

지능형 후각센서

Intelligent Olfactory Sensor

이대식 (D.-S. Lee, dslee@etri.re.kr)

안창근 (C.G. Ahn, cgahn@etri.re.kr)

김봉규 (B.K. Kim, bongkim@etri.re.kr)

표현봉 (H.B. Pyo, pyo@etri.re.kr)

김진태 (J.T. Kim, jintae@etri.re.kr)

허철 (C. Huh, chuh@etri.re.kr)

김승환 (S.H. Kim, skim@etri.re.kr)

진단치료기연구실 책임연구원

의료정보연구실 책임연구원

진단치료기연구실 책임연구원

진단치료기연구실 책임연구원

진단치료기연구실 책임연구원

진단치료기연구실 책임연구원/실장

의료정보연구실 책임연구원

ABSTRACT

With advances in olfactory sensor technologies, the number of reports on various intelligent applications using multiple sensors (sensor arrays) are continuously increasing for fields such as medicine, environment, security, etc. For intelligent and point-of-care applications, it is not only important for the sensor technology to perform chemical or physical measurements rapidly and accurately, but it is also important for artificial intelligence technology to recognize and quantify specific chemicals or diagnose diseases such as lung cancer and diabetes. In particular, great advances in pattern recognition technologies, including deep learning algorithms, as well as sensor array technologies, are expected to enhance the potential of various types of olfactory intelligence applications, including early cancer diagnosis, drug seeking, military operations, and air pollution monitoring.

KEYWORDS olfactory sensor array, common-edge technologies, deep learning, artificial intelligence

1. 서론

인간에게나 동물에게나 냄새를 맡는 후각 감각은 매우 중요하다. 인간의 후각 능력은 환경오염 물질, 매연, 독성 물질에 대한 경계를 잘 수행하도

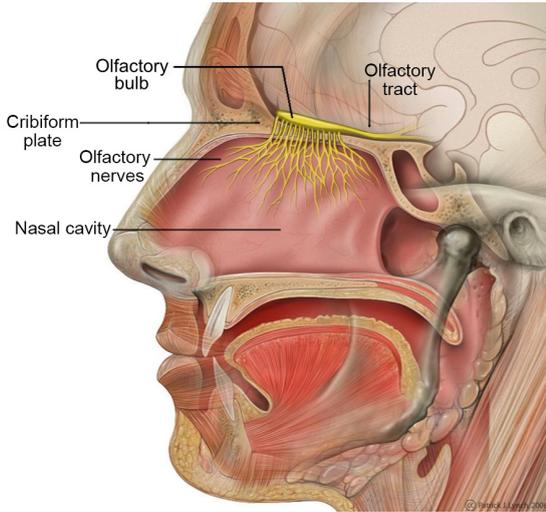
록 도와주기도 하며, 좋은 와인이나 맛있는 음식을 즐기고 달콤한 냄새를 음미하도록 할 뿐만 아니라 기억에도 영향을 미친다.

생리학적으로 냄새를 맡는다는 것은 가스 형태로 들어오는 입자가 코 속의 후각 수용체를 화학적

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340408>

* 본 기술동향 분석은 과학 기술 정부부 산하 한국연구재단 국책사업인 모바일 헬스케어 사업 일환으로 수행되었음 (NRF-2017M3A9F1033056).





출처 Patrick J. Lynch, medical illustrator [CC BY 2.5 (<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5>)]

그림 1 상피세포, 후각 뉴런, 시상 판을 포함한 인간의 후각 감지시스템

으로 자극하고, 후각신경을 흥분시켜 뇌의 측두엽 안쪽에 위치한 후각 중추에 신호를 전달하는 행위이다. 결과적으로 보면, 코 속으로 들어오는 냄새 입자를 식별한다는 것을 의미한다. 감지 입자는 원래 물질의 성질을 포함하기 때문에 원래 물질이 무엇인지를 구별하여 찾아내는 단서가 된다. 따라서 이러한 가스 중에 포함된 입자를 감지하는 능력인 냄새를 맡는다는 것이 인간의 삶에 매우 유용하며 많은 영향을 끼친다. 하지만, 인간의 후각 능력은 대부분의 포유류나 파충류에 비해 매우 떨어진다.

개의 후각은 비상해서 사람의 후각보다 최대 10만 배나 예민한데, 이는 일정 부분 'olfactory recess, 후각 함요(嗅覺 陷凹)'라는 구조에 기인한다. 종잇장 처럼 얇은 뼈들이 미로처럼 얽혀 있는 이 후각 함요에는 수백만 개의 후각 수용체가 있는데, 이 수용체들이 냄새를 분석하는 뇌까지 신경세포로 연결되어 있다. 군견들은 폭탄의 위치를 정확히 찾아낼 수 있고, 잘 훈련된 개를 이용하여 암과 같은 특정 질병을 가진 사람을 찾아낼 수 있다.

이러한 인간의 낮은 후각 능력을 ICT 기술 기반으로 보완할 수 있다면 더할 나위가 없을 것이다. 이러한 상황에서 개발되기 시작한 것이 지능형 후각센서이다. 지능형 후각센서는 미세 전류가 흐르는 센서에 공기 중에 떠다니는 냄새 분자가 닿을 때 전기적 특성이 변화하는 성질을 이용한다. 또 냄새 분자와 결합하면 색이 변하는 물질을 이용하기도 한다. 반면 사람이나 동물의 코에 있는 냄새 수용체는 그림 1과 같이 하나의 냄새 분자에만 결합하는 것이 아니다. 냄새 수용체는 수많은 물질과 각각 다르게 결합하는데, 뇌는 이러한 결합 패턴을 총체적으로 분석하여 하나의 냄새를 파악해낸다. 개의 후각능력을 이용하여 질병은 찾아내는 것과 같이 지능형 후각센서가 질병 진단에도 쓰일 수 있을 것으로 기대된다. 이미 환자의 날숨을 분석하여 폐암 및 질병 관련 바이오마커를 진단하는 지능형 후각센서 기술이 보고되고 있다.

본 연구팀은 후각센서의 연구동향을 살펴보고, 후각을 모방 혹은 증강시키는 ICT 기반의 지능형 후각센서들의 연구 동향 및 발전 방향에 대해 본 원고를 통해 검토해 보도록 한다.

II. 후각센서의 기술현황

1. 후각센서의 기술동향

가. 후각센서의 역사

인간은 시각, 청각, 후각, 미각, 촉각의 오감을 지니고 있다. 시각, 청각, 촉각과 같은 물리량의 감지 및 분석이 현재 거의 완성되었다. 하지만 냄새 및 맛에 해당하는 후각과 미각은 아직 구현하지 못하고 있다.

반도체 가스센서는 일본의 큐슈 대학교 대학원생 세이야마(T. Seiyama)와 일반인 발명가 타쿠치(N. Taguchi)가 1962년에 각자 독자적으로 탄생시

표 1 후각센서 기술의 종류 및 간략 특성 비교[4]

Sensor type	Operation Principle	Sensitivity	Advantages	Disadvantages
Metal oxide	Conductivity	0.1~500ppm	inexpensive microfabricated	Operated at high temperature
Conducting polymer	Conductivity	0.1~100ppm	Operateds at room temperature	Very sensitive to humidity
Mass spectrometry	Atomic mass spectrum	Low ppb	Potential analytical accuracy	Sample pre-concentration required
Gas chromatography	Molecular spectrum	Low ppb	Potential analytical accuracy	Sample pre-concentration required
Light spectrum	Light spectrum	Low ppb	No sample consumption	Require tunable quantum-well devices
Optical	Fluorescence	Low ppb	High electrical noise immunity	Restricted availability of light sources

킨 기술이다. 전자는 산화촉매작용의 반도체 이론에 기초하여 기체분자가 촉매와 산화물 반도체와의 사이에서 일어난 전자 수수로 인해 산화물의 전기전도도가 변화하는 현상에 착안된 것이다. 결국 ZnO 박막센서로 알코올 가스감지 기술 개발을 성공하여 그 연구결과를 발표하였다. 한편, 후자는 대기업 제조라인에서 근무하던 대졸의 젊은 기술자가 당시 가스 누설 폭발사고에 관련된 신문 기사를 보았다. ‘금속이 산소에 의하여 산화물이 되면 전기가 통하지 않게 되고, 가연성가스는 금속 산화물을 환원한다’라는 정도의 지식을 가지고, 여러 가지의 산화물로 거듭된 실험을 한 결과, SnO₂ 소재의 우수한 가스센서를 개발하였다. 이로써 세계 최초의 가스누설경보기의 특허를 취득하게 되었다. 그 이후 이의 산화물에 소량의 귀금속(예, Pt, Pd)의 첨가가 가스검출 특성을 개량하는 데 유효하다고 보고되었다[1,2]. 이런 센서 기술은 선택성, 신뢰성, 정확도, 정밀도 확보라는 미완의 숙제가 있다. 이 해결방안으로, 이를 서로 다른 종류의 센서들을 어레이로 사용하여 특정 냄새에 대해 발생하는 고유한 신호 패턴을 적용할 수 있다는 개념을 영국 Warwick 대학교 퍼사우드(K. Persaud)가

1982년에 Nature에 발표하였다[3]. 현재는 나노센서 및 인공지능 기술의 눈부신 발전으로 다양한 주요 분야에서 나타나는 공통 핵심 문제에 대한 해결책으로 대두되고 있다.

나. 후각센서의 종류

후각센서는 냄새를 감지하고, 이의 종류와 농도를 정량적으로 측정할 수 있는 전자코(Electronic nose, e-nose)의 핵심소자이다. 주로 금속산화물 센서, 폴리머 센서, 광학 센서 등의 다양한 종류의 후각센서들이 보고되고 있다[4,5]. 그리고 각 후각센서 종류별 특성을 표 1에 간단하게 정리하였다.

1) 금속산화물 센서

금속산화물 반도체(MOS) 센서의 화학적 감지를 근거로 한 가스센서는 이미 상용화된 제품이 일부 있고, 다른 단일 가스센서 형태보다 더 냄새 계측용으로 어레이 형태로 좀 더 널리 사용되고 있다. 많은 금속산화물이 최적화 상태에서 가스 감도를 보이지만, 가장 널리 사용되는 물질은 백금과 같은 촉매 금속 첨가물이 가미된 주석산화물(SnO₂)이다. 가스가 있을 때 SnO₂ 입자의 표면에서 산소와

반응하여, SnO₂의 전기저항에 영향을 미치게 되는 것이다. MOS 센서는 선택적이지는 못하여, 많은 다른 종류의 가스에도 어느 정도 반응성을 갖고 있다. 필요한 선택성을 갖기 위해서 조금씩 다른 종류의 여러 센서 어레이와 인공지능 기술이 사용된다[6,7].

반도체산화물은 CO와 같은 가스의 감지 및 모니터링에 많이 사용되는 저렴한 감지물질이다. 분석 대상 가스에 대해 빠른 응답특성, 고감도, 그리고 장기안정성을 갖고 있다. 반응 원리는 그림 2와 같이 반도체 특성을 가진 금속산화물의 전기전도도가 산화물 표면에서 가스의 산화/환원 반응에 의해 변화되는 것을 이용한다. 이러한 반응은 사용된 산화물의 전자적 구조, 화학적 조성, 결정 구조, 결정 방향, 입자 크기, 가스에 노출되는 산화물의 표면특성 등의 조절에 의해 특성 설계가 가능하다. 산화물의 다결정상 중에서 특정 결정상에 따라서 특정 가스에 대한 선택성을 갖게 할 수 있다. 예를 들면, 다결정성을 가진 SnO₂와 TiO₂의 Rutile 구조에서는 CO와 탄화수소계 가스를 잘 감지하며, Perovskite 구조를 가진 산화물은 산화성 가스에 대해 고감도 특성을 가진다. 신뢰성 있는 감응특성을 얻으려면 산화물의 결정구조가 결정 안정성을 가지는 구간 내에 있어야 한다[6].

금속산화물을 사용한 예로서, 폐암 조기 스크리닝, 음식품질 평가 및 환경모니터링용으로 사용된 것이 발표되었다. 가스감지 물질로서 나노벨트, 나노막대, 나노점과 같이 나노 구조체를 갖는 산화물을 사용하는 경향이 증가하고 있다. 나노 결정화 작업은 산화물 다결정체를 안정화시키는 데 사용될 수도 있다. 예를 들면, TiO₂의 경우 Rutile 구조에서는 안정하고, Anatase 구조의 경우 정상적인 조건에서는 불안정하지만, 나노 구조에서는 안정할 수 있다[8]. 저항변화형 화학센서의 경우에 응답시

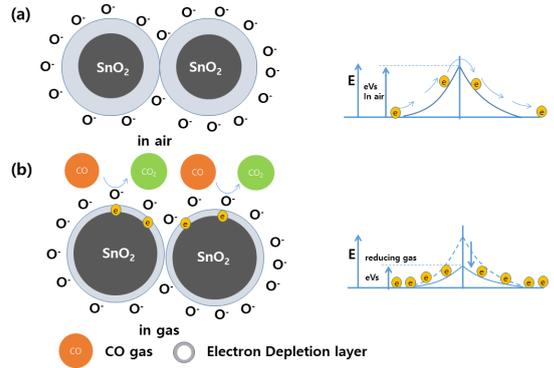


그림 2 금속산화물 센서의 동작원리

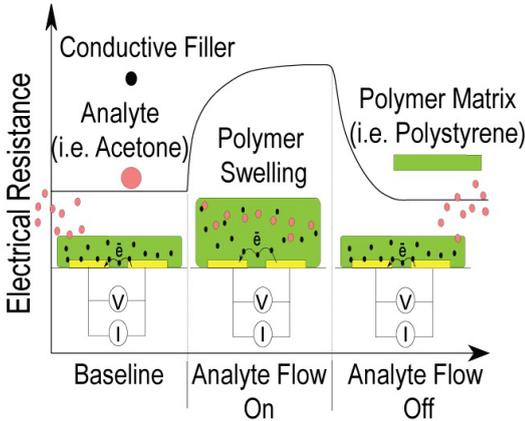
간과 가스감도와 같은 감지특성이 산화물반도체의 입자크기를 줄일 때 크게 향상된다.

2) 폴리머 센서

가장 흔하게 사용되는 가스감지 물질은 전도성 폴리머 및 복합체와 같은 가스 흡탈착성이 있는 것이다. 가스 흡착할 때 폴리머가 부풀어 오름으로써 전도성 폴리머의 전기적 특성이 바뀌거나 폴리머가 코팅된 캔틸레버소자의 공진주파수가 바뀌게 된다. 전도도 및 공진주파수는 주요 파라미터로 사용될 수 있다. 가스감지의 원리는 가스에 대한 고유한 친화력을 가진 폴리머와 전도성 물질의 혼합으로 구성된 복합체에 분석물의 흡착에 의해 그림 3과 같이 전기전도도가 변하는 특성을 이용하는 것이다. 다양한 폴리머, 특히 폴리피롤과 같은 폴리히테로사이클 계통이 휘발성 가스에 대한 흡착 능력이 있어 많이 이용되고 있다[9].

전도도 변화로 나타나는 감도를 가지하는 감지 센서에 절대적 선택성은 없다. 감지 물질의 응답 특성은 폴리머의 분자량, 폴리머 체인의 종류, 수소 결합 등에 따라서 달라진다. 상대적으로 감응시간도 매우 길다[9].

복합체는 휘발 용제가 흡착될 때 부피가 증가되



출처 Reprinted from M.M. Kiaee, T. Maeder, and J. Brugger, "Ink-jet-Printing Polymer Nanocomposite for Detecting VOCs," Eurosenors, vol. 2, 2018, pp. 882:1-5, CC BY 4.0.

그림 3 Polymer composite 센서 동작 원리

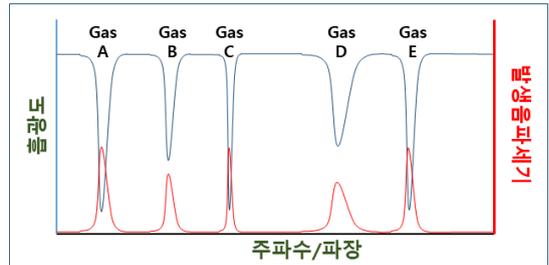
는데, 이는 전기전도도의 변화가 일어나므로, 폴리머는 전도성 복합체를 사용해야 할 필요가 있다. 한 방법으로 여러 개의 고유한 전도성을 가진 폴리머를 이용한다. 예를 들면, 폴리헥테로사이클 물질이다. 이 방법은 흡착성의 선택도의 가용성을 제한할 수 있다. 또 다른 전략은 폴리비닐페놀, 폴리 에틸렌산화물, 에틸셀룰로스와 같은 부도체성 폴리머에 카본블랙을 혼합하여 사용하는 것이다. 카본블랙이 복합체의 전기전도도 변화 기여체이다. 알코올과 같이 상대적으로 고증기압을 가진 휘발성 유기화합물에 잘 반응하게 된다. 상온 혹은 저온 동작이 가능한 장점이 있으나 습도에 민감한 단점도 있다[2,9,10].

3) 광음향 분광 센서

가스성분을 선택적으로 분석하는 방식으로 가스 내부 분자 간의 결합에너지가 다른 특성을 이용한 후각센서 기술이 개발되고 있다. 가스성분별로 다른 결합에너지 크기는 흡수되는 빛의 파장 또는 전파 주파수 특성으로 나타나며, 이러한 방식의 후각



(a) 광음향 신호 발생 원리



(b) 광음향 분광

그림 4 PAS 원리 및 측정방식

센서는 정밀측정을 위하여 포집이나 흡착을 하지 않아도 되기 때문에 실시간 연속 측정의 장점을 지니고 있다. 빛 또는 전파의 흡수 특성을 이용한 대부분 기술들은 잡음제어가 어렵기 때문에 고감도 측정이 어려워 시스템이 복잡해지는 경향이 있지만, 최근 연구가 많이 되고 있는 광음향 분광(PAS) 기술을 이용한 후각센서는 소형 정밀 분석이 가능해지고 있다.

PAS 센서 원리는 다음 그림 4와 같이 레이저 펄스를 가스에 비추어주면 가스에서 열팽창/수축이 반복적으로 발생하면서 음파가 발생된다. 입사되는 빛의 파장을 바꾸어 가면서 발생하는 음파의 크기 변화 특성을 분석하게 되면 다양한 가스성분별로 농도를 측정할 수 있게 된다.

PAS 기반 후각센서는 공진기 등을 이용한 수신 음파 증폭 기술과 잡음을 제어하는 기술을 감도 향상기술에 활용하고 있으며, 최근에는 ppt 이하의 초소량의 가스를 분석하는 후각센서 기술로 발전

하고 있다[11]. 지금까지의 PAS 기반 후각센서는 대부분 고가의 증적외선 광원을 활용하고 있지만, 최근에는 저가의 광원 기반의 PAS 센서 기술과 소형화된 PAS 센서 기술로 발전하고 있다. 또한, 인공지능 기반 데이터 분석 기술이 PAS 기반 후각센서에 적용되어 더욱더 신뢰성 높고 감도가 좋은 제품이 수년 내 상용화될 것으로 기대되고 있다.

PAS 기반 후각센서는 사람의 코의 기능과 같이 실시간 연속적으로 가스성분을 분석할 수 있는 장점을 지니고 있기 때문에 가스를 초고감도로 실시간/연속적으로 분석하는 마약 탐지견 대체, 전자코, 화재 조기경보 센서, 질병 조기진단 호기센서 등 다양한 서비스에 활용도가 높을 것으로 기대된다.

4) 표면 플라즈몬 공명 센서

표면 플라즈몬(SPs)은 금속 매질의 표면에서 동일한 에너지와 운동량, 동일한 위상(in-phase)을 갖고 진동하는 전하 밀도의 양자화된 집단적 운동이다[16, 17].

표면 플라즈몬의 운동량은 주어진 에너지에 대해 금속 매질과 이에 접하는 유전 매질(Dielectric media)의 굴절률과 흡수 특성, 즉 매질의 유전함수(Dielectric function)에 따라 달라진다. 만일 국소적으로 금속 매질의 계면에 접한 유전 매질의 굴절률

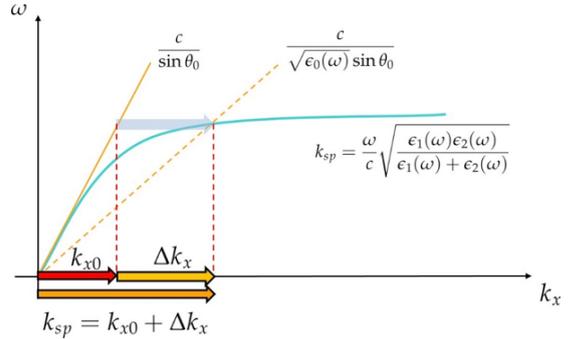


그림 5 표면 플라즈몬과 입사광의 분산 관계 (Dispersion relations)

혹은 두께의 변화가 있다면 표면 플라즈몬의 운동량도 이에 따라 변화하게 된다.

외부로부터 주어지는 에너지원(Energy source)에 대해 특정 조건에서 표면 플라즈몬이 이를 공명 흡수하는 경우가 생겨나는데, 이를 표면 플라즈몬 공명(SPR) 흡수라고 한다. 조사되는 광원(Light source)의 파장이나 입사 각도를 조절하여 국소적으로 변화된 굴절률에 따른 공명 조건을 유지할 수 있는데, 금속 매질과 접해있는 유전 매질(기체, 액체 등)의 국소적인 굴절률 변화를 광원의 입사 조건, 즉 입사 각도나 파장에 따른 함수로 알아내는 조건을 찾는 것이 표면 플라즈몬 공명 센서의 기본적인 원리이다(그림 5).

표면 플라즈몬 공명을 센서로 이용할 때 국소적인 굴절률의 변화를 보기 위한 방법은 ① 주어진 파장에서 입사 각도를 조절하는 방법, ② 입사 각도를 고정하고 다색 광원을 사용하여 파장의 변화를 보는 방법, ③ 입사광의 파장과 입사 광원을 고정하고, 2차원 면 광원을 조사하여 반사율의 변화를 공간적으로 표현하는 방법(표면 플라즈몬 공명 이미징) 등이 있다. 그리고 이 방법마다 센서를 구성하는 각 매질의 유전 특성(Dielectric property)과 그 구조에 따라 센서의 성능 지수(FOM)가 달라진다. 따라서 센서를 구성하는 금속의 종류와 박막의

표 2 PAS 기반 후각센서 동향 분석

기관	GAS	감도	특징
Helsinki Univ. ^[11]	SF ₆ , HF	0.7 ppt	증적외선
Aerodyne Research ^[12]	NO	30 ppt	증적외선
GASERA ^[13]	-	sub ppb	적외선 (Product)
IPM ^[14]	CO ₂	<100ppm	Compact (~cm ³)
MTEC PA ^[15]	-	-	sensor head

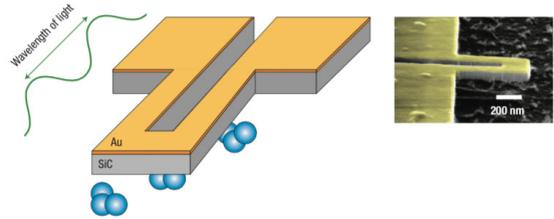
두께, 그리고 입사 광원의 파장과 입사 각도 등 필요한 파라미터를 적절히 선택하여 센서 시스템을 구성하는 것이 매우 중요한 요소가 될 것이다.

SPR 현상을 센서로 사용할 것을 처음 제안한 것은 스웨덴 Linköping 대학 그룹이 마취제 halothane의 농도를 측정하는 것이 처음이다[18]. 그 이후로 SPR 센서는 그의 비표지식 특성과 분자 사이의 흡착, 탈착을 실시간으로 관찰할 수 있는 특성 때문에 표면에서 분자들 간의 친화도(Affinity)를 정량적으로 측정할 수 있는 도구로 사용될 뿐 아니라, 기체 시료를 포함한 화학센서나 DNA 칩, 단백질 칩 등 다양한 바이오센서로의 응용 연구와 제품 개발이 활발히 이루어지고 있다[19].

5) 마이크로 캔틸레버 센서

마이크로 캔틸레버 센서는 단일 가스분자를 검출할 수 있는 민감도를 가질 수 있기 때문에 저농도의 가스분자를 감지할 수 있는 후각센서를 개발하기 위하여 활발히 기술 개발이 이루어지고 있다. 시료(공기, 음식, 호흡 가스 등) 내 가스분자가 마이크로 캔틸레버 표면에 흡착하면 마이크로 캔틸레버 무게 변화에 따라 진동 공진 주파수가 변화하는 원리를 이용하여 가스분자를 감지한다(그림 6). 또한, 특정 가스분자에 결합하는 항체 분자로 마이크로 캔틸레버를 코팅하면 분석하고자 하는 가스분자를 분석할 수 있어서 우수한 선택성을 얻을 수 있다.

최근에 미국 Oak Ridge 국립연구소의 Thundat 그룹에서 정적(Static) 마이크로 캔틸레버를 이용하여 폭발성 화학 물질인 TNT를 고감도로 검출한 연구 결과를 보고하였다[20]. 이 연구에서는 압전 마이크로 캔틸레버를 이용하여 TNT를 비표지(Label-free) 방식으로 감지에 성공하였다. 감지 원리는 TNT 물질이 압전 마이크로 캔틸레버에 흡착될 때 표면 장력에 의해 유도되는 압전 마이크로 캔틸



출처 Reprinted by permission with Nature, J. Mamin, "Small strains, big gains," *Nature Nanotechnol.*, vol. 2, 2007, pp. 81-82.

그림 6 마이크로 캔틸레버 센서 동작원리 설명 및 구조 예

레버의 처짐(Deflection) 변화를 측정하는 방식으로 비표지 검출을 하였다.

최근에 이론적으로 동적(Dynamic) 마이크로 캔틸레버를 이용하는 방식이 정적 마이크로 캔틸레버를 이용한 방식보다 더 민감하게 비표지 방식으로 가스분자 감지가 가능하다는 연구 결과가 발표되었다[21-22]. 미국 칼텍(Caltech)의 Roukes 그룹에서 SPM과 금속 박막을 마이크로 캔틸레버 표면에 코팅한 동적 압전 마이크로 캔틸레버 트랜스듀서[20]를 이용하여 difluoroethane 분자를 atto(10⁻¹⁸) 그램 정도의 민감도로 검출한 결과를 발표하였다[21].

앞서 간략하게 살펴본 바와 같이, 현재까지 다양한 감지 방식의 후각센서에 대한 기술 개발이 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그러나 현재까지 후각센서의 단점인 감도, 선택성, 재현성 및 신뢰성을 더욱 높여야 할 필요성이 존재한다. 따라서 이러한 단점들을 극복하기 위하여 향후 센서 간 융합 기술 개발에 주력한다면 의료/환경/식품/안전 등의 분야에 큰 기여 및 새로운 신시장 개척이 가능할 것으로 기대된다.

다. 후각센서의 응용

1) 의료진단 분야

인체에서 유래하는 유기 화합물은 인간의 질병

을 진단하는 데 도움을 주는 지표가 된다. 그리고 체취, 객담(Sputum), 소변, 땀, 날숨(Breath) 등은 이러한 유기 화합물을 분석하는 데 필요한 냄새(Odor)의 근원이다.

서로 다른 물리-화학적 특성을 갖는 전도성 고분자 화합물을 이용하여 기체분자의 종류와 농도에 따라 변화하는 전기전도도의 채널별 패턴을 분석하거나 직접 후각 수용체를 각 채널에 고정화하여 기체분자에 대한 특이성을 부여하는 등의 다양한 방법을 이용한다. 이러한 후각센서는 확보된 반도체 및 미세전자기계시스템공학(MEMS)의 공정 방법을 이용하므로 소형화, 집적화가 가능하며, 생산 단가도 낮출 수 있는 장점이 있다. 또한, 딥러닝(Deep learning)과 같은 고도의 인공지능 분석 방법은 앞으로 다채널 센서의 신호분석과 결과 예측의 정확도를 더욱더 향상시킬 수 있는 좋은 도구로서 주목받고 있다[23,24].

2) 환경 분야

화학 오염물질을 포함한 유기, 무기 기체물질은 저렴하고 사용이 간편하며, 휴대성 좋은 후각센서를 이용하여 지속적인 모니터링이 가능하다.

이는 특히 실시간 연속 측정 및 센서 네트워크 시스템이 필요한 대기 오염, 해수 오염, 화재, 하수 오염, 공항과 항만에서의 화학적 오염, 산업시설의 독성 물질 누출, 배기가스, 광산, 실내 공기 질 감시 등 다양한 분야에의 적용이 가능하며, 이때문에 다채널, 소형화 및 경량화, 낮은 제조단가, 센서 네트워킹이 가능한 후각센서의 환경 분야에의 응용이 확대되고 있다[25].

3) 사회안전 분야

폭발물이나 화학전작용제(CWAs)와 같은 위협물

테러와 특히 인종, 종교, 국가 간의 갈등이 심화하고 있는 현재 상황에 비추어 매우 중요한 사회적·범국가적 과제가 되었다.

특히 공공장소에서 불특정 다수에게 가해지는 예측할 수 없는 화학제를 이용한 공격이나 드론을 이용한 폭발물 투척, 공항, 항만을 통한 점증하는 마약류의 유입과 같이 공공의 안녕과 질서를 위협하는 반사회적 시도는 그 원점에서부터 철저히 감시할 수 있는 상시 감시체제를 요구하고 있다.

그러나 이에 대한 인공 후각센서의 응용은 아직 미미한 편이다. 이는 대부분 상기 화학전작용제에 대한 특이성, 재현성, 안정성이 부족하여 개별 시료에 국한된 형태로 연구 개발되고 있기 때문이다. 다만 근래 들어 테라헤르츠 분광법(THz spectroscopy)이 특정 주파수 대역(0.1~2.8THz)에서 폭발물에 대해 특이적인 흡수도를 갖는 것이 알려지면서 이 분석법에 기초한 센서 시스템을 소형화, 다채널화하려는 연구가 진행되고 있다[26].

III. 지능형 후각센서의 기술현황

1. 지능형 후각센서 개요

가. 지능형 후각센서의 정의

지능형 후각센서는 다수의 독립적인 채널로 이루어진 가스센서 어레이와 인공지능의 융합으로서, 냄새를 감지하고, 이의 종류와 농도를 정량적으로 측정할 수 있는 전자코(e-nose) 시스템이다. 지능형 후각센서는 ① 시료 전 처리부, ② 다채널 감지부, ③ 신호 처리부로 이루어져 있고, 이는 근본적으로 인간의 후각 감각을 본뜬 것이라 할 수 있다(그림 7).

나. 지능형 후각센서의 특징

지능형 후각지능은 인간의 후각 기능을 모방하

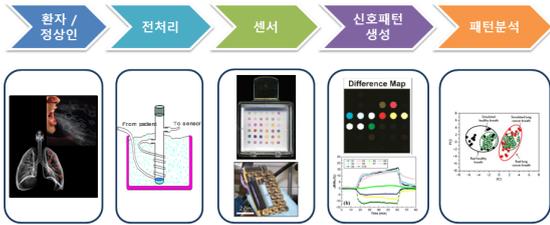


그림 7 지능형 후각센서의 동작 흐름도

여 제작되는 전자적 장치로서, 냄새 구별을 위한 지능형 화학센서 어레이 시스템이다. 1983년 영국 Warwick 대학교에 퍼사우드 등에 의해 센서어레이와 신호처리 기술을 이용하는 전자 후각의 개념이 소개되면서, 냄새 인식 기능의 실현을 위한 연구가 유럽, 미국 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 기존의 분석시스템보다 저렴하면서도 빠르고 정확하게 냄새를 인식할 수 있는 장점이 있다. 기존에는 음식 관리, 주류 관리 등에서 최근에는 보안 및 질병 관리 분야를 위한 고성능 지능형 후각센서의 수요가 증가되고 있다. 국내에서는 1990년대 초반부터 경북대와 LG 전자기술원에서 전자코에 대한 연구가 진행되어왔고, 최근에는 ETRI, KAIST, 서울대, 고려대 등 여러 기관이 후각센서 및 후각 지능에 관한 연구를 진행 중이다. 후각센서는 정확성, 정밀성, 신뢰성과 선택성 측면에서 몇 가지 개선되어야 할 요소들이 있다. 이는 적절한 센서 어레이와 적절한 인공지능의 조합을 활용하여 극복할 수 있다. 지능형 후각센서의 가스 식별 알고리즘은 전처리 모듈 및 분류 절차를 포함할 수 있다. 각 센서에서 측정된 신호의 전처리 모듈 역할은 백그라운드에서 관심 패턴을 분할하고, 노이즈를 제거하고, 패턴을 표준화하고, 패턴의 압축된 표현을 정의하는 모든 작업을 포함한다. 데이터 전처리 단계는 전체 패턴 분석 성능을 향상시키는 방식으로 작용한다. 최근에는 나노센서 어레이 기술을 기반으로 한 폐암 등 질환 조기

진단, 극미량의 마약 검색, 화생방 화학물질 검색 등 그 응용 분야에서 실증 실험 결과에 대한 연구 보고들이 점점 더 증가하고 있다[24,25].

2. 지능형 후각센서의 핵심기술 및 발전 방향

1) 인공지능 기반의 패턴인식 기술

가스혼합물 자료의 다변량 분석은 센서어레이 자료의 분석에 필요하다. 주성분 분석법(PCA)상의 플롯에서 동일 샘플 집단 간의 시각적 구별을 위해 많이 이용되는 분석방법이다. PCA 상의 플롯은 자료의 이차원적인 그림인데, 여기에서 자료의 최대 분산치가 포함된다. 그리고 지능형 후각센서는 전처리된 데이터들을 이용하여 인공지능(AI) 기계학습(ML)을 활용한 진화된 데이터 처리 기법들을 통해 구현될 수 있다. 주로 측정치의 공간과 분류 요소 간의 함수적 관계를 설정하기 위하여, 지도(Supervised) 학습 방법이 사용된다. 지난 수십 년 동안 많은 학습 방법이 개발되었는데, 예를 들면 그림 8과 같이 최소자승회귀법(PLS), 지지벡터머신(SVM), 인공신경망(ANN), 결정트리(DT),

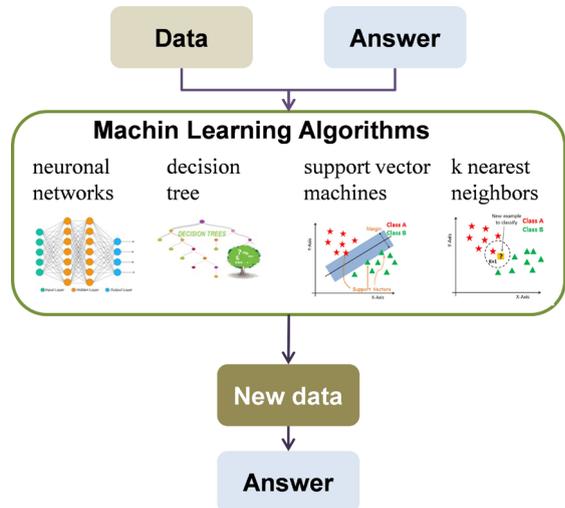


그림 8 지능형 후각센서에 사용되는 기계학습법들

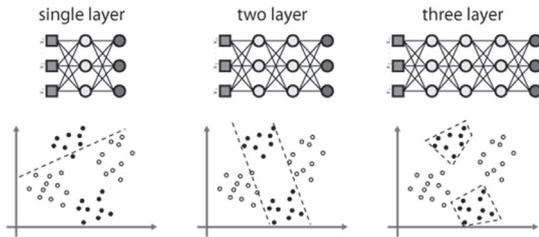


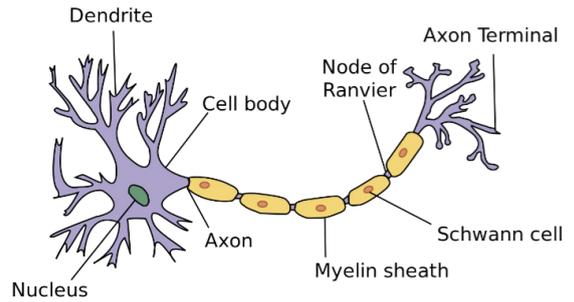
그림 9 다층 신경 네트워크(MNN)의 분류 능력 개념도

K최근접이웃(KNN) 등이다. 그 중에서 다층 퍼셉트론(MLPs)과 같은 신경망이 많이 사용되었다. 최근 심층 학습(딥러닝[deep learning], 딥신경망[DNN]) 기계 학습은 현재 인공지능(AI)의 가장 보편적인 응용 프로그램이며, 데이터의 패턴을 자동으로 감지하고 발견되지 않은 패턴을 사용하여 미래의 데이터를 예측하거나 분류하여 데이터를 수집하거나 적합한 데이터로부터 정보를 추출하여 새로운 지식을 도출할 수 있게 되었다[2,27].

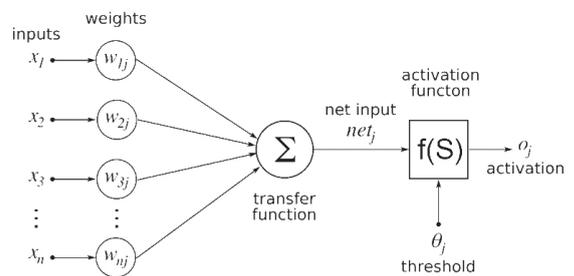
다양한 머신 러닝 알고리즘 중에 한 예로서, 다층신경네트워크(MNN)를 기반으로 하는 지능형 후각센서를 소개한다. 파라미터를 갱신하기 위해서는 오류역전파(EBP) 알고리즘이 주로 사용되었다. 이는 단순히 신경네트워크에서 어떤 함수의 극소점을 찾기 위해 gradient 반대방향으로 이동해 가는 방법인 gradient descent 방법을 체인룰(Chain rule)을 사용하여 단순화시킨 방법을 주로 사용한다.

만약 세 계층의 신경네트워크로 구성된 오류역전파를 가정한다면, 보통 신경망은 입력층 i, 숨겨진 층 j 및 출력층 k의 3개의 층으로 구성된다. 입력 데이터 X_i , $i = 1, 2, \dots, I$ 를 입력층에 적용하면 출력 레이어에서 출력 O_k 를 얻을 수 있다.

이 O_k 는 미리 지정된 값인 d_k 와 비교된다. 에러 $e_k = d_k - O_k$ 가 발생하면, 에러 역전파 알고리즘에 기초하여 에러가 작아지도록 가중 계수 W_{ij} , W_{kj} 가 보정되는 원리이다. 그림 9에서 보듯이 숨겨진 층



출처 Dhp1080 [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>)]



출처 Geetika saini [CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)]

Types of activation function

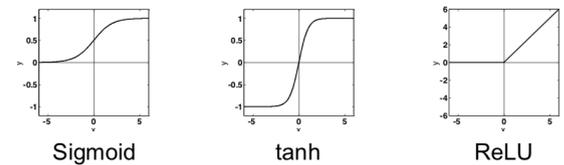


그림 10 딥러닝 알고리즘 개념도 및 활성화 함수들

수가 증가할수록 분류 능력이 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 특성 냄새 벡터를 분류하려는 목적으로 냄새의 변화를 줄이기 위해 일반적인 특징 벡터에 변동 계수를 추가하고 특징 벡터에 대해 원하는 출력을 할당하면, 트레이닝 데이터 세트의 반복 데이터 중 첫 번째 샘플 데이터를 추출하고, 트레이닝 데이터 세트로서 제2샘플 데이터가 선택되고, 트레이닝 데이터로서 제3샘플 데이터가 선택되고 조정되는 식으로 연산을 수행하면 특성 냄새에 대한 정확한 결과를 얻을 수 있다[25,28].

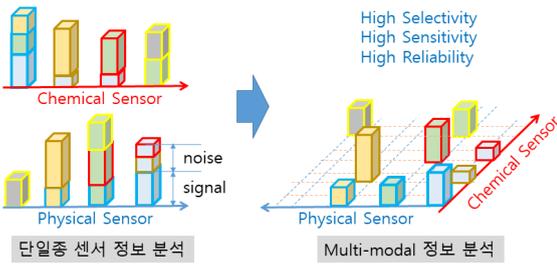


그림 11 멀티모달 분석 기술 개념도

딥러닝에 대해서도 좀 더 살펴보면, 머신 러닝의 한 갈래이며, 신경망을 기반한 기계학습을 통해 이루어진다. 신경망은 그림 10과 같이 기본적으로 생물학에서 영감을 얻어 신경세포에 연결된 축삭돌기들의 큰 단위체를 가진 생물학적 뇌가 문제를 해결하는 방식을 따른 것이다. 신경망의 과적합(overfitting) 문제가 Drop-out이라는 개념이 도입되면서 정확도가 크게 증가하면서 딥러닝 기술이 새롭게 부각되었다. 이는 GPU 하드웨어 발전으로 연산 성능 및 연산 시간이 크게 단축되었다. 그리고 빅데이터, 즉 충분히 많은 데이터를 가지고 아주 빠른 반복 학습을 통해 올바른 결론을 도출할 수 있어 정확성이 크게 강화되었다는 점이다. 최근에는 콘볼루션 신경망(CNN) 기반의 딥러닝 알고리즘이 뛰어난 성능을 발휘하고 있어, 컴퓨터 비전 등의 분야에서 탁월한 성능을 보이고 있다. 특히 ReLU 활성화 함수(activation function)가 새로이 도입함으로써 딥러닝의 성능이 더욱 향상되었다. 빅데이터 기반의 고성능이 요구되는 의료, 환경, 안전 분야에 적용될 수는 지능형 후각센서의 성공적 구현을 위해서 필히 요구될 것으로 예상된다[25,29]. 최근에는 지능형 후각센서에 딥러닝을 적용한 연구가 일부 보고되기 시작하였다[30].

2) 멀티모달 분석 기술

특정 가스의 농도를 정밀/정확하게 분석하기 위

해서는 다른 가스성분에 의한 영향을 최소화해야 한다. 후각센서 기술로는 금속산화물 센서, 질량 분석, 표면흡착식 센서, 이온반응, 광음향분광 등 다양한 센서들이 개발되고 있다. 각각의 센서들은 분석하고자 하는 가스성분 외 다른 가스에 의한 영향을 최소화하기 위한 기술들이 개발되고 있지만, 동일한 물리적 특성(질량, 흡광도 등), 동일한 화학적 특성(흡착도, 반응 등)을 갖는 가스들이 존재할 수 있다. 따라서 화학적 특성 또는 물리적 특성이 동일한 가스성분들은 화학센서 또는 물리센서만으로는 성분을 분리할 수 없기 때문에 여러 종의 화학센서 또는 물리센서 기반으로 가스를 분석하게 되면 측정 오차가 발생하여 측정감도 및 신뢰도를 보장할 수 없다.

만약, 화학적 특성을 분석하는 센서와 물리적 특성을 분석하는 센서 등의 이종(異種) 멀티모달(MM) 센서의 측정정보를 동시에 분석하게 되면 동일한 종류의 센서방식에서 분리할 수 없는 가스성분을 분리할 수 있기 때문에 가스 분석 특이도를 향상시킬 수 있게 된다(그림 11). 패턴인식 기반의 센서에서 제공되는 다양한 측정 정보 및 인공지능 기술을 활용한 멀티모달 정보 분석을 이용하면 초저농도(ppb 이하) 가스를 정확하게 분석할 수 있다. 후각센서 기술은 측정 감도, 정확도, 신뢰도를 향상시킬 수 있는 패턴인식, 인공지능, 멀티모달 분석 기술을 활용한 후각지능으로 발전할 것으로 예상되며, ICT 서비스의 성능 개선뿐만 아니라 정밀 의료/조기진단/조기경보 등의 새로운 기능을 제공하는 미래기술로 발전할 것으로 기대된다.

IV. 결론

지능형 후각센서 기술은 이제까지 불가능하였던 의료, 환경 및 안전 분야에서 미래 신산업과 신서

비스를 창출해 낼 공통응용 혁신(Cross-cutting) 기술로 부각되고 있다. 특히 최근에 의료 분야에서 지능형 후각센서를 이용한 질병 조기 모니터링을 위한 기존 의료기기와의 임상 동등성 및 유효성 평가가 보고되는 등 그 가능성이 보여주고 있다[31-32]. 그러므로 이 기술의 성공적인 구현을 위해서는 고감도, 고선택성, 고신뢰성을 제고할 수 있는 멀티모달 센서들과 빅데이터를 적용한 고성능 기계 학습이 융합되는 새로운 기술 개발이 반드시 필요하다.

용어해설

VOCs (Volatile Organic Compounds) 휘발성 유기화합물, 분자량이 적고 후각 지능에서 냄새의 원인으로 주로 생각되는 물질임

MOS (Metal Oxide Semiconductor) 센서 금속산화물 중에서 반도체적인 전기 특성을 가진 소재를 이용하여, 가스분자와의 표면 결합으로 인한 전기전도도와 같은 전기적 특성이 변화되는 특성을 이용하여 제작된 센서

PAS (Photo-Acoustic Spectroscopy) 센서 레이저 펄스를 가스에 비추면 가스에서 열팽창/수축이 반복적으로 발생하면서 음파가 발생함. 입사되는 빛의 파장을 바꾸어 가면서 발생하는 음파의 크기 변화 특성을 분석하게 되면 다양한 가스성분별로 농도를 측정하는 센서

SPR (Surface Plasmon Resonance) 센서 비표지식 특성과 분자 사이의 흡착, 탈착을 실시간으로 관찰할 수 있는 특성 때문에 표면에 분자들 간의 친화도(Affinity)를 기체 및 바이오 시료를 정량적으로 측정할 수 센서

Deep learning 여러 비선형 변환기법의 조합을 통해 높은 수준의 추상화(abstractions, 다량의 데이터나 복잡한 자료들 속에서 핵심적인 내용 또는 기능을 요약하는 작업)를 시도하는 기계학습 알고리즘의 집합이며, 기계학습의 한 분야

Convolutional Neural Network 심층신경망의 한 종류로 하나 또는 여러 개의 컨볼루션 계층(convolutional layer)과 통합 계층(pooling layer), 완전하게 연결된 계층(fully connected layer)들로 구성된 신경망, 일종의 전처리부가 추가된 다층퍼셉트론임

CNN	Convolutional Neural Network
CO	Carbon Monoxide
CO ₂	Carbon Dioxide
CWAs	Chemical Warfare Agents
DNN	Deep Neural Network
DT	Decision Tree
EBP	Error Back-Propagation
E-nose	Electronic Nose
FLOPS	Floating Operations Per Second
FOM	Figure of Merit
FWHM	Full Width at Half Maximum
GC-MS	Gas Chromatography-Mass Spectroscopy
GPU	Graphics Processing Unit
HF	Hydrogen Fluoride
ICT	Information & Communication Technology
KNN	K Nearest Neighbors
MEMS	Micro-Electro Mechanical Systems
ML	Machine Learning
MLPs	Multi-Layer Perceptron
MM	Multi-Modal
MNN	Multilayer Neural Network
MOS	Metal Oxide Semiconductor
NO	Nitrogen Oxide
PAS	Photo-Acoustic Spectroscopy
PLS	Partial Least-Square
PPB	Part Per Billion
PPM	Part Per Million
PPT	Part Per Trillion
QCM	Quartz Crystal Microbalance
ReLU	Rectified Linear Units
SAW	Surface Acoustic Wave
SF ₆	Sulfur HexaFluoride

약어 정리

AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Network
AutoMC	Automated Model Compression

SPM	Scanning Probe Microscope
SPR	Surface Plasmon Resonance
SnO ₂	Tin Oxide
SVM	Supporting Vector Machine
TiO ₂	Titanium Oxide
TIR	Total Internal Reflection
TNT	Trinitrotoluene
VOCs	Volatile Organic Compounds
ZnO	Zinc Oxide

참고문헌

- [1] 손영목, "신가스센서의 개발과 센서재료의 최근 개발동향," 기술 뉴스브리프, KISTI, 2004. 01.
- [2] D.-S. Lee, "전자코와 혀의 소재 및 응용 분야에 관한 분석," KOSEN Expert Review, 2004.
- [3] K. Persaud et al., "Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model," *Nature*, vol. 299, 1982, pp. 352-355.
- [4] K. Arshak et al., "A review of gas sensors employed in electronic nose applications," *Sensor Review*, vol. 24, no. 2, 2004, pp. 181-198.
- [5] D.-D. Lee et al., "Environmental Gas Sensors," *IEEE Sensors J.*, vol. 1, no. 3, 2001, pp. 214-224.
- [6] A. Dey, "Semiconductor metal oxide gas sensors: A review," *Materials Sci. Eng. B*, vol. 229, 2018, pp. 206-217.
- [7] M.E. Franke, "Metal and Metal oxide nanoparticles in Chemiresistors: Does the Nanoscale Matter?," *Nano Micro Small*, vol. 2, no. 1, 2006, pp. 36-50.
- [8] S. J. Patil et al., "Semiconductor metal oxide compounds based on gas sensors: A literature review," *Front. Mater. Sci.*, vol. 9, no. 1, 2015, pp. 14-37.
- [9] H. Bai et al., "Gas Sensors Based on Conducting Polymers," *Sensors*, vol. 7, 2007, pp. 267-307.
- [10] M. M. Kiaee et al., "Inkjet-printing polymer nanocomposite for detecting VOCs," *Euroensors*, vol. 2, no. 13, 2008, pp. 882:1-5.
- [11] T. Tomberg et al., "Sub-parts-per-trillion level sensitivity in trace gas detection by cantilever-enhanced photo-acoustic spectroscopy," *Scientific Reports*, vol. 8, 2018, pp. 1848:1-7.
- [12] D. Nelson et al., "Characterization of a near-room-temperature, continuous-wave quantum cascaded laser for long-term, unattended monitoring of nitric oxide in the atmosphere," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 13, 2006, pp. 2012-2014.
- [13] GASERA ONE, <https://www.gasera.fi/product/>
- [14] J. Huber et al., "Simulation model for the evaluation and design of miniaturized non-resonant photoacoustic gas sensors," *J. Sens. Sens. Syst.*, vol. 5, 2016, pp. 293-299.
- [15] Photoacoustic Spectroscopy Technology Overview, PAS, <http://www.mtecpas.com/technology.html>
- [16] H. Raether, "Surface Plasmons," Springer, 1988.
- [17] H.-B. Pyo et al., "Plasmonic Biosensor," *Biochip J.*, vol. 1, no. 4, 2007, pp. 281-287.
- [18] C. Nylander et al., "Gas detection by means of surface plasmon resonance," *Sens. Actuators*, vol. 3, 1982/83, pp. 79-88.
- [19] J. Homola (Ed.), "Surface Plasmon Resonance Based Sensors," Springer, 2006.
- [20] L. A. Pinnaduwaage et al., "A microsensor for trinitrotoluene vapour," *Nature*, vol. 425, no. 695, 2003, p. 474.
- [21] J. Mamin, "Small strains, big gains," *Nature Nanotechnol.*, vol. 2, 2007, pp. 81-82.
- [22] M. Li, H. X. Tang, M. L. Roukes, "Ultra-sensitive NEMS-based cantilevers for sensing, scanned probe and very high-frequency applications," *Nature Nanotechnol.*, vol. 2, 2007, pp. 114-120.
- [23] T. C. Pearce et al., "Handbook of Machine Olfaction," WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2003.
- [24] E.-H. Oh et al., "Recent advances in electronic and bioelectronic noses and their biomedical applications," *Enzyme Microbial Technol.*, vol. 48, no. 6-7, 2011, pp. 427-437.
- [25] J. Gutiérrez, M. C. Horrillo, "Advances in artificial olfaction: Sensors and applications," *Talanta*, vol. 124, 2014, pp. 95-105.
- [26] J. Chen et al., "Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1-2.8 THz," *Opt. Express*, vol. 15, no. 19, 2007, pp. 12060-12067.
- [27] A. P. F. Turner et al., "Electronic noses and disease diagnostics," *Nature Rev.*, vol. 2, 2004, pp. 161-166.
- [28] D.-S. Lee et al., "Recognition of volatile organic compounds using SnO₂ sensor array and pattern recognition analysis," *Sens. Actuators B*, vol. 77, no. 1-2, 2001, pp. 228-236.
- [29] wikipedia, "답러닝," <https://ko.wikipedia.org/wiki/답러닝>
- [30] P. Peng et al., "Gas classification using deep convolutional neural networks," *Sens.*, vol. 18, no. 1, 2018, pp. 157:1-11.
- [31] X. Sun et al., "Detection of volatile organic compounds (VOCs) from exhaled breath as noninvasive methods for cancer diagnosis," *Analytical Bioanalytical Chemistry*, vol. 408, no. 11, 2016, pp. 2759-2780.
- [32] J. E. Chang et al., "Analysis of volatile organic compounds in exhaled breath for lung cancer diagnosis using a sensor system," *Sens. Actuators B: Chemical*, vol. 255, 2018, pp. 800-807.