

## 보상용 적외선 센서를 사용한 비분산 적외선 이산화탄소 센서의 온도특성

이승환<sup>+</sup>

### Temperature Dependency of Non-dispersive Infrared Carbon Dioxide Gas Sensor by using Infrared Sensor for Compensation

SeungHwan Yi<sup>+</sup>

#### Abstract

NDIR CO<sub>2</sub> gas sensor was built with ASIC implemented thermopile sensor which included temperature sensor and unique elliptical waveguide structures in this paper. The temperature dependency of dual infrared sensor module (CO<sub>2</sub> and reference IR sensors) has been characterized and its output voltage characteristics according to the temperature and gas concentration were proposed for the first time. NDIR CO<sub>2</sub> gas and reference IR sensors showed linear output voltages according to the variation of ambient temperatures from 243 K to 333 K and their slopes were 14.2 mV/K and 8.8 mV/K, respectively. The output voltages of temperature sensor also presented a linear dependency according to the ambient temperature and could be described with  $V(T) = -3.191 + 0.0148T(V)$ . The output voltage ratio between CO<sub>2</sub> and reference IR sensors revealed irrelevant to the changes of ambient temperatures and gave a constant value around 1.6255 with standard deviation 0.008 at 0 ppm. The output voltage of CO<sub>2</sub> gas sensor at zero ppm CO<sub>2</sub> gas consisted of two components; one is caused by the HPB (half pass-band) of IR filter and the other is attributed to the part of CO<sub>2</sub> absorption wavelength. The characteristics of output voltages of CO<sub>2</sub> gas sensor could be accurately modeled with three parameters which are dependent upon the ambient temperatures and represented small average error less than 1.5% with 5% standard deviation.

**Keywords:** Dual-infrared sensors, Non-dispersive infrared gas sensor, Carbon dioxide sensor, Temperature compensation, Temperature sensor

#### 1. 서 론

최근 공조시스템(Heating, Ventilating and Air-Conditioning System)은 건물의 냉난방 에너지 관리뿐만 아니라 실내 공기 질 (Indoor Air Quality) 관리를 위해 그 역할과 중요성이 인식되고 있으며[1], 공기 질 관리의 한 인자로서 실내 이산화탄소 가스 농도의 측정과 이를 통한 HVAC 시스템의 운용은 국민 건강증대 및 에너지 효율성 측면에서도 그 중요성이 날로 부각되고 있다. 또한 상수원으로서 하천과 호수의 물 관리를 위해 총 탄소

(Total carbon) 혹은 총 유기 탄소(Total organic carbon)의 측정 및 관리가 요구되고 있고, 물의 광분해 또는 연소산화에 의해 발생하는 이산화탄소 가스량 분석을 통해 수중 탄소량을 역산하고, 이를 통해 상수원의 수질 관리를 전세계적으로 진행하고 있으며[2], 국내에서도 이에 대한 중요성 인식 및 법제화를 통한 관리를 강화하고 있다.

일반적으로 공기 질 관리를 위한 이산화탄소 센서로 비분산 적외선 방식과 고체전해질 방식[3]을 사용하고 있으나, 고체 전해질 방식은 외부 가스와 화학반응을 통해 농도를 검출하기에 선택성과 장기 안정성이 광학식에 비해 취약한 단점을 지니고 있어, 공기 질 관리시스템에서 비분산 적외선 방식을 선호하고 있다.

또한 상수원 관리를 위한 이산화탄소 측정용 가스센서 및 시스템으로서 비분산 적외선(Non-dispersive infrared rays) 방식[4]과 선택적 이산화탄소 가스투과 멤브레인 방식[5,6]이 사용되고 있으나, 시료의 채취 및 분석의 용이성 측면에서 NDIR 방식이 TOC 측정시스템에 직접 연결되므로, 실시간 분석이 용이한 것으로 알려져 있다.

NDIR 방식의 가스센서는 적외선의 방출과 광 경로상 측정대

국립한국교통대학교, KNUT(Korea National University of Transportation)  
Dept. of Mechanical Eng.  
50, Daehakro, Chungjushi, Chungbuk 27469  
<sup>+</sup>Corresponding author: isaac\_yi@ut.ac.kr  
(Received: Feb. 15, 2016, Revised: Feb. 29, 2016, Accepted: Mar. 2, 2016)

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.

상 가스의 적외선 흡수 및 이로 인한 적외선 검출기에서의 출력전압 변화를 증폭하여 그 농도를 산출하는 방식이고, 광학적 구조물을 제외한 관련소자가 반도체 공정을 통해 제작되기에 고체 전해질 방식의 센서에 비해 선택성과 장기 신뢰성이 우수하고, 온도변화에 따른 이산화탄소 가스농도의 보정을 초기에 정확히 수행하면, 장시간 별도의 보정절차가 필요하지 않다는 장점을 지니고 있어, 이산화탄소 가스를 비롯하여 호흡기 알코올 [7], 과일의 신선도 판단을 위한 에틸렌 [8] 가스 측정용 센서 모듈의 제작을 위해 연구 개발이 진행되어 왔다. 그러나 적외선 광원에서 방사되고, 협대역 필터(Narrow bandpass filter)를 통과하여 서모파일 적외선 검출기에 도달하여 출력되는 전압은 수십에서 수백  $\mu V$ 의 낮은 전압이기에 이를 증폭하고, 증폭된 전압의 변화에 따른 농도검출 방식을 취하고 있기에 외부잡음에 취약한 특성을 갖고 있으므로, 소신호 증폭과 잡음제거 기술이 절대적으로 필요한 사항이다. 또한 기존 연구를 살펴보면 가스 흡수와 이로 인한 출력전압의 변화로부터 센서의 기본특성을 살펴보고, 가스주입에 따른 출력전압 감소에 따른 센서의 특성을 살펴보고 있으나 [9,10], 특정 가스의 흡수파장과 이를 중심으로 한 협대역 필터의 특성에 따른 연구결과는 찾아볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 소신호 증폭회로와 온도센서를 ASIC 화하여 서모파일과 동일 금속 패키지에 내장한 적외선 검출기와 독자적으로 개발된 광학적 구조물 [11,12]을 사용하여 이산화탄소 가스센서 모듈을 제작하고, 협대역 필터의 특성에 따른 센서의 출력전압에 대한 온도 의존성을 살펴보았다.

## 2. 이론적 고찰 및 실험 방법

### 2.1 이론적 고찰

비분산 적외선 가스센서의 가스 반응에 따른 출력특성은 적외선 광원에 의해 매질에 방사되는 적외선의 단위면적당 에너지( $I_0$ )와 센서 입력 단에 입사되는 적외선 에너지( $I_d$ ) 및 적외선 검출부로 사용되는 센서의 출력특성에 의해 주어진다.

즉 광원, 매질 내에서의 적외선 방사와 흡수, 방사된 에너지의 흡수에 따른 센서의 출력이라는 세가지 측면에서의 고찰이 요구된다.

그 첫 번째로 적외선 광원으로 램프나 흑체 방사를 사용하는 경우, 이들에 의해 방사되는 적외선 에너지,  $R_T$  는 Stefan의 법칙으로 알려져 있으며, 식 (1)과 같이 표현된다 [13].

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(v) dv = \sigma T^4 \quad (1)$$

$v$ : 주파수(Hz),  $T$ : 절대온도 (K),  $\sigma$ : Stefan-Boltzmann 상수

한편 주변에 측정 대상가스가 있는 경우, 적외선의 흡수와 이

에 따른 적외선 에너지의 변화는 Beer-Lambert 법칙을 따르며, 측정 대상가스 농도가 증가하면 증가할수록 초기 적외선 에너지( $I_0$ )는 지수함수적으로 감소하여 적외선 센서 부에서 아래의 식 (2)를 따르는 것으로 알려져 있다<sup>[9]</sup>.

$$I_d = I_0 \exp(-\alpha Lx) \quad (2)$$

단,  $a$  가스의 흡수계수,  $L$  광 경로 길이(m),  $x$  가스농도 (ppm)

한편 G. Zhang et al. 에 의하면, 이산화탄소 센서 모듈에서의 출력전압은 아래의 식 (3)과 같이 기술할 수 있을 것으로 제시하고 있으나<sup>[10]</sup>,

$$V_{out} = I_{4.26}(\exp(-K_{gas}JL)KC_{gas})R_{gas} + V_{bgl} \quad (3)$$

단,  $I_{4.26}$  4.26  $\mu m$  파장에서의 적외선 에너지,  $K_{gas}$  이산화탄소 가스의 흡수계수,  $J$  이산화탄소 가스농도,  $L$  광 도파 관의 길이,  $K$  광 도파 관의 반사율,  $C_{gas}$  측정용 필터의 광 투과율,  $R_{gas}$  측정용 센서의 감도,  $V_{bgl}$  주변 적외선 에너지에 의한 전압출력 주변 적외선 에너지에 의한 성분은 협대역 필터의 특성이 이 에너지에 해당하는 적외선을 투과할 때 제시한 (3)식이 타당하리라 생각되나, 일반적으로 협대역 필터를 포함한 광학적 구조물은 외부에서 방출되는 적외선을 투과할 수 없는 구조로 이루어져 있으므로, 제시한 식(3)은 출력특성을 정확하게 예측하기에 무리가 있을 것으로 보인다.

또한 L. Jun et al. 은 협대역 필터의 특성을 감안하여 측정 대상가스의 광 파장과 이 파장을 포함하는 필터의 투과특성을 고려하여 아래의 식 (4) 와 같이 수정된 Beer-Lambert 식을 제시 하였다 [14].

$$I = I_0((1-S) \cdot \exp(-bx) + S) \\ I_0(1-S) \cdot \exp(-bx) + I_0S \quad (4)$$

이때  $b$ : 측정 대상가스의 흡수계수,  $S$ : 흡수 파장 이외의 적외선에 의한 에너지 기여 분

따라서 상기 제시된 (3)과 (4)식 중, 적외선 센서의 출력특성 면에서 식 (4)가 측정 대상가스에 의한 영향과 센서 부를 보다 정확하게 기술하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

한편 적외선 센서로 서모파일 센서를 사용하는 경우, 센서에서의 출력전압은 아래의 식 (5)과 같이 나타나는 것으로 알려져 있다 [15].

$$V = N\Delta\alpha_{AB}(T_h - T_c) \quad (5)$$

$N$  열전쌍수,  $\Delta\alpha_{AB}$  A, B 두 물질의 Seebeck 계수 차,  $T_h$  열 접점의 온도,  $T_c$  냉 접점의 온도

상술한 이론적 고찰을 통해 적외선을 이용한 가스센서의 출력전압 특성은 1) 센서를 구성하는 광원, 2) 측정 가스의 흡수계수와 광학적 구조물의 형상, 3) 적외선 센서 구성부품들을 종합적으로 고찰하여 해석하여야 함을 알 수 있다.

## 2.2 실험 방법

본 연구에서는 서모파일 미세전압을 회로 기판상에서 증폭하는 대신 증폭 부와 온도센서 및 관련 회로가 ASIC화 되어 있는 서모파일 센서들(HIS A21 F4.26-180 G5600, HIS A21 F3.91-90 G5600, Heimann, Germany)과 적외선 광원으로는 MEMS 기술에 의해 제작된 IR-50(Hawkeyes, USA)을 사용하였다. 또한 적외선 광원의 효율적인 집광을 위한 별도의 광학 렌즈를 사용하지 않는 두 개의 타원형 광 도파관을 사용하여 1광원, 2 센서 구조의 센서모듈을 제작하였다[11].

주변 온도변화와 이산화탄소 가스농도에 따른 센서모듈의 출력 특성확인을 위해 진행된 실험은 기존에 발표된 논문에서의 실험방법과 동일[12,16] 하게 진행되었으나, 온도보상에 대한 알고리즘을 확보하기 위해 수증기가 가스 챔버에 포함되지 않도록 버블러(Bubbler)는 사용하지 않았다. 그러나 제작된 센서모듈을 가스 챔버에 삽입 후, -30°C에서 +60°C까지 10°C 간격으로 온도변화에 따른 출력전압 특성실험(순환 반복실험)을 4개월 간 진행하였고, 온도 설정 후 가스챔버 내에 존재하는 센서모듈을 열적으로 평형상태에 도달시키기 위해 2시간 이상 대기하였으며, 최종적으로 온도센서의 출력전압이 이전 실험값의 ±5 mV 이하일 때, 각 센서들에서 측정된 전압을 저장하였다.

또한 가스반응 실험은 가스챔버에 존재하는 모든 가스를 고순도 질소(99.99%)로 배출시키고, 항온·항습조의 온도를 설정한 뒤 온도를 조절하였으며, 미세한 누설에 의한 대기 중 이산화탄소 가스증가를 온도 설정 중 재배출하고, 1시간 이상 대기함으로써 초기 가스농도를 0 ppm 근처에 도달하도록 하였다. 이때 가스반응 실험의 온도조건은 본 시작품의 응용이 예상되는 온도 구간을 설정하여 -20°C 에서 +60°C까지 20°C 간격으로 온도를 증가시켜 초기 조건을 설정한 후, 0에서 약 3,000 ppm까지 이산화탄소 가스를 증가시키며 가스 농도에 따른 센서모듈의 출력특성을 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험 결과

가스 챔버의 이산화탄소 농도가 0 ppm일때, 분위기 온도의 변화에 따른 이산화탄소 가스센서, 기준 적외선 센서와 온도센서의 출력전압을 나타내면 Fig. 1과 같다. 모든 센서들의 출력전압은 온도가 증가함에 따라 직선적인 출력 특성을 보였고, 온도센서의 경우 14.7 mV/K의 기울기를 나타내었다. 또한 기준 적외선 센서와 이산화탄소 가스센서의 온도에 따른 기울기는 각각 8.8 mV/K, 14.2 mV/K를 나타내었다.

한편 Fig. 2는 온도 298 K에서 이산화탄소 가스의 주입에 따른 이산화탄소 가스센서, 기준 적외선 센서와 온도센서 출력전압의 가스농도 의존성을 나타낸다. 이산화탄소 가스를 주입함에

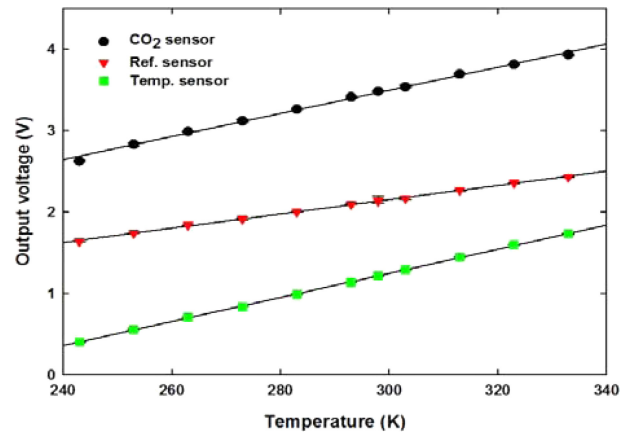


Fig. 1. Output voltages of sensors as a function of temperatures @ zero ppm of CO<sub>2</sub>.

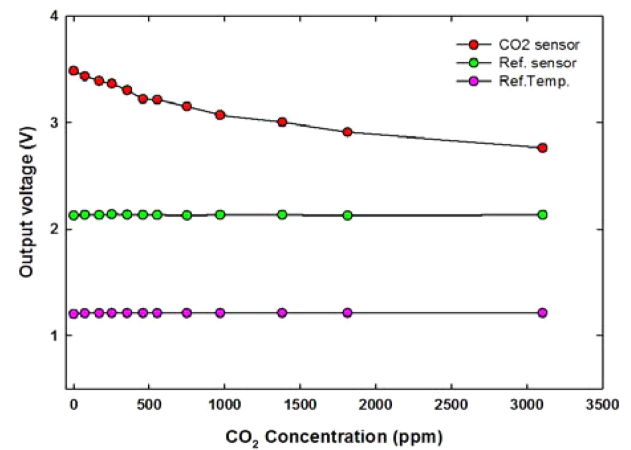


Fig. 2. Output voltages of sensors as a function of concentration of carbon dioxide gas (@ 298 K).

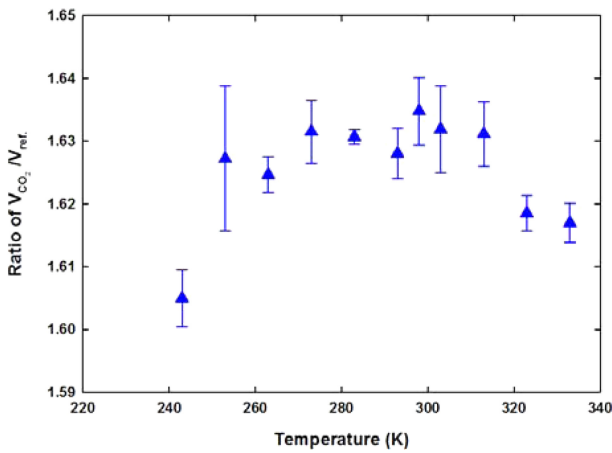
따라 기준 적외선 센서(출력전압 평균 2.153 V, 표준편차 0.004 V)와 온도센서의 출력전압(평균 1.214 V, 표준편차 0.5 mV)은 거의 변화가 없었으나, 이산화탄소 가스센서의 출력전압은 가스농도에 의존해 감소하는 양상을 나타내었다.

측정대상 온도 구간에서 기준 적외선 센서와 온도센서의 평균 출력전압과 표준편차를 제시하면 Table 1과 같고, 각 분위기 온도에서 측정된 기준 적외선 센서 출력전압의 표준편차는 최소 1.91 mV에서 최대 10.4 mV를 나타내었다. 이때 각 온도에서 온도센서 출력전압의 표준편차는 최소 0.163 mV에서 최대 2.87 mV를 나타내었다. 즉, 이산화탄소 가스 0 ppm에서 각 온도 별 온도센서 출력전압은 거의 동일한 상태에서 신뢰성 있게 측정되었음을 알 수 있다.

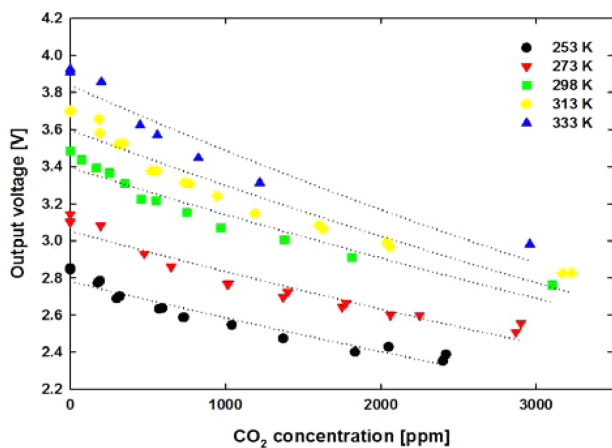
Fig. 1에서 이산화탄소 가스센서와 기준 적외선 센서의 출력전압이 온도변화에 따라 선형적인 특성을 나타내었고, 가스농도의 증가 시 기준 적외선 센서의 출력전압이 일정함으로써, 이들 전압 비 ( $V_{CO_2}/V_{ref.}$ )를 온도변화에 따라 나타내면 Fig. 3과 같다. 비록 243 K에서의 전압비가 가장 작은 값을 나타내

**Table 1.** Averages and standard deviations of output voltage of reference/temperature sensors

Temperature (K)	Average (V/V)	Standard deviation (mV/mV)
243	1.638/0.399	1.91/0.7
253	1.737/0.553	3.61/1.0
263	1.838/0.709	5.10/2.0
273	1.913/0.836	9.38/0.3
283	2.001/0.987	2.76/1.1
293	2.095/1.137	3.62/0.6
298	2.153/1.214	4.51/0.5
313	2.264/1.290	10.4/2.87
323	2.354/1.597	6.00/2.2
333	2.429/1.739	7.14/0.163



**Fig. 3.** Ratio of  $V_{CO_2}/V_{ref}$  as a function of concentration of carbon dioxide gas @ zero ppm  $CO_2$  gas.

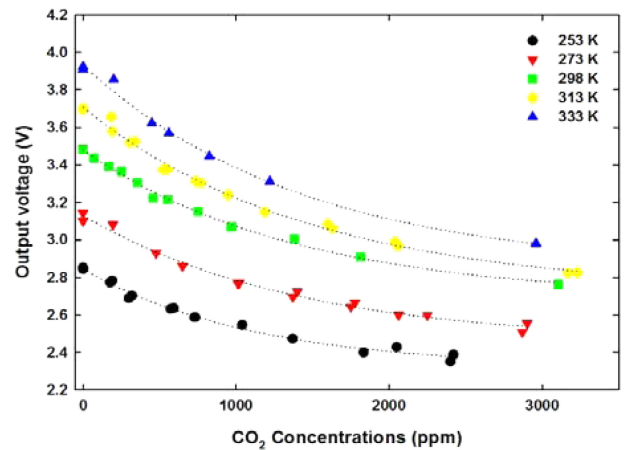


**Fig. 4.** Output voltages of carbon-dioxide gas sensor as a function of gas concentrations by using a function of exponential function described in equation (2).

였으나, 상온 (298 K)에서 전압 비의 평균은 1.635, 표준편차 0.005를 갖고 있었고, 전체 실험구간에서의 평균 전압 비와 표

**Table 2.** Maximum and minimum errors according to the equation (2).

Temperature (K)	Minimum error (%)	Maximum error (%)
253	-5.14	-0.61
273	-6.61	+0.30
298	-5.32	+0.33
313	-7.14	+0.72
333	-1.01	+83.3



**Fig. 5.** Output voltages of carbon-dioxide gas sensor as a function of gas concentrations by using a function presented in equation (6).

준편차는 각각 1.6255와 0.008을 나타내었다. 또한 263 K에서 313 K까지 출력 전압비의 평균은 1.630, 표준편차는 0.003을 나타내었다.

한편 이산화탄소 가스농도에 따라 상온 (298 K)을 중심으로 253 K에서 333 K까지 20 K 간격으로 이산화탄소 가스센서의 출력전압의 변화양상을 기존 문헌에서 제시된 이론 식 (2)와 유사한 식으로 외삽하여 제시하면 Fig. 4와 같다. 측정된 출력전압과 외삽을 통해 도출된 추세선과 이를 통한 각 온도별 출력전압과의 오차를 계산한 결과를 제시하면 Table 2와 같으며, 상온 이하에서의 오차는 비교적 작았으나, 온도가 증가함에 따라 오차는 급격하게 증가하는 양상을 나타내었다. 즉, 식 (2)와 유사한 지수함수적 출력전압에 의한 예상치는 실제 측정값보다 큰 오차를 갖고 계산되어 온도가 증가함에 따라 이들 오차는 크게 증가하는 것으로 예측되었다.

동일한 측정 결과를 세 개의 매개변수를 지닌 함수로 추세선을 도출하였을 때의 결과를 나타내면 Fig. 5와 같고, 가스 농도에 따른 측정결과와 도출된 추세선 들이 거의 일치함( $0.9861 < R^2 < 0.9956$ )을 보여주었다. 즉 가스 농도에 따른 이산화탄소 가스센서의 출력전압은 기존 문헌에서 제시된 식 (2) 보다, 아래 제시한 식(6)이 보다 정확하게 출력전압을 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

**Table 3.** Maximum and minimum error according to the equation (6)

Temperature (K)	Minimum error (%)	Maximum error (%)
253	-1.23	-0.23
273	-1.23	+0.97
298	-0.87	+1.40
313	-0.79	+2.30
333	-1.35	+0.92

$$V_{out,CO_2} = V_0 + V_1 \cdot \exp(-\beta \cdot x) \quad (6)$$

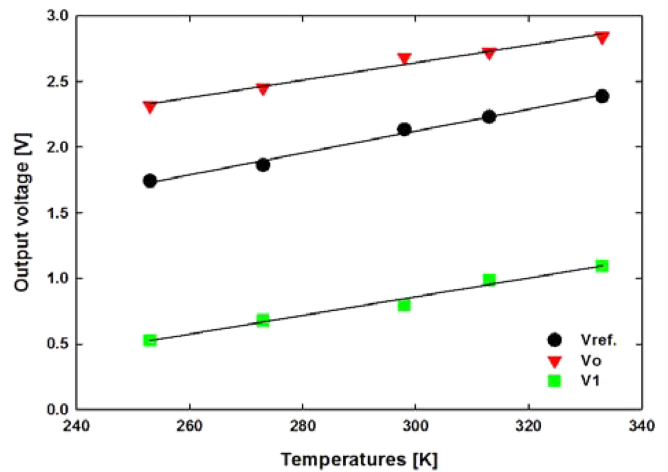
단, 이때  $V_0$ ,  $V_1$ 은 가스농도 0 ppm에서 출력전압(V),  $\beta$ 는 가스흡수와 광 경로에 따른 변수,  $x$ 는 가스농도 (ppm)

또한 측정 전압과 추세를 통한 각 농도 별 출력전압 예상치의 오차분석 결과를 나타내면 Table 3과 같고, 식 (6)에 따른 오차는 제시된 것과 같이 -1.35%에서 +2.30% 이내로 정확하게 측정결과를 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.2 실험적 고찰

Table 1에 제시된 것과 같이 각 측정 온도에서 온도센서 출력전압의 최대편차가 2.87 mV 이하이므로, 0 ppm에서의 온도변화는 약 0.2K 이하의 상태임을 알 수 있고, 이런 상태에서 기준 적외선 센서의 출력전압 표준편차 또한 최대 10 mV 이하로서 안정적인 상태에서 측정이 진행되었음을 알 수 있다. 또한 이산화탄소 가스의 주입 시, Fig. 2에 제시된 바와 같이 온도센서의 출력전압 또한 일정한 값을 제시하고 있으므로, 온도에 의한 이산화탄소 가스센서의 출력전압 변화는 각 온도 구간에서 미미할 것이라 판단할 수 있다. 따라서 Fig. 2와 Fig. 5에 나타난 이산화탄소 가스센서의 출력전압 변화는 측정 대상인 이산화탄소 가스농도의 변화에 의한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 Fig. 4와 Fig. 5 및 Table 2와 Table 3에 제시된 결과에 의한 출력전압의 추이와 이에 따른 오차의 발생은 기존에 제시된 이론으로 설명이 가능하지 않은 상태이다.

한편 본 연구에 사용된 적외선 서모파일 센서들은 각 중심 파장(이산화탄소 센서 4.26  $\mu$ m, 기준 적외선 센서 3.90  $\mu$ m)에서 각각 180 nm와 90 nm의 HPB(half pass band)를 갖고 있다. 즉 이산화탄소 가스를 측정하기 위한 적외선 센서는 측정 파장 이외의 적외선을 투과하는 광학적 필터를 내장하고 있고, 기준 적외선 센서는 주변의 가스(이산화탄소, 산소 및 기타 탄화수소 계)와는 무관하게 적외선을 흡수하므로 Fig. 2와 같이 온도가 일정한 경우 이산화탄소 가스센서는 가스농도가 증가함에 따라 출력전압이 감소하고, 기준 적외선 센서의 출력전압은 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다. 즉 이산화탄소 가스센서의 출력전압은 1) 가스농도와 무관하게 적외선 필터의 HPB폭에 따른 출력성분, 2) 가스농도에 따라 변화를 나타내



**Fig. 6.** Output voltages of reference IR sensor and voltages described in equation (6) as a function of temperatures at zero carbon dioxide concentration.

는 두 가지 출력성분의 합에 따른 출력 전압특성을 나타내는 것으로 사료된다.

즉 Fig. 6에 제시된 그림과 같이 기준 적외선 센서의 출력전압(주변 가스와 무관하고 적외선 필터의 투과 파장대에 의존하는 서모파일의 출력전압)과 유사하게 가스의 유무에 무관한 출력성분을 나타내는  $V_0$ 전압과 가스 농도변화에 따른 출력특성을 나타내는  $V_1$ 성분의 합으로 나타남을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6에 제시된 실험결과에서 보듯이 식(4)는 주변온도의 증가에 따라 출력 전압이 증가하는 양상을 정확하게 기술할 수 없음을 알 수 있다.

주변 온도가 증가함에 따라 기준 적외선 센서의 출력전압과 이산화탄소 센서의 출력전압이 선형적으로 증가하는 양상은 주변 온도가 증가함에 따라 협대역 통과 필터(narrow band-pass filter)의 중심 파장이 증가하기 때문[17]이라고 사료된다. 즉 흑체의 온도가 일정한 경우, 본 연구에서 사용한 흑체의 최대 에너지 방출 파장은 이산화탄소 가스의 흡수 파장보다 큰 상태일 것으로 예상된다. 이에 따라 온도 증가시, 기준 적외선 센서와 이산화탄소 센서의 협대역 통과 필터의 중심 파장이 증가함으로써 단위면적당 입사되는 적외선 에너지가 증가하고, 중심파장의 증감( $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ )에 따라 Fig. 1과 Fig. 6에 제시된 것과 같이 두 센서의 출력전압이 주변온도의 증감에 따라 선형적으로 변화하는 것으로 사료된다.

그러나 적외선 광원으로 사용된 흑체는 외부전원에 의해 고정전압에서 작동하므로 표면 온도가 일정하다고 가정하면, 주변 온도에 따른 적외선 에너지는 C.N. Chen[18]에 의하면 식 (7)과 같이 주어진다.

$$I_d = \sigma \cdot (T_{black}^4 - T_{amb.}^4) \quad (7)$$

단,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수,  $T_{black}$ 은 흑체온도,  $T_{amb.}$ 는 주변온도

즉, 적외선을 흡수하는 센서의 표면에 도달하는 적외선 에너지는 주변온도( $T_{amb}$ )가 증가하면 증가할수록 식(7)에 의해서 감소하는 특성을 나타낼 것이라 예상할 수 있으나, 출력전압은 증가하는 양상을 나타내므로 출력전압의 변화는 식(7)에 의한 영향보다 적외선 필터의 특성에 의한 결과가 주도적으로 나타남에 의한 것임을 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다.

또한 Fig. 4 혹은 Fig. 5에서 주변온도가 증가하면 증가할수록 동일한 가스농도 변화에 따른 전압변화의 크기가 증가하고, 이들 전압의 변화폭은 Fig. 6과 식 (6)에 제시된 전압  $V_i$ 과 유사한 값을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 온도 및 가스농도의 변화에 따른 적외선 서모파일 센서의 출력전압은 본 연구를 통하여 제시된 식 (6)으로 해석하는 것이 보다 타당하리라 사료되는데, 이는 L. Jun et al.[14]에 의해 제시된 식 (4)를 간접적으로 증명하는 것이라고 사료된다. 그러나 제시된 식(2)와 (4)는 적외선 센서의 방사와 흡수측면만을 나타내므로 센서의 출력전압 측면의 식 (6)과 부합하기 위해서 아래의 식(8)로 수정됨이 타당하리라 사료된다.

$$I_d = I_{BPF}(T) + I_{Gas}(T) \cdot \exp(-\alpha L \cdot x) \quad (8)$$

이때  $I_{BPF}$ 와  $I_{Gas}$ 는 각각 온도에 따른 측정 가스 흡수과장을 제외한 협대역 필터를 통과하는 적외선 에너지와 측정 가스 흡수과장에서의 적외선 에너지

측정대상 가스가 존재하지 않는 경우, 식(7)에 의해 주변 온도가 감소함에 따라 적외선 센서에서 흡수되는 광 에너지가 증가함으로 적외선 센서의 출력이 증가하리라 예상된다. 그러나 출력전압의 감소 특성을 나타낸 것은 적외선 센서의 측면에서 주변 온도에 따른 흡수 광 에너지의 변화보다는 S. Kim과 C. K. Hwangbo, T. Stolberg 등이 제시하고 있는 협대역 필터의 중심파장 온도의 존성에 의한 영향이 지배적임을 확인할 수 있으며[17,19], 이로 인해 식 (6)에 의한 출력전압도 식(8)에 의한 성분들의 영향으로 아래와 같은 식 (9)로 수정됨이 타당하리라 사료된다.

$$V_{out}(T, x) = V_{BPF}(T) + V_{4.26\mu m}(T) \cdot \exp(-\alpha L \cdot x) \quad (9)$$

즉, 식(9)에 기술한 것과 같이 서모파일 센서의 출력전압,  $V_{out}(T, x)$ 는 측정 대상가스의 과장을 포함한 특정대역의 적외선을 투과할 수 있도록 제작된 협대역 필터의 온도 특성을 따른 전압인,  $V_{BPF}(T), V_{4.26\mu m}(T)$ 에 의해 초기 전압( $x=0$ )이 나타나고, 측정 대상가스 농도가 무한히 큰 경우( $x=\infty$ ) 협대역 필터를 통과한 적외선에 의한 출력전압이 증폭되어 Fig. 5에 제시된 것과 같이 온도에 따른 특정전압이 옅어짐으로 출력될 것을 예상할 수 있다.

한편 Fig. 7은 식(9)를 통하여 산출된 이산화탄소 농도와 실제 측정을 통해 얻은 결과를 비교한 것으로, 측정 온도 구간에서 온도 보상된 가스농도 산출이 실제 농도와 비교하여 평균오차 1.5%와 약 5% 이내의 표준편차로 정확하게 예측됨을 확인할 수 있었다.

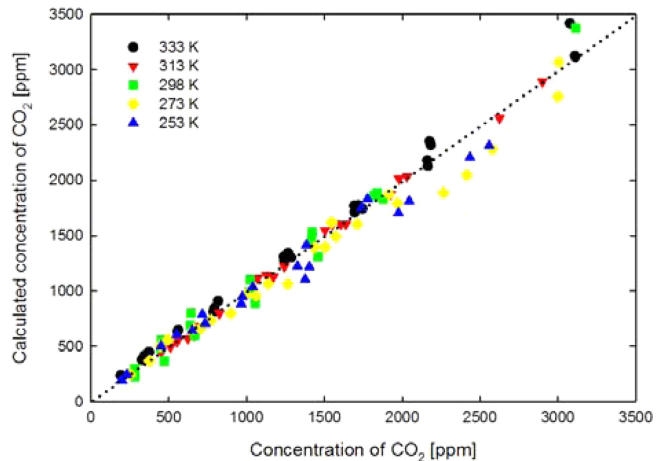


Fig. 7. Calculated concentrations of carbon dioxide according to the actual concentration of CO<sub>2</sub> gas.

#### 4. 결 론

본 연구에서 온도센서의 전압변화가 수 mV이내일 때 기준 적외선 센서와 이산화탄소 센서의 출력전압 변화도 10 mV로 작아, 가스 농도의 변화에 따른 센서 거동과 이를 통한 전압변화에 대한 실험식을 처음으로 제한할 수 있었다. 신호처리용 ASIC칩을 포함한 서모파일 센서의 출력특성은 이산화탄소 가스의 흡수과장과 흡수과장을 제외한 협대역 필터의 투과대역에 따른 출력전압에 의한 영향으로 분류할 수 있었고, 이들은 온도에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 나타내었는데, 이는 온도에 따른 필터의 중심파장 이동에 의한 것으로 사료된다. 또한 온도 보상된 가스농도 예측은 본 연구를 통해 도출된 실험식에 의해 보다 정확하게 기술할 수 있었고, 본 연구개발의 결과가 TOC 측정용 센서개발에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

This research was supported by R&D Center for Green Patrol Technologies through the R&D for Global Top Environmental Technologies funded by Ministry of Environment, Republic of Korea (MOE). The author would like to thank to Mr. Yun and Mr. Maniruzzaman about the experiments.

#### REFERENCES

[1] M.S. Zuraimi, R. Magee, and G. Nillson, "Development and application of a protocol to evaluate impact of duct cleaning on IAQ of office buildings", *Buildings and Environment*,

- Vol. 56, pp. 86-94, 2012.
- [2] G. Visco, L. Campanella, and V. Nobili, "Organic carbons and TOC in waters: an overview of the international norm for its measurements", *Microchemical Journal*, Vol. 79, pp. 185-191, 2005.
- [3] K. Kaneyasu, K. Otsuka, Y. Setoguchi, S. Sonoda, T. Nakahara, I. Aso, and N. Nakagaichi, "A carbon dioxide gas sensor based on solid electrolyte for air quality control", *Sensors and Actuators B*, Vol. 66, pp.56-58, 2000.
- [4] N. Kawasaki, K. Matsushige, K. Komatsu, A. Kohzu, F. Watanabe Nara, F. Ogishi, M. Yahata, H. Mikami, T. Goto, and A. Imai, "Fast and precise method for HPLC-size exclusion chromatography with UV and TOC(NDIR) detection: Importance of multiplr detectors to evaluate the characteristics of dissolved organic matter", *Water research*, Vol. 45, pp. 6240-6248, 2011.
- [5] <http://www.filtsep.com> (retrieved on Feb.4, 2016)
- [6] K. Tian, and P. K. Dasgupta, "A permeable membrane capacitance sensor for inogenic gases: Application to the measurement of total organic carbon", *Analytica Chimica Acta*, Vol. 652, pp. 245-250, 2009.
- [7] L. Lindberg, S. Brauer, P. Wollmer, L. Goldberg, A.W. Jones, and S.G. Olsson, "Breath alcohol concentration determined with a new analyzer using free exhalation predicts almost precisely the arterial blood alcohol concentration", *Forensic Science International*, Vol. 168, pp.200-207, 2007.
- [8] S. Adam, J. Stefeen, L. Walter, "Detection limit improvement for NDIR ethylene gas detectors using passive approaches", *Sensors and Actuators B*, Vol. 175, pp. 246-254, 2012.
- [9] R. V. Maikala, "Modified Beer's law-historical perspectives and relevance in near-infrared monitoring of optical properties of human tissue", *Inter. Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 40, pp. 125-134, 2010.
- [10] G. Zhang, Y. Li, and Q. Li, "A miniature carbon dioxide gas sensor based on infrared absorption", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, pp.1206-1212, 2010.
- [11] S.H. Jang, S.H. Chung, and S.H. Yi, "Characteristics of an optical waveguide with two identical elliptical structure", *J. Korean Institute of Gas*, Vol. 18, No. 2, pp. 48-54, 2014.
- [12] S.H. Yi, J. H. Kim, B. D. Kang, and J. M. Ihn, "Characteristics of NDIR alcohol sensor with elliptical optical structures", *J. Auto-Vech. Safety Assoc.*, Vol. 7, No. 2, pp. 39-43, 2015.
- [13] R. Eisberg and R. Resnick, *Quantumn Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, John Wiley & Sons, New York, pp. 1-25, 1985.
- [14] L. Jun, T. Qiulin, Z. Wendong, X. Chenyang, G. Tao, and X. Jijun, "Miniature low-power IR monitor for methane detection", *Measurement*, Vol. 44, pp. 823-831, 2011.
- [15] J. M. Park, N. K. Min, S. Y. Kweon, and S. H. Yi, "Novel NDIR CO<sub>2</sub> sensor with two concave mirrors", *Proc. of APCOT 2006, D-15, Singapore*, June 25-28, 2006.
- [16] J. S. Park and S. H. Yi, "Nondispersive infrared ray CH<sub>4</sub> gas sensor using focused infrared beam structures", *Sensors and Materials*, Vol. 23, No. 3, pp. 147-158, 2011.
- [17] S. Kim and C. K. Hwangbo, "Derivation of the center-wavelength shift of narrow-bandpass filter under temperature change", *Optics Express*, Vol. 12, No. 23, pp. 5634-5639, 2004.
- [18] C.N. Chen, "Fully quantitative characterization of CMOS-MEMS polysilicon/titanium thermopile infrared sensors", *Sensors and Actuators B*, Vol.161, pp.892-900, 2012.
- [19] T. Stolberg-Rohr and G. Hawkins, "Spectral design of temperature-invariant narrow bandpass filters for mid-infrared", *Optics Express*, Vol. 23, No. 1, pp. 580-596, 2015.