

산화물 반도체형 후막 가스 센서의 이산화질소 감지 특성

김승렬*, 윤동현*, 홍형기*, 권철한*, 이규정*

NO₂ Sensing Properties of Oxide Semiconductor Thick FilmsSeung-Ryeol Kim*, Dong Hyun Yun*, Hyung-Ki Hong*, Chul Han Kwon*,
and Kyuchung Lee*

요 약

산화물 반도체를 이용한 후막형 가스센서의 이산화질소에 대한 감지특성을 조사하였다. 기본 감지물질로는 WO₃, SnO₂, ZnO를 사용하였고, 여기에 다른 산화물 반도체를 소량 첨가하여 이산화질소에 대한 감지특성을 실험하였다. 동작온도에 따른 후막센서의 감지특성에서 감도, 회복특성을 고려할 때, WO₃와 SnO₂계 감지물질은 300°C, ZnO계 감지물질은 220~260°C 정도의 동작온도에서 최적의 감지특성을 보였다. 그러나, ZnO계 감지물질은 큰 센서저항으로 인해 안정한 신호를 얻을 수 없었다. 오존, 암모니아, 에탄올, 메탄, 일산화탄소/프로판 혼합 가스에 대한 선택성 실험에서 WO₃-ZnO(3 wt.%)와 SnO₂-WO₃(3 wt.%) 후막센서가 가장 우수한 이산화질소 감지특성을 보였다. 또한, 이들 후막센서들은 반복실험 및 농도의존성 실험을 통해서도 우수한 신호재현성을 보였으며 특히, 1 ppm 이하의 이산화질소를 검지, 정량화할 수 있음을 보여 주었다.

Abstract

The thick films of oxide semiconductors such as WO₃, SnO₂ and ZnO for the NO₂ detection of sub-ppm range have been prepared and their characteristics were investigated. It is showed that the optimum operating temperatures of the sensors are 300°C and 220~260°C for WO₃-based and SnO₂-based thick films, and ZnO-based thick films, respectively. Since the resistance of ZnO-based thick films are extremely high(>10⁶Ω), the signal to noise ratio was comparatively low. In order to determine the selectivity, the films are exposed to the interfering gases such as ozone, ammonia, methane and the mixture of carbon monoxide and propane. WO₃-ZnO(3 wt.%) and SnO₂-WO₃(3 wt.%) thick film sensors show high sensitivity, good selectivity, excellent reproducibility and the linearity of NO₂ concentration versus sensor resistance. The preliminary results clearly demonstrated that the sensor can be successfully applied for the detection of NO₂ in sub-ppm range.

1. 서 론

산업화에 따른 대기환경오염이 심화됨에 따라 쾌적

한 삶을 보장하기 위한 환경유지 및 제어체계의 필요성이 높아가고 있다. 서로 다른 원인을 갖는 배출가스의 농도측정은 현재까지 주로 광학을 이용한 분석적인 기술에 의존하고 있지만,^[1] 이 방법은 고가이고 운반 및 조작이 용이하지 못하기 때문에 일반적인 사용에는 한계를 지니고 있다. 따라서 저가이고 휴대 및 사용이

* LG종합기술원, 소재재료연구소(LG Corporate Institute of Technology, Devices and Materials Laboratory)

<접수일자 : 1997년 10월 20일>

간편하며 고 감도의 우수한 선택성을 지닌 오염도 측정기가 필요하게 되었으며, 가스센서는 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 대안으로 부각되고 있다.

대기오염의 주원인 가운데 하나인 이산화질소는 연소공기 및 연료 중에 포함된 질소성분이 고온에서 산소와 결합하여 생성되는 대기오염물질로, 아황산가스와는 달리 원천 감소가 불가능하고 자동차의 증가로 매년 그 오염도가 상승하고 있다. ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)는 대기 중의 이산화질소에 대한 허용농도를 3 ppm으로 규정하고 있으며, 그 이하의 저 농도에서도 지속적인 노출은 인체 및 동식물의 생육에 직접 영향을 미칠 뿐만 아니라 산성비의 생성과 오존 등의 2차 대기오염물질을 생성하기 때문에 현재 대기환경기준은 150 ppb/hr로 정해져 있다.^[2]

대기 중의 이산화질소를 측정하기 위한 가스센서의 개발에는 NASICON을 이용한 고체전해질 센서,^[3,4] 프탈로시아닌이나 산화물 반도체를 이용한 반도체형 센서,^[5,8] 압전소자를 이용한 센서^[9,10] 등과 같은 다양한 감지재료와 소자들을 이용하여 활발히 연구되고 있다. 그러나, 이들 연구가 대부분 배출가스 즉, 수직에서 수백 ppm의 고농도 이산화질소를 측정하는데 목표를 두고 있기 때문에, 대기 중의 이산화질소 측정을 위한 저농도 측정용 센서의 개발은 상대적으로 부진한 것 또한 사실이다.

본 연구에서는 박막공정에 비해 공정편의성 및 응용성에 있어서 장점을 지닌 후막공정^[11]을 이용하여 다양한 산화물 반도체를 감지막으로 하는 후막센서를 제조하였다. 이산화질소 센서의 모물질로 이용되고 있는 산화물 반도체 가운데 WO_3 는 이에 대한 감지특성이 매우 우수한 것으로 알려져 있으며, 이 외에도 SnO_2 와 ZnO 를 기본 감지물질로 하는 가스센서에서도 이산화질소에 대한 우수한 감지특성이 보고되고 있다.^[6,8] 본 연구에 앞선 기초 연구로서 다양한 산화물 반도체 및 그 혼합물과 이들의 제조조건 변화에 따른 실험 결과에서도 WO_3 , SnO_2 , ZnO 계 감지물질을 사용한 후막센서들이 우수한 이산화질소 감지특성을 보였다.^[12] 따라서 본 연구에서는 WO_3 , SnO_2 , ZnO 를 기본 감지물질로 하는 후막센서의 이산화질소 감지특성을 살펴보았으며, 이러한 연구는 범용 이산화질소 가스센서 개발에 있어서 센서의 감지막 설계에 기초를 제공할 수 있다.

II. 실 험

그림 1은 본 연구에서 사용한 후막형 가스센서를 나타낸 것으로, 알루미늄 기판(크기: 3.5mm × 3.5mm × 0.25mm)의 한쪽 면에 백금전극과 히터, 그리고 전극 위에 감지막이 형성된 구조로 되어 있다. 서로 분리되어 있는 한 쌍의 히터는 센서의 동작회로에서 직렬로 연결되어 하나의 전원으로 구동된다. 후막 가스센서의 제조에는 일반적인 후막제조기술인 스크린 인쇄법을 사용하였으며, 그 제조공정은 그림 2와 같다. 감지물질로는 상업용 분말(Aldrich Co.)을 사용하였으며, 기본 감지물질은 WO_3 , SnO_2 , ZnO 이다. 첨가물질로는 WO_3 의 경우에는 NiO , TiO_2 , ZnO 를, SnO_2 와 ZnO 의 경우에는 WO_3 를 각각 기본 감지막 물질에 3 wt.% 함량으로 첨가하였다. 이렇게 혼합된 분말들은 각각 유기용제과 혼합하여 감지물질 페이스트(paste)로 준비하였다. 동시에 세척된 알루미늄 기판 위에 백금 페이스트(Heraeus Inc.)를 사용하여 그림 1과 같은 히터와 전극을 스크린 인쇄하고, 1100°C에서 1시간 동안 열처리하였다. 그리고 앞에서 준비한 감지물질 페이스트를 각각의 전극 위에 스크린 인쇄한 후, 800°C에서 열처리하여 그림 1과 같은 센서소자를 만들었다. 마지막 공정으로 히터와 전극의 패드 부분에 백금 선을 부착시킨 후, 개별 센서로 패키징하였다. 이렇게 제조된 각각의 센서들은 공기 중에서 600°C로 수 일간 안정화 과정을 거친 후 실험에 사용하였다.

그림 3은 이산화질소 센서의 실험장치로서, 센서 cell은 4개의 개별센서를 동시에 장착할 수 있으며, 센서 cell로 도입되는 공기와 이산화질소는 solenoid valve를 이용하여 선택적으로 제어할 수 있다. 즉, 백

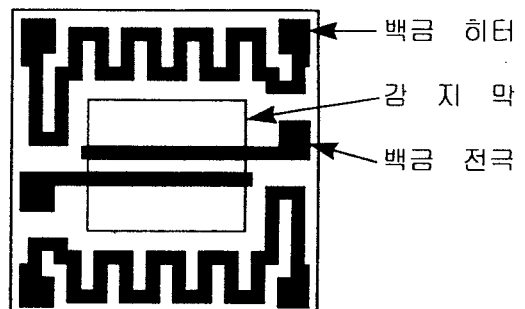


그림 1. 후막형 가스센서

Fig. 1. Schematic view of the thick film gas sensor.

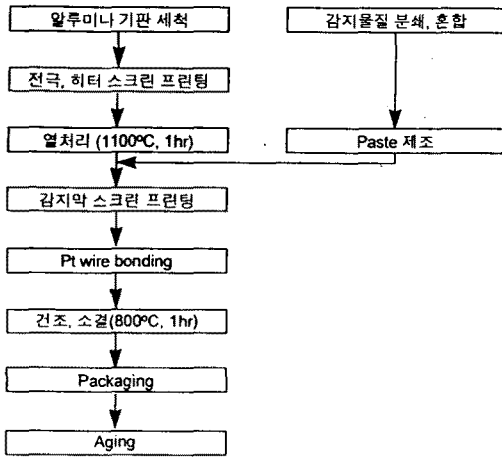


그림 2. 후막센서의 제조공정
Fig. 2. Processing steps of the thick film sensor.

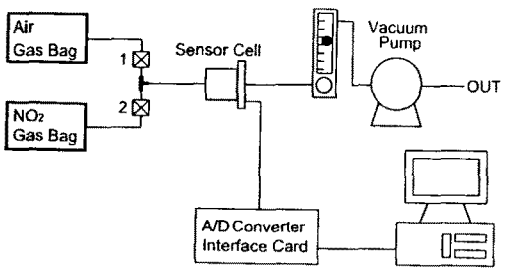


그림 3. 실험장치
Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup.

브 1이 열리면, 진공펌프의 흡입에 의해 gas bag에 포장된 공기가 cell로 도입되고, 밸브 2가 열리면 이산화질소가 cell로 도입된다. 여기서 이산화질소는 표준가스(5.71 ppm/N₂ base)를 구입하여 공기와 부피비로 혼합, 희석함으로써 원하는 농도의 이산화질소를 준비하였다. 실험은 공기흐름 하에서 센서가 안정화된 후, 5분 동안 센서를 이산화질소 흐름에 노출시켜 감도를 측정하고, 다시 5분 동안 공기흐름을 도입하여 회복실험을 하였다. 그리고 실험 후에는 공기흐름 하에서 센서를 5분 동안 500°C로 처리하여 센서 신호를 회복시킨 후, 다음 실험을 하였다. 이때 도입되는 이산화질소와 공기흐름은 2,000 ml/min으로 유지하였으며, 모든 센서출력은 개인용 컴퓨터를 사용하여 on-line으로 측정하였다. 센서의 동작온도는 히터에 인가되는 전압을 변화시킴에 따른 감지막의 표면온도를 비접촉식 적외선온도계(Infrared

Thermometer IT-340, Horiba. Ltd.)로 측정하였다. 또한, 후막센서의 이산화질소 감지특성은 공기 중에서의 센서저항(R_a)과 측정가스 분위기 하에서의 센서저항(R_g)을 측정, 비교함으로써 얻었다.

III. 결과 및 고찰

1. 첨가물 및 동작온도의 영향

그림 4와 5는 기본 감지물질인 WO₃, SnO₂, ZnO 및 기본 감지물질에 다른 산화물 반도체가 미량(3 wt.%) 첨가된 혼합 감지물질들의 동작온도에 따른 이산화질소 감지특성이다. 여기서 R_{a1} 은 이산화질소 도입 전에 공기 중에서 안정화된 센서의 저항이고, R_g 는 측정가스(5.71 ppm 이산화질소)에 5분 동안 노출되었을 때의 저항이며, R_{a2} 는 R_g 측정 후에 다시 공기를 도입하여 5분간 회복실험을 했을 때의 센서저항이다. 센서의 기본적인 특성은 기본 감지물질의 종류에 따라서 결정되지만, 첨가물은 센서저항, 감도, 응답 및 회복속도 등의 센서특성에 영향을 준다. 또한, 동작온도에 따라서는 센서특성이 변하게 된다. 그림 4에서는 첨가물로 인해 센서 저항(R_{a1})이 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 첨가물의 도핑(doping) 효과, 혼합물의 입자성장 및 다양한 물리화학적 요인이 관계하기 때문에 정량적인 해석을 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 동작온도가 증가하면 센서의 저항이 감소하는 경향을 보이지만, 센서의 감도는 감소함을 알 수 있다. 특히, 500°C 이상의 고온에서는 모든 센서가 이산화질소에 대해 거의 응답 특성을 보이지 않았다. 하지만, 동작온도의 증가는 회복 속도(R_{a2}/R_{a1})를 향상시켰으며, WO₃에 미량의 NiO, TiO₂, ZnO를 첨가하였을 때에는 순수한 WO₃의 경우와 비교할 때, 300°C 이상의 높은 동작온도에서도 센서의 큰 감도(R_g/R_{a1})가 유지되었다.

SnO₂와 ZnO를 기본 감지물질로 하는 경우에는 WO₃를 첨가하면 센서저항이 감소하는 경향이 관찰되지만(그림 5), 공기 중에서의 저항(R_{a1})이 WO₃의 경우에 비해 매우 큼을 알 수 있다. 산화성 가스인 이산화질소는 n-type 감지막의 저항을 증가시키기 때문에, 이 경우에는 이산화질소의 도입에 따라 센서의 저항이 더욱 증가된다. 따라서 높은 저항값에 기인한 센서의 신호처리에 잡음 등의 문제를 일으킬 수 있으므로, 센서의 저항값이 센서개발에 있어 중요한 요소로 고려되어야 한다.

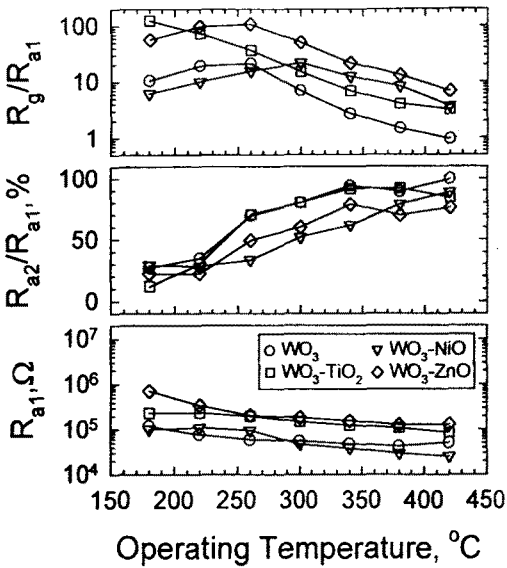


그림 4. 동작온도에 따른 WO₃계 후막센서의 이산화질소(5.71 ppm) 감지특성

Fig. 4. Sensing properties of WO₃-based thick film sensors to 5.71 ppm NO₂ at various operating temperatures.

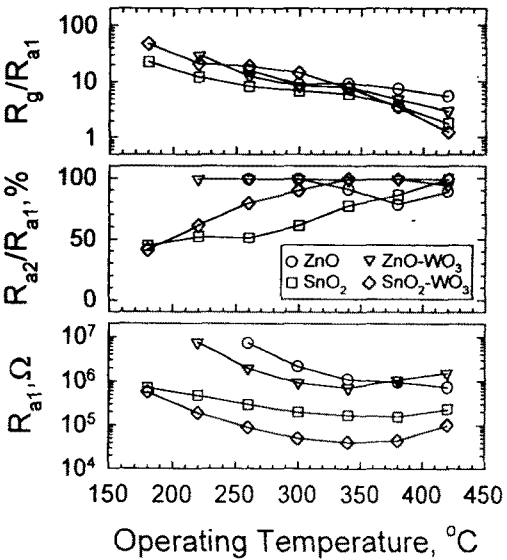


그림 5. 동작온도에 따른 SnO₂계 및 ZnO계 후막센서의 이산화질소(5.71 ppm) 감지특성

Fig. 5. Sensing properties of SnO₂-based and ZnO-based thick film sensors to 5.71 ppm NO₂ at various operating temperatures.

센서의 감지특성 가운데 고려되어야 할 것 중의 하나가 응답 및 회복속도이다. 본 연구에서 사용된 물질들 가운데, SnO₂의 응답 및 회복속도가 가장 우수했으며, WO₃가 가장 느린 응답 및 회복속도를 보였다. 하지만, WO₃의 경우에는 첨가물의 도입으로 응답 및 회복속도의 증진을 확인할 수 있었으며, 특히, ZnO를 첨가하였을 때 감도뿐만 아니라 응답 및 회복속도에 있어서도 우수한 특성을 보였다. 또한 그림 4와 5의 실험에서 5.71 ppm은 안정성 기준으로 볼 때, 높은 농도이기 때문에 ppm 이하의 농도를 측정하기 위해서는 센서들의 이산화질소에 대한 감도(R_g/R_{a1})가 어느 정도 이상이 되어야 하기 때문에 본 연구에서는 그 기준을 10 정도로 하고, 센서저항, 회복성, 응답 및 회복속도 등을 고려하여 센서의 동작온도를 결정하였다. 즉, WO₃와 SnO₂계 후막센서의 경우에는 300°C, ZnO와 ZnO-WO₃(3 wt.%)의 경우에는 각각 260과 220°C로 동작온도를 정하여 센서의 이산화질소 감지특성에 대한 선택성, 신호재현성, 농도의존성에 대한 실험을 하였다.

2. 선택성

그림 6과 7은 WO₃와 SnO₂계 감지물질의 경우에는 300°C, ZnO와 ZnO-WO₃(3 wt.%)의 경우에는 각각 260과 220°C의 동작온도에서 개별 센서들의 타 가스에 대한 선택성 실험결과이다. 선택성 실험을 위한 가스로는 산화성 가스인 5.71 ppm 이산화질소, 100 ppb 오존과 환원성 가스인 370 ppm 암모니아, 85 ppm 에탄올, 880 ppm 메탄, 그리고 490 ppm 일산화탄소와 50 ppm 프로판의 혼합 가스를 사용하였으며, 사용한 가스 및 가스농도는 실제 환경의 대기환경기준에 포함되도록 선택하였다. 실험결과로부터 산화성 가스인 오존과 이산화질소는 센서저항의 증가를, 환원성 가스인 나머지 가스들은 센서저항의 감소를 가져옴을 알 수 있다.

그림 6은 WO₃를 기본 감지물질로 하는 센서들의 타 가스에 대한 선택성 실험결과로서 이산화질소뿐만 아니라, 산화성 가스인 오존과 환원성 가스인 암모니아, 에탄올, 메탄에 대해 응답을 보였다. 이러한 타 가스에 대한 응답특성은 같은 산화성 가스인 오존의 경우와는 이산화질소에 대한 감도와 비교할 때는 그 감도가 매우 작다. 또한, 환원성 가스인 경우에는 센서의 저항이 반대로 변하기 때문에 이들 가스를 이산화질소로 잘못 인식할 가능성은 없으며, 감도(저항변화)가 작기 때문에 이산화질소와 동시에 도입될 경우에도 이산

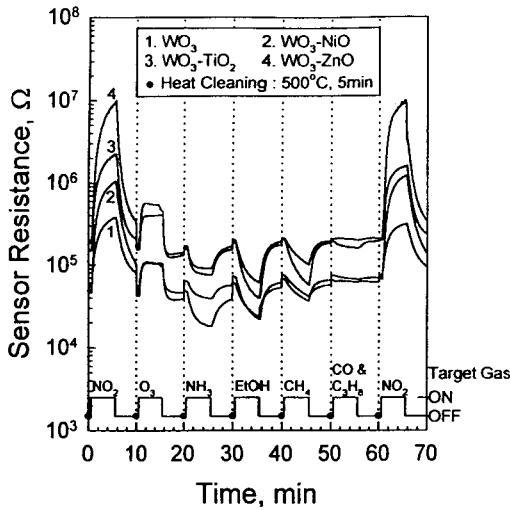


그림 6. WO_3 계 후막센서의 선택성

Fig. 6. Selectivity of WO_3 -based thick film sensors.

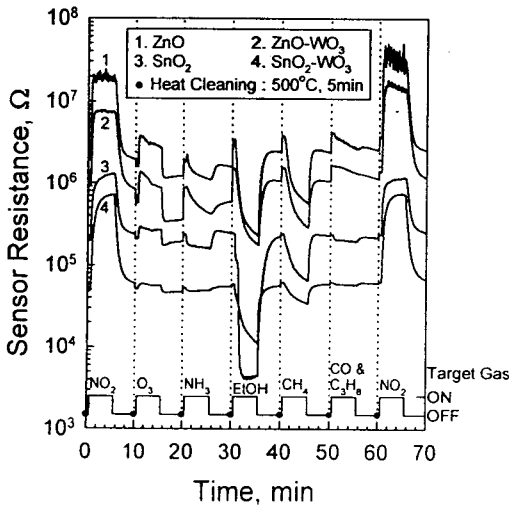


그림 7. SnO_2 계 및 ZnO 계 후막센서의 선택성

Fig. 7. Selectivity of SnO_2 -based and ZnO -based thick film sensors.

화질소 측정에는 큰 영향을 주지 못할 것으로 기대된다. 특히, WO_3 - ZnO (3 wt.%)의 경우에는 타 가스에 비해 이산화질소에 대한 상대적으로 큰 응답특성을 확인할 수 있다. 하지만, WO_3 를 기본 감지물질로 하는 센서들은 ZnO 와 SnO_2 가 기본 감지물질인 센서와 비교할 때(그림 7), 이산화질소 측정에 있어서 느린 응답 및 회복속도를 보였다. 그림 7은 ZnO 와 SnO_2 를 기본 감

지물질로 하는 센서의 선택성 실험결과이다. SnO_2 의 경우에는 대부분의 가스에 대해 우수한 선택성을 보이지만, 메탄과 특히, 에탄올에 대해서는 상당히 큰 감도를 나타내었다. 환원성 가스인 에탄올과 메탄에 대해 센서 저항은 이산화질소와는 반대로 변하지만, 센서가 이들 가스에 대해 큰 감지특성을 지니고 있기 때문에 이산화질소와 동시에 존재할 경우에는 이산화질소의 농도를 측정하는데 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 메탄과 에탄올에 대한 선택성 문제는 SnO_2 의 경우에는 WO_3 를 첨가함으로써 선택성이 크게 개선되었지만, WO_3 의 첨가에도 불구하고 큰 감지특성을 보이는 에탄올에 대한 선택성 확보가 해결 과제로 남아 있다. 감지막이 ZnO 인 경우에는 WO_3 나 SnO_2 를 기본 감지막으로 사용한 센서의 경우와 비교할 때 상대적으로 이산화질소에 대한 감도가 작기 때문에 타 가스에 대한 선택성이 두드러지지 않음을 알 수 있으며, 이러한 특성은 첨가물로 WO_3 를 첨가한 경우에도 선택성에 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다. 따라서 ZnO 를 기본 감지물질로 사용하는 경우에는 다른 기본 감지물질에 비해 월등히 빠른 응답 및 회복속도를 나타내었지만, 큰 센서 저항으로 인해 이산화질소 측정시 신호의 잡음과 그에 따른 안정한 측정신호를 확보할 수 없기 때문에 다음의 실험대상에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 WO_3 및 SnO_2 를 기본 감지물질로 하는 센서들 가운데 첨가물에 의해 선택성 등의 센서특성이 향상된 WO_3 - ZnO (3 wt.%)와 SnO_2 - WO_3 (3 wt.%) 후막센서를 사용하여 신호재현성 및 농도의존성에 대한 실험을 수행하였다.

3. 신호재현성 및 농도의존성

그림 8은 WO_3 - ZnO (3 wt.%)와 SnO_2 - WO_3 (3 wt.%) 감지막을 $300^\circ C$ 의 동작온도에서 5.71 ppm의 이산화질소에 대해 반복 측정한 실험결과이다. 센서의 상업적인 응용을 위해서 가장 중요한 요소는 장기안정성으로, 출력되는 센서신호가 시간 및 주변환경에 관계없이 신뢰성이 있어야 한다. 하지만, 이러한 연구는 많은 시간 및 노력이 요구되기 때문에 본 연구에서는 반복측정으로 그 특성을 간접적으로 살펴보고, 그림 8은 우수한 신호재현성을 확인시켜 준다. 또한 이들 센서를 사용하여 이산화질소의 농도변화에 따른 센서저항의 농도의존성을 실험하였다(그림 9). 그림 9에서 보는 바와 같은 선형적인 농도의존성은 1 ppm 이하의 이산화질소 농도를 측정할 수 있음을 제시해 준다.

IV. 결 론

본 연구를 통해 산화물 반도체형 후막센서의 이산화질소에 대한 감지특성을 살펴보았다. 본 연구에서는 박막센서에 비해 공정편의성, 가격 및 응용범위에 있어 장점을 지닌 후막공정을 이용하여 다양한 산화물 반도체 및 그 혼합물들의 센서제조 및 측정조건을 조절함으로써 이산화질소에 대해 우수한 감지특성을 나타내는 후막센서를 얻을 수 있었다.

WO₃계 감지물질의 경우에는 센서의 응답 및 회복 속도가 느리지만, 이산화질소에 대한 선택성 및 감도가 우수하였다. SnO₂계 감지물질의 경우에도 우수한 감지특성을 보였지만, 에탄올과 메탄이 존재할 경우엔 센서 저항이 크게 감소하였다. 하지만, 메탄과 에탄올에 대한 순수한 SnO₂ 감지막의 응답특성은 첨가물의 사용으로 선택성을 크게 증진시킬 수 있었다. ZnO계 감지물질의 경우에는 우수한 감지특성에도 불구하고 큰 센서 저항으로 인한 신호의 잡음으로 안정한 센서신호를 얻을 수 없었다.

이상의 결과들로부터 WO₃-ZnO(3 wt.%)와 SnO₂-WO₃(3 wt.%)를 감지물질로 하는 후막센서가 가장 우수한 이산화질소 감지특성 및 타가스에 대한 선택성을 보였다. 또한 이들 후막센서는 선형적인 농도 의존성과 우수한 신호 재현성을 나타내었고 특히, 1 ppm 이하의 이산화질소에 대한 측정 가능성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] N. Yamazoe and N. Miura, "Environmental gas sensing," *Sensors and Actuators B*, vol. 20, pp. 95~102, 1994.
- [2] 全國環境管理人聯合會 編, 環境關係法規, 弘文館, 1994.
- [3] S. Yao, Y. Shimizu, N. Miura and N. Yamazoe, "Use of sodium nitrite auxiliary electrolyte sensor to detect nitrogen oxides," *Chemistry Letters*, pp. 587~590, 1992.
- [4] N. Miura, S. Yao, Y. Shimizu and N. Yamazoe, "Development of high-performance solid-electrolyte sensors for NO and NO₂," *Sensors and Actuators B*, vol. 13/14, pp. 387~390, 1993.
- [5] C. Park, D. H. Yun, S. T. Kim, Y. W. Park, "Enhancement of the NO₂-sensing capability of

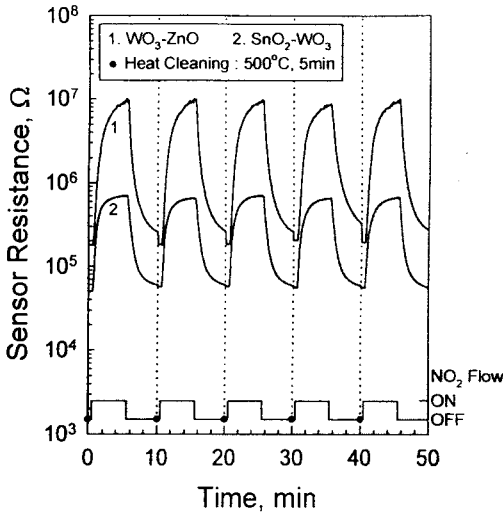


그림 8. WO₃-ZnO와 SnO₂-WO₃ 후막센서의 신호 재현성(5.71 ppm 이산화질소, 300°C 측정)
 Fig. 8. Reproducibility of the sensor signals of WO₃-ZnO and SnO₂-WO₃ to 5.71 ppm NO₂ at 300°C.

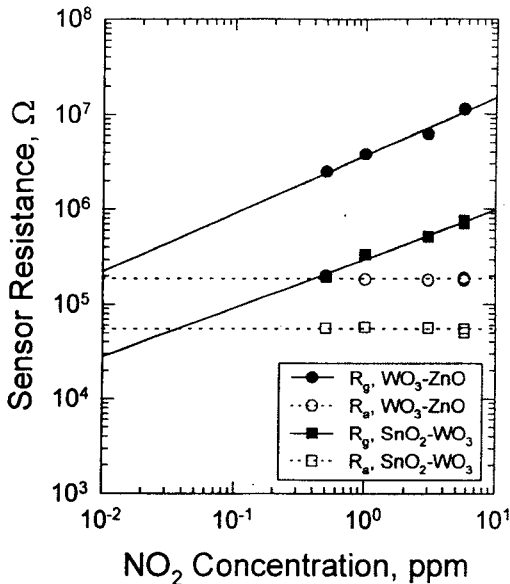


그림 9. WO₃-ZnO와 SnO₂-WO₃ 후막센서 저항의 NO₂농도의존성(동작온도: 300°C)
 Fig. 9. NO₂ concentration dependence of the resistance of WO₃-ZnO and SnO₂-WO₃ at 300°C.

- copper phthalocyanine by measuring the relative resistance change," *Sensors and Actuators B*, vol. 30, pp. 23~27, 1996.
- [6] G. Sberveglieri, S. Groppelli and P. Nelli, "Highly sensitive and selective NO_x and NO₂ sensor based on Cd-doped SnO₂ thin films," *Sensors and Actuators B*, vol. 4, pp. 457~461, 1991.
- [7] M. Akiyama, J. Tamaki, N. Miura and N. Yamazoe, "Tungsten oxide-based semiconductor sensor highly sensitive to NO and NO₂," *Chemistry Letters*, pp. 1611~1614, 1991.
- [8] S. Matsushima, D. Ikeda, K. Kobayashi and G. Okada, "NO₂ gas-sensing properties of Ga-doped ZnO thin film," *Sensors and Actuators B*, vol. 13-14, pp. 621~622, 1993.
- [9] S. R. Kim, J. D. Kim, K. H. Choi and Y. H. Chang, "NO₂-sensing properties of octa(2- ethylhexyloxy) metallophthalocyanine LB films using quartz-crystal microbalance," *Sensors and Actuators B*, vol. 40, pp. 39~45, 1997.
- [10] M. S. Nieuwenhuizen and A. J. Nelderof, "Surface acoustic wave gas sensor for nitrogen dioxide using phthalocyanines as chemical interfaces. Effects of nitric oxide, halogen gases, and prolonged heat treatment," *Analytical Chemistry*, vol. 60, pp. 236~240, 1988.
- [11] P. T. Moseley, "Thick film semiconductor gas sensors," in *Thick Film Sensors*, M. Prudenziati (ed.), Elsevier, Amsterdam, p. 289, 1994.
- [12] 金承烈, 尹童鉉, 洪炯基, 權哲漢, 李圭晶, "酸化物半導體를 이용한 厚膜形 NO₂ 가스센서," 化學工學의 理論과 應用, 제3권, 제1호, pp. 929~932, 1997.

 著 者 紹 介



김승렬 (金承烈)

1967년 6월 16일 생. 1990년 연세대학교 화학공학과 졸업(공학사). 1992년 한국과학기술원 화학공학과 졸업(공학석사). 1996년 한국과학기술원 화학공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 LG종합기술원 선임연구원.



윤동현 (尹童鉉)

1968년 9월 2일 생. 1991년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학사). 1993년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사). 1993년~현재 LG종합기술원 선임연구원.



홍형기 (洪炯基)

1963년 4월 1일 생. 1989년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1991년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1991년~현재 LG종합기술원 선임연구원.



권철한 (權哲漢)

1964년 11월 27일 생. 1987년 연세대학교 요업공학과 졸업(공학사). 1989년 연세대학교 대학원 요업공학과 졸업(공학석사). 1989년~현재 LG종합기술원 선임연구원.



이규정 (李圭晶)

1959년 10월 16일 생. 1982년 성균관대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1984년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1990년 미국 Georgia Institute of Technology 대학원 전기공학과 졸업(M.S.). 1990년~현재 LG종합기술원 책임연구원(가스센서 팀장).