



광학적 가스센서 특성 향상을 위한 광 공동 구조의 고찰

박종선 · †이승환

국립 충주대학교 기계공학과/충주대학교 지역혁신센터
(2008년 10월 31일 접수, 2008년 12월 11일 수정, 2008년 12월 11일 채택)

Speculation of Optical Cavity for Improving Optical Gas Sensor's Characteristics

JongSeon Park · †SeungHwan Yi

Dept. of Mech. Eng./RIC-ReSEM, Chungju National University, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea
(Received 31. October. 2008, Revised 11. December. 2008, Accepted 11. December. 2008)

요 약

본 논문은 적외선 센서의 광 강도 및 효율을 증가시키기 위해 새로운 오목한 반사 벽면(curved mirror surface)과 기존의 수직 반사 벽면(vertical mirror surface)구조와의 모의해석 및 실험 결과에 대해 기술하였다. 모의해석 결과 수직 반사 벽면을 사용했을 때 적외선 센서 필터 표면에 도달하는 광의 분포는 타원 형상으로 적외선 센서 표면에 도달함을 볼 수 있고, 오목한 반사 벽면을 사용하는 경우에는 광이 원형 상으로 집광되는 것을 볼 수 있었다. 따라서 초기 평행광의 면적보다 작은 면적으로 집광됨으로 인해 단위면적당 광 강도는 향상되고, 이에 따라 광학적 센서의 출력전압은 향상될 것이라 예측되었다. 이 모의해석을 근간으로 하여 25°C, 45%R.H.에서 이산화탄소를 0 ppm에서 2500 ppm까지 250 ppm 간격으로 주입시켰을 때, 오목한 반사 벽면의 광 공동이 수직 반사 벽면의 광 공동보다 출력전압이 약 200 mV 증가하였다.

Abstract – This paper describes about the simulation and the experimental results of optical cavity with curved mirror surface and vertical mirror surface to improve the light intensity and efficiency of the optical sensors. When we use the vertical mirror surface, the distribution of light reached to the filter surface of detector shows an elliptical shape. Whereas, the curved mirror surface focuses the light into circular shape. Therefore, due to focusing effects in case of using curved mirror surface, the light intensity per unit area has been improved. Consequently, the output voltage of gas sensor has been expected to increase. Based upon the simulation, the experiment of gas sensor has been conducted with CO₂ gas from 0ppm to 2,500 ppm at 250 ppm step and 25°C, 45%R.H. ambient. The output voltage of gas sensor that has a curved mirror surface increases approximately 200 mV than that of vertical mirror surface.

Key words : NDIR (Non-Dispersive Infrared), CO₂ gas sensor, curved mirror surface, vertical mirror surface, optical cavity

I. 서 론

비분산 적외선(NDIR) 센서는 측정 대상가스가 지닌 특정 파장의 적외선을 흡수하는 광학적 원리를 이용한 것으로, 광이 지나가는 통로에서 가스 분자의 농도에 따라 센서부의 적외선 광량이 변하게 된다. 이러한 분자의 흡수와 농도와의 관계를 표현한 것이 Beer-Lambert법칙이다[1].

이 법칙에서 측정 가스의 적외선 흡수 계수가 일정하다고 가정할 경우, 비분산 적외선 센서의 효율을 증가시키기 위해서는 크게 세 가지 방법이 있다. 첫째는 비분산 적외선 센서부에 도달하여 변환되는 물리양인 광 강도를 크게 함으로써 출력전압을 향상시키는 것이다. 이를 위해서는 비분산 적외선 가스 센서의 입력단 광원에서 방출되는 광 강도를 증가시키는 방법이 있으며, 적외선 가스 센서에서 많이 쓰이는 광원으로는 IR램프, LED, Laser Diode가 있다. IR램프는 전류를 가하면 주울열에 의하여 1 μm~10 μm의 파장대의 적외선을 방사

†주저자:isaac_yi@cju.ac.kr

하고, 측정대상 가스에 흡수되는 특정파장의 광 효율이 떨어지지만, LED나 Laser Diode는 측정하고자 하는 가스의 파장대만을 출력하기 때문에 광 효율이 좋다. 특히 Laser Diode는 광의 퍼짐이 없기 때문에 장거리 측정 시 우수한 장점을 가지고 있지만, LED나 Laser Diode는 IR램프에 비해 고가라는 단점을 가지고 있다 [2].

둘째, 출력단에서는 열형 검출기를 사용하는 일반적인 비분산 적외선 센서의 경우, 광 측정 센서부에서 단위 면적당 광 강도를 증가시키는 구조를 들 수 있다[3]. 이는 적외선 센서부 전단에 물리 화학적 반응을 야기시키는 적외선을 집광시킴으로써 광 효율을 증대시켜 센서의 효율을 극대화 시키는 방법이다.

세 번째 방법은 광 경로를 증가시키는 것으로 Fig. 1의 a)는 두 개의 반사경형 구조[4], b)는 원통 실린더 구조[5], c)는 원통 튜브형 구조가 있으며[6,7], 효과적으로 광 경로를 증가시키기 위해서 각기 독자적인 광 공동 구조를 가지는 것을 볼 수 있다.

본 논문에서는 광 효율을 증가시키기 위해 광 측정 센서부에서 단위면적당 광 강도를 증가시키는 새로운 광 공동인 오목한 반사 벽면 구조를 제안하고, 기존의 광 반사경으로 사용되던 수직 반사 벽면구조와의 모의 해석 결과 및 실험결과를 비교함으로써 각 구조의 특성 분석을 통해 광학적 센서의 특성 향상 방법에 대해서 살펴보았으며, 그 초기 결과를 제시하고자 한다.

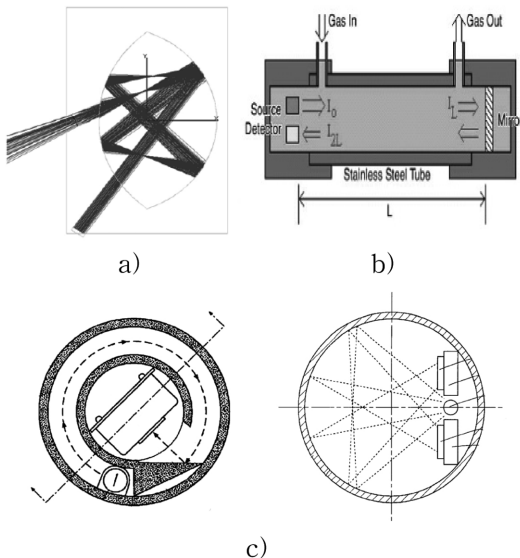


Fig. 1. Optical cavity types to increase optical path: a) two mirror type, b) cylinder type, c) tube type.

II. 이론적 고찰

비분산 적외선 센서의 효율을 증가시키는 방법 중에 경제성을 고려하여 평행하게 광이 들어오는 경우, 출력단에서 평행 광을 집광시켜 광 측정 센서부에서 단위 면적당 광 강도를 증가시키는 방법에 대해서 살펴보고자 한다. 이를 위해서는 적외선 광량과 써모파일 (Thermopile) 출력전압의 상관성을 알아야 한다. 적외선 센서에서 분자의 흡수와 농도와의 관계를 표현한 것이 Beer-Lambert법칙이며, 식 (1)과 같이 표현된다[1,8].

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

한편 식 (1)을 초기 평행광의 반경(r_i)으로 광 공동 내에서 두 번의 반사를 통하여 집속된 광의 반경(r_s)에 관하여 정리하면 식 (2)와 같다.

한편 주위의 온도보다 높은 온도를 지닌 물체는 열 방산(thermal radiation)을 하게 되고, 단위면적당 방사되는 열에너지는 Stefan-Boltzmann법칙을 따르게 되며, 식 (3)과 같다.

$$I_d^F = \left(\frac{r_i}{r_s} \cdot 0.97\right)^2 \cdot I_o \cdot \exp(-\alpha x L) \quad (2)$$

$$R_T = \int_0^\infty R_T(v) dv = \sigma(T_2^4 - T_{amb}^4) \quad (3)$$

$$R_T = I_d^F = \left(\frac{r_i}{r_s} \cdot 0.97\right)^2 \cdot I_o \cdot \exp(-\alpha x L) = \sigma(T_2^4 - T_{amb}^4) \quad (4)$$

$$V_{AB} = \int_{T_{amb}}^{T_2} (\alpha_A - \alpha_B) dT = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_2 - T_{amb}) \quad (5)$$

$$V_x = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot \frac{r_i^2 \cdot 0.97^2 \cdot I_o}{\sigma \cdot r_s^2 \cdot (T_2 + T_{amb}) \cdot (T_2^2 + T_{amb}^2)} \cdot \exp(-\alpha x L) = \eta \cdot (-\alpha x L) \quad (6)$$

또한 적외선 센서의 전단부에 조사되는 적외선 광량 (R_T)은 식 (1)에 제시된 Beer-Lambert 식의 광 강도와 동일한 개념을 갖고 있으므로, 식 (2)와 식 (3)을 정리하면 식 (4)와 같다.

한편 상온(T_{amb})에서 온도 T_2 의 적외선을 흡수하는 실리콘 열전쌍의 열기전력은 식 (5)와 같이 표현된다 [9].

따라서 식 (4)와 (5)를 연관시켜 적외선 광 강도와 온도에 따른 실리콘 써모파일의 출력 전압간의 관계를 도

출하면 식 (6)과 같다.

즉, 출력전압은 실리콘 열전쌍의 지배상수차, 초기 입사광의 강도와 온도의 함수로 표현될 뿐만 아니라, 이론적으로 집속광의 반경이 감소함에 따라 출력전압은 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 가스가 존재하는 경우, 실리콘 열전쌍에 유기되는 기전력은 광로의 길이가 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소할 것임을 예측할 수 있으나, 공간적 제약을 감안하여 본 연구에서는 소형의 광 공동구조에서 집광방안을 모색하고자 했다.

III. 모의해석

모의해석에 사용된 프로그램은 광학해석 전용 프로그램인 TracePro를 이용하였으며, 모의해석에 사용한 광 공동 (Optical Cavity)은 두 개의 오목 거울을 이용한 구조로써 Fig. 2와 같고 광 경로를 늘리기 위해 두 번 반사한 것을 볼 수 있다.

모의해석을 위해 수직 반사 벽면과 오목한 반사 벽면을 갖는 광 공동 내부의 공통점을 보면 다음과 같다.

Variable은 적외선 센서가 놓이는 위치를 말하며, Origin은 입사된 광이 반사경을 두 번 반사하여 나오는 중심축과 x축이 만나는 점으로 Variable의 시작점의 의미이다. 두 광 공동 내부의 반사경 표면은 금으로 코팅되어 있음을 가정하였으며, 이때 금의 반사율은 99%라고 가정하였다[1]. 그리고 광원은 x축과 평행하게 입구에 0.66 watts로 입사된다고 가정하였다. 두 광 공동의 차이점은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 수직 반사 벽면을 갖는 광 공동은 반사경이 수직인 것을 볼 수 있고, 오목한 반사 벽면을 갖는 광 공동의 경우 반사경이 오목하게 들어가 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3은 비분산 적외선 센서의 광 강도를 증가시키기 위한 개념이다. Fig. 3의 a)와 같이 수직 반사 벽면을 갖는 경우 평행하게 조사되는 광은 적외선 센서 표

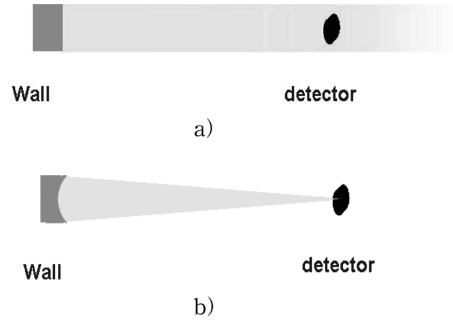


Fig. 3. Concept of optical cavities for the increment of light intensity per unit area: a) with vertical-mirror surface, b) with curved-mirror surface.

면에 모두 도달하지 않는 것을 볼 수 있고, Fig. 3의 b)와 같이 오목한 반사 벽면을 갖게 하는 경우 광이 집광되어 하나의 점으로 적외선 센서 표면에 도달하는 것을 예측할 수 있다.

따라서 집광효과에 의해 입사된 광이 모두 적외선 센서 표면에 도달하며 하나의 점으로 집광되기 때문에 단위면적당 광 강도의 증가를 통한 출력 전압 증가를 예상할 수 있다.

Fig. 4는 모의해석에 사용된 써모파일 검출기의 외형을 나타낸 것으로, Fig. 5와 비교하여 설명하면, Fig. 5에서 바깥쪽 원은 적외선 광이 들어가는 써모파일 검출기의 필터 영역이고, 안쪽 원은 Fig. 4의 b)에 제시된 실리콘 써모파일의 능동영역(적외선 검출부)의 유효단면적을 표시한 것이다.

적외선 센서가 놓이는 거리(Variable)에 따른 적외선 센서 전단부에 위치한 필터에 도달하는 광의 모양을 모의 해석한 결과 Fig. 5와 같았다. Fig. 5의 a)와 같이 수직 반사 벽면을 갖는 광 공동의 경우, 적외선 센서의 필터에 도달하는 광의 분포는 타원 형상으로 센서의 표

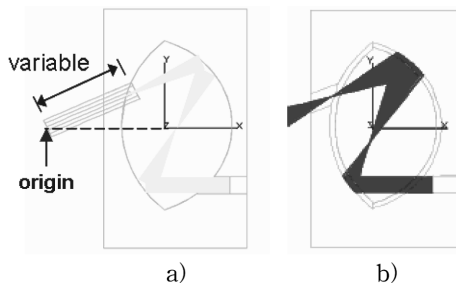


Fig. 2. Optical cavity of used simulation: a) with vertical-mirror surface, b) with curved-mirror surface.

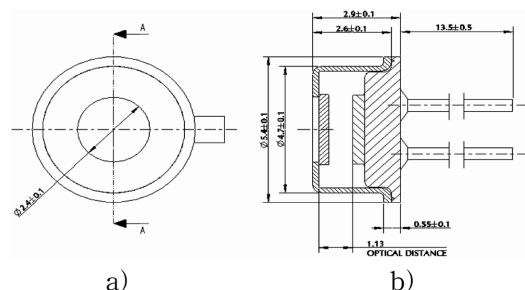


Fig. 4. The thermopile detector which is used in simulation: a) top view b) section A-A.

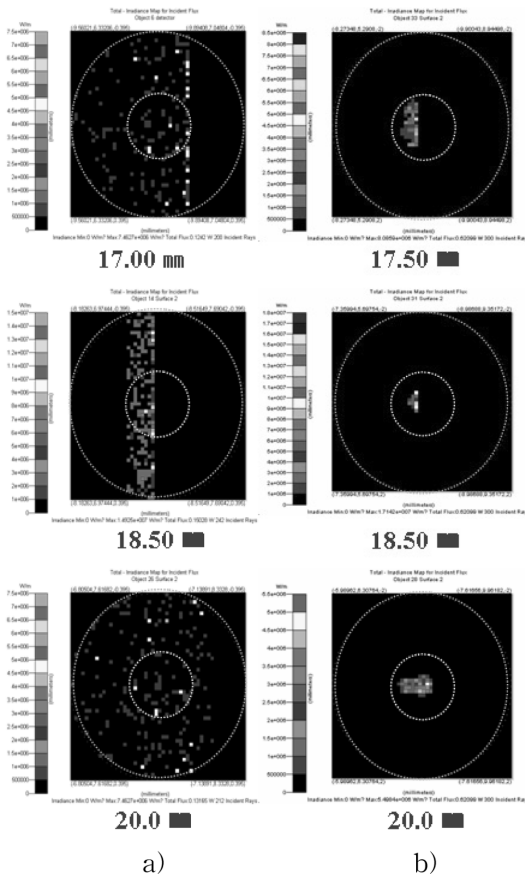


Fig. 5. Infrared light distribution on the detector's filter and active area: a) with vertical-mirror surface, b) with curved-mirror surface.

면에 도달함을 볼 수 있고, 오목 반사 벽면을 지닌 광 공동은 원형 상으로 집광되었음을 확인할 수 있다.

따라서 오목한 반사 벽면의 광 공동 구조는 원형의 분포를 가지므로, 초기 평행광의 면적보다 작은 면적으로 집광된다. 이로 인해 모든 광이 써모파일 검출기의 열전쌍의 유효 단면적에 도달함으로써 광 강도가 향상됨에 따라 적외선 센서의 출력 전압이 향상될 것이라 예측할 수 있다.

그리고 두 광 공동 구조의 거리에 따른 광 강도 특성을 모의 해석한 결과, 광원의 초기 광량을 0.66 watts로 했을 때 적외선 센서 필터에 도달하는 광량은 수직 반사 벽면을 갖는 광 공동은 약 160 mW이고, 오목한 반사 벽면을 갖는 광 공동은 초기 광량의 90% 이상의 광량이 들어오는 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

따라서 식 (6)에 따라 유기되는 전압은 오목한 반사 벽면 구조를 갖는 광 공동의 출력전압이 증대될 것임

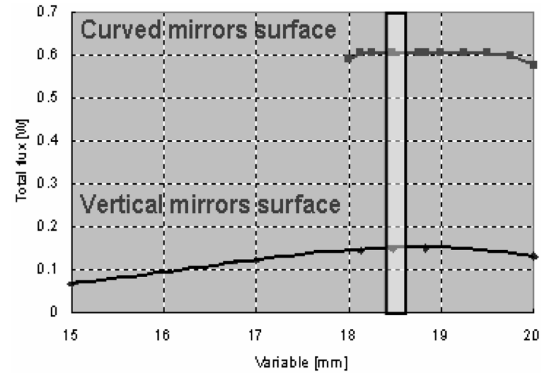


Fig. 6. A characteristics of the light intensity according to the position at thermopile detector surface.

을 또한 유추할 수 있다. 그리고 Fig. 5와 Fig. 6에서 적외선 센서가 놓이는 위치는 18.50 mm에서 최적의 범위인 것을 모의해석을 통해서 알 수 있었다.

IV. 실험 방법

4.1. 센서제작

본 연구에서 제작한 센서 모듈은 세 개의 주요 구성 요소를 가지고 있다. 첫째 IR(Infra-Red) 광원과 모의해석 결과를 기반으로 새롭게 제작된 오목한 반사 벽면을 갖는 광 공동(Cavity)과 써모파일 및 NTC 써미스터를 갖는 온도센서 적외선 가스 센서부, 두 번째는 안정적이고 일정한 적외선 광원을 출력하기 위한 적외선램프 회로부, 세 번째는 제작된 각 모듈에 주소를 할당해 주고 광량을 조절하며, 검출기에서 받은 신호를 A/D Converting 해주는 MCU(Micro-Controller Unit)로 구성되어 있다. Fig. 7은 상기 제시된 구성 요소들을 포함한 완성된 비분산 적외선 가스 센서 모듈을 보여주고 있다.

4.2. 실험방법

본 실험에는 모의해석 결과에 의한 정확한 측정을 위해 광 공동 구조 외에는 모두 똑같은 조건 하에 실험을 수행하였다. 가스측정은 항온·항습기(온도($\pm 0.2^\circ\text{C}$)와 습도($\pm 3\%RH$))를 조절) 내부에 밀폐된 가스 챔버(Chamber)를 사용하여 다른 가스나 습도의 영향을 받지 않게 구성하였으며, 가스 농도는 Innova사의 가스 분석기로 이산화탄소 농도를 1 ppm 이하의 정밀도로 측정하여 기준 농도(Reference concentration)를 제공하였다.

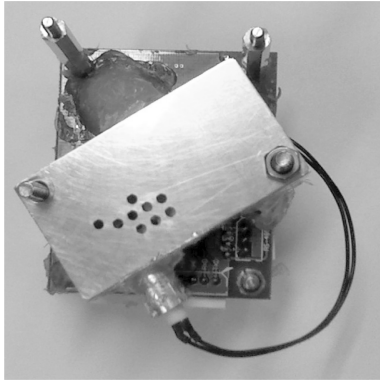


Fig. 7. Developed CO₂ gas sensor module.

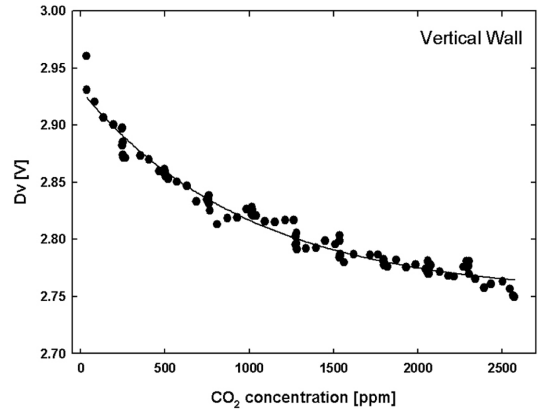
실험방법은 처음에 가스 센서 모듈의 IR램프를 on-time 350 ms와 off-time을 5 sec로 설정한 다음에 챔버 안에 넣었다. 그 다음 온도는 25°C, 습도는 45%R.H로 설정한 후에 챔버 내에 다른 가스의 영향을 받게 하지 않기 위한 고순도 Air로 Purge함으로써 이산화탄소의 농도를 0 ppm으로 설정하였다. 그 다음 센서 모듈이 안정화 될 때까지 일정한 시간을 기다려 준 후, 주 컴퓨터의 명령에 의해 가스 컨트롤러는 이산화탄소를 0 ppm에서 2,500 ppm까지 250 ppm 간격으로 주입시켰다. 그 다음 가스 농도 변화에 따라 출력되는 써모파일 전압 값을 RS-485 통신을 통해 메인 컴퓨터에 저장시킨 다음 이를 분석하였다.

V. 실험 결과

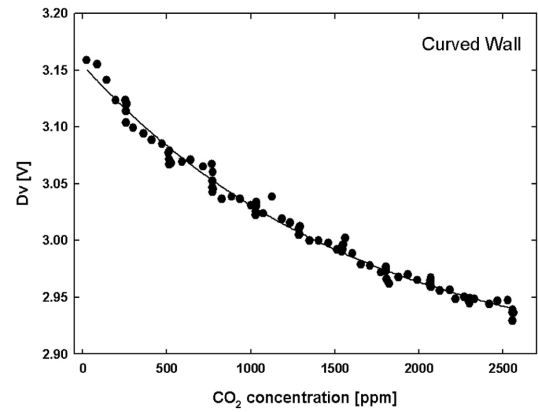
본 실험에서는 모의해석을 근간으로 하여 25°C, 45%R.H.에서 이산화탄소를 0 ppm에서 2,500 ppm까지 주입 시켰을 때 수직 반사 벽면과 오목한 반사 벽면을 갖는 센서의 출력전압과 센서의 가스 응답특성을 살펴 보았다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 오목한 반사 벽면을 사용한 센서가 수직 반사 벽면의 센서보다 약 200 mV 증가한 3.16 V를 나타내었다. 그리고 각 광 공동의 감도를 알아보면 수직 반사 벽면을 사용했을 때 약 210 mV, 오목한 반사 벽면은 220 mV의 변화를 볼 수 있다.

이는 집광으로 인해 입사된 광이 모두 검출기에 도달하며, 이때 단위면적당 광 강도를 증가시켜 센서부에서의 출력전압이 증가할 것이라는 모의해석 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 6에서 제시된 바와 같은 큰 출력전압을 나타내지는 않았으며, 광 강도 증가에 의한 감도의 증가는 수직 반사 벽면의 경우보



a)



b)

Fig. 8. Variation of light intensity according to the CO₂ at 25°C, 45%R.H.: a) with vertical-mirror surface, b) with curved-mirror surface.

다 조금 크게 측정되었다. 이 결과는 적외선 센서가 놓이는 위치(Variable)에 정확히 위치하지 않아 집광상태가 모의해석 결과와 정확히 일치하지 않았기 때문이라 사료된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 광학적 센서의 초기 출력전압 증가에 의한 감도 및 신호대 잡음비(S/N)특성을 향상시키기 위한 일환으로 광 공동 구조에 따른 광학적 특성 변화를 모의해석하고, 센서의 출력전압과 감도특성 향상 방안에 관하여 살펴보고자 하였다. 적외선 방식의 가스센서로 본 연구에서 제안한 광 공동을 이용할 때 적외선이 놓이는 거리에 정확히 위치시켜 광을 집광시켜주는 광

공동을 제작한다면 광 강도, 감도 그리고 신호대 잡음 비(S/N)가 더욱 향상된 광학적 센서를 제작할 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 일부분은 2007년도 충주대학교 학술연구 조성비와 충주대학교 지역혁신센터(RIC-ReSEM)의 지원에 의하여 수행되었으므로, 이에 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]
r_s	: A radius which concentrated radiation [m]
r_i	: A initial radius of parallel radiation [m]
T_{amb}	: Atmosphere 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	: 5.67×10^{-8} [W/(m ² · K ⁴)]

α_A, α_B : Seebeck coefficients [mV/K]

참고문헌

- [1] Wagner, E., R. 광 공동 and K. Spenner, "Sensors: volume 6 Optical Sensors", VCH press, Chapter 12, 278, (1991)
- [2] 윤동현, "이산화탄소 가스 검출기", Korea Patent NO. 1019970077148, (1999)
- [3] 오권일, "타원 돔형 반사경이 구비된 비분산 적외선 가스 센서", Korea Patent NO. 10-0694635, (2007)
- [4] 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. Digest of Transducers 2005, The 13th International Conf. on Solid-Sate Sensors and Microsystems, 2, Seoul, Korea, 1211-1214, (2005)
- [5] George, S., M. Crawford, M. George and R.G. John, "Design of a Portable Optical Sensor for Methane Gas Detection", *Sensors and Actuators B*, 113, (2006)
- [6] David, M.S., "Gas Sensor", US Patent NO. 6,753,967 B2, (2004)
- [7] Hong, T.S. and C.H. Peter, "Non-Dispersive Infrared Gas Sensor", US Patent NO. 6,469,303 B1, (2002)
- [8] 이승환, 박정민, 박영환, 한승오, "실내 공기질 향상을 위한 비분산 적외선 이산화탄소 가스센서", 한국전기전자재료학회, **18**(7), 628, (2005)
- [9] Choi, ILhang, "A Silicon-based Thermopile Infrared Detector Array Containing On-chip Readout Circuitry", *Technical Report, The university of Michigan Ann Arbor*, 176, 21, (1986)