



ASIC 칩 내장형 비분산 적외선 이산화탄소 가스센서의 온도보상

박종선* · †이승환

국립 충주대학교 기계공학과
(2007년 2월 16일 접수, 2007년 3월 23일 채택)

Temperature Compensation of NDIR CO₂ Gas Sensor Implemented with ASIC Chip

JongSeon Park · †SeungHwan Yi

Department of Mechanical Engineering, Chungju National University, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea
(Received 16 February 2007, Accepted 23 March 2007)

요 약

본 논문은 온도보상의 특성을 보여주는 비분산 적외선 이산화탄소 가스센서에 대해 기술하였다. 이 가스센서는 두개의 오목한 반사경을 가진 광 공동, 검출기 출력 전압과 온도센서의 증폭을 위해 동일한 금속 패키지 내에 제작된 ASIC 칩을 포함한 써모파일 검출기로 구성되어 있다. 새롭게 개발된 센서 모듈은 0 ppm에서 2,000 ppm까지 이산화탄소 가스의 농도를 측정할 결과 ± 40 ppm의 오차를 보였으며, 실험 결과에 기초한 가스농도의 계산 방법으로부터 센서 모듈은 15°C에서 35°C 온도 구간에서 ± 5 ppm의 오차를 나타냄으로써 높은 정확성을 가진 자기 온도 보상형 센서를 제작하였다.

Abstract – This paper describes NDIR CO₂ gas sensor that shows the characteristics of temperature compensation. It consists of novel optical cavity that has two elliptical mirrors and a thermopile that includes ASIC chip in the same metal package for the amplification of detector output voltage and temperature sensor. The newly developed sensor module shows high accuracy (less than ± 40 ppm) throughout the measuring concentration of CO₂ gas from 0 ppm to 2,000 ppm. After implementing the calculation methods of gas concentration, which is based upon the experimental results, the sensor module shows high accuracy less than ± 5 ppm error throughout the measuring temperature range (15°C to 35°C) and gas concentrations with self-temperature compensation.

Key words : IAQ (Indoor Air Quality), NDIR (Non-dispersive Infrared), CO₂ Gas sensor, STC (Self-Temperature Compensation), Concave mirrors

I. 서 론

최근 화석연료의 소비 증가로 대기오염과 이산화탄소의 배출은 날로 증가하고 있으며, 대기오염의 주된 요인은 자동차(냉각제 가스, 일산화탄소, 이산화탄소, 질소 산화물)와 산업현장인 공장에서 발생되고 있다. 대기 오염을 저감하는 능동적인 방법 중, 자동차 분야에서는 Hybrid 자동차나 전기 자동차의 보급을 들 수 있으며, 산업 부분에서는 배출가스의 정화장치를 통한 저감기술의 확대라 볼 수 있다. 대기 오염 가스 중 이산화탄소는 지구온난화를 발생시킬 뿐만 아니라, 적절

한 환기 부족에 따라 이산화탄소의 농도가 5,000 ppm 이상일 때 인체의 피로 증상을 유발하는 것으로 알려져 있다. 따라서 최근 정부에서는 에너지 절감 및 대중보건의 차원에서 전열교환기의 설치를 의무화하고 있으며, 유럽연합(European Union)은 화석 연료를 사용하는 난방기에 이산화탄소 가스 센서 모듈 장착을 의무화하여 시행하고 있는 실정이다. 따라서 최적의 상태에 전열교환기와 같은 HVAC(Heat, Ventilation & Air Conditioning) 시스템을 운용하기 위해서는 실시간으로 공기 질을 감시할 수 있는 이산화탄소 센서의 요구가 증대되고 있다.

일반적으로 이산화탄소 농도를 측정하는 방법에는 두 가지가 있다. 첫 번째는 비분산 적외선 방식을 이용

*주저자: isaac_yi@cjnu.ac.kr

하는 것이고, 두 번째는 고체 전해질 방식을 사용하는 것이다[1]. 고체 전해질 방식은 비분산 적외선보다 저가이나, 비분산 적외선 방식(NDIR)은 장기 안정성, 높은 정확성, 그리고 낮은 전력소비의 이점이 있다. 게다가 비분산 적외선 방식은 측정 대상가스가 특정 파장의 적외선을 흡수하는 광학적 원리를 사용함으로써 높은 선택성과 감도가 우수한 특성을 지니고 있다. 비분산 적외선 방식을 이용한 이산화탄소 가스센서는 Fabry-Perot 필터[2], 두개의 오목거울[3,4]과 실리콘 써모파일을 이용하고 있다. 그러나 써모파일의 출력 전압은 온도의 변화에 따라 출력 특성의 변화가 유발되기 때문에 온도에 따른 출력 전압의 보상은 정확한 이산화탄소의 농도 측정을 위하여 매우 중요하다.

본 논문에서는 두 개의 오목거울로 제작된 비분산 적외선 가스 센서를 위한 새로운 광 공동 구조의 모의해석과 이산화탄소 농도를 측정하기 위해 새롭게 설계된 센서의 실험 결과를 제시 하였으며, 온도 변화에 따른 출력 전압의 자기 온도보상 방법에 대해서 살펴보려고 하였다.

II. 이론적 고찰

광이 지나가는 통로에 가스 분자가 존재하는 경우, 광은 가스 분자의 농도에 따라 흡수되며 광의 강도는 감소한다. 이러한 분자의 흡수와 농도와의 관계를 표현한 것이 Beer-Lambert 법칙[5]이며 식 (1)과 같이 표현된다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 광 경로가 길어지면 미량의 가스 농도(x) 변화에 민감한 센서특성을 확보할 수 있다[6].

$$I_d = I_o \cdot \exp(-\alpha x L) \quad (1)$$

한편 식 (1)에 제시된 가스농도와 광 강도와의 관계는 전압과 가스농도와의 상관관계로 나타내어지는 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 이때 식 (2)에서 가스가 존재하는 경우 실리콘 열전쌍에 유기되는 기전력은 광로의 길이가 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다[6].

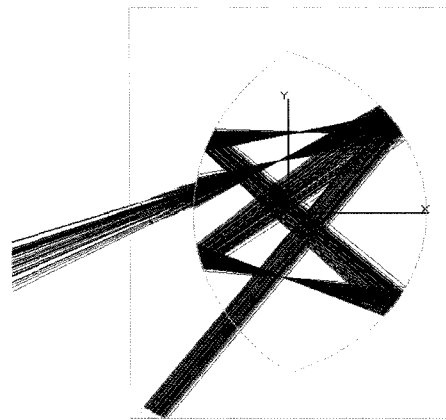
$$V_x = \eta \cdot \exp(-\alpha x L) \quad (2)$$

III. 센서제작 및 실험방법

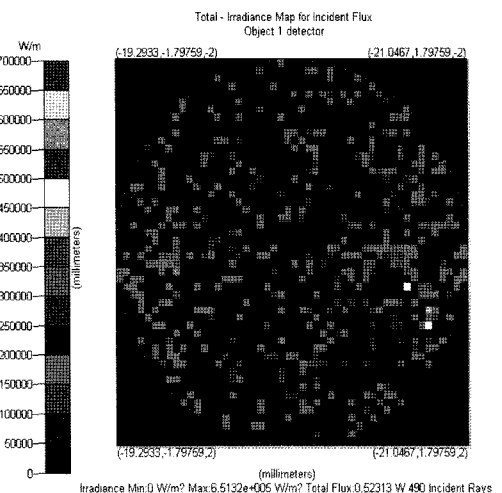
3.1. 광 공동 설계

일반적으로 비분산 적외선 가스 센서 모듈은 크게 네

개의 광 공동 구조를 이용하여 사용되고 있다. 첫 번째는 하나의 적외선(Infra-Red light) 광원과 검출기가 정사각형 또는 원형의 광 공동을 사용한 구조[7], 두 번째는 적외선램프의 열화를 보상할 목적으로 두 개의 적외선 소스와 하나의 검출기를 사용한 구조가 있다[8,9]. 세 번째는 측정 가스의 파장을 선택하기 위한 Fabry-Perot 필터[2]와 광 공동으로 원형 튜브를 사용한 것, 마지막으로 작은 공동 안에서 광 경로를 증가시키기 위한 세 개의 오목 거울 구조를 사용한 적외선 센서 모듈이다[10]. 본 연구에서는 세계 특허를 등록된 대표적인 광 공동 구조[10]를 조사하여, 독창적인 구조를 제안하고자 하였다. 전술한 광 공동은 반지름이 다른 세



(a)



(b)

Fig. 1. Simulation results of optical cavity for NDIR gas sensor; a) optical path, b) ray distribution onto thermopile detector.

개의 원을 사용한 것으로 파악되었으며, 이를 응용하여 Fig. 1에 제시한 고유한 광 공동을 설계할 수 있었다[3]. Fig. 1의 a)에 제시한 바와 같이 평행하게 조사된 적외선은 광 공동의 벽면에 다섯 번 반사되어 왼쪽 중간 지점에 적외선이 도달함을 확인할 수 있다. Fig. 1의 b)는 써모파일 검출기 표면에 도착하는 적외선 분포를 보여주는데, 아주 균일하게 도달함을 알 수 있다. 그리고 이때 약 610 mW의 전력에 의해 발생된 적외선은 광 공동 내부에서 다섯 번 반사되어 센서 전면에 입사되는 단위시간당 에너지는 약 520 mW로 감소되는 것으로 해석되었다.

3.2. 센서제작

본 연구에서 제작한 센서 모듈은 네 개의 주요 구성 요소를 가지고 있다. 첫 번째 IR(Infra-Red) 광원과 시뮬레이션 결과를 기반으로 새롭게 제작된 광 공동 그리고 써모파일 및 온도센서와 이단 증폭기를 집적한 ASIC 칩을 내장한 적외선 가스 센서부, 두 번째는 안정적이고 일정한 적외선 광원을 출력하기 위한 적외선 램프 회로부, 세 번째는 Fig. 2의 자기 온도 보상을 위해 검출기에서 출력되는 써모파일 출력전압과 선형적 출력 특성을 지닌 온도센서 출력전압을 차동 증폭한 회로이다.

차동 증폭에 의해 출력되는 최종 증폭 단에서의 출력전압은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_o = V_{TP} + \frac{R_5}{R_4}(V_{TP} - V_{TM}) \quad (3)$$

네 번째로는 제작된 각 모듈에 주소를 할당해주고 광량을 조절하며, 검출기에서 받은 신호를 A/D Convertor

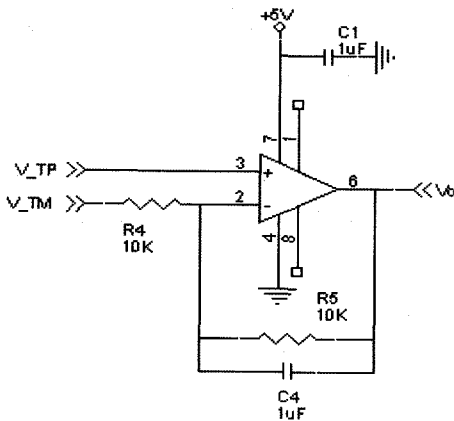


Fig. 2. Differential amplification circuit for NDIR CO₂ gas sensor.

해주는 MCU (Micro-Controller Unit)로 구성되어 있다. Fig. 3은 상기 제시된 구성 요소들을 포함한 완성된 센서 모듈을 보여주고 있다.

3.3 실험방법

본 실험에는 Fig. 4의 장비를 사용하였다. Fig. 4의 (a)는 항온·항습기로 온도(±0.2°C)와 습도(±3%RH)

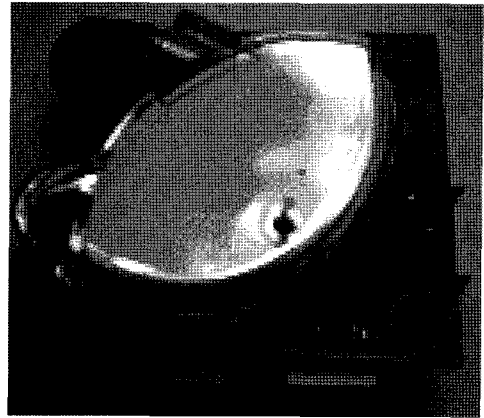
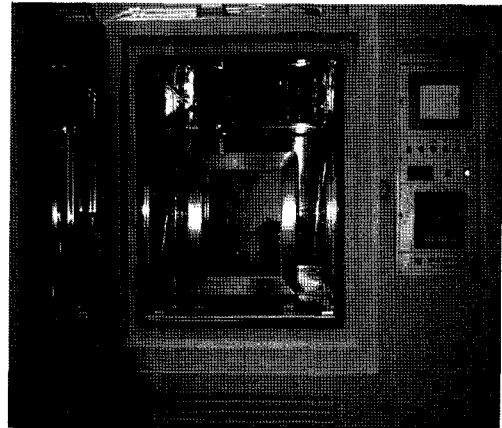
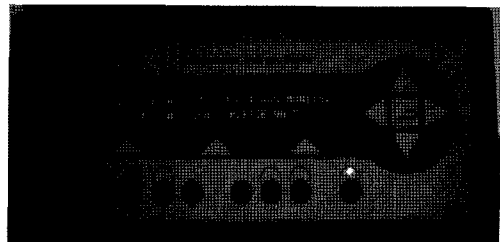


Fig. 3. Developed CO₂ gas sensor module.



(a)



(b)

Fig. 4. Experimental apparatus; (a) constant temperature and humidity chamber that has gas chamber, (b) multi-gas analyzer.

를 조절할 수 있으며, 내부에 밀폐된 가스 챔버 (Chamber)를 사용하여 다른 가스에는 영향을 받지 않게 구성하였다. Fig. 4의 (b)는 가스농도 측정 장비인 Innova사의 가스 분석기로 이산화탄소 농도를 1 ppm 이하의 정밀도로 측정하여 기준 농도(Reference concentration)를 제공해준다.

제작된 센서 모듈의 온도특성을 알아보기 위해 이산화탄소 농도가 0 ppm인 상태에서 램프의 펄스 조절 주기는 350 ms동안 켜져 있고, 5초 동안 꺼져있게 하였다. 그리고 10°C에서 65°C까지 5°C 간격으로 센서의 출력전압을 측정하였다. 실험에서 측정된 온도특성을 바탕으로 가스농도에 따른 출력특성을 알아보기 위해서 온도를 15°C에서 35°C까지 10°C 간격으로 변화 시키고, 이산화탄소 농도는 0 ppm에서 2,000 ppm까지 250 ppm 간격으로 주입시켜 각 온도 별로 총 8회에 걸쳐 실험하였다. 이 실험 결과를 바탕으로 더 정확한 센서 모듈을 제작하고자 하였다.

IV. 실험결과

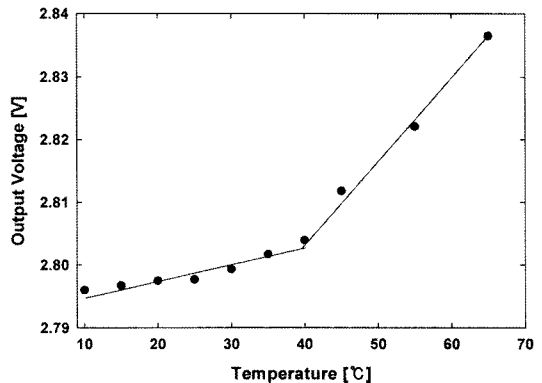
Fig. 5는 개발된 센서 모듈의 온도 특성을 보여준다. Fig. 5의 (a)에서는 차동 증폭된 출력 전압이 두개의 다른 구간을 가진다는 것을 볼 수 있다. 하나는 10°C에서 40°C이고, 다른 하나는 40°C에서 65°C 온도 구간이다. 첫 번째 구간에서 거의 2.79 V의 비슷한 출력 전압을 보여주고, 이 구간에서 전압의 차는 약 8 mV이다. 그러나 두 번째 구간에서는 2.80 V에서 2.84 V의 출력 전압의 큰 변화를 볼 수 있다. 본 연구에서는 두 번째 온도 구간에서의 특성에 대해서는 분석을 하지 않았다. 왜냐하면 본 비분산 적외선 센서가 가전분야에서 사용되는 경우, 그 동작온도는 10°C에서 40°C 사이라고 판단했기 때문이다.

Fig. 5의 (b)는 주변 온도에 따른 온도 센서의 출력 전압을 보여준다. 여기서 볼 수 있듯이 온도변화의 출력 전압은 선형적 특성을 지니며, 약 14.4 mV/°C의 감도특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

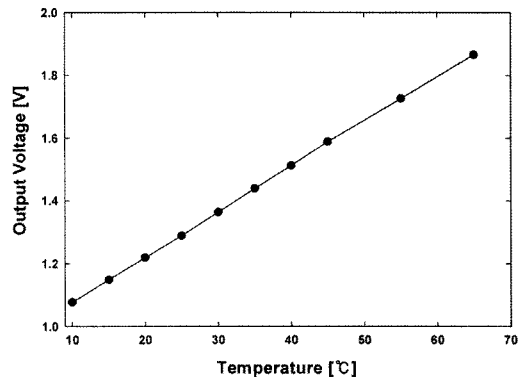
Fig. 6은 25°C에서 이산화탄소 농도에 의한 차동 증폭된 써모파일의 출력 전압 특성을 나타낸 것이다. 센서 모듈의 출력전압은 이산화탄소의 농도가 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소하는 특성을 나타내었다.

특성 곡선함수는 Beer-Lambert 법칙[5]에서 유도된 식 (1)을 기본 함수로 하여 식 (4)와 같은 함수로 정의할 수 있다.

$$y = y_0 + a \cdot \exp(-bx) \quad (4)$$



(a)



(b)

Fig. 5. Temperature characteristics of developed sensor module; (a) differentially amplified thermopile output (CO₂ concentration = 0 ppm), (b) output voltage of temperature sensor.

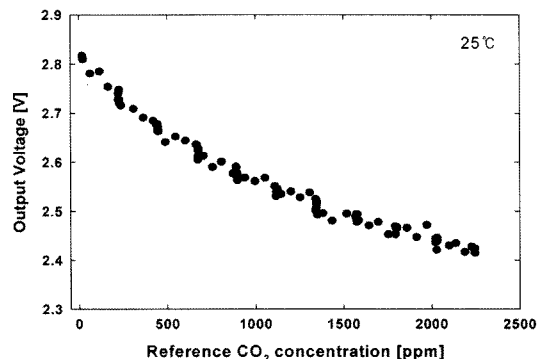


Fig. 6. Output voltage characteristics of differentially amplified thermopile as a function of CO₂ concentration.

식 (4)에서 각 변수 y_0 , a , b 는 실험 온도 구간에서의 근사화를 통해 얻을 수 있으며, 그 값을 각각 제시하면

Table 1. Temperature characteristics of the temperature dependent parameters.

	y_0	a	b
15°C	2.4084	0.392313	0.0011166
25°C	2.3875	0.41592	0.0010204
35°C	2.38038	0.422868	0.0009822

Table 1과 같다.

$y_0 + a$ 는 0 ppm에서 차동 증폭되어 출력된 전압으로 각 온도에서 약 3 mV의 아주 작은 변화가 있는 것을 볼 수 있었으며, 이는 실험 온도 구간에서 센서가 차동 증폭에 의해 온도보상을 해준다는 것을 의미하고 있다. 그리고 이산화탄소 농도변화에 따른 출력전압의 변화를 살펴봄으로써 센서모듈의 응답시간을 얻을 수 있었고, 측정된 이산화탄소 센서의 응답시간은 120 초보다 작게 나왔다.

개발된 센서 모듈의 온도 특성을 얻기 위해 Fig. 7에서 보여주는 것처럼 15°C에서 35°C까지 10°C 간격으로 가스센서의 특성 실험을 실시하였다. 실험하는 동안 가스 분석기는 MFC를 통하여 공급되는 이산화탄소 농도를 측정하였다. 실험 결과 이산화탄소의 주입량의 불균일성으로 인해 각 온도에서의 출력 전압과 농도는 기준(reference) 이산화탄소 농도와 비교하여 불일치하는 것처럼 보여진다. 그러나 측정된 이산화탄소의 농도는 각 온도와 농도에서 약 ± 40 ppm보다 작은 오차를 나타내었다.

한편 주입된 이산화탄소에 따른 센서에서 측정된 출력전압을 농도로 계산하여 제시된 식 (4)를 테일러 급수로 변환하면 식 (5)와 같이 9차 항까지 정의할 수 있다.

$$y = y_0 + a \left(1 - bx + \frac{b^2}{2}x^2 - \frac{b^3}{6}x^3 + \frac{b^4}{24}x^4 - \frac{b^5}{120}x^5 + \frac{b^6}{720}x^6 - \frac{b^7}{5040}x^7 + \frac{b^8}{40320}x^8 - \frac{b^9}{362880}x^9 \right) \quad (5)$$

식 (5)에서 농도를 구하기 위해 수치해석의 한 방법인 Newton's Method를 이용하여 프로그램을 작성하여 계산하였으며, 그 결과를 제시하면 Fig. 8, 9와 같다.

25°C에서 측정된 실험 결과를 바탕으로 Fig. 8에서 보여주듯이 이산화탄소 농도를 계산하였다. 비록 6번째 실험 단계에서 상이한 값을 나타내었지만, 모든 실험 결과는 각 측정에서 ± 30 ppm보다 작은 오차를 갖으며 선형적으로 변화되는 결과를 보여주었다.

한편 각 온도에서 측정된 8번의 실험 결과를 평균하여 이산화탄소 농도를 계산한 후, 그 결과를 기준농도와 비교하여 제시하면 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 15°C에서 35°C까지 온도 변화가 있지만 실험을

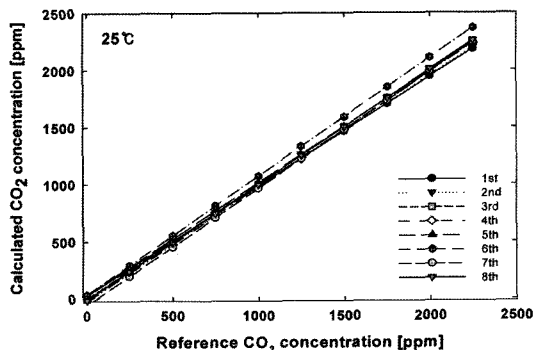


Fig. 8. Calculated CO₂ concentration vs. reference CO₂ concentration values at 25°C.

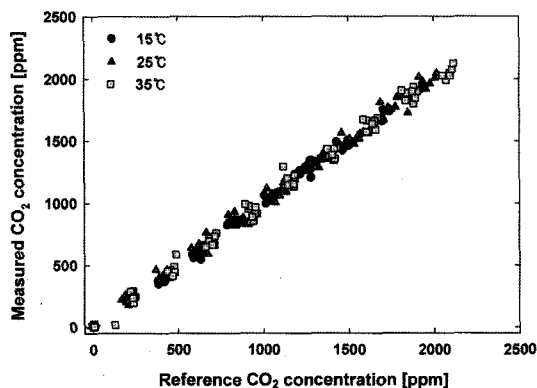


Fig. 7. Measured CO₂ concentration vs. reference CO₂ concentration as a parameter of ambient temperature.

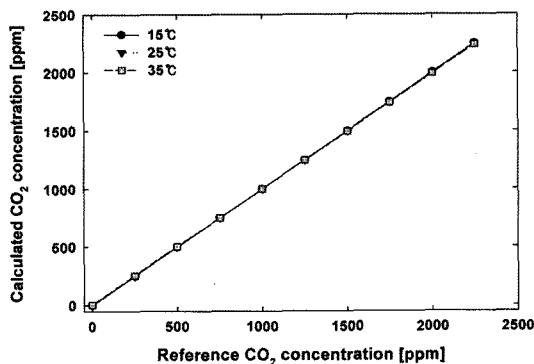


Fig. 9. Calculated CO₂ concentration as a parameter of ambient temperatures.

통하여 확보된 특성 인자를 통하여 계산된 이산화탄소의 농도는 온도와 무관한 결과를 나타내었으며, 모든 측정 구간에서 ± 5 ppm보다 작은 오차를 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 비분산 적외선 가스 센서를 위한 새로운 광 공동 구조를 설계하고, 이것에 대한 모의해석을 수행하였다. 써모파일과 온도센서의 출력을 차동 증폭한 결과 출력은 주변 온도에 의존하는 두 개의 특성 영역을 갖고 있음을 알 수 있었으며, 차동 증폭을 통하여 더욱더 정확한 가스 센서 모듈을 얻을 수 있었다. 제작된 이산화탄소 모듈은 이산화탄소 측정 농도 구간에서 약 ± 40 ppm의 오차를 보였으며, 새롭게 제안된 증폭법과 보상 알고리즘을 통하여 센서 모듈은 15°C 에서 35°C 온도 구간에서 ± 5 ppm의 오차를 나타냄으로써 높은 정확성을 가진 자기 온도 보상형 센서를 제작할 수 있었다. 본 연구 결과로부터, 제작한 적외선 가스 센서 모듈은 실내의 공기 질을 감시하는 시스템에 적용 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하는 충주대학교 지역 혁신센터(Regional Innovation Center)의 지원을 받아 수행되었기에 감사드립니다.

사용기호

I_o	: Light intensity at the IR source [W/cm^2]
I_d	: Light intensity on the detector at room temperature [W/cm^2]
x	: Gas concentration [ppm]
L	: Light traveling length from the IR source to the detector [m]
V_o	: Differentially amplified voltage[V]
V_{TP}	: Output voltage of thermopile [V]
V_{TM}	: Output voltage of temperature sensor [V]
R_4, R_5	: The resistance of Amplification circuit [Ω]
y_o	: Specific output voltage of sensor module [V]
a	: Output voltage of sensor due to the light source and filter for target gas [V]
b	: Gas absorption rate according to ambient temperature and condition

그리스 문자

α	: absorption coefficient of target gas
η	: Proportional constant that is affected by the light intensity which is coming from IR source and temperature

참고문헌

- [1] Kaneyasu, K., K. Otsuka, Y. Setoguchi, S. Sonoda, T. Nakahara and I. Aso, "Carbon Dioxide Gas Sensor Based on Solid Electrolyte for Air Quality", *Sensors and Actuators B*, **66**, 56-58, (2000)
- [2] Noro, M., K. Suzuki, N. Kishi, H. Hara, T. Wantanabe and H. Iwaoka, "CO₂/H₂O Gas Sensor Using Tunable Fabry-Perot Filter with Wide Wavelength Range", Tech. Digest of *IEEE International Conf. on MEMS*, Kyoto, Japan, 319-322, (2003)
- [3] Yi, S.H., Y.H. Park, S.O. Han, N.K. Min, E.S. Kim and T.H. Ahn, "Novel NDIR CO₂ Sensor for Indoor Air Quality Monitoring", Tech. Diges of Transducers 2005, *The 13th International Conf. on Solid-State Sensors and Microsystems*, **2**, Seoul, Korea, 1211-1214, (2005)
- [4] Park, J.M., N.H. Min, S.Y. Kweon and S.H. Yi, "Novel NDIR CO₂ Sensor with Two Concave Mirrors", *Proc. of Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro-Nano Technology 2006*, Singapore, 137-141, (2006)
- [5] Wagner, E., R. Dandliker and K. Spenner, *Sensors : volume 6 Optical Sensors*, VCH press, Chapter 12, 278, (1991)
- [6] Yi, S.-H., J.-M. Park, Y.-H. Park and S.-O. Han, "NDIR CO₂ Gas Sensor for Improving Indoor Air Quality", *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, **18**(7), 628-634, July, (2005)
- [7] Wong, J.Y., NDIR Gas Sensor, US Patent NO. 5,444,249, Aug. 22, (1995)
- [8] Chelvayohan, M., Methods and Apparatus for Infrared Gas Sensing, US Patent 6,067,840, May 30, (2000)
- [9] Park, I.Y., I.K. Lee, K.M. Kang, S.W. Kang and J.H. Cho, "An Implementation of NDIR CO₂ Gas Sample Chamber and Measuring Hardware for Capnograph System in Consideration of Time Response Characteristics", *J. of Korea Sensor*, **5**(5), 279-289, (2001)
- [10] Martin, H. and E. Goran, Gas Sensor, International Patent NO. WO98/09152, March 5, (1998)