 4.1 FFT변환에 의한 NOx 주기 동정

화격자 방식의 쓰레기 소각로에서의 실질적인 연소는 화격자의 왕복운동에 의해 이루어진다. 즉, 폐열 보일러의 증기 발생량에 따라 노내로 쓰레기를 공급하는 공급기, 건조단, 연소단 및 후연소단까지 순차적으로 쓰레기를 이송시키면서 연소가 진행되도록 화격자를 제어한다. 따라서, 화격자가 왕복운동을 할 때 활발한 연소반응이 진행되면서 노내 온도, 증기 발생량과 더불어 연소 가스속에 유해물질의 농도가 증가하게 된다.

기존 연구에서, 소각 전처리 공정에서 발생하는 유해 가스속의 NOx량의 증감과 화격자의 왕복운동 사이클의 관계가 밝혀졌으며<sup>(6)</sup> 이를 바탕으로 SCR 시스템의 입력측 NOx량의 주기성을 파악하기 위하여 보일러의 증기 발생량을 23,000kg/hr이 되도록 제어하여 입력측 NOx 데이터를 얻은 후 FFT변환을 거쳐 Fig. 4과 같은 주파수 응답을 구하였다.

위의 Fig. 4로부터 0.034rad/sec 부근에서 가장 큰 주기성을 보였고, 이 결과 185sec 부근에서 입력측 NOx량이 주기적임을 알 수 있었다. 이는 화격자 운동주기와 일치하고 있으므로 반복제어계의 설계시 주기를 185sec로 하였다.

#### 4.2 SCR 시스템의 모델링

수치 시뮬레이션을 위한 SCR 시스템 모델은 기존 연구결과인 ARX 동정법에 의해 동정된 SCR 모델<sup>(6)</sup>을 이용하기로 한다. ARX 동정법을 요약하면 다음과 같다.

ARX 모델은 다음 식으로 나타내어진다.

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k) \tag{12}$$

여기서,

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

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

윗 식에서 시스템의 백색잡음형 입력  $u(k)$ 를 인가하여 이로부터 얻어지는 출력  $y(k)$ 로부터 ARX 모델의 다항식  $A(q^{-1}), B(q^{-1})$ 의 계수를 구하는 것을 ARX 동정법이라 한다.

본 논문에서는 백색잡음형 입력으로서 M계열 화학 암모니아를 SCR 시스템에 가하여 출력측의 NOx 데이터를 측정하였다. SCR 시스템의 특성상 출력 지연시간은 45sec, 샘플링주기는 0.5sec로 하였으며, 그 결과 108차의 동정된 SCR 모델이 구해졌다.

#### 4.3 반복제어계의 설계

(i) 파라미터  $Q = C^T C, R = 10000$ 로 하여 식 (8)으로부터 리카치방정식의 해를 구해 식 (7)을 이용하여 칼만필터의 게인  $H$ 를 구하였다.

(ii) 파라미터  $\rho = 10, \Phi = 1$ 로 하여 식 (9)로부터 상태 피득백 게인  $K$ 를 구하였다.

(iii) 반복제어계의 저대역 통과필터를 식 (13)과 같이 설계하였으며, 이때의 식 (11)에 대한 보드 선도는 Fig. 5로 되어, 반복제어계의 필터가 시스템의 추종성을 고려하여 설계되었음을 알 수 있다.

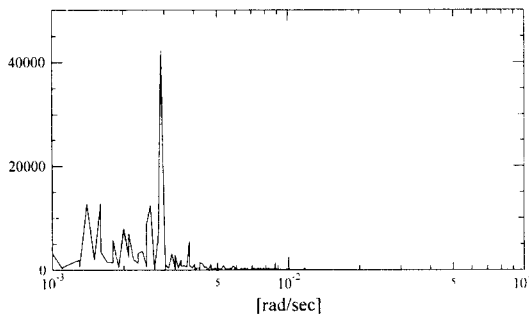


Fig. 4 FFT analysis of inlet NOx

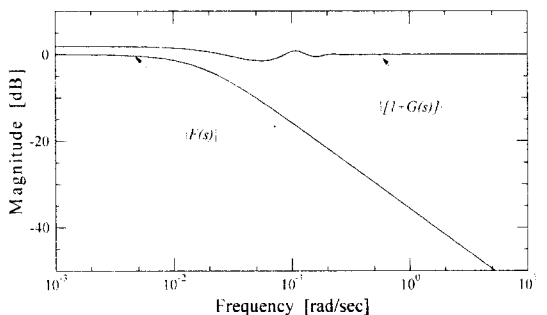


Fig. 5 Bode plot for repetitive control

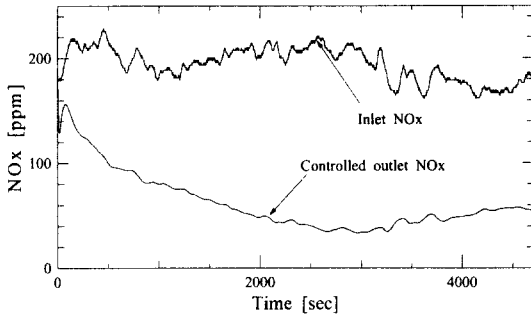


Fig. 6 Simulation result by PID controller

$$F(s) = \frac{1}{30s + 1} \quad (13)$$

## 5. 실험 결과 및 고찰

### 5.1 실험 장치의 구성

본 실험은 부산광역시 해운대에 설치되어 있는 쓰레기 소각장의 SCR 시스템을 대상으로 하여 시뮬레이션과 실험을 행하였다. 실험에서는 32bits 노트북 컴퓨터와 프린터 포트를 이용한 A/D, D/A 인터페이스 및 I/V, V/I 변환기를 이용하여 각각 센서로부터 데이터를 계측하고 암모니아의 토출량을 제어하였다. 이때 샘플링 주기는 0.5sec로 하였으며 제어 NOx 량은 45ppm으로 하여 실험 및 시뮬레이션을 행하였다.

### 5.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

SCR 시스템의 NOx 저감 제어에 있어 기존의 연구<sup>(7)</sup>에서 고찰하였던 PID 제어기에 비해 본 논문에서 제안한 반복 제어기의 유용성과 성능을 비교, 검토하기 위해 다음과 같은 조건에서 시뮬레이션을 행하였다.

① 기존의 연구<sup>(7)</sup>에서는 동일한 입력 NOx 량이 반복된다는 가정으로 시뮬레이션 수행하였으나, 본 논문에서는 실제 입력 NOx 량을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

② 시뮬레이션에서 초기조건을 영으로 하였다.

③ 목표 NOx 량은 45ppm이하의 정량값으로 하였다.

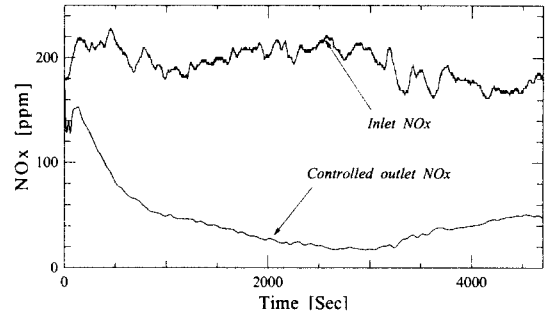


Fig. 7 Simulation result by repetitive controller

#### 5.2.1 SCR 시스템에 대한 PID제어

PID 제어입력은 다음과 같다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

여기서,  $e(t)$ 는 목표 NOx 량과 출력 NOx 량에 대한 편차를 나타내고, PID 계인은  $K_p=0.008$ ,  $K_I=0.00015$ ,  $K_D=0.06$  으로 반복 시뮬레이션을 통하여 최적계인을 도출하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같이 나타낸다

Fig. 6의 초기조건을 영으로 하여 시뮬레이션을 행하였으므로 초기 상태에서 목표치 추종까지는 2200sec으로 응답성이 매우 느리고, 또한 안정한 상태에서도 입력 NOx 량이 급격하게 변동할 때 3000~5000sec 사이에서 제어 NOx 량의 증가로 맥동을 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 5.2.2 SCR 시스템에 대한 반복제어

4절에서 설계된 반복제어 계인을 이용하여 PID 제어와 같은 조건에서 시뮬레이션을 행하였으며, 시뮬레이션 결과는 Fig. 7과 같다. 초기 상태에서 목표치 추종까지는 PID 제어보다 1500sec 앞선 700sec 정도로 응답성이 매우 우수함을 알 수 있고, 또한 안정한 상태에서도 입력 NOx 량이 3000~5000sec 부근에서 급격하게 변동할 때 맥동형은 보이지는 않지만, PID 제어와 같이 출력치가 45ppm 이상으로 증가함을 알 수 있다. 이는 SCR 시스템에서의 시간지연 및 입력 NOx 량의 주기변동에 기인하는 것으로 보여진다.

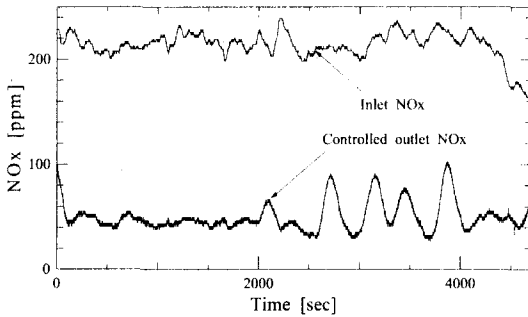


Fig. 8 Experimental result by PID controller

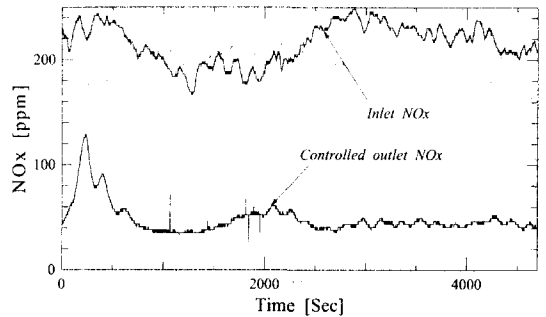


Fig. 9 Experimental result by repetitive controller

5.3 실험 결과 및 고찰

5.3.1 SCR 시스템에 대한 PID 제어

실제 실험에서 가장 양호한 PID 제어 결과는 Fig. 8과 같다. 실험 결과, 출력 NOx 량은 45ppm 으로 제어되고 있으나 시뮬레이션에서 보인 맥동보다도 큰 맥동이 주기적으로 나타나고 있다. 이는 소각로에서 연소되는 쓰레기 질의 변화에 따른 스팀 발생량의 변화 및 스팀 발생량과 인터록(Inter-locked) 관계에 있는 화격자의 왕복운동 사이클에 따라 주기적인 NOx 발생 사이클<sup>(6)</sup>에 기인한 것으로 보여진다. 따라서, 화격자의 왕복운동에 의한 SCR시스템에 주기적으로 입력되는 NOx 량을 고려하여 출력되는 NOx 량을 정량적으로 제어하기에는 PID 제어만으로는 불충분하다는 것을 알 수 있다.

5.3.2 SCR 시스템에 대한 반복제어

반복제어의 경우의 실험 결과는 Fig. 9와 같다. 실험 결과, 출력 NOx 량은 초기에는 다소 진폭이 크게되고 있으나, 이는 반복제어계의 초기 조건을 모두 영으로 하였기 때문이다.

시뮬레이션 결과와 같이 실험에서도 PID 제어에 비하여 목표치에 대한 응답특성이 빠르고, 안정적으로 출력 NOx 량이 45ppm으로 정량적으로 제어되고 있으나 시뮬레이션 결과와 같이 입력 NOx치가 급격하게 변동하는 1500~2500sec 사이에서는 출력 NOx치가 증가되는 것이 나타나고 있다. 따라서, 소각로 연소 조건의 변화로부터 출력 NOx 량을 정량적으로 제어하기 위해서는 입력 NOx 량의 주기성을 고려한 제어뿐만 아니라,

SCR 시스템의 시간지연 및 입력 NOx 량의 주기변동을 고려한 반복제어 알고리즘이 설계되어야 한다.

5.4 암모니아 슬립량 추정 및 고찰

SCR 시스템에서 NOx를 제거하기 위해 공급되는 과다한 NH<sub>3</sub>량은 2차적인 환경오염을 유발시킬수 있어 국내에서는 NH<sub>3</sub> 슬립량을 50ppm이하로 규정하고 있다. 그러나, 현재까지의 NH<sub>3</sub> 슬립량 측정방식은 주로 샘플 채취에 의한 간접방식으로 연속적으로 측정하기 어려운 단점을 지니고 있다.

현재 대부분의 소각장에서는 NH<sub>3</sub> 슬립량을 시공업체의 보증치(5ppm)에 의존하고 있으나, 불안정한 쓰레기 연소시 및 SCR 내부의 적절한 청소시기의 미결정으로 인한 탈초율 저하로 인하여 항상 NH<sub>3</sub> 슬립량이 보증치 이하로 보증될 수는 없다.

최근에는 이론식에 근거하여 쓰레기를 발열량에 따라 고질, 중질, 저질로 분류하여 SCR 시스템에서의 NOx의 등몰 반응식 (1)식으로부터 NH<sub>3</sub> 슬립량식을 다음과 같이 유도하여 NH<sub>3</sub> 슬립량 추정<sup>(2,8)</sup>에 이용하고 있다.

$$U = G_a / \left\{ Q_a \times NOx_{in} \times \frac{(21 - O_2)}{(21 - 12)} \times 10^{-6} \times \frac{17}{22.4} \times \frac{1}{0.25} \right\} \quad (15)$$

$$G_v = G_a \times \frac{1}{0.9071} \quad (16)$$

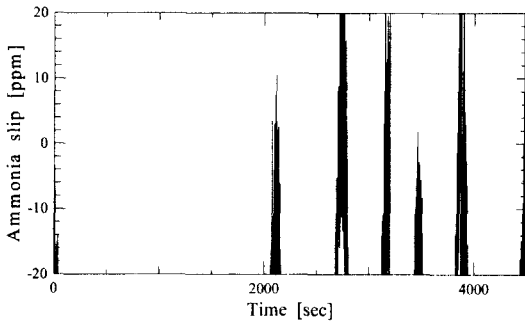


Fig. 10 Estimated ammonia slip for PID controller

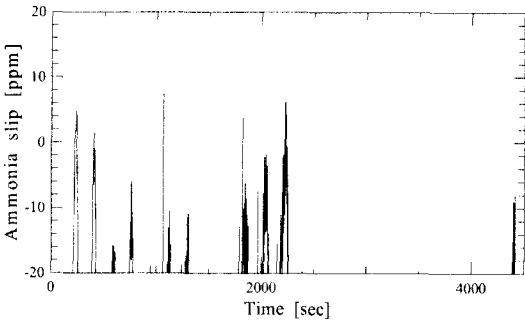


Fig. 11 Estimated ammonia slip for repetitive controller

$$NH_3 \text{ Slip} = NOx_{in} \times \left( U - \frac{NOx_{in} - NOx_{out}}{NOx_{in}} \right) \quad (17)$$

여기서  $G_a$ 는  $NH_3$  사용량 [kg/hr],  $G_v$ 는  $NH_3$  사용량 [l/hr],  $Q_d$ 는 배출되는 연소 가스량 [ $Nm^3/hr$ , Dry],  $O_2$ 는  $O_2$  량,  $U$ 는 탈초율,  $NOx_{in}$ 은 입구  $NOx$ [ppm] 및  $NOx_{out}$ 은 출구  $NOx$ [ppm]을 각각 나타낸다.

본 연구에서는 PID 제어와 반복제어를 이용한 SCR 시스템의  $NOx$  제어의 유효성을 보이기 위해 위의 (17)식을 이용하여  $NH_3$  슬립량을 추정하여 검증하고자 한다. 단,  $O_2$  및  $Q_d$ 는 각각 평균치로서 9.5%와  $45,000Nm^3/hr$ 로 고려하였다.

각 실험에서 사용된 데이터로부터 추정된  $NH_3$  슬립량은 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 여기서 슬립량이 음수로 표시되는 것은 출력측의  $NOx$ 량을

45ppm으로 제어하고 있으므로 부족한 암모니아량을 의미한다.

PID 제어시 초기에는 0~2000sec까지는 슬립량이 없으나 출력  $NOx$ 량의 맥동이 나타나는 2000sec 이상에서는 슬립량이 환경규준치 이하로는 만족하나 설계 보증치 5ppm보다는 큰 값을 보이고 있다. 이것은 기존의 PID 제어로서는 쓰레기의 발열량 변화 및 SCR 시스템의 변화에 대해서 부적절한 제어가 이루어지고 있음을 보이고 있다.

한편, 본 논문에서 제안한 반복제어시는 초기에 다소  $NH_3$  슬립량이 존재하나, 시간이 경과함에 따라 원활한 제어가 이루어지고 있으며,  $NH_3$  슬립량도 설계 보증치를 만족하고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는, 부산광역시 해운대 신시가지에 위치한 쓰레기 소각로의 배기가스 처리 시스템중  $NOx$  제거 설비인 SCR 시스템의 입력측  $NOx$  량이 일정한 주기성을 가지는 특성을 고려하여 반복제어계를 이용하여 제어계를 구현하였다.

실험결과에서 알 수 있듯이, 시스템의 주기성을 고려한 반복제어계를 사용함으로써 출력측  $NOx$  량을 일정치 이내로 제어할 수 있음을 확인하였으며,  $NH_3$  슬립량 추정을 통하여 2차적인 대기오염을 최소화할 수 있음을 알 수 있었다.

그러나, SCR 시스템의 시간지연 및 입력측  $NOx$  량의 주기 변동에 대한 반복제어계의 구현은 금후과제로 남아있다.

## 참고문헌

- (1) 환경관리공단, 1994, "도시 쓰레기 소각처리시설 운영관리 지침서."
- (2) 신생플랜트, 1996, "부산 해운대 소각로 시운전 조작설명서," 삼성건설.
- (3) Nogami, Y., et al., 1995, "Fuzzy Combustion for Reducing both CO and  $NOx$  from Flue Gas of Refuse Incineration Furnace," Symposium on Environmental Engineering, JSME, pp. 104~107.
- (4) Krause, B., et al., 1994, "A Neuro-Fuzzy Adaptive Control Strategy for Refuse Incineration"



- Plants," *Fuzzy Sets and System*, Vol. 63, pp. 329~338.
- (5) Miyamoto, Y., et al., 1997, "Development of Operation Support System for Refuse Incineration Plant," *The Society of Inst. and Cont. Engineers*, pp. 1053~1052, (Japanese)
- (6) 김인규, 여태경, 김환성, 김상봉, 1998, "소각로의 NOx 제어용 SCR 시스템의 암모니아 공급량 제어," *대한기계학회 논문집 A권 제 22권*, 2호, pp. 451~457.
- (7) 서진호, 김인규, 김환성, 김상봉, 1997, "진상·지상 보상기를 지닌 반복제어계를 이용한 소각장 SCR 시스템 제어에 관한 연구," *한국동력기계공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 179~182.
- (8) 남인석, 1997, "다이옥신 저감을 위한 폐기물 소각기술," *포항공과대학교 환경공학부 산학단기강좌 Workshop* pp. 73~99.
- (9) Francis, B.A. and Wonham, W.M., 1975, "The Internal Model Principle for Liner Multivariable Regulators," *Appl. Math & Opt.*, Vol. 2, pp. 170~194.
- (10) 中野道雄, et al., 1989, "繰返し制御," *計測自動制御學會*.
- (11) Woo S.C. etc., 1995, "Analysis and Design of Two Types of Digital Repetitive Control System," *Automatica*, Vol. 31, No. 5, pp. 741~746.
- (12) George, W. and Martin, H., 1999, "Repetitive Control of MIMO system using  $H^\infty$  design," *Automatica*, Vol. 35, pp. 1185~1199.
- (13) 足立修一, 1993, "ユーザのためのシステム同定理論," *日本自動計測學會*.