

IT 융합 기술 기반 환경모니터링을 위한 가스 센서 기술

박종혁 | 전용일 | 이유경

한국전자통신연구원

요약

본 논문에서는 글로벌 시대에 갈수록 강화되는 환경규제와 더불어 전산업 분야에 영향을 미칠 수 있는 에너지·환경 이슈를 해결하기 위하여 현재 첨단 IT 기술을 기반으로 하여 환경을 모니터링할 수 있는 센서 기술들을 살펴보고, 다양한 센서 기술들 중에서 향후 IT 융합 기반 센서 기술이 지향할 바를 모색하고자 한다.

1. 서론

2008년 세계 환경규제의 화두는 '3R(Recycle, Reuse, Reduce)' 과 온실가스 감축이 될 전망이다. 반덤핑관세와 같은 수입규제 조치 또한 계속해서 전지역, 전산업으로 확산될 것으로 전망되며, 환경규제가 유럽과 미국 등의 선진국들이 주로 활용하는 수단이라는 인식은 이미 오래되었지만, 중국을 선두로 해서 선진국의 조치를 모방한, 개도국 역시 환경규제 도입을 본격화하고 있다. 국제환경협약에 의거하여 취해지는 개별 국가의 환경규제가 늘어나고 있고, 현재 발효중인 국제환경협약은 220개가 넘는데, 이중 몬트리올의정서, 기후변화 협약, 교토의정서 등과 같은 28개 협약이 무역규제 조치를 포함한 협약이다.

최근 한국IT서비스산업협회에서 발간한 "2008년 IT서비스 산업시장 및 기술 전망 보고서"에 따르면 IT시장 7대 트렌드 중 하나로 친환경 그린IT가 선정될 정도로 IT시장에서의 그

린IT의 중요성이 더욱 부각되고 있는 실정이다. 이와 관련 현재 우리나라는 교토의정서상 비부속서 국가로 구속적인 온실가스 의무 감축 대상국가는 아니지만 우리나라는 현재 경제협력개발기구(OECD) 회원국임과 동시에, 이산화탄소 배출량 세계 10위, OECD내 온실가스 배출량 증가율 1위를 기록하고 있는 나라임을 감안할 때 2012년 이후 포스트 교토체제 논의와 관련 우리나라는 향후 의무부담 등 논의에서 자유롭지는 않을 것이라는 전망이 보다 설득력이 있는 것으로 평가된다.

따라서 만약 우리가 2013년 이후 의무부담 국가 그룹에 속하게 된다면 기준년도 및 온실가스 배출감축 의무부담 정도에 따라 우리경제와 제반 산업에 심대한 영향을 미칠 가능성을 배제할 수 없다.

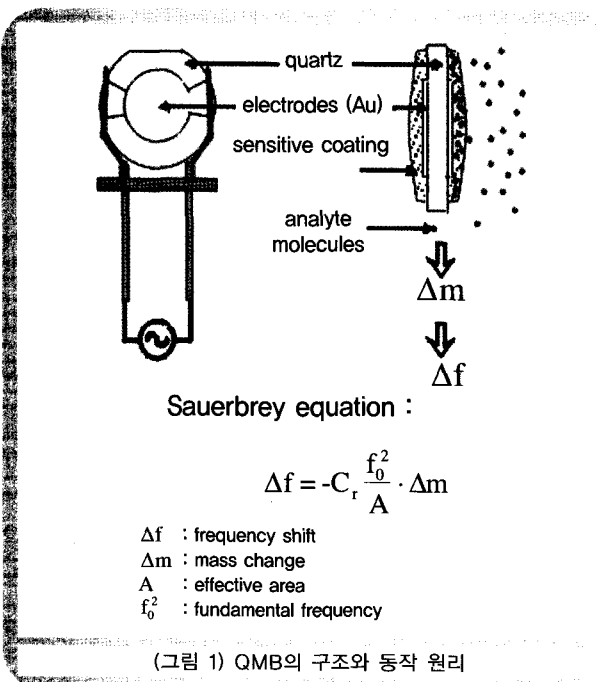
게다가 최근 지구온난화의 주범으로 밝혀진 온실 가스의 주요 발생원인 화석원료 중에서 석유 가격의 급등으로 에너지에 대한 위기감이 높아지고 있다. 대체에너지에 대한 연구가 활발해지고 이와 동시에 에너지 사용을 최소화하기 위한 노력이 다양하게 시도되고 있다.

향후 IT기술을 응용하여 에너지·환경 이슈를 해결하기 위해서는 에너지 절약 및 친환경 소재/공정 기술을 적용한 Green IT기술이 핵심 기술로 부상할 것으로 예상되며, 첨단 IT 기반 기술을 적용한 센서 네트워크가 사회 및 산업 전반에 활용되어 실시간으로 환경을 모니터링하고자 하는 요구가 그 어느 때보다 절실할 것으로 판단된다. 이를 실현하기 위해서는 핵심 센서 기술 개발이 급선무이며, 현재 개발되고 있는 다양한 센서들 중 환경오염과 직결된 화학센서 특히 가스 센서 기술들을 살펴보고 향후 이들 센서 기술 개발

방향을 모색하고자 한다.

II. 가스센서의 기술 동향

실내의 환경 오염 물질을 실시간으로 감지하여 감지 물질의 종류와 양을 분석하기 위한 가스 센서 기술들은 크게 다음과 같다.

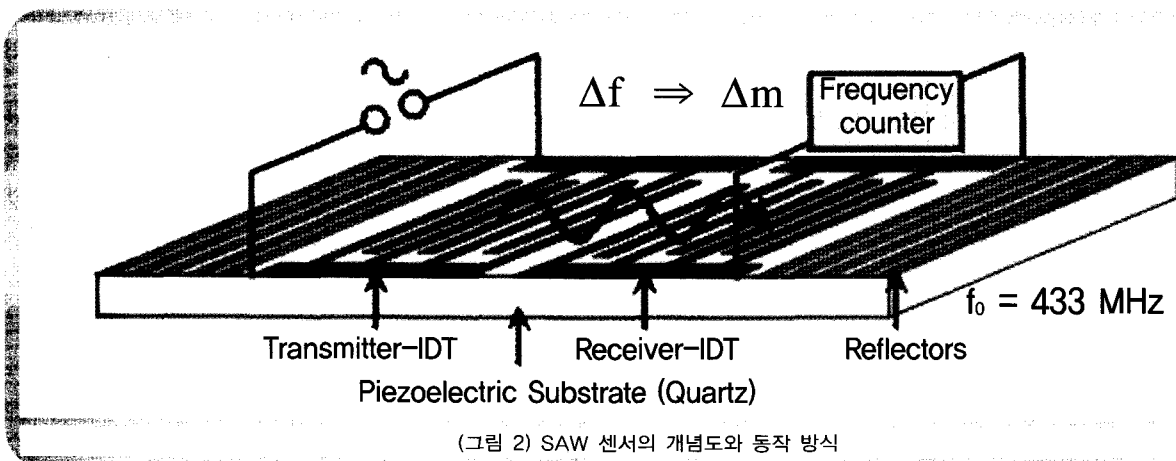


1. Bulk Acoustic Wave Sensor (BAW)

BAW 센서(Thickness Shear Mode Resonator : TSMR)은 질량 차이를 감지하는 Quartz Micro-Balance (QMB)의 일종이다. 다중 센서 시스템에서 가장 많이 사용되는 방식으로, VOCmeter 시리즈나 휴대형 VOCcheck에 적용되고 있다. 특정 물질을 감지하는 선택성이나 감도는 다양한 폴리머(EC, PEUT, siloxane 등)와 감지 물질과의 반응성에 따라 선택하여 구현하며, 적합한 폴리머의 종류에 따라 다양한 응용 분야에 활용된다.

단결정의 피에조 쿼츠 기판을 특정 결정 방향으로 자르고, 양쪽에 얇은 금 전극을 형성한다. 그리고, 스프레이 코팅이나 Langmuir-Blodgett, 자기 조립 박막 (Self-Assembled Monolayer : SAM) 방식으로 QMB의 양쪽에 고분자 박막을 증착한다. 측정시에 전극에 특정 주파수의 교류 신호를 가하면, 표면에 흡착된 감지 물질의 양에 따라 주파수 변화를 감지하는 방식으로 구동된다. 이 때, 가해지는 신호의 주파수는 약 10 ~ 30 MHz 범위에서 피에조 물질, 결정 방향, 기판의 두께 등에 따라 결정된다.

진동 주파수는 Sauerbrey 등식에 의하면 가스 상태의 감지 물질이 흡착되면서 고분자 층에서 발생하는 질량 변화에 따라 선형적으로 변화한다. 진동 피드백 제어 회로에서의 공진 주파수의 변화가 바로 센서 신호가 되며, 선형 특성은 상당히 넓은 밀도 범위에서 유효하다. 주파수가 클수록 센서 신호가 커지는데, 최대 주파수는 기판의 최소 두께에 의해 제한된다. QMB 센서는 신호가 온도에 의존하여 상온이나 이보다 약간 높은 온도 범위에서 온도가 제어된 환경에서



구동된다. 온도가 낮을수록 흡탈착 반응이 느려지지만, 높은 온도에서는 오히려 흡착된 분자의 양이 줄어든다. 대체로 QMB 센서는 10 ppm 이상 농도의 가스 상태의 감지 물질을 검출하는 용도로 활용되는데, 높은 신호의 안정성과 상온에서의 구동, 비파괴적 특성 및 대량 생산 가능성이 장점으로 꼽히는 반면, 상대적으로 크기가 크고 센서의 단가가 높다는 점이 단점이다. QMB는 상대적으로 습도에 대해 안정성을 보이는 반면, MOSFET이나 MOS 센서에 비하여 높은 농도 범위에 사용이 가능하다.

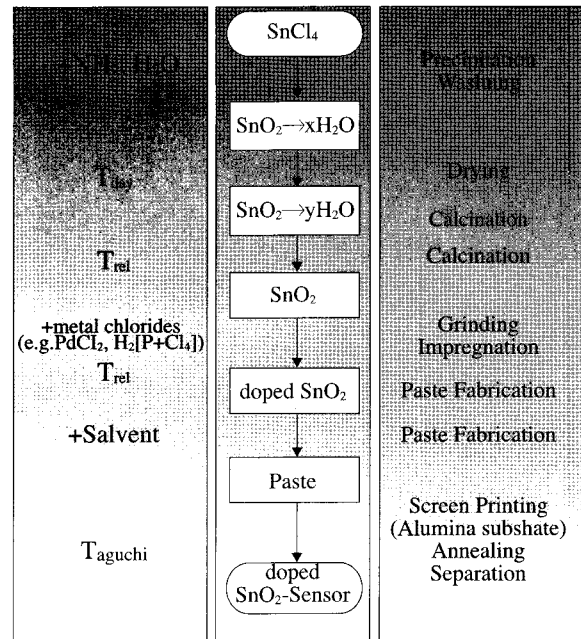
2. Surface Acoustic Wave Sensor (SAW)

SAW 센서는 질량 변화에 따른 주파수 변화를 감지하는 QMB 센서와 유사한 동작 원리를 가지는데, 600MHz 정도의 높은 주파수의 표면탄성파를 사용한다.

SAW 센서는 매끈한 피에조 기관 위에 형성된 두 개의 얇은 금속 IDT(interdigital transducer) 전극으로 구성되는데, 이들은 지연선만큼 떨어져 있거나 반사구조체로 둘러싸여 중앙에 위치한 구조를 가지고 있다. IDT 전극의 간격이 주파수를 결정하는데, 한쪽 IDT에 가해지는 교류 신호가 표면의 수축 및 이완을 유도한다. 이러한 변형은 표면 탄성파(Rayleigh wave)를 일으키고, 기관을 따라 이동한다. 반대쪽 수신 IDT는 주파수 측정기에 연결되어 감지되는 신호의 주파수 변화를 감지한다. 많은 경우에 이중 SAW 구조가 사용되는데, 센서 신호는 코팅되지 않은 SAW로부터의 기준 신호와 합쳐져 노이즈 및 온도 효과를 최소화하며, 관측 주파수 또한 낮추는 효과를 준다.

표면 탄성파의 주파수는 표면의 물리적 특성에 의해 결정되는데, 지연선 구조(delay line set-up)의 경우 IDT 사이의 기관이 얇은 고분자막으로 덮히거나 아니면 IDT 자체가 코팅되어 있다. 종종 기관 자체가 감지막으로 작용하는 경우도 있다. 가스 흡착은 감지층의 물리적 특성을 변화시키고, 표면 탄성파의 전파를 간섭한다. 실제로 표면 탄성파에 영향을 주는 다수의 변수로 인해 SAW는 질량에만 반응하는 구조가 아니다. 온도나 압력 뿐만 아니라 고분자막의 유전율 및 점성의 변화에 의해 영향을 받는다.

주파수와 질량 부하와의 상관 관계는 처음 Wohltjen에 의해 규명되었고, 온도, 압력, 점도나 유전율 등의 다른 변수에 의한 영향을 무시할 수 있는 경우 Sauerbrey 등식으로 주어



(그림 3) 대표적 SnO₂ 센서 물질의 제조 과정

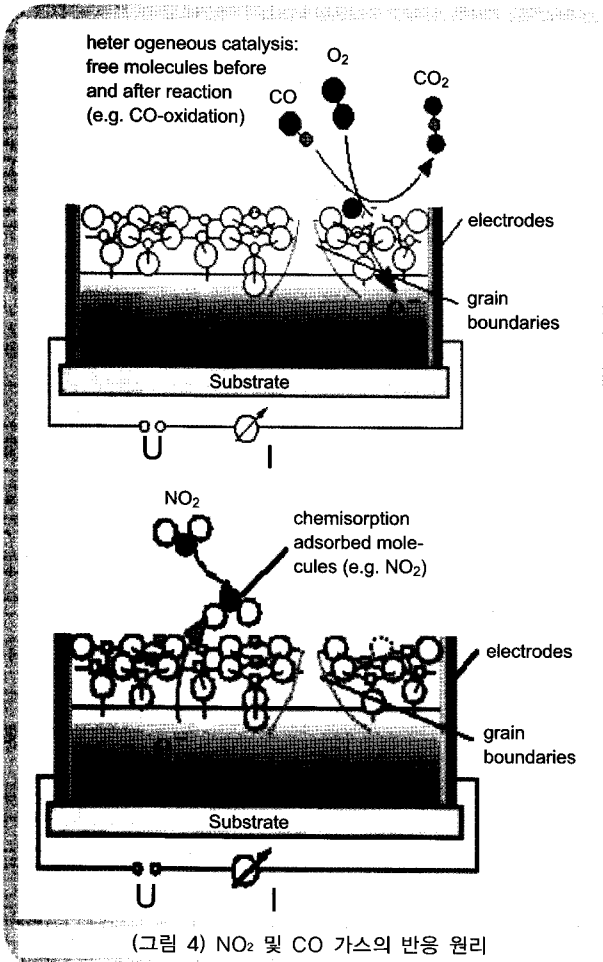
지게 된다.

이론상 SAW는 고감도 특성을 가질 수 있으나, 노이즈 효과도 또한 커진다. 게다가 SAW 구조는 QMB보다 훨씬 얇은 감지막을 증착하여야 하는데, 이에 따라 감지물질의 흡착량도 줄어든다. 그러나, QMB의 경우 미소한 정도로 영향을 주는 다른 요소들에 대한 의존성이 상대적으로 커서 이를 통한 고분자와 감지물질 간의 흡착에 대한 추가적인 정보를 얻을 수 있다.

3. Metal Oxide Semiconductor Sensor (MOS)

ZnO 또는 SnO₂로 대표되는 금속 산화물 반도체는 1960대에 Seiyama와 Taguchi에 의해 처음 개발되어 가정에서 액화석유가스(LPG)용 검출기로 사용되었다. 이들의 성공에 힘입어 반도체식 센서는 더욱 연구가 되었고, 최근에는 대량으로 생산되어 누출 및 화재 감지기 뿐만 아니라 다양한 용도로 활용되고 있으며, 감지물질로 TiO₂, WO₃, In₂O₃ 등 여러 가지 산화물이 응용되고 있다.

다결정의 다기공 구조를 가진 물질로 구성된 후막 센서의 경우 sol-gel 과정을 통해 만들어진다. 수용액 내에서 SnCl₄

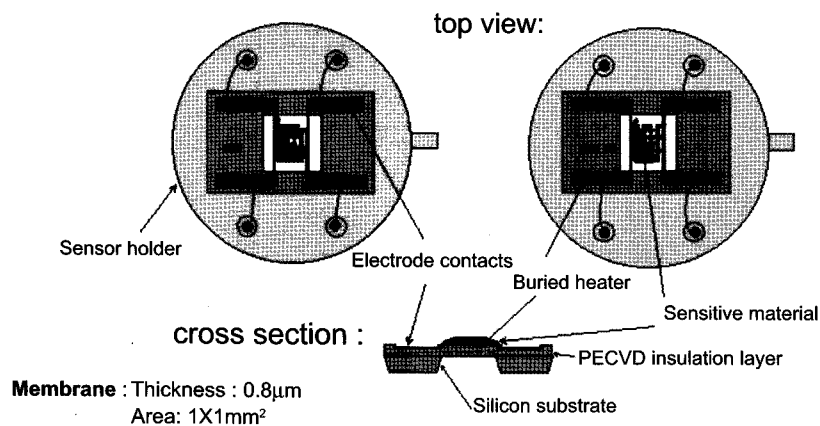


를 시작으로 암모니아를 첨가하여 tin tetrahydroxide가 만들어지고, 침전물은 건조후 500℃ ~ 1000℃에서 소결과정을 거친다. 얻어진 tin dioxide 가루는 분쇄 후 금속염화물 계열의 첨가물과 함께 혼합되고, 순수 금속 상태를 얻고 염소를 제거하기 위해 가열한다. 그리고, 스크린 프린팅을 위해 접착제 형태로 만든다. 마지막 단계로 전극과 히터가 형성된 알루미늄 기판에 프린팅하여 수백 마이크론 두께의 막을 형성하고, 후 열처리 과정을 거친다. 각 단계의 온도나 농도, 시간 등의 조건들은 감지 특성에 매우 큰 영향을 미치므로, 아주 세심하게 조절되어야 한다. 약 50nm 두께의 감지막을 가지는 박막 센서의 경우 SnO₂ 타겟을 이용, 스퍼터링 방식이나 화학증착 및 기화법으로 만든다.

감지 특성은 반도체 표면에서의 화학 반응에 따른 두 전극 사이의 저항 변화로 관측되는데, 원리는 간단하게 설명하면 다음과 같다. 산화성 분위기에서는 산소 분자의 분해로부터 발생하는 산소 원자나 전자 친화성이 큰 분자가 표면 근처에 흡착하고, 전도에 기여하는 자유 전자를 포획한다. 이 경우 저항이 증가하게 된다. 반면, 환원성 분위기에서는 흡착된 산소 원자가 환원성 분자와 반응하고, 포획된 전자를 방출하여 저항이 감소하게 된다.

센서의 선택성은 감지물질에 귀금속 촉매를 첨가하거나 250℃ ~ 400℃ 범위에서 측정 온도를 변화시키거나 그레이인의 크기를 변화시켜 개선될 수 있다.

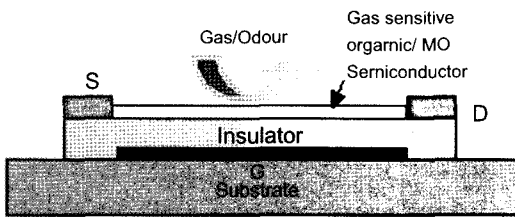
Micromachined Sensor



(그림 5) 마이크로히터를 내장한 MOS 센서의 구조도

MOS 센서의 장점은 포화 탄화수소를 포함한 대부분의 연소성 가스와 NO₂, CO에 대한 높은 감도를 보이고, 극성 물질 사이에서는 차이가 거의 없다. 그 외에 빠른 반응 특성과 신뢰성, 부식성 가스나 습도에 대한 안정된 특성, 기계적 강도와 저렴한 생산 비용 등도 장점이다. 상대적으로 취약한 선택성이 단점인데, 도핑이나 측정 시 온도 조절 등에 의해 상당 부분 향상이 가능하나 소비전력이 증가하는 높은 동작 온도가 요구된다.

4. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor Sensor (MOSFET)



Schematic for TFT gas Sensor

(그림 6) MOSFET 센서의 개념도

화학반응에 의해 FET의 변화를 이용하는 것을 ChemFET, 특히 가스에 반응하는 경우에 GASFET이라고 한다. 일반적인 MOSFET 구조 이외에도 suspended gate FET(SGFET) 형태가 있다. MOSFET 센서의 경우 MOS 구조 위에 얇은 금속 촉매나 가스에 반응하는 고분자 박막을 포함한다.

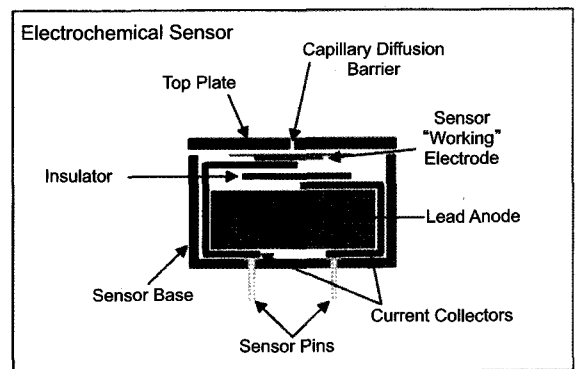
MOSFET은 p-type 실리콘에 기반한 MOS 기술로 만들어진 다. 제작 과정이나 패키징 기술은 표준 IC 기술과 동등하다. 센서는 통상 1x1 mm² 보다 크기가 작다. 촉매 금속의 형태나 두께에 따라 다른 형태의 MOSFET 센서가 만들어진다. 모두 p-도핑된 실리콘 채널과 n-doping된 소스 및 드레인, 실리콘 산화막 절연층 위에 놓인 게이트의 구조를 가진다.

다공성의 촉매 금속 게이트를 가지는 전계 센서의 동작 원리는 다음과 같다. 가스 상태의 분자가 촉매 표면에서 반응하면 반응물이나 중간물이 전기를 띄고 표면에 흡착되거나 절연층의 비어있는 곳으로 이동한다.

수소나 수소를 포함한 물질의 반응으로 생성된 수소 원자

는 촉매 금속을 통하여 확산하고 금속과 절연층 사이의 계면에서 이중극자를 형성한다. 절연층 표면의 극성물질과 안쪽 계면의 수소원자의 극성층은 가스 상태의 물질 농도와 평형 상태를 이루고, 이중극자층을 형성하여 금속과 반도체 사이에 전기장을 일으키게 된다. 이로 인해 게이트와 소스 전극 사이의 전압이 바뀌게 되고, 채널과의 정전 커플링을 통해 소스-드레인 간의 전류가 변화한다. 실제로는 트랜지스터 전류를 일정하게 유지하기 위해 가해지는 게이트 전압을 변화를 측정하여 센서 신호를 검출한다.

다양한 가스에 대한 선택성은 탈수소화 및 촉매 반응이 온도에 의존하므로, 측정 온도를 변화시켜 얻을 수 있고, 촉매 표면의 금속 재질 및 두께, 표면 구조를 변화시켜서 얻기도 한다. 전계 센서는 수소를 포함하거나 극성을 띤 다양한 화합물에 반응하고, 안정적이며 습도에 대하여 상대적으로 낮은 의존성을 보인다. 반도체 산업에서 잘 알려진 MOSFET 공정을 활용하여 대량으로 높은 신뢰도를 가지고 제작이 가능하다.



(그림 7) 전기화학식 센서의 간단한 구조도

5. Electrochemical Gas Sensor

전기화학식 센서는 감지전극, 기준전극 및 반대전극으로 구성되며, 이들 사이는 전해질로 채워진다. 감지전극에 도달한 가스는 전극 물질에 따라 특정 가스에 활성화된 산화 또는 환원 반응을 일으킨다. 이 때 발생한 전류 또는 전압을 반대전극에서 감지하여 센서 신호로 검출된다.

전기화학식 센서는 온도와 압력에 민감하므로, 일정한 조건에서 유지하는 것이 필요하다. 통상 내부적으로 일정한

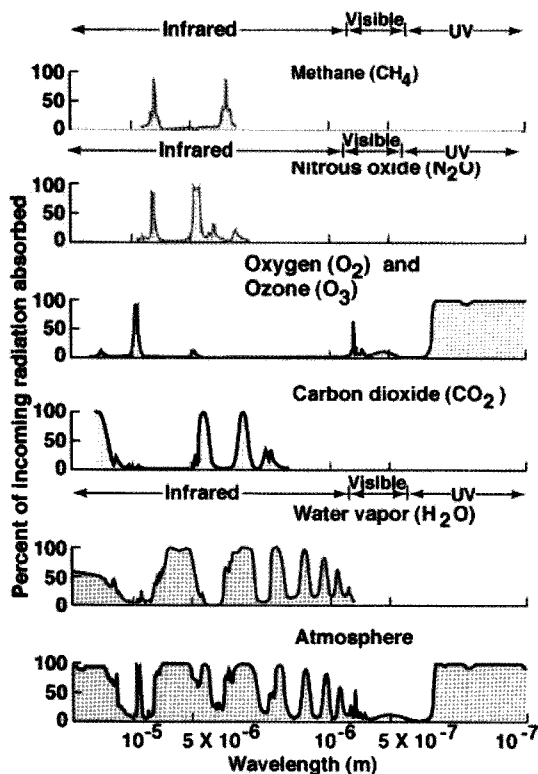
온도를 유지할 수 있도록 설계되어 있다.

일반적으로 특정 가스에 대하여 선택성을 가지도록 설계가 가능하지만, 감지 가스의 종류에 따라 다른 가스에 의한 영향이 존재한다.

산소 센서의 경우 아주 탁월한 선택비와 안정성을 가지는 반면, CO와 같은 다른 센서의 경우 다른 가스에 의한 영향이 상당히 존재하여, 이를 보상하기 위한 필터를 사용하는 것이 필요하다.

6. Non-dispersive Infra-red Gas Sensor (NDIR)

IR 센서의 가장 큰 장점은 감지 가스와 직접 반응하지 않는다는 점이다. 가스와 반응하는 적외선을 생성하고, 검출하는 광학부가 중요한 역할을 하는데, 구조가 복잡하고 가격이 비싼 단점이 있다. 적외선 센서는 선택성이 높으며, ppm부터 100% 농도까지 넓은 감지 대역을 가진다.



(그림 8) 대표적 가스의 흡수 스펙트럼

감지 가스 분자의 구조에 따라 적외선 영역에서의 흡수 스펙트럼이 다양하게 나타나는데, 흡수피크의 위치와 흡수 정도 및 흡수곡선의 특성 등이 각각의 가스의 독특한 특징으로 구별된다.

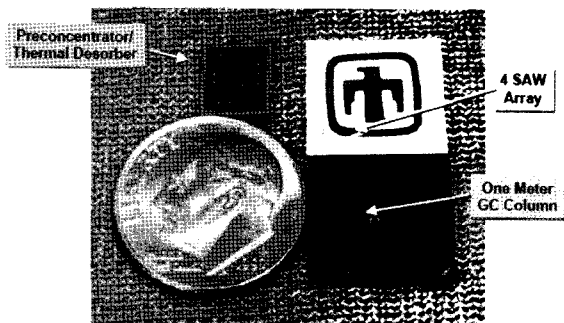
실제 센서에서는 가스 농도를 정량화하기 위해 특정 흡수 대역을 활용하는데, 대략 2~15 마이크로미터 영역에 해당한다. 센서 신호는 크게 두 가지 방식으로 결정되는데, 가스 분자가 적외선을 흡수하여 증가한 온도를 측정하거나 가스 분자에 의해 흡수된 적외선의 감소량을 측정하여 가스 농도에 비례하는 신호를 만들어낸다.

적외선 센서는 기본적으로 온도센서이므로 주변 온도에 매우 민감하다. 하지만, -40°C ~ 60°C 범위에서는 적절한 검출기 구조를 통해 쉽게 사용이 가능하다. 보통 온도 안정화에 10분 ~ 20분 정도가 소요되는데, 온도 변화가 크지 않은 경우에는 크게 문제가 되지 않는다.

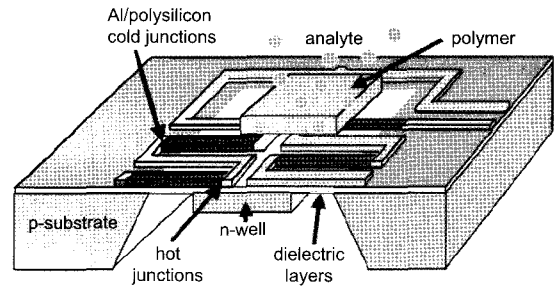
습도가 높아지는 경우 수증기가 광학계에 응집되어 영향을 줄 수 있고, 가스 챔버가 IR에 반응하지 않는 물질로 설계되어 부식성 가스의 경우에 사용이 가능하다. IR 흡수 특성은 가스 종류와 농도에 따라 매우 크게 변화하는데, 넓은 감지 범위에서 특성이 선형적이지 않으므로 각 가스에 맞추어 센서별로 응답 곡선을 확보하여야 한다. IR 검출기는 사파이어 필터 내부에 표준 패키징으로 잘 밀봉되어 있어 대부분의 전자소자와 유사한 수명을 가질 수 있다. 반면, IR 광원의 경우 대략 3~5년 정도의 수명을 가진다.

III. IT 융합 환경 모니터링을 위한 센서 기술 전망

최근 개발되고 있는 화학센서의 기술 동향을 보면, 감지물질의 처리부와 감지부 및 신호 처리부가 하나의 구조로 통합된 구조를 구현하기 위해 MEMS/NEMS, CMOS IC 및 Microfluidic과 같은 첨단 기술들이 융합되어 시도되고 있다. 그 대표적인 예로 Sandia 국립연구소에서는 MEMS 기반의 마이크로센서 개발에 집중하고 있는데, 동전보다 작은 크기의 센서 요소 부품을 개발하고 이를 통합하는 기술을 진행 중이다.[2]



(그림 9) Sandia Nat. Lab에서 개발 중인 μ -Chemlab [2]

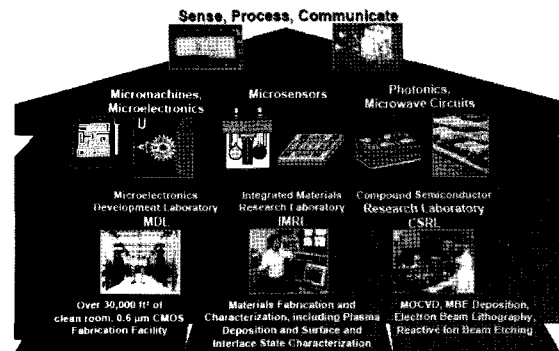


(그림 11) CMOS 기반 가스 센서 [3]

또한, CMOS와 호환 가능한 공정을 통해 집적화된 소형 센서를 개발하여 크기, 동작 속도 및 신호 처리 등 다양한 기능이 가능한 스마트 센서 개발도 동시에 이루어지고 있다. 반도체식 센서의 경우 센서부의 온도를 올리기 위한 히터 구조가 필수적인데, CMOS와 MEMS 공정 기술을 이용하여 멤브레인 형태로 전력 소모를 최소화하면서 이와 동시에 주변 CMOS IC 부와의 절연 특성을 구현하여 소형 단일칩 형태로 스마트 센서 네트워크에 필요한 센서 노드로의 활용 가능성을 제시하고 있다.[3]

한편, 전력소모가 크고, 구조가 복잡한 광학식의 경우 포토닉 결정체를 이용하여 기존의 적외선 광원보다 소비전력 및 필터 등 여러 가지 측면에서 개선된 구조의 센서 개발이 진행 중이다.[4]

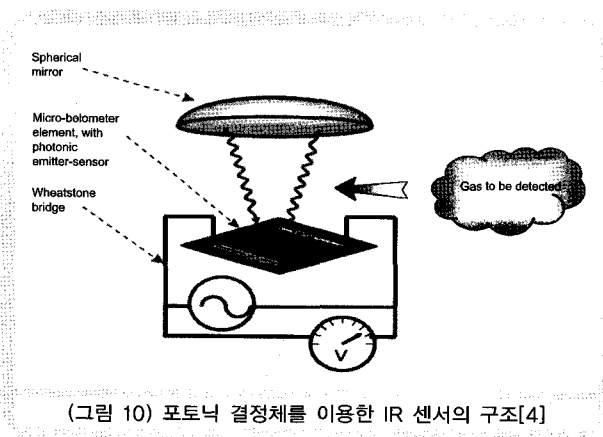
이와 더불어 gas chromatography와 같은 기존의 고가의 정밀 분석 기법을 첨단 MEMS 기술로 소형화하는 시도가 활발한데, 최근 MIT 그룹에서는 마이크로컬럼을 이용하여 전력



(그림 12) MEMS 기반 센서의 다양한 응용 [2]

소모와 분석 시간을 획기적으로 단축한 결과를 보여주고 있어 휴대형 가스 센서로의 적용 가능성을 훨씬 높여 주었다.[5]

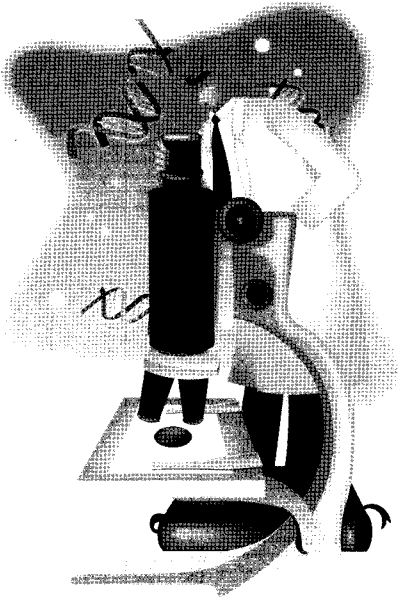
향후 IT 기술을 기반으로 실시간 환경 감시 센서 네트워크와 같은 응용 분야로 적용되기 위해서는 핵심 센서들이 소형화, 저전력, 빠른 신호 처리, 집적화 가능성 등의 특성을 갖추어야 하는데, 반도체식이 가장 가능성이 높다고 할 수 있다. 하나, 응용 분야에 따라서 생산 비용이 높더라도 정밀도가 요구되는 경우에는 광학식이나 마이크로컬럼 기술이 활용될 수 있고, 현재 센서 기술 개발의 추세를 보면 가까운 시일 내에 구현이 가능할 것으로 판단되며 이와 더불어 IT 융합 시대 도래와 함께 다양한 응용 분야를 창출할 것으로 기대된다.



(그림 10) 포토닉 결정체를 이용한 IR 센서의 구조[4]

참고문헌

- [1] Joseph R. Stetter, William R. Pensore, and Sheng Yao, "Sensors, Chemical Sensors, Electrochemical Sensors and ECS", Journal of Electrochemical Society, 2003, 150, S11 - S16
- [2] Sandia National Laboratory, "www.sandia.gov/mst/"
- [3] Andreas Hierlemann and Henry Baltes, "CMOS-based chemical microsensors", Analyst, 2003, 128, 15-28
- [4] ICX Photonics Corp. "www.icx-precision-photonics.com"
- [5] MIT, "MIT gas sensor is tiny, quick", MIT TechTalk, 2008, 52, 4



약력



1993년 서울대학교 물리학과 학사
 1995년 서울대학교 물리학과 대학원 석사
 2001년 서울대학교 물리학과 대학원 박사
 현재 한국전자통신연구원 융합부품소재부문 미래기술그룹
 시스템통합기술팀 선임연구원
 관심분야: 마이크로-스마트 센서, 나노 소재 및 공정 기술,
 융합부품·소재 응용 기술

박종혁



1981년 고려대학교 전기공학과 학사
 1983년 한국과학기술원 전기공학과 석사
 현재 한국전자통신연구원 시스템통합기술팀 팀장
 관심분야: 네트워킹 VLSI/시스템, 초고주파 회로, 융합부품·
 소재 시스템통합

전용일



1978년 한국항공대학교 전자공학과 학사
 1980년 연세대학교 전자공학과 석사
 현재 한국전자통신연구원 기술사업화본부 본부장
 관심분야: 네트워크 구조 및 시스템, 연구 성과 상용화

이유경