

## 산화니켈 및 탄소나노튜브/산화니켈 복합체 가스센서의 제작과 황화수소 감지 특성

양하늘 · Ngyuen Duc Chinh · Ngyuen Minh Hieu · 박지환 · 홍순현 · 윤홍관 · 김천중 · 김도진<sup>†</sup>  
충남대학교 신소재공학과

### Fabrication and H<sub>2</sub>S Sensing Property of Nickel Oxide and Nickel Oxide-Carbon Nanotube Composite

Haneul Yang, Ngyuen Duc Chinh, Ngyuen Minh Hieu, Jihwan Park, Soonhyun Hong,  
Hongkwan yun, Chunjoong Kim and Dojin Kim<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University,  
Daejeon 34134, Republic of Korea

(Received May 24, 2018 : Revised July 23, 2018 : Accepted July 27, 2018)

**Abstract** Nickel oxide(NiO) thin films, nanorods, and carbon nanotube(CNT)/NiO core-shell nanorod structures are fabricated by sputtering Nickel at different deposition time on alumina substrates or single wall carbon nanotube templates followed by oxidation treatments at different temperatures, 400 and 700 °C. Structural analyses are carried out by scanning electron microscopy and x-ray diffraction. NiO thinfilm, nanorod and CNT/NiO core-shell nanorod structural of the gas sensor structures are tested for detection of H<sub>2</sub>S gas. The NiO structures exhibit the highest response at 200 °C and high selectivity to H<sub>2</sub>S among other gases of NO, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, CO, etc. The nanorod structures have a higher sensing performance than the thin films and carbon nanotube/NiO core-shell structures. The gold catalyst deposited on NiO nanorods further improve the sensing performance, particularly the recovery kinetics.

**Key words** carbon nanotube, nickel oxide, H<sub>2</sub>S.

### 1. 서 론

황화수소는 투명하며 대기 환경을 오염시키는 가스이다. 특유의 계란 썩는 냄새가 나고 인화성과 폭발성을 가지고 있으며 인체에 매우 유해하다. 사람이 30 ppm 이하의 농도의 황화수소 가스에 노출 될 경우 결막염 현상이 일어날 수 있고, 500 ppm 이하의 농도에서는 기관지와 관련된 여러 문제가 발생할 수 있으며, 1,000 ppm 이상의 고 농도에 노출 될 경우 호흡 마비와 혼수상태 등 사람에게 치명적인 영향을 끼칠 수 있다.<sup>1)</sup>

탄소나노튜브의 경우 구조적으로 표면 대 체적의 비가 크기 때문에 가스 표면 반응의 유효 면적이 넓고 따라

서 가스 감지체로 사용할 경우 넓은 표면적으로 센서의 감도를 증가시킬 수 있다.<sup>2,3)</sup> 산화니켈의 경우 강자성 물질이며 p형 반도체 물질이다. 또한 화학적 안정성과 전기적 특성이 뛰어난 물질로 잘 알려져 있다.<sup>4,5)</sup> 산화니켈은 자체로써, 또는 다른 물질과의 복합체로써 황화수소 가스 감지 특성을 향상시킬 수 있는 것이 보고되고 있으며, 낮은 온도에서의 황화수소 감지 특성도 보고되고 있는 등 황화수소 감지에 탁월한 성능을 가진 재료로 알려져 있다.<sup>6-10)</sup>

기존의 산화니켈을 사용하는 연구의 경우 산화니켈을 다른 물질과 혼합하여 사용하였지만 본 연구에서는 나노구조체로써 순수한 산화니켈 박막과 나노막대 구조 그

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : dojin@cnu.ac.kr (D.J. Kim, Chungnam Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

리고 산화니켈/탄소나노튜브 core-shell 구조의 황화수소 감지 특성을 비교 조사하였으며, 상온에서의 황화수소 감지 가능성을 조사하기 위하여 금 나노입자를 촉매금속으로 사용하고, 자외선 조사의 영향 하에서 황화수소 감지 특성을 비교 조사함으로써 상온에서의 황화수소 센서 개발 가능성을 타진하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 센서 구조의 제작

산화니켈(NiO) 나노막대 센서 구조를 금(Au) 전극이 형성되어 있는 알루미나 기판 위에 제작하였다(그림 2.1 (a)). In-situ 아크 방전법(ITS, ITS-ARC-1)으로 기판 위에 합성된 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT: single-wall carbon nanotube)를 주형(template)으로 사용하여 니켈을 스퍼터 증착한 후 수평형 튜브(선영 시스텍, 79500 Tube furnace)를 이용하여 산화열처리를 거쳐 산화니켈 나노막대를 형성하는 방법을 사용하였다. 이는 본 연구실에서 창안된 통기성 나노구조 센서의 제작법이다.<sup>9,11-16)</sup> In-situ 아크방전법으로 기판 위에 탄소나노튜브를 합성하기 위해 전극이 형성된 기판을 챔버의 내벽에 정치시킨 후 촉매금속으로 Ni, Fe, Mo을 채운 탄소봉을 사용하여 450 Torr의 수소 분위기, 150 A/cm<sup>2</sup>의 아크방전 전류 조건에서 합성하였다. 탄소나노튜브 층의 두께는 합성시간을 1 분, 2 분, 3 분으로 변화시켜 조절하였다. 합성된 탄소나노튜브는 대기분위기에서 400 °C에서 2 시간 동안 열처리하여 외벽에 형성된 비정질 탄소를 제거하였다. 다음으로 Ni을 탄소나노튜브 외벽에 증착 시키기 위하여 스퍼터링(DC magnetron sputter) 방법으로 5 분간 증착하였다. 니켈 타겟은 순도 99.99%의 직경 2 인치 타겟을 사용하였으며, 증착 조건은 Ar 압력  $3 \times 10^{-3}$  Torr, 전력 30 W이다. 이렇게 형성된 CNT/Ni core-shell 나노막대를 700 °C에서 탄소나노튜브를 산화 제거 시킴으로써 순

수한 NiO 나노막대 센서 구조를 제작하였고, 이 구조에서의 황화수소 감지 특성을 바탕으로 하여 다음 센서 구조를 제작하는 기준으로 삼았다.

이 후 최적조건으로 산출된 2 분 탄소나노튜브 증착 형태를 기본으로 하여 Ni 스퍼터링 시간을 3, 6, 14, 20 분으로 변화시키면서 증착시켜 CNT/Ni core-shell 나노막대를 형성한 후 일부는 400 °C에서 2 시간 동안 산화 공정을 실행하여 CNT/NiO core-shell 나노막대로 만들었고(CN-계열) 각각을 CN3, CN6, CN14, CN20 시편으로 명명하였다. 한편 산화 온도를 700 °C로 올려서 탄소나노튜브를 산화 제거 시킴으로써 순수한 NiO 나노막대(N-계열) 센서를 제작하였으며, N6, N14, N20 등으로 센서를 명명하였다. 또, 이러한 나노막대 형태 센서와의 특성 비교를 위해 산화니켈 박막(T-계열) 센서를 제작하였는데, 이 경우 Ni 스퍼터링 시간을 2, 3, 6 분 동안 증착한 후 700 °C에서 2 시간 동안 산화 공정을 실시하여 NiO 박막 센서를 제작하였다. 이들 역시 T2, T3, T6 등으로 명명하였다.

또한, 황화수소 가스 감지에 미치는 금 촉매의 영향을 조사하기 위하여 N14 센서의 표면에 금을 스퍼터 증착하여 G-계열 센서를 제작하였다. 금 타겟은 순도는 99.99%의 2 인치 타겟을 사용하였고, Ar 압력은  $3 \times 10^{-3}$  Torr, 전력 3 W의 조건에서 10, 20, 30 초 동안 증착한 후 500 °C에서 2 시간 동안 열처리하여 증착한 금을 입자 형태로 바꾸어 주어 센서 G10, G20, G30을 제작하였다. 제작한 구조의 형상은 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였고, 화학 구조는 X-선 회절 방법(XRD)으로 측정하였다.

### 2.2 센서 감지 특성 측정 분석

제작한 CNT/NiO 나노막대 복합체(CN-계열), 산화니켈 나노막대(N-계열), 금 촉매가 도포된 산화니켈 나노막대(G-계열), 산화니켈 박막(T-계열) 센서 구조의 황화수소

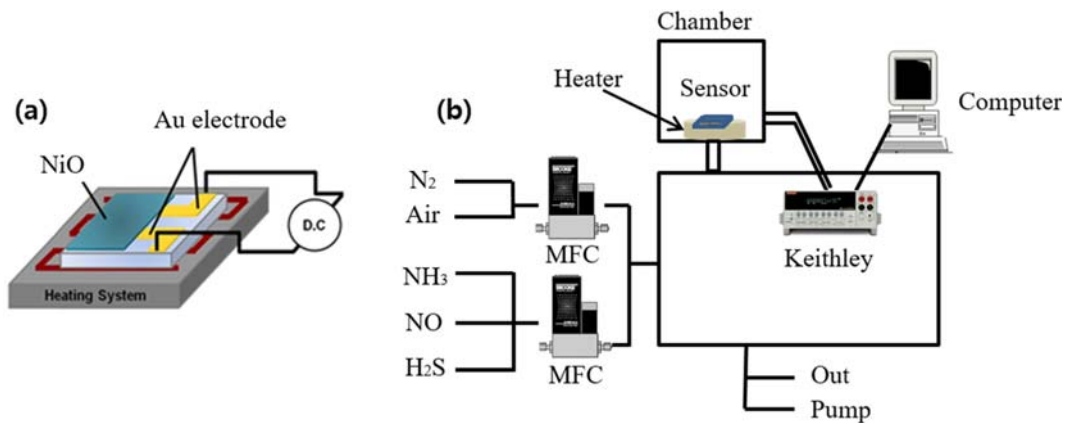
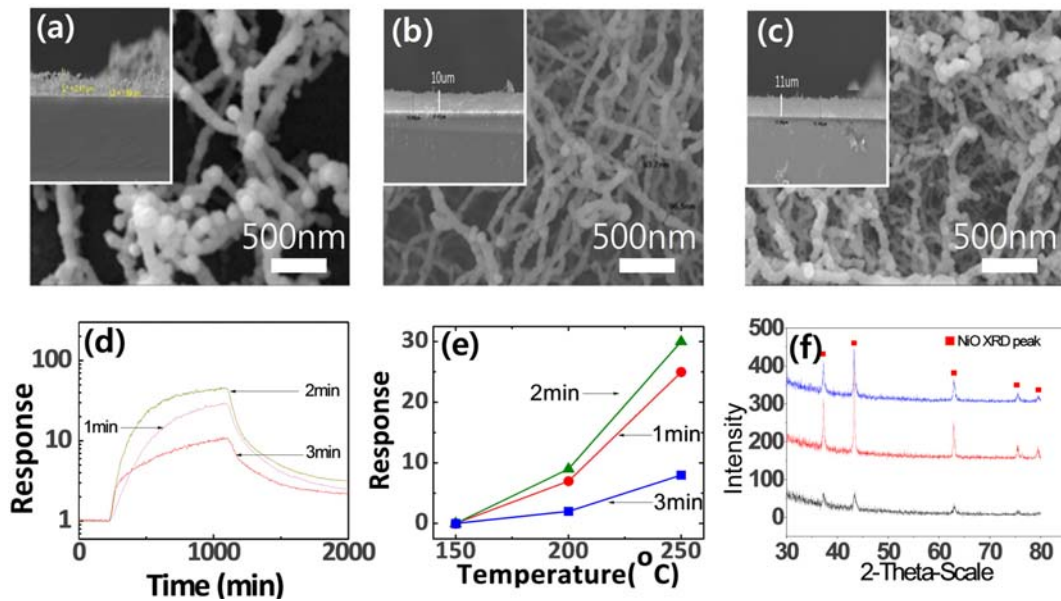


Fig. 1. (a) Au electrode on the Alumina substrate (b) Schematic diagram of the sensing property measurement system.



**Fig. 2.** (a-c) SEM images of the fabricated NiO nanowire sensor structures of the CNT synthesis times of 1, 2, and 3 minutes followed by 5 min Ni sputtering and oxidation in air at 700 °C for 2 hours. (d) shows the response-recovery curve of the sensors to 100 ppm H<sub>2</sub>S gas at 250 °C. (e) The response levels measured for the sensors at different temperatures showing the highest response level for CNT synthesis time of 2 min. (f) XRD patterns from above NiO nanowire sensors exhibiting the chemical stoichiometry of NiO. The measurements from N-series and CN-series sensors also revealed the same stoichiometry.

감지 특성을 측정하는데 모식도 Fig. 1의 측정장치를 사용하였다<sup>11-16</sup>. 챔버 내 가열판에 센서를 장착하고 황화수소 가스를 dry air를 캐리어가스로 하여 MFC를 통해 유량을 제어하여 주입하면서 시료의 저항 변화를 측정함으로써 센서의 가스 감지도를 측정하였다.<sup>17</sup> 또한 광조사 영향을 조사하기 위하여 챔버에 quartz window를 설치하고 이를 통해 LED 조명을 투과시켜 광량을 조절하며 황화수소 감지 특성을 조사하였다. 또한 센서의 가스 선택성(gas selectivity)과 가스량 변화에 따른 센서의 선형적 변화 등을 조사하여 가스센서로서의 가능성을 조사하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 탄소나노튜브 형틀 제작 조건 실험

Fig. 2a-2c는 탄소나노튜브의 아크방전 합성 시간을 1, 2, 3 분으로 변화시켜 형틀로 사용된 탄소나노튜브 형틀 층의 두께를 변화시켜 가장 좋은 황화수소 감지를 가지는 두께를 알아보았다. 한편, Ni 증착 시간 5 분, 산화 처리 온도 700 °C의 일정 조건으로 제작한 니켈산화막대 센서의 SEM 사진이다. Fig. 2d는 서로 다른 시간 동안 탄소나노튜브를 증착한 센서로 100 ppm H<sub>2</sub>S 가스에 대해 250 °C에서 측정한 감지 및 회복 신호를 도시한 것인데 2 분 증착한 센서가 가장 높은 신호를 보였다. Fig. 2e는 150에서 250 °C 사이에서 100 ppm의 황

화수소에 대해 측정한 감도를 정리한 결과로써 온도가 높아질수록 감도가 향상되는 것을 볼 수 있다.

이 결과에 따라 이후의 탄소나노튜브 형틀을 사용한 산화니켈 나노막대 구조를 제작 할 경우에는 탄소나노튜브의 아크 방전 시간을 2 분으로 고정하여 실험을 진행하였다. 2 분간 탄소나노튜브 증착한 형틀에서 얻어진 NiO 나노막대가 최고의 감도를 보인 것은 이 조건에서 NiO 나노막대 간의 연결, 즉 percolation이 최적의 저항 변화, 즉 감도를 나타내도록 한 조건이라고 판단된다. 이에 대한 자세한 분석은 본 연구의범위를 넘어서며 또 다른 연구가 요구되는 영역이다.

Fig. 2f는 제작된 니켈나노막대의 X-선 회절 패턴인데, 화학식 NiO의 회절 피크와 일치한다. 한편 그림에는 추후 제작된 N-계열 및 CN-계, 즉 400 °C 및 700 °C 산화 공정 결과 제작된 니켈산화막의 화학조성을 측정된 결과도 포함하고 있는데, 모두 공히 NiO의 화학식을 보이는 것을 확인하였다.

#### 3.2 산화니켈의 황화수소 가스 감지 특성

앞에서 구한 최적의 탄소나노튜브 형틀(2 분 탄소나노튜브 증착)을 사용하여 산화니켈 나노막대의 굵기를 변화시킨 NiO 나노막대(N-계열) 및 CNT/NiO 나노막대(CN-계열) 센서를 제작하고 황화수소 감지 특성을 조사하였으며, 이를 NiO 박막(T-계열) 센서의 결과와 비교하였다. Fig. 3은 나노구조 크기(박막 두께 및 나노막대 굵

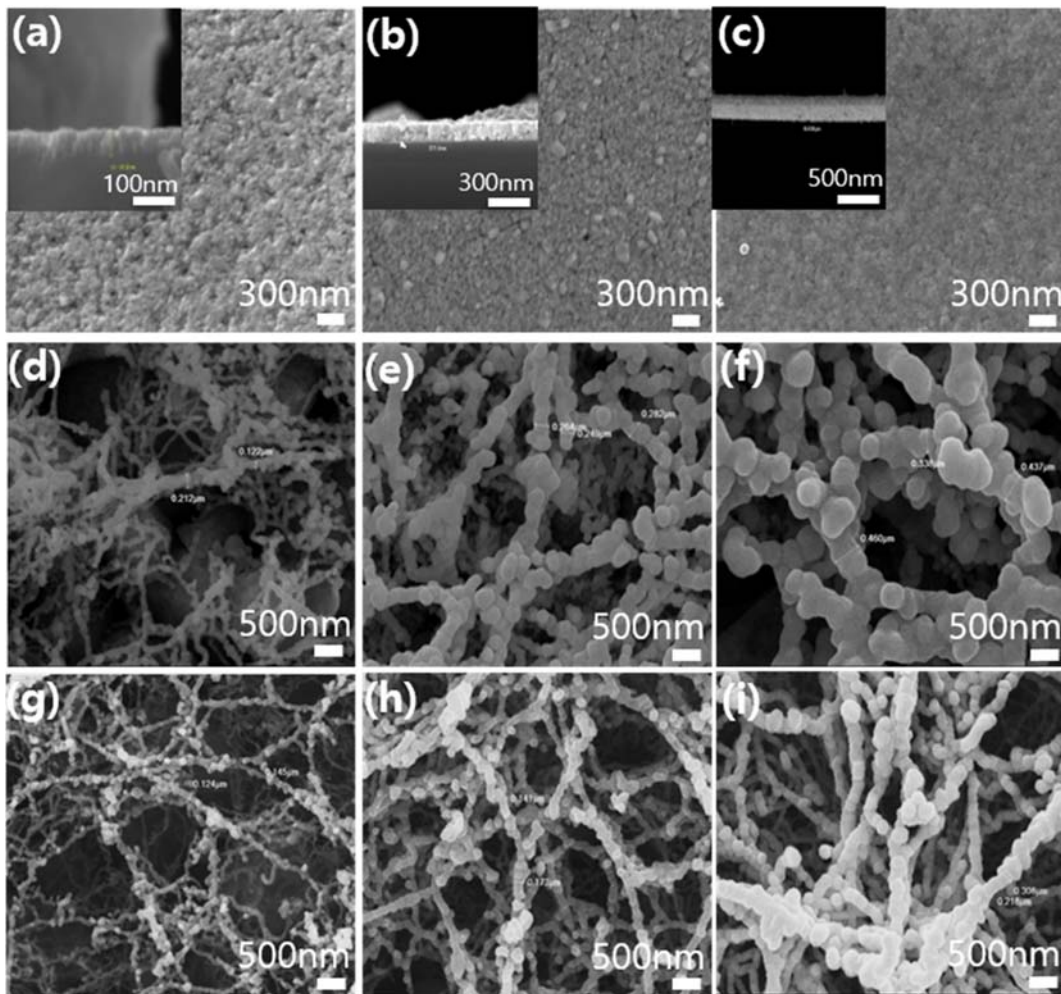


Fig. 3. SEM image of the sensors (a-c) T-2, T-3, T-6, (d-f) N-6, N-14, N-20, and (g-i) CN-3, CN-6, CN-14.

기)를 변화시키면서 제작된 센서 구조들의 SEM 사진이다. Fig. 3a-3c의 T-계열 센서 구조의 평면 및 단면 사진을 보여주고 있는데, 스퍼터 증착시간 2, 3, 6 분 변화에 따라 NiO 박막 두께가 100, 270, 430 nm로 증가하며 동시에 입자의 크기가 커짐을 관찰하였다. Fig. 3d-3f는 N-계열 센서의 형태로 NiO 나노막대의 굵기가 스퍼터 증착시간 6, 14, 20 분 변화에 따라 120, 250, 400 nm로 증가함을 볼 수 있다. Fig. 3g-3i는 CN-계열 core-shell 나노막대의 형상으로 역시 증착 시간이 3, 6, 14 분으로 증가함에 따라 나노막대의 굵기가 증가하는 경향을 보여준다. 박막과 나노막대 구조에서 나노 크기를 결정하는 스퍼터링 시간이 차이가 큰데 이는 유효 증착량이 다르기 때문으로 이해된다. 나노막대 구조는 간극이 수 백 nm에 이르므로 gas와 센서 구조의 접촉에 Knudsen 확산에 의한 영향을 배제할 수 있는 통기성이 매우 큰 구조를 나타내었다. N-계열과 CN-계열은 나노막대의 중심에 탄소나노튜브가 존재하는지 여부에 따른

구분인데 탄소나노튜브의 굵기가 작고 또 탄소나노튜브의 산화에 따른 니켈산화막대의 수축도 기대할 수 없으므로 그 둘 사이의 길보기 굵기 차이는 무시할 수 있다.

Fig. 3에서 관찰한 T-, N-, CN-계열 나노구조 센서의 황화수소 가스 감지 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 각 센서에 대해 150-300 °C 온도에서 측정하였으며, 건조 대기에 100 ppm으로 희석된 황화수소 가스에 대한 감지 특성을 조사하였다. 도시한 가스센서 감도(response)는 시료를 황화수소 가스에 노출시켰을 때 나타나는 저항의 변화를 나타낸 값으로써, 가스 반응 후 저항( $R_g$ )을 가스 반응 전 저항( $R_0$ )으로 나눈 값( $R_g/R_0$ )을 말한다. 황화가스를 흘렸을 때 센서의 저항은 증가하였는데 이는 NiO 및 CNT/NiO 복합체가 모두 p-형의 반도체특성을 갖기 때문이다.

각 계열의 구조에서 산화니켈 박막의 경우 T-3 센서, 산화니켈 나노막대의 경우 N-14 센서, 탄소나노튜브/산화니켈 나노막대 복합체의 경우 CN-14 센서가 각각 가

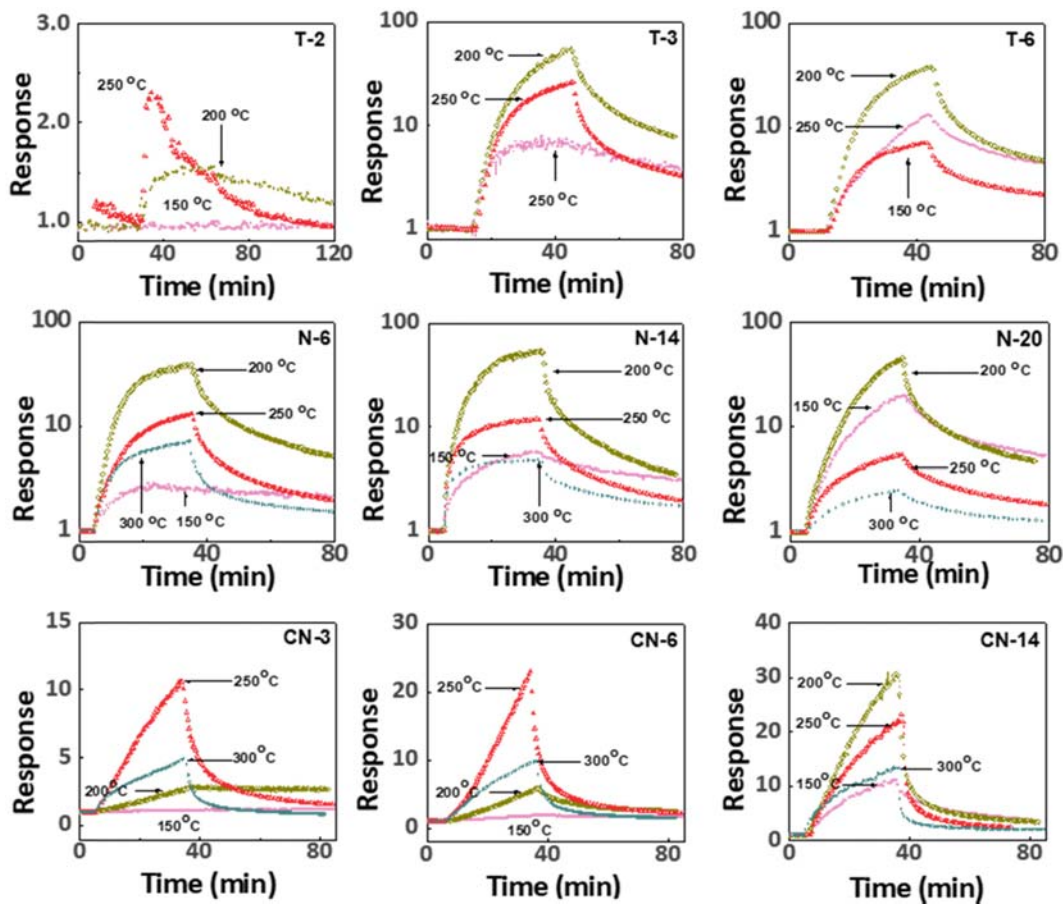


Fig. 4. Gas sensing properties of the sensors of Fig. 3 measured at different temperatures to 100 ppm  $H_2S$  diluted in dry air.

장 큰 감도를 나타내었으며, 그 중에서도 N-14가 작동 온도 200 °C에서 가장 우수한 감도와 함께 우수한 감응-회복 양상을 보였다. 감응 곡선을 비교해 보면 나노막대가 박막에 비해 더 빨리 안정화 단계에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이는 통기성 나노막대 구조가 나노입자로 구성된 박막에 비해 가스와의 반응 시간이 짧다는 것을 시사한다. 회복 양상도 상대적으로 나노막대가 우수하지만 모두가 완전한 회복에 이르지 못하는 것을 볼 수 있다. T-, CN- 계열의 경우 45분 경과 후에도 90 % 수준으로 회복하지 못하였으나(T-3의 경우 70 % 정도, CN-14의 경우도 88 % 정도의 회복 수준을 보였다), N-14의 경우 90 % 회복을 하는데 25 분이 소요되어 회복 성능이 가장 우수하였다.

또, 탄소나노튜브/산화막대 코어-셸 구조는 감지 곡선으로 판단할 때 안정 단계에 이르는데 매우 긴 시간이 필요한 것으로 보여 감응 시간이 매우 길 것으로 예측되었고 감도도 상대적으로 낮았다. Core-shell 구조의 상대적으로 낮은 감도와 긴 감지 시간은 부분적으로 코어-셸 구조의 큰 전기전도도, 즉 낮은 저항으로부터 기인하는 요소가 크며(탄소나노튜브의 경우  $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ ohm} \times \text{cm}$

의 비저항을 가진다.), 열처리 온도에 따른 산화니켈의 결정성과 연결된 전하 이동 특성과의 연결도 예상된다. 가스 감도, 감응 시간, 회복 시간 등을 종합적으로 비교해 보았을 때 나노막대 구조 센서가 황화수소 감지에 가장 우수한 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 결과를 작동 온도에 따라 나타낸 것으로 (a)는 T-계열 센서, (b)는 N-계열 센서, (c)는 CN-계열 센서의 감도를 나타낸 것이다. 박막 및 나노막대 구조는 모두 200 °C에서 최대 감도를 보였으나, CN-계열 중 얇은 니켈산화막 구조의 경우 더 높은 온도인 250 °C에서 가장 높은 감도를 나타내었다. 탄소나노튜브/니켈산화막대 core-shell 구조의 특이한 감지 특성은 현재 확실하게 분석되지 않아 별도의 연구가 요구되고 있으나, 황화수소감지에 있어서 감지 특성뿐만 아니라 감지 조건에서도 상대적으로 열악한 감지 특성을 나타내고 있는 것은 확실하다.

가장 좋은 감도 특성을 갖는 N-14의 황화수소 가스 농도 변화(10-100 ppm)에 따른 감지 특성을 Fig. 6a에 나타내었으며 insert에 직선적으로 변화하는 양상을 나타내었다. N-14의 가스 선택성을 산화 가스인 NO와 다른 환

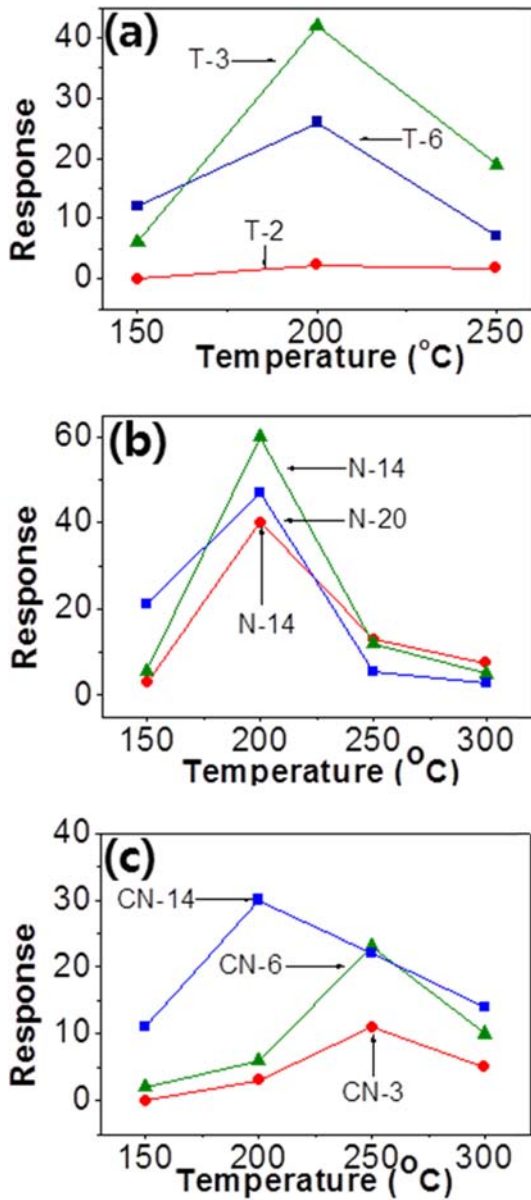


Fig. 5. Summary of the sensor responses of the sensors in Fig. 4.

원 가스인 NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, CO에 대해 200 °C에서 조사하였는데 Fig. 6b에 보였듯이 NO 및 NH<sub>3</sub>에 대해 약간의 감도를 나타내었을 뿐 황화수소에 대한 가스 선택성이 매우 우수함을 알 수 있다.

### 3.3 금 촉매의 황화수소 가스 감지 특성에 미치는 영향 조사

이제까지 조사한 바 NiO는 150 °C 이하의 작동 온도에서는 황화수소를 감지하지 못하는 것을 확인하였다. 이는 150 °C 이하에서는 산화물 센서 표면에서의 흡탈착 및 화학반응에 필요한 에너지 공급이 부족하기 때문인데, 이러한 열에너지를 광학에너지로 대체하는 시도가 많

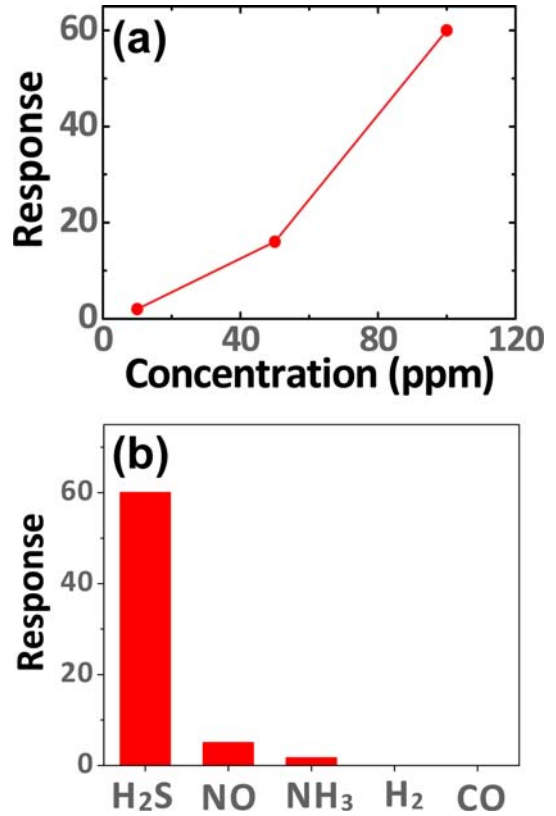
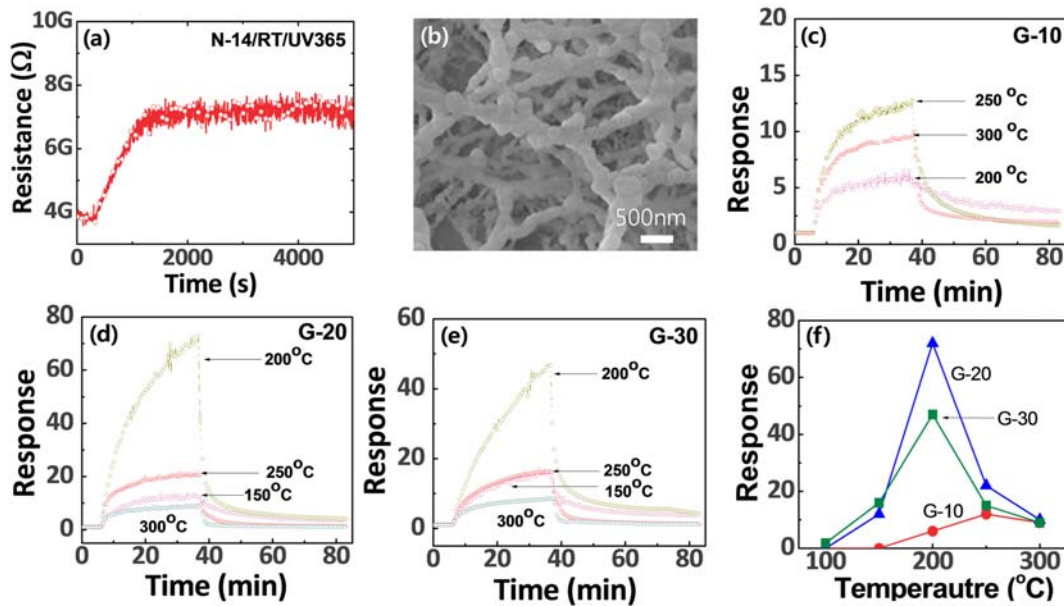


Fig. 6. (a) Response curves of N-14 sensor for different H<sub>2</sub>S concentrations and (b) gas selectivity of the sensor.

이 수행되었다.<sup>16,18)</sup> 본 연구에서는 365 nm의 파장을 가진 자외선 조사 효과를 측정하였는데, Fig. 7a에서 보듯이 N-14에 자외선을 쬐어주었을 때는 상온에서 황화수소에 대한 응답이 있음을 알 수 있다. 이는 자외선 조사 하에서는 황화수소와 표면 흡착되어 있는 산소이온과의 반응이 일어나고 있음을 반증한다. 그러나, 가스의 주입을 멈추었을 때 회복 단계에서 저항이 처음의 기저 저항으로 회복되지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 대기 중 산소의 흡착이 광조사에 의해 방해 받고 있음을 반증한다. 즉 자외선 광조사는 흡착된 산소와 황화수소의 표면 반응을 활성화시키지만 회복 주기에서 산소의 흡착을 방해하는 것을 알 수 있다. 그 원인에 대해서는 별도의 연구가 필요하다.

그런데 산화니켈 나노막대 표면에 촉매금속으로써 금 입자를 코팅한 후 자외선을 쬐이면서 온도를 변화시키면서 황화수소 감지 특성을 조사하였다. 금은 여러가지 가스 센서의 감지능을 높이는 촉매로서 널리 사용되어 왔다.<sup>12)</sup> 금 촉매는 N-14 산화니켈 나노막대 위에 10, 20, 30 초 동안 스퍼터링으로 증착한 후 500 °C에서 2 시간 동안 열처리하여 나노 입자 형태로 바꾸어 G-계열 센서를 제작하였다. Fig. 7b는 G-20 나노막대 센서의 주사전자현미경 사진인데, 나노 막대에 금 입자가 붙어있



**Fig. 7.** (a) Response to H<sub>2</sub>S at room temperature under UV light showing a response but with poor recovery behavior. (b) The SEM morphology of G-20 structure. (c-e) The sensing properties measured for G-10, G-20, and G-30 sensor structures at different temperatures. (f) The summary of the measurements for the progress of response time.

는 것을 확인 할 수 있다. 금 증착 시간이 길어 질수록 금 입자의 크기가 커지고 있음을 확인할 수 있었다. 센서 G-10, G-20, G-30의 온도 변화에 따른 100 ppm 황화수소에 대한 감지 결과를 Fig. 7c-7e에 나타내었다. 감도는 G-20의 경우 가장 높게 측정되었는데, 금 촉매가 없는 나노막대 센서인 N-14와 비교하여 보았을 때 G-20이 약간 더 높은 감도를 보였으며, 감응 시간 보다는 회복 시간에서 큰 향상을 보였다. G-20의 경우 회복 시간이 14분으로 25분을 가지는 N-14와 비교하여 훨씬 빠른 회복 성능을 보였다. 즉, 금 촉매의 효과는 황화수소의 산화니켈 표면에서의 폭발 반응(combustion reaction)에 대한 속도론적 활성화 보다는 회복단계에서의 산소 흡착에 주요한 기여를 함을 알 수 있었다.

Fig. 7f는 금 촉매 크기에 따른 감지도를 반응 시간에 따른 변화로 나타낸 것이다. 어느 정도 크기 이상의 금 촉매는 감지 시간에 큰 차이가 없으나 크기가 상대적으로 작을 경우 감지 반응에 대한 속도론적 효과는 더디 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 금 촉매의 표면적이 상대적으로 작아 화학반응 처리 양을 증대시키는 효과가 작아서 나타난 결과로 판단된다.

#### 4. 결 론

황화수소 가스 감지를 위해 박막 및 나노막대 형태의 산화니켈과 CNT/NiO 나노막대 core-shell 복합체 센서의 감지 특성을 측정 비교 하였으며, 자외선과 금 촉매

의 황화수소 감지 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 산화니켈 나노막대가 박막 구조 보다 더 높은 감도를 나타냈으며 짧은 회복 시간을 나타내었다. 이는 황화수소와 반응하는 넓은 표면적에 의한 나노 효과로 설명되었다. 한편 탄소나노튜브/산화니켈 core-shell 나노막대 구조는 황화수소 감지 성능이 상대적으로 떨어졌는데 중심에 있는 고전기전도도의 탄소나노튜브에 의해 저항 변화율이 작기 때문에 나타난 결과이다. 산화니켈의 경우 황화수소 감지에 150 °C 이상의 온도가 필요하였으며, 자외선을 조사한 경우 상온에서 황화수소를 감지하였으나 회복은 일어나지 않았다. 또, 금을 촉매금속으로 사용했을 경우 그렇지 않은 나노막대 센서 보다 30% 정도 높은 감도를 나타냈으며 특히 회복 속도가 향상되었다. 산화니켈은 NO, NH<sub>3</sub>, CO, H<sub>2</sub> 등에 대해 높은 황화수소 선택성을 나타내었다.

#### Acknowledgement

This work was supported by the National Research Lab program(2018R1A2A1A05023126) of the National Research Foundation of Korea.

#### References

1. Patnaik, P., A comprehensive guide to the hazardous properties of chemical substances. p.405, Wiley & Sons,

- USA (2007).
2. P. G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami and A. Zettl, *Science*, **287**, 1801 (2000).
  3. J. Kong, N. R. Franklin, C. Zhou, M. G. Ghaipline, S. Peng, K. J. Cho and H. J. Dia, *Science*, **287**, 622 (2000).
  4. M. Kitao, K. Izawa, K. Urabe, T. Komatsu and S. Kuwano, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 6656 (1994).
  5. K. Yoshimura, T. Miki and S. Tanemura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 2440 (1995).
  6. E. D. Gaspera, M. Guglielmi, S. Agnoli, G. Granozzi, M. L. Post, V. Bello, G. Mattei and A. Martucci, *Chem. Mater.*, **22**, 3407 (2010).
  7. Y. Wang, F. Qu, J. Liu, Y. Wang, J. Zhou and S. Ruan, *Sens. Actuators, B*, **209**, 515 (2015).
  8. L. Xu, R. Zheng, S. Liu, H. Song, J. Chen, B. Dong and H. Song, *Inorg. Chem.*, **51**, 7733 (2012).
  9. N. Van Hieu, P. T. Hong Van, L. T. Nhan, N. V. Duy and N. D. Hoa, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 25310 (2012).
  10. T. Yu, X. Cheng, X. Zhang, L. Sui, S. Gao, H. Zhao and L. Huo, *Mater. Chem. A*, **3**, 11991 (2015).
  11. H. N. Hieu, N. Q. Dung, J. Kim and D. Kim, *Nanoscale*, **5**, 5530 (2013).
  12. N. M. Vuong, D. Kim and H. Kim, *Sci. Rep.*, **5**, 11040 (2015).
  13. N. M. Vuong, D. Kim and H. Kim, *Sens. Actuators, B*, **220**, 932 (2015).
  14. N. M. Vuong, D. Kim and H. Kim, *Sens. Actuators, B*, **224**, 425 (2016).
  15. S. Moon, N. M. Vuong, D. Lee, D. Kim, H. Lee, D. Kim, S. Hong and S. Yoon, *Sens. Actuators, B*, **222**, 166 (2016).
  16. N. D. Chinh, N. D. Quang, H. Lee, T. T. Hien, N. M. Hieu, D. Kim, C. Kim and D. Kim, *Sci. Rep.*, **6**, 35066 (2016).
  17. N. D. Hoa, S. An, N. Q. Dung, N. Y. Quy and D. Kim, *Sens. Actuators, B*, **146**, 239 (2010).
  18. N. M. Vuong, N. D. Chinh, T. T. Hien, N. D. Quang, D. Kim, D. Kim, H. Kim and S. Yoon, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **16**, 10346 (2016).