

실내 공기질 향상을 위한 비분산 적외선 이산화탄소 가스센서

NDIR CO₂ Gas Sensor for Improving Indoor Air Quality

이승환^{1,a}, 박정민¹, 박영환¹, 한승오²

(Seung-Hwan Yi^{1,a}, Jeong-Min Park¹, Young-Hwan Park¹, and Seung-Oh Han²)

Abstract

We have simulated and proposed novel optical cavity, which has two elliptical mirrors, for NDIR gas sensor module and have tested it from 0 ppm to 2,000 ppm CO₂ concentration. The proposed sensor module shows the maximum peak voltage at 500 ms pulse modulation time, however, it shows a maximum voltage changes at 200 ms pulse duration with 18,000 times amplification gain. From 0 ppm to 2,000 ppm, the voltage difference of sensor module (ΔV) shows 360 mV at 200 ms pulse duration and 3 sec turn-off time. The response time of designed sensor module is about 30 seconds.

Key Words: Indoor air quality, NDIR gas sensor, Optical cavity, Concave elliptical mirrors

1. 서론

근래 급속한 산업화에 따른 에너지 소비의 증대와 자동차의 증가로 인해 대기 오염은 가속화되어 도심에서 실시간 공기 질을 대중에 알리고자 하는 노력이 증대되고 있으며, 또한 대규모 주상 복합 건물의 출현과 함께 더욱 관심이 고조되고 있는 것이 주거 공간 내에서의 공기 질이라 할 수 있다. 그리고 건물 신축 시 사회적인 관심을 끌고 있는 것은 각종 건축 재료에서 방출되는 포름알데히드 (HCHO), 휘발성 유기물 (Volatile Organic Components)을 들 수 있는데, 이들은 새집증후군 (Sick House Syndrome) 이라 명명된 호흡기 및 피부 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다. 새집증후군을 유발시키는 상기 물질이외에 실내 공기 질 향상을 위해 유지 관리되어야 할 항목으로 2004년부터 환경부에서 입법 고시[1]된 물질로는 일산화탄소 (100 ppm 이하), 이산화탄소 (1,000 ppm 이하)와 부유분진 (PM 10)을 들 수 있다. 비록 저

농도에서 인체에 무해한 이산화탄소는 사무 작업 공간 내에서 5,000 ppm 이상의 농도에 장기간 노출시 피로감과 졸음을 유발시킴으로 인해 산업 보건상의 문제로 대두되어 적절한 환기 시스템의 도입을 권고하고 있다. 또한 이산화탄소 가스는 지표면에서 대기 중으로 복사되는 특정 파장 (2.7 μm , 4.26 μm)의 적외선을 흡수[2]함으로써 평균 대기온도를 상승시키는 지구 온난화의 주원인으로 작용함으로써, 도쿄의정서에 의거하여 각국은 이산화탄소 발생량을 1990년대 초반의 수준으로 낮추어야 하는 실정이다. 이를 위한 대응 방안 중의 하나로서 태양열, 풍력을 이용한 대체 에너지 개발이 진행 중이나, 그 효과는 아직 미미한 것으로 알려져 있다.

한편 생활수준의 향상으로 참살이 (Well-being)에 대한 사회적 관심의 증대에 따라 각종 공기질 향상을 위한 공기청정기, 이온 발생기 등이 보급되어 사용되고 있으나, 이들은 인체에서 방출되는 이산화탄소 가스의 영향을 고려하지 않고 있다. 따라서 에너지 소비의 감소와 실내 공기 질 향상을 위한 적극적인 대응 방안으로 제시되고 있는 것이 전열교환기 (Heat Exchanger)이다[3]. 이는 냉난방을 유지한 공간 내에서 오염된 공기의 배출시 열교환부를 통하여 흡기되는 신선한 공기와 열에너지를 교환하게 함으로써 오염된 공기는 배출되나, 냉난방시의 에너지 손실을 최대한 줄일 수 있는

1. 충주대학교 정보제어공학과
(충북 충주시 이류면 검단리 123)

2. 고려대학교 전기공학과

a. Corresponding Author : isaac_yi@chungju.ac.kr

접수일자 : 2005. 3. 28

심사완료 : 2005. 6. 10

표 1. 이산화탄소 센서 비교.

Table 1. Comparison of CO₂ gas sensors.

항 목	NDIR 방식	고체 전해질
가격	고가	저가
소비전력	1 watt 이하	1 watts 이상
주기적 보정	불필요	필요 (년 1회)
기본 원리	특정과장의 광흡수	셀 내의 이온전도
내구 신뢰성	5년 이상	2년 이하

효과를 갖고 있어 건물에 설치 운용되고 있으나, 2006년부터는 주거공간에 의무설치를 법제화하고 있는 실정이다. 그러나 전열교환기의 효과적인 운영을 위해서는 1) 실내 공기질을 평가할 수 있는 대상의 선정과 2) 이를 측정할 수 있는 센서의 부착을 통하여 효과적으로 전열 교환기를 운영함으로써 에너지 소비를 최대한 줄일 수 있는 방안이 모색되어야 한다.

세계 각국이 채택하고 있는 공기 질 평가 대상 가스는 이산화탄소 가스이고, 이산화탄소 가스 농도 측정을 위한 센서로는 1) 고체전해질 형[4]과 2) 비분산 적외선(NonDispersive InfraRed)을 이용한 가스센서[5,6]를 들 수 있다. 비록 고체 전해질 형 이산화탄소 센서가 저렴하나, 적외선 가스센서에 비해 장기 신뢰성, 감도 특성 및 정확성이 결여되어 있는 단점을 지니고 있으며, 각 센서들을 비교 제시하면 표 1과 같다.

표 1에 제시한 바와 같이 적외선을 이용한 가스센서의 특징은 물리적인 원리를 이용함으로써, 타 가스에 대한 간섭을 배제할 수 있으므로 선택성이 아주 우수하다는 큰 장점을 지니고 있다.

본 논문에서는 공기 질 향상을 위해 채택되고 있는 적외선 가스센서의 국산화 일환으로 핵심 부품인 광 공동 (Optical Cavity)을 새롭게 제안하고, 이의 구현을 통해 고유한 적외선 가스센서를 제시하고자 한다.

2. 광 공동의 설계 개념

2.1 광 공동 제작

현재까지 NDIR 가스센서는 두 가지 기본 설계 개념[7], 즉 1) 단일광원에 두개의 가스 챔버 (one light source with two gas chamber)를 사용한 시스템과 2) 단일 광원 단일 챔버 (one light source with one gas chamber)로 설계 · 사용되고 있다. 근래 광범위하게 사용되고 있는 휴대용 혹은 소형 가스센서 모듈의 설계 관점은 단일 광원에 단일

챔버를 사용한 네 가지 광 공동 개념을 바탕으로 설계, 현용되고 있다. 그 첫 번째 시스템은 실린더 혹은 사각형의 튜브형 광공동 형태를 사용한 것[8]과 두 번째 구조로 광원의 장시간 사용에 따른 열화로 인한 출력 전압을 보상하기 위한 구조로 두 개의 광원과 하나의 센서를 채택한 구조[9,10]가 제안되었으며, 세 번째 구조로는 첫 번째 구조와 동일한 형상을 지나, 인가 전압에 따라 투과되는 파장을 조절할 수 있는 Fabry-Perot 필터를 채택한 센서[11]와 마지막으로 소형의 가스 챔버 내의 광 경로를 극대화한 세 개의 오목한 거울을 이용한 센서[12]로 분류할 수 있다.

이들 광 공동 구조 중 세 개의 오목한 거울 구조를 이용한 센서는 식 1)에 제시한 Beer-Lambert 공식[7]에서도 알 수 있듯이, 긴 광 경로 (L)을 지니고 있기 때문에 미량의 가스 농도 (x) 변화에 민감한 센서특성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 두 번째 세 번째 구조에서와 같이 별도의 추가적인 부품을 요구하지 않음으로 인해 저가형 센서의 제작이 가능하다는 큰 장점을 갖고 있음을 알 수 있다.

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

단, I_o : 광원에서 방출되는 광 강도 (W/cm^2),

I_d : 적외선 센서부에서의 광 강도 (W/cm^2)

α : 특정 가스의 적외선 흡수 계수 (absorption coefficient), x : 가스 농도 (ppm), L : 광 공동 내에서 광원과 가스 센서 간 광 경로 길이 (m)

상기 제시한 오목 거울을 이용한 광 공동 (Optical Cavity) 구조의 광로 해석 결과를 제시하면 그림 1과 같다. 그림 1에 제시한 세 개의 오목 거울을 이용한 적외선 가스센서는 다음과 같은 두 가지 특징적인 구조로 이루어져 있다. 첫째 적외선 광원에 의하여 방출되는 빛을 평행 광으로 만들기 위한 포물 반사경 (Parabolic reflector, 오른쪽 상단 구조)과 둘째 정해진 소규모 체적 내에서 다중 반사를 통하여 광로를 길게 하기 위한 세 개의 원호로 이루어진 반사경 (reflecting mirrors)을 갖고 있다는 것이다. 이때 세 원호의 중심은 각 반사경의 근처에 뒹으로써 대향하고 있는 반사경에서 반사된 빛의 퍼짐을 방지한 구조로 되어 있으며, 컴퓨터 모의해석을 통해 그 경로에 대해서 살펴보면 그림 1과 같이 입사된 평행 광이 적외선 센서의 표면까지 평행하게 전달, 조사됨을 확인할 수 있다.

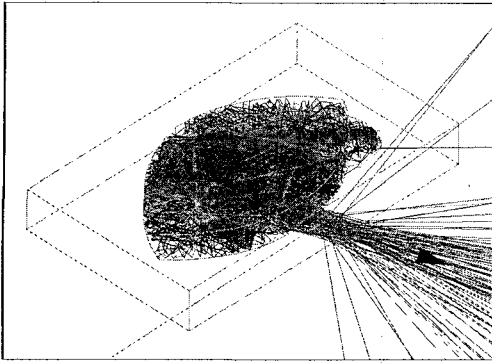


그림 1. 세 개의 타원형 반사경 구조의 모의해석 결과.

Fig. 1. Simulation result of three elliptical mirrors structure.

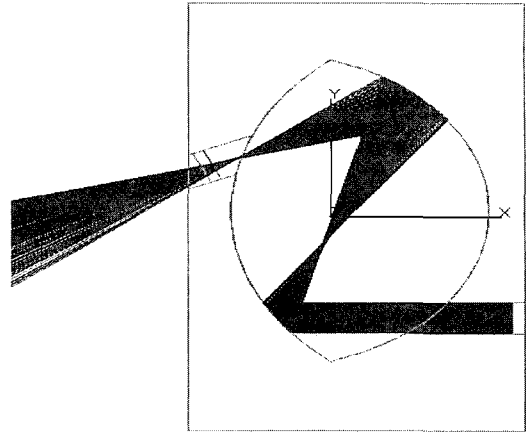
그림 1에 제시한 구조와 차별화한 새로운 개념의 광 공동 구조는 그림 2와 같다. 그림 2(a)에 제시된 본 연구의 고유한 광 공동 구조는 초기에 직경 4 mm의 평행광이 포물 반사경을 통하여 조사된 후, 두 개의 오목반사경을 통하여 적외선 센서에 도달하는 구조로 이루어져 있다. 그림 2(a)에서 알 수 있듯이 입사광은 두 번의 반사 후 적외선 센서의 전단부에 도착하고, 센서의 전단부에서 입사광이 집속되는 특징을 갖고 있다. 한편 그림 2(b)에 제시된 초기 광 출력 660 mW는 두 번의 반사에 따라 621 mW로 감소되는 것을 보여주고 있으나, 반사된 빛의 단위 면적당 강도는 빛이 센서의 전단부에서 집속되는 특징을 갖고 있기 때문에 증가됨을 본 모의해석 결과를 통하여 확인할 수 있다.

2.2 적외선 광량과 써모파일 출력전압의 상관성

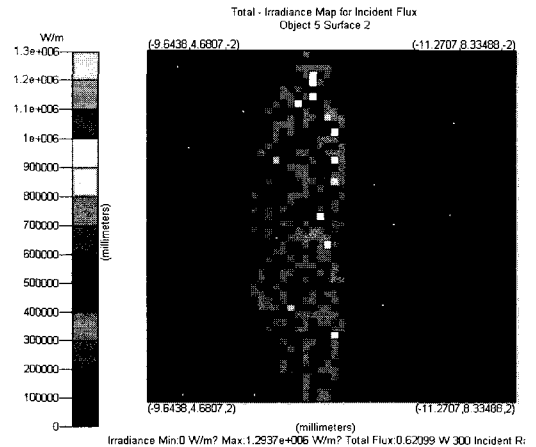
일반적으로 주위의 온도 보다 높은 온도를 지닌 물체는 열방산 (thermal radiation)을 하게 되고, 이때 단위면적당 방사되는 열에너지는 식 (2)에 제시된 Stefan-Boltzmann 법칙[13]을 따르는 것으로 알려져 있다.

$$R_T = \int_0^\infty R_T(\nu) d\nu = \sigma(T_2^4 - T_{amb}^4) \quad (2)$$

단, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$, T_2 : 열방산 물체의 절대온도(K), T_{amb} : 분위기 온도(K)



(a)



(b)

그림 2. 두 개의 반사경으로 이루어진 새로운 공동의 모의해석 결과: (a) 공동내에서 광 경로, (b) 센서부에서의 출력과 광 분포도.

Fig. 2. Simulation results of a newly designed cavity structure with two mirrors: (a) ray tracing in the cavity, (b) ray distribution and output power at the detector side.

또한 비인의 변위 법칙 (Wien's displacement law)에 의하면 임의의 온도 T와 이 온도에서 방사되는 최대 광파장의 곱은 항상 일정함이 식 (3)과 같이 알려져 있다.

$$\lambda_{max} T = 2.898 \times 10^{-3} (m \cdot K) \quad (3)$$

표 2. 적외선 램프의 특성.

Table 2. Characteristics of Infra-red lamp.

정격 출력(mW)	표면 온도(K)	λ_{max} (μm)
660	983	2.95

따라서 식 (2)와 (3)으로부터 열에너지를 방사하는 물체의 단위 면적당 방사에너지, R_T 를 알고 있는 경우 열 방사체의 온도와 최대 파장을 알 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서 사용한 적외선 램프의 정격출력을 기준으로 표면온도와 이때 방사되는 최대 파장을 제시하면 표 2와 같다.

한편 식 (1)과 (2)로부터 평행 광이 조사되는 경우와 평행 광의 집속에 의한 광 강도를 살펴보면 식 (4)와 같이 표현된다. 즉, 정격 출력의 평행 광이 조사되는 경우 단위 면적당의 광 강도는 (4)식의 우측식과 같이 나타낼 수 있으나, 광 공동 내에서 두 번의 반사에 의해 광 강도가 감소하고, 반경 r_s 내로 광이 집중되는 경우 식 (4)의 좌측과 같이 표현된다. 따라서 광 공동 내에서 두 번의 반사를 통하여 집중된 광을 갖는 구조에서 센서 전단부에 도착하는 광 강도, I_d^F 를 Beer-Lambert 식을 이용하여 제시하면 식 (5)와 같다.

$$I_o^F = \left(\frac{E}{\pi r_s^2}\right) \cdot (0.97)^2, I_i = \left(\frac{E}{\pi r_i^2}\right) \quad (4)$$

$$I_d^F = I_o^F \cdot \exp(-\alpha x L) \\ = \left(\frac{r_i}{r_s} \cdot 0.97\right)^2 \cdot I_o \cdot \exp(-\alpha x L) \quad (5)$$

단, E : 초기 입사광의 출력 (watts), r_s : 집중된 빔의 반경 (m), r_i : 초기 평행 광의 반경 (m), 반사경의 표면에 금을 증착한 경우 적외선의 반사계수는 0.97[7]

즉, 식 (5)에 제시한 바와 같이 임의의 길이(L)를 갖는 광 공동에서 두 번의 반사를 거쳐 적외선 광원이 집중되는 구조는 초기 조사되는 광의 반지름에 대한 집중광의 반지름비와 광 공동 반사면의 반사계수의 곱의 자승에 비례하여 증가됨을 알 수 있다.

한편 상온(T_{amb})에서 온도 T_2 의 적외선을 흡수하는 실리콘 열전쌍 (Silicon Thermopile)의 열기

전력은 식 (6)과 같이 표현된다[14]. 이때 α_A 와 α_B 는 실리콘 열전쌍을 이루는 물질의 지백상수 (Seebeck coefficient)을 의미한다.

$$V_{AB} = \int_{T_{amb}}^{T_2} (\alpha_A - \alpha_B) dT \\ = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (T_2 - T_{amb}) \quad (6)$$

따라서 실리콘 열전쌍에서 발생하는 전압은 열 방사체의 온도와 주변 분위기 온도 차 ($T_2 - T_{amb}$)와 지백상수 ($\alpha_A - \alpha_B$)의 곱으로 표현된다. 또한 적외선 센서의 전단부에 조사되는 적외선 광량 (infrared radiancy, R_T)은 식 (1)에 제시된 Beer-Lambert 식의 광 강도와 동일한 개념을 갖고 있으므로, 식 (2)와 식 (5)을 정리하면 식 (7)로 표현된다.

$$R_T = I_d^F \\ = \left(\frac{r_i}{r_s} \cdot 0.97\right)^2 \cdot I_o \cdot \exp(-\alpha x L) \\ = \sigma (T_2^4 - T_{amb}^4) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)에 의하여 적외선 광 강도와 온도에 따른 실리콘 써모파일의 출력 전압간의 관계를 도출하면 식 (8)과 같다.

$$V_x = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot \frac{r_i^2 \cdot 0.97^2 \cdot I_o}{\sigma \cdot r_s^2 \cdot (T_2 + T_{amb})(T_2^2 + T_{amb}^2)} \cdot \exp(-\alpha x L) \\ = \eta \cdot \exp(-\alpha x L) \quad (8)$$

단, η 는 비례상수

즉, 출력전압은 실리콘 열전쌍의 지백상수차, 초기 입사광의 강도와 온도의 함수로 표현될 뿐만 아니라, 집중광의 반경이 감소함에 따라 출력 전압은 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 가스가 존재하는 경우 실리콘 열전쌍에 유기되는 기전력은 광로의 길이가 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 식 (8)의 양변에 자연로그를 취하면 식 (9)와 같이 표현됨으로써 가스농도의 변화에 따른 출력전압은 선형적인 결과를 나타내게 된다.

$$\ln V_x = \ln \eta - \alpha L x \quad (9)$$

3. 센서 모듈의 제작과 실험

본 연구에서는 전술한 모의해석 결과를 바탕으로, 새로운 광 공동과 이를 이용한 비분산 적외선 센서 모듈을 개발하였다. 본 연구를 통한 샘플의 제작에 두 개의 상용제품을 이용하였는데, 첫 번째로 Gilway Technical Lamp사의 적외선 광원과 평행 광을 확보하기 위해 포물 반사경을 사용하였으며, 방사되는 광은 1 μm 에서 5 μm 까지 연속 광을 방출하는 것으로 알려져 있다. 두 번째로 사용한 상용 제품은 적외선 센서로서 국내 GE Thermo-metrics Technologies사의 ZTP-315 제품을 가스 센서용으로 신규 개발한 제품인데, 써모파일 상부의 패키지에 부착된 일반적인 광학 필터(5 μm 에서 20 μm 의 적외선 투과 필터) 대신 이산화탄소 가스의 흡수 파장인 4.26 μm 를 중심으로 20 nm의 반치폭을 갖는 필터를 채택한 제품을 사용 하였다.

그림 3은 본 연구에서 새롭게 고안된 비분산 적외선 가스센서 모듈을 보여주고 있는데, 이는 세계의 주요부로 나누어진다. 첫 번째는 적외선 광원의 조절부로서 적외선이 방사되는 시간을 200 ms에서 600 ms까지 100 ms 간격으로 조절할 수 있게 하였으며, 적외선 센서의 출력 전압 안정화를 기하고 램프의 수명시간의 증대를 기하기 위하여 2 초에서 3 초간 0.5 초 간격으로 적외선 광원을 단속하였다. 두 번째 부분은 광 공동 (Optical Cavity) 부로서, 본 연구의 모의해석을 통한 결과를 바탕으로 설계 제작한 공동을 사용하였다. 마지막으로 실리콘 열전쌍의 미소 전압을 증폭하기 위한 증폭단으로써, 본 연구에서는 옴셋 전압이 작고 (약 1 μV), 열적 드리프트가 작은 AD 8628과 기준 전압의 제공을 위해 LM385를 사용하였으며, 실험 과정에서 증폭 비는 조정 가능하도록 제작 하였으나, 본 연구에서는 증폭비 18,000 배를 기준으로 하여 출력 전압을 측정하였다.

제작한 센서 모듈은 가스 챔버 내에서 그 특성을 측정하였는데, 챔버는 세 가지 구성요소로 이루어져 있다. 즉, 1) 가스 주입부, 2) ± 30 ppm 기준 이산화탄소 트랜스미터(Senseair 사의 eSense), 3) 15개의 자료를 인식, 저장할 수 있는 컴퓨터와 연결된 자료인식 (Data Aquisition) 시스템과 측정값의 정확성과 시간에 따른 피크 전압 (일정 농도의 이산화탄소 주입에 따른 출력전압)과 기준전압 (인공 공기상태에의 적외선 센서의 출력 전압)의 차 (ΔV)를 분석 저장하기 위한 디지털 오실로스코프(Lecroy사, WaveRunner 6505A)로 구성하였다.

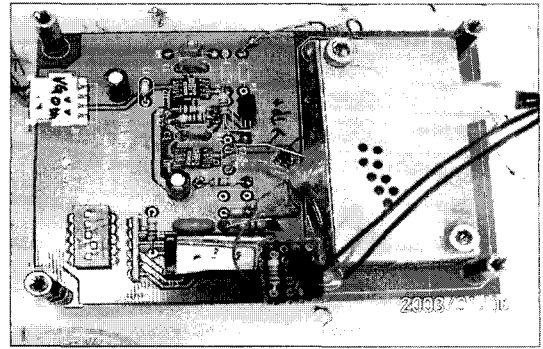


그림 3. 개발된 고품위 비분산 적외선 가스센서 모듈.

Fig. 3. Developed novel NDIR gas sensor module.

한편 제작한 센서 모듈의 응답시간은 시간적 변화에 따른 피크전압과 기준전압의 차이를 저장함으로써 확보하였는데, 초기 안정된 출력 전압 (ΔV)에서 가스의 주입 후 초기 출력전압 (ΔV)의 63 % 변화에 이르는 시간으로 규정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

이산화탄소 트랜스미터의 기본적인 구성요소로서, 본 연구의 센서 모듈을 사용하기 위해선 가스 농도에 따른 전압 변동을 분석하는 것이 유용하기에, 본 연구에서는 0 ppm에서 2,000 ppm의 이산화탄소 가스 농도의 변화에 따른 센서 모듈의 출력 전압 특성을 살펴 보았으며 그 결과를 제시하면 그림 4와 같다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 200 ms 동안 적외선 램프를 점등 시 가장 큰 출력 신호의 변화 (ΔV)를 나타냄을 볼 수 있다. 그러나 점등시간이 300 ms에서 500 ms로 증가하는 경우, 출력 신호의 변화는 큰 폭을 갖고 감소하여 일정한 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이러한 실험적 결과는 본 연구에서 사용한 실리콘 열전쌍의 시상수 (time constant)가 약 200 ms 정도이고, 이에 따라 출력 전압의 변화가 200 ms이상에서 포화되는 특성을 나타내기 때문으로 사료된다. 즉, 적외선 광원을 점등 시 실리콘 열전쌍은 동 시간 동안 적외선을 흡수하게 되고, 이에 따라 출력 전압은 상승하게 된다. 그러나 점등시간이 계속 증가하여 실리콘 열전쌍의 시상수보다도 크면 실리콘 열전쌍의 출력 전압은 포화됨으로 인해 출력전압의 변화량은 감소하는 특성을 나타내게 되는 것으로 사료된다.

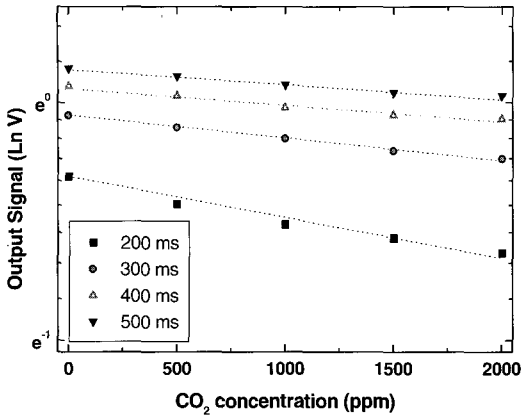


그림 4. 적외선 펄스 조절 주기 함수로 표현한 이산화탄소 농도 대비 센서 출력 곡선.

Fig. 4. Output signal versus CO₂ concentration as a function of IR pulse modulation period.

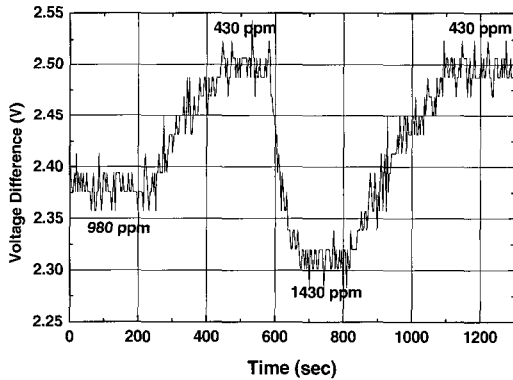


그림 5. 설계된 센서 모듈의 응답시간 특성 곡선.

Fig. 5. Response time characteristics of de-siged sensor module.

그림 5는 이산화탄소 가스의 농도 변화에 따른 센서모듈의 응답특성을 나타낸 것이다. 본 연구를 통하여 고안 제작된 센서 모듈의 응답시간은 약 30 초 정도임을 이산화탄소 가스 농도를 430 ppm에서 1430 ppm으로 변화 시 확인할 수 있다. 이는 기존의 전해질 방식의 센서의 응답속도가 1분 이상되는 것에 비해 약 2배 이상의 빠른 응답시간 특성이 확보될 수 있음을 확인할 수 있고, 실험시 기준 센서로 사용한 NDIR 방식의 가스센서와 유사한 특성을 나타냄을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 이산화탄소 가스 측정을 위한 고유한 비분산 적외선 광 공동을 설계하고, 모의해석을 통해 그 유용성을 확인하였다. 새롭게 고안된 광 공동은 두 개의 오목한 반사경과 적외선의 집광을 위한 포물 반사경을 갖고 있으며, 구현된 광 공동은 기존의 개념과 비교하여 소규모의 공동 내에서 적외선 광로를 증가시킴과 동시에 집광시킴으로써 센서의 출력 전압을 향상시킬 수 있는 특징을 갖을 것으로 사료된다. 비록 적외선 광원의 점등시간을 증가시킴에 따라 기준 전압과 가스 주입 상태에서의 출력 전압 차를 증가시킬 수 있으나, 그 변화폭은 감소함을 확인 할 수 있다. 본 연구를 통하여 제작된 비분산 적외선 가스센서 모듈은 이산화탄소 가스 뿐만아니라, 적외선을 이용한 가스 감지가 요구되는 자동차의 HVAC 시스템의 차내 공기질 및 냉매 유출 감지와 최근 사회적 관심이 증대되고 있는 건물 내의 실내 공기질 판단용 공조 시스템의 핵심센서로 응용 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구의 일부분은 2004년도 충주대학교 학술연구조성비에 의하여 수행되었으므로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 환경부, “지하 생활공간 공기질 관리법 시행령 개정령 안”, 2003.
- [2] E. Wagner, R. Dandliker, and K. Spenner, “Sensors: volume 6: Optical Sensors”, VCH press, Chapter 9, p. 204, 1991.
- [3] 이상렬, “일본의 하이브리드 환기시스템”, Journal of KSME, Vol. 44, No. 4, p. 26, 2004.
- [4] 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, p. 56, 2000.
- [5] G. Zhang, J. Lui, and M. Yuan, “Novel carbon dioxide gas sensor based on infrared

- absorption", *Opt. Eng.*, Vol. 39, No. 8, p. 2235, 2000.
- [6] O. Zhelondz, M. Horn, O. Kanoun, and H. R. Trankler, "Temperature influence correction of a NDIR carbon dioxide sensor", *Proceedings of Sensor*, p. 243, 2003.
- [7] E. Wagner, R. Dandliker, and K. Spenner, "Sensors: volume 6 Optical Sensors", VCH press, Chapter 12, p. 278, 1991.
- [8] J. Y. Wong, "NDIR Gas Sensor", US Patent Patent, No. 5,444,249, 1995.
- [9] M. Chelvayohan, "Methods and Apparatus for Infrared Gas Sensing", US Patent No. 6,067,840, 2000.
- [10] 박일용, 이인기, 이성기, 강경목, 강신원, 조진호, "시간응답특성을 고려한 2 광원 1센서 방식의 capnograph 시스템용 NDIR CO₂ 가스채널 설계 및 측정회로의 구현", *한국센서학회 논문지*, 10권, 5호, p. 279, 2001.
- [11] M. Noro, K. Suzuki, N. Kishi, H. Hara, T. Watanabe, and H. Iwaoka, "CO₂/H₂O gas sensor using tunable fabry-perot filter with wide wavelength range", *IEEE International conference on MEMS*, p. 319, 2003.
- [12] H. Martin and E. Goran, "Gas Sensor", International Patent, Patent, No. WO98/09152, 1998.
- [13] R. Eisberg and R. Resnick, "Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles", John Wiley and Sons, 2nd edition, Chapter 1, p. 4, 1985.
- [14] ILhang Choi, "A silicon-based thermopile infrared detector array containing on-chip readout circuitry", Technical Report, The university of Michigan Ann Arbor, No. 176, p. 21, 1986.