

타원형 광구조물을 갖는 비분산 적외선 알코올 센서의 특성

이승환* · 김진호* · 강병도** · 인정민**

Characteristics of NDIR Alcohol Sensor with Elliptical Optical Structures

SeungHwan Yi*, JinHo Kim*, ByoungDo Kang**, JeongMin Ihn**

Key Words: Alcohol sensor (알코올 센서), NDIR sensor (비분산 적외선 센서), Elliptical structures(타원형 구조물), Offset voltages (오프셋전압), Sensitivity (감도)

ABSTRACT

NDIR (Non-dispersive infrared Rays) alcohol sensor has been prototyped and its temperature characteristics were measured. In order to design novel optical alcohol sensor, elliptical structures with one common foci were modeled and analyzed their optical properties. After analyzing elliptic optical structures, a prototype alcohol sensor module was tested according to the temperature variations from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. The offset voltages of alcohol sensor decreased from 1.1056 V at the temperature $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to 0.7339 V at $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. However, the highest sensitivity of alcohol sensor showed about $303\text{ }\mu\text{V/ppm}$ at room temperature.

1. 서론

현대생활에서 자동차는 대중교통 수단 및 개인 여행 및 운송수단으로서 점점 중요성이 증대되고 있으며, 최근 자동차는 단순히 운송 수단으로서뿐만 아니라 움직이는 사무실로서의 역할이 증대되고 있다. 또한 전통적 기계공학의 산물에서 정보(Information), 통신(Communication) 및 전자기술(Electronic Technologies)의 융합적 총아로서 성장하고 있으며, 자율자동차(Autonomous vehicle) 시대의 도래를 목전에 두고 있는 상황이다.

스마트 자동차(Smart Cars) 시대에서 자동차 내부의 정보(Information)를 확보하기 위한 센서기술과 이를 종합·분석하고, 명령을 내릴 수 있는 ECU(Electronic Control Units)와 액츄에이터의 종합적인

기술개발은 한층 중요성이 증대되고 있으며, 이들을 통한 자동차 안전사고의 중요성은 증대되고 있다.

전세계적으로 자동차 사고 중 가장 높은 빈도의 사고 발생요인으로는 1) 운전자의 시선집중을 방해하는 요인들, 2) 과속, 3) 음주운전이 차지하고 있으며, 음주운전을 방지하기 위해 미국에서는 1980년대부터 이의 중요성을 인식하여 사고경감을 위한 호흡기 알코올 시동잠금장치 (Breath Alcohol Ignition Interlock Devices, BAIDs)를 사용하고 있다⁽¹⁾. BAIDs의 보급과 효용성이 입증됨으로써 캐나다와 호주 및 유럽에서도 음주운전에 적발 및 기소자들에게 이를 의무 혹은 자율적으로 장착시킴으로써 음주운전에 의한 사고를 경감시키고 있다.

현재 음주운전방지를 위한 BAID는 세라믹 산화물을 모체로 한 전기화학식(Electrochemical) 방식의 센서^(2,3)를 사용하고 있는데, 물질자체의 특성 및 가스와의 반응으로 인해 주기적으로 보상해야 하는 단점을 지니고 있으며, 고가이기에 경제적 부담이 높아 현재까지 많이 사용되지 않고 있으나, 그 수요가 급증하리

* 한국교통대학교 기계공학과

** 자동차안전연구원

E-mail : isaac_yi@ut.ac.kr

라 예상되고 있다. 그러나 최근 전기전자 기술의 발전으로 비분산 적외선 방식의 가스센서에 대한 연구가 활발히 진행되어, 에틸렌⁽⁴⁾ 및 알코올 검출용⁽⁵⁾ 적외선 가스센서의 보급이 활발히 진행되고 있다.

광학식 가스센서의 특성은 측정대상 가스에 대한 선택성이 아주 우수하고, 광원과 적외선 센서의 장기 신뢰성이 우수하기에 전기화학식 센서가 갖는 주기적 보정의 단점을 해소할 수 있는 장점을 지니고 있으므로, 본 연구에서는 광학식 알코올 센서의 개발을 위해 독자적인 광학적 구조물의 제안과 제작 및 이를 통한 센서모듈의 제작과 온·습도변화에 따른 실험을 진행하였다.

2. 이론적 고찰

비분산 적외선 가스센서는 연속적 근적외선을 방출하는 광원과 적외선 센서 사이의 공기에 존재하는 측정 대상가스의 광 흡수에 따른 광 강도 변화로 기인한 센서 출력전압의 상관성 해석을 통하여 가스센서로 동작하게 되며, 이는 아래 식 (1)로 주어진 Beer-Lambert 식으로 표현된다⁽⁶⁾.

$$I_a = I_o \cdot \exp(-\alpha \cdot x \cdot L) \tag{1}$$

단, I_o 는 입사광의 에너지 (W/m^2), I_a 는 센서에 도달하는 에너지 (W/m^2), α 는 대상 가스의 광 흡수계수, x 는 가스 농도 (ppm), L 은 광원에서 적외선 센서까지 광 경로의 길이(m)

한편 써모파일(thermopile)을 적외선 센서로 사용하는 경우, 직류전압 출력이 가능하며, 가스 농도에 따른 출력전압은 아래 (2)식과 같이 표현된다⁽⁶⁾.

$$V = \eta \cdot \exp(-\alpha \cdot x \cdot L) \tag{2}$$

단, η 는 비례상수

3. 모의해석 및 시작품 제작과 실험

3.1. 모의해석

광학적 구조물의 제작을 위해 전용 소프트웨어인 TracePro[®]를 사용하여 고안된 구조물의 광 경로와 입

사광 대 수광부의 에너지 전달과정을 살펴보았으며, 그 과정을 제시하면 Fig. 1과 같다. Pro-E[®]를 통하여 3차원 구조물을 설계한 후, 이를 해석 프로그램에 탑재하여 구조물 각 영역의 물성을 대입하고, 해석을 진행하였다. 모의해석 후, 센서(Detector)에 도달하는 광의 경로와 광 에너지의 효율성을 평가하여 최적의 구조를 확보하였다.

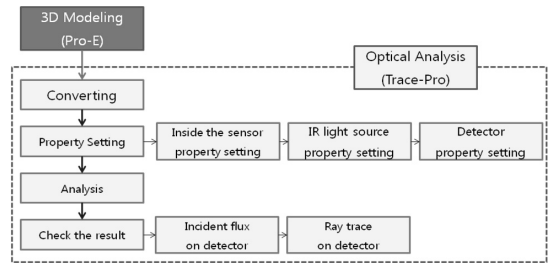


Fig. 1 Schematic diagram of simulation procedures⁽⁷⁾.

3.2. 실험방법

Fig. 2는 시작품의 특성을 확인하기 위한 실험장치를 나타낸 것으로, 제작된 시작품은 오른쪽의 향온·향습조 내부의 가스 챔버에 넣고, 왼쪽에 보여지는 가스 조절장치를 통하여 챔버 내에 측정 대상가스를 20 ppm 단위로 공급하였다. 가스 농도의 조절은 가스 조절장치가 연결된 주 컴퓨터를 통하여 제어되었으며, 가스챔버 내에 공급된 에탄올 가스는 다중 가스분석기(INNOVA-1312)에 의해 ppm 단위의 정밀도로 측정되었다. 이때 챔버 온도는 향온·향습조의 온도를 -20 ~ 35 °C까지 10 °C 간격으로 조절하여 온도에 따른 시제작 센서모듈의 특성을 확인하였는데, 가스 챔버의 온도는 조절부의 온도 설정값과 비교하여 ± 0.5 °C 이내로 조절되었다.

한편 가스 챔버 내의 습도는 가스 조절장치내의 버블러(Bubbler)를 통하여 습기를 공급함으로써 설정 습도를 조절하고자 하였으며, 각 온도별 실험은 10 회 이상 실시하였으며, 측정된 결과 중 이론적 특성에 부합되는 결과만을 모아 평균을 구한 뒤 이를 제시하였다.

한편 시 제작된 광학적 구조물과 센서 회로부를 제시하면 Fig. 3과 같으며, 가스 챔버 내의 온도와 습도를 정확하게 확인하기 위해 제시된 Fig. 3과 같이 습도센서 모듈을 별도로 장착하였다.



Fig. 2 Experimental apparatus: constant temperature and humidity chamber (right side), MFC controller (left side), a multi-gas analyzer above MFC (left top side).

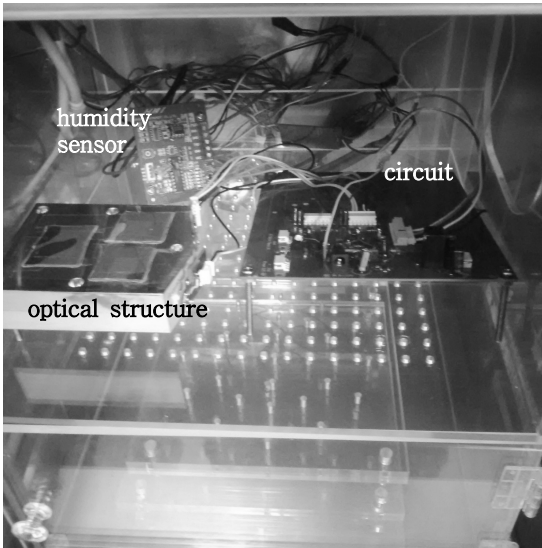
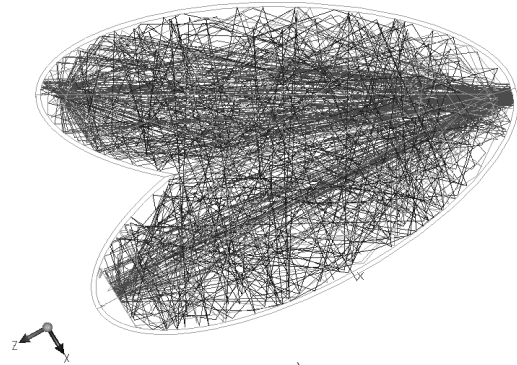


Fig. 3 Electronic circuit boards and optical structures with elliptical shape.

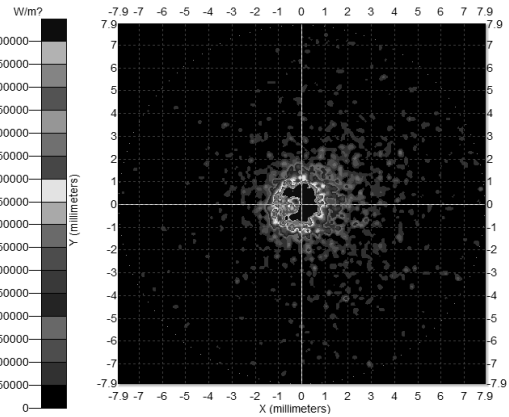
각 온도별 에탄올 가스의 공급과 습도의 조절에 따른 가스센서 모듈의 출력들과 습도센서 모듈에서 측정된 습도와 온도 값은 RS-485 통신 포트를 통하여 두번째 컴퓨터인 신호처리용 컴퓨터에 전송되었으며, 신호처리용 컴퓨터에 저장된 측정결과는 각 조건별 분석에 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 모의해석 결과



a)



b)

Fig. 4 Simulation results of elliptic optical structures: a) ray tracing, b) incident power density.

Fig. 4에는 두 개의 타원형 광학적 구조물의 광 경로와 적외선 센서부에 도달하는 입사광의 광 강도분포⁽⁷⁾를 나타내었다. 공통 초점을 갖는 두 개 타원경 장축 간의 각도가 30 도 일때 입사광 대 수광부의 효율이 가장 우수한 상태를 나타냄을 확인하였으며, 이때 Fig. 4 b)에 제시된 바와 같이 직경 2 mm 안에 입사되는 광이 집중됨을 모의해석을 통하여 알 수 있었다. 따라서 타원경 장축의 각도를 30 도, 장축의 길이 10 cm를 갖는 금속 가공물을 제작(Fig. 3참고)하였으며, 실험 결과를 제시하면 아래와 같다.

4.2. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 온도를 매개변수로 하였을 때, 에탄올 농도에 따른 센서의 출력특성을 나타낸 것이다. 습도센서로부터 측정된 상대 습도는 약 44 % R.H.를 나타내지만, 이는 상온에서 포화수증기압에 비하면 상당히 낮은 값을 갖고 있으므로 습기에 의한 영향은 거의 배제할 수 있으며, 온도에 의한 영향만이 반영된 결과로 사료된다. -20 °C에서 에탄올 가스에 대한 출력특성은 3차 다항식의 형태를 따르는 것(R=0.9425)으로 나타났으며, 회귀선에 따른 오프셋전압은 약 1.1056 V를 나타낼 것으로 예상되었다. 또한 0 °C 이하에서의 출력전압 특성이 Fig. 5와 유사한 형태이나, 오프셋전압만 낮아지는 특성을 보여, 추가적인 결과제시는 생략하였다.

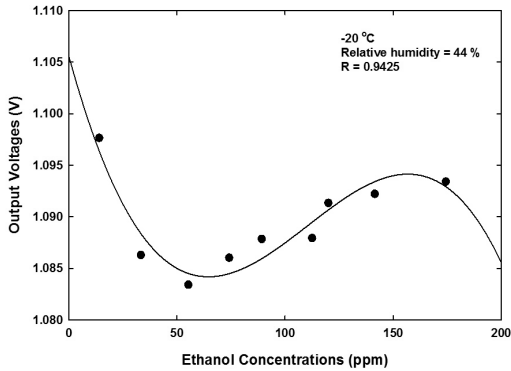


Fig. 5 Output voltages as a function of ethanol concentrations @ -20 °C

Fig. 6은 5 °C에서 에탄올 농도에 따른 센서의 출력 특성을 나타낸 것으로, 가스챔버 안의 상대습도는 약 18 % R.H.를 나타냈으며, 오프셋 전압은 0.9833 V를 나타낼 것으로 측정되었다. 이때 센서의 감도는 약 303 $\mu\text{V}/\text{ppm}$ 을 나타냈다.

한편 Fig. 7은 25°C에서 에탄올 농도에 따른 센서의 출력특성을 나타낸 것이다. 습도센서로 측정된 상대 습도는 약 18 % R.H.였고, 3차 다항식의 출력특성 곡선(R=0.9765)을 나타내고 있었다. 출력특성 곡선에서 외삽을 통한 센서 모듈의 오프셋전압과 감도는 각각 0.8785 V와 184 $\mu\text{V}/\text{ppm}$ 를 나타냈다.

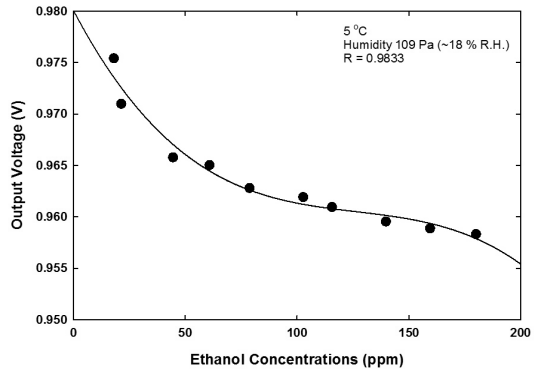


Fig. 6 Output voltages as a function of ethanol concentrations @ 5 °C

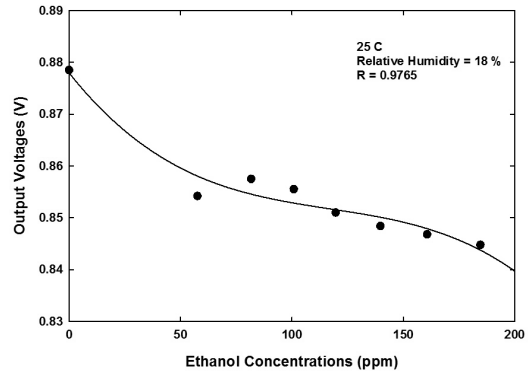


Fig. 7 Output voltages as a function of ethanol concentrations @ 25 °C

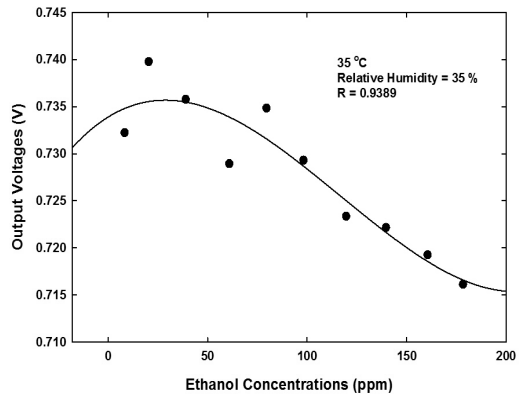


Fig. 8 Output voltages as a function of ethanol concentrations @ 35 °C.

Fig. 8은 35 °C 온도에서 에탄올 농도에 따른 센서의 출력특성을 나타낸 것이다. 챔버 분위기의 상대습도는 약 35 % R.H.을 갖고 있었으며, 모든 실험결과에서 보여주듯이 3차 다항식의 출력특성 곡선을 갖고 있음을 알 수 있었다. 이때 옙셋전압은 약 0.7339 V와 감도 150 $\mu\text{V}/\text{ppm}$ 을 나타내었다.

온도를 매개변수로 하여 에탄올 농도 변화에 따른 알코올 센서 모듈의 출력특성을 확인하였을 때, 센서의 출력전압은 3차 다항식 형태의 특성 곡선을 갖고 있었으며, 빙점 이하에서와 상대적으로 습도가 높은 온도(대부분의 실험결과에서 확인된 사항으로서)에서 상이한 특성을 나타내었다. 즉 빙점 이하에서는 S 자형상, 온도가 높고 상대적으로 수증기 분압이 높은 경우 저농도 에탄올에서 최고 전압을 갖는 형상을 나타냄을 보였으며, 상대습도가 높아짐에 따라 출력전압은 상대적으로 낮아지는 뚜렷한 경향을 나타내었다. 따라서 인체 호흡기를 통한 알코올 농도의 정확한 측정과 보정을 위해서 정확한 습도 조절과 고습 영역에서 센서 출력특성을 확인하고, 이에 따른 보정알고리즘을 수립하여야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 음주운전 방지장치의 제작을 위해 공통초점을 갖는 두 개의 타원체를 이용한 광학적 구조물의 모의해석을 진행하고, 이 결과를 바탕으로 광학식 알코올 센서모듈을 제작하여 그 특성을 살펴보았다.

온도가 증가함에 따라 센서 모듈의 옙셋전압은 감소하였으며, 빙점 이하와 온도 및 습도가 높은 구간에서 출력전압 특성곡선의 양상은 서로 다름을 확인할 수 있었으며, 센서의 감도는 온도에 의존하는 양상을 나타내었다. 수증기 압력의 변화에 따라 상대적으로 출력전압이 낮아짐을 빙점 이상의 온도에서 확인할 수 있었으며, 인체 호흡기를 통한 알코올 농도 분석을 위해 정확한 습도조절에 따른 특성 해석이 필요함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토교통부와 자동차안전연구원의 지원(과제번호: 13TLRP-C067560-05-000000)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Federal Register, 1993, "Highway safety programs; Model specifications for devices to measure breath alcohol.", Federal Register/Vol.58, No. 179, pp.48705-48710/Friday, September 17.
- (2) Edna, S., David, S., 2011. "An analysis of alcohol breath tests results with portable and desktop breath testers as surrogates of blood alcohol levels.", Accident Analysis and Prevention, 43, 2188-2194..
- (3) KiChul Kim, Sung M. Cho, HooGon Choi, 2000, "Detection of ethanol gas concentration by fuel cell sensors fabricated using a solid polymer electrolyte", Sensors and Actuators B, 67, pp.194-198.
- (4) Adam S., Stefeen J., Walter L., 2012, "Detection limit improvement for NDIR ethylene gas detectors using passive approaches", Sensors and Actuators B, 175, pp.246-254.
- (5) Lindberg, L., Brauer, S., Wollmer, P., Goldberg, L., Jones, A.W., Olsson, S.G., 2007, "Breath alcohol concentration determined with a new analyzer using free exhalation predicts almost precisely the arterial blood alcohol concentration", Forensic Science International, 168, 200-207.
- (6) JongSeon Park and SeungHwan Yi, 2011, "Nondispersive infrared ray CH4 gas sensor using focused infrared beam structures", Sensors and Materials, vol.23, no.3, pp.147-158.
- (7) 장성호, 정상호, 이승환, 2014, "두 개의 동일한 타원형 구조를 지닌 광 도파관의 특성", 한국가스학회 논문지, vol. 18, no. 2, pp. 48- 54.