

아미노산을 이용한 망간 산화물 기공성 나노 구조의 합성 및 C₃H₈ 가스에 대한 선택적 감응 특성

최권일 · 이종훈*

Preparation of Manganese Oxide Porous Nanostructures using Amino-acid and its Selective C₃H₈ Sensing Properties

Kwon-Il Choi and Jong-Heun Lee*

Abstract

Porous manganese oxide porous nanostructures were prepared by amino-acid-mediated solvothermal self assembly reaction and subsequent heat treatment at 600 °C. When Mn-precursors were heat-treated at 400 - 550 °C, the sensors did not show significant gas responses. In contrast, the manganese oxide heat-treated at 600 °C showed the significant gas responses, that is, the resistance decrease to 100 ppm C₃H₈ ($R_g/R_a = 2.17$, R_a : resistance in air, R_g : resistance in gas) and the resistance increase to 100 ppm C₂H₅OH ($R_g/R_a = 1.92$). The opposite change of resistance upon exposure to C₃H₈ and C₂H₅OH was discussed in relation to the mixed phases of manganese oxides with different valences.

Keywords : Manganese oxide, C₃H₈, Selectivity, Gas sensors

1. 서론

산화물 반도체형 가스센서는 반도체 표면과 피검가스가 반응하여 발생하는 저항 변화를 통해 독성 또는 폭발성 가스를 검출한다[1, 2]. 대표적인 감응물질로서 n형 산화물 반도체 물질 SnO₂[3,4], ZnO[5,6], WO₃[7], In₂O₃[8], Fe₂O₃[9], TiO₂[10,11]와 p형 반도체 물질 CuO[12-14], Cr₂O₃[15], Co₃O₄[16,17] 등이 연구되고 있다.

산화물 반도체형 가스센서에서의 가스 감응은 물질 표면에서 일어나는 반응이기 때문에 높은 감응 특성을 얻기 위해서 높은 비표면적을 유지하면서 응집이 적게 일어나는 나노선(nano-wires)[18-20], 나노큐브(nanocubes)[21], 나노벨트(nanobelts)[22], 중공구조(hollow spheres)[23-27], 계층구조(hierarchical structures)[28-31] 등과 같은 고기능성 나노 구조를 가스센서에 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

반도체형 가스센서의 가장 큰 취약점은 피검가스의 선택적 검지가 어렵다는 점이다. n형 반도체 물질은 C₃H₈, C₂H₅OH, CH₃COCH₃, CO 등과 같은 환원성 가스를 검지할 때 모두 저항

이 감소하는 비슷한 결과를 나타내며 NO_x와 같은 산화성 가스를 검지할 때는 반대로 저항이 증가하는 결과를 나타낸다. 이 때문에 환원성 가스와 산화성 가스의 구별은 명확하지만 같은 환원성 가스들은 구별하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 촉매 첨가[30]와 감응물질의 조성변화[33]등이 연구되고 있으나 아직 초기 단계이다.

산화망간은 다양한 산화수를 가지는 물질로서 열처리 조건에 따라 다양한 상의 산화물로 나타날 수 있으며, 그 조절이 용이하다. 산화물의 상은 가스 감응 시 저항 변화 경향 및 속도에 결정적인 영향을 미치므로 이를 조절함으로써 우수한 특성의 가스 감응 물질을 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 수열합성법을 이용하여 다공성의 MnO_x를 합성했으며 이를 이용하여 C₃H₈ 가스를 선택적으로 감지하는데 효과적인 가스센서를 구현했다.

2. 실험 방법

2.1 MnO_x의 합성

0.075 g의 MnSO₄(99.99 % Sigma-Aldrich Co., Ltd., USA)와 L(+)-lysine monohydrate (99 %, Acros organics) 0.082 g을 증류수 50 ml에 첨가하여 만들어진 용액을 100 ml

고려대학교 신소재공학과 (Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea)

*Corresponding author : jongheun@korea.ac.kr, TEL:+82-2-3290-3282, FAX:+82-2-928-3584

(Received : Nov. 15, 2010, Revised : Jan. 4, 2011,

Accepted : Jan. 19, 2011)

부피의 테플론이 코팅된 수열합성 용기에 옮긴 후, 180 °C에서 3 시간 동안 수열 합성하였다. 수열합성 후 상온으로 냉각된 전구체를 원심분리기를 이용하여 증류수로 5회 세척한 후, 70 °C에서 24 시간 동안 건조하였다. 건조된 분말을 600 °C에서 2 시간 동안 하소하여 MnO_x를 얻었다.

2.2 시편 분석

얻어진 분말의 상과 결정구조를 분석하기 위해 X-선 회절분석기(Rigaku D/MAX-2500 V/PC, Cu K line = 1.5418 Å)가 사용되었으며 field-emission 주사전자현미경(FE-SEM, S-4300, Hitachi Co. Ltd., Japan)을 이용해 분말의 모양을 분석하였다.

2.3 센서 소자 제작 및 측정

합성된 MnO_x 분말을 증류수와 혼합하여 slurry형태로 Au 전극이 패터닝된 알루미늄 기판(Fig. 1) 위에 도포하여 가스 감응 소자를 제작하고 Fig. 2와 같이 튜브로의 중앙에 소자를 위치시키고 튜브로의 온도를 600 °C로 유지시켜 2 시간 동안 열처리한 후, 400 °C에서 2 시간 동안 안정화 시켰다. 이 후, 가스 유속을 500 cm³/min으로 고정하여 100 ppm 농도의 C₃H₈, C₂H₅OH, CH₃COCH₃, CO 등 4 종류의 환원성 가스에 대하여 400 °C에서 가스 감응성을 측정하였다.

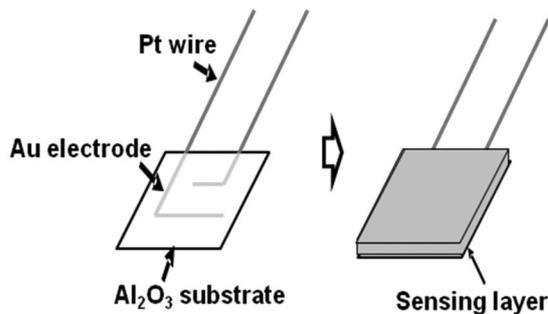


Fig. 1. The schematic diagram of Al₂O₃ substrate patterned Au electrodes.

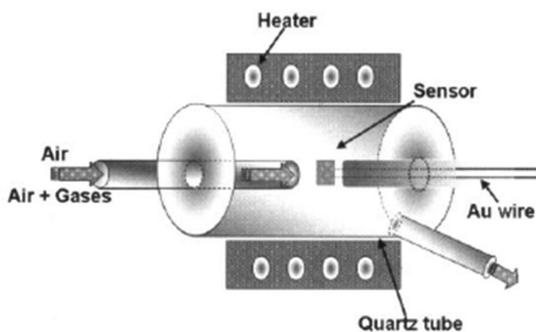


Fig. 2. The schematic diagram of gas sensing measurement. Tube furnace was used in this study to maintain temperature.

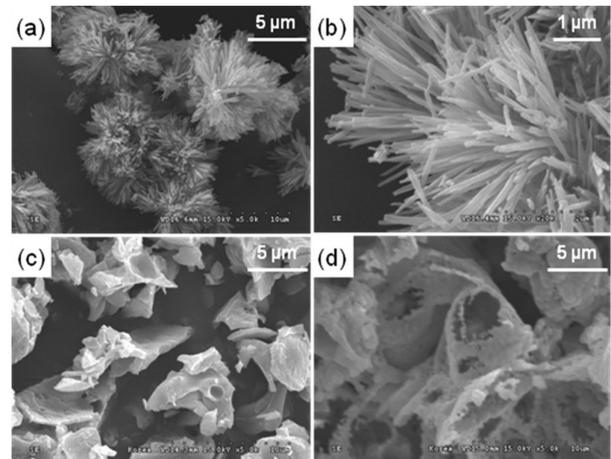


Fig. 3. SEM images of : (a,b) as-prepared powders, (c) powders after heat treatment at 500 °C for 2 h, (d) powders after heat treatment at 600 °C for 2 h.

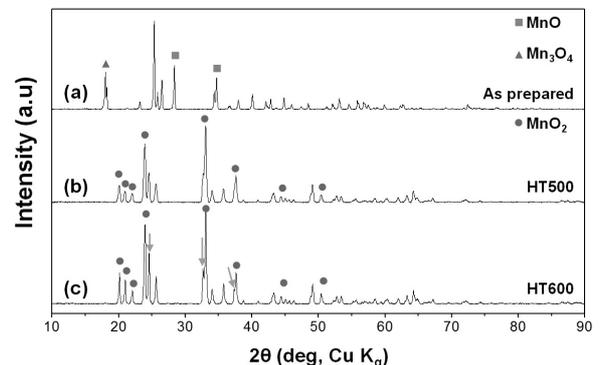


Fig. 4. X-ray diffraction pattern of : (a) as-prepared powders, (b) after heat treatment of (a) at 500 °C for 2 h, (c) after heat treatment of (a) at 600 °C for 2 h.

3. 결과 및 고찰

3.1 합성된 분말의 모양과 상

수열 합성 직후 얻어진 전구체는 두께 100~200 nm, 길이 1~3 μm의 1차원 rod가 구형으로 자기 조립되어 약 3~6 μm크기의 3차원 나노 계층 구조(hierarchical structures)를 형성하였다(Fig. 3 (a), (b)). 계층 구조의 형성은 첨가제로 사용된 Lysine의 영향으로 판단된다. Amino acid의 한 종류인 Lysine은 양이온으로 이온화 가능한 아민 기능기 2 개와 음이온으로 이온화 가능한 카르복실 기능기 1 개를 동시에 가지고 있다. 이러한 기능기는 수열합성 과정에서 각각 양이온과 음이온으로 이온화하여 정전기적 결합을 형성할 수 있으며, 아민 기능기는 카르복실 기능기가 가지고 있는 산소 원자와 수소 결합을 형성하기도 한다. 뿐만 아니라 같은 아미노산 간의 펩타이드 결합 등을

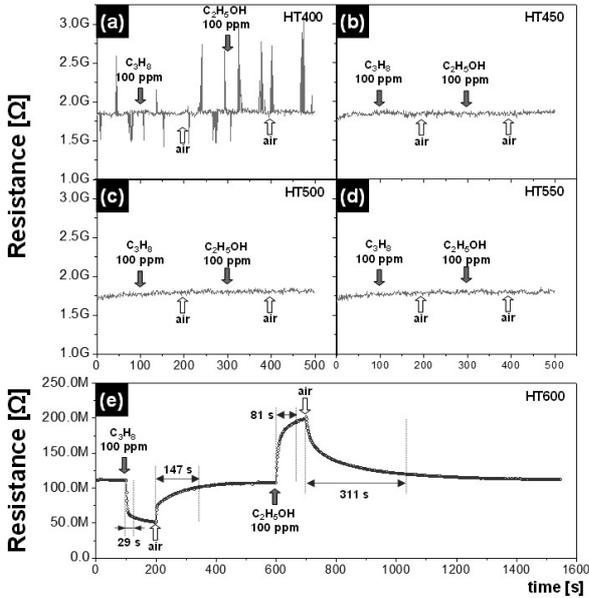


Fig. 5. Gas sensing behavior of heat-treated specimen : (a) at 400 °C for 2 h, (b) at 450 °C for 2 h, (c) at 500 °C for 2 h, (d) at 550 °C for 2 h, (e) at 600 °C for 2 h.

형성할 수 있어, 액상공정을 통한 전구체의 합성과정에서 그 구조를 형성하는 중요한 역할을 한다. 형성과정이 정확하게 밝혀지지 않았으나 rod 구조 내에 존재하는 Lysine의 기능기들 간의 결합들로 인해 rod 구조를 기반으로 자기 조립된 계층 구조가 형성된 것으로 판단된다. 본 연구자 등은 Lysine을 이용하여 다른 모양의 In₂O₃ 나노 계층구조를 합성하여 보고한 바 있다 [34]. 이 계층 구조는 500 °C 에서 하소 후 계층 구조가 없어지며 깨어진 껍질 모양으로 변화되었다(Fig. 3 (c)). 합성 직후 형성되는 rod 구조의 매끄러운 표면은 500 °C까지 유지되었지만 600 °C(Fig. 3 (d)) 하소 과정에서 고온에 의한 입자성장에 의해 거친 표면의 입자로 변화되었다. 또한 600 °C 하소 이후에 껍질 구조가 더욱 얇아지고 기공도가 더욱 커지는 것을 관찰할 수 있었다. 위는 하소 과정에서 계층 구조를 이루고 있는 유기물질이 분해 되면서 기공구조를 형성하고 나노 구조체 내의 망간 전구체 분자들의 재배열되는 과정으로 이해된다. 형성된 나노 구조체는 껍질의 두께가 100 nm정도로 얇고 매우 분산된 형태를 이루고 있어 가스 감응에 있어 유리할 것으로 기대된다.

수열 합성 직후의 전구체 분말(Fig. 4 (a))과 500 °C(Fig. 4 (b)) 및 600 °C(Fig. 4 (c))에서 열처리 한 분말의 X-선 회절 도형을 Fig. 2에 나타내었다. 세 분말의 패턴들은 모두 여러 가지 상이 복합적으로 섞여 있는 것으로 나타났다. 여러 가지 상들이 복합적으로 나타나는 이유는 망간의 산화수와 관계가 있다. 망간은 +2, +3, +4, +6, +7 등 다양한 산화수를 가지고 있고 이에 따라 MnO, MnO₂, Mn₂O₃, Mn₃O₄ 등의 다양한 산화상태로 나

타날 수 있다[35]. 복잡한 X-선 회절 도형은 이러한 다양한 산화상태가 복합적으로 나타난 결과이며 이는 가스 감응 선택성에 영향을 줄 것으로 예상된다. 500 °C 및 600 °C에서 하소한 미분말의 주요 상은 MnO₂임을 확인할 수 있다. 600 °C에서 하소했을 경우에는 특히 화살표로 나타난 부분의 상이 더 증가하는 것으로 판단되는데, 이상의 정확한 조성은 확인할 수 없었다.

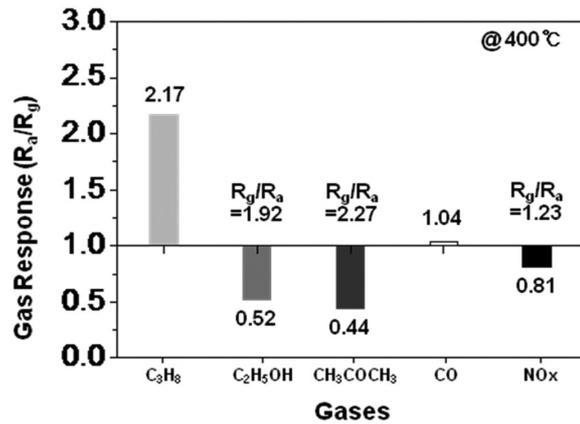


Fig. 6. Gas response of the sensors heat treated at 600 °C to 100 ppm C₃H₈, 100 ppm C₂H₅OH, 100 ppm CH₃COCH₃, 100 ppm CO and 1 ppm NOx.(Measurement temperature: 400 °C)

3.2 가스 감응 특성 평가

매우 분산된 형태를 이루고 있어 가스 감응에 있어 유리할 것으로 기대된다. 가스 감응 특성 평가는 하소 온도에 따라 다음과 같이 5 가지 시편에서 진행되었다. 수열 합성 직후, 분말들은 각각 400 °C, 450 °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C에서 2 시간 동안 하소 되었으며, 이 때의 승온 속도는 10 °C/min 로 고정했다. 가스 감응 평가는 400 °C에서 진행되었으며 센서 소자 제작 후 안정화를 위하여 2 시간 동안 각각의 하소 온도에서 다시 열처리 하였다. 피검 가스로는 환원성 가스인 C₃H₈, C₂H₅OH 100 ppm을 사용하였다. 각각의 시편들의 두 가지 가스 감응에 따른 저항 변화 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 400 °C ~ 550 °C 하소 시편의 경우 C₃H₈, C₂H₅OH 두 가스에 모두 반응하지 않았으며, 1.7 × 10⁹ Ω의 매우 높은 저항을 나타내었다(Fig. 5(a-d)). 특히 센서 동작온도와 동일한 400 °C하소 시편의 경우 센서 안정화가 이루어 지지 않아 저항이 매우 불안정한 모습을 보였다(Fig. 5(a)). 하지만 동작온도 보다 높은 온도인 450 °C 이상에서 하소한 시편들의 경우는 보다 안정된 저항 값을 나타내었다(Fig. 5(b-d)).

600 °C 하소 시편의 경우 저항이 115 × 10⁶ Ω으로 약 15배 감소하였으며 C₃H₈, C₂H₅OH 두 가스에 모두 반응하여 저항 변화를 나타내었다. C₃H₈, C₂H₅OH 두 가스의 감도는 각각 R_a/R_g

= 2.17(R_g : resistance in air/ R_a : resistance in gas), R_g/R_a = 1.92 로 나타났다. 90 % 반응 시간 및 회복 시간은 C₃H₈ 가스가 각각 29 초, 147 초를 나타내었는데, 이는 C₂H₅OH 가스의 81 초, 311 초에 비해 월등히 빠른 반응 및 회복 특성이다. 본 결과의 또 다른 중요한 특징은 n형 반도체 물질에서 두 가지 환원성 가스에 저항변화의 양상이 다르게 나타난다는 점이다. C₃H₈ 가스의 경우 저항이 감소하지만 C₂H₅OH 가스의 경우 저항이 증가되었다. 재현성을 확인하기 위해 다른 batch의 시편을 제작한 이후 동일한 시험을 반복해 본 결과 같은 경향의 결과를 얻었다. 한 가지 물질이 n-형 반도체의 가스 감응특성과 p-형 반도체의 가스 감응특성을 나타내는 현상은 복잡한 가스 감응기구를 의미하는 것으로 향후 자세히 연구되어야 할 것으로 판단되지만, 복잡한 Mn 산화물 중에 p-형의 반도체가 혼재되어 있는 것에 기인될 수 있다. 특히 Mn 산화물 혼합체가 여러 가지 다른 환원성 가스에 대해 다른 촉매 효과를 나타낼 경우 가스에 따른 저항의 변화가 다르게 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 현재, Mn 산화물을 이용한 가스 센서의 연구는 초기 단계이므로 향후 더 많은 고찰이 필요하지만, C₃H₈ 가스에는 n형 가스센서 특성을, C₂H₅OH 가스에는 p형 가스센서 특성을 나타내는 본 연구의 센서를 C₃H₈ 가스를 선택적으로 감지하는 데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

600 °C에서 하소된 분말의 C₃H₈, C₂H₅OH, CH₃COCH₃, CO 100 ppm 및 NO_x 1 ppm 등 4 종류의 환원성 가스와 1 종류의 산화성 가스에 대한 감도(R_a/R_g)를 Fig. 6에 나타내었다. 알코올 계열의 가스인 C₂H₅OH, CH₃COCH₃ 두 가스에 대해 저항이 증가하였으며, 두 가스 외의 환원성 가스인 C₃H₈ 및 CO 가스와 산화성 가스인 NO_x 가스에 대해서 모두 n-형 반도체의 특성이 나타난 것을 확인하였다. 이를 통해 합성된 Mn산화물은 전체적으로 n-형 반도체 물질임을 간접적으로 확인하였다. 알코올 계열 산화성 가스에 대해 p-형 반도체 특성을 보이는 이유는 합성된 Mn산화물 내부에 혼재하는 p-형 산화물에 C₂H₅OH, CH₃COCH₃ 가스가 선택적으로 크게 반응하기 때문인 것으로 생각된다. 즉, C₃H₈, CO 및 NO_x 가스는 n-형 Mn산화물에 C₂H₅OH, CH₃COCH₃ 가스는 p-형 산화물에 각각 더 크게 반응하여 위와 같은 결과를 나타낸 것으로 볼 수 있다.

환원성 가스 4 종류를 비교할 때, CO에 대해서는 매우 낮은 감도를 나타내었으며 C₂H₅OH, CH₃COCH₃ 두 가스에는 저항이 감소하는 p-형 반도체 특성을 나타내므로 합성된 물질은 C₃H₈ 가스에 선택적으로 반응한다. 그림에서 C₂H₅OH, CH₃COCH₃ 두 가스에 대한 감도를 0.52, 0.44로 나타낸 것은 감도를 n-형 가스센서와 같이 R_a/R_g 로 정의했을 때의 값으로, 이를 p-형 가스센서의 감도(R_g/R_a)로 바꿀 경우 감도가 각각 1.92, 2.27이 된다. 상기 그림은 본 연구의 센서를 이용할 경우 프로판을 선택적으로 감지할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 첨가물 Lysine을 이용하여 나노 계층 구조의 망간 전구체를 합성하였으며, 이를 600 °C의 고온으로 열처리하여 가스의 원활한 확산이 가능한 망간 산화물 나노 구조체를 합성했다. 전구체를 400–550 °C로 열처리한 경우에는 가스의 감도를 나타내지 않는 반면, 600 °C에서 열처리 한 이후에는 C₃H₈, C₂H₅OH 등의 가스에 반응하여 저항의 변화를 나타내었다. 망간의 경우 다양한 산화수로 인해 여러 산화상태가 혼재해 있으며 이로 인해 같은 환원성 가스인 C₃H₈, C₂H₅OH에 대해 저항 변화가 서로 반대로 일어났다. 이를 이용하여 상기 두 가스를 선택적으로 감지할 수 있었으며, C₃H₈ 가스가 C₂H₅OH 가스에 비해 반응 속도 및 회복 속도가 각각 4 배, 2 배 가량 빠른 것으로 나타났다.

감사의 글

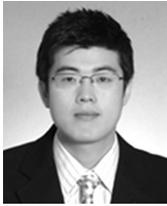
본 연구는 지식경제부 소재원천 기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCE

- [1] N. Yamazoe, "Toward innovations of gas sensor technology", *Sens. & Actuators B*, vol. 108, pp. 2-14, 2005.
- [2] Y. Shimizu and M. Egashira, "Basic aspects and challenges of semiconductor gas sensors", *MRS Bull.*, vol. 24, pp. 18-24, 1999.
- [3] Y. Shimizu, A. Jono, T. Hyodo, and M. Egashira, "Preparation of large mesoporous SnO₂ powder for gas sensor application", *Sens. Actuators B*, vol. 108, pp. 56-61, 2005.
- [4] A. Kolmakov, Y. Zhang, G. Cheng, and M. Moskovits, "Detection of CO and O₂ using tin oxide nanowire sensor", *Adv. Mater.*, vol. 15, pp. 997-1000, 2003.
- [5] Q. Wan, Q. H. Li, Y. J. Chen, T. H. Wang, X. L. He, J. P. Li, and C. L. Lin, "Fabrication and ethanol sensing characteristics of ZnO nanowire gas sensors", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, pp. 3654-3656, 2004.
- [6] M.-W. Ahn, K.-S. Park, J.-H. Heo, J.-G. Park, D.-W. Kim, K. J. Choi, J.-H. Lee, and S.-H. Hong, "Gas sensing properties of defect-controlled ZnO-nanowire gas sensor", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, p. 263103, 2008.
- [7] N. Yamazoe, "Toward innovations of gas sensor

- technology”, *Sens. & Actuators B*, vol. 108, pp. 2-14, 2005.
- [8] A. Gurlo, M. Ivanovskaya, N. Barsan, M. Schweizer-Berberich, U. Weimar, W. Gopel, and A. Dieguez, “Grain size control in nanocrystalline In_2O_3 semiconductor gas sensors”, *Sens. & Actuators B*, vol. 44, pp. 327-333, 1997.
- [9] J. Chen, L. N. Xu, W. Y. Li, and X. L. Gou, “ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanotubes in gas sensor and lithium-ion battery”, *Adv. Mater.*, vol. 17, pp. 582-586, 2005.
- [10] W. S. Choi, Y. Koo, Z. Zhongbin, Y. Li, and D.-Y. Kim, “Template synthesis of porous capsules with a controllable surface morphology and their application as gas sensors”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 17, pp. 1743-1749, 2007.
- [11] O. K. Varghese, D. Gong, M. Paulose, K.G. Ong, E.C. Dickey, and C.A. Grimes, “Extreme changes in the electrical resistance of titania nanotubes with hydrogen exposure”, *Adv. Mater.*, vol. 15, pp. 624-627, 2003.
- [12] J. Zhang, J. Liu, Q. Peng, X. Wang, and Y. Li, “Nearly monodisperse Cu_2O and CuO nanospheres: Preparation and applications for sensitive gas sensors”, *Chem. Mater.*, vol. 18, pp. 867-871, 2006.
- [13] Y.-S. Kim, I.-S. Hwang, S.-J. Kim, C.-Y. Lee, and J.-H. Lee, “ CuO nanowire gas sensors for air quality control in automotive cabin”, *Sens. Actuators B*, vol. 135, pp. 298-303, 2008.
- [14] S.-J. Kim and J.-H. Lee, “Preparation of nanocrystalline CuO powders by hydrazine method and their gas sensing characteristics”, *J. Kor. Sensors. Soc.*, vol. 16, no. 1, pp. 11-16, 2007.
- [15] R. Hao, J. Yuan, and Q. Peng, “Fabrication and sensing behavior of Cr_2O_3 nanofibers via In situ gelation and electrospinning”, *Chem. Lett.*, vol. 35, pp. 1248-1249, 2006.
- [16] W.-Y. Li, L.-N. Xu, and J. Chen, “ Co_3O_4 nanomaterials in lithium-ion batteries and gas sensors”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 15, pp. 851-857, 2005.
- [17] C.-Y. Liu, C. -F. Chen, and J. P. Leu, “Fabrication of mesostructured cobalt oxide sensor and its application for CO detector”, *Electrochem. & Solid-State Lett.*, vol. 12, pp. J40-J43, 2009.
- [18] Y.-J. Choi, I.-S. Hwang, J.-G. Park, K.-J. Choi, J.-H. Park, and J.-H. Lee, “Novel fabrication of an SnO_2 nanowire gas sensor with high sensitivity”, *Nanotechnology*, vol. 19, p. 095508, 2008.
- [19] E. Comini, G. Faglia, M. Ferroni, and G. Sberveglieri, “Controlled growth and sensing properties of In_2O_3 nanowires”, *Cryst. Growth & Des.*, vol. 7, pp. 2500-2504, 2007.
- [20] I.-S. Hwang, S.-J. Kim, Y.-S. Kim, B.-K. Ju, and J.-H. Lee, “VOCs(Volatile Organic Compounds) sensor using SnO_2 nanowires”, *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 17, no. 1, pp. 69-74, 2008.
- [21] W.-Y. Li, L.-N. Xu, and J. Chen, “ Co_3O_4 nanomaterials in lithium-ion batteries and gas sensors”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 15, pp. 851-857, 2005.
- [22] E. Comini, G. Faglia, G. Sberveglieri, Z. Pan, and Z.L. Wang, “Stable and highly sensitive gas sensors based on semiconducting oxide nanobelts”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 1869-1871, 2002.
- [23] C.-Y. Lee, S.-J. Kim, I.-S. Hwang, and J.-H. Lee, “Glucose-mediated hydrothermal synthesis and gas sensing characteristics of WO_3 hollow microspheres”, *Sens. & Actuators B*, vol. 142, pp. 236-242, 2009.
- [24] J. Park, X. Shen, and G. Wang, “Solvothetical synthesis and gas-sensing performance of Co_3O_4 hollow nanospheres”, *Sens. Actuators B*, vol. 136, pp. 494-498, 2009.
- [25] H. Zhang, Q. Zhu, Y. Zhang, Y. Wang, L. Zhao, and B. Yu, “One-pot synthesis and hierarchical assembly of hollow Cu_2O microspheres with nanocrystals-composed porous multishell and their gas-sensing properties”, *Adv. Funct. Mater.*, vol. 17, pp. 2766-2771, 2007.
- [26] H. X. Yang, J. F. Qian, Z. X. Chen, X. P. Ai, and Y. L. Cao, “Multilayered nanocrystalline SnO_2 hollow microspheres synthesized by chemically induced self-assembly in the hydrothermal environment”, *J. Phys. Chem. C*, vol. 111, pp. 14067-14071, 2007.
- [27] Q. Zhao, Y. Gao, X. Bai, C. Wu, and Y. Xie, “Facile synthesis of SnO_2 hollow nanospheres and applications in gas sensors and electrocatalysts”, *Eur. J. Inorg. Chem.*, vol. 2006, pp. 1643-1648, 2006.
- [28] H.-R. Kim, K.-I. Choi, J.-H. Lee, and S.A. Akbar, “Highly sensitive and ultra-fast responding gas sensors using self-assembled hierarchical SnO_2 spheres”, *Sens. Actuators B*, vol. 136, pp. 138-143, 2009.
- [29] Y. S. Ding, X. F. Shen, S. Gomez, H. Luo, M. Aindow, and S. L. Suib, “Hydrothermal growth of manganese dioxide into three-dimensional hierarchical nanostructures” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 16, pp. 549-555, 2006.
- [30] P. Jiang, J. J. Zhou, H. F. Fang, C. Y. Wang, Z. L. Wang, and S.S. Xie, “Hierarchical shelled ZnO structures made of bunched nanowire arrays” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 17,

- pp. 1303-1303, 2007.
- [31] Y. Baek, Y. Song, and K. Yong, "A novel heteronanostructure system: hierarchical W nanothorn arrays on WO₃ nanowhiskers" *Adv. Funct. Mater.*, vol. 18, pp. 3105-3110, 2006.
- [32] U.-S. Choi, G. Sakai, K. Shimano, and N. Yamazoe, "Sensing properties of Au-loaded SnO₂-Co₃O₄ composites to CO and H₂", *Sens. Actuators B*, vol. 107, pp. 397-401, 2005.
- [33] W. J. Moon, J. H. Yu, and G. M. Choi, "The CO and H₂ gas selectivity of CuO-doped SnO₂-ZnO composite gas sensor", *Sens. Actuators B*, vol. 87, pp. 464-470, 2002.
- [34] K.-I. Choi, H.-R. Kim, and J.-H. Lee, "Enhanced CO sensing characteristics of hierarchical and hollow In₂O₃ microspheres", *Sens. Actuators B*, vol. 138, pp. 497-503, 2009.
- [35] V. P. Santos, M. F. R. Pereira, J. J. M. Orfao, and J. L. Figueiredo, "The role of lattice oxygen on the activity of manganese oxides towards the oxidation of volatile organic compounds", *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 99, pp. 353-363, 2010.



최 권 일(Kwon-Il Choi)

- 2008년 고려대학교 재료공학과(공학사)
- 2010년 고려대학교 신소재공학과(공학석사)
- 현재 고려대학교 신소재공학과 박사과정



이 종 훈(Jong-Heun Lee)

- 1987년 서울대학교 무기재료공학과 (공학사)
- 1989년 서울대학교 무기재료공학과 (공학석사)
- 1993년 서울대학교 무기재료공학과 (공학박사)
- 1993~1999년 삼성 종합기술연구원 선임 연구원
- 1999~2000년 National Institute for Research in Inorganic Materials, Japan, Science and Technology Agency(STA) of Japan fellow
- 2000~2003년 서울대학교 BK21연구교수
- 2003~2008년 고려대학교 신소재공학과 부교수
- 2008년~현재 고려대학교 신소재공학과 교수