

## 이산화탄소 감지를 위한 4.26 $\mu\text{m}$ 필터용 poly-Si/SiO<sub>2</sub> 다층 박막 기반의 패브리 페로-필터

도남곤<sup>1,2</sup> · 이준엽<sup>1,2</sup> · 정동건<sup>1</sup> · 공성호<sup>2</sup> · 정대웅<sup>1,+</sup>

### Si/SiO<sub>2</sub> Multilayer-based Fabry-Perot Filter for 4.26 $\mu\text{m}$ Filtering in Carbon Dioxide Detection

Nam Gon Do<sup>1,2</sup>, Junyeop Lee<sup>1,2</sup>, Dong Geon Jung<sup>1</sup>, Seong Ho Kong<sup>2</sup>, and Daewoong Jung<sup>1,+</sup>

#### Abstract

In this study, the relationship between the transmitted light intensity and full-width-at-half-maximum (FWHM) of a Fabry-Perot filter was investigated. The measured refractive indices and absorption coefficients of the fabricated thin films were applied to the Fabry-Perot filter via simulations using optical software. Although considerable research has been conducted on Fabry-Perot filters, this study focused on the usefulness of 4.26- $\mu\text{m}$  infrared filtering in carbon dioxide detection. Optical analysis was performed considering the effects of the thickness, refractive indices, and number of thin films in a distributed Bragg reflector. Ultimately, a clear trade-off relationship was observed wherein the transmitted light intensity decreased as the number of multilayers increased; however, the FWHM was observed to be narrower.

**Keywords :** Fabry-Perot interferometer (FPI), Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), Bragg reflector, Polysilicon (poly-Si), Silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>)

#### 1. 서 론

이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 실내 공기질의 모니터링 대상 주요 가스 중 하나이다. 우리나라에서는 실내 이산화탄소 농도 한계치는 1000 ppm으로 정하고 있으며, 그 이상의 농도에서는 호흡기, 순환기대뇌 등의 기능에 영향을 미치게 된다[1]. 이러한 이유로 실내의 CO<sub>2</sub> 농도를 측정할 수 있는 다양한 센서들이 요구되며 대표적으로 전기화학식[2-4], 금속산화물 기반[5-6], 비분산적외선 방식[7-9]이 대표적으로 사용되고 있다. 최근 들어, 높은 선택성과 신뢰성, 그리고 긴 수명이 특징인 비분산적외선 방식이 CO<sub>2</sub> 감지용으로 널리 쓰이고 있으나 가격이 비싸다는 단점이 존재한다.

비분산적외선 방식의 가스센서는 광원과 가스 및 광이 지나가는 광도파로, 광필터, 광검출기로 이루어져 있으며 가스마다 고유의 파장을 흡수하는 원리를 이용하여 농도를 측정한다. CO<sub>2</sub>는 4.26  $\mu\text{m}$ 의 파장을 선택적으로 흡수하는데 광원이 지나가는 경로인 광도파관에 CO<sub>2</sub>가 존재하여 이를 흡수하면 광검출기에 도달하는 광량이 줄어들고 이에 따른 출력의 차이로 CO<sub>2</sub>의 농도를 계산한다. 따라서 CO<sub>2</sub>가 흡수하는 4.26  $\mu\text{m}$ 의 파장만을 광검출기로 선택적으로 입사시키면 다른 가스의 간섭없이 CO<sub>2</sub>에 의한 출력차이만 측정 가능하므로 광필터가 센서의 성능에 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 광필터는 일반적으로 고가의 사파이어 기판위에 금속 반사체가 사용되어 진다.

본 연구에서는 상대적으로 저렴한 poly-Si/SiO<sub>2</sub> 다층 박막 구조를 기반으로 한 패브리-페로 필터를 설계하고 시뮬레이션을 통해 투과 광량과 반치전폭의 상관관계를 규명하여 비분산적외선 가스센서에 적용하기 위한 최적의 적층수를 도출해내었다.

시뮬레이션에 앞서 poly-Si와 SiO<sub>2</sub>를 LPCVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition)로 증착하고 이를 엘립소미터로 분석한 실제 광학 변수들을 시뮬레이션에 적용하였다. 실제 측정값을 반영한 시뮬레이션 결과, poly-Si/SiO<sub>2</sub> 다층박막으로 이루어진 패브리-페로 필터는 4.26  $\mu\text{m}$ 에 대한 뛰어난 투과도와 반치전폭을 보여주었으며 poly-Si/SiO<sub>2</sub> 다층 박막의 적층수에 따른 투과 광량과 반치전폭은 trade-off관계를 보여주었다. 해당 논

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 안전시스템연구그룹 (Safety System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

320, Techno sunhwan-ro, Yuga-eup, Dalseong-gun, Daegu, Republic of Korea

<sup>2</sup> 경북대학교 전자전기공학부 (School of Electrical Engineering, Kyungpook National University)

80, Daehak-ro, Buk-gu, Daegu, Republic of Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: [dwjung@kitech.re.kr](mailto:dwjung@kitech.re.kr)

(Received: Jan. 20, 2021, Revised: Jan. 28, 2021, Accepted: Jan. 29, 2021)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://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.

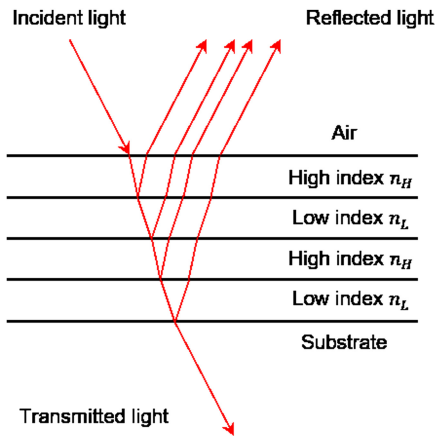


Fig. 1. Schematic of the transmission and reflection of the incident light on the distributed Bragg reflector.

문의 결과들은 기존의 상용화된 필터와 달리 저가의 재료로 4.26 μm 뿐만 아니라 적층 물질과 두께에 따라 다른 파장에도 적용될 수 있음을 보여주므로 이를 통해 다양한 물질을 사용하여 페브리-페로 필터를 제작할 수 있는 가능성을 제시하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 분산 브래그 반사경(Distributed Bragg Reflector) 모델링

분산 브래그 반사경(DBR)은 서로 다른 굴절률을 가지는 두 개의 물질이 반복 적층된 다층 구조이다. DBR은 금속 반사체에 비해 높은 반사율과 낮은 흡수율을 가질 수 있으며, 적층 두께 및 물질의 굴절률을 조절하여 반사율 및 반사파의 대역을 조절할 수 있다. 이러한 이유로 DBR은 페브리-페로 필터 설계 시 상 하부 반사체로 많이 사용된다.

Fig. 1과 같이 DBR 구조에 입사하는 빛은 투과되는 동시에 반사된다. 반사된 빛은 각 적층 계면에서 위상차가 생기며 이때 위상차가 식 (1)을 만족할 때 보강간섭이 발생한다.

$$\Delta\delta = m \cdot 2\pi, \quad (m: \text{정수}) \tag{1}$$

빛의 보강간섭을 위해 Fig. 1의 DBR 각 박막 두께를  $\lambda/4$  로 설정하면 하나의 박막을 진행하는 동안 빛은  $\pi/2$ 의 위상차가 발생하고, 고굴절률( $n_H$ )에서 저굴절률( $n_L$ )로 진행할 때  $2\pi$ 의 위상차가 발생하므로 DBR에서의 모든 반사파는  $2\pi$ 의 배수만큼 위상차가 발생하여 식 (1)을 만족한다. 따라서 보강간섭이 일어나는 DBR 각 박막의 두께( $d$ )와 해당 물질의 굴절률( $n$ ), 파장( $\lambda$ )의 관계는 다음 식 (2)를 따른다.

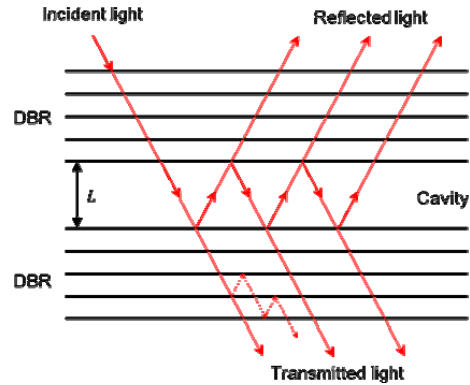


Fig. 2. Schematic of the transmission and reflection of the incident light between cavity in the Fabry-Perot filter.

$$nd = \frac{\lambda}{4} \tag{2}$$

DBR의 반사도(R)은 식 (3)과 같이 주어진다.

$$R = \left( \frac{1 - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2p}}{1 + \left(\frac{n_L}{n_s}\right)^{2p} \left(\frac{n_L}{n_s}\right)^2} \right)^2 \tag{3}$$

$n_L$ 는 저 굴절률 물질의 굴절률이며,  $n_s, n_i$ 는 각각 기판의 굴절률과, 입사 매질의 굴절률에 해당한다.  $p$ 는 저/고 굴절률 물질의 반복 적층 횟수이다. 식 (3)에 의해 물질의 굴절률 및 적층 수를 조절하여 DBR의 반사율을 설계할 수 있다. 또한 두 물질의 굴절률 차이가 클수록, 적층 수가 많을수록 반사율은 증가하게 됨을 알 수 있다.

### 2.2 다층 박막 구조의 페브리 페로 필터

Fig. 2와 같이 다층 박막 구조의 페브리-페로 필터는 두개의 DBR 사이에 공진층이 형성된 구조를 가진다. 페브리-페로 필터의 투과도는 식(4)를 따른다.

$$T_{FP} = \left( 1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \delta \right)^{-1} \tag{4}$$

식 (4)에서  $\sin^2 \delta$ 이  $m\pi$  ( $m=0, 1, 2, \dots$ )가 되면 투과도가 1이 되어 이론적으로 모든 빛이 투과함을 알 수 있다. 이를 만족하기 위한 공진층의 두께( $L$ )은 식 (5)와 같다.

$$L = \frac{m\lambda}{2n_c} \tag{5}$$

이러한 페브리-페로 필터의 성능지표로는 반치전폭, 자유 스펙트럼 영역, 예리도가 있으며 이 논문에서는 식 (6)의 반치전폭을 통해 설계된 페브리-페로 필터의 성능을 평가하였다.

**Table 1.** Fabrication conditions for the poly-Si/SiO<sub>2</sub> thin films.

	Poly-Si	SiO <sub>2</sub>
Temperature (°C)	620	698
Time (min)	31	60
Flow rate (sccm)	SiH: 100	O <sub>2</sub> : 4 TEOS: 100
Pressure (mTorr)	150	850

$$FWHM = \frac{\lambda^2(1-R)}{2\pi L\sqrt{R}} \quad (6)$$

반치전폭은 다층 박막구조로 이루어진 DBR의 반사율이 높아질수록 좁아지며, 좁은 반치전폭은 성능의 향상을 의미한다[10].

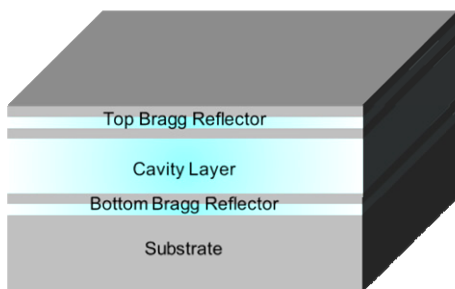
### 2.3 박막 증착 및 시뮬레이션 방법

모든 시뮬레이션은 LightTrans社의 VirtualLab Fusion 소프트웨어를 이용해 진행하였다. 저 굴절률 물질인 SiO<sub>2</sub>와 고 굴절률 물질인 poly-Si의 굴절률 및 흡수계수 정보는 실제 증착한 박막의 측정결과를 시뮬레이션에 반영하였다. 먼저, p타입 6인치 실리콘 웨이퍼에 Table 1의 조건으로 LPCVD를 이용하여 poly-Si, SiO<sub>2</sub> 박막을 증착하고 J.A Woollam社의 IR-VASE Mark II 엘립소미터로 1~25 μm 파장대역에서 굴절률을 측정하였다. Fig. 3과 같이 다층 구조의 패브리-페로 필터를 구현한 뒤, VirtualLab Fusion의 coating analyser를 이용하여 투과도 및 반사율을 시뮬레이션 하였다. 또한 적층 수에 따른 패브리-페로 필터의 투과 광량과 반치전폭의 관계를 분석하기 위해 4.3 μm에서 중심파장을 가지는 Hamamatsu photonics社의 L13201 광원의 스펙트럼을 반영하였다.

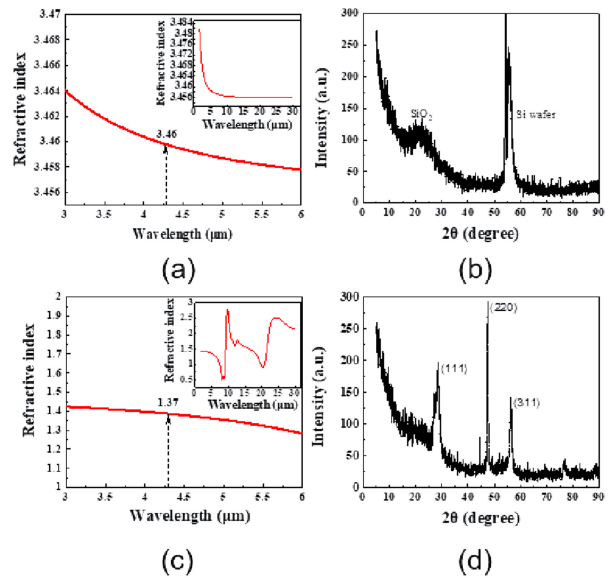
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 박막 두께 최적화를 위한 poly-Si/SiO<sub>2</sub>의 굴절률 분석

일반적으로 알려진 poly-Si, SiO<sub>2</sub>의 굴절률은 각각 3.5와 1.5



**Fig. 3.** The designed Fabry-Perot filter with multi-layers.



**Fig. 4.** The refractive index and the XRD peak of the(a),(b) poly-Si, and (c),(d) SiO<sub>2</sub>.

이다. 해당 물질들은 결정구조에 따라 굴절률이 변하게 되므로, 공정방법 및 증착 조건에 의해 굴절률 차이가 발생한다. 따라서 박막 증착 후 실제 측정된 굴절률을 시뮬레이션에 반영 할 필요성이 있다. Fig. 4는 LPCVD로 증착한 poly-Si 및 SiO<sub>2</sub> 다층 박막의 엘립소미터와 XRD 분석 결과이다. Fig. 4(a)는 측정된 poly-Si 박막의 굴절률 그래프로 4.26 μm 파장대에서 3.46으로 측정되었다. Fig. 4(b)는 poly-Si 박막의 XRD 측정 결과로 2θ값이 28.5, 48.5, 58.5에서 피크가 확인되었다. 이 피크는 다결정 구조 poly-Si의 XRD 피크와 일치한다. Fig. 4(c), (d)는 SiO<sub>2</sub>의 측정결과이다. SiO<sub>2</sub>의 경우 4.26 μm 파장대에서 굴절률이 1.37로 측정되었다. 측정된 굴절률을 바탕으로 4.26 μm 투과를 위한 각층의 두께를 식(2), 식(5)에 대입하여 계산하였다. 계산 결과, DBR을 구성하는 poly-Si의 두께는 307 nm, SiO<sub>2</sub>의 두께는 779 nm이며 공진층의 경우 1558 nm로 계산되었다. 이 차이는 두께 값으로 계산되었을 때, SiO<sub>2</sub>의 경우 710 nm로 실제 측정 결과 기반의 설계 값과 69 nm의 오차를 가지게 된다. 결과적으로, 결정 구조에 따라 굴절률이 달라지는 poly-Si 및 SiO<sub>2</sub>의 실제 측정된 굴절률을 반영한 시뮬레이션을 통해 두께 오차를 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 3.2 적층 수에 따른 다층 박막 패브리-페로 필터의 특성 분석

poly-Si/SiO<sub>2</sub> 다층 박막 기반의 DBR을 설계한 뒤, 4.26 μm 파장대에서 적층 수에 따른 DBR의 반사도를 확인하였다. 2-10 층에 걸쳐 시뮬레이션 진행했으며, Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 적

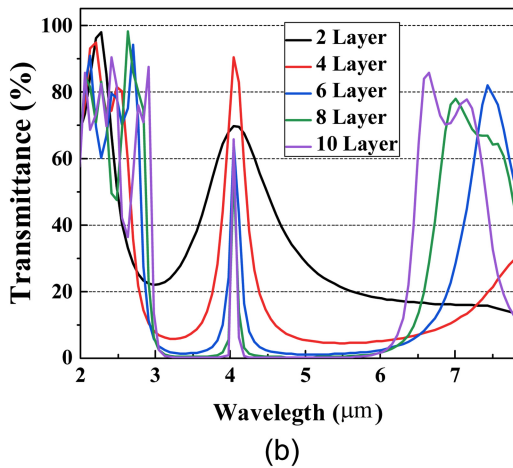
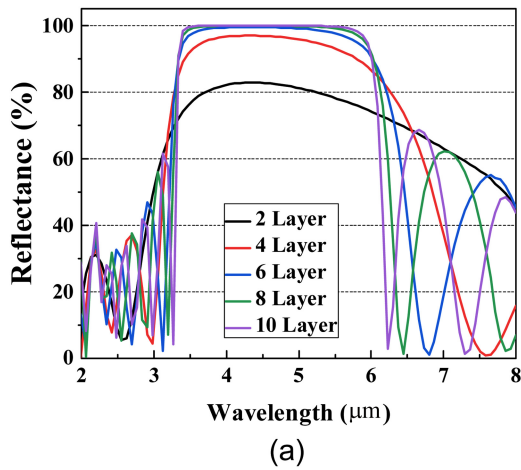


Fig. 5. The simulated transmittance (a) and reflectance (b) of the distributed Bragg reflector with increase in the number of multilayers.

층 수가 증가할 수록 DBR 은 높은 반사율을 가지는 것을 알 수 있다. 특히 6층 이상의 다층 구조가 되면 반사율이 100%에 근접하며, 3~6 μm 대역의 밴드 패스 필터로서 동작하게 된다. Fig. 5(b)는 앞서 설명한 DBR 구조에서 공진층을 추가한 패브리-페로 필터의 투과도 그래프이다. CO<sub>2</sub> 분자의 흡수 파장대인 4.26 μm에서 중심파장을 가지는 것을 볼 수 있으며, DBR의 적층 수가 늘어날 수록 반치전폭이 작아 짐을 알 수 있다. 가장 작은 반치전폭을 가지는 조건은 10층이며, 25 nm의 반치전폭을 가진다. 이는 시뮬레이션을 진행한 조건 중 10층에서 가장 선택성이 높은 광 필터링이 가능함을 나타낸다.

투과 광량과 반치전폭의 상관관계를 확인 하기위해 상용화 광원의 정보를 바탕으로 설계한 패브리-페로 필터의 투과 광 스펙트럼을 확인하였다. Fig. 6은 4.3 μm에서 최대 피크를 가지는 광원을 필터로 수직 입사 시킨 투과광의 스펙트럼 그래프이다. 출력된 빛은 입사광의 스펙트럼과 투과도 스펙트럼의 곱의 형태로, 입사된 광의 중심파장이 4.3 μm에서 4.26 μm으로 이동한 것

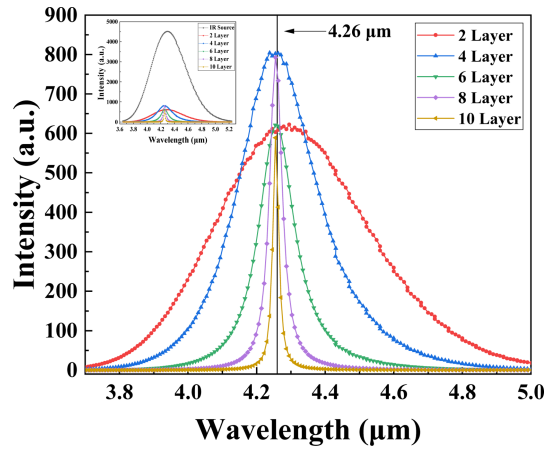


Fig. 6. The comparison of the transmitted light intensity.

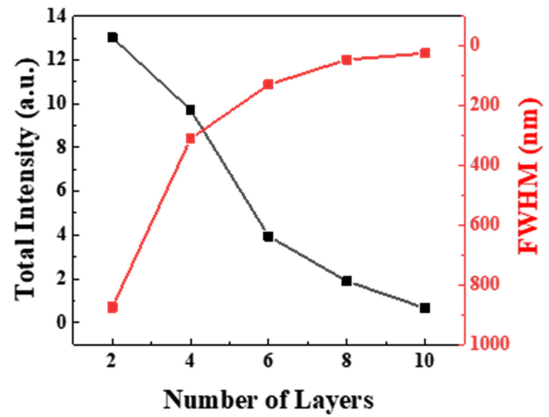


Fig. 7. The relationship between the transmitted light intensity and FWHM of the Fabry-Perot filter.

을 확인할 수 있다. 해당 스펙트럼의 면적은 투과 광량을 나타내며 다층 박막이 2층 조건일때, 입사 광량의 13%만이 투과되는 것을 확인할 수 있었다. 적층 수가 증가하면서 투과 광량은 감소하는 경향을 보이며, 10층일 경우 투과 광량은 약 0.6%로 큰 감소가 나타났다. Fig. 5(b)에서 확인된 적층 수에 따른 반치전폭과의 관계와는 상반된 결과를 얻게 되었다.

명확한 비교를 위해 DBR의 적층 수에 따른 투과된 광량과 반치전폭의 관계를 Fig. 7로 나타냈다. 투과 광량은 4-6 층 조건에서 가장 큰 감소가 보이며 적층 수가 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 양상을 보인다. 반면 반치전폭은 2-4 층 조건에서 가장 큰 감소를 보이며 적층 수가 증가할수록 지속적으로 좁아짐을 알 수 있다. 즉 두 변수의 관계는 trade-off관계를 가지는 것을 알 수 있다. 결과적으로, CO<sub>2</sub> 검출을 위한 최적의 층 수 조건은 6층임을 확인할 수 있었다. 그 이유는 CO<sub>2</sub>의 흡수 파장대역 보다 좁은 반치폭을 가지면서 동시에 투과 광량이 가장 높은 조건이기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 poly-Si/SiO<sub>2</sub>를 이용하여 다층 박막 구조의 페브리-페로 필터를 설계하고, DBR과 공진층을 포함한 적층 수에 따른 필터 특성을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. LPCVD로 실제 제작된 박막의 광학 변수를 분석하고 이를 시뮬레이션에 반영하였으며, 적층 수에 따른 반치전폭과 투과 광량의 관계를 확인하였다. 그 결과, 적층수가 10층일 때 4.26 μm 중심 파장에서 최소 25 nm의 우수한 반치전폭을 보여주었으며, 적층 수가 증가함에 따라 반치전폭은 지수적으로 향상되는 반면, 투과 광량은 크게 줄어드는 것을 확인하였다. 두 필터 성능지표의 trade-off관계를 고려하였을 때, CO<sub>2</sub> 검출을 위한 가장 적절한 페브리-페로 필터의 적층 조건은 6층으로 나타났다. 위 결과들은 페브리-페로 필터 박막의 두께를 조절하여 중심파장을 설정하고 박막의 굴절률 차이와 적층수를 제어하여 반사도 및 투과도를 설계함으로써 4.26 μm 외의 파장대역을 필터링 하는 고성능 광학 필터로서의 적용 가능성을 제시하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2020-DD-UP-0348).

이 논문은 2020년도 정부(대구시)의 재원으로 대구테크노파크의 지원을 받아 수행된 연구임(202008105).

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업의 지원으로 수행한 연구입니다.

#### REFERENCES

- [1] <http://kosha.or.kr/>(retrieved on October, 2017).
- [2] N. Ma, S. Ide, K. Suematsu, K. Watanabe, and K. Shimanoe, "Novel Solid Electrolyte CO<sub>2</sub> Gas Sensors Based on c-Axis-Oriented Y-Doped La<sub>9.66</sub>Si<sub>5.3</sub>B<sub>0.7</sub>O<sub>26.14</sub>", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 12, No. 19, pp. 21515-21520, 2020.
- [3] H. Wang, H. Chen, M. Zhang, J. Wang, and J. Sun, "Solid-state potentiometric CO<sub>2</sub> sensor combining Li<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> with MoO<sub>3</sub>-doped Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sensing electrode", *Ionics*, Vol. 25, No. 7, pp. 3397-3406, 2019.
- [4] M. Struzik, I. Garbayo, R. Pfenninger, and J. L. M. Rupp, "A Simple and Fast Electrochemical CO<sub>2</sub> Sensor Based on Li<sub>7</sub>La<sub>3</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>12</sub> for Environmental Monitoring", *Adv. Mater.*, Vol. 30, No. 44, pp. 1804098, 2018.
- [5] T.V.K. Karthik, L. Martinez, and V. Agawal, "Porous silicon ZnO/SnO<sub>2</sub> structures for CO<sub>2</sub> detection", *J. Alloys Compd.*, Vol. 731, No. 15, pp. 853-863, 2018.
- [6] D. Y. Kim, H. Kang, N. J. Choi, K. H. Park, and H. K. Lee, "A carbon dioxide gas sensor based on cobalt oxide containing barium carbonate", *Sens. Actuators B Chem.*, Vol. 248, pp. 987-992, 2017.
- [7] H. Liu, Y. Shi, and T. Wang, "Design of a six-gas NDIR gas sensor using an integrated optical gas chamber", *Opt. Express*, Vol 28, No. 8, pp. 11451-11462, 2020.
- [8] S. Esfahani, A. Tiele, S. O. Agbroko, and J. A. Covington, "Development of a Tuneable NDIR Optical Electronic Nose", *Sensors*, Vol. 20, No. 23, pp. 6875, 2020.
- [9] S. H. Yi, "Infrared Light Absorbance: a New Method for Temperature Compensation in Nondispersive Infrared CO<sub>2</sub> Gas Sensor", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 5, pp. 303-311, 2020.
- [10] H. H. Mai "Characterization of Novel Fabry Pérot Filter Arrays for Nanospectrometers in Medical Applications", *Universität Kassel*, 2012.