



Recent progresses in metal oxide gas sensors for food freshness monitoring

Young Kook Moon^{1†}

¹Korea institute of Materials Science (KIMS), 797 Changwon-daero, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51508, Republic of Korea

식품신선도 판단용 산화물반도체형 가스센서 개발 동향

문영국^{1†}

¹한국재료연구원

(Received August 1 2023; Revised August 22 2023; Accepted August 26, 2023)

Abstracts

As the growing demand for fresh and safe food continues, the development of reliable, low-cost, and time-saving methods for freshness investigation becomes increasingly important. Metal oxide gas sensors, which offer distinctive advantages such as high gas response, reversible reaction, and cost-effectiveness, represent valuable tools for monitoring food freshness to avoid rotten meat, spoiled fish, and over-ripened fruit. This paper reviews the recent developments in metal oxide gas sensors for highly sensitive and selective detection of food freshness marker gases, such as hydrogen sulfide, ammonia, trimethylamine, and ethylene. Key approaches include the use of thermal activation, the utilization of chemical affinity between analyte gases and sensing materials, and bilayer structures with catalytic overlayers. Overall, the development of such advanced gas sensors has the potential to greatly improve the efficiency and accuracy of food freshness monitoring, making it more accessible and convenient for food producers and consumers.

Keywords: Food freshness monitoring, Gas sensor, Metal oxide

[†]Corresponding Author: ykmoon@kims.re.kr

1. 서론

농업의 발달과 과학기술의 진보로 인해 인류의 식품 생산력은 획기적으로 개선되었고, 식품의 가용성과 다양성이 증가했다. 이러한 변화로 인해 인류는 단순히 많은 양의 식량을 확보하기 위한 노력에 그치는 것이 아니라 더 나은 질의 식물을 생산하고, 관리하는 것을 추구하게 되었다. 식품에서 발생하는 가스는 다양한 종류의 화합물들이 복합적으로 존재하며 매우 극미량 수준으로 존재한다. 그러나, 미량의 범위 내에서도 그 농도의 차이에 따라 인체가 감지하는 맛과 냄새의 종류는 달라질 수 있어 식품에서 발생하는 가스와 식품의 품질과의 상관관계를 정확하게 이해하는 것이 중요하다. 예를 들어, 황화수소(H_2S), 메틸머캅탄(CH_3SH) 등을 포함한 황화합물은 계란, 유제품 및 육류와 같은 고단백 식품뿐 아니라, 와인의 숙성이나 발효시 발생할 수 있으며, [1] 암모니아(NH_3), 트리메틸아민 (TMA) 와 같은 질소계화합물들은 옥수수과 시금치와 같은 짙은 야채나 생선의 부패시 발생하는 대표적인 가스로 식품신선도의 품질지표역할을 한다고 보고되고 있다. [2] 뿐만 아니라, 에틸렌(C_2H_4)은 식물이나 과일의 숙성시 발생하는 식물호르몬 가스로서 식품의 운반 및 저장시 방출 및 축적되어 식품의 조기 부패를 초래할 수 있다. [3]

식품에서 발생하는 다양한 미량 가스를 정확하게 측정하기 위한 기존의 분석장비는 가격이 비싸고, 부피가 커서 식품의 소비자나 생산자가 즉각적인 측정이 어렵다는 점에서 아직까지 실생활에 적용하기에는 한계점이 있다. [4] 이러한 한계를 극복하기 위하여, 다수의 센서를 어레이로 배열하여 그 반응 패턴을 해석하여 식품신선도 판단에 이용하는 전자코 기술이 연구되고 있다. [4,5] 그러나 전자코 기술은 식품에서 배출되는 복잡한 혼합 가스를 분석하는데 유리하지만, 전자코를 구성하는 센서가 특정 지표가스에 대한 선택성이 낮다면 그 장점을 적절히 활용하기 어렵고 때로는 단일 센서에 비해 가스 감지 능력이 저하될 수도 있다. 따라서 전자 코의 잠재력을 극대화하기 위해서는 선택성이 우수한 센서들로 어레이를 구성해야 하며, 이를 위해 특정 신선도 지표 가스

에 고감도, 고선택성을 나타내는 단일 센서의 개발이 선행되어야 한다.

산화물 반도체형 가스센서는 높은 감도, 빠른 반응속도, 우수한 안정성, 간단한 구조, 초소형화 용이성 등의 장점이 있으므로 경제적이면서도 성능이 우수한 식품신선도 판단센서로 활용 가능성이 높다. [6,7] 그러나 식품신선도 지표가스의 낮은 농도(ppb-ppm), 다양한 방해가스의 존재에 의한 표적가스에 대한 낮은 선택성은 산화물 반도체형 가스센서를 실제상황에 도입하기 위해 해결해야 할 기술적 한계로 존재한다. [8] 본 고에서는 산화물반도체형 가스센서를 통해 식품의 신선도 지표가스를 감지하기 위한 고감도, 고선택성 가스 감응소재 설계 동향에 대해 소개하고, 향후 감응소재의 성능을 향상시킬 수 있는 전략에 대해 토의하고자 한다.

2. 본론

2.1 산화물반도체형 가스센서의 동작온도 변화를 통한 가스 감응특성 조절

산화물반도체형 가스센서는 100-400 °C의 동작온도에서 금속산화물 표면에 흡착되어 있는 이온화된 흡착 산소종과 특정 가스들과의 화학적 흡착 및 탈착 반응에 의해 형성되는 전기적 저항 변화 신호들을 분석하여 가스를 감지하는 원리를 가지고 있다. [9] 예를 들어, n형 산화물반도체형 가스센서의 경우, 주 전하이동자가 전자이기 때문에 금속산화물 표면의 흡착산소와 환원가스와의 반응 또는 금속산화물 표면과 산화가스와의 직접 반응시 전자를 주고받게 되고 이에 따라 금속산화물 표면의 전자공핍층의 두께가 각각 줄어들고 늘어나는 현상에 의해 발생하는 저항변화를 측정하여 특정기체를 감지한다 (Fig. 1. a). 그러나 이러한 금속산화물 기반의 가스센서는 표적가스 이외의 어떠한 기체와 반응을 하더라도 저항변화를 나타낼 수 있기 때문에 복합적인 가스가 존재하는 실제상황에 산화물반도체형 가스센서를 적용하기 위해서는 특정가스에 대한 높은 감도 및 선택성을 확보하는 것이 매우 중요하다.

산화물반도체형 가스센서의 동작온도를 조절하는 것

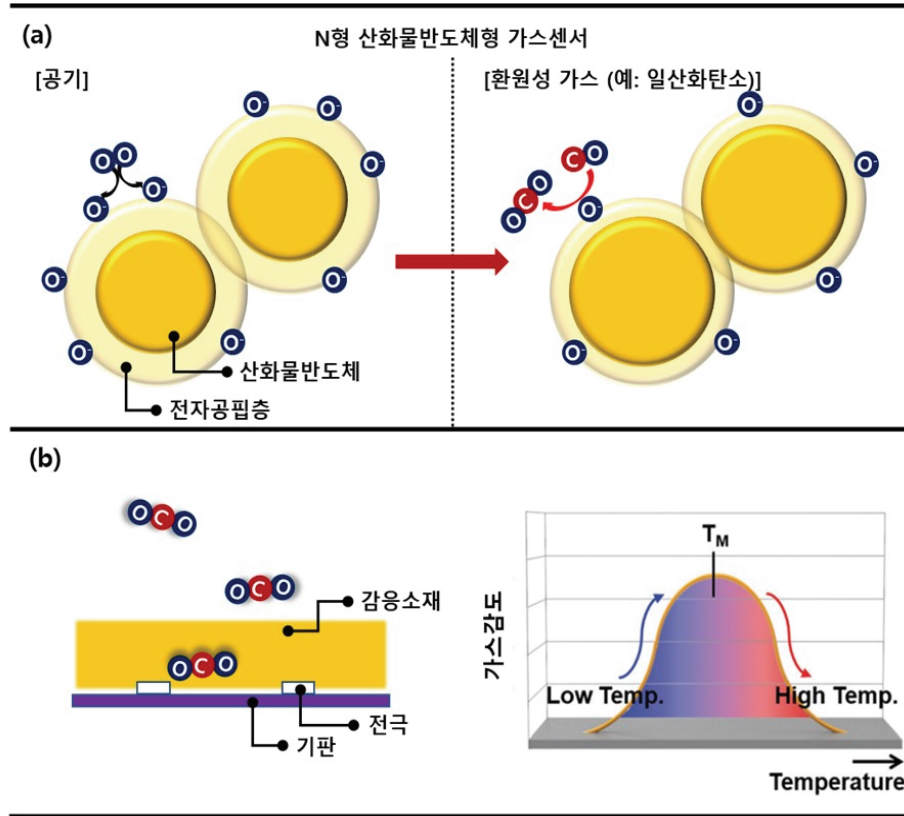


Fig. 1. a. n형 산화물반도체형 가스센서의 가스 감응기구 및 b. 온도별 산화물반도체형 가스센서의 감도 변화 모식도[11]

은 높은 감도와 선택성을 가진 가스 센서를 설계하는 단순하지만 효과적인 접근방법이다.[10,11] Fig. 1. b에 묘사된 것과 같이 가스감응 소재가 두 개의 감지 전극 위에 형성된 경우, 1) 표적가스가 감지막 하단의 전극에 확산되는 정도와 2) 감지막 상단 산화물 표면에 흡착되어 있는 산소이온과 표적가스 간의 산화반응(예: $\text{CO} + \text{O}_{(\text{흡착})} \rightarrow \text{CO}_2$)이 가스 감도의 크기를 결정하는 중요한 역할을 하게 된다. 가스의 확산 및 표면 반응은 열 활성화 과정이기 때문에 감지 온도가 증가함에 따라 두가지 반응은 함께 증가한다. 예를 들어, 낮은 감지 온도에서는 가스의 확산 정도는 느리지만 표적가스가 감응소재의 촉매효과에 의한 산화 없이 주변 대기로부터 하부 감지 영역으로 확산된다. 반면 과도하게 높은 감지 온도에서는 가스의 확산은 빠른 반면 분석 대상 가스가 감지 전극과 가까운 하부 감지 반응까지 이동하는 동안 주변 대기

나 감지 막의 상부에서 반응성이 적은 물질(예: CO_2 또는 H_2O)로 산화되게 되고 이러한 산화반응은 하부 전극 주변에 도달하는 표적가스의 양을 감소시켜 가스의 감도가 감소하게 된다. 마지막으로, 3) 산화물 표면에 있는 이온화 산소의 양은 감응소재의 높은 온도 및 낮은 온도에서 적어지기 때문에 산화물 반도체 가스 센서의 감도는 감지 온도에 따라 종 모양으로 변하는 특성을 보이게 된다. 이렇게 형성된 종 모양의 산화물반도체형 가스센서의 온도별 가스 감응특성은 가스의 분자량, 반응성, 산성도, 극성도 등 복잡한 다양한 요소의 차이에 따라 서로 다르게 형성되게 되며 이를 조율하여 특정가스에 대한 고감도 고선택적인 가스 감응 특성을 확보할 수 있다.[12-14]

식품의 숙성 및 부패과정에서는 다양한 지표가스가 발생하고, 이러한 지표가스를 산화물반도체형 가스센

Table 1. 식품의 숙성 및 부패시 발생할 수 있는 지표가스의 종류

식품	가스	관련내용	참고문헌
생선	Trimethylamine ((CH ₃) ₃ N), triethylamine ((C ₂ H ₅) ₃ N), Ammonia (NH ₃), dimethylamine ((CH ₃) ₂ NH), hydrogen sulfide (H ₂ S), dimethyl sulfide (CH ₃ SCH ₃), dimethyl disulfide (DMDS)	생선 부패	2
육고기, 계란	hydrogen sulfide (H ₂ S), methanethiol (CH ₃ SH), dimethyl disulfide (CH ₃ S ₂ CH ₃), dimethyl trisulfide (CH ₃ S ₃ CH ₃), dimethyl sulfide (CH ₃ SCH ₃)	육고기 및 계란 부패	15, 16
과일	Ethylene (C ₂ H ₄), Alcohols, Aromatic volatiles	과일 숙성	17, 18

서를 통해 검지하기 위한 개발이 많은 연구자들을 통해 진행되고 있다. 다음은 식품에서 발생하는 다양한 가스의 종류 및 본 고에서 언급하고자 하는 황화수소, 암모니아, 트리메틸아민, 에틸렌이 발생하는 주요환경에 대해 정리한 표이다 (Table 1).

그러나 식품의 신선도를 판단하기 위해서는 앞서 언급한 지표가스 이외에 다양한 가스들이 복합적으로 존재하고, 이들은 특정 표적가스를 측정하는 경우 산화물반도체형 가스센서의 방해가스로 작용한다. 뿐만 아니라, 실제 식품에서 발생하는 표적가스의 농도는 ppb-ppm 수준으로 매우 미량 존재하기 때문에 단순히 산화물반도체형 가스센서의 동작온도를 조절하는 것만으로는 식품 신선도 지표가스에 대한 고감도, 고선택성 감응특성을 가지는 감응소재를 개발하기는 한계가 있으며 정확한 신선도 판단을 위해서는 센서의 감도 및 선택성을 향상시킬 수 있는 새로운 방법이 확보되어야 한다.

2.2 황화수소(H₂S)가스센서

황화수소는 세균에 의한 황을 함유하는 아미노산의 이화작용에 의해 발생하는 화합물이며, 계란이나 육류의 식품의 신선도를 나타내는 지표가스로서 활용된다고 보고되고 있다. 따라서, 황화수소의 농도를 정확하게 측정할 수 있다면 식품의 보관이나 운송시 식품의 품질을 빠르고, 편리하게 평가할 수 있다. 그러나 식품의 부패에 의해 발생하는 황화수소의 농도는 매우 낮고 대부분의 식품에서 황화수소 이외의 다른 가스가 혼합되어 발생하기 때문에 황화수소를 고감도 및 고선택적으로 검지하는 감응소재의 개발이 필수적이다. 보고된 데이터에 따르면 10 mL의 계란흰자는 100 mg의 H₂S 가스

를 배출한다고 알려져있다. 이는 식품의 보관 용기 및 온도를 고려하여 농도로 환산한다면 100 ppb미만의 검출한계를 가지는 H₂S센서를 개발하여야 함을 의미한다.[8,19]

다양한 산화물 반도체형 가스센서 중 반도체의 CuO는 황화수소 gas와 반응시 전도성이 있는 CuS로의 변화 ($\text{CuO} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{CuS} + \text{H}_2\text{O}$)가 나타나 급격한 저항변화를 보이기 때문에 황화수소 가스를 선택적으로 검지하는데 매우 유리하다 (Fig. 2. a). Lim등은 Cu와 Fe염과 PVP로 이루어진 복합물질을 근접장 전기방사 방식을 활용하여 나노 섬유를 합성하고 후열처리를 통해 CuO-CuFe₂O₄ 나노섬유를 합성하였다.[20] 합성한 CuO-CuFe₂O₄ 나노섬유는 200 °C의 동작온도에서 방해가스들에 대한 감도는 무시할 수 있을 수준으로 작으며 황화수소에 대해서는 매우 높은 감도를 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다 (Fig. 2. b). 이러한 결과는 p(CuO)와 n(CuFe₂O₄) 사이에 형성된 고저항의 p-n 접합에 의한 감응소재의 민감화와 황화수소와 CuO의 반응에 의한 CuS로의 상변화에 의한 선택적인 가스 감지로 설명되었다. 뿐만 아니라, 상기의 연구에서는 동일 센서의 동작온도를 조절하여 와인의 숙성시 발생하는 황화물 중 하나인 메틸머캅탄(CH₃SH) 역시 고감도 및 고선택적으로 검지하였다 (Fig. 2. c). 이는 분자량이 크고 반응성이 낮은 메틸머캅탄이 황화수소대비 비교적 높은 온도(400 °C)에서 가스감도의 최대점이 있기 때문이며, 상기의 연구 결과는 황화합물 계열의 가스들 각각에 대한 선택적검지가 감응소재와 표적가스의 화학적 친화도 및 동작온도의 조절에 의해서 가능하다는 점을 잘 보여준다.

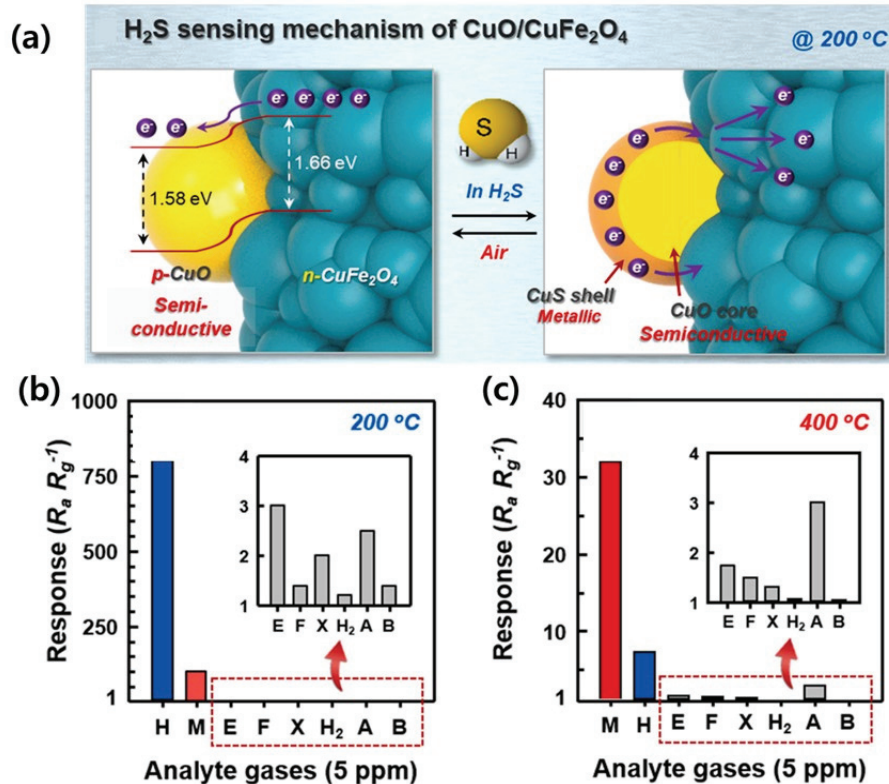


Fig. 2. CuO/CuFe₂O₄ 나노섬유의 a. H₂S 가스 감응 모식도, b. 200 °C, c. 400 °C 에서의 표적가스에 대한 가스 감도(H: 황화수소, M: 메틸 머캅탄, E: 에탄올, F: 포름알데히드, X: 자일렌, H₂: 수소, A: 암모니아, B: 벤젠)[20]

2.3 트리메틸아민 가스센서

트리메틸아민 (TMA)은 전형적인 생선냄새를 유발하는 가스로서 미생물에 의한 트리메틸아민 N-oxide (TMAO)해산물의 분해에 의해 생성된다. 싱싱한 생선의 경우 TMAO의 농도가 높고 TMA의 농도가 매우 낮은 반면, 죽은 생선의 경우 미생물의 분해에 의해 급격하게 TMA 농도가 높아지게 되기 때문에 TMA는 해산물의 신선도를 나타내는 지표 중 하나로 보고되고 있다.[21]

트리메틸아민은 비공유 전자쌍을 가지는 아민계 가스로 산화물 표면 양이온에 형성된 루이스 산성부위에 쉽게 흡착하는 것으로 알려져있다. 따라서 WO₃, MoO₃, Cr₂O₃와 같이 표면에 산성을 띄는 산화물을 가스 감응소재로 사용하거나, 첨가제로 사용한다면 트리메틸아민에 대한 높은 가스 감도와 선택성을 확보할 수 있다.[22-24] Li 등은 전기방사법을 활용하여 합성된

MoO₃ 나노섬유를 통해, 325 °C에서 여러 가스(암모니아, 황화수소, 산화질소, 아세톤, 벤젠, 에탄올, 포름알데히드, 톨루엔, 자일렌)와 트리메틸아민에 대한 가스 감응특성을 보고하였다.[25] 그 결과 MoO₃ 나노섬유는 트리메틸아민에 대하여 약 120 이상의 높은 가스 감도를 나타냈으며 에탄올과 같은 방해가스에 비교하여 약 30 배 이상 우수한 선택성을 보여준다는 사실을 확인했다. MoO₃ 가스감응소재는 트리메틸아민 다음으로 암모니아에 대해서도 비교적 높은 가스 감도를 나타냈는데, 이는 암모니아 역시 트리메틸아민과 같은 비공유 전자쌍을 가지고 있기 때문에 산성의 MoO₃와의 높은 화학적 친화성을 가지기 때문이다. 산성의 물질을 가스 감응소재로 쓰는 것 이외에도 첨가제로 사용하여 트리메틸아민에 대한 우수한 가스 감응특성을 확보할 수 있다. Park등은 역전된 오팔구조의 SnO₂ 감응소재에 Cr₂O₃나

노입자를 이빔진공증착기를 통해 도포하여, 2차원 구조체 형태의 가스 감응소재를 개발하였다 (Fig. 3. a, b). [26] 이를 통해 275 °C에서 SnO₂ 구조체대비 2배 이상의 트리메틸아민 감도 향상을 확보할 수 있었으며, 대표적인 방해가스인 에탄올 대비 높은 가스 선택성 역시 확보할 수 있었다 (Fig. 3. c). 상기의 결과들은 산성의 표면 성질을 가지는 감응소재나 산화물 첨가제를 통해 가스 센서를 제조하는 것이 생선 신선도 판단용 트리메틸아민 가스센서 개발에 매우 효과적임을 잘 보여준다. 이외에도 Rh, Au와 같은 귀금속 촉매를 도포할 경우 상기 센서의 감응특성을 더욱 향상시킬 수 있다는 연구결과들이 있어 향후 관련 연구를 통해 더욱 향상된 트리메틸아민 센서가 개발될 수 있을 것으로 기대된다.[27,28]

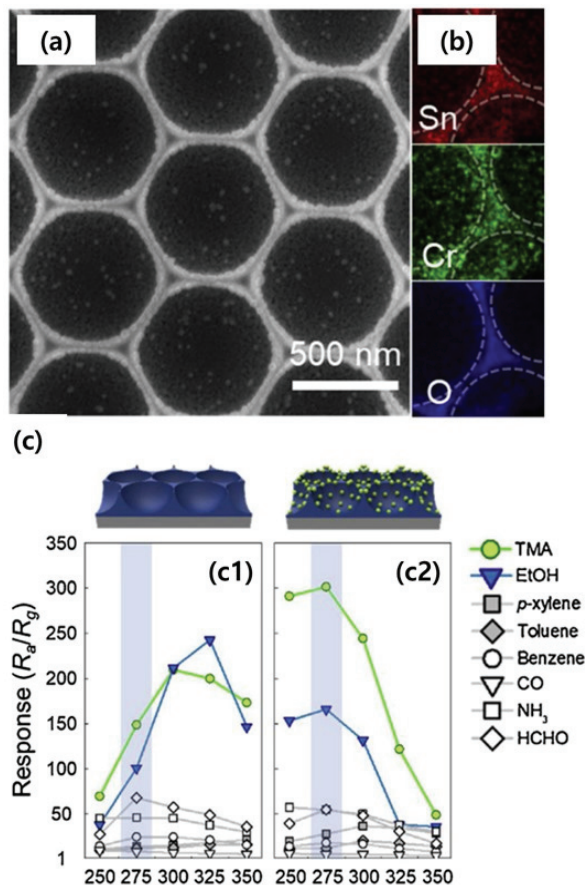


Fig. 3. a, b. Cr₂O₃ 나노입자가 도포된 SnO₂ 역전도 오팔구조의 TEM 및 EDS 이미지, c1. SnO₂ 역전도 오팔구조와 c2. Cr₂O₃ 나노입자가 도포된 SnO₂ 역전도 오팔구조의 가스 감응특성[26]

2.4 에틸렌 가스센서

에틸렌은 대표적인 식물호르몬 가스로 ppb-ppm 수준의 매우 적은 양으로 식물의 생장, 조직 및 기관의 노화, 종자의 발아, 꽃의 개화 및 과일의 숙성 등 식물의 발달과정을 조절하는 가스로 알려져 있다.[29,30] 따라서 미량의 에틸렌농도를 검출할 수 있다면 과일의 저장 및 운송중 숙성도의 조절 및 부패의 방지와 같은 수많은 농업 및 원예 응용분야의 발전을 가속화할 수 있을 것이라 기대된다. 그러나 에틸렌은 매우 단순한 구조 (알켄, C₂H₄)와 더불어 낮은 반응성을 가지고 있어 일반적인 단일 산화물반도체형 가스센서로는 고감도, 고선택적으로 검지하는 것이 어렵다는 한계를 가지고 있다. Ivanov등은 귀금속(금, 백금, 팔라듐)이 첨가된 산화주석(SnO₂)감응소재를 센서어레이로 제작하여 에틸렌, 에탄올, 암모니아 및 이들의 이원 혼합물에 대한 센서 반응을 조사하였다.[30] 각각의 감응소재는 특정가스에 대한 고감도, 고선택성을 가지지는 못하지만 에틸렌을 포함한 다른 방해가스들에 부분 선택성을 보임으로써 상기의 센서어레이는 저농도의 에틸렌을 다른 방해가스들과 구분할수 있었으며 농도별 분별이 가능하였다. 연구결과는 표적가스인 에틸렌을 고감도, 고선택적으로 검지하지 못하는 감응소재를 조합하고 이들 가스 감응패턴의 신호처리를 통해 에틸렌의 정량적 검지가 가능함을 보여주고 있다. 그러나, 신호처리를 통한 에틸렌가스의 선택적 검지를 다양한 종류의 방해가스가 혼재되어있는 실제 상황에 적용하기 위해서는 감응소재 자체의 고감도 및 고선택성을 확보하는 것이 선행되어야 한다.

Jeong등은 반응성이 낮은 에틸렌에 대한 선택성을 확보하기 위해 산화주석 감응층의 두께를 조절함과 동시에 산화 촉매활성이 매우 높은 Cr₂O₃ 촉매층을 산화주석 감응층 위에 도포함으로써, 반응성이 높은 방해가스들을 반응성이 낮거나, 없는 종 (예: CO₂, H₂O등)으로 완전 산화시킴으로써 에틸렌에 대한 선택성을 확보할수 있었다.[31] 상기의 결과는 에틸렌에 대한 고선택적인 특성은 확보할 수 있었으나, 식물에서 발생하는 낮은 농도의 에틸렌을 정확하게 측정하기 위해서는 에틸렌에 대한 고감도 감응특성을 확보하는 것이 중요하다. Moon

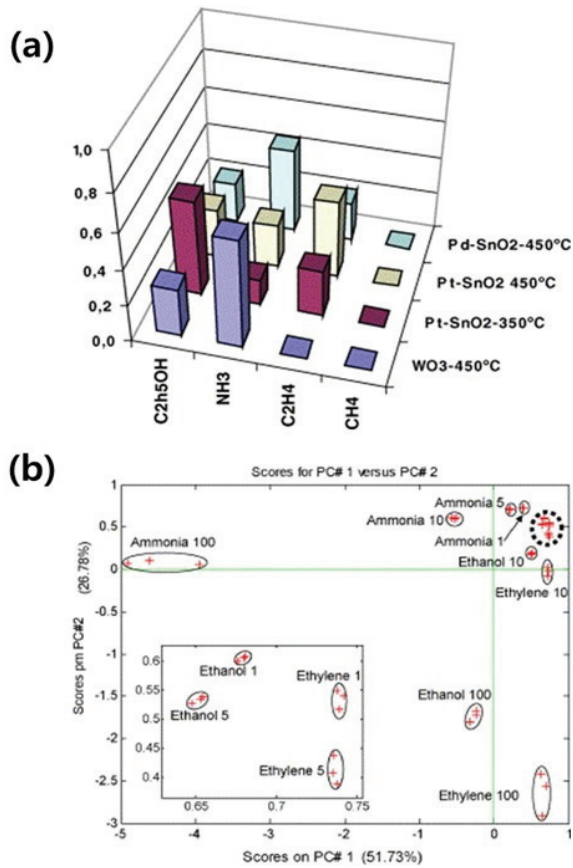


Fig. 4. a. 귀금속이 첨가된 SnO₂ 가스센서의 에탄올, 암모니아, 에틸렌, 메탄에 대한 가스 감응특성, b. 감응소재의 가스감도 결과로부터 도출된 PCA 결과[30]

등은 반응성이 낮은 에틸렌을 반응성이 높은 아세트알데히드로 개질시키는 Wacker oxidation 촉매를 산화물 반도체 감응층 상단에 도포하여 에틸렌에 대한 고감도 고선택적 특성을 보이는 이중층 센서를 개발하였다.[32] 센서는 Pd-V₂O₅-TiO₂ 난황구조로 이루어진 상단의 Wacker oxidation 촉매층을 통해 에틸렌을 아세트알데히드로 개질시킴과 동시에, 다른 방해가스들을 반응성이 낮거나 없는 종으로 변환시킬 수 있음을 확인하였으며, 이러한 촉매층을 In₂O₃ 감응층에 도포하였을 때 300 °C에서 1 ppm의 에틸렌에 대해 20배 이상의 가스감도를 나타냈으며 다른 방해가스 대비 4배 이상의 선택성을 확보할 수 있었다 (Fig. 5. a). 상기의 결과는 기존의 단일센서로서 감지하기 어려웠던 에틸렌가스를 이중층

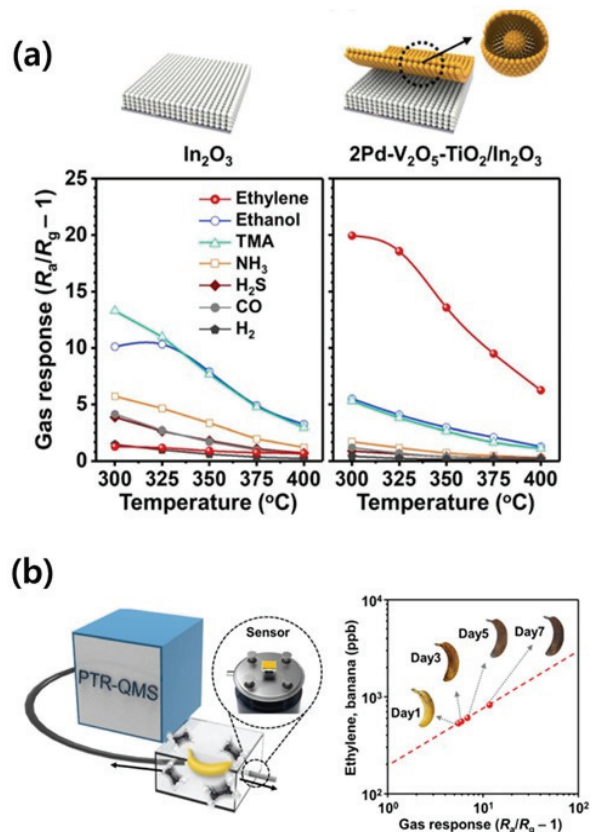


Fig. 5. a. In₂O₃ 단일층과 Pd-V₂O₅-TiO₂/In₂O₃ 이중층 센서의 가스감응특성, b. 바나나의 숙성에 따라 발생하는 PTR-QMS로 측정된 에틸렌의 농도 및 Pd-V₂O₅-TiO₂/In₂O₃ 이중층 센서의 가스감도와와의 상관관계[28]

구조를 활용할 경우 고감도, 고선택적으로 감지할 수 있다는 것을 확인시켜주는 결과이다. 뿐만 아니라, 상기의 센서는 과일(바나나)의 숙성에 대한 PTR-QMS(proton transfer reaction-mass spectrometry)와의 교차 검증을 통해 실제 과일의 숙성시 발생하는 에틸렌을 매우 정밀하게 분석할 수 있음을 증명했으며, 이는 잘 설계된 산화물 반도체형 가스센서가 식품신선도의 판단시 고가의 분석장비들을 충분히 대체할 수 있다는 점을 잘 보여 준다 (Fig. 5. b).

3. 결론

본 고에서는 식품의 보관시에 활용될 수 있는 식품신

선도 판단용 지표가스(황화수소, 트리메틸아민, 에틸렌)에 대한 고성능 산화물 반도체형 가스 센서의 설계 방안에 대해 고찰하였다. 특정가스에 대한 고감도 및 고선택성을 확보하기 위해 가스센서의 동작온도 조절 가스와 화학적으로 친화성이 높은 감응 소재의 활용, 산화물 및 귀금속 첨가제의 도핑, 촉매층을 이용한 방해 가스의 필터링 및 표적 가스의 개질 등의 방안을 고찰하였다. 이러한 방법들은 본 연구에서 언급한 식품 신선도 지표가스 이외의 다른 가스에 대한 고성능 특성 확보에도 활용될 수 있다.

식품은 실제로 다양한 종류의 가스를 발생시키며, 이러한 가스들은 식품의 신선도에 복합적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 우수한 선택성을 갖는 단일 센서들을 먼저 개발하고, 이들을 고성능 센서 어레이로 구성하여 전자 코를 형성한다면, 식품의 생산자 및 소비자가 간편하게 식품의 신선도를 판단할 수 있는 잠재력을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. A. Casaburi, P. Piombino, G. J. Nychas, F. Villani, D. Ercolini, *Food Microbiology*, **45**, 83-102 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.02.002>
2. K. Wu, M. Debliquy, C. Zhang, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **22**, 913-945 (2023). <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13095>
3. N. Keller, M. N. Ducamp, D. Robert, V. Keller, *Chem. Rev.*, **113**, 5029-5070 (2013). <https://doi.org/10.1021/cr900398v>
4. M. Nurjuliana, Y. B. Che Man, D. Mat Hashim, A.K.S. Mohamed, *Meat Sci.*, **88**, 638-644 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.02.022>
5. A. Berna, *Sensors*, **10**, (2010), 3882-3910. <https://doi.org/10.3390/s100403882>
6. D. R. Miller, S. A. Akbar, P. A. Morris, *Sens. Actuators, B*, **204**, 250-272 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.07.074>
7. G. Zambotti, R. Capuano, V. Pasqualetti, M. Soprani, E. Gobbi, C. D. Natale, A. Ponzoni, *Sensors*, **22**, 5888 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22155888>
8. Z. Yuan, M. Bariya, H. M. Fahad, J. Wu, R. Han, N. Gupta, A. Javey, *Adv. Mater.*, **32**, 1908385 (2020). <https://doi.org/10.1002/adma.201908385>
9. H.-J. Kim, J.-H. Lee, *Sens. Actuators, B*, **192**, 607-627 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.005>
10. S.-Y. Jeong, J.-S. Kim, J.-H. Lee, *Adv. Mater.*, **32**, 2002075 (2020). <https://doi.org/10.1002/adma.202002075>
11. Y. K. Moon, K. B. Kim, S.-Y. Jeong, J.-H. Lee, *Chem. Commun.*, **58**, 5439-5454 (2022). <https://doi.org/10.1039/D2CC01563C>
12. T. Jinkawa, G. Sakai, J. Tamaki, N. Miura, N. Yamazoe, *J. Mol. Catal. A Chem.*, **155**, 193-200 (2000). [https://doi.org/10.1016/S1381-1169\(99\)00334-9](https://doi.org/10.1016/S1381-1169(99)00334-9)
13. Y.-M. Jo, K. Lim, J. W. Yoon, Y. K. Jo, Y. K. Moon, H. W. Jang, J.-H. Lee, *ACS Cent. Sci.*, **7**, 1176-11823 (2021). <https://doi.org/10.1021/acscentsci.1c00289>
14. H. J. Choi, J.-H. Chung, J.-W. Yoon, J.-H. Lee, *Sens. Actuators, B*, **338**, 129823 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129823>
15. T. M. Lovestead, J. B. Thomas, *Food Chemistry*, **121**, 1274-1282 (2010). <https://doi.org/10.1031/2013.27837>
16. J. Koskela, J. Sarfraz, P. Ihalainen, A. Määttänen, P. Pulkkinen, H. Tenhu, T. Nieminen, A. Kilpelä, J. Peltonen, *Sens. Actuators, B*, **218**, 89-96 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.093>
17. B. Esser, J. M. Schnorr, T. M. Swager, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 5752-5756 (2012). <https://doi.org/10.1002/anie.201201042>
18. M. Benady, J. E. Simon, D. J. Charles, G. E. Mile, *Trans. ASAE*, **38**, 251-257 (1995). <https://doi.org/10.13031/2013.27837>
19. W. Katiyo, H. L. de Kock, R. Coorey, E. M. Buys, *LWT*, **128**, 109468 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109468>
20. K. Lim, Y.-M. Jo, S. Kim, J.-W. Yoon, S.-Y. Jeong, J.-S. Kim, H. J. Choi, Y. Cho, J. Park, Y. W. Jeong, J.-H. Lee, *Sens. Actuators, B*, **348**, 130665 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130665>
21. K. Mitsubayashi, Y. Kubotera, K. Yano, Y. Hashimoto, T. Kon, S. Nakakura, Y. Nishi, H. Endo, *Sens. Actuators, B*, **103**, 463-467 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.05.006>
22. Y. H. Cho, Y. C. Kang, J.-H. Lee, *Sens. Actuators*,

- B, **176**, 971-977 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.10.044>
23. Y. H. Cho, Y. N. Ko, Y. C. Kang, I.-D. Kim, J.-H. Lee, *Sens. Actuators, B*, **195**, 189-196 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.01.021>
24. C.-H. Kwak, H.-S. Woo, J.-H. Lee, *Sens. Actuators, B*, **204**, 231-238 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.07.084>
25. H.-Y. Li, L. Huang, X.-X. Wang, C.-S. Lee, J.-W. Yoon, J. Zhou, X. Guo, J.-H. Lee, *RSC Adv.*, **7**, 3680-3685 (2017). <https://doi.org/10.1039/C6RA26280E>
26. Y. H. Cho, X. Liang, Y. C. Kang, J.-H. Lee, *Sens. Actuators, B*, **207**, 330-337 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.10.001>
27. C. Zhao, J. Shen, S. Xu, J. Wei, H. Liu, S. Xie, Y. Pan, Y. Zhao, Y. Zhu, *Food Chem.*, **392**, 133318 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133318>
28. Q. Chao, M. Rothenberg, R. Solano, G. Roman, W. Terzaghi and J. R. Ecker, *Cell*, **89**, 1133-1144 (1997). [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(00\)80300-1](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(00)80300-1)
29. A. J. Hamilton, G. W. Lycett and D. Grierson, *Nature*, **346**, 284-287 (1990). <https://doi.org/10.1038/346284a0>
30. P. Ivanov, E. Llobet, A. Vergara, M. Stankova, X. Vilanova, J. Hubalek, I. Gracia, C. Cané, X. Correig, *Sens. Actuators, B*, **111-112**, 63-70 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.06.064>
31. S.-Y. Jeong, Y. K. Moon, T.-H. Kim, S.-W. Park, K. B. Kim, Y. C. Kang, J.-H. Lee, *Adv. Sci.*, **7**, 1903093 (2020). <https://doi.org/10.1002/advs.201903093>
32. Y. K. Moon, J. H. Kim, S.-Y. Jeong, S. M. Lee, S. J. Park, T. H. Kim, J.-H. Lee, Y. C. Kang, *J. Mater. Chem. A*, **11**, 666-675 (2023). <https://doi.org/10.1039/D2TA08425B>

◎◎ 문영국



- ◎ 2018년 고려대학교 학사
- ◎ 2023년 고려대학교 박사
- ◎ 2023년 한국재료연구원 선임연구원