



비분산 적외선 가스센서의 온도보상 알고리즘

박종선* · †이승환

Sensor Division, Mico MST Co., Chungju대학교 기계공학과/충주대학교 지역혁신센터
(2011년 7월 5일 접수, 2011년 8월 23일 수정, 2011년 8월 26일 채택)

Temperature Compensation Algorithm of Nondispersive Infrared (NDIR) Gas Sensor

JongSeon Park* · †SeungHwan Yi

Sensor Division, Mico MST Co., Dept. of Mechanical Eng./RIC-ReSEM, Chungju National University, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea

(Received July 5, 2011; Revised August 23, 2011; Accepted August 26, 2011)

요약

본 논문에서는 써모파일을 사용한 비분산 적외선 메탄가스센서의 온도보상 알고리즘을 제시하였다. 가스측정을 위해 적외선 감지부에 내장된 써미스터의 출력전압과 분위기 온도와 상관성을 도출하고, 협대역통과 필터 특성과 온도 변화에 따른 센서모듈(광 공동과 적외선램프)의 출력전압 특성 및 메탄가스의 흡수계수와 광 경로에 따른 출력특성 해석을 통하여 가스센서 모듈의 온도보상 알고리즘을 도출하였다.

온도보상 전 약 $\pm 1,500$ ppm 이상의 오차를 갖는 센서는 온도보상 알고리즘을 적용함으로써 20 °C 온도변화 구간에서 최대 약 180 ppm 이하의 정밀한 센서모듈을 제작하였다.

Abstract - This paper describes the temperature compensation algorithm using thermopile detector for nondispersive infrared methane gas sensor. From the output voltage of thermistor that is attached onto the infrared detector, the ambient temperature was extracted. The effects of temperatures on the properties of sensor module (the characteristics of narrow bandpass filter, optical cavity and infrared lamp, and gas absorption coefficient times optical path length) have been introduced in order to implement the temperature compensation algorithm. Even though the measurement error of developed sensor module was in the range of $\pm 1,500$ ppm, after programming the temperature compensation algorithm, the developed sensor module shows a high accuracy less than +180 ppm error within 20 °C temperature variation.

Key words : NDIR (Non-Dispersive Infrared), CH₄ gas sensor module, thermistor output voltage, narrow bandpass filter, temperature compensation algorithm.

1. 서론

대기 중 가스 분석법으로 적외선 분광법이 선택성과 내구성이 우수한 것으로 알려져 있는데, 이들에에는 푸리에 변환 적외선 분광기(fourier transform infrared spectroscopy), 적외선 가스분석기(infrared gas an-

alyzer: dispersive or non-dispersive infrared analysis), 미분 광학적 흡수분광기(differential optical absorption spectroscopy)로 분류되고 있다[1,2]. 상술한 세 가지 주요 분석방법 중, 비분산 적외선방식은 소형이고, 견고하며 가격 경쟁력면에서 우수한 특징을 지니고 있기에 자동차 배기가스 분석기 및 자동차 실내와 주거공간의 공기질 측정방법으로 사용되고 있다[3].

한편 온실효과에 영향을 주는 가스 중, 이산화탄

†주저자:isaac_yi@cju.ac.kr

소와 메탄가스는 산업화지역, 자동차 배기가스 및 주거 지역 등 광범위한 영역에서 발생 및 사용되고 있다. 특히 현대사회에서 밀폐된 공간 내에서의 활동이 지속적으로 증가함에 따라 이산화탄소 가스의 농도는 실내 공기질(indoor air quality)을 평가하는 기준으로 사용되고 있는데, 이는 대기가스를 통하여 호흡기 질환 및 이와 관련된 각종 유해건물 증후군(sick building syndrome)을 유발시키기 때문으로 알려져 있기 때문이다[4]. 또한 액화천연가스(Liquid natural gas)의 사용이 증대됨에 따라 이의 안전관리 측면에서 메탄가스의 누설 및 측정에 대한 사회적인 관심이 증대되고 있는데, 이는 LNG의 주요성분이 메탄가스이기 때문이며, 메탄가스의 폭발하한선(lower explosive limit)는 약 대기 중 5%로 알려져 있다[5]. 따라서 가정과 산업화 지역에서 메탄가스의 누설을 조기에 검출할 수 있고, 가격경쟁력이 뛰어난 뿐만 아니라 신뢰성있는 센서모듈에 대한 요구는 증가하고 있는 실정이다.

대기 중의 메탄가스를 검출하기 위한 센서로는 반도체식[6], 접촉연소식 가스센서[7]가 있는데, 국내 시중에 공급되고 있는 가연성가스센서는 접촉연소식 센서가 주류를 이루고 있다. 접촉연소식 가스센서는 제작이 용이하고, 응답속도가 상대적으로 빠르고, 경량화가 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 선택성이 결여되어 있고 장기적 신뢰성에서 취약하다는 단점이 있는 것으로 알려져 있다. 한편 광학식 가스센서는 제시된 센서보다 장기 안정성과 높은 정확성, 그리고 낮은 전력소비의 이점이 있으며, 측정 대상가스 농도에 따른 적외선 흡수와 이에 따른 출력단의 전압변동을 이용하는 원리를 사용함으로써 높은 선택성과 감도가 우수한 특성을 지니고 있음[3]이 알려져 있다. 그러나 광학식 가스분석법에서 사용되고 있는 실리콘 써도파일 또한 주변온도의 변화에 따라 출력전압특성의 변화가 유발됨으로써 측정된 가스농도의 온도보상이 필수적이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 정확도와 신뢰성이 높은 광학식 가스검출 방식 중, 비분산 적외선(NDIR) 가스센서의 온도에 따른 출력전압의 측정과 고찰을 통해 주변온도의 변화에 무관한 가스농도 측정 알고리즘을 제시하고자 한다.

II. 이론적 고찰

적외선 광 강도와 온도에 따른 적외선 센서의 출력 전압간의 관계를 도출하면 식 (1)과 같다[8].

$$V_x = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot \frac{r_i^2 \cdot 0.97^2 \cdot I_0}{\sigma \cdot r_s^2 \cdot (T_2 + T_{amb.})(T_2^2 + T_{amb.}^2)} \cdot \exp(-\alpha x L) = \eta \cdot \exp(-\alpha x L) \quad (1)$$

단, r_s : 집속된 빔의 반경 (m), r_i : 초기 평행 광의 반경 (m), η : 비례상수

상기 제시한 식 (1)은 적외선 가스센서의 제작 시 특정파장의 투과를 위해 사용된 협 대역통과 필터(narrow bandpass filter)의 고유특성(3.3 μm 의 메탄가스 흡수파장을 중심으로 74 nm의 반치폭을 갖고 적외선을 투과시킴)으로 인해 측정가스의 존재 유무와 관련 없이 조사된 적외선에 대응한 일정 전압을 출력하기 때문에 이에 따른 영향을 고려하여야 하며, 이를 고려한 수식을 제시하면 식 (2)와 같다.

$$V_{out} = V_{offset} + \eta \cdot \exp(-\alpha x L) \quad (2)$$

단, V_{out} 은 측정가스의 량에 따른 출력전압 [V], V_{offset} 은 협 대역통과 필터의 특성에 따른 출력전압 [V]. α : 검출 가스의 흡수계수(absorption coefficient), x : 가스농도(ppm), L : 광 경로의 길이(m)

따라서 식 (2)식에서 측정대상 가스의 농도, x , 를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$x = \frac{\ln \eta - \ln(V - V_{offset})}{\alpha \cdot L} [ppm] \quad (3)$$

III. 센서모듈의 제작과 실험방법

고유한 센서모듈의 제작을 위해 모의해석을 실시하였고[8], 이를 기반으로 비분산 적외선 메탄가스 센서 모듈을 제작하였으며, 이를 제시하면 Fig. 1과 같다.

센서 모듈을 제어하기 위해 신호 변환 및 온도보상 알고리즘을 내장할 수 있는 8051core계열의 microm을 사용하였으며, 적외선 램프의 점등시간(on time)을 350 ms, 점멸시간(off time)을 5 s 간 반복하게 제어함으로써 센서의 출력에 안정을 기하도록 하였다. 또한 16 bits ADC(analog-digital conversion)에 의해 분석된 농도에 따른 출력전압을 프로그램에 의해 농도 값으로 변환시켜주도록 설정하였고, 변환된 농도 값은 RS232통신을 통해 컴퓨터로 저장시킴으로써

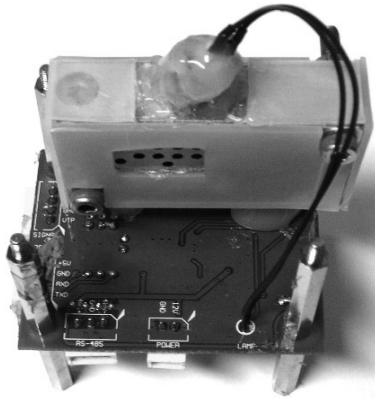


Fig. 1. Developed CH4 gas sensor module.

실험결과를 해석하기에 용이하도록 하였다.

한편 제작된 비분산 적외선 가스센서의 온도보상 알고리즘 도출실험은 항온·항습기안의 가스챔버 내에서 실시되었다. 센서모듈을 가스챔버 내부에 설치된 통신선에 결합시킨 후 온도를 15 °C에서 35 °C 까지 10 °C 간격으로 변화 시키고, 습도는 45 %R.H.로 설정하여 실험을 하였는데, 이때 가스 챔버 내에 존재할 수도 있는 타 가스의 영향을 받게 하지 않기 위해서 고순도 Air로 Purge함으로써 메탄가스의 농도를 거의 0 ppm으로 설정하였다.

이때 가스 농도 변화에 따라 출력되는 써모파일 전압과 써미스터 전압 값을 RS232 통신을 통해 메인 컴퓨터에 저장 시켰으며, 실험의 기준 가스 농도 값은 고정밀도의 가스농도 측정 장비인 INNOVA사의 다중 가스 분석기(multi-gas analyzer)로 메탄(CH4) 농도 측정하여 저장하였다.

이렇게 동일한 시험을 10 회 이상 실시 한 후, 이들의 평균값으로 각 가스농도에 따른 출력값으로 설정하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 온도보상 인자도출

Fig. 2는 가스 챔버 내부온도의 변화에 따른 온도 측정용 센서인 써미스터 출력전압의 온도의존성을 나타 낸 것이다. 각 온도에서 측정된 써미스터 출력 전압으로부터 분위기 온도와 관련된 식을 도출하면 식 (4)를 얻을 수 있었으며, 이를 온도보상을 위한 기준온도로 설정하여 micom에 저장하였다.

$$T_{amb.} = -67.222 + 154.627 \cdot T_v - 53.779 \cdot T_v^2 \quad (4)$$

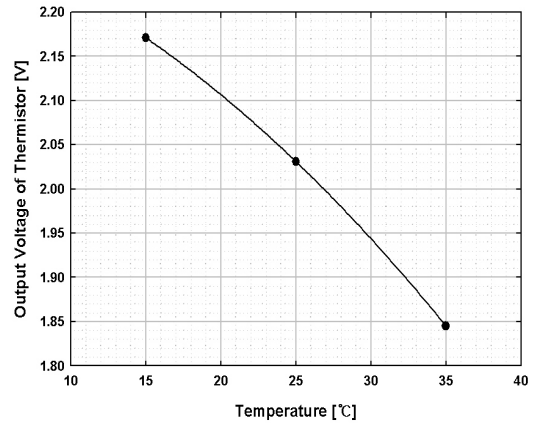


Fig. 2. Output voltage of thermistor as a function of ambient temperature.

Fig. 3은 온도 15 °C에서 35 °C로 증가시키면서 측정 한 데이터의 온도인자를 수식으로 유도하기 위해 각 온도별 측정값으로부터 유도된 인자들에 대한 그래프를 나타낸 것이다.

이들 각 온도에 따른 파라미터를 분위기 온도의 존성 식으로 표현하면, 아래의 식(5), (6) 및 (7)과 같다.

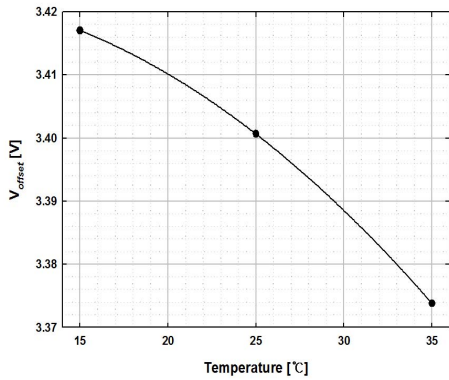
$$V_{offset} = 3.422 + 4.480 \times 10^{-4} \cdot T_{amb.} - 5.225 \times 10^{-5} \cdot T_{amb.}^2 \quad (5)$$

$$\eta = 2.692 \times 10^{-1} - 6.99 \times 10^{-5} \cdot T_{amb.} - 3.33 \times 10^{-9} \cdot T_{amb.}^2 \quad (6)$$

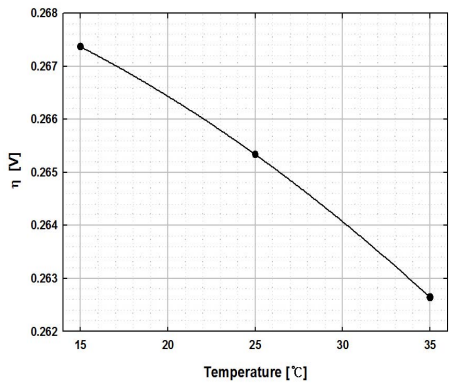
$$\alpha \cdot L = 1.250 \times 10^{-4} - 7.971 \times 10^{-7} \cdot T_{amb.} + 5.685 \times 10^{-9} \cdot T_{amb.}^2 \quad (7)$$

한편 온도변화에 따른 적외선 가스센서의 출력특성을 제시하면 Table-1과 같으며, Table-1 및 식 (2)에서 약 0 ppm에서 가스센서의 출력전압은 온도변화에 따른 적외선램프의 출력특성과 헐 대역통과 필터의 특성으로 인한 것임을 알 수 있으며, 온도가 증가함에 따라 검출대상가스의 적외선 흡수계수 또한 감소하는 것으로 실험결과 나타냈다.

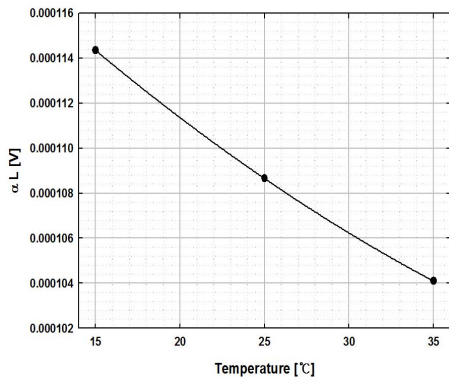
따라서 식(4)의 써미스터 출력전압으로부터 측정 시의 분위기 온도를 산출하고, 이 값을 상기 제시한 식(5), (6), (7)에 대입함으로써 온도의 변화에 따른 메탄가스센서의 각 계수의 추이를 확인할 수 있으며, 이들을 센서모듈의 Micom에 프로그래밍하여 가스센서의 온도에 따른 가스농도 측정의 보정을 실시하도록 하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Temperature coefficients of thermopile detector: (a) offset voltage, (b) temperature dependent coefficients, (c) absorption coefficient time optical path.

4.2. 온도보상

Fig. 4는 온도보상 알고리즘을 micom에 탑재한 후 온도변화에 따른 제작된 센서모듈의 메탄가스농도 측정결과를 가스분석기 결과와 비교한 것이다.

메탄가스를 0 ppm에서 10,000 ppm까지 1,000 ppm 씩 10단계로 주입했을 때, 가스 분석기와 제작된 비분산 적외선 메탄가스 센서의 농도차는 전 영역에 걸쳐 -60 ~ +180 ppm의 오차범위에서 메탄 농도 값을 출력하는 것을 확인할 수 있었으며, 표준편차는 약 60 ppm을 나타내었다. 즉, 제작된 비분산 적외선 메탄 가스센서는 가스 분석기와 거의 동일한 출력특성을 나타낸 것을 알 수 있었는데, 이는 급격한 온도의 변화가 없는 상태에서 가스농도의 측정은 본 실험의 기준 측정기로 사용한 가스분석기와 비교하여 정확한 측정결과를 제시하는 것으로 판단할 수 있다.

Table-1. 온도변화에 따른 써미스터의 출력전압과 메탄가스센서의 출력특성

측정온도 [°C]	Thermistor 출력전압 [V]	V_{0ppm} [V]	η [V]	$\alpha \cdot L$ [ppm-1]
15	2.171	3.684	0.267	1.144×10^{-4}
25	2.031	3.666	0.265	1.087×10^{-4}
35	1.845	3.636	0.262	1.041×10^{-4}

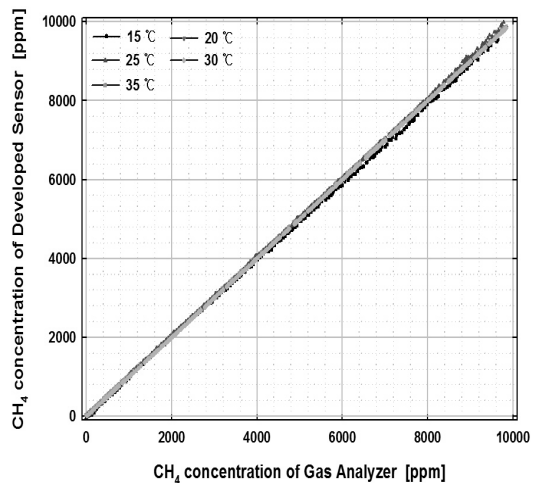


Fig. 4. Methane gas measurement results compared to gas analyzer as a parameter of ambient temperature.

Table-2. Measurement error between gas analyzer and developed sensor module implemented with temperature compensation algorithm.

측정온도 [°C]	35	30	25	20	15
Gas Analyzer 측정값 [ppm]	2,846	2,776	2,707	2,661	2,605
온도 보상된 센서 측정값 [ppm]	2,702	2,676	2,598	2,576	2,435
측정 오차 [ppm]	144	100	109	85	170

한편 표-2는 온도보상 알고리즘을 탑재한 메탄가스 센서 모듈을 메탄가스농도 2,846 ppm에서 온도 35 °C에서 15 °C로 연속적으로 온도를 변화시키면서 측정된 결과를 나타낸 것이다. 온도보상을 하지 않은 센서의 경우, 25 °C 측정결과와 비교하여 동일 출력전압을 기준으로 약 1,500 ppm 이상의 오차를 지니고 있음을 알 수 있었으나, 온도보상을 실시한 후 5 °C 간격으로 가스농도를 측정된 결과, 가스분석기의 측정결과와 비교하여 최저 약 85 ppm과 최대 170 ppm의 오차를 갖는 정확한 센서모듈을 확보할 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 적외선 검출부에 내장된 써미스터 출력전압을 기준으로 가스 측정용 센서로 사용된 써모파일 적외선 센서 출력전압의 온도의존성과 이에 따른 특성을 살펴봄으로써 메탄가스센서 모듈의 온도변화에 따른 가스검출 특성의 상관성 해석을 실시하였다. 써미스터 출력전압으로 도출한 분위기 온도와 제안된 온도보상 알고리즘을 통하여 보상 전 약 1,500 ppm 이상의 오차를 갖는 센서모듈은 가스분석기와 비교하여 -60 ppm에서 최대 +180 ppm의 오차 및 표준편차 60 ppm을 갖는 정확성을 확보한 센서모듈을 제시할 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 일부분은 충주대학교 지역혁신센터(RIC-ReSEM)의 지원에 의하여 수행되었으므로, 이에 감사드립니다.

사용기호

I_0 : Light intensity at the IR source [W/cm²]

I_d : Light intensity on the detector at room temperature [W/cm²]

x : Gas concentration [ppm]

L : Light traveling length from the IR source to the detector [m]

r_s : radius of concentrated radiation [m]

r_i : initial radius of beam radiation [m]

$T_{amb.}$: Ambient temperature [K]

T_2 : Absolute temperature of thermal radiation [K]

그리스 문자

α : absorption coefficient of target gas

η : Proportional constant that is affected by the light intensity which is coming from IR source

σ : Boltzmann 상수, 5.67×10^{-8} [W/(m² · K⁴)]

α_A, α_B : Seebeck coefficients [mV/K]

참고문헌

- [1] A. Nefel, C. Fischer, C. Flechard, "Measurements of greenhouse gas fluxes from agriculture", J. International congress series, 1293, 3-12, (2006)
- [2] R. Rubio, J. Santander, J. Fonollosa, L. Fonollosa, L. Fonseca, I. Gracia, C. Cane, M. Moreno, S. Marco, "Exploration of the metrological performance of a gas detector based on an array of unspecific infrared filters", Sensors and Actuators B:Chem., 116, 183-191 (2006)
- [3] R. Frodl and T. Tille, "A high-precision NDIR CO₂ gas sensor for automotive applications", IEEE Sensors, 6, 1697-1705, (2006)
- [4] J. Sundell, "On the history of indoor air quality and health", Indoor Air, 14, 51-58 (2004)
- [5] C. Massie, G. Stewart, G. McGregor, and J. R. Gilchrist, "Design of a portable optical sensor for methane gas detection", Sensors and Actuators B: Chem., 113, 830-836, (2006)
- [6] E. Wagner, R. Dandliker, and K. Spenner, "Sensors: volume 6 Optical Sensors", VCH press, Chapter 12, 278, (1991)
- [7] 윤동현, "이산화탄소 가스 검출기", Korea Patent NO. 1019970077148, (1999)
- [8] 박중선, 이승환, "광학적 가스센서 특성향상을 위한 광 공동 구조의 고찰", KIGAS, 12(4), 63-68, (2008)