

# 가스 센서 기술

최근에 들어와 가스 센서에 실리콘 반도체 공정과 MEMS 기술을 접목하여 고성능화, 집적화, 저가격화를 달성하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 또한 그 애플리케이션도 단순한 측정 및 계측용으로부터 LOC,  $\mu$ -TAS, 그리고 전자 코(electronic nose) 등 미래형 시스템에 집적될 수 있는 요소 부품으로서의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 본고에서는 기존의 대표적인 가스 센서를 개관하고 차세대 센서 기술로서 가스 센서의 집적화, MEMS 기술의 적용 사례를 살펴본다. 또한 CNT 감응 물질의 적용 및 MEMS 소자와의 접목 기술 등에 대한 개념을 제시한다. <편집자 주>

글: 주병권 박사/KIST 디스플레이 및 나노 소자 연구실  
jbk@kist.re.kr

가스 센서는 가스와 감응 물질 간의 상호 작용에 의해 가스의 종류와 양을 전기적인 신호로 검출하는 소자로서, 현재에 이르기까지 세라믹 반도체 방식 등을 비롯하여 전기화학적 방식, 고체전해질 방식, 그리고 접촉연소 방식 등을 이용한 하이브리드형 센서들이 특징과 용도에 맞도록 개발, 사용되어 왔다.

최근에 와서 실리콘 반도체 공정과 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술을 접목하여 고성

능화, 집적화, 소형화, 일괄생산화, 그리고 저가격화를 이루기 위한 노력이 일고 있다. 또한 가스 센서의 응용 분야도 단순한 측정 및 계측용으로부터 LOC(Lab-On-a-Chip),  $\mu$ -TAS( $\mu$ -Total Analysis Systems), 그리고 전자 코(electronic nose) 등과 같은 미래형 시스템에 집적될 수 있는 요소 부품으로서 개발되고 있다. 아울러, 2000년대로 접어들면서 신소재로서 관심을 끌고 있는 탄소 나노 튜브(CNT, Carbon Nano Tube)를

표 1. 가스 센서 기술 및 특징

| 종류                 | 동작 원리     | 제조 공정          | 현황        | 감도         | 장점      | 문제점      |
|--------------------|-----------|----------------|-----------|------------|---------|----------|
| 금속 산화물             | 전도성       | 반도체 공정 MEMS    | 제품화 다수 다종 | 5~500ppm   | 저가격     | 고온 동작    |
| 전도성 고분자            | 전도성       | 반도체 공정 도금, 프린팅 | 제품화 특수용도  | 0.1~100ppm | 상온 동작   | 습도에 민감   |
| QCM                | 압전성       | 프린팅 MEMS       | 제품화 소수 소종 | 1.0ng      | 검증된 기술  | 접속 회로    |
| SAW                | 압전성       | 반도체 공정 프린팅     | 제품화 소수 소종 | 1.0ng      | 고감도     | 접속 회로    |
| MOSFET             | 전하량 채널 특성 | 반도체 공정         | 제품화 주문형   | ppm 수준     | 회로 집적화  | 게이트 손상   |
| 광                  | 형광 화학적 발광 | 담금 코팅 정밀가공     | 연구        | Low ppb 수준 | 잡음 면역성  | 광원 제한    |
| Gas chromatography | 분자 스펙트럼   | MEMS 정밀가공      | 제품화       | Low ppb 수준 | 측정 정확도  | 샘플 제한    |
| Mass spectroscopy  | 원자량 스펙트럼  | MEMS 정밀가공      | 제품화       | Low ppb 수준 | 측정 정확도  | 샘플 제한    |
| Light 스펙트럼         | 투과광 스펙트럼  | MEMS 정밀가공      | 연구        | Low ppb 수준 | 샘플 비소모성 | 양자 소자 필요 |

센서용 감응 물질로 이용하려는 시도가 행해지고 있으며, 센서의 고감도화 및 상온 동작을 통한 저전력화를 위해 매력적인 요소로 간주되고 있다.

본고에서는 기존의 대표적인 가스 센서들의 분석과 함께 차세대 센서 기술로서 가스 센서의 집적화, MEMS 기술의 적용 일례들을 소개하고, 이와 더불어 CNT 감응 물질의 적용 및 MEMS 소자와의 접목 기술 등에 대해 개념을 제시하고자 한다.

## 가스 센서 기술

가스 센서는 표 1에 보인 바와 같이 그 종류가 매우 다양하나 이를 동작 기구에 의해 구분해 살펴보면 5 종류, 즉 전도성 센서, 압전형 센서, MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)형 센서, 광섬유 센서, 그리고 분광계(spectrometry) 센서로 그룹화시킬 수 있다.

### 전도성 센서

전도성 센서에는 금속 산화물형과 고분자형의 두 가지가 있는데, 모두 가스에 노출되면 저항이 변화하게 된다. 특히 금속 산화물 센서가 사용빈도가 높고 제품화되어 있는데, 주로 Pt나 Pd와 같은 귀금속이 도핑된 Sn, Zn, Ti, W, Ir 등의 산화물을 가스 감응 물질로서 사용하고 있다.

금속 산화물 센서는 그림1과 같은 구조를 갖는데, 실리콘이나 유리, 플라스틱 등의 기판 위에 2개의 금속 전극(Pt, Al, Au 등)이 구성되어 있고, 이들 사이에 감응 물질이 도포되어 있으며, 아래 부분에는 가열을 위한 저항체가 있다. 약 200~400℃의 온도에서 동작하기 때문에 열손실 등이 센서 구조의 설계에 주요한 인자로 작용한다. 한편, MEMS 기술을 이용하여 가열이 필요한 부분을 매우 얇게 만들어 열손실과 전력소모를 가능한 적게 하기도 한다.

가열된 상태에서 가스가 감응 물질 위를 지나게 되면 농도 등에 비례하여 금속 전극 양단간의 저항이 변화하고, 이로부터 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge)나 회로 등을 통하여 출력 신호가 얻어진다.

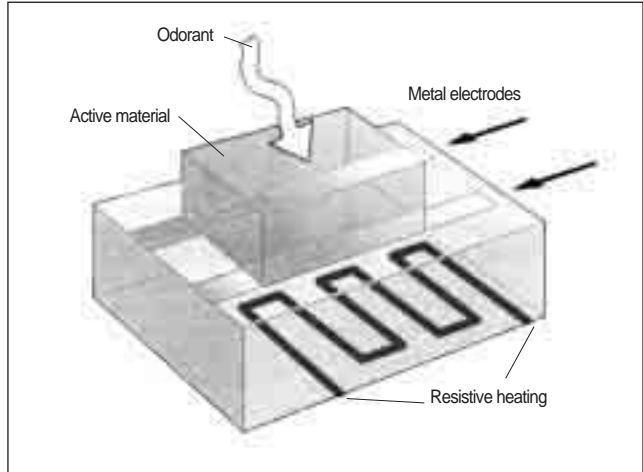


그림 1. 전도성 센서(금속 산화물형)의 구조 및 동작 원리

가스 감응 물질은 CO나 NH<sub>3</sub>와 같은 특정한 가스에 대하여 반응할 수 있도록 설계되며, 동작 온도를 변화하는 등의 방법에 의해 선택도를 더욱 향상시킬 수 있다. 센서의 감도는 주로 5~50ppm(part per million) 정도이며, 또한 수분이나 습도 등에도 응답하므로 센서의 초기화를 위해 기준 가스를 사용하여야 한다. 뿐만 아니라 사용 주기나 시간에 따라 특성이 변화할 우려가 있고, 유독성 가스에 손상을 입을 수도 있으므로, 이에 대한 보상이나 보호 등이 이루어져야 한다.

전도성 고분자 센서의 경우, 감응 물질이 폴리파이롤(polypyrrole), 티오펜(thiophene), 인돌(indole), 푸란(furan) 등과 같은 전도성 고분자에 해당하며, 역시 가스에 노출되면 반응성 결합 과정을 통하여 전도도에 변화를 일으킨다. 이러한 전도성 고분자 센서는 상온에서 동작이 가능하여 가열원이 불필요하다. 따라서 시스템이 간단해지므로 휴대용 계측기에 많이 적용된다. 이러한 센서들은 0.1ppm에 이르기까지 측정이 가능하나 일반적으로 10~100ppm 범위에서 사용된다. 고분자 센서가 갖는 결점은 제조 과정에 있어서 감응 물질들간의 재현성이 부족하고, 사용 시간에 따라 동작 특성이 저하되며, 수분이나 습도에 더욱 민감하다는 점을 들 수 있다.

### 압전형 센서

압전형 센서의 경우, QMB(Quartz Micro-

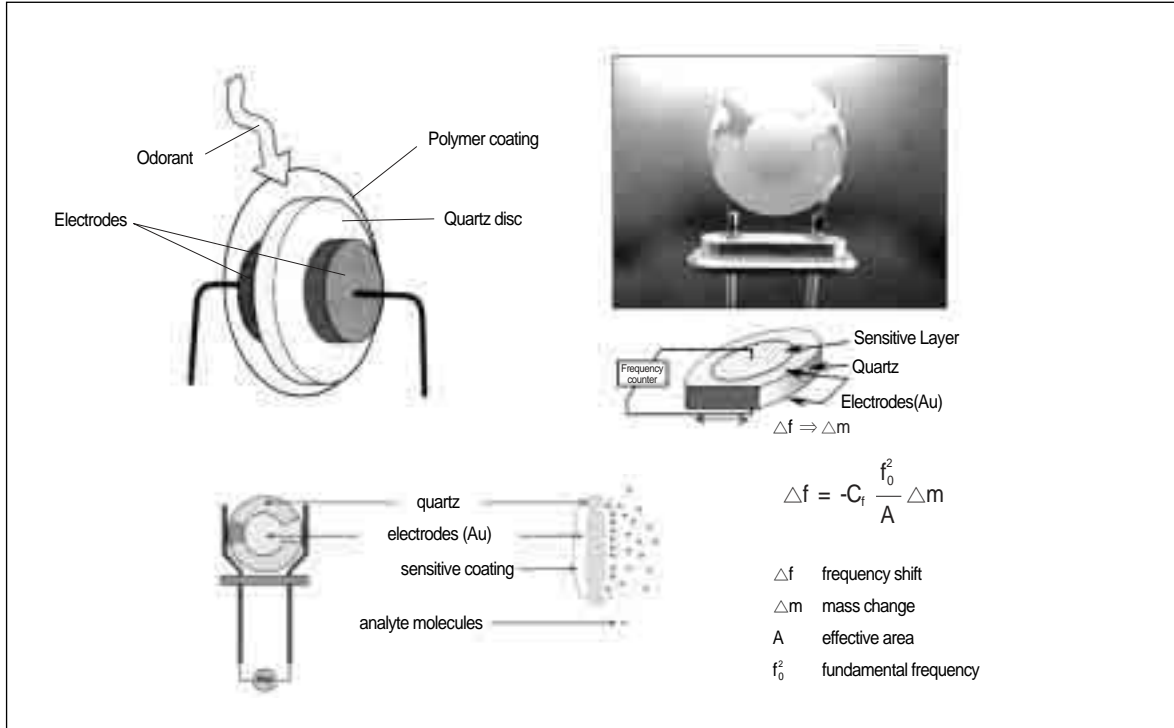


그림 2. QMB 소자의 구조 및 동작 원리 (AppliedSensor)

Balance) 소자와 SAW(Surface Acoustic-Wave) 소자 두 가지가 대표적이다. 이들은 온도, 질량 변화, 압력, 힘, 그리고 가속도 등의 측정에도 사용될 수 있으며, 가스 센서로서는 질량 변화를 감지하는 소자로서 작용한다.

QMB 센서의 구조와 동작 원리는 그림 2에 설명한

것과 같은데, 수 mm 직경의 진동자 양단에 금속 전극이 연결된 모양으로 공진 신호가 들어오면 10~30MHz 범위에서 진동하게 된다. 이 위에 고분자 감응 물질을 코팅하면, 가스가 감응 물질에 흡착되어 질량이 증가하게 되고, 따라서 공진 주파수가 감소하게 된다.

예를 들어 특정 방향으로 절단된 두께 166 $\mu$ m의 수정의 경우, 10MHz의 공진주파수를 갖는데, 이러한 QCM 센서의 질량이 0.01% 증가하면 공진주파수가 1kHz만큼 감소한다. 이러한 QCM 센서는 감도가 높고, 선형성이 우수하고, 온도에 따른 감도 변화가 매우 적다는 특징이 있다.

그림 3과 같은 SAW 센서의 경우, 진동 파형이 벌크가 아닌 표면을 통해서만 전달된다는 점에서 QCM 센서와 다르며, 상대적으로 높은 주파수인 수백 MHz 대역에서 동작하기 때문에 주파수의 변화폭도 크다. 즉, 입력 트랜스듀서(transducer)에 교류 전압이 인가되면 표면에 음향파(acoustic wave)가 발생하고, 이는 압전 기판 표면을 통해 출력 트랜스듀서로 전달되며,

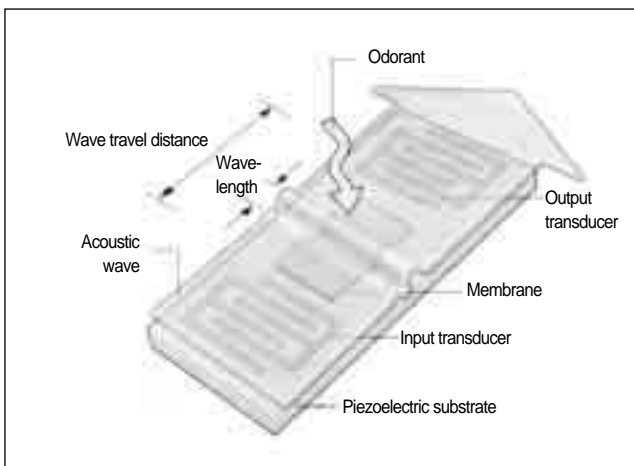


그림 3. SAW 센서의 구조

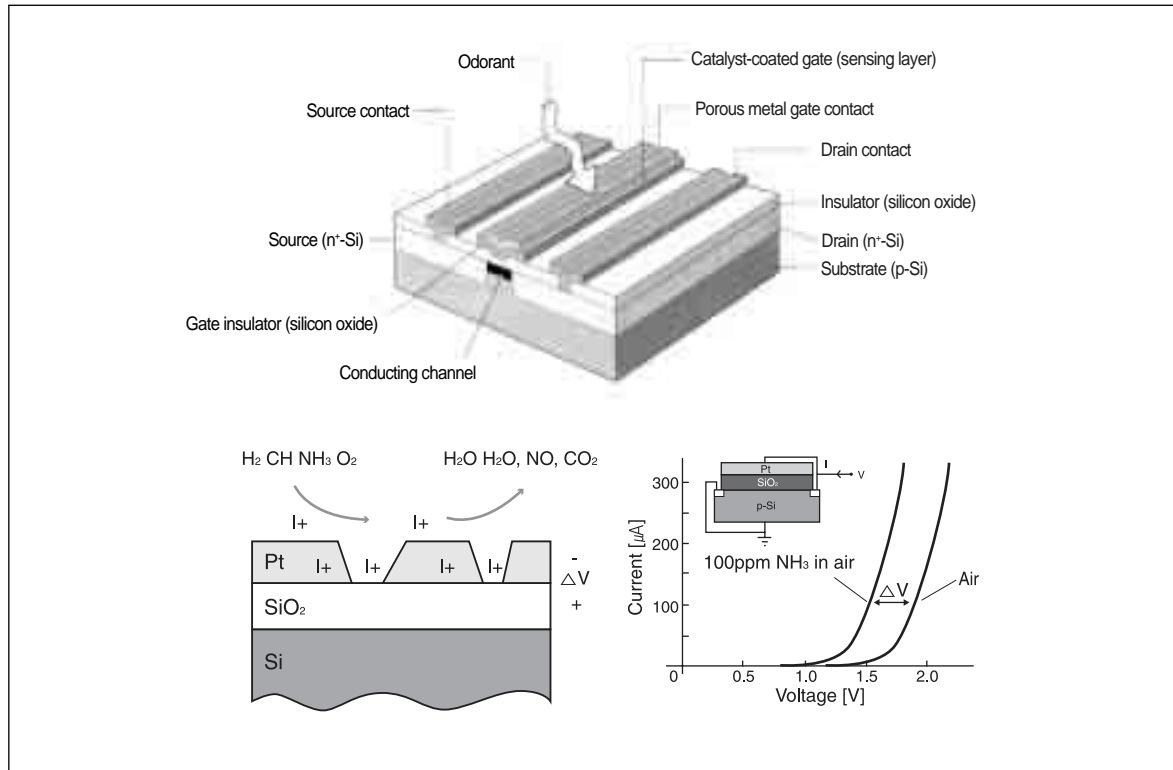


그림 4. MOSFET 가스 센서의 구조 및 동작 원리

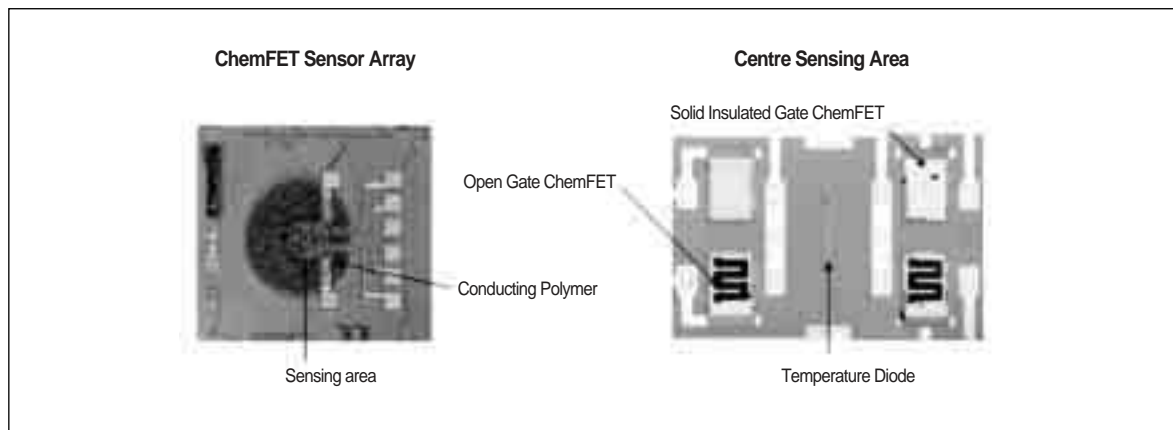


그림 5. 고분자 감응 물질이 도포된 MOSFET 센서의 모양 (Neuchatel Univ.)

여기에서 교류 전압 형태로 출력된다. 이때 출력 신호의 위상 변화는 고분자 감응 물질에 흡착된 가스의 질량 등에 관계하게 된다.

SAW 센서는 평면형 구조를 가지기 때문에, 사진 식각 공정과 같은 마이크로일렉트로닉 공정에 의해 제작될 수 있다.

고분자 감응 물질은 QCM 센서의 경우와 마찬가지로 다양한 방법을 통해 도포될 수 있다.

QCM과 SAW 센서의 단점은 전도성 센서에 비해 전자 회로가 복잡하고, 기계적인 구조 변형을 통해 공진 주파수의 변화가 일어날 수 있다는 것이다.

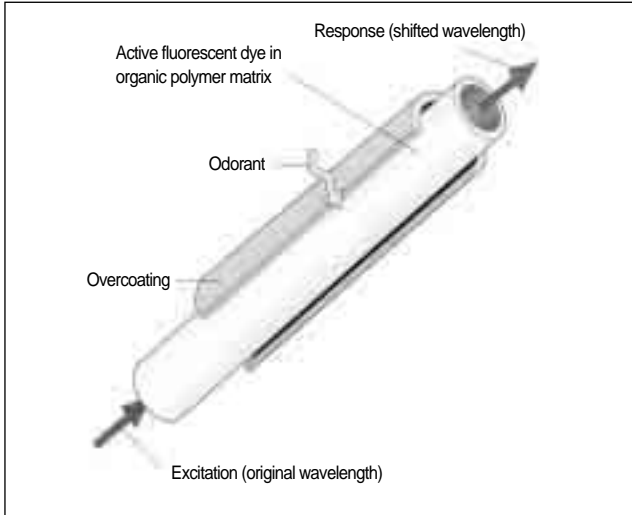


그림 6. 광 섬유를 이용한 가스 센서의 구조

### MOSFET형 센서

MOSFET형 센서의 경우, 그림 4에 보인 구조 및 동작 원리를 갖는다. 자세히 설명하면 p형 실리콘 기판 위에 n형 소스 및 드레인이 형성된 n 채널 구조를 가지며, 게이트 전극 위에 코팅된 금속 감응 물질(촉매), 즉 Pt, Pd, Ir 등이 가스와 반응하여 게이트의 전하 밀도 등을 바꾸고, 이로 인해 채널의 전도도가 변화하여 MOSFET의 전기적인 특성이 변화하게 된다. 즉, 가스와 감응 물질간의 반응에 의하여 전하가 발생하고, 이는 게이트 전극에 부가적인 전압을 인가하는 것으로 간주될 수 있으며, 이로 인해 트랜지스터의 전류-전압 특성이  $\Delta V$ 만큼 이동하게 된다.

센서의 감도와 선택도는 금속 감응 물질의 성분과 두께, 그리고 동작 온도 등에 의하여 최적화되는데, 현재까지는 측정할 수 있는 가스의 수가 제한되어 있어 범용성에는 한계가 있다. 또한 MOSFET 센서는 IC(Integrated Circuit) 공정을 이용하여 제조할 수 있기 때문에 소자간의 재현성 및 신뢰성이 높은 반면에 반도체 회로와 가스 인자가 닿을 우려가 있어 선택적인 밀봉성 패키징이 요구된다.

그림 5에 MOSFET의 게이트 전극 위에 고분자 감응 물질이 도포된 경우를 나타내었다. 고분자 감응 물질은 상온( $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ )에서도 가스와 반응이 활발하여 센서의 상온 동작이 가능하므로 저전력화가 가능하다.

이 센서는 4개의 FET, 온도 센서용 다이오드로 구성되어 있으며, FET들은 각각 감지 센서와 기준 센서로서 동작하게 된다.

### 광섬유 센서

광섬유 센서의 경우, 그림 6에 나타낸 바와 같이 광섬유의 표면이나 끝 부분에 화학적인 감응 물질인 고분자 막이 코팅된 구조로 되어 있다. 단파장이나 혹은 좁은 대역폭을 갖는 광이 광섬유에 입사되는데, 가스가 감응 물질과 반응함으로써 출력되는 광의 파장이나 스펙트럼이 변화한다.

광섬유 센서는 가격이 저렴하고 제조과정이 간단하여 단일 광섬유나 광섬유 어레이 등의 형태로 바이오 관련 연구 등에 매우 다양하게 적용되고 있다. 예를 들어 인체 면역 기구에 있어서 항체나 항원의 결합 과정을 연구하는데 사용되기도 한다. 반면에, 계측 시스템을 구성하기가 복잡하고, 형광 기능이 시간에 따라 저하되는 경향이 있다는 점 등이 결점이 되고 있다.

### MEMS 기술의 적용

가스 센서에 MEMS 기술을 적용할 경우, 가스 채널이나 저장소 제공, 가열원 및 열적 고립 구조 제공 등과 같은 기능을 부가할 수 있다. 아울러, 소형화가 가능하고, 보상 및 신호 처리 회로를 집적시킬 수 있으며, 실리콘 웨이퍼 상에서 일괄 제조되기 때문에 가격을 낮출 수 있다. 뿐만 아니라 최근에 화학 및 바이오 관련 마이크로 시스템 기술의 핵심으로 등장하고 있는 LOC,  $\mu$ -TAS 등과 제조공정 및 조립, 성능 면에서 조화를 이룰 수 있다.

Hong Kong Science & Technology Univ.에서 발표한  $\text{CO}_2$  측정용 MEMS 가스 센서를 그림 7에 나타내었다. 표면 마이크로머시닝 공정에 의하여 열( $300^{\circ}\text{C}$ )의 발생 및 유지를 위한 마이크로 가열원과 열적 고립 구조가 제공되었으며, 가스 감응 물질로는  $\text{SnO}_2$ 를 적용하였고, 다이아프램과 히터 및 온도 센서로는 각각  $\text{Si}_3\text{N}_4$ (혹은  $\text{SiO}_2$ )와 다결정 실리콘이 사용되었다. 이는 히터의 온도를 올린 상태에서  $\text{CO}_2$  가스가 접촉하게

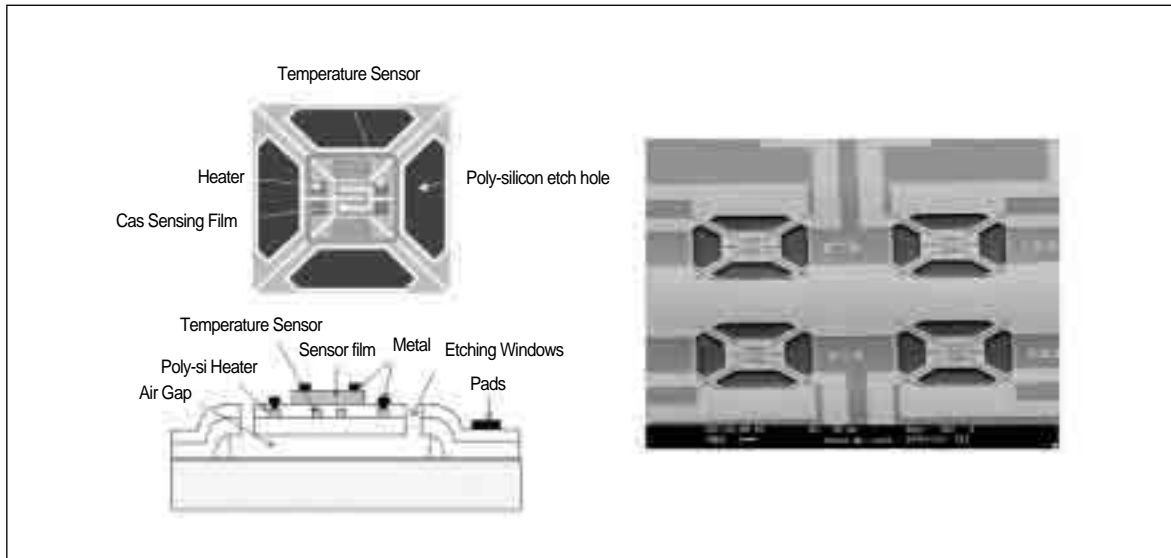


그림 7. CO<sub>2</sub> 측정용 MEMS 가스 센서의 일례 (Hong Kong Science & Technology Univ.)

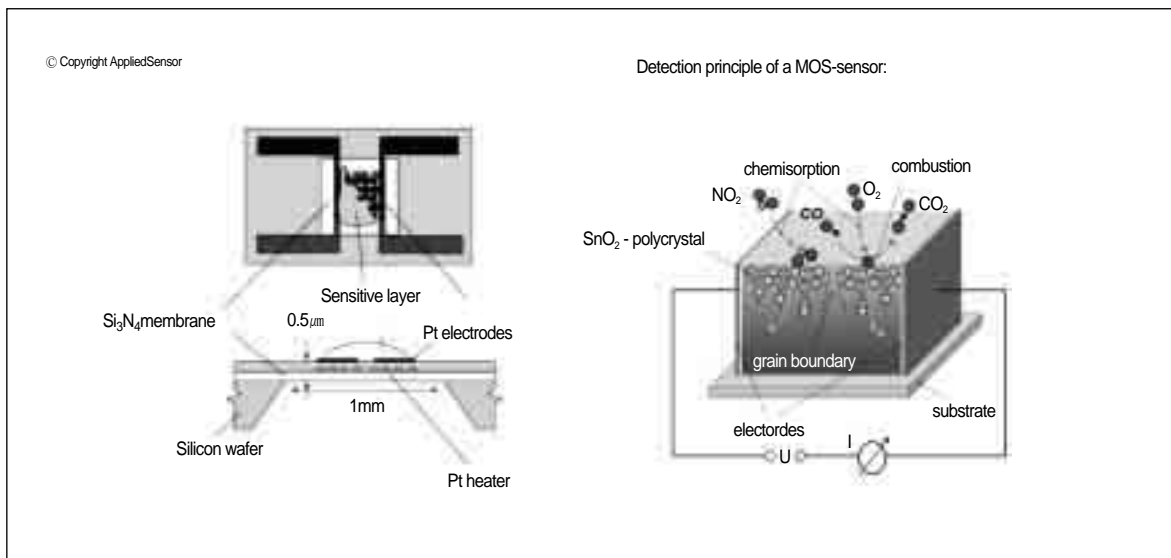


그림 8. SnO<sub>2</sub> 후막을 이용한 전도성 가스 센서의 구조 및 동작 원리 (AppliedSensor)

되면 SnO<sub>2</sub>의 저항이 변화함으로써 CO<sub>2</sub>의 농도를 1ppm까지 측정할 수 있다.

그림 8은 SnO<sub>2</sub> 후막을 감응 물질로 이용하고, 실리콘 몸체 가공에 의해 제조된 전도성 센서의 구조와 동작 원리를 나타낸 것으로 AppliedSensor사에서 개발된 것이다. 동작 원리를 살펴보면, 대기 중에서는 산소나 수증기 등의 인자들이 SnO<sub>2</sub> 입계(grain boundary)의 표면에 접착되어 있다. 측정하고자 하

는 가스가 CO나 H<sub>2</sub>와 같은 환원성 가스일 경우에는 접촉된 산소나 수증기들과의 반응에 의해 감응 물질의 저항이 감소하게 되고, 반대로 NO<sub>2</sub>나 O<sub>3</sub>와 같은 산화성 가스일 경우에는 저항이 증가하게 된다. 이때, 측정 감도와 선택도는 기관의 미세 구조나 조성, 도핑 정도, 그리고 감응 물질의 형상 및 구조적 특징, 그리고 동작 온도 등에 의존한다. 이와 함께 Seju사에서 개발 중인 MEMS 가스 센서의 일례를 그림 9에 설명

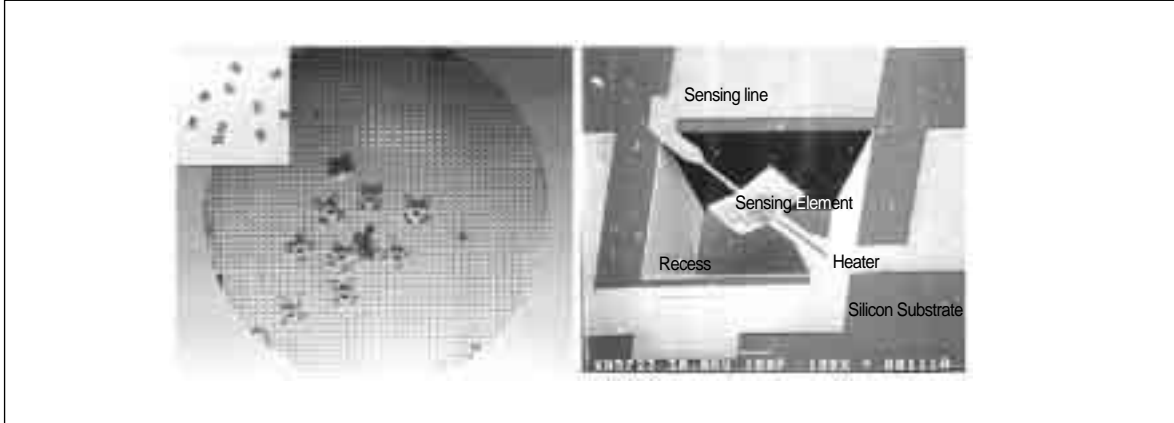


그림 9. MEMS-가스 센서 일례 (Seju Co.)

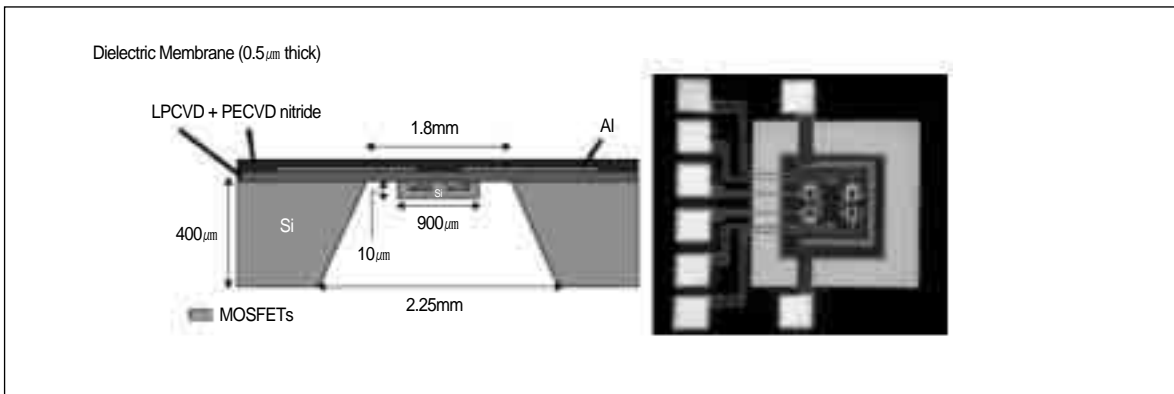


그림 10. 저전력 MOSFET형 가스 센서의 구조 및 모양 (Neuchatel Univ.)

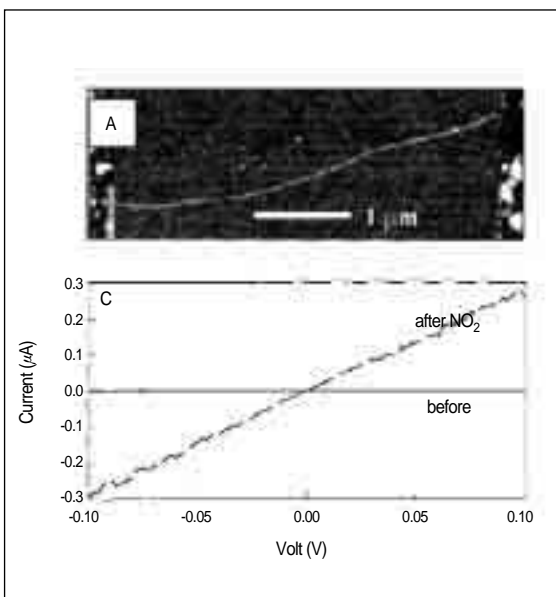


그림 11. CNT의 가스 감응 특성의 일례 (Stanford Univ.)

했다. 스위스의 Neuchatel Univ.에서 발표한 마이크로 가열기(micro-hotplate)를 이용한 MOSFET 센서를 그림 10에 나타내었다. 이는 실리콘의 몸체 가공(bulk micromachining)에 의해 제조되며, 가열 저항과 온도 센서로 사용되는 다이오드, 그리고 절연막 멤브레인으로 둘러싸인 실리콘 아일랜드 위에 구성된 4개의 MOSFET들로 이루어져 있다.

이러한 멤브레인은 낮은 열전도도를 가지므로 센서부와 실리콘 칩 프레임에 열적으로 격리할 수 있고, 따라서 열손실이 적기 때문에 히터에 인가되는 전력을 줄일 수 있다.

## CNT 감응 물질 및 센서 응용

CNT의 가스 감응 특성은 그림 11에 보인 바와 같이



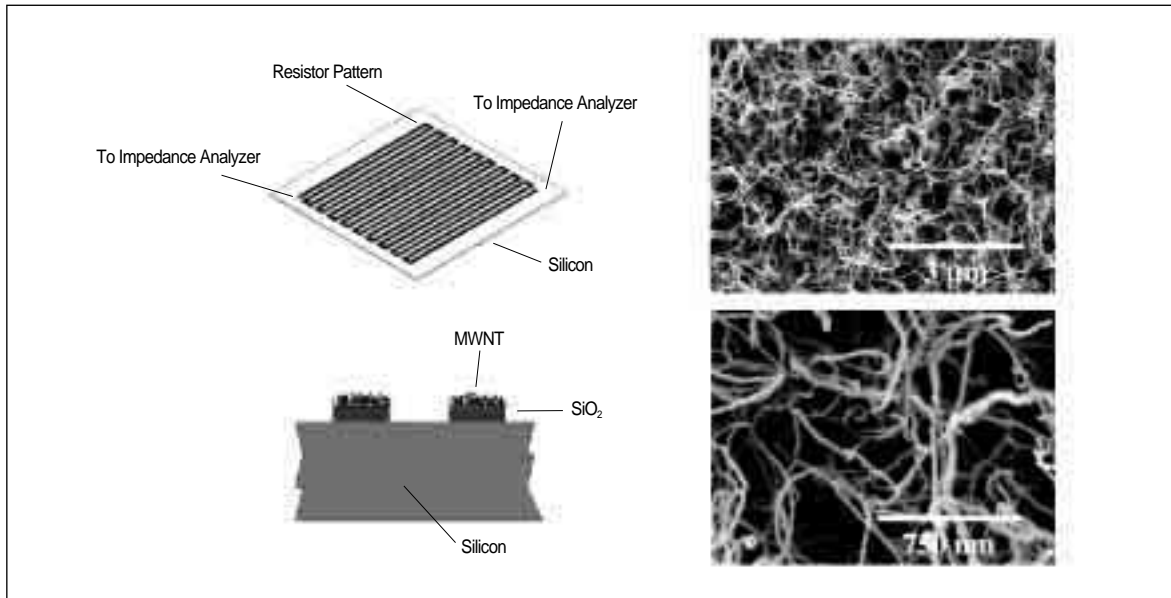


그림 12. CNT 감응 물질을 이용한 가스 센서 (Penn. State Univ.)

| <u>CNT +</u>              | <u>MEMS +</u>          | <u>IC =</u>                 | <u>New gas sensor</u> |
|---------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 상온동작<br>높은 감도<br>빠른 응답 속도 | 소형화<br>열적 절연<br>구조적 기능 | 집적화<br>일괄 제조<br>웨이퍼 레벨 pkg. | 고성능<br>고신뢰성<br>고생산성   |

그림 13. MEMS CNT 가스 센서 개발의 접근 개념도

2000년 1월에 Stanford Univ.의 연구진에 의하여 보고된 바 있다. 이를 통하여 CNT가 가스 분위기( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$  등)에 노출될 경우, CNT 표면에 흡착된 가스 분자들이 게이트 역할을 하여 CNT 내의 캐리어 농도에 영향을 미침으로서 저항치가 변화하는 현상이 확인되었다. 이후 현재에 이르기까지 연구 결과를 통하여 가스 감응 물질로서 CNT의 특징이 강조되어 오고 있다. 즉, 기존의 센서들이 가스와 감응 물질간의 반응을 위하여 200~600℃ 정도의 가열을 필요로 하는데 반하여, CNT 가스 센서는 상온에서도 충분한 가스 흡착 및 저장 기능이 있으며, 또한 단위 면적당 표면적이 넓고 전체 면적이 반응하므로 감도가 높으며 응답 속도가 빠르다.

CNT 감응 물질의 하부에 게이트 바이어스를 인가하

는 등의 방법에 의해 가스 선택도 조절이 가능하며, 비활성 기체 분위기 내에 방치하거나 혹은 가열함으로써 기능을 복구(reversibility)할 수 있다. 아울러, CNT가 지닌 고유 특성으로서 물리·화학적 내구성이 우수하고, 나노 스케일의 크기를 가지며, 집적화가 가능하다는 점을 십분 활용할 수 있다.

CNT 감응 물질을 이용하여 제조되는 CNT 가스 센서 소자와 관련된 연구결과가 최근 Penn. State Univ.의 연구진에 의해 보고된 바 있다. 두 종류의 센서 소자, 즉 용량형과 저항형 소자를 제조하였고, 이로부터 습도와  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  등의 가스 부분압이 임피던스의 변화로 측정되었다. 그림 12에 저항형 소자와 이에 사용된 다중벽-CNT(MW-CNT, Multi Wall-CNT)의 모양을 함께 보였다.



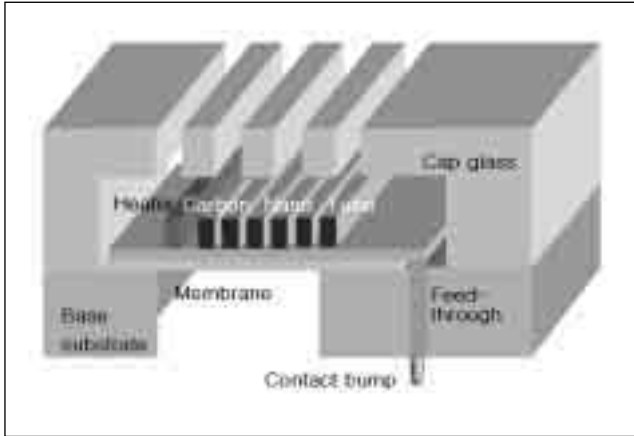


그림 14. MEMS CNT-가스 센서의 가상도 (KIST)

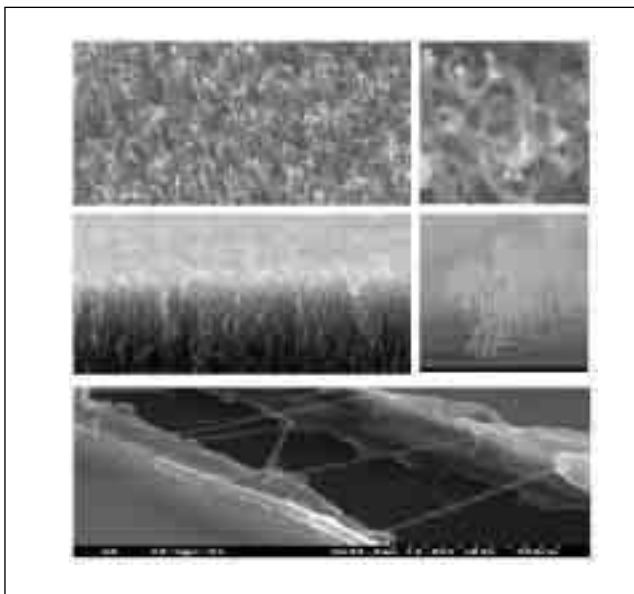


그림 15. LP-CVD 방식에 의해 성장된 MW-CNT의 모양 (KIST)

현재까지의 연구 결과들을 통하여 CNT 가스 감응 물질을 이용한 가스 센서의 가능성과 함께 기본적인 토대는 마련된 것으로 볼 수 있다. 그러나 CNT 가스 센서의 기술적인 완성을 위해서는 CNT 및 반도체 소자와 관련된 제반 기술들이 보완 및 접목되어야 한다. CNT의 가스 센싱 메커니즘의 명확한 규명, 가스 선택도 및 감도 향상 기구, CNT의 선택적 성장 및 수직-수평 성장 공정, 실리콘 반도체 IC 공정과의 친화성 기술, 그리고 MEMS 공정의 적용과 이를 통한 부가적 기능 제공 및 성능·생산성 향상 등이 이에 해당하는

주요 요소들이라 판단된다.

## MEMS CNT-가스 센서의 기술적 제언

CNT 소재 기술과 MEMS 및 IC 공정 기술이 접목된 MEMS CNT 가스 센서 개발을 위한 기본적인 개념을 그림 13에 나타내었다. 즉, CNT 감응 물질이 갖는 상온 동작, 감도, 응답 속도, 기능 복구성, 내구성 등의 고유의 장점을 활용하고, 이에 MEMS 기술을 접목하여 소형화, 열적 절연을 위한 구조체 형성, 그리고 가스 흐름을 제어할 수 있는 기계적인 구조물 등을 설치하게 되면 소재와 구조로서의 장점을 공히 활용할 수 있게 된다.

단위 소자로서의 최적 기능이 검증될 경우, 마지막 단계로서 웨이퍼 레벨의 반도체 IC 공정을 적용하여 집적화를 통한 일괄 제조공정이 적용됨으로써 시제품 수준으로 발전할 수 있으며, 센서의 일괄 제조와 함께 트리밍 등 간단한 보상 회로, 그리고 웨이퍼 레벨의 패키징 기술이 주요 시안이 될 것이다.

MEMS CNT 가스 센서의 가상도를 그림 14에 나타내었는데, 이의 구조를 살펴보면 다음과 같다. 즉, 실리콘 기판 위에 다이아프램이 형성되어 있고, 이 위에 CNT 감응 물질과 가열원이 패터닝되어 배치되어 있다. 다이아프램은 열 및 전기적 절연 구조를 제공하며, 가열원은 감응 물질과 가스 간의 반응을 촉진시키고, 동작 후에 탈기체화시키는 역할을 하는데, 이는 감도 향상을 위해 고려되었으나 완전한 상온 동작이 검증되면 배제될 수 있다. 상부의 가공된 유리 캡 구조물은 가스 분위기 노출, 유입된 가스의 일시 저장, 그리고 센서의 보호 역할을 수행하게 된다. 센서부와 외부간의 전기적 연결은 수직형 피드쓰루(feed-through) 기술을 적용할 수 있으며, 이러한 제반 공정들은 웨이퍼 레벨 제조 및 패키징을 기반으로 한다. 이상과 같은 가상도 및 개념은 기술적인 관점에서 고려한 것이며, 생산성 및 사업화 측면에서 일부 수정될 여지가 있을 것으로 보인다.

CNT 감응 물질의 경우, 현재로서는 불규칙적으로 성장된 CNT가 고려될 수 있으며, 이와 함께 패터닝 등

소자 제작 단계에서는 수직 성장 및 선택적 성장 방식도 함께 고려되어야 하며, CNT의 저항치를 명확히 정의하기 위해서는 측면 성장 방식(lateral growing method)이 효과적일 수도 있다.


그림 15에 RTP(Rapid Thermal Process) 가열법을 적용한 LP-CVD(Low Pressure Chemical Vapor Deposition) 방식에 의해 성장된 MW-CNT의 일례를 보였는데, 각각 불규칙적으로 성장된 모양, 수직 정렬된 모양, 선택적으로 수직 성장된 모양, 그리고 선형적으로 측면 성장된 모양들을 지니고 있다.

MEMS 기술의 경우, 실리콘 기판 위에 부유형 구조물(floating structure)을 형성하는 공정과 유리 가공 후 실리콘과 정전 열 접합하는 공정이 주로 적용될 것으로 판단된다. 부유형 구조물은 기판 뒷면으로부터의 벌크 마이크로머시닝을 적용한 다이아프램 구조나 혹은 앞면으로부터의 식각을 이용하는 구조로서 브리지가 있는 실리콘이나 절연막 다이아프램이 일반적으로 사용된다.

이와 함께 반도체 IC 공정의 경우, 간단한 보상 회로

의 집적화와 웨이퍼 레벨 패키징이 요소 기술이 될 것으로 판단되며, 특히 수율을 고려하지 않은 칩 단위의 공정이 아니라 고수율의 웨이퍼 단위 일괄공정이 확보되어야 한다.

## 맺음말

가스 감응 물질로서 CNT의 활용성과 함께 MEMS 및 IC 공정을 적용한 소자화에 대해 조사 분석한 후 개발 모델을 제시했다. CNT의 우수한 가스 감응 특성이 MEMS 기술과 효과적으로 결합됨으로써 IC 공정을 통하여 제품화될 수 있다면 이는 고성능 센서 및 MEMS 기술의 발전은 물론 나노 기술의 사업화라는 측면에서 긍정적인 충격이 될 것으로 확신한다. 

## 참고문헌

- 주병권, "탄소 나노 튜브," 월간 전자부품 2002. 2.
- 주병권, 이윤희, "나노 기술 -  $\mu\text{m}$ 의 벽을 허물다!," 월간 전자기술, pp.141-148 (2001.10.)
- P.Chan et al., "An integrated gas sensor technology using surface micro-machining," Proc.IEEE-MEMS'2001, pp.543-546 (2001.1.)
- O.Varghese et al., "Gas sensing characteristics of multi-wall carbon nanotubes," Sensors and Actuators, vol.B4074, pp.1-10 (2001)
- P.Collins et al., "Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes," Science, vol.287, pp.1801-1804 (2000.3.)
- J.Kong et al., "Nanotube molecular wires as chemical sensors," Science, vol.287, pp.622-625 (2000.1.)
- G.Kaplan et al., "The how and why of electronic noses," IEEE Spectrum, pp.22-34 (1998.9.)
- 세주실업 web site: <http://safe-drive.co.kr>
- KIST-국가지정연구실(나노응용소자 연구실) web site: <http://ndpl.kist.re.kr>
- KIST-Display and Nano Devices Lab. web site: <http://diana.kist.re.kr>
- Nordic Sensor Technologies web site: <http://www.appliedsensor.com>
- SamLab web site: <http://www-samlab.unine.ch>
- Swedish Sensor Center web site: <http://www.ifm.liu.se/Applphys/S-SENCE>