

# 일반 구조형 관측기를 이용한 소각장 SCR 시스템의 Inlet NOx 추정에 관한 연구

이충환\*, 김인규\*\*, 김환성\*\*\*, 김상봉\*\*\*\*

## A Study on the Inlet NOx Estimation of SCR System in a Refuse Incineration Plant by Using General Structured Observer

Choong-Hwan Lee\*, In-Kyu Kim\*\*, Hwan-Seong Kim\*\*\*, Sang-Bong Kim\*\*\*\*

### ABSTRACT

The function of SCR system in refuse incineration plant is to reduce the harmful combustion gases especially NOx which make serious environmental pollution. The SCR system normally have a NOx measurement system such as inlet NOx analyzer and outlet T.M.S.(Tele Monitoring System) to control the outlet NOx in stack. The NOx measurement system is very important, however there are frequently happened sensing problems and it need maintenance periodically. In this paper, we propose an estimation method of inlet NOx of SCR system by using general structured observer. The inlet NOx is considered as an input disturbance and it is modelled by applying FFT method in frequency domains. Through the design of general structured observer, the inlet NOx can be estimated by using observation error between real outlet NOx and estimated outlet NOx. The effectiveness of the proposed method is shown by comparing to a measured inlet NOx data.

**Key Words** : General structured observer(일반 구조형 관측기), SCR(Selective Catalytic Reduction, 촉매 환원법), Refuse incineration plant(소각장), NOx(질소산화물), NH<sub>3</sub>(암모니아)

### 기호설명

$x(t)$  = state vector of system  
 $\hat{x}(t)$  = estimated state vector of system  
 $d(t)$  = input disturbance vector  
 $\hat{d}(t)$  = estimated disturbance vector  
 $e(t)$  = error vector between real states and estimated states  
 $\zeta(t)$  = transformed estimated error vector  
 $\xi(t)$  = transformed error vector  
 $K, H, M, N$  = gain matrices of general structured observer

### 1. 서론

생활 쓰레기 소각장에서 발생하는 오염물질은 주로 가스형태 혹은 고형 물질형태로 나타난다. 가스형태의 오염물질은 염화수소(HCl), 불화수소(HF), 황산화합물(SO<sub>x</sub>), 질산화합물(NO<sub>x</sub>) 및 수은(Hg) 등으로 구성되며, 기타 플라이애쉬(Fly-Ash)와 금속가루가 포함된다<sup>(1),(2)</sup>.

이와 같은 가스형태의 유해물질 저감을 위해서는 배기가스의 전처리 및 후처리 공정제어가 필수적이다. 현재까지의 소각로 제어는 연소공정제어를 바탕으로 한 피지제어<sup>(3)</sup>, 뉴로-피지제어<sup>(4)</sup>가 대부분이며, 최근 후처리 공정에서 반복제어기법을

\* 양산대학 메카트로닉스과  
 \*\* 부경대학교 대학원  
 \*\*\* 한국해양대학교 이공대학 물류시스템공학과  
 \*\*\*\* 부경대학교 공과대학 기계공학부

이용한 NOx 저감제어<sup>(5),(6)</sup>가 제안되었다.

배기가스 후처리 공정에서 주로 다루는 질소산화물(NOx)은 쓰레기 연소과정의 소각인자에 의해 결정된다. 쓰레기 연소로부터 나오는 배기가스 중의 NOx의 평균치는 대략 200~400[ppm]으로 NO2량은 전체 NOx량의 5%내외를 차지한다<sup>(1)</sup>.

최근, 새로운 법령 개정으로 최대 허용 배기가스 기준이 강화되어 각 연소공정 및 배기가스 처리공정이 감시·감독되고 있으며, 특히 연돌(stack)에 설치된 감시측정 시스템에 의해 수집된 데이터가 공식적인 보고서의 근거로 사용되고 있다.

그러나, 현재 소각로에서 연소가스 중의 오염물질 측정방식은 대부분 샘플링 방식에 의한 분석기법들이 사용되고 있으며, 그 이외에도 몇몇 방법들이 연구되고 있으나 측정 정도는 아직 미약한 수준이다. 샘플링 방식에 의한 분석기법들은 연소가스를 샘플링하여 분석하므로 상대적으로 느린 분석결과를 가져오며, 연소가스 분석 경로의 막힘으로 주기적인 청소가 요구된다. 기타 기기의 고장들은 가동년수에 비례하여 증가하고 이에 따른 유지보수비도 증가하는 실정이다. 따라서, 이러한 NOx 분석기는 샘플 Probe와 흡입관의 주기적인 청소 및 유지 보수시에 NOx 측정이 불가능하므로 정확한 NOx 제어가 불가능하다.

본 논문에서는 이러한 NOx 분석기의 단점을 극복하기 위한 한 방법으로서 일반 구조형 관측기 기법을 도입하여 SCR 시스템의 Inlet NOx량을 추정하는 방법을 제안한다. 먼저 NOx 측정 데이터를 FFT 분석하여 주기를 산출하고 NOx 모델을 구성하였으며, SCR 시스템에 대해 설계된 일반 구조형 관측기를 이용하여 입력측 외란으로 간주된 NOx량을 추정하고, 그 유효성을 시뮬레이션을 통하여 검증을 행한다.

## 2. SCR 시스템 및 NOx analyzer

### 2.1 SCR 시스템 구조

쓰레기 소각 플랜트의 처리공정은 쓰레기 공급 공정, 소각공정, 제반출 공정, 연소가스 냉각공정 및 연소가스 처리공정으로 분류된다<sup>(1),(2)</sup>. 소각로의 처리공정 중에 발생하는 연소가스는 연소가스 냉각

공정을 거친 후 연소가스 처리공정으로 유입되어 연소가스중의 먼지와 유해성 가스인 염화수소, 황산화물, 질소산화물 및 다이옥신류가 제거된다.

본 논문에서 다루는 SCR 시스템은 연소가스중의 질소산화물 및 다이옥신류가 제거되는 공정으로서 질소산화물은 암모니아(NH3)와 환원 반응이 일어러 질소산화물이 제거되고, 다이옥신류는 연소가스가 SCR 시스템 내부를 통과하면서 촉매와 접촉이 이루어질 때 연소가스중의 산소(O2)에 의해 부수적으로 제거된다.

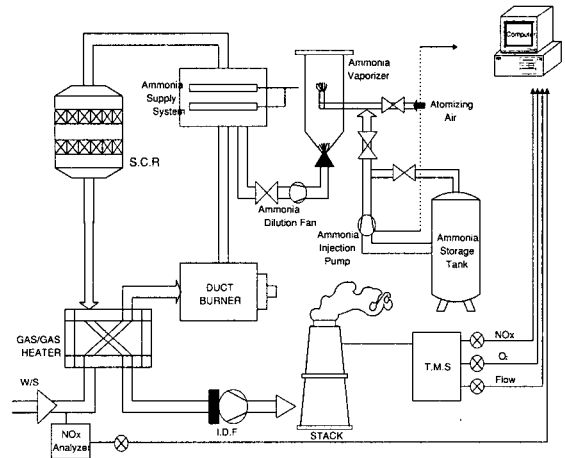


Fig. 1 SCR System

소각로의 SCR 시스템은 Fig. 1과 같다. 소각과정에서 발생된 850~1000℃ 이상의 연소공기는 연소가스 냉각공정과 연소가스 처리공정을 거치면서 145℃정도로 온도가 낮추어진다. 이 연소가스를 SCR 반응탑에서 암모니아와 연소가스중의 NOx 성분과 환원반응하기 위한 적정온도인 320℃까지 승온시키는 설비로서 Gas/Gas Heater, Duct Burner가 장착되어 있으며, 이 승온설비에 의해 승온된 연소가스는 암모니아 공급설비에 의해 SCR 반응탑으로 공급된 암모니아와 반응하여 질소산화물, 다이옥신 성분이 제거되어진다. 그리고, SCR 시스템 입구측의 NOx Analyzer, SCR 시스템 출구측인 Stack에 설치된 배출가스 측정장치, 주입펌프의 서보 유닛, 인버터, Position Setter, 제어기 등에 의해 NOx가 계측되고 암모니아 주입량이 제어된다<sup>(2)</sup>.

## 2.2 NOx Analyzer

소각로의 SCR 시스템은 SCR 시스템의 입구측에 설치된 NOx analyzer로부터 NOx를 계측하여 압모니아 제어를 행한다.

현재 소각로에서 연소가스 중의 오염물질 측정 방식은 대부분 샘플링 방식의 분석기들을 사용하고 있다. 샘플링 방식의 분석기들은 연소가스가 흐르는 Duct 및 Stack등의 내부 일정부위의 연소가스를 튜브로 흡입하여 필터를 거치고, Test Gas를 이용하여, 쿨러(Cooler), 건조기(Dryer), 샘플링 펌프 및 유량계(Flow meter)를 거쳐 분석기로 분석하므로 분석 결과가 매우 느리게 나타난다.

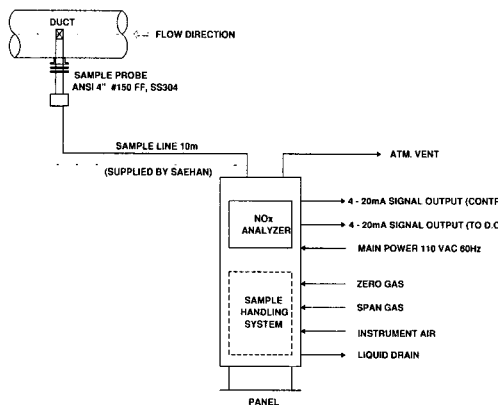


Fig. 2 NOx Analyzer of SCR System

Fig. 2는 본 논문에서 실험대상으로 하고 있는 SCR 시스템의 입구측 NOx 분석기로서 위에서 설명한 샘플링 방식의 특징 이외에도, Sample Probe와 흡입관(Sampling line)등의 막힘 현상이 자주 발생하며, Sample Probe와 흡입관의 주기적인 청소(Air purge)가 필수적으로 요구된다. 이러한 문제가 발생하는 경우는 연소 가스속의 정확한 NOx량의 계측이 어렵고, 쿨러, 건조기, 샘플링 펌프 등의 고장은 소각로의 가동연수에 비례하여 증가함에 따라서 정확한 계측 및 제어가 어려우며, 아울러 보수 유지비도 증가하고 있다.

## 3. 일반 구조형 관측기

본 절에서는 종래의 연구결과<sup>(8)</sup>를 바탕으로 일반 구조형 관측기를 적용하며, 소각장의 SCR 시스템의 입력측 NOx 추정에 적합한 관측기 설계법에 대해 다루도록 한다.

### 3.1 일반 구조형 관측기의 구성

다음의 선형 연속 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (1b)$$

여기서  $x(t) \in R^n$ ,  $y(t) \in R^p$ ,  $u(t) \in R^m$ 는 각각 상태벡터, 출력벡터, 입력벡터를 나타내며 ( $A, C$ )는 가관측이다.

(1)식으로 표현된 시스템에 대한 일반 구조형 관측기는 다음과 같다<sup>(8)</sup>.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K\zeta(t) + H\epsilon(t) \quad (2a)$$

$$\zeta(t) = N\zeta(t) + M\epsilon(t) \quad (2b)$$

$$\epsilon(t) = y(t) - C\hat{x}(t) \quad (2c)$$

단,  $\hat{x}(t) \in R^n$ ,  $\zeta(t) \in R^r$ ,  $\epsilon(t) \in R^p$ 은 각각 상태추정 벡터, 변환벡터, 추정 오차벡터를 나타내며,  $K, H, N, M$ ,은 일반 구조형 관측기의 개인 행렬이다.

### 3.2 입력외란 추정 알고리즘

소각장 SCR 시스템의 입력측에 나타나는 NOx치를 추정하기 위해 다음과 같이 입력측에 외란이 인가되는 선형 연속 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Dd(t) \quad (3a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3b)$$

$$\dot{d}(t) = Wd(t) \quad (3c)$$

여기서  $d(t) \in R^r$ 은 외란 벡터를 나타내며,  $W$ 는 외란 모델의 시스템 행렬을 나타낸다.

(3)식으로 표현된 소각장 SCR 시스템에 대해

일반 구조형 관측기를 적용하기로 하자.

일반 구조형 관측기를 이용하여 입력측 NOx를 추정할 수 있도록 다음의 오차함수를 정의한다.

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (4)$$

(4)식을 양변 미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{e}(t) = (A - HC)e(t) - K\zeta(t) + Dd(t) \quad (5)$$

$$\dot{\zeta}(t) = N\zeta(t) + MCE(t) \quad (6)$$

일반 구조형 관측기 계인을  $K = D$ 로 설계하고, 변수  $\xi(t)$ 를 다음과 같이 도입하여 정리하면

$$\dot{\xi}(t) = \zeta(t) - d(t) \quad (7)$$

(5)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{e}(t) = (A - HC)e(t) - K\xi(t) \quad (8)$$

(7)식을 양변 미분하고, 관측기 계인을  $N = W$ 로 설계하면 다음과 같다.

$$\dot{\xi}(t) = MCE(t) + N\xi(t) \quad (9)$$

따라서, (8)식과 (9)식을 이용하여 확대계를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{e}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서  $\begin{bmatrix} A - HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix}$ 가 안정하도록 관측기 계인  $H, M$ 이 설계되면,  $t \rightarrow \infty$ 일 때  $e(t), \xi(t) \rightarrow 0$ 으로 되어 (7)식으로부터 외란 추정치는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{d}(t) = \zeta(t) \quad (11)$$

## 4. SCR 시스템의 Inlet NOx 추정

### 4.1 Inlet NOx 모델

입력측 NOx 모델을 구하기 위해, NOx analyzer로부터 I/V 변환기 및 A/D 변환기를 이용하여 입력측 NOx 치를 측정하였다.

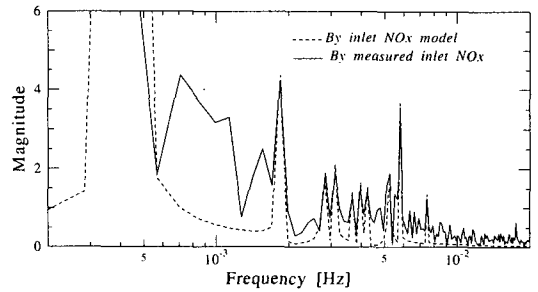


Fig. 3 Frequency responses of inlet NOx and estimated inlet NOx

측정된 inlet NOx를 FFT 분석을 한 결과는 Fig. 3과 같다. 여기서 가장 큰 영향을 주는 주파수 모드는 0.00417[Hz] 부근에서 주기성을 보이고 있으며, 실제 소각장의 화격자의 주기와 관계가 있는 모드는 0.0058[Hz]로서 이전 연구 결과<sup>(7)</sup>와 유사하다.

위의 FFT 분석 결과로부터 입력측에 나타나는 NOx 신호의 구성 주파수를 Table 1과 같이 10개 모드로 나타내었다.

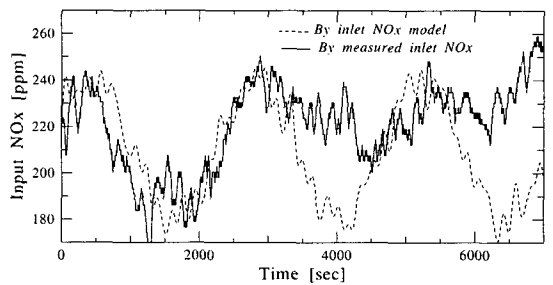


Fig. 4 Time responses of measured and its model

Table 1 Frequency modes of inlet NOx

Mode	Frequency [Hz]	Magnitude
1	0.000417	30.0
2	0.001850	4.20
3	0.002800	1.90
4	0.003100	1.90
5	0.003680	1.30
6	0.003950	1.50
7	0.004260	1.40
8	0.005200	1.90
9	0.005800	3.50
10	0.007500	1.25

이와 같은 주파수 모드를 이용하여 inlet NOx 모델을 구성하였으며, 시간영역에서 측정된 inlet NOx와의 응답비교를 행하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 실선은 inlet NOx 실측치를 나타내며, 점선은 inlet NOx 모델의 응답을 나타내고 있다.

### 4.2 일반 구조형 관측기의 설계

본 절에서는 일반 구조형 관측기로 표현된 (3)식에서 주어지는 관측기 게인  $K, H, N, M$  을 설계하는 문제를 다루기로 한다.

(10)식에서 확대 시스템 행렬은

$$\begin{bmatrix} A-HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -K \\ 0 & N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H \\ -M \end{bmatrix} [C \ 0]$$

으로 되므로,  $\left( [C \ 0], \begin{bmatrix} A & -K \\ 0 & N \end{bmatrix} \right)$ 가 가관측

인 경우, 안정한 일반 구조형 관측기 게인  $H, M$ 을 기존의 최적제어법 등으로 설계할 수 있다.

### 4.3 시뮬레이션 및 고찰

SCR 시스템의 입력측 NOx량을 추정하기 위하여 10개의 주파수 모드 중 특정한 2개만을 고려하여 일반 구조형 관측기의 게인을 설계하고 시뮬레이션을 행하였다. 그리고, 전체 주파수 모드중 특정 모드만을 고려하였을 때의 NOx량 추정상태를 비교·검토하기 위하여 주파수 모드 1, 2에 대한 설계,

주파수 모드 2, 9에 대한 설계, 및 주파수 모드 3, 4에 대한 설계의 3가지 경우에 대해 시뮬레이션을 행하였다.

전체 주파수 모드 중 가장 큰 진폭이 있는 모드 1, 2를 고려하였을 때, (3c)식에서 NOx 모델  $W$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$W = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0 & 0 \\ 0.5000 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & -0.0001 \\ 0 & 0 & 0.5000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

SCR 시스템과 inlet NOx 모델에 대하여 일반 구조형 관측기의 게인을 설계하고 NOx량을 추정한 결과는 Fig. 5와 같다.

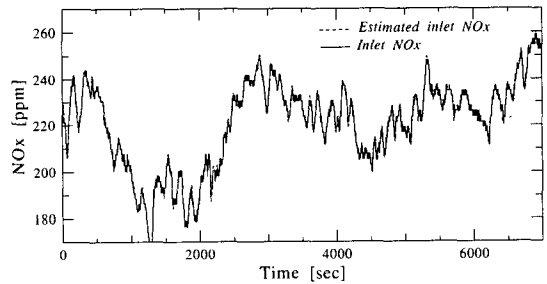


Fig. 5 Estimated result in mode 1 & 2

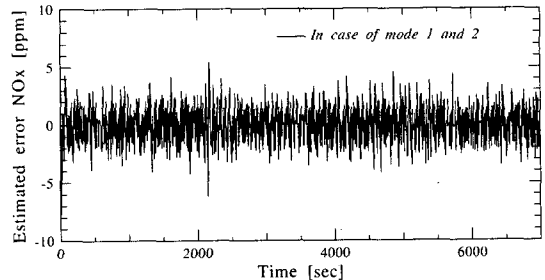


Fig. 6 Estimated error in mode 1 & 2

Fig. 5에서는 외란으로 주어진 NOx값과 일반 구조형 관측기에 의해 추정된 NOx값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있으며, Fig. 6은 주파수 모드 1, 2만이 고려된 일반 구조형 관측기의 추정오차를 보여주고 있다.

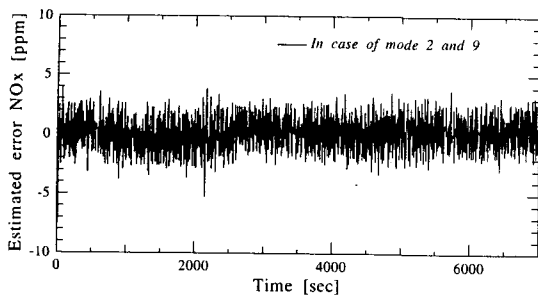


Fig. 7 Estimated error in mode 2 & 9

Fig. 7은 주파수 모드 2와 9를 고려하여 외란 모델을 설계하고 입력측의 NOx량을 추정할 경우의 추정오차를 표시한 것이다.

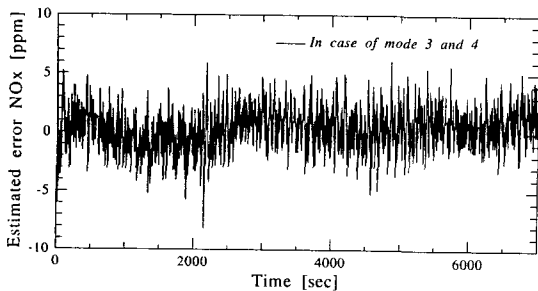


Fig. 8 Estimated error in mode 3 & 4

Fig. 8에서는 주파수 모드 3과 4를 고려하여 일반 구조형 관측기의 계인을 설계하고 시뮬레이션을 행한 결과로써, 주파수 모드가 전체 주파수 중 비교적 진폭이 작은 경우에 해당되며, 추정오차에서 특정 주파수의 영향이 미소하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 NOx 측정값을 FFT분석하고 그 결과로 얻어진 주파수 모드를 외란 모델로써 적용하여 NOx값을 추정하는 방법이 전체 주파수 모드에서 Fig. 5와 유사하게 효과적으로 추정되고 있음을 알 수 있고, 비교적 진폭이 작은 주파수 모드를 이용할 경우는 그 외의 경우보다 추정오차가 더 크게 되어 나타남을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 SCR 시스템의 입력측에 나타나는 NOx를 검출하는 과정에서 발생하는 문제점을 해결하기 위해 일반 구조형 관측기 기법을 이용하

여 입력측의 NOx를 추정하기 위한 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 행하였다.

NOx 입력을 시스템의 외란으로 간주하고, FFT 분석한 결과를 이용하여 일반 구조형 관측기의 계인을 설계하고 시뮬레이션을 한 결과, 실제 NOx 값과 거의 일치하는 유효한 추정결과를 보여주고 있다. 따라서 일반 구조형 관측기는 외부 노이즈가 존재하는 경우의 상태추정 및 외란 노이즈 추정에 유효한 성능을 보이고 있다.

## 참고문헌

1. 환경관리공단, “도시 쓰레기 소각처리시설 운영 관리 지침서,” 1994.
2. 신생플랜트, “부산 해운대 소각로 시운전 조작설명서,” 삼성건설, 1996.
3. Nogami, Y. et al., “Fuzzy Combustion for Reducing both CO and NOx from Flue Gas of Refuse Incineration Furnace,” Symposium on Environmental Engineering, JSME, pp. 104-107, 1995.
4. Krause, B., etc., “A Neuro-Fuzzy Adaptive Control Strategy for Refuse Incineration Plants,” Fuzzy Sets and System, Vol. 63, pp. 329-338, 1994.
5. 김인규, 여태경, 김환성, 김상봉, “소각로의 NOx 제어용 SCR 시스템의 암모니아 공급량 제어,” 대한기계학회 논문집 A권 제22권 2호, pp. 451-457, 1998.
6. 서진호, 김인규, 김환성, 김상봉, “진상·지상 보상을 지닌 반복제어계를 이용한 소각장 SCR 시스템 제어에 관한 연구,” 한국동력기계공학회 추계학술대회 논문집, pp. 179-182, 1997.
7. 足立修一, “ユーザのためのシステム同定理論,” 計測自動制御學會, 1993.
8. 이충환, 김환성, 김상봉, “일반 구조형 관측기에 관한 연구,” 한국정밀공학회, 제17권 9호, pp. 95-101, 2000.