

전도성 고분자 물질이 결합된 하이브리드 커플러를 적용한 RF 가스 센서

RF Gas Sensor Using 4-Port Hybrid Coupler with Conducting Polymer

이용주 · 김병현 · 이희조** · 홍윤석*** · 이승환* · 최향희* · 육종관

Yong-Joo Lee · Byung-Hyun Kim · Hee-Jo Lee** · Yunseog Hong*** ·
Seung Hwan Lee* · Hyang Hee Choi* · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 2.4 GHz에서 동작하는 90° 하이브리드 커플러 구조에 전도성 고분자 화합물을 적용한 가스 센서를 제안하였다. 가스 센서에서 전도성 고분자 화합물(Conducting Polymer: CP)은 특정 가스를 검출하는 검출 물질로 사용되며, 특정 가스와 반응할 때 대개 물질의 일함수(work function)와 전도도(conductivity) 및 임피던스가 변하게 된다. 이러한 물성변화 특성의 근거로 마이크로파 대역에서 90° 하이브리드 커플러 구조에 전도성 고분자를 적용하여 가변 감쇄기 및 가변 위상 천이기 형태의 센서를 제작하였다. 본 연구에서 제안한 센서는 전도성 고분자 화합물의 높은 전도도를 이용하여 기존 전송선로의 일부를 전도성 고분자 물질로 대체하였다. 실험은 온도 28°C와 상대습도 85% 환경에서 진행되었으며, 센서에 100 ppm 농도의 에탄올 가스를 노출시켰다. 그 결과, S_{21} 의 진폭 특성이 최대 0.13 dB 변하였고, $\angle S_{21} = 360^\circ$ 를 만족하는 주파수가 2.875 MHz 이동한 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a gas sensor using a modified 90° hybrid coupler structure with conducting polymer which operates at 2.4 GHz is represented. Conducting polymers are used to the gas sensing material in proposed sensors. The conducting polymer varies its electrical property, such as work function and conductivity corresponding to the certain gas. To verify this variation of electrical property of conducting polymer at microwave frequencies, the conducting polymer is incorporated with the 90° hybrid coupler structure, and this proposed sensor operates as reflection type variable attenuator and variable phase shifter. The conducting polymer is employed as impedance-variable transmission lines that cause a impedance mismatching between the general transmission line and conducting polymer. The experiment was conducted with 100 ppm ethanol gas at temperature of 28°C and relative humidity of 85%. As a result, the amplitude deviation of S_{21} is 0.13 dB and the frequency satisfying $\angle S_{21} = 360^\circ$ is shifted about 2.875 MHz.

Key words: Conducting Polymer, Hybrid Coupler, Gas Sensor, RF Sensor

「이 연구는 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2012R1A1A3013893).」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electric and Electronic Engineering, Yonsei University)

*연세대학교 화학생명공학과(Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University)

**대구대학교 물리교육과(Department of Physics Education, Daegu University)

***삼성탈레스(Samsung Thales)

· Manuscript received September 27, 2014 ; Revised October 31, 2014 ; Accepted December 15, 2014. (ID No. 20140927-05S)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

I. 서 론

산업혁명 이후 전 세계적으로 환경오염 문제가 대두되고 있으며, 특히 도시환경에서의 대기오염 문제가 지금까지 꾸준히 주목받고 있다. 대도시 환경오염 정도가 나날이 심각해짐에 따라 여러 가지 건강문제를 야기하고 있다. 따라서 대기 중의 유독가스를 검출하기 위한 다양한 형태의 가스 센서들을 사용하고 있으며, 현재 대다수의 가스 센서들은 반도체 소자 기반의 나노 박막, 나노선, 전도성 고분자 화합물 등이 적용된 구조를 사용하고 있다^{[1]~[4]}.

특히 전도성 고분자 화합물은 물질의 전기적 특성과 변형 및 적용이 쉽고, 가격이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 1970년대부터 개발되어 오늘날까지 가스 센서분야뿐만 아니라, 생물학, 의학, 전기전자 분야 등 다양한 분야에 걸쳐 이용되고 있다^{[5],[6]}. 전도성 고분자 화합물은 대부분 전도도가 우수하며, nm 크기로 공정 제어가 가능하기 때문에 전기전자분야에 많이 활용되고 있다. 한편, 전도성 고분자 화합물의 경우 가스에 노출되었을 때 반응성이 우수한 기체 분자와 결합하게 되고, 그 분자구조가 변하므로 물질의 전도도 및 일함수가 변하게 된다^{[7],[8]}. 따라서 이러한 메커니즘을 이용하여 가스 센서에 활용되어 왔다.

지금까지의 고분자 화합물을 이용한 기존연구들은 주로 직류 상에서 동작하는 FET 구조나 나노선 형태가 대표적이었다^{[4],[9]}. 교류 상의 가스 센서 경우, 수십 kHz에서 수십 MHz 대역까지 동작하는 고분자 화합물을 얇은 박막을 형성하여 공진기 구조에 적용시킨 연구들이 보고되었다^{[2],[10]~[13]}. 그러나 이러한 직류 및 저주파 대역에서 작동하는 가스 센서들은 가스 흡착을 시킨 후 반드시 열처리를 통해 다시 가스를 탈착시켜 주어야만 한다. 이로 인해 가스 센서 검출시간이 지연되고, 빠른 응답 특성과 민감도 측면에서 한계를 가져올 수밖에 없는 상황이다.

이러한 한계를 극복할 수 있는 대안으로써 본 논문에서는 RF 대역에서 전도성 고분자가 결합된 하이브리드 커플러 형태를 적용한 가스 센서를 제안하였다. 본 논문에서 제안된 가스 센서는 기존의 정적 가스 검출 환경과는 달리 공기 중에 노출된 상태에서 온도 28°C와 상대습

도 85 %의 열악한 환경에서 측정했다는 점에서 더욱 의미가 있다.

II. 본 론

2-1 일반적인 가스 검출 메커니즘

그림 1은 전도성 고분자를 이용한 일반적인 가스 센서 원리와 검출 메커니즘을 나타낸 개념도이다. 그림 좌측의 가스분자 분포는 검출하고자 하는 가스 분자(analyte)와 그 외의 불순 가스 분자(impurity)들이 존재하는 일반적인 대기상태를 보여준다. 이 때 분석하고자 하는 가스 분자만을 선택적으로 검출하기 위해서는 특정가스와 반응성이 높은 검출물질(sensing material)을 사용하게 되는데, 본 연구에서는 전도성 고분자 화합을 사용하였다. 분석하고자 하는 가스분자와 전도성 고분자 화합물은 우수한 반응성으로 인해 가스분자가 고분자 화합물에 흡착하는 현상이 발생하게 된다. 이러한 흡착현상으로 인해 전도성 고분자 화합물의 전기적 물성이 변화하게 되고, 신호변환기(transducer)는 이러한 화학적 반응을 전기적 신호로 변환하게 된다. 최종적으로 변환된 전기적 신호를 분석하면 원하는 가스에 대한 검출 결과를 얻을 수 있다.

2-2 검출 물질과 메커니즘

전도성 고분자 물질을 이용한 가스 센서의 경우, 고분자의 고리를 따라 이동하는 폴라론(Polaron)과 자유캐리어(free carrier)에 의해 전도성이 나타나는데, 이러한 전도성의 전도도 변화는 가스 흡착에 의해 표면에서 주로 발생

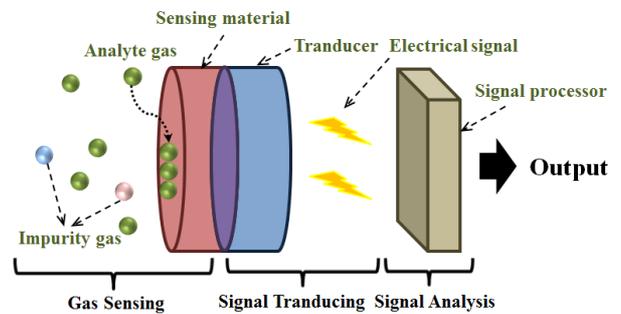


그림 1. 가스 검출 메커니즘

Fig. 1. Conceptual diagram of gas detection mechanism.

하게 된다. 두께 변화에 의한 민감도의 변화 또한 전도도의 변화로 설명할 수 있는데, 감지막의 두께가 두꺼울수록 전도도는 낮아지고, 민감도도 낮아진다. 그 이유는 전도도 변화가 크게 일어나는 표면층에 비해 전도도 변화가 낮은 두꺼운 내부층을 갖고 있기 때문에 전체 저항 변화는 작아지며, 따라서 감도는 낮아진다.

에탄올 가스처럼 알코올류 가스분자의 수소성 꼬리인 알킬기가 선택적으로 흡착되면 고분자 사슬내에서 자유롭게 이동하는 캐리어의 이동을 방해하여 감지막의 전도성은 낮아지고 감도 또한 낮아진다⁷⁾.

그러나 PEDOT poly(3,4-ethylenedioxythiophene) : PSS : poly(4-styrene sulfonic acid) 경우는 용매 DMSO(dimethyl sulfoxide)에 처리했을 때 전도성 고분자의 전형적인 탄소 원자의 단일 결합과 이중결합이 교차되어 생기는 파이-오비탈(π -orbital) 겹침을 통해 전자의 이동이 일어나는데, 본 실험에서 사용된 감지물질 PEDOT : PSS의 경우, 용매 처리에 의해 파이-오비탈이 겹침이 더 강해져 전자의 이

동이 훨씬 빠르게 이루어진다. 이러한 이동이 쉽기 때문에 전자들은 에탄올 가스에 노출되었을 때 검출 물질로 사용된다.

2-3 신호변환기(Transducer)

신호변환기는 검출물질의 물성 변화를 해석하기 용이한 전기적 신호로 변환시키기 위해 사용한다. 변환기는 검출하고자 하는 가스물질의 종류와 해석 메커니즘에 따라 다양하게 설계할 수 있다¹⁴⁾. 본 연구에서는 미세한 화학적 물성변화를 정밀하게 검출하기 위하여 RF 소자로 잘 알려진 4-포트 90° 하이브리드 커플러를 변형한 형태를 이용하였다¹⁵⁾.

그림 3은 본 연구에서 사용한 변형된 4-포트 90° 하이브리드 커플러이다. Taconic 사의 유전율 9.7의 두께 0.76 mm인 CER-10 PCB 기판을 사용하였으며, 손실 탄젠트는 0.0035이다. 본 센서는 2.4 GHz에서 동작하며, 임피던스는 50 옴으로 정합되어 있다. 그림 3에 표시된 포트 3과 포트 4의 끝부분은 비아 홀(via hole)을 통해 접지되었으며 포트의 끝부분에 전송선로(Transmission line)를 대신하여 전도성 고분자 화합물을 전송선로로 사용하였다.

그림 3에 제안된 센서를 등가적으로 나타내면 그림 4와 같다. 여기서 Z_{cp} 는 그림 3에서 포트 3과 포트 4에 위치한 전도성 고분자 화합물을 고유 임피던스로 등가화하여 나타낸 것이다. 그림 4의 구조는 통신 시스템에서 잘 알려진 반사 계수를 활용한 형태의 가변 감쇄기(variable attenuator) 혹은 가변 위상 천이기(variable phase shifter)

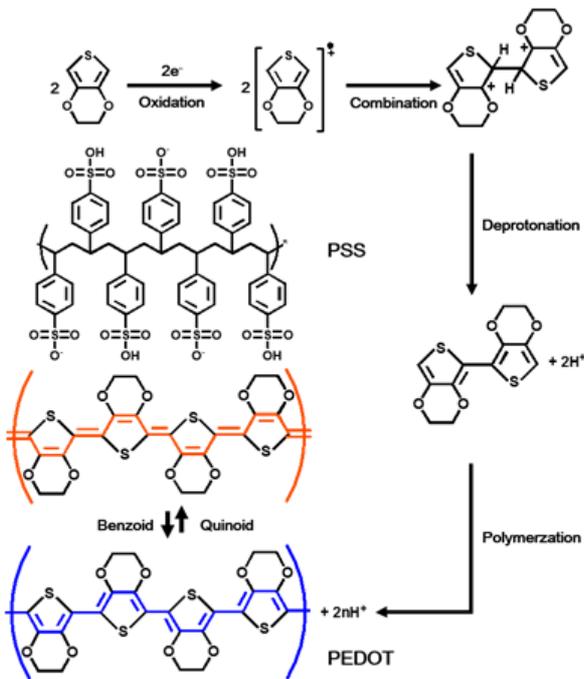


그림 2. 공액구조를 갖는 전도성 고분자 화합물의 구조
Fig. 2. Chemical structure of conjugated conductive polymer poly(3,4-ethylenedioxythiophene).

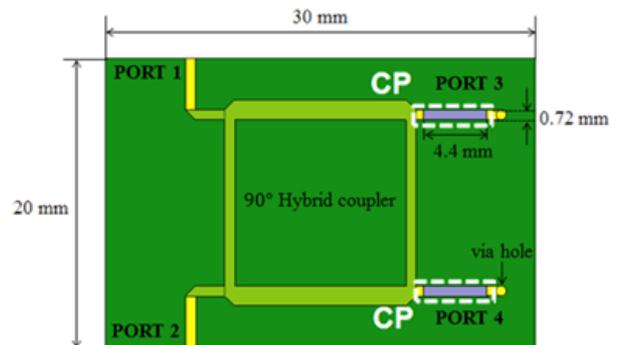


그림 3. 제안된 가스 센서 구조
Fig. 3. Geometry of the proposed gas sensor.

구조이며, 수식적인 분석을 통해 제안한 센서의 동작원리를 설명할 수 있다. 전도성 고분자 화합물의 임피던스 Z_{cp} 는 다음과 같이 실수부와 허수부를 나누어 표현할 수 있다.

$$Z_{cp} = R_{cp} + jX_{cp} \quad (1)$$

이때 전도성 고분자 화합물이 가스에 노출되게 되면 화합물의 임피던스가 변하게 된다. 따라서 변화한 임피던스 Z'_{cp} 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z'_{cp} = (R_{cp} + \Delta R) + j(X_{cp} + \Delta X) \quad (2)$$

그림 4에서 50 옴 전송선로 Z_0 와 전도성 고분자 화합물 Z_{cp} 또는 Z'_{cp} 사이에 임피던스 부정합이 나타나므로 그때의 반사계수 Γ_{cp} 또는 Γ'_{cp} 를 구하면 다음과 같다^[16].

$$\Gamma_{cp} = \frac{Z_{cp} - Z_0}{Z_{cp} + Z_0} \quad (3)$$

$$\Gamma'_{cp} = \frac{Z'_{cp} - Z_0}{Z'_{cp} + Z_0} \quad (4)$$

전도성 고분자의 임피던스 Z_{cp} 의 변화에 의한 S-파라미터는 다음과 같다^[17].

$$[S] = \begin{bmatrix} 0_{ideal} & \frac{j(R_{cp} - Z_0)}{R_{cp} + Z_0} \\ \frac{j(R_{cp} - Z_0)}{R_{cp} + Z_0} & 0_{ideal} \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 $R_{cp} \cong Z_{cp}$ 로 근사하여 식을 간단히 정리하

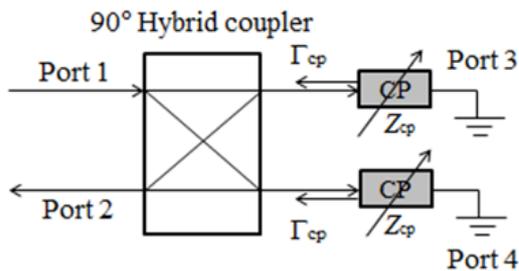


그림 4. 제안된 가스 센서의 개념도
Fig. 4. Conceptual diagram of the proposed gas sensor.

면 다음과 같이 반사계수를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & j\Gamma_{cp} \\ j\Gamma_{cp} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

전도성 고분자 임피던스 Z_{cp} 의 위상항 jX_{cp} 의 변화로 인한 포트 1과 포트 2 사이의 위상 천이각 ϕ 는 다음과 같다^[18].

$$\phi(rad) = -2 \tan^{-1} \left(\frac{X_{cp} + \Delta X_{cp}}{2Z_0} \right) + 2 \tan^{-1} \left(\frac{X_{cp}}{2Z_0} \right) \quad (7)$$

고분자 화합물이 가스에 노출되면 센서의 임피던스의 변화가 나타난다. 따라서 이러한 변화로 신호의 진폭과 위상이 변하는 결과가 동시에 나타난다.

III. 측정 결과

3-1 검출 물질 측정 결과

본 연구에 사용된 PEDOT : PSS 물질은 폴리이미드 (polyimide) 필름을 사용하여 정확한 위치에 물질이 형성 되도록 제작되었다. PEDOT : PSS 물질을 기판에 형성시 두께의 균일성을 향상시키기 위해 스프레이 코팅 방식으로 박막을 형성하였다. 기판 위에 형성된 PEDOT : PSS 물질의 전기전도도를 측정하기 위해 4개의 프로브 포인트를 이용한 van der Pauw 방법을 사용하였고, 그 값은 약 5×10^4 S/m 정도로 측정되었다^[19]. 또한, 형성된 물질의

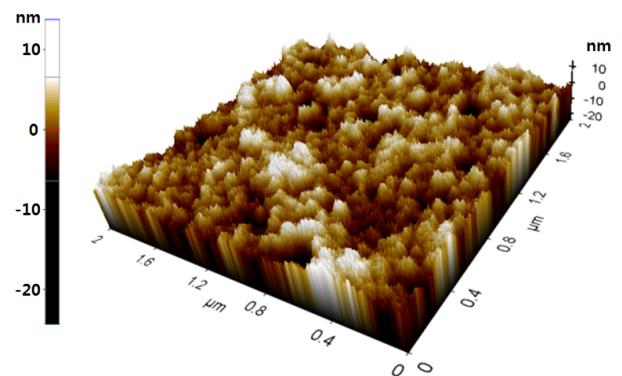


그림 5. PEDOT : PSS 필름 물질의 AFM 이미지
Fig. 5. AFM images of PEDOT : PSS film.

두께는 AS 500 alpha-step surface profiler를 이용하여 측정하였으며, 그 두께는 약 $10 \mu\text{m}$ 로 균일하게 측정되었다.

그림 5는 표면 모폴로지를 관찰하기 위해 AFM(Dimension 3100, Digital Instrument 사)를 사용하여 측정한 결과, 구형의 균일한 박막을 형성하고 있음을 볼 수 있다.

3-2 가스 주입에 따른 실험 결과

실험은 대기 중에 제안한 센서를 노출시키고, 100 ppm 농도의 에탄올 가스를 센서에 분사시켜 진행하였다. 에탄올의 캐리어 가스는 반응성이 낮은 질소가 사용되었으며, 분사량을 정밀하게 조절하기 위해 조절장치(flow meter)를 통해 노출 정도를 1,000 cc/min으로 유지하였다. 실험 시 온도 28°C, 습도 85 %가 유지된 고온다습(Humidity condition)한 환경에서 진행되었다. 측정을 위해 네트워크 분석기(E8364A, 에질런트 사)와 그림 6과 같이 지그시스템(3,680 K, 안리츠 사)을 사용하였다.

그림 7은 제안한 가스 센서를 주파수 영역에 대해 측정된 S -파라미터와 시뮬레이션을 비교하여 나타낸 그래프이다. 사용된 90° 하이브리드 커플러는 모든 신호선이 금속인 경우 2.4 GHz 대역에서 동작하도록 설계되었지만, 금속의 일부가 전도성 고분자 물질로 대체됨으로써 공진 주파수가 2.3 GHz에서 설계 목적에서 약 0.1 GHz 정도 벗어나 측정되었다. 그 결과로 S_{11} 값이 약 2.3 GHz 대역에서 약 -32 dB의 최저값이 측정되었으며, 시뮬레이션 값과 유사하게 나타났다는 것을 확인하였다. S_{21} 의 경우, 2.4 GHz 대역에서 -2.6 dB 값이 측정되었으며, 시뮬레이

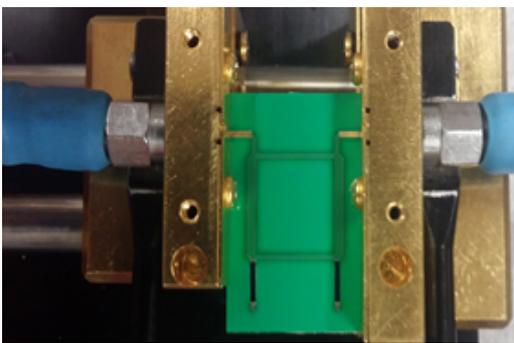


그림 6. 제안한 가스 센서와 테스트 픽스처
Fig. 6. Test fixture and the proposed gas sensor.

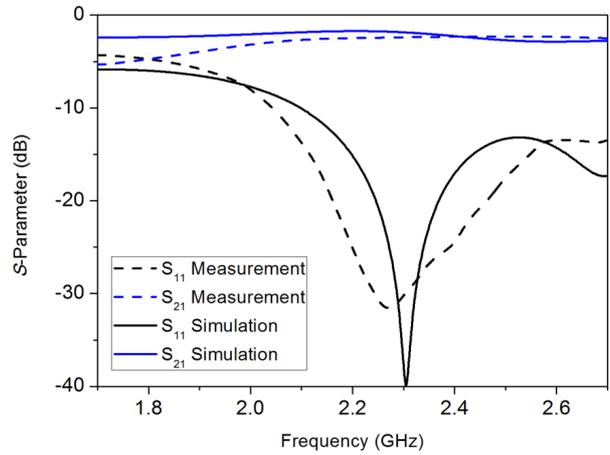


그림 7. 측정된 S -파라미터
Fig. 7. Measured results of S -parameter.

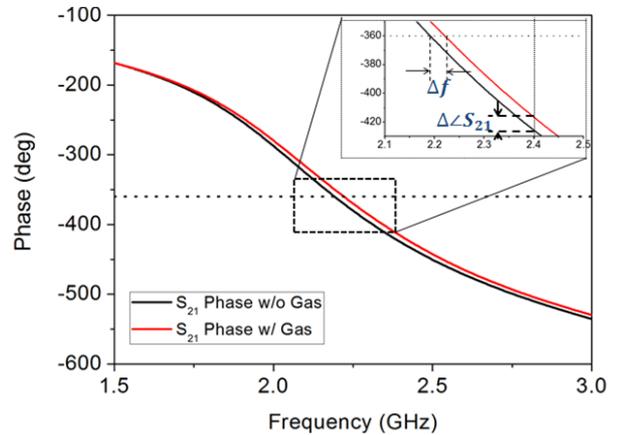


그림 8. 센서의 가스 노출에 따른 S_{21} 의 위상 응답
Fig. 8. Phase response of the sensor with and without ethanol gas.

션에 비해 손실이 높게 발생하였다.

그림 8은 제안한 가스 센서를 주파수 영역에서 가스 노출에 따른 S_{21} 의 위상변화를 나타낸 것이다. 제안한 가스 센서가 가스에 노출되면 주파수에 대한 위상 응답이 전체적으로 오른쪽으로 천이되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 2.4 GHz 기준으로 $\Delta(\angle S_{21})$ 이 약 9° 로 측정되었으며, -360° 신호 기준으로 Δf 값이 약 2.875 MHz가 천이된 것을 확인하였다.

그림 9는 제안한 가스 센서를 시간영역에서 가스 노출에

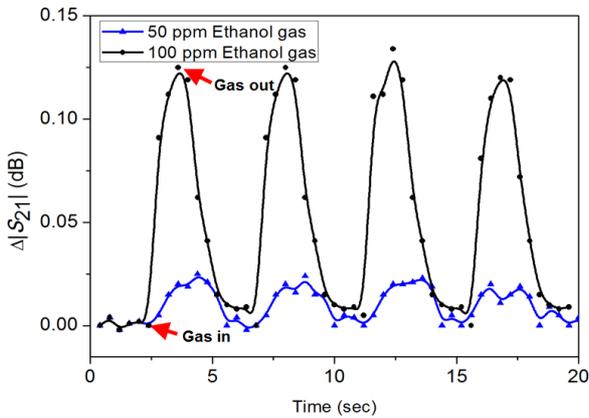


그림 9. 시간 영역에서의 가스 주입에 따른 S_{21} 진폭 변화
 Fig. 9. Amplitude variation of the S_{21} level in time-domain.

따라 2.4 GHz에서의 S_{21} 값 변화를 나타낸 것이다. 센서를 가스 유입지점(gas in)부터 가스 배출지점(gas out)까지 50 ppm과 100 ppm 농도의 에탄올 가스를 반복적으로 노출시킨 결과이다. 측정 결과, 100 ppm 에탄올 가스의 경우, $\Delta|S_{21}|$ 값이 최대 0.13 dB로 측정되었고, 50 ppm 에탄올 가스의 경우 최대 0.023 dB로 측정되었다. 특히 기존의 가스 센서 연구 결과와는 달리 가스 노출에 따른 그래프 변이가 실시간으로 변하는 것을 확인하였다. 가스가 주입된 시간으로부터 제안된 센서가 가스를 검출하기까지 평균적으로 약 1.5초가 소요되는 것으로 측정되었다. 또한, 가스 여러 회 주입해도 그 결과가 서로 유사하게 나타나는 것으로 보아, 가스 센서의 검출 반복성(repeatability) 또한 우수하다는 것을 확인하였다.

그림 9에서 가스 유입지점에서 가스 배출지점까지 에탄올 가스가 주입될 동안에 $\Delta|S_{21}|$ 값이 약간 흔들리는 경향성이 보이는 결과는 고온 다습한 실험환경과 공기 중에서 측정한 실험조건으로 인한 것으로 해석되며, 비교적 낮은 온도와 상대습도 상태에서 정적 진공 상태를 통해 실험이 진행된다면 보다 $\Delta|S_{21}|$ 값이 증가하며, 동시에 안정적인 수준에서 측정될 것으로 추측된다.

IV. 결 론

본 연구는 RF 대역에서 동작하는 소자에 전도성 고분

자 물질(PEDOT : PSS)을 적용한 가스 센서를 제안하였다. 검출 가스로 50 ppm과 100 ppm 농도의 에탄올 가스에 캐리어 가스는 질소가 사용되었다. 노출 정도를 제어하기 위해 플로우 미터를 통하여 1,000 cc/min으로 고정하여 진행하였다. 센서 구조로 2.4 GHz에서 동작하는 4-포트 90° 하이브리드 커플러 구조를 변형하여 2-포트로 제작되었으며, 주파수 영역과 시간 영역에서 S_{21} 값을 이용하여 진폭과 위상변화를 통한 검출 과정을 나타내었다. 그 결과 가스 노출에 따라 $\Delta|S_{21}|$ 값이 100 ppm 농도의 경우 최대 0.13 dB로 측정되었으며, 50 ppm 농도의 경우 최대 0.021 dB로 측정되었다. $\Delta(\angle S_{21})$ 값이 약 9°, -360° 위상 기준으로 Δf 값이 약 2.875 MHz로 측정되었다. 본 연구에서는 해석시간이 몇 분 단위로 측정되었던 기존 연구와는 달리 해석시간이 평균 약 1.5초로 비약적으로 단축되었으며, 가스 주입에 따른 응답(response) 또한 균일하고 유사하게 나타나, 센서의 검출 반복성이 우수하다. 온도 28°C와 상대습도 85 %의 고온다습한 열악한 환경과 공기 중에 개방된 환경에서 에탄올 가스에 노출시켜 측정되었다는 점에서 열악한 조건에서도 비교적 측정이 잘 되었다는 점 또한 주목할 만하다. 본 연구에서 더 나아가 미량의 가스 검출을 위한 센서의 민감도(sensitivity)를 향상시킬 수 있는 형태의 변환기(transducer)를 설계하는 것이 향후 과제로 남아 있다.

References

- [1] J. L. Fontecha, M. J. Fernandez, I. Sayago, J. P. Santos, J. Gutierrez, M. C. Horrillo, I. Gracia, C. Cane, and E. Figueras, "Fine-tuning of the resonant frequency using a hybrid coupler and fixed components in SAW oscillators for gas detection", *Sens. Actuators B*, vol. 103, pp. 139-144, Sep. 2004.
- [2] T. H. Lin, Y. T. Li, H. C. Hao, I. C. Fang, C. M. Yang, and D. J. Yao, "Surface acoustic wave gas sensor for monitoring low concentration ammonia", *Solid-State Sens. Actuators and Microsystems Conference*, pp. 1140-1143, Jun. 2011.
- [3] J. Rossignol, G. Barochi, B. de Fonseca, J. Brunet, M.

- Bouvet, A. Pauly, and L. Markey, "Microwave-based gas sensor with phthalocyanine film at room temperature", *Sens. Actuators B, Chem*, vol. 189, pp. 213-216, Apr. 2012.
- [4] C. Luo, A. Chakraborty, "Effects of dimensions on the sensitivity of a conducting polymer microwire sensor", *Microelectron*, vol. J40, no. 6, pp. 912-920, Jun. 2009.
- [5] J. W. Gardner, P. K. Guha, F. Udrea, and J. A. Covington, "CMOS interfacing for integrated gas sensors: A review", *IEEE Sensor Journal*, vol. 10, no. 12, pp. 1833-1848, Dec. 2010.
- [6] B. Adhikari, S. Majumdar, "Polymers in sensor application", *Progress in Polymer Science*, vol. 29, pp. 699-766, Jul. 2004.
- [7] J. Janata, M. Josowicz, "Conducting polymers in electronic chemical sensors", *Nature*, vol. 2, pp. 19-244, Jan. 2003.
- [8] M. F. Mabrook, C. Pearson, and M. C. Petty, "Inkjet-printed polymer films for the detection of organic vapors", *IEEE Sens. Journal*, vol. 6, pp. 1435-1444, Dec. 2006.
- [9] Y. Kim, S. Lee, H. H. Choi, J. S. Noh, and W. Lee, "Detection of a nerve agent simulant using single-walled carbon nanotube networks: dimethyl-methyl-phosphate", *Nanotechnology*, vol. 21, pp. 495501(1-5), Sep. 2010.
- [10] W. Wen, H. Shitang, L. Shunzhou, L. Minghua, and P. Yong, "Enhanced sensitivity of SAW gas sensor coated molecularly imprinted polymer incorporating high frequency stability oscillator", *Sens. and Actuators B*, vol. 125, pp. 422-427, Mar. 2007.
- [11] H. Lee, G. Shaker, K. Naishadham, X. Song, M. McKinley, B. Wagner, and M. Tentzeris, "Carbon-nanotube loaded antenna-based ammonia gas sensor", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 10, pp. 2665-2673, Oct. 2011.
- [12] C. Bernou, D. Rebiere, and J. Pistre, "Microwave sensors: a new sensing principle. Application to humidity detection", *Sens. and Actuators B*, vol. 68, pp. 88-93, Aug. 2000.
- [13] R. A. Potyrailo, W. G. Morris, "Multianalyte chemical identification and quantitation using a single radio frequency identification sensor", *Anal. Chem.*, vol. 79, pp. 45-51, Nov. 2007.
- [14] B. -H. Kim, Y. -J. Lee, H. -J. Lee, Y. Hong, M. H. Chung, W. Cho, H. H. Choi, and J. -G. Yook, "A gas sensor using double split-ring resonator coated with conducting polymer at microwave frequencies", *IEEE Sens. 2014 Conference Proceedings*, 2014. *accepted*.
- [15] Y. -J. Lee, B. -H. Kim, H. -J. Lee, Y. Hong, S. H. Lee, J. J. Lee, H. H. Choi, and J. -G. Yook, "A reflection type gas sensor using conducting polymer as a variable impedance at microwave frequencies", *IEEE Sens.*, 2014. *accepted*.
- [16] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, New York: Wiley, pp. 57-66, 1998.
- [17] D. Henkes, "Analysis of a variable attenuator using a 3 dB quadrature coupler", *Appl. Microwave Wireless*, vol. 11, pp. 44-56, Jun. 1999.
- [18] H. Hayashi, T. Nakagawa, "A miniaturized MMIC analog phase shifter using two quarter-wave-length transmission lines", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 1, pp. 150-153, Jan. 2002.
- [19] L. J. van der Pauw, "A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape", *Philips Res. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1-9, Feb. 1958.

이 용 주



2014년 2월: 경희대학교 전자전파공학과 (공학사)
 2014년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 바이오 센서, 가스 센서, RF System, RF Component, 전도성 고분자

이 승 환



2010년 2월: 수원대학교 신소재공학과 (공학사)
 2010년 3월~현재: 연세대학교 화공생명공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 전기 전도성 고분자 나노 입자 합성, 에너지 변환시스템 응용

김 병 현



2012년 2월: 연세대학교 전자전파공학과 (공학사)
 2012년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 바이오 센서, 가스 센서, RF System, RF Component

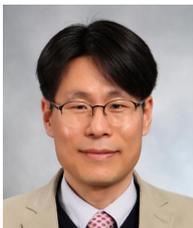
최 향 희



1998년 2월: 조선대학교 화학공학과 (공학박사)
 2001년 1월~12월: University of Massachusetts, Amherst Post-doc.
 2005년 3월~2010년 2월: 연세대학교 나노 메디컬 국가핵심연구센터 연구교수
 2010년 3월~현재: 연세대학교 융합기술연구원 연구교수

[주 관심분야] 환경 유해 가스검지 재료 및 센서, 유, 무기 나노물질 합성 및 응용, 전도성 고분자를 이용한 열전 특성 등

이 희 조



2010년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2010년 3월~10월: 연세대학교 전기전자공학부 박사후 연구원
 2010년 11월~2012년 3월: 세종대학교 그래핀연구소 전임연구원
 2012년 4월~2013년 11월: 연세대학교 융합기술연구원 연구교수

2013년 11월~2014년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 연구교수

2014년 9월~현재: 대구대학교 물리교육과 조교수
 [주 관심분야] RF 회로 및 소자 기반 나노바이오 및 가스 센서, 탄소나노물질의 RF 특성, RF와 생체물질간 상호작용

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 12월: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
 1997년 1월~1998년 9월: University of Michigan Research Fellow

1998년 10월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer
 1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
 2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
 2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)
 [주 관심분야] 수치 해석, 바이오 센서, 마이크로파 구조 해석, 및 설계, RF MEMs, 박막 공진 구조, EMI/EMC, HEMP 등

홍 윤 석



2002년 9월~현재: 삼성탈레스 수석연구원
 2011년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더, 생체신호 측정 센서 및 바이오물질 검출 센서