

메조세공을 갖는 이산화 주석의 합성 및 가스센서로서의 응용

김남현 · 김건중[†]

인하대학교 생명화학공학과
(2007년 1월 17일 접수, 2007년 2월 22일 채택)

Synthesis of Mesoporous Tin Oxide and Its Application as a Gas Sensor

Nam-Hyon Kim and Geon-Joong Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
(Received January 17, 2007; accepted February 22, 2007)

본 연구에서는 주형물질로 C₁₆TMABr을 이용하여 염기 조건하에서 메조세공을 갖는 산화주석을 졸-겔법으로 합성하였다. 메조세공 SnO₂의 합성 최적조건을 탐사하였으며, 얻어진 시료는 X선회절, 질소흡착 및 투과전자현미경 등으로 분석하여 특성을 조사하였다. 금전극과 백금히터 회로를 알루미늄 기재상에 스크린 프린팅 법으로 코팅하고, 합성한 메조세공의 산화주석을 전극상에 접합시켜 하나의 유니트로 구성하였으며, 제작한 센서는 350 °C에서 1~10,000 ppm 농도범위의 메탄과 일산화탄소에 대하여 감지능력을 평가하였다. SnO₂ 상에 담지된 팔라듐량의 변화가 이들 측정가스의 검출에 미치는 영향도 검토하였다. 메조세공을 갖는 산화주석은 비다공성의 상용 산화주석에 비하여 동일한 측정 조건하에서 측정가스에 대해 보다 높은 감도를 나타낼 뿐 아니라 안정성이 있으면서도 빠른 응답속도를 보였다.

In this study, mesoporous tin oxide was synthesized by sol-gel method using C₁₆TMABr surfactant as a template in a basic condition. The optimum conditions for the synthesis of mesoporous SnO₂ were investigated and the obtained samples were characterized by XRD, nitrogen adsorption and TEM analysis. A mesoporous and nanostructured SnO₂ gas sensor with Au electrode and Pt heater has been fabricated on alumina substrate as one unit *via* a screen printing process. Sensing abilities of fabricated sensors were examined for CO and CH₄ gases, respectively, at 350 °C in the concentration range of 1~10,000 ppm. Influence of loading amount of palladium impregnated on SnO₂ was also tested in detection of those gases. High sensitivity to detecting gases and the fast response speed with stability were obtained with the mesoporous tin oxide sensor as compared to a non-porous one under the same detection conditions.

Keywords: mesoporous tin oxide, gas sensor, palladium, sensitivity

1. 서 론

우리의 생활환경에는 대단히 많은 종류의 위험한 가스가 존재하고 있어 일반 가정으로부터 화학플랜트 등에 이르기까지 폭발사고 및 오염 공해 등이 잇따르고 있다. 최근 들어 환경보존과 공해문제 해결에 대한 관심이 증가하면서 각종 규제가 강화되고 있으며, 이에 따라 가스센서에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 인간의 감각기관으로는 위험 가스의 농도를 정량하거나 종류를 거의 판별할 수 없으므로, 이에 대응하기 위해 물질의 물리적, 화학적 성질을 이용한 가스센서가 개발되어 가스의 누설감지, 농도의 측정 기록, 경보 등에 사용되고 있다. 반도체형 가스센서는 금속산화물인 SnO₂, ZnO, In₂O₃ 등의 소결체로서 흡탈착 메커니즘에 의해 전도도가 변하는 현상을 이용하여 공기 중 특정 가스의 유무 및 농도를 저항변화로써 측정하는데, 다양한 가스를 검지할 수 있을 뿐만 아니라 가격이 저렴하므로 경제적으로도 이용가치가 크다. 이들은 일본의 Figaro 사에 의해 상업화된 후 가스 누출경보용이나 가스의 농도측정에 주로 사용되어 왔다. 산화주석을

주형물질로 한 벌크형 센서소자는 그 이후에 개발된 많은 가스센서의 본보기가 되었다. 특히 탄화수소 감지용 센서는 탄화수소의 사용량이 급증함에 따라 수요가 증가하고 있고, 현재는 보다 정밀하고 가스에 대한 선택도가 높으면서 낮은 온도에서도 작동이 가능한 경제성 있는 센서의 개발이 요구되고 있다[1]. 이를 위해 주석 산화물 모체에 여러 종류의 첨가물을 사용하여 낮은 감도와 선택도를 높이려는 노력이 경주되고 있으며 실제로 귀금속을 첨가제로 이용하여 향상된 감도나 선택도를 여러 연구자들이 보고하고 있다. 특히 백금, 팔라듐, 로듐 등의 귀금속은 탄화수소가스 센서의 감지 기구로 알려진 감지 가스의 흡착과 표면 산화 반응 속도를 증가시키는 한편 감지온도를 낮추는 등 센서의 감지도를 크게 높이고 있다고 알려져 있다[2-7].

또 한 가지 센서의 감지도를 높이는 방법으로 제시된 것이 센서 소재 자체의 표면적을 넓게 만드는 것인데, 이는 반도체 가스센서의 가스분자 검지 메커니즘이 일정온도에서 활성화된 반도체물질의 표면에서 흡탈착되는 것이기 때문이다. 다공성물질의 경우 넓은 표면적과 우수한 화학적 물성을 갖고 있기 때문에 많은 과학자들이 다공성물질을 합성하고 있으며 이들 중 실리카가 아닌 산화물금속 자체를 다공

[†] 주 저자 (e-mail: kimgj@inha.ac.kr)

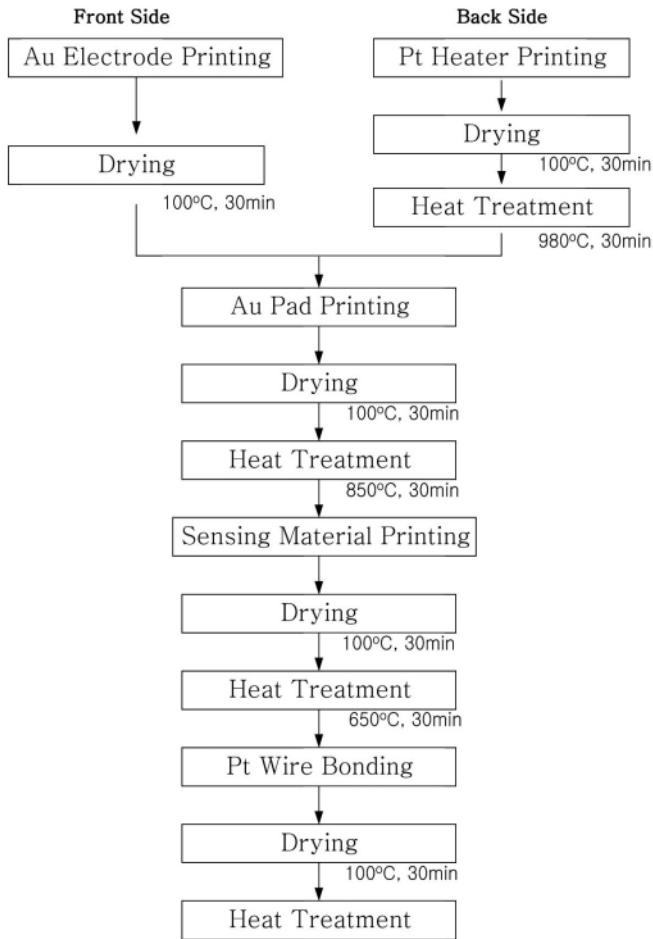


Figure 1. Typical procedure for fabrication of Pd/SnO₂ sensor.

성물질로 만들려 하고 있다[8].

국내에서는 펠렛형 Pt/MoO₃ 가스 센서[9]와 CVD법을 이용한 α-Fe₂O₃ 박막 가스센서[10] 및 산화주석을 중심으로 한 센서특성 평가 연구결과[11,12] 등이 보고된 바 있다. Egashira는 단층과 복합층, 그리고 서로 다른 종류로 이루어진 층을 갖는 산화주석 가스센서를 슬라이드-오프(slide-off)방식으로 제작하고 그 성능을 연구한 바 있었다 [13]. 또한 이들은 규칙적인 메조세공을 갖는 산화주석을 C₁₆PyCl과 Na₂SnO₂·3H₂O를 이용하여 합성하고 열 안정성을 부여하기 위해 열 처리 전에 인산으로 처리한 다음, 가스감지 특성을 수소와 일산화탄소에 대하여 평가하였다[14]. 최근에 Jiang은[15] 염화주석(TiCl₄ or TiCl₂)과 블록 공중합고분자인 P123을 이용하여 균일한 나노세공을 갖는 산화주석 합성하고, 리튬 이온 배터리의 음극으로 사용하여 그 전기적 특성을 조사하기도 하였다.

본 연구에서는 주형물질로 C₁₆TMABr을 이용하여 메조세공을 갖는 산화주석을 졸-겔법으로 합성하였으며, 금전극과 백금히터 회로를 알루미늄 기제상에 코팅하고 팔라듐(Pd)을 함유시킨 반도체센서층을 전극상에 접합시켜 후막형으로 소형 유닛을 제작한 다음, 실제 센서로서의 활용 가능성을 평가하였다. 표면적 증가가 측정가스의 감지능력에 어떤 영향을 주는지 살펴보기 위하여 시판되고 있는 산화주석과 비교하여 센서특성을 검토하였다. 본 연구에서 합성한 메조세공을 갖는 산화주석은 검지가스로 메탄(CH₄)과 일산화탄소(CO)를 사용하였을 때, 동일한 팔라듐 담지량 및 동일 측정 조건하에서 보다 우수한

센싱성능을 보여주었으며, 실제 센서소재로 응용해도 무방할 만한 가능성을 제시하였다.

2. 실험

2.1. 상용산화주석

가스 검출 능력의 비교를 위한 기준 센서용 Tin (IV) oxide 분말 (SnO₂, Mw = 150.71)은 Junsei Chemical Co. (Ltd)에서 구입하여 정제 없이 그대로 사용하였다.

2.2. 메조세공 산화주석의 합성

주형물질로 사용한 C₁₆TMABr (Aldrich®, Cetyltrimethylammonium Bromide)을 에탄올에 충분히 녹인 후, 따로 준비한 Tin chloride (SnCl₄, Aldrich®), 에탄올, 증류수의 혼합액과 함께 섞어 교반한다. 이 혼합물에 수산화나트륨 용액을 서서히 첨가하여 용액의 pH가 9가 되도록 하고 80 °C에서 교반하였다. 이 교반 과정에서 불화암모늄 (NH₄F)을 첨가하거나 혹은 넣지 않은 채로 각각 24 h 동안 환류 (reflux)한다. 합성 액의 조성(mol 비)은 다음과 같다. C₁₆TMABr (4.0×10⁻²) : Ethanol (20) : SnCl₄ (1.0) : NH₄F (0.1) : H₂O (25). 반응처리 후에 용매를 증발 농축하여 부피가 반이 되도록 한 다음 24 h 동안 80 °C에서 반응처리하였다. 시료 중의 용매를 완전히 증발시키고 120 °C에서 건조하여 분말을 얻었으며, 이를 공기분위기하에서 600 °C까지 소성(승온속도: 1 °C/min)하여 산화 주석을 합성하였다.

2.3. 물성조사

X선 회절분석기(Rigaku)로 회절패턴을 조사하여 졸-겔법으로 합성한 산화주석의 세공형성여부와 결정구조를 확인하였다. 분말시료의 비표면적 및 세공크기분포는 Protech사의 ASAP2000 부피 흡착량 측정장치로 액체질소 온도에서 측정된 질소 흡착등온선에 BET식을 적용하여 계산하였다. 합성한 산화주석 분말의 입자모양은 FE-SEM (Hitach, S-4200)으로, 또한 투영된 입자형태 및 세공구조는 TEM (Philips, CM200)으로 관찰하였다.

2.4. 센서 제작(Fabrication)

합성한 메조세공 산화주석과 상용화된 산화주석분말의 센서로서의 거동을 살펴보기 위하여, 팔라듐을 서로 다른 양으로 담지시키고 실제 센서 유닛을 제작하였다. 팔라듐은 1~10 wt% 범위에서 담지시켰는데, 일정량의 염화팔라듐을 물에 용해시켜 산화주석분말과 혼합시킨 후 회전식 증발기에서 40 °C로 1 h 동안 건조시켰다. 이를 100 °C에서 1 h 동안 건조시키고 공기중에서 650 °C로 1 h 소성한다. 소성된 분말은 밀링장치에서 300 rpm으로 1 h 동안 곱게 간 다음 10 wt%의 유기점결제와 혼합하여 금 전극위에 코팅하였다. 알루미늄 기질의 양면에는 백금 히터와 금 전극부를 스크린법으로 인쇄하고 전극 위에 센서재료(팔라듐담지 산화주석)를 코팅하였으며, 전극과 히터선의 끝부분은 금으로 코팅한 다음 여기에 백금선을 연결하여 회로를 구성하고 가스센서의 특성을 평가하였다. 이와 같은 센서 유닛 제작과정을 Figure 1에 간략히 나타내었다[16].

Figure 2의 (b)는 스크린 코팅으로 인쇄된 백금히터의 회로 사진이며, (c)는 (b)의 끝부분에 금 패드를 코팅하여 배선접촉부를 형성시킨 것이다. 또한 Figure 2(d)는 팔라듐 담지-산화주석 층의 아래에 위치하는 금 전극회로의 인쇄상태를 보여주는 사진이다. (c)와 (d)는 각각 알루미늄 양면에 인쇄되어 있으며, 완성된 센서 유닛의 외형은

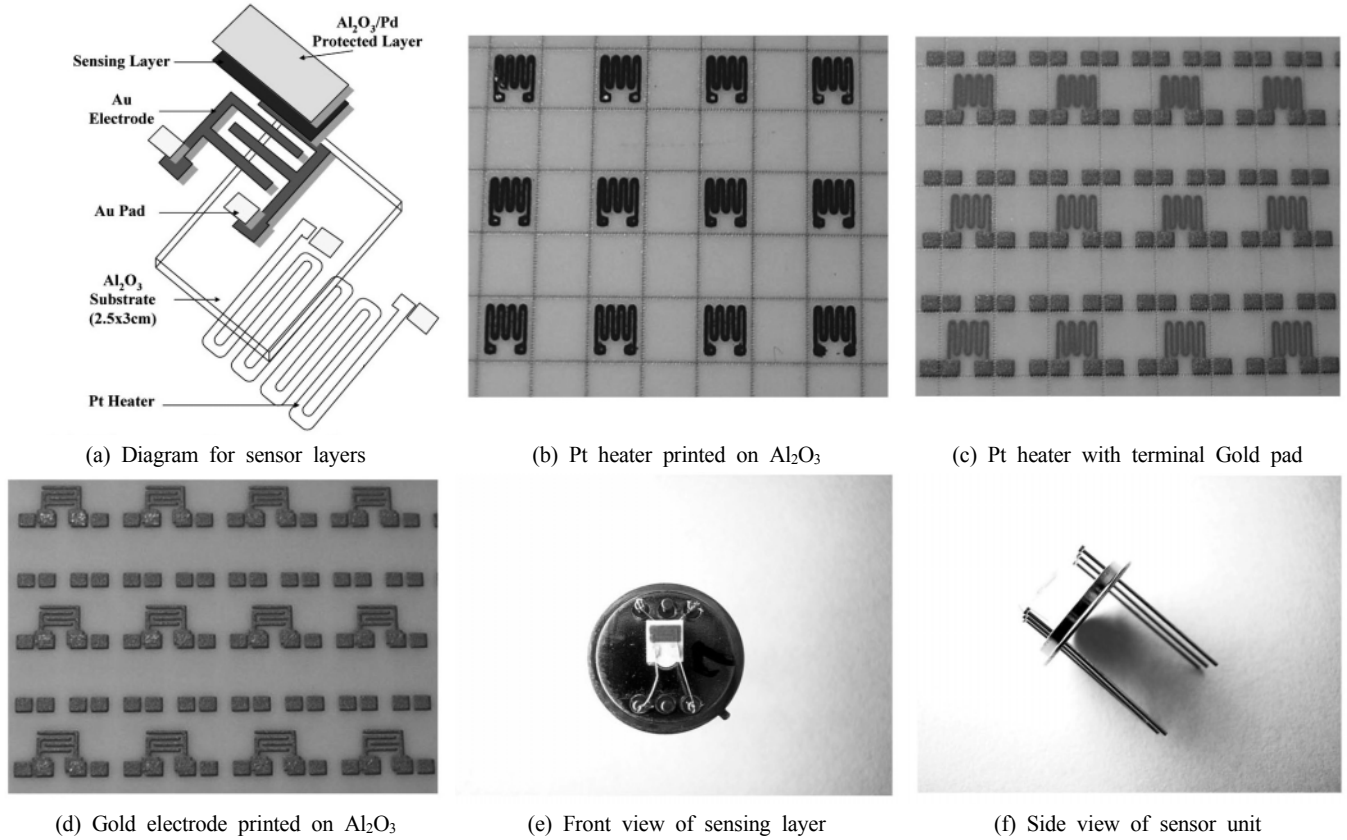


Figure 2. Schematic diagram and photographs of Pd/SnO₂ gas sensor units.

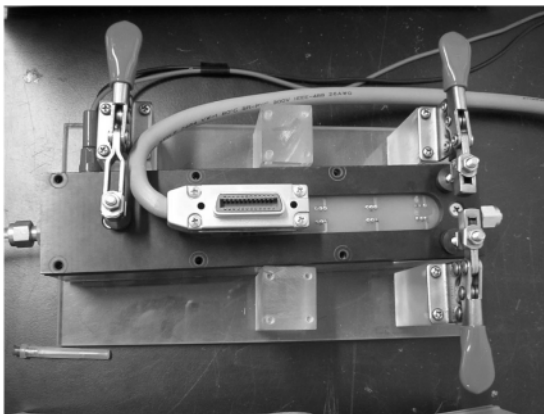


Figure 3. The continuous flow-type apparatus used for evaluation of gas sensor properties (The concentration of gas was controlled in this chamber).

Figure 2(e)와 같이 옆 모습은 Figure 2(f)에 나타내었다. 제작된 이들 센서유니트는 Figure 3과 같이 외부 측정 단자와 연결하여 유로내에 설치하고 일정 농도(1~10000 ppm 범위)의 검지가스를 통과시키면서 저항값을 측정하였다. 측정대상가스로서 메탄과 일산화탄소를 각각 사용하여 팔라듐/산화주석 가스센서의 검지도와 응답속도 등을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

실험항에서 기술한 방법으로 합성한 산화주석의 특성을 조사하기 위하여 X선회절분석을 수행하였으며, 그 결과를 Figure 4와 Figure 5에 각각 나타내었다. 특히 합성중 NH₄F의 첨가유무에 대한 영향을 비교하여 살펴보았다. Figure 4의 X선회절분석 결과를 살펴보면, NH₄F를 첨가하지 않고 합성한 산화주석의 경우 소성전에는 메조세공의 존재에 따른 낮은 각도($2\theta = 5$ 도 이하)의 회절피크가 관찰되었지만, 650 °C에서 소성하면 저각도의 피크가 크게 감소하고 또한 고각도에서 보이는 산화주석의 특징적인 피크가 매우 날카로운 형태로 변화하였다. 이는 열처리 도중에 메조세공이 파괴될 뿐만 아니라 산화주석이 고온에서 열 안정성을 갖지 못해 입자가 서로 붙으면서 크게 성장하기 때문이라고 생각된다. 반면에 합성중에 NH₄F를 첨가하고 얻은 산화주석의 경우 뛰어난 열안정성을 보이고 있다. Figure 5에 나타난 바와 같이, 이 시료는 650 °C에서 소성하여도 오히려 저각도의 피크가 크게 증가하고 또한 고각도에서 보이는 산화주석의 특징적인 피크들도 열처리전과 동일한 형태의 완만한 피크 모양을 보이고 있다.

시판용과 본 연구에서 합성한 산화주석의 비표면적과 흡착용량 등을 살펴보기 위하여 질소흡착 실험을 수행하고, 얻어진 흡착등온곡선을 Figure 6에 비교하여 실었다. 수열반응 중에 NH₄F를 첨가하면서 합성한 산화주석 시료는 질소흡착실험을 통한 BET 분석결과에서 비표면적이 224 m²/g 정도로 매우 넓게 나타났다. 한편 시판되는 산화주석은 Figure 6의 (C)에 함께 나타낸 것처럼 질소흡착량도 매우 작을 뿐 아니라 흡착등온선으로부터 계산된 비표면적도 29 m²/g 정도의 거

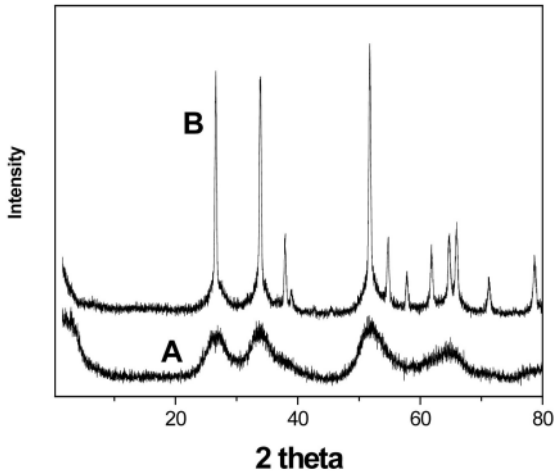


Figure 4. XRD patterns of tin oxide synthesized in a basic condition without addition of ammonium fluoride (A: before calcination, B: after calcination).

의 비다공성 물질임을 알 수 있다. NH_4F 를 첨가하지 않고 합성한 산화주석은 열처리 후에 세공이 붕괴되고 나노크기의 입자들이 서로 붙으면서 입자사이에 세공을 형성하는 것으로 생각되며, 이는 Figure 6의 (A)에서 볼 수 있듯이 상대압력이 0.9에 가까운 부분에서 흡착량이 급격히 상승하고 더욱이 이 영역에서 히스테리시스현상을 보이는 결과로 부터 유추할 수 있다. 이 경우의 시료가 갖는 비표면적은 약 $86 \text{ m}^2/\text{g}$ 정도였다.

Figure 7은 NH_4F 를 첨가하고 수열합성한 산화주석 시료와 첨가하지 않고 얻은 시료의 투과전자현미경 사진이다. NH_4F 를 첨가하지 않고 얻은 산화주석 시료는 메조세공은 거의 관찰되지 않고 오히려 전체적으로 매우 작은 나노 입자들이 서로 들어붙은 형태를 보이고 있다. 이는 앞의 X선회절분석이나 질소흡착결과에서도 언급한 것처럼 소성처리 중에 메조세공 구조가 허물어지고 작은 입자가 서로 들러붙으면서 그 사이에 새로운 세공을 나타내는 것으로 생각된다. 한편 수열반응 중에 NH_4F 를 첨가하면서 합성한 산화주석 시료는 Figure 7의 (A)에 나타난 것처럼 소성처리한 뒤에도 메조세공을 그대로 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

가스 감지성능비교를 위하여 본 실험에서 사용한 시판 가스센서용 산화주석재료도 X-선 회절도를 측정하여 보았다. 얻어진 회절도 상에 나타난 특성 피크들은 폭 넓지만 다를 뿐, 각 피크의 위치는 앞의 Figure 4와 Figure 5에 실은 메조세공구조의 산화주석과 잘 일치함을

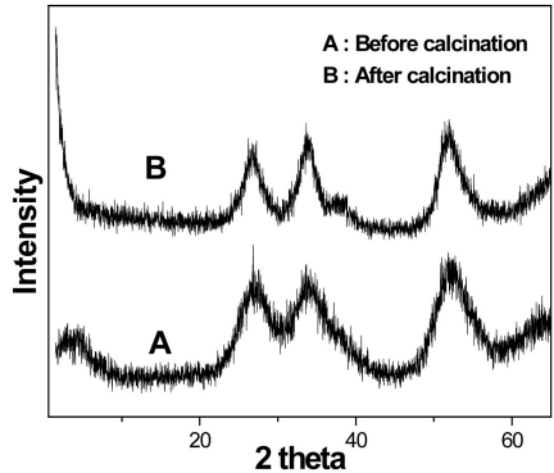


Figure 5. XRD patterns of tin oxide synthesized in a basic condition with addition of ammonium fluoride (A: before calcination, B: after calcination).

알 수 있었다. 이처럼 시판용 산화주석 시료의 경우, X선회절피크들의 폭이 좁고 강도가 센 이유는 결정이 상대적으로 크게 성장하였기 때문이라고 할 수 있다. 시판용과 합성한 메조세공 함유 산화주석의 입자모양을 주사전자현미경으로 관찰하고, 그 결과를 Figure 8에 나타내었다. 상업용 비다공성 산화주석(A)의 경우에는 작은 입자가 큰 입자의 표면에 붙어 있는 상태였는데, 입자의 모양은 비교적 불규칙하고 큰 편이었다. 수열합성한 다공성의 산화주석의 경우에는 Figure 8에서 살펴볼 수 있는 것처럼 입방체에 가까운 결정의 모양을 취하고 있다.

반도체식 가스센서는 가스 감지부, 히터부 및 전극부의 세 부분으로 구성되어 있다. 가스 감지부는 검출 gas와 직접 반응하여 저항의 변화를 보이는 부분으로 본 실험에서는 시판용과 수열합성한 다공성 산화주석을 금전극 회로 위에 각각 코팅하여 사용하였다. 히터부는 감지 물질을 적절한 온도까지 승온시켜주는 부분으로 발열의 방식은 수~수십오의 전기 저항체에 전압을 인가하는 방식이 주로 사용된다. 이러한 적정 온도유지는 센서표면에서의 감지반응에 필요한 활성화 에너지를 부여하는 역할을 한다. 본 연구에서는 고온에서 산화성과 반응성이 적은 백금을 사용하여 히터를 스크린 인쇄 방법으로 구성하였고, 가열온도가 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 가 되도록 고정하여 실험하였다. 전극부는 감지부에서의 전기적 신호를 외부로 송출하는 부분으로 안정성 및 응답 속도를 고려하여 금전극을 사용하였다. 이와 같이 앞의 실험항에 나

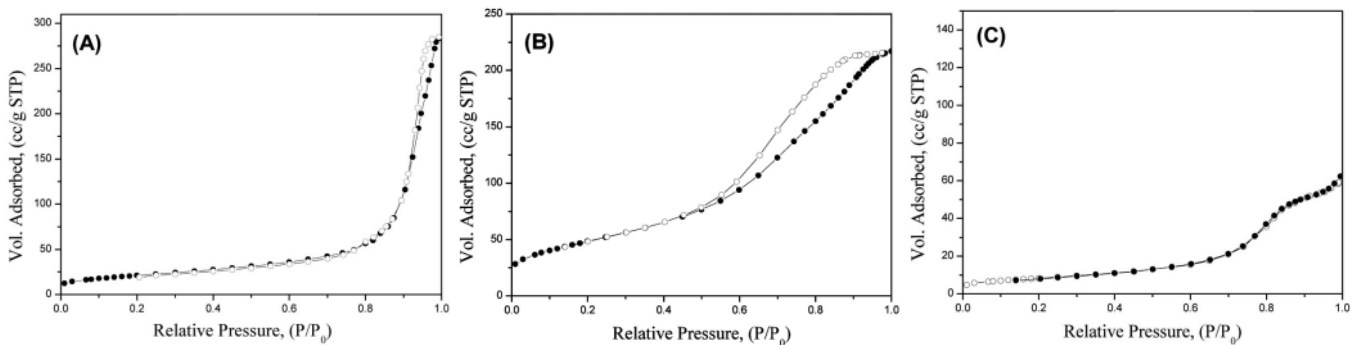


Figure 6. N_2 adsorption isotherm of mesoporous tin oxide synthesized in a basic condition and that of commercial one (A: without addition of NH_4F (BET surface area: $86 \text{ m}^2/\text{g}$), B: with NH_4F addition ($224 \text{ m}^2/\text{g}$), C: commercial tin oxide ($29 \text{ m}^2/\text{g}$)).

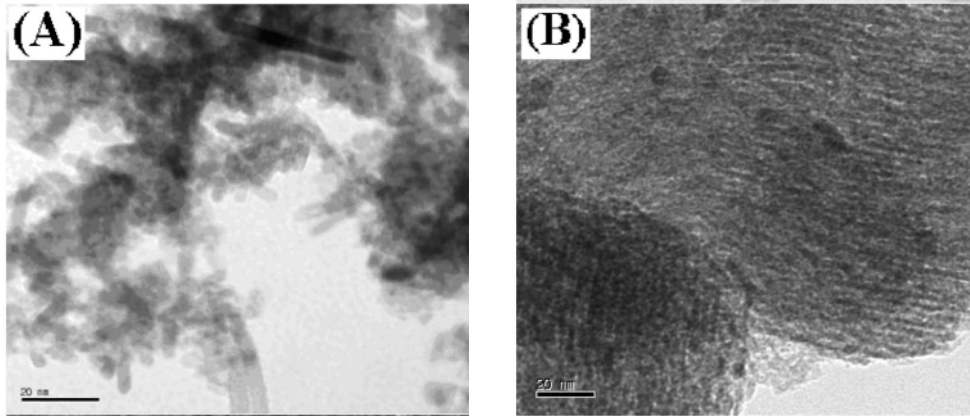


Figure 7. TEM images of synthesized tin oxide powder. (A): synthesized in the absence of NH_4F , (B): synthesized in the presence of NH_4F .

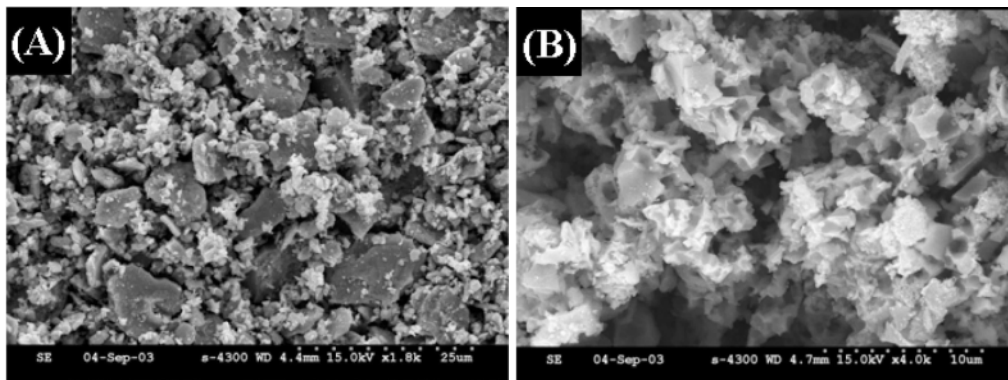


Figure 8. SEM images of commercial SnO_2 (A) and mesoporous SnO_2 synthesized in this work (B).

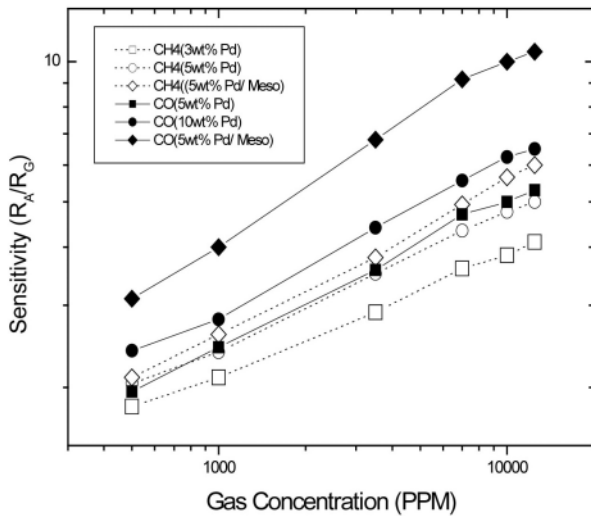


Figure 9. Sensitivity of SnO_2 sensor for $\text{CH}_4(\text{g})$ and $\text{CO}(\text{g})$ tested at 350°C . (Pd loaded commercial SnO_2 (●○■□), Pd loaded mesoporous SnO_2 synthesized in this work (◆◇)).

탄젠 절차대로 제작, 조립한 가스 센서를 사용하여 일산화탄소와 메탄가스에 대한 가스검지효율을 조사하였다. 제조세공을 갖는 시료의 가스센서로서의 성능은 시판되는 산화주석을 기준 물질로 하고 동일한 절차로 센서유니트를 구성한 다음, 측정가스의 농도변화에 따른

검지특성능력을 비교하여 검토하였다. 센서의 측정가스에 대한 검지 능력은 'sensitivity'로 표현하였으며 그 값은 측정가스가 존재하지 않을 때, 즉 공기 중에서의 저항값(R_A)과 가스가 검지되었을 때의 저항값(R_G)을 비교하여 R_A/R_G 비로 표현하였다.

n-형 반도체인 SnO_2 는 부족한 산소 중을 대기 중에서 흡착하여 양/음이온의 불균형을 해소하려고 하는 경향을 가지게 되는데, 흡착된 산소종의 전기음성도에 기인하여 반도체내의 전기전도역할을 하는 전자가 흡착산소 표면에 잡히는 상태가 되어 전기전도성을 잃게 된다. 만약 환원성가스(CO , NH_3 등)에 이러한 상태의 n-형 반도체가 노출되면 표면의 흡착산소가 이들 기체 중들과 반응 ($\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$)하여 표면의 흡착산소를 다시 탈착시키게 되며, 이 때 산소주위에 포획된 전자가 다시 자유로워져서 전기전도도에 기여할 수 있게 된다. 따라서, 검지하고자 하는 목적가스에 따라 반도체 센서의 전기 전도도가 변화하게 되고 이로부터 기체종의 존재유무 및 농도를 알 수 있다. 일반적으로 n-형 반도체는 환원성 가스에 대해 센서 저항의 감소, 곧 전기전도도의 증가를 일으키게 된다.

팔라듐 담지량의 변화와 측정하려는 가스의 농도변화에 따른 센서의 감지능력을 각각 Figure 9와 Figure 10에 나타내었다. 가스 센서의 검지효율은 시간과 저항에 대해 그래프를 표시하였을 때, 동일 조건하에서 검지도의 값이 클수록, 즉 R_A/R_G 비로 클수록 또한 그 기울기값이 (+)방향으로 클수록 검지효율이 좋다. Figure 9와 Figure 10의 결과를 살펴보면 팔라듐의 담지량 증가에 따라 센서의 감지도가 증가하였으며, 다공성 산화주석으로 제작한 센서의 경우에 비다공성인

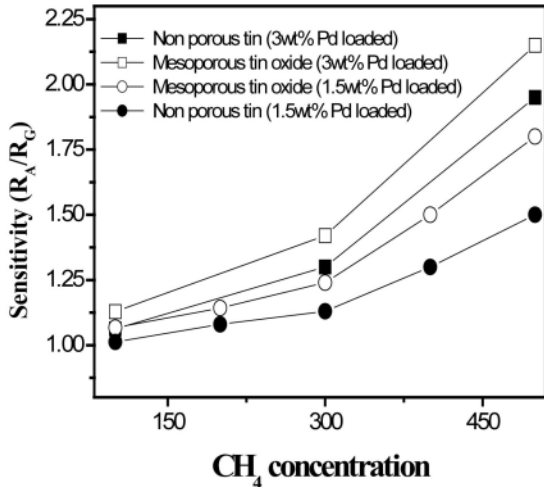


Figure 10. Sensitivity of SnO₂ sensor for CH₄(g) at 350 °C (Pd loaded commercial SnO₂ (●■), Pd loaded msoporous SnO₂ synthesized in this work (○□)).

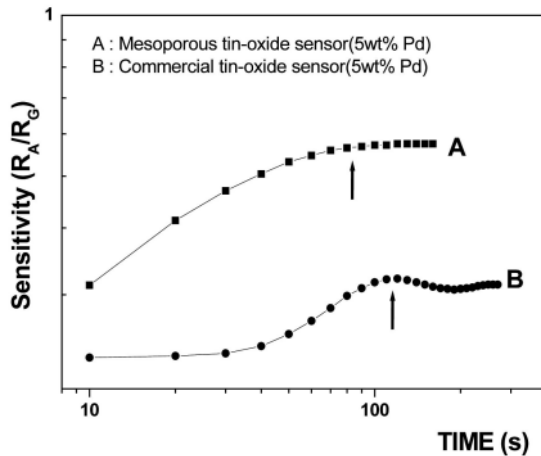


Figure 11. Time response curve for CH₄(g) at 5000 ppm.

기존 시판용 산화주석에 비해 감지도가 크게 나타남을 알 수 있다. 한편 동일한 양의 팔라듐이 함유된 센서에 있어서는 가스농도가 증가할수록 감지도는 증가함을 볼 수 있다.

가스센서가 실용화 되기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 특성이 만족되어야 한다. 우선 감지감도가 높고 농도의 측정 정밀도가 우수하여야 하며, 감지하려는 가스만을 선택적으로 감지할 수 있어야 할 뿐만 아니라 공존하는 다른 가스에 의해 영향을 받지 않아야 한다. 또한 응답속도가 빠르고 가역적으로 반복 사용할 수 있어야 하며, 안정된 감도를 나타내야 한다. 이와 같은 특성 중의 하나인 검지가스에 대한 응답속도를, 상용 산화주석과 메조세공 재료를 사용하여 제작한 센서 각각에 대하여 측정하고 그 성능을 비교하였다. 5000 ppm 농도의 메탄가스에 대한 센서의 시간응답성을 다음의 Figure 11에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 같은 농도에 노출되더라도 메조세공을 갖는 산화주석 센서의 경우가 보다 높은 감도로 빨리 일정한 값에 도달하고 시간 변화에 대해 안정한 수치를 계속 유지하고 있다. 이처럼 메조세공을 함유하므로써 비표면적이 커진 산화주석은 비다공성 재료에 비하여 빠른 응답속도를 나타내는 등 센싱물질로서 우수한 특성을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서 주형물질로 C₁₆TMABr을 이용하여 수열합성한 산화주석은 소성처리 후에도 안정하게 메조세공구조를 유지하였으며, 큰 비표면적을 나타내었다. 제조한 산화주석을 센서재료로 활용하기 위하여, 알루미늄 기재상에 스크린 프린팅 법으로 금전극과 백금히터 회로를 코팅하고, 합성한 메조세공형 산화주석을 전극상에 접합시켜 후막형의 센서 유니트를 제작하였다. 제작한 센서는 350 °C에서 1~10000 ppm 농도 범위의 메탄과 일산화탄소에 노출시켜 가스 검지능력을 측정하였으며, 가스검출성능은 상용되는 비다공성 산화주석을 동일한 형태의 센서유니트로 만든 다음 이를 기준으로 비교, 평가하였다. SnO₂ 상에 담지된 팔라듐량의 변화가 이들 측정가스의 검출에 미치는 영향을 검토하였을 때, 가스에 대한 측정 감도는 첨가한 팔라듐 양의 증가와 함께 향상되었다. 또한 메조세공을 갖는 산화주석은 비다공성의 상용 산화주석에 비하여 동일한 조건하에서 측정가스에 대해 보다 높은 감도를 나타낼 뿐 아니라 빠른 응답속도를 보였으며, 실제 센서소재로 사용하여도 적합한 특성을 지녔음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. D. D. Lee, *Chemical Sensors Technology*, **1**, 79 (1994).
2. D. D. Lee, W. Y. Chung, and B. K. Sohn, *Sensors and Actuators B*, **13**, 242 (1993).
3. R. Pitchai and K. Klier, *Catalysis Reviews Sci. Eng.*, **28**, 13 (1986).
4. R. F. Hicks, H. Qi, M. L. Young, and R. G. Lee, *J. Catal.*, **122**, 280 (1990).
5. R. F. Hicks, H. Qi, M. L. Young, and R. G. Lee, *J. Catal.*, **122**, 295 (1990).
6. F. H. Ribeiro, M. Chow, and R. A. D. Betta, *J. Catal.*, **146**, 537 (1994).
7. R. Burch, F. J. Urbano, and P. K. Loader, *Appl. Catal.*, **123**, 173 (1995).
8. P. Yang, D. Zhao, D. I. Margolose, B. F. Chmelka, and G. D. Stucky, *Nature*, **396**, 152 (1998).
9. C. K. Kim, J. G. Kim, K. S. Yoo, Y. I. Choi, and D. Y. Han, *Journal of Korean Association of Crystal Growth*, **6**, 213 (1996).
10. S. M. Choi, S. H. Lee, and S. C. Choi, *Journal of Korean Association Crystal Growth*, **9**, 280 (1999).
11. J. R. Sohn and H. D. Park, *Korean J. Chem. Eng.*, **14**, 469 (1997).
12. H. K. Jun and J. C. Kim, *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, **35**, 307 (1997).
13. M. C. Carotta, G. Martinelli, L. Crema, M. Gallana, M. Merli, G. Ghiotti, and E. Traversa, *Sensors and Actuators B*, **68**, 1 (2000).
14. T. Hyodo, N. Nishida, Y. Shimizu, and M. Egashira, *Sensors and Actuators B*, **83**, 209 (2002).
15. T. Wang, Z. Ma, F. Xu, and Z. Jiang, *Electrochemistry Communications*, **5**, 599 (2003).
16. 홍성철, 서울시립대학교 석사학위논문 (2003).