

논문 99-8-3-08

PID 온도 제어 및 적외선 센서를 이용한 이산화탄소 측정 시스템 설계에 관한

연구

임형택*, 백승화*, 주관식**

A study on the design of Carbon Dioxide Measurement System
using Infrared sensor and PID temperature control

Hyung Taek Lim*, Seung Hwa Beack*, Kwan Sik Joo**

Abstract

The CO_2 measuring system using infrared sensor has the variance according to the temperature change. Therefore, the temperature compensation should be needed to obtain a reliable measurement. In this study, the sensor module consist of infrared CO_2 Sensor, IR Source, pipe and the heater and measuring system has amplifier, A/D converter and microprocessor. And we suggest a method to reduce the error by using the PID temperature control. We use optimum parameters setting of Ziegler & Nichols as well as PID temperature control algorithm for the temperature compensation. In this method, PID optimum parameter is set from dummy time(L) and maximum slope(R). As a result of using this PID temperature control, it is founded that it has the fast response and low steady state error. Therefore, it is certainly proved that this is very suitable algorithm to correct the error on measurement.

1. 서론

최근 대기 오염의 정도가 심각해지기 시작하면서 우리는 각종 대기 오염 물질에 관해 많은 관심을 보여 왔다. 대기 오염 물질의 주류는 각종 화석연료의 연소에 의해 발생하는 SO_x , NO_x , CO_2 등의 독성 가스류이며, 특히 CO_2 는 지구 온난화의 주범이 되고 있고, 이에 대한 배출 규제 또한 강화되고 있는 것이 현실이다. 이러한 독성 가스들을 장시간 호흡하면 인체에 치명적인 손상을 입힐 수 있다.^[1] 현재 이러한 독성 가스를 측정하는 방법으로 가장 흔히 사용되고 있는 것

이 전기 화학식 센서를 이용한 측정 방식과 적외선 센서를 이용한 측정방법이다. 전기 화학식 센서는 소량의 가스를 측정하는데 적합하지만, 센서의 사용 수명이 짧은다는 단점을 가지고 있다.^[2] 또한 현재 자동차 배출 가스등을 측정하는 용도로 널리 사용되고 있는 적외선 방식의 센서는 특정 가스가 적외선 파장대의 특정 파장만을 흡수하는 성질을 이용하는 것으로 측정 범위가 넓고, 전기 화학식 센서에 비해 센서의 수명이 길어 최근에 많은 연구가 진행되고 있다.^[3] 반면 적외선 센서는 센서 주변의 온도 변화에 따른 센서의 출력 변화가 민감하여, 센서 주변의 온도 변화를 보상하기 위한 여러 방법들이 제안되고 있다. 이러한 온도 보상 방법에는 적외선 센서부에 온도 센서를 부가하여, 적외선 센서부의 온도를 측정하여 그 온도의 변화량에 따라 측정 오차를 보상하는 방법이 제안되고 있다. 그러나 온

* 명지대학교 정보제어공학과(Dep. of Control Information System Eng.)

** 명지대학교 물리학과(Dep. of Physics Myongji Univ.)

<접수일자 : 1999년 4월 2일>

도 보상 과정에 있어서 온도 센서의 응답 시간과 적외선 가스 센서의 응답 시간 차이에 의한 보상 오차의 발생 확률이 존재하며, 또한 각각의 적외선 가스 센서들간의 온도에 대한 출력 변화율이 달라 센서마다 온도 보상 데이터를 취득해야하는 문제점을 안고 있다. 본 논문에서는 적외선 센서를 이용한 CO₂ 가스 측정 시스템을 구현하고, 외란에 빠른 제어 성능 및 정상상태 오차가 작은 PID 온도 제어 알고리즘^[4]을 부가함으로써 온도 변화에 의한 적외선 센서의 응답 오차를 보상하였다.

2. PID 온도 제어 및 적외선 센서를 이용한 이산화탄소 측정 시스템 설계

그림 1은 CO₂ 센서부, 증폭부, A/D 변환부, 마이크로프로세서로 구성로 구성된 CO₂ 측정 시스템의 전체 구성을 보여주고 있다.

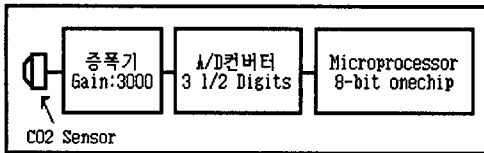


그림 1. 전체 시스템 구성도
Fig. 1. System block diagram

2.1 시스템의 설계

2.1.1 센서 모듈의 구성 및 기능

센서 모듈은 적외선 CO₂ 센서, 적외선원(IR Source), 도파관, 열선부로 구성되어 있다.

센서는 CO₂ 가스가 4.26 μ m(최대파장치)대역의 적외선 파장을 흡수하는 성질을 이용하는 것으로, 적외선파장 대역에 속하는 4.26 μ m만을 통과시키는 협대역 통과 필터(4.26 μ m narrow band pass filter)와 적외선에 반응하는 온도감응소자(thermopile element)로 구성되어 있다.^[4] 그러므로 이 적외선 CO₂ 센서는 4.26 μ m의 적외선 파장 대역에만 응답하는 특성을 가진다.

적외선원(infrared source)은 CO₂가 흡수하는 4.26 μ m ($\pm 1\%$)의 적외선 파장대역을 발생시키는 IR source이며, 이러한 파장 대역을 발생시키기 위해 Wien의 변위

법칙(Wien's displacement law)^[5]을 사용하였다. 식 (1)은 온도에 따른 파장의 최대치를 구하는 식이다.

$$\lambda_{\max}(\mu\text{m}) = \frac{2,898}{T(\text{C})} \quad (1)$$

위 식에서 T는 IR source의 온도이며, λ_{\max} 는 IR source의 최대 파장치다. 여기서 우리가 원하는 파장대역은 4.26 μ m($\pm 1\%$)이므로 식 (1)에서 온도 T를 구할 수 있다.

$$T = \frac{2,898}{4.26} \approx 680(\text{C})$$

이다. 그러므로 적외선원은 680 $^{\circ}$ C의 온도를 가져야만 한다.

도파관은 그림 2에서 알 수 있듯이 도파관 양끝으로 적외선원과 적외선 CO₂ 센서를 위치시킨 후, 관 내부로 측정하고자하는 CO₂ 가스를 투입시키기 위한 기구물로 사용하였다.

열선부는 적외선 CO₂ 센서가 같은 양의 CO₂ 농도에서도 적외선 CO₂ 센서 주변의 온도에 따라 상이한 응답을 나타내는 문제를 보상하기 위해 부가된다. 즉 적외선 CO₂ 센서 주변의 온도를 일정하게 유지시킴으로써 온도 변화에 따른 센서의 출력 변화 문제를 해결하였다. 이러한 온도 제어를 위해서 적외선 CO₂ 센서에 온도센서를 추가로 설치하여 온도센서의 출력을 입력으로 받아 열선을 제어하는 PID 온도제어 시스템을 구현하였다.

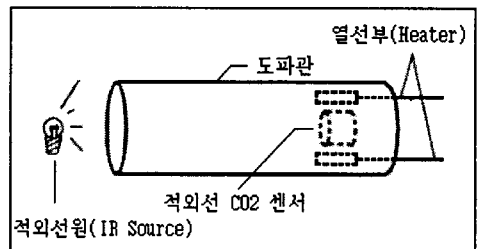


그림 2. 센서부 구성도
Fig. 2. Sensor module block diagram

2.1.2 계측 시스템 구성 및 기능

계측시스템은 크게 증폭부와 A/D 변환부 그리고 마

이크로프로세서로 구성하였다.

증폭부에서는 미약한 입력신호를 증폭하기 위하여 3,000배의 증폭 이득을 갖는 증폭기 회로를 사용하였다.

증폭기를 구성하는 op-amp로는 AD사의 OP-07를 사용하였다. OP-07은 저잡음의 특성을 가지고 있어, 각종 계측기의 증폭기로서 널리 사용되고 있는 소자이다.^[6]

A/D 변환부는 증폭부에서 증폭된 아나로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 마이크로프로세서에 전달하는 역할을 한다. A/D 변환부에 사용된 A/D 변환기는 Telcom사의 적분형 AD 변환기인 TC14433을 사용하였다. 축차비교형 AD 변환기에 비해 A/D 변환 속도는 느리나, 잡음에 강한 특성을 가지고 있다.^[7]

마이크로 프로세서는 MicroChip사의 8bit one chip microprocessor인 PIC16C74를 사용하였다. PIC16C74는 chip 안에 프로그램 ROM과 data RAM을 내장하고 있어 회로의 간결성을 부여하는데 큰 장점을 가지고 있다.^[8] PIC16C74는 A/D 변환부에서 변환된 디지털 신호를 입력받아, 그에 상응하는 CO₂ 농도(ppm)로 변환하고, 또한 온도 센서에서 입력된 센서부의 온도를 PID 알고리즘의 입력 변수로 받아 그에 적합한 신호를 열선부에 출력하는 역할을 수행한다.

3. PID 온도 제어 시스템의 설계

3.1 PID 온도 제어 시스템의 개요

PID 온도 제어는 비례·미분·적분 제어라고도 하며, 적분(integral)동작에 있어서의 편차를 없애는 성질과 미분(differential)동작의 진동을 제동시키는 성질을 부가하여 비례(proportion)동작과 조합한 것으로, 편차가 없고, 적응성이 좋은 응답을 실현할 수 있는 장점을 가지고 있다.^[1]

PID 제어기의 입출력 관계식은 식 (2), 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

continuous system :

$$\mu = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (2)$$

(μ : output value, e : 오차,

K_p : 비례이득, T_i : 적분시간, T_d : 미분시간)

discrete system :

$$\mu(kT) = K_p \left(e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(it) + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e(k-1)T] \right) \quad (3)$$

(T : sampling time, k : k th sample number)

식 (2)는 아나로그 제어기의 입출력 관계식이며, 식 (3)은 디지털 제어기의 입출력 관계식을 나타낸다.

3.2 PID 최적 계수 설정

전항에서 제어 대상을 수식으로 표현할 수 있었으나, PID 제어를 실행할 경우는 최적의 파라미터를 설정하지 않으면 좋은 응답(출력)을 기대할 수 없을 뿐더러 제어 대상이나 제어계 전체의 파손등 위험한 경우도 있다. 여기서는 가장 일반적인 설정법인 지글러 니콜스의 스텝 응답법^[9]을 사용하여 안정된 응답을 위한 최적 계수를 설정하였다.

지글러 니콜스에 의해 제안된 조정법칙에 따르면, 비례 이득 K_p , 적분 시간 T_i , 미분 시간 T_d 는 그림 3으로부터 얻은 스텝 응답의 낭비 시간 L , 최대 기울기 R ($\frac{\Delta y}{\Delta t}$), 그리고 식 (4)로부터 얻어진다 (표 1 참조).

$$K_p = \frac{1.2}{RL}, \quad T_i = 2L, \quad T_d = 0.5L \quad (4)$$

표 1. 지글러 & 니콜스의 최적조정계수

Table 1. Ziegler & Nichols's optimum settings coefficient

P 제어	$K_p = \frac{1}{RL}, T_i = \infty, T_d = 0$
PI 제어	$K_p = \frac{0.9}{RL}, T_i = 3.3L, T_d = 0$
PID 제어	$K_p = \frac{1.2}{RL}, T_i = 2L, T_d = 0.5L$

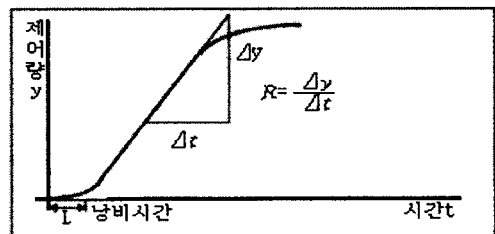


그림 3. 낭비시간(L)과 최대기울기(R)

Fig. 3. Dummy time(L) and max slope(R)

4. 실험 및 결과

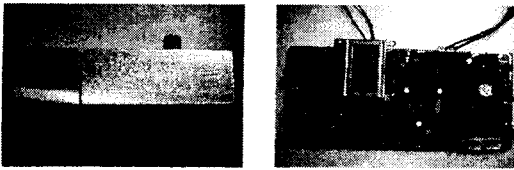


그림 4. (a) 센서부, (b) 측정 시스템
Fig. 4. (a) Sensor module, (b) Measuring system

그림 4(a)는 제작한 센서부이며, 알루미늄 재질을 사용하여 도파관을 구성하였고, 가스의 흡·배기구가 양 방향으로 구성되어 있다. 또한 내부에 파이프 히터를 삽입하여 센서부의 온도를 50℃ 유지하는 역할을 한다. 그림 4(b)는 마이크로프로세서가 내장되어 있는 계측 시스템이다. 센서부로부터 입력된 가스농도를 LCD에 표시하고, 센서부의 온도를 정온 시키기 위해 열선을 PID 제어한다.

PID 알고리즘에 의해 계산된 출력값은 0 %에서 100 %로 환산되어지며, 제어 주기를 1초(1 Hz)로 하였을 때, 출력 100 %는 제어 주기 1초 동안 모든 출력이 열선으로 나가고 있음을 의미하며, 출력 50 %는 1초 중 50 % 즉, 0.5초만 열선으로 출력된다.

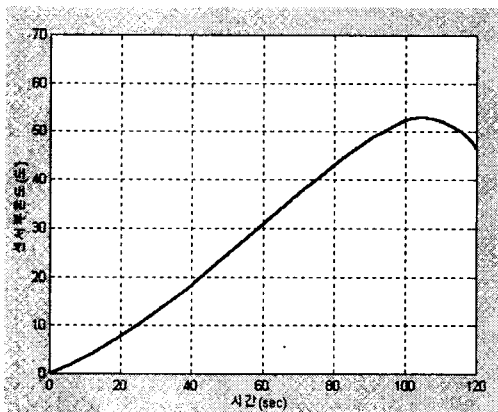


그림 5. PID 최적 계수 설정을 위한 온도 제어 곡선
Fig. 5. Temperature graph for PID auto-tuning

그림 5는 PID 최적 계수 설정을 위하여 목표값 50℃ 까지 on시킨 후 off 시킨 온도 곡선이다. auto-tuning의 결과는 R이 0.6(℃), L이 15(초)이며, K_p , T_i , T_d 는 식 (4)에서

$$K_p = \frac{1.2}{RL} = \frac{1.2}{0.6 \times 15} \approx 0.133$$

$$T_i = 2L = 30$$

$$T_d = 0.5L = 7.5$$

이다.

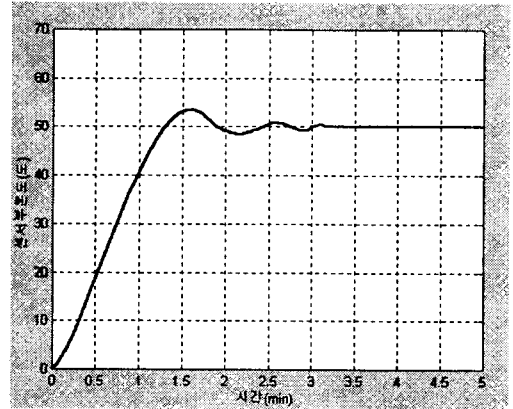


그림 6. PID 온도 제어 곡선
Fig. 6. PID temperature control graph

그림 6은 설정된 상수로 PID 제어했을 때의 온도 제어 곡선을 나타낸다. 상승에서는 over shoot가 적고 정상상태에서는 목표 값에 대해 거의 ±1℃ 이내로 정정되어 있음을 알 수 있다.

본 논문에서 구성한 적외선 CO₂ 측정 시스템에 5,000 ppm의 CO₂ 가스를 투입하고, PID 온도제어 알고리즘을 적용하지 않은 경우, 센서부의 온도 변화에 따른 출력 변화를 측정하였다. 그림 7은 온도에 대한 센서 출력 변화를 나타내고 있다. CO₂ 5,000 ppm을 투입하고 센서부의 온도를 0℃에서 40℃까지 5℃ 간격으로 측정하였다. 온도 변화에 따라 센서부의 출력값이 일정하지 않고 변화함을 알 수 있다. 즉 20℃일 경우 CO₂ 5,000 ppm을 투입하였을 때, CO₂ 센서부의 출력값은 15 mV를 나타낸다.

센서부 주변의 온도가 20℃를 중심으로 증가하거나 감소할 경우 CO₂ 센서부의 출력값 또한 온도 변화에 비례하여 나타났다.

그림 8은 CO₂ 측정 시스템에 CO₂ 5,000 ppm을 투입하고, PID 제어 알고리즘을 적용하여 센서부의 온도를 0℃에서 40℃까지 5℃ 간격으로 측정한 결과치를 나타낸 것이다. 그림 6의 결과와는 달리 PID 온도 제

어 알고리즘을 적용하였을 때, 센서부 주위의 온도가 변화되어도 CO₂ 센서의 출력은 15 mV로 유지되었음을 보여주고 있다.

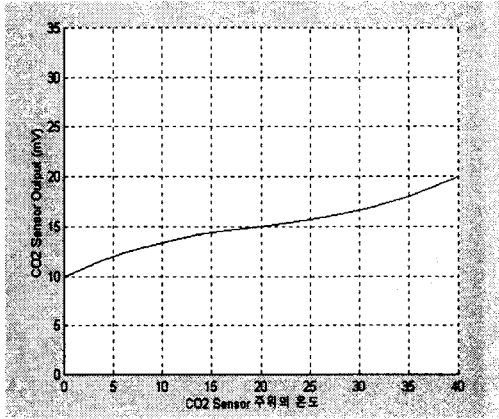


그림 7. PID 온도제어 알고리즘을 적용한 CO₂ 측정 시스템의 응답.

Fig. 7. Reponse of CO₂ measuring system non-using PID temperature control algorithm.

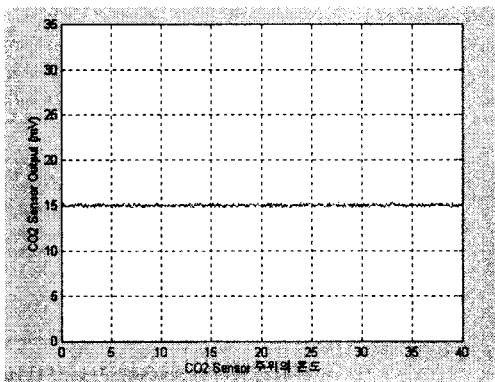


그림 8. PID 온도제어 알고리즘을 적용한 CO₂ 측정 시스템의 응답.

Fig. 8. Reponse of CO₂ measuring system using PID temperature control algorithm.

그림 9는 PID 온도제어 알고리즘을 적용하여 구현된 CO₂ 측정 시스템의 응답 특성을 보여 주고 있다. CO₂ 가스를 0 ppm에서 100,000 ppm까지 CO₂ 측정 시스템에 투입하고, 센서의 응답(mV)을 측정하였다. 센서의 출력이 CO₂ 가스 농도에 비례하여 나타나고 있음을 알 수 있다.

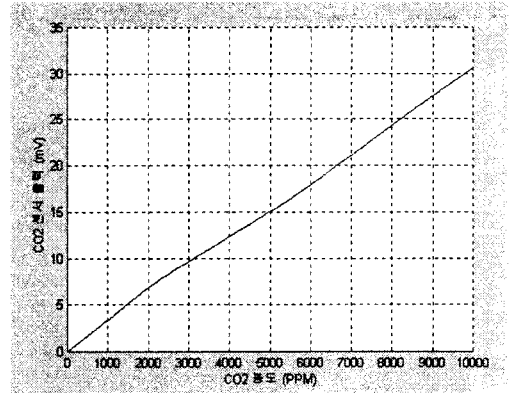


그림 9. CO₂ 가스농도에 따른 CO₂ 측정시스템의 응답.

Fig. 9. Reponse of CO₂ mearing system for CO₂ gas concentration.

5. 결론

본 논문에서는 CO₂ 측정 시스템 설계에 있어 주변 온도에 의한 측정 결과 값의 부정확성을 줄이기 위해 PID 온도 제어 알고리즘을 적용하였다.

본 논문에서 적용한 PID 온도 제어 알고리즘으로 보상한 결과는 PID 온도 제어 알고리즘을 적용하지 않은 시스템에 비해 안정적인 결과를 보여 주고 있다.

따라서 PID 온도 보상 알고리즘을 적용한 본 시스템은 온도 변화가 심한 곳에서 측정값의 정확성을 높여 줄 것으로 기대된다.

6. Reference

- [1] 1998년도 환경백서, 남형문화(주), 1998.
- [2] *Product data handbook*, CiTicel, 1988.
- [3] *Thermopile sensor*. Heimann, 1995.
- [4] Gene F. Franklin, J. David Powell, and Abbas Emami-Naeini, *Feedback Control of System*, Addison-Wesley Publishing Compa 3rd edit., pp. 179~196.
- [5] Amit Goswami, *Quantum Mechanics*, Brown Publishers, pp. 2~5, 1992.
- [6] *Data converter reference manual*, A vol. 2, 1992.

- [7] *1995 data book*, TelCom Smiconductor, Inc., 1995.
- [8] *PIC 16/17 Microcontroller data book* 1995.
- [9] J. G. Ziegler, and N. B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759-768, 1942.

 著 者 紹 介

**임형택**

1970년 12월 28일생
 1998년 3월 명지대 제어계측공학과 졸업(공학사)
 1998년~현재 명지대 전기정보제어공학부 석사과정
 주관심분야 : 가스센서응용 등

**주관식**

1972.3-1976.2 연세대학교 이과대학 물리학과 졸업(이학사)
 1976.3-1978.2 연세대학교 대학원 물리학과 이학석사
 1982.3-1987.2 연세대학교 대학원 물리학과 이학박사
 1992.4~현재 명지대학교 이과대학 물리학과 교수
 주관심분야 : 의료용 디지털 X선 영상장치 개발 등

**백승화**

1953년 6월 12일생
 1977년 연세대 전기공학과 졸업
 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박)
 1991-1992년 Univ. of Missouri columbia school of Medicine.

Research Associate.

현재 명지대 전기정보제어공학부 교수
 주관심분야 : 생체정보처리