

## 주변 온도 영향에 따른 비분산 적외선 가스센서의 출력 특성 해석

박한길 · 이승환<sup>+</sup>

### Analysis of Output Voltage Properties of Non-dispersive Infrared Gas Sensors According to Ambient Temperatures

Han-Gil Park and Seung-Hwan Yi<sup>+</sup>

#### Abstract

This article describes the output properties of non-dispersive infrared carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) sensors resulting from the changes in ambient temperatures. After the developed sensor module was installed inside the gas chamber, the temperature was set to 267 K, 277 K, 300 K, and 314 K, and the concentrations of CO<sub>2</sub> gas were increased from 0 to 5,000 ppm. Then, the output voltage at each concentration was obtained. Through these experimental results, two observations were made. First, both the CO<sub>2</sub> sensor and the reference sensor showed an increase in the output voltages as the temperature rose from 0 ppm, Second, the full scale outputs of the CO<sub>2</sub> sensor grew as the temperature increased. The output characteristics were analyzed based on two factors: change in the radiant energy of the infrared light source and change in the absorptivity of CO<sub>2</sub> gas according to the ambient temperature. Additionally, temperature compensation methods were discussed.

**Keywords:** NDIR (Non-Dispersive Infrared), CO<sub>2</sub> Gas sensors, Infrared Sources, Blackbody radiation, Thermal resistance, Absorptivity

#### 1. 서 론

최근 IoT (Internet of Things) 시대의 도래로 인해 기존 센서 뿐만 아니라 마이크로센서의 산업적 응용이 더욱 주목받고 있으며, 이들의 통합 시스템의 응용이 현실화되고 있다. 특히 가스센서의 경우, 반도체 공정기술과 MEMS (Microelectromechanical Systems) 기술의 접목을 통한 소형화 및 집적화를 통해 다양한 가스 성분을 검출할 수 있는 상태로 발전하고 있으며[1], 물리적 원리에 의한 가스센서의 연구개발이 보다 활성화되고 있는 상태이다[2].

그러나 우리가 실제로 사용하는 여러 센서 모듈은 목적에 따라 다양한 환경조건에서 사용되고 있으며, 가스센서의 경우, 측정 대상 가스의 물리적 상태 또는 화학적 상태가 측정하는 환경요인 등의 영향을 받아 그 특성이 변화될 수 있다. 따라서 측

정 환경변화에 대한 영향하에서도 출력이 변하지 않고, 이로 인해 측정 대상인 가스 농도에 따라 분해능과 정확성이 뛰어난 비분산 적외선 가스 센서를 개발하기 위해 센서의 출력에 영향을 줄 수 있는 환경적 요인들이 무엇인지 정확하게 파악하고, 어떠한 영향을 적외선 센서에 미치는지 이해할 필요가 있다.

한편 비분산 적외선 방식을 이용한 가스 측정 센서는 기본적으로 적외선 광원, 광학적 도파관 (optical waveguide)와 적외선 센서로 구성되어 있는데, 적외선 광원과 적외선 센서는 주변 환경에 영향을 받게 된다. 따라서 적외선 가스센서는 주변 분위기 상태 (습도, 가스의 온도와 주변 온도, 압력 등) 중 주변온도에 의해 센서 모듈이 받는 열적인 영향, 가스를 주입하면서 생기는 센서 모듈 내부에서 가스의 대류 현상 등이 측정 결과에 큰 영향을 줄 수 있음을 고려할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 비분산 적외선 방식을 이용한 이산화탄소 측정 센서 모듈의 실험 결과를 통해 비분산 적외선 방식의 센서 구성 요소인 적외선 광원과 적외선 센서의 온도 의존성을 적외선 센서의 출력 특성을 해석함으로써 비분산 적외선 가스 센서의 기본 특성을 살피고, 적외선 센서의 온도 의존성 고찰을 통해 비분산 적외선 가스센서의 온도 보상법에 대해 논의하고자 한다.

Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehakro, Chungjushi, Chungbuk 27469, Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: isaac\_yi@ut.ac.kr

(Received: Jun. 30, 2018, Revised: Aug. 3, 2018, Accepted: Aug. 9, 2018)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 이론적 배경 및 실험 방법

2.1 이론적 배경

비분산 적외선 센서의 출력은 적외선 광원에서 방사되는 에너지와 측정대상 가스의 농도, 온도에 따른 측정대상-가스의 흡수 계수 (absorption coefficient)에 의해 결정된다.

따라서 비분산 적외선 센서의 출력을 이해하기 위해서는 첫째 적외선 광원에서 방사되는 에너지의 주변 온도 의존성과 둘째 측정 대상가스의 적외선 흡수 계수의 온도 의존성에 대한 정확한 이해가 요구되므로, 주변 온도가 적외선 광원과 적외선 센서에 미치는 영향에 대해 이해하기 위해 열전도와 방사에 관한 열역학적인 이해가 필요하다.

적외선 광원을 흑체로 가정하면, 흑체에서 방출되는 에너지 총량( $R_T$ )는 흑체의 표면 온도에 비례한 값으로 Stefan-Boltzmann 법칙인 식 (1) 로

$$R_T = \int_0^\infty R_T(\nu) d\nu = \sigma T^4 \tag{1}$$

여기서  $\nu$  는 주파수(Hz), T 는 적외선 광원인 흑체의 표면 온도(K),  $\sigma$  는 Stefan-Boltzmann 상수  $5.67032 \times 10^{-8} (W/m^2 \cdot K^4)$ 로 주어진다[3].

측정 대상 가스의 특정 파장 흡수에 의해 감소한 적외선 에너지는 Beer-Lambert 법칙으로 알려져 있으며[4], 센서에서 측정된 에너지는 측정 대상 가스의 농도와 적외선이 측정 대상 가스를 통과하는 거리에 따라 지수함수적으로 반비례하는 에너지 ( $I$ )로 식 (2) 로 주어진다.

$$I = I_0 \exp(-qLx) \tag{2}$$

여기서  $q$  는 측정 대상가스 흡수계수,  $L$  은 광원에서 센서까지의 광 경로 길이(m),  $x$  는 측정 대상 가스의 농도(ppm),  $I_0$  는 입사되는 적외선 광원의 초기 에너지이다.

한편 주변 온도와 농도에 따라 변하는 측정 대상 가스의 적외선 흡수율( $\alpha$ )는 식 (2)에 제시된 흡수 계수( $q$ )를 대입하여 식 (3)으로 나타낼 수 있다[5].

$$\alpha = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - e^{-qw} \tag{3}$$

$$w = xPL/RT$$

여기서  $w$  는 광 경로에 수직인 단위 면적당 기체의 질량이며,  $x$  는 측정 대상 가스의 농도,  $P$  는 전체 압력(Pa),  $R$  은 기체 상수,  $T$  는 측정 대상 가스의 온도(K)로 주어진다.

적외선 광원의 출력 에너지는 식(1)에서 흑체 온도의 네제곱에 비례하는 것을 알 수 있는데, 실험에 사용될 적외선 광원인 IMPORTEC사의 INTX MILR17-900은 Fig. 1과 같이 인가되는

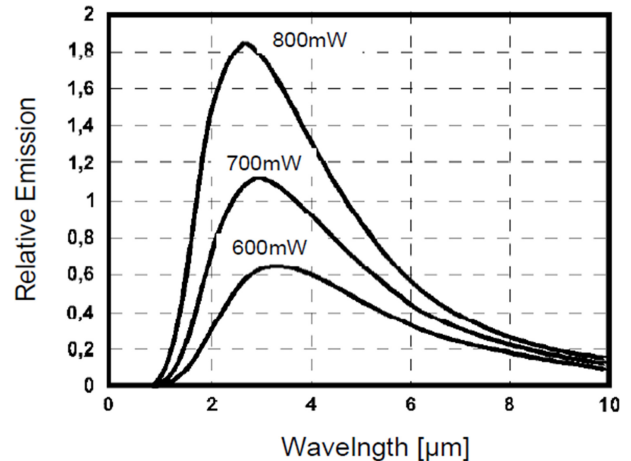


Fig. 1. Relative emitted energy as a function of wavelength and the applied power (IMPORTEC INTX MILR17-900) [6].

전력량의 증가를 통해 흑체 표면온도를 상승시켜 방사되는 에너지량을 증가시킨다. 따라서 적외선 광원을 사용하는 주변 온도와 흑체 표면의 온도 차이에 의해 열 전도가 발생되고, 이로 인해 흑체 온도는 적외선 광원이 사용되는 주변 온도의 변화에 따른 의존성이 있게 된다. 따라서 이 부분에 대해 이해하기 위해서 주변 온도에 따른 흑체의 열전도 현상을 이해할 필요가 있으며, 이에 대해 살펴보면 아래와 같다.

열전도는 온도가 서로 다른 물질 사이의 열 이동 현상이고, 이때 열전도를 설명하기 위해 열 저항이라는 개념을 도입하는데, 식 (4)로 주어진 열 저항은 온도가 다른 물질 사이에 전도를 방해하는 벽을 열 이동의 저항으로 보고 벽과 물질의 접촉면에 반비례하고 두께에 비례한 형태로 도선에서의 전기 저항과 유사한 형태로 표현된다[7].

$$R_{th} = \frac{l}{kA} \tag{4}$$

여기서  $k$ 는 벽의 열 전달 계수( $W/K \cdot m$ ),  $A$ 는 열 전도가 발생하는 단면적 ( $m^2$ ),  $l$ 은 벽의 두께(m)로 주어진다.

서로 다른 온도의 물질이 직접적인 접촉을 통해 열전도가 일어나는 경우에는 접촉면을 통해서 열전도가 발생하기 때문에 전도가 발생하는 단면적만 고려한 형태의 열 저항으로 식 (5)로 표현된다.

$$R_{th} = \frac{1}{hA} \tag{5}$$

여기서  $h$ 는 물질 사이의 열 전달 계수( $W/K \cdot m^2$ )이다. 그리고 물질 사이의 열전도 현상에 의해 이동되는 에너지,  $\dot{Q}$ 는 식 (6)으로 주어진다.

$$\dot{Q} = \frac{T_H - T_L}{R_{th}} \tag{6}$$

여기서  $T_H$ 는 고온 물질의 온도(K),  $T_L$ 은 저온 물질의 온도(K)이다.

열전도 현상 중에서 우리가 고려할 부분은 적외선 광원의 흑체에서 적외선 방사가 일어나면서 생기는 흑체와 주변 온도 차이로 인한 전도 현상이다. 센서 모듈 내부에서 가스 주입으로 생기는 대류에 의해 전도는 적외선 광원 앞에 사파이어 필터가 장착되어 흑체가 받는 대류 영향은 거의 없기에 고려하지 않는다.

적외선 방사에 의한 열전도에서의 열 저항은 흑체에서 주변 대기로 방사 될 때의 에너지 이동 식(7)을 식(6)과 비교하여 식(8)로 정의 할 수 있다.

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A (T_{body}^4 - T_{amb}^4) = h_{rad} A (T_{body} - T_{amb}) \quad (7)$$

$$R_{th} = \frac{1}{h_{rad} \cdot A} \quad (8)$$

여기서  $\epsilon$ 는 흑체의 방사율,  $T_{body}$ 는 흑체 온도(K),  $T_{amb}$ 는 주변 온도(K),  $A$  흑체의 표면적( $m^2$ ),  $h_{rad}$ 는 방사에서의 열 전달 계수( $W/K \cdot m^2$ )이다.

초기 흑체의 온도는 대기 온도와 동일하지만, 전력을 인가함에 따라 가열되고, 흑체의 가열 면과 대기에 노출된 방사면으로 에너지 이동이 발생하게 되며, 에너지가 이동 함에 따라 흑체는 온도가 변화하게 된다. 이렇게 가열된 흑체의 온도는 식 (9)로 정의한다.

$$T_{body} = T_{amb} + \frac{\dot{g} \cdot V}{hA} = T_{amb} + R_{th} \cdot \dot{Q}_{rad} \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \dot{g} \cdot V$$

여기서  $T_{body}$ 는 흑체의 온도(K),  $T_{amb}$ 는 주변온도(K),  $\dot{g}$  단위 체적당 에너지 공급량( $W/m^3$ ),  $V$ 는 흑체 부피( $m^3$ ),  $R_{th}$ 는 열 저항( $K/W$ )으로 주어진다.

식 (9)의 흑체에 공급되는 에너지 ( $\dot{g} \cdot V$ )는 적외선 광원에 인가되는 전력과 동일하게 볼 수 있으며, 따라서 흑체 온도를 적외선 광원에 인가되는 전력에 관한 식으로 표현하게 되면 식 (10)과 같다 [8].

$$T_{body} = T_{amb} + R_{th} \cdot P_{electric} \quad (10)$$

여기서  $P_{electric}$ 는 흑체에 인가되는 전력(W)이다.

## 2.2 실험 방법

본 실험에서 긴 광 경로를 얻기 위해 제작한 센서모듈은 White-cell의 원리를 바탕으로 제작하였으며[9], 긴 광 경로는 식 (2)에서 입력 에너지와 출력 에너지 차를 크게 하여 상대적으로 낮은 농도의 이산화탄소 환경에서도 측정이 가능하게 만들어준다. 즉 분해능을 향상시킬 수 있는 구조가 가능하게

된다[10].

온도 영향에 따른 센서의 출력을 확인하기 위해 항온·항습도 챔버에 센서모듈을 넣어주고, 온도는 267 K, 277 K, 300 K, 314 K에서 실험을 진행하였다. 챔버 내부의 센서 모듈을 열적 평형 상태에 도달 시켜주기 위해 온도 설정 후 7시간 이상 대기하여, 온도 센서(Pt-100)의 출력 값이 이전 실험 값의  $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  이내일 때, 각 센서에서 출력되는 값을 컴퓨터에 자동으로 저장시켰으며, 센서 모듈 내부의 가스를 고순도질소 가스(99.99%)를 이용해 전부 배출시켜 내부의 이산화탄소 농도를 0 ppm에 가까운 상태로 만들어 준 후, 순차적으로 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 5000 ppm의 가스를 400 초 동안 주입하여 온도와 이산화탄소 농도에 따른 센서의 출력을 확인하였다. 센서 모듈 내부의 가스 농도는 다중 가스 분석기 (INNOVA-1312)를 통해 ppm단위로 정확하게 측정하였다[11].

이전 실험 결과에서 습도의 영향보다는 온도에 의한 센서의 출력 특성 변화가 지배적인 것을 확인하였고[11], 이 논문에서 중점적으로 다루게 되는 적외선 광원은 Fig. 2 와 같이 적외선 광원에 사파이어 필터가 장착되어, 적외선 광원의 흑체가 센서모듈 내부의 습도와 대류에 의한 직접적인 영향을 거의 받지 않아 본 실험에서는 습도와 가스의 유속에 의한 영향은 고려하지 않았다.

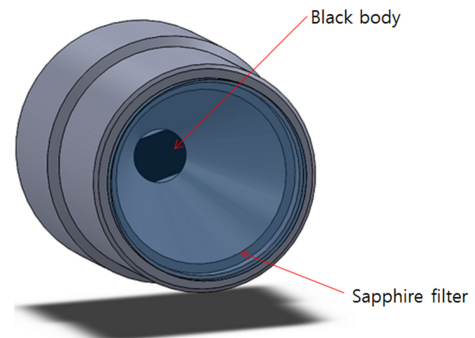


Fig. 2. 3-D modelling of continuous blackbody infrared Source with sapphire filters (MIRL17-900).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험 결과

이산화탄소 농도와 온도에 따른 이산화탄소 가스센서의 출력 전압은 Fig. 3 와 같이 측정되었다. Fig. 3 (a)와 같이, 0 ppm 에서는 상대적으로 높은 온도에서 높은 출력 전압 값을 보이고, 가스 농도(ppm)가 0~5000 ppm까지 증가함에 따라 높은 온도에서의 출력 전압 값이 상대적으로 큰 폭으로 감소하는 양상을 보였다. 가스의 농도에 영향을 받지 않는 기준 적외선 센서의 출력 전압은 Fig. 3 (b)와 같이 온도가 증가 함에 따라 출력전압

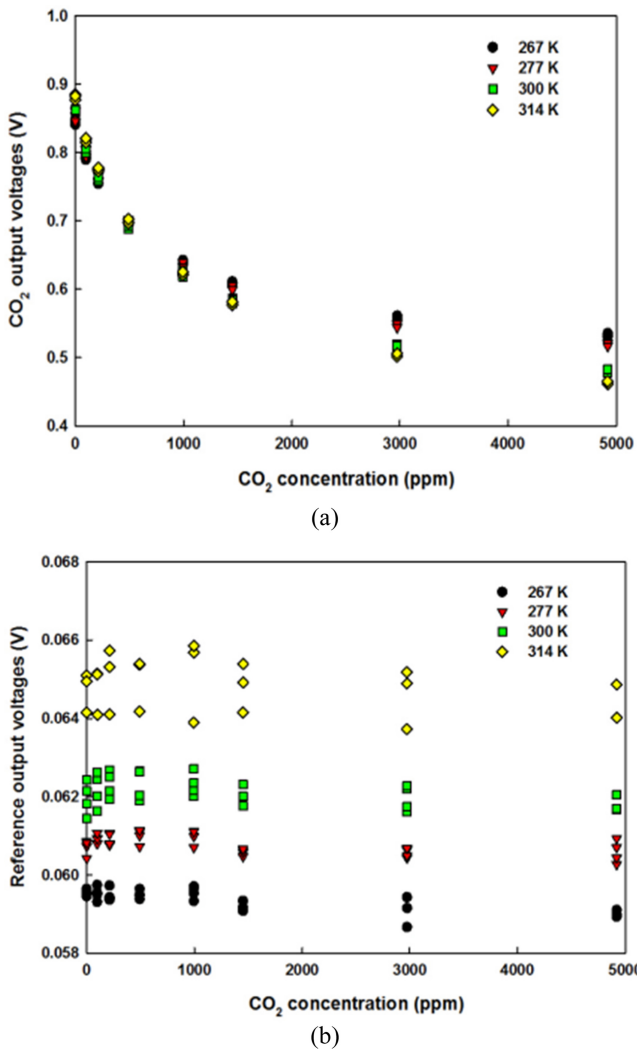


Fig. 3. Output voltages of sensors as a function of carbon dioxide concentrations: a) CO<sub>2</sub> sensor, b) reference sensor.

이 증가하는 양상을 보였으며, 기준 적외선 센서는 이산화탄소 가스 농도가 증가해도 1~2 mV 정도 출력 값이 변화할 뿐 가스 농도에 의한 영향은 거의 없다는 것을 재확인 할 수 있었다. 두 센서의 표준 편차를 나타낸 Table 1, Table 2 를 보면 각각의 온도에 해당하는 농도에서의 출력 전압 데이터의 표준 편차는 전체적으로 출력 전압 데이터의 평균값의 1 % 미만으로 나타났다.

가스의 영향을 받지 않는 0 ppm 상태에서 센서의 초기 출력 전압을 정확하게 확인하고, 온도 보상 알고리즘의 정확성을 향상시키기 위해서 끝점 온도인 267 K와 314 K에서 ±10 K 증감을 하여 257 K와 324 K 에서의 실험을 추가로 진행 하였으며, 6점 온도와 0 ppm에서 센서의 초기 출력 전압은 Fig. 4와 같다. Fig. 4 (a)는 이산화탄소 가스 센서의 출력이고 Fig. 4 (b)는 기준 적외선 센서의 출력 전압인데, 두 센서의 출력은 3차 함수의 형태로 온도가 증가 함에 따라 출력 전압 값도 증가하는 양상을 보였다.

Table 1. Standard deviation of CO<sub>2</sub> sensor output voltage.

concentration (ppm)	CO <sub>2</sub> sensor output voltages (mV)			
	267K	277K	300K	314K
0	2.9	7.3	1.8	4.2
100	2.5	5.4	2.9	2.9
200	3.0	4.7	3.3	2.4
500	3.0	4.9	3.4	2.8
1000	2.8	3.5	3.3	2.5
1500	2.4	3.4	3.2	2.6
3000	2.7	2.6	3.0	2.5
5000	2.5	2.4	2.3	2.6

Table 2. Standard deviation of reference sensor output voltage.

concentration (ppm)	Reference sensor output voltages (mV)			
	267K	277K	300K	314K
0	0.1	0.2	0.4	0.5
100	0.2	0.1	0.4	0.6
200	0.2	0.2	0.4	0.8
500	0.1	0.2	0.4	0.7
1000	0.2	0.2	0.3	1.1
1500	0.1	0.1	0.2	0.6
3000	0.3	0.1	0.4	0.8
5000	0.1	0.3	0.2	0.6

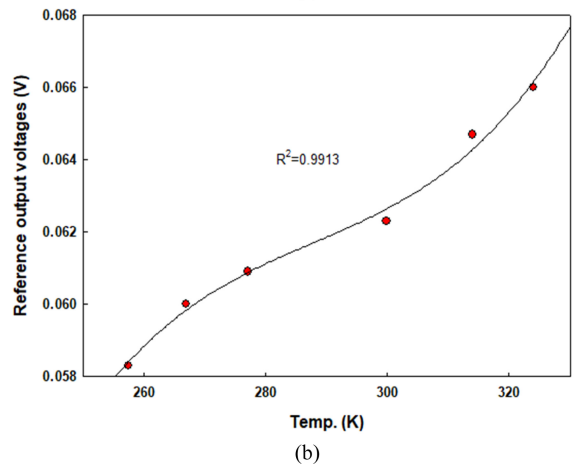
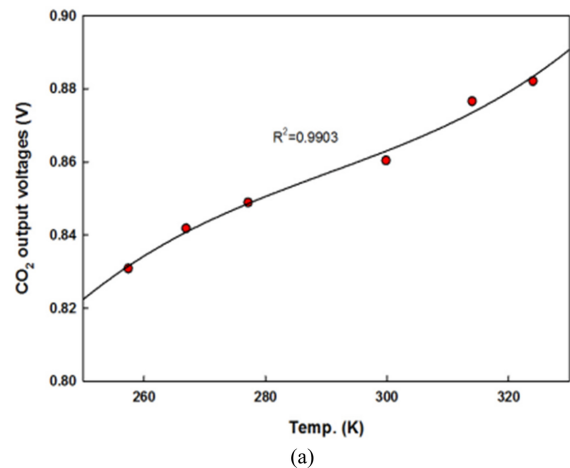


Fig. 4. Initial output voltages of sensors as a function of ambient temperatures: a) CO<sub>2</sub> sensor, b) reference sensor.

### 3.2 실험적 고찰

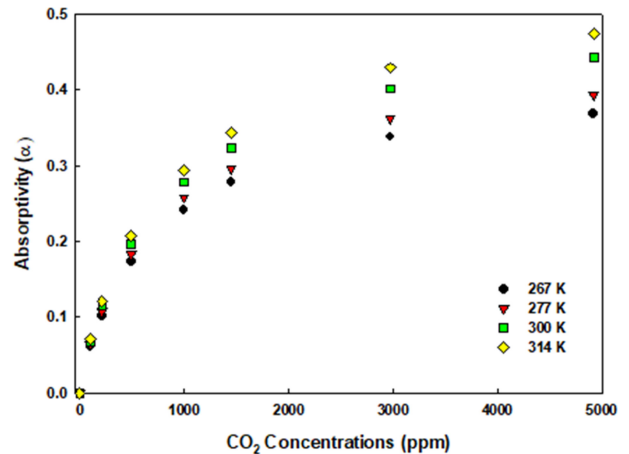
0 ppm 상태에서 이산화탄소 센서와 기준 적외선 센서 모두 주변 온도가 증가 함에 따라 출력 전압이 증가하는 양상을 Fig. 4을 통해 확인 할 수 있다. 이러한 양상은 비분산 적외선 방식을 이용한 에탄올 가스 측정 센서에서도 동일하게 나타나는데 [12], 이는 비분산 적외선 방식의 센서 모듈에 공통적으로 사용되는 적외선 광원과 연관이 있다고 사료된다.

즉, Fig. 4 (a), (b)를 보면 두 센서에 도달하는 적외선 에너지 입사량이 다르기 때문에 출력 전압의 증가 폭은 서로 다르지만 온도가 증가 함에 따라 출력 전압은 공통적으로 3 차 함수의 형태로 증가하는 양상을 보이는데, 이를 식 (10)을 통해 적외선 광원의 에너지 출력이 주변 온도에 영향을 받기 때문이라 설명 할 수 있다. 즉 식 (10)에서 인가되는 전력이 일정 할 때, 적외선 광원으로 사용된 흑체의 온도는 주변 온도가 상대적으로 증가함에 따라 같이 증가 한다는 걸 알 수 있는데, 이는 결과적으로 식 (1)에 의해 방사되는 에너지 총량이 증가한다는 것을 의미한다. 따라서 주변 온도가 높아짐에 따라 Fig. 3 과 같이 두 센서 모두 0 ppm에서의 초기 출력 전압이 증가하는 이유는 적외선 광원의 방사 에너지가 온도가 증가 함에 따라 같이 증가 하였기 때문이라 판단할 수 있다.

Table 3은 Fig. 3 (a)의 이산화탄소 센서의 출력 전압 변화 폭을 나타낸 표로, 온도가 증가 함에 따라 전압변화폭 (full-scale output)이 커지는 걸 확인 할 수 있다. 출력 전압 변화 폭이 높은 온도에서 커지는 이유는 식 (3)에 주어진 가스의 흡수율( $\alpha$ )가 온도가 증가 함에 따라 지수 함수적으로 증가하기 때문이라 판단 되는데, Fig. 3 (a)의 이산화탄소 센서의 0 ppm에서의 초기 전압 출력( $I_0$ )와 100 ppm이상에서의 출력 전압 값( $I$ )를 식 (3)에 대입하여 흡수율을 구하게 되면 Fig. 5와 같이 온도가 증가함에 따라 흡수율도 커지는 양상을 보이게 된다. 따라서 Fig. 3 (a)의 이산화탄소 센서의 출력 전압 변화 폭이 온도가 증가함에 따라 커지는 이유는 식 (3)을 통해 가스의 흡수율이 증가해 더 많은 적외선 에너지 흡수가 이루어졌기 때문이라 판단할 수 있다. 이러한 현상을 W. B. DeMore[13]는 온도에 따라 가스의 흡수 계수의 변화로 더 높은 온도에서 더 많은 에너지 흡수가 일어난다고 주장한 결과와 일맥상통한 결과임을 확인할 수 있다.

**Table 3.** The full-scale outputs of the CO<sub>2</sub> gas sensor.

Temp (K)	CO <sub>2</sub> sensor output voltages (mV)		
	0 ppm	5000 ppm	$\Delta V$
267 K	843	533	310
277 K	855	519	336
300 K	862	480	381
314 K	881	463	418



**Fig. 5.** The absorptivity of CO<sub>2</sub> gas calculated by Eq. (3)

### 4. 결 론

본 연구에서는 White-cell의 원리를 통해 제작된 비분산 적외선 이산화탄소 센서 모듈의 주변 온도 변화에 따른 출력 특성을 살펴 보았다.

0 ppm 상태에서 이산화탄소, 기준 적외선 센서의 출력 전압이 주변 온도가 상승 함에 따라 같이 증가하는 이유는 주변 온도가 상승하게 되면 적외선 광원의 흑체 온도도 같이 상승하게 되는데, 이는 적외선 광원에서 방사되는 적외선 에너지 증가로 이어지며, 결과적으로 센서에 입사되는 적외선 에너지도 증가하여 출력 전압이 상승 했음을 확인 하였고, 이산화탄소 가스 센서의 출력 전압 변화 폭이 주변 온도 증가에 따라 같이 커지는 이유는 가스의 흡수율이 온도가 증가함에 따라 지수함적으로 증가하여 높은 온도 상태의 가스가 상대적으로 더 많은 적외선 에너지를 흡수 했기 때문이라 판단한다.

따라서 주변 온도변화에 따른 비분산 적외선 센서의 온도 보상은[14] 주변 온도에 따라 적외선 광원에 인가되는 전력을 달리함으로써 방사되는 에너지량을 조절하게 하는 프로그램을 작성하고, 주변 온도에 따른 대상 가스의 흡수율에 대한 종합적인 분석과 보정 프로그램의 적용을 통해 주변 온도 변화에도 센서의 출력이 일정하고 정확하게 할 수 있음을 확인할 수 있다.

### REFERENCES

[1] J. W. Judy, "Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 10, No. 6, pp. 1115-1134, 2001.

[2] J. Sun, F. Guan, D. Cui, X. Chen, L. Zhang, and J. Chen, "An improved photoionization detector with a micro gas chromatography column for portable rapid gas chromatography system", *Sens. Actuators B*, Vol. 188, pp. 513-518,

- 2013.
- [3] R. Eisberg and R. Resnick, *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles*, John Wiley & Sons, New York, pp. 1-25, 1985.
- [4] R.V. Maikala, "Modified Beer's law-historical perspectives and relevance in near-infrared monitoring of optical properties of human tissue", *Inter J. Ind. Ergon*, Vol. 40, No. 2, pp. 125-134, 2010.
- [5] D .K. Edwards, "Absorption by Infrared Bands of Carbon Dioxide Gas at Elevated Pressures and Temperatures", *J. Opt. Soc. Am*, Vol. 50, No. 6, pp. 617-626, 1960.
- [6] [http://www.eot.it/pdf/Intex\\_MILR17\\_900.pdf](http://www.eot.it/pdf/Intex_MILR17_900.pdf)(retrieved on Sep. 16, 2016).
- [7] T. L. Bergman, A. S. Lavine, and F. P. Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th*, John Wiley & Sons, United Kingdom, pp. 1-193, 2011.
- [8] O. Schulz, G. Muller, M. Lloyd, A. Ferber, "Impact of environmental parameters on the emission intensity of micro-machined infrared sources", *Sens. Actuators B*, Vol. 121, No. 1, pp. 172-180, 2005.
- [9] J. U. White, "Long optical paths of large aperture", *J. Opt. Soc. Am*, Vol. 32, No. 5, pp. 285-288, 1942.
- [10] J. H. Kim, J. Y. Lee, K. H. Lee, S. H. Yi, and K. H. Lee, "Enhanced Characteristics of Nondispersive Infrared CO<sub>2</sub> Gas Sensor by Deposition of Hydrophobic Thin Film", *Proc. Eurosensors2017*, pp. 410, Paris, France, 2017.
- [11] J. H. Kim, and S. H. Yi, "Effects of Temperature and Humidity on NDIR CO<sub>2</sub> Gas Sensor", *J. Sens. Sci. Technol*, Vol. 26, No. 3, pp. 179-185, 2017.
- [12] J. H. Kim, and S. H. Yi, "Properties of Non-dispersive infrared Ethanol Gas Sensors according to the Irradiation Energy", *J. Sens. Sci. Technol*, Vol. 26, No. 3, pp. 20-24, 2017.
- [13] W. B. DeMore and M. Patapoff, "Temperature and Pressure Dependence of CO<sub>2</sub> Extinction Coefficients", *J. Geophys. Res*, Vol. 77, No. 31, pp. 6291-6293, 1972.
- [14] J. H. Kim, G. H. Lee, and S. H. Yi, "NDIR Ethanol Gas Sensor with Two Elliptical optical Structures", *Proc. Eng*, Vol. 168, pp. 359-362, 2016.