전도성 고분자가 첨가된 생체 모방형 분자 각인 고분자 테르펜 센서

정재훈 · 이성필*

Biomimetic MIP Terpene Sensors Adding Conductive Polymers

Jaehun Jung and Sung Pil Lee*

Abstract

Biomimetic terpene sensors which have high sensitivity and stability have been fabricated using molecularly imprinted polymer (MIP) technology. Since it is impossible to make a resistive type sensor due to the high resistance of MIP, we improved the sensor by adding conductive polymers. We investigated the sensitivity of resistive type sensors with nano particles depending on the amount of conductive polymers. The MIP membrane contained the methacrylic acid as functional monomer and ethylene glycol dimethacrylate as cross linker, which formed specific cavities originated by the target terpene molecules. The mixture of MIP and the conductive polymer was coated on the patterns of interdigit electrodes on the alumina substrate. The fabricated sensors showed their highest specific sensitivities exposed to 500 ppm target gases : limonene 0.055 at 40% of amount of conductive polymers and geraniol 5.84×10^{-4} at 20% of amount of conductive polymers. In conclusion, we found that the terpene sensors are affected by the target molecules, functional monomers and the conductive polymers.

Keywords : Terpene sensor, Limonene, Geraniol, MIPs, Conductive polymer

1. 서론

인간이 숲 속에 들어갔을 때 신선한 냄새와 함께 정신이 맑아지는 기분을 느낄 수 있는데, 이것은 단지 자연 속에서 느끼는 안락함 때문만이 아니라 인간의 몸이 직접 느끼는 건강해지고 있는 신호를 인지하는 것이다. 러시아의 생태학자 토킨박사[1]는 식물에는 각각 특유의 발산물질에 대해 다음과 같이 규명하였다. 식물은 끊임없이 병원균에게 공격을 받고 있으나 도망갈 수도 없으며, 조금이라도 약해지면 금방 균의 공격을 받아 곰팡이가 생기든지 썩어 버린다. 식물이 살아가기 위해서는 이들 병원균에 대한 저항력을 갖추지 않으면 안 된다. 식물이 병원균에 저항하기 위해 방출 또는 분비하는 물질을 '피톤치드(fitontsid, phytoncide)'라 부르며 이러한 피톤치드의 주성분은 테르펜(terpene)이다.

테르펜은 산화탄화수소(oxygenated hydrocarbons)이며, 이는 사람을 안정시키며 오존을 제거하는 등 사람에게 여러 가지 도움을 준다. 이러한 점을 이용한 몇몇 테르펜은 상업적인 방향으로 사용되

고 있다.

테르펜은 종류에 따라 특유의 향기를 가지고 있는 반면, 비슷한 성질을 가진 종이 많아 연구의 진행이 더딘 상태이다. 지금까지 연구되어 온 테르펜 감지 방법의 주를 이루는 것은 고속 액체 크로마토그래피(high performance liquid chromatography, HPLC)[2]와 가스 크로마토그래피 질량분석계(gas chromatography mass spectrometry, GC/MS)[3,4]인데, 이들은 분석장치가 너무 크고 가격이 비싸다. 또한 정량적인 분석을 위해서는 많은 시간을 요한다.

이를 대체하기 위해 최근에 연구되는 소자가 수정결정 미소저울(quartz crystal microbalance, QCM)[4-11]이다. QCM은 HPLC나 GC/MS에 비해 현저히 크기가 줄었으며, 감도가 높고, 선행성이 뛰어나며, 유해 물질도 감지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 QCM의 단점은 주로 액체 상태나 농도가 높은 기체에서 측정해야 한다는 점과 테르펜이 흡착하기 전과 후의 주파수 차를 감지하기 때문에 진동에 의한 잡음과 구별하기 어렵다는 점을 들 수 있다.

분자 각인 고분자(molecular imprinted polymers, MIPs)[3,4,10]는 높은 선택성과 탁월한 분자 인식 능력으로 인하여 여러 가지 영역에 널리 응용되고 있다. 분자 각인 고분자는 가교제(cross-linker), 기능성 단량체(functional monomers), 주형분자(template)로 구성되어 있으며 주형분자 주위에 기능성 단량체가 결합

경남대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Kyungnam University)

449 Wolyong-dong, Masanhappo-gu, Chanwon 631-701, Korea

*Corresponding author: sensors@kyungnam.ac.kr

(Received : Jul. 17, 2012, Accepted : Aug. 17, 2012)

자리에 미리 정렬되어 결합된다. 그 후 주형 분자와 결합된 기능성 단량체의 배열을 유지하기 위해 가교제와 중합 개시제를 첨가하여 고분자 중합을 시킨다. 다음 단계로 중합된 고분자에서 주형분자를 제거함으로써 주형분자와 일치하는 입체 특이적인 공극을 가진 MIP가 합성 제조된다. 주형분자가 제거된 후의 MIP는 주형분자간의 재결합이 쉽게 이루어지는 특징을 이용하여 이를 센서의 감지물질로 이용한다. 그러나 MIP는 저항률이 너무 높아 절연체에 가깝기 때문에 MIP 자체만으로 저항형센서를 제작하는 것은 불가능하다.

본 연구에서는 주형분자로 테르펜을 사용한 MIP와 주형분자와의 재결합 시 분자 각인 고분자의 저항이 변화될 것이라는 가설을 가지고 연구를 진행하였다. 전술한 바와 같이 순수한 분자 각인 고분자는 전도도가 낮기 때문에 저항의 변화를 측정하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 전도성 고분자를 혼합 중합하여 저항형 테르펜 센서를 제작하고 전도성 고분자 첨가량에 따른 저항률 변화, MIP와 전도성 고분자 비율에 따른 각 테르펜 센서의 감지특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 테르펜 센서의 제조

2.1.1 실험재료

저항형 테르펜 센서를 제조하기 위한 기판은 알루미늄(Al_2O_3)을 사용하였으며 전극은 금(Au)을 사용하였다. 분자각인 고분자 제조를 위한 기능성 단량체로는 메타크릴산(methacrylic acid, MAA), 가교제로는 ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA), 주형분자로 리모넨(limonene)과 제라니올(geraniol), 그리고 개시제로는 2,2'-azobisisobutyronitrile (AIBN)을 사용하였다. MIP 추출용액은 메탄올과 아세트산을 사용하였다. 전도성 고분자는 폴리아닐린 에머럴딘 염기, 전도성 고분자의 용매로는 N-dimethylformamide (N-DMF), 그리고 도핑용액은 1 몰의 염산을 사용하였다.

2.1.2 전극형성

저항형 테르펜 센서 제작을 위한 전극은 3차원 조형물 제조기를 이용하여 인터디짓(interdigit)형 웨도우 마스크를 제작하였다. 설계된 패턴의 크기는 14.4 mm × 29.2 mm이고, 빗살(finger)의 두께는 1 mm 및 빗살 간의 간격은 1 mm로 하였다. 준비된 마스크를 알루미늄 기판에 부착하여 진공열 증착기(FUT150)에 장착하고, 10^{-5} torr 의 압력에서 AC 100 A의 전류를 인가하여 1분 동안 금을 증착하였다. 전극이 형성된 알루미늄 기판은 질소 분위기 800℃ (20 °C/min)에서 10분간 열처리 하였다.

2.1.3 분자 각인 고분자 합성

MIP는 주형분자인 테르펜을 각각 기능성 단량체인 MAA, 가교제인 EGDMA 및 개시제인 AIBN을 혼합하여 제조하였다. 혼합된 분자 각인 고분자는 탈산소화를 위해 질소가스를 10분간 주입하였다. Table 1은 실험에 사용된 테르펜의 특성을 보여주고 있다. 테르펜은 $(C_5H_8)_n$ 의 분자식을 가진다. 이때 이소프렌(isoprene)의 수가 2일 때 모노테르펜(monoterpene)이라고 한다. 리모넨은 모노테르펜이고 제라니올은 oxygenated terpene으로 산소가 결합된 것을 제외하면 분자식이 비슷함을 알 수 있다. 그러나 이들의 분자 구조는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 큰 차이를 보이고 있으므로 이들 테르펜들에서 나오는 향과 끓는 점 등 그 특성은 차이가 많이 남을 알 수 있다. 이러한 경우 일반적인 화학센서로는 각각을 구분하기가 매우 어려운 반면, 분자 각인 고분자를 이용하면 주형분자의 모양을 한 특별한 공극을 형성하게 되어 재결합을 쉽게 하게 하는 특징을 이용하며 비슷한 분자식을 보이더라도 뛰어난 감도 및 선택성을 보여줄 것으로 기대된다.

Table 1. Properties of terpene

Target terpenes	Molecular structure	Flavor	Boiling point(°C)	Flash point(°C)
Limonene	$C_{10}H_{16}$	Fresh orange	165	46
Geraniol	$C_{10}H_{18}O$	Rose	230	100

Fig. 1. Molecular structure of (a) limonene and (b) geraniol.

2.1.4 테르펜가스 감지용 센서의 제작

준비된 분자각인 고분자와 전도성 고분자인 폴리아닐린을 용매인 N-DMF에 3 wt% [12] 비율로 녹인 용액을 혼합하였다. 혼합된 시료는 알루미늄 기판 위에 인터디짓형으로 형성된 금전극 기판 위에 약 30 mg의 시료를 디핑 및 스핀 코팅 후 70℃의 항온수조에서 12시간 동안 중합하였다. 중합된 시료는 전도성 고분자의 전도도를 높이기 위해 1 몰의 염산용액에 12시간 동안 도핑 하였다. 도핑전과 후의 전도도는 약 5 S/cm와 170 S/cm로 보고되고 있다 [12]. 주형분자의 추출을 위해 메탄올과 아세트산을 15 : 0.5 wt%의 비율로 섞은 용액에 30분간 담가 두었다. 추출용액을 사용하여 원하는 테르펜의 주형분자를 제거한 후 목표하는 테르펜에 응답하는 센서를 완성한다. Fig. 2는 테르펜 센서의 제조 과정을 도식화 한 것이다.

Fig. 2. Fabrication procedure of terpene sensors.

2.2 테르펜 센서의 측정

테르펜센서의 테르펜에 대한 감도와 응답 특성을 조사하기 위해 측정 장치를 제작하였다. 질소가스는 두 경로로 나누어 진행하도록 하였다. 즉 건조한 질소가스 및 테르펜을 담은 비이커를 통과하여 테르펜 분자를 포함한 질소가스가 질량유량계(mass flow controller, MFC)를 통해 각각의 유량을 결정한 후, 테르펜가스와 질소의 혼합비를 결정하도록 하였다. 테르펜 가스의 농도가 ppm 단위로 혼합 챔버를 통해 테르펜 센서에 주입되면 테르펜 센서에서의 도전을 변화가 데이터 수집기(Agilent 3497A)를 통해 저장된다. 이때 온도와 습도에 대한 변화를 배제하기 위해 항온 항습이 유지되도록 하였다. 센서를 거친 테르펜 분자는 압력차에 의해 배기구를 통해 배출되도록 하였다. Fig. 3은 테르펜 센서의 측정을 위한 장치도이다.

3.결과 및 고찰

3.1 MIP 혼합비에 따른 중합상태 비교

Fig. 3. Schematic of measurement equipment.

재료의 혼합비에 따른 MIP의 중합 상태 및 전도율 변화를 조사하기 위해 MAA, EGDMA 및 전도성 폴리머의 혼합비를 달리하여 시료를 제조하였다. Table 2는 혼합비를 다양화한 샘플들의 비율을 나타낸 것이다. 먼저 기능성 단량체(MAA) : 가교제(EGDMA)의 비율을 결정하기 위해 문헌[10,13]에서 보고된 5 : 5와 4 : 20의 조건으로 Table 2의 혼합비 1,2와 같이 제조하였다. Fig. 4는 두 시료에 대한 SEM 사진이다. Fig. 4(a)는 기능성 단량체(MAA) : 가교제(EGDMA)의 비율을 4 : 20으로 한 시료를 5,000배 확대하여 찍은 사진이고, Fig. 4(b)는 기능성 단량체(MAA) : 가교제(EGDMA)의 비율을 5 : 5로 한 시료를 5,000배 확대하여 찍은 사진이다. 또한 Fig. 3(c)는 Fig. 4(b) 시료의 측면을 20,000배 확대하여 찍은 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 기능성 단량체(MAA) : 가교제(EGDMA)의 비율을 4 : 20으로 한 시료는 중합체의 균질성이 떨어져 지고 과다한 가교제의 첨가로 인해 기공(void)가 존재하는 등 센서로 사용하기에는 부적합한 표면 및 내부 상태를 보여주고 있다. 반면 기능성 단량체(MAA) : 가교제(EGDMA)의 비율이 5 : 5인 시료는 기능성 단량체의 중합 상태가 균질하며 가교제의 첨가에 의한 가교상태가 일정함을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(c)에서 기관과의 접촉 상태가 뛰어나고 입자가 조밀하게 쌓여있음을 알 수 있다. 입자의 크기는 100~150 nm의 나노 사이즈로 분포되어 있음을 알 수 있다.

Table 2. Mixing ratio of materials for terpene sensors

Sample number	Mixing ratio of MIP (target : MAA : EGDMA) (wt%)	Conductive polymer : MIP (wt%)
1	0 : 4 : 20	2 : 8
2	0 : 5 : 5	2 : 8
3	1 : 5 : 5	2 : 8
4	1 : 5 : 5	4 : 6
5	1 : 5 : 5	6 : 4
6	1 : 5 : 5	8 : 2

Fig. 4. SEM images of MIP, ratio of conductive polymer : MIP is 2 : 8 ; (a) functional monomer(MAA) : cross-linker (EGDMA)=4 : 20, (b) MAA : EGDMA=5 : 5 and (c) cross sectional image of (b).

Fig. 5. Resistivity change according to content of conductive polymer.

3.2 전도성 고분자의 영향

전도성 고분자의 혼합에 따른 테르펜 센서의 전도도 변화를 조사하기 위해 분자 각인 고분자 및 전도성 고분자의 혼합비를 달리하여 시료를 제조하였다. Table 1의 샘플 번호 3 ~ 6과 같이 주형분자 : 기능성 단량체(MAA) : 가교제(EGDMA) 비를 1 : 5 : 5 로 고정하여 제조한 시료에 전도성 고분자의 함량을 20%, 40%, 60% 및 80% 로 증가하여 첨가시키면서 센서를 제조하였다. 각 센서의 주형분자에 따라 리모넨 센서는 Limo로 제라니올 센서는 Ge로 명명하였다. Fig. 5는 제조된 센서의 전도성 고분자의 함량에 따른 센서의 저항률 변화를 측정한 것이다. 예상한 바와 같이 전도성 고분자의 함량이 높아질수록 센서의 저항률이 감소함을 알 수 있다. 리모넨 센서의 경우 전도성 고분자 함량이 10% 일 때 저항률이 $3.39 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 매우 높다가 전도성 고분자의 함량이 높아짐에 따라 급격히 저항률이 감소함을 알 수 있다.

3.3 테르펜 센서의 감지 특성

전도성 고분자의 함량에 따른 리모넨 센서의 감도를 측정하였다. 주형분자를 리모넨으로 하고 주형분자 : 기능성 단량체(MAA) : 가교제(EGDMA)의 비율은 1 : 5 : 5 로 고정된 후, 전도성 고분자와 분자 각인 고분자(MIP)의 혼합비율을 각각 1 : 9, 2 : 8, 4 : 6, 6 : 4 및 8 : 2로 하였다. Fig. 6(a)에서 전도성 고분자 함량이 10%인 경우 저항률이 높아 매우 낮은 전류값을 나타내었으며, 잡음 신호와 식별이 어려워 시간응답 특성이 불규칙하게 나타났다. 그러므로 전도성 고분자의 함량은 20% 이상 혼합하였다. 테르펜 가스를 주입하면 제조 과정 중 MIP 내의 테르펜이 추출된 지점에 목표가스가 들어가 차게 되고, 이로 인해 감지 물질에 전자를 내어 놓거나 뺏어 옴에 따라 센서의 저항이 감소하거나 증가하게 된다. 리모넨 가스의 경우 가스 주입에 따라 저항이 감소하였으며, 리모넨 가스를 5,000 ppm 주입하였을 때 반응시간은 약 500 초로 나타났다. 이때 반응시간은 가스 주입 후 저항값이 포화치의 90%에 이르는 시간을 측정 한 것이다.

Fig. 7은 Fig. 5의 결과를 정리한 것으로 전도성 고분자의 함량에 따른 리모넨 센서의 감도를 나타낸 것이다. 이때 센서의 감도는 $d/dt(R_s - R_0)$ 로 정의하였다. 여기서 R_s 는 측정 저항값이며, R_0 는 대상 가스를 주입하기 전의 저항 값이다. 전도성 고분자와 분자각인 고분자의 혼합비율이 4 : 6에서 가장 뛰어난 감도를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이 조건에서 리모넨 가스의 농도가 100 ppm일 때 감도는 약 0.05였으며, 10,000 ppm에서는 약 0.63으로 나타났다.

Fig. 6. Sensitivity and response of limonene sensor; ratio of conductive polymer to MIP is (a) 1 : 9, (b) 2 : 8, (c) 4 : 6, (d) 6 : 4, and (e) 8 : 2.

Fig. 7. Sensitivity of limonene sensors according to content of conductive polymer.

리모넨 센서와 같은 방법으로 전도성 고분자의 함량에 따른 제라니올 센서의 특성을 조사하였다. 주형분자는 제라니올로 하고 전도성 고분자와 분자 각인 고분자의 혼합비를 각각 2 : 8, 4 : 6, 6 : 4 및 8 : 2로 하였다. Fig. 8은 전도성 고분자의 함량에 따른 제라니올 센서의 응답 특성을 나타낸 것으로 리모넨 센서와 비교해 볼 때 제라니올 센서는 가스 주입에 따른 시간응답이 빠른 것을 알 수 있다. 제라니올 가스를 5,000 ppm 주입하였을 때 반응시간은 약 350 초로 나타났다. 이는 제라니올 분자에 있는 산소 혹은 OH기는 주로 이온화 상태로 있기 때문에 센서 내에 존재하는 전자를 쉽게 받아드리기 때문에 반응시간이 짧은 것으로 사료된다. 또한 제라니올 센서는 가스 농도가 증가함에 따라 저항률이 증가하였다. 실험에서 나타난 결과로 유추해 볼 때 리모넨 가스는 이온화된 상태에서 주형분자 공극에 결합하면서 센서의 표면에 전자를 내어 놓게 되고 이러한 전자들은 이웃하는 나노 사이즈의 도메인으로 호핑되어 전도에 기여하게 된다. 그러나 제라니올분자는 센서의 전자를 받아들여 전기적 중성을 띄게 되므로 가스 농도에 따라 저항이 증가하게 된다.

Fig. 8. Sensitivity and response of geraniol sensor; ratio of conductive polymer to MIP is (a) 2 : 8, (b) 4 : 6, (c) 6 : 4, and (d) 8 : 2.

Fig. 9는 Fig. 8의 결과를 정리한 것으로 전도성 고분자의 함량에 따른 제라니올 센서의 감도를 나타낸 것이다. 전도성 고분자와 분자각인 고분자의 혼합비율이 2 : 8에서 가장 뛰어난 감도를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이 조건에서 제라니올 가스의 농도가 100 ppm일 때 감도는 약 0.43×10^{-3} 였으며, 10,000 ppm에서는 약 0.014로 나타났다. 리모넨 센서의 경우 전도성 고분자의 함량이 40% 일 때 감도가 가장 높았으나, 제라니올 센서의 경우 전도성 고분자의 함량이 약 20% 일 때 감도가 가장 높았다.

전도성 고분자를 첨가한 전기저항형 센서의 경우 센서의 감도는 전기저항의 변화에 의존하므로 센서재료의 저항률 설정은 매우 중요하다. 저항률이 높은 경우 센서 전극을 통해 흐르는 전류가 적어 가스와 반응하여 생긴 미세한 저항의 변화를 인식하기 어렵고, 저항률이 너무 낮은 경우는 외부 잡음에도 민감하게 반응할 수 있다. 그러나 저항률을 낮추기 위해 전도성 고분자를 너무 많이 첨가하면 감지물질인 MIP의 양이 줄어 감도가 낮아지게 되므로 이 두 요소는 감도지수(figure of merit)가 된다. 본 연구의 경우 Fig. 5에서와 같이 리모넨은 전도성 고분자의 첨가량이 적은 경우 저항률이 매우 높다가 전도성 고분자의 함량이 약 40% 정도에서 저항률이 수 $k\Omega \cdot cm$ 대로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 7의 결과와 일치한다. 반면 제라니올은 전도성 고분자의 첨가량에 따른 저항률의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 9와 같이 전도성 고분자의 함량이 적은 경우 감도가 높아 짐을 알 수 있다. 전도성 고분자의 함량이 80%인 경우 감도가 증가하는 이유에 대해서는 그 원인을 규명 중이다.

Fig. 9. Sensitivity of geraniol sensors according to content of conductive polymer.

4. 결론

본 연구는 분자 각인 고분자의 우수한 감지 특성을 이용함과 동시에 전도성 고분자와의 혼합에 의해 센서의 저항률 변화를 감지할 수 있는 저항형 테르펜 센서를 제작하였다.

MIP의 혼합비에 따른 중합상태는 주형분자 : 기능성 단량체(MAA) : 가교제(EGDMA) = 1 : 5 : 5인 경우 표면이 나노 사이즈의

입자가 비교적 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있었다.

리모넨 센서의 가장 우수한 감지 특성을 보이는 조건은 전도성 고분자와 MIP의 혼합비가 4 : 6일 때이며, 이때 가스 농도가 각각 500 ppm 및 10,000 ppm일 때 센서의 감도는 0.055 및 0.601로 나타났다. 또한 제라니올 센서는 전도성 고분자와 MIP의 혼합비가 2 : 8인 경우, 가스 농도가 각각 500 ppm 및 10,000 ppm일 때 감도는 5.84×10^{-4} 및 0.015로 나타났다.

전도성 고분자를 첨가한 저항 측정형 테르펜 센서는 GC-MS나 QCM 어레이 센서에 비해 대상 테르펜에 대한 감도나 정확도는 비슷하거나 약간 떨어지지만, 시료를 준비하는데 필요한 노력을 줄일 수 있고, 제조공정이 간단하며, 기판 재료의 단가가 낮은 점 등 장점이 많다. 이를 활용하면 테르펜 센서의 범용화에 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구임(No. 2012R1A1A4A01007610)

REFERENCES

- [1] B. P. Tokin, *Fitontsid*, 2nd ed, Moscow, 1951.
- [2] H. Wang and S. Hanash, "Multi-dimensional liquid phase based separations in proteomics", *J. Chromatogr. B*, Vol. 787, pp. 11-18, 2003.
- [3] R. Sun, H. Yu, H. Luo, and Z.Y. Shen, "Construction and application of a stoichiometric displacement model for retention in chiral recognition of molecular imprinting", *J. Chromatogr. A*, Vol. 1055, pp. 1-9, 2004.
- [4] B. S. Vicente, F. N. Villoslada, and M. C. Moreno-Bondi, "Continuous solid phase extraction and preconcentration of bisphenol A in aqueous samples using molecularly imprinted columns", *Anal. Bioanal. Chem.*, Vol. 380, pp. 115-122, 2004.
- [5] W. H. King Jr., "Piezoelectric sorption detector", *Anal. Chem.*, Vol. 36, No. 9, pp. 1735-1739, 1964.
- [6] E. Pasquinet, C. Bouvier, F. Therx-Merland, L. Hairault, B. Lebre, C. Methivier, and C. M. Pradier, "Synthesis and absorption on gold surfaces of a functionalized thiol : elaboration and test of a new nitroaromatic gas sensor", *J. Colloid Interf. Sci.*, Vol. 272, pp. 21-27, 2004.

- [7] M. Yamada, and S. S. Shiratori, "Smoke sensor using mass controlled layer-by-layer self-assembly of polyelectrolytes films", *Sensors Actuators B*, Vol. 64, pp. 124-127, 2000.
- [8] H. Eun and Y. Umezawa, "Sulfate ion sensing based on a quartz-crystal microbalance immobilized with barium sulfate crystals grown on a selfassembled monolayer of phosphorylated 11-mercapto-1-undecanol", *Anal. Chim. Acta.*, Vol. 375, pp. 155-165, 1998.
- [9] Y. Liu, X. Yu, R. Davidsson, M. Bengtsson, T. Laurell, and J. Emneus, "Quartz crystal biosensor for real-time monitoring of molecular recognition between protein and small molecular medical agents", *Biosens. Bioelectron.*, Vol. 19, pp. 9-19, 2003.
- [10] N. Tsuru, M. Kikuchi, H. Kawaguchi, and S. Shiratori, "A quartz crystal microbalance sensor coated with MIP for bisphenol A and its properties", *Thin Solid Films*, Vol. 499, pp. 380-385, 2006.
- [11] N. Iqbal, G. Mustafa, A. Rehman, A. Biedermann, B. Najafi, P.A. Lieberzeit, and F. L. Dickert, "QCM-arrays for sensing terpenes in fresh and dried herbs via bio-mimetic MIP layers", *Sensors*, Vol. 10, pp. 6361-6376, 2010.
- [12] K. S. Ryu and C. H. Yo, "The electrical conductivity of polyaniline film depending on the doping temperature", *J. Korean Chemical Society*, Vol. 45, No. 3, pp. 282-285, 2001.
- [13] C. E. Jung, J. H. Chang, K. P. Huh, M. Kim, and B. S. Kim, "The preparation of chiral separation membranes by UV polymerization and its properties", *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 19, No. 3, pp. 287-294, 2008.

정재훈 (Jaehun Jung)

- 2010년 2월 경남대학교 전자공학과(공학사)
- 2012년 8월 경남대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 관심분야 : 바이오센서, 센서시스템

이 성 필 (Sung Pil Lee)

- 1989년 경북대학교 전자공학과(공학박사)
- 1988년 ~ 현재 경남대학교 전자공학과 교수
- 관심분야 : 센서 재료 및 시스템, 반도체 가스센서, MEMS, 바이오센서