

자동차 배기가스용 NO_x센서의 감도향상을 위한 새로운 산화물 감지물질과 변형된 혼합전위 센서의 개발

박진수 · 윤병영 · 박종욱[†]

The development of new oxide materials and modified mixed potential sensing method for highly sensitive NO_x sensor

Jinsu Park, Byoung Young Yoon and Chong Ook Park[†]

Abstract

The sensing characteristics of new oxide sensing materials, NiO, NiO-YSZ and CuO, were evaluated at the temperature of 700 °C in 10 % O₂ containing atmosphere. Through simultaneous response to NO₂ and NO, the sensing mechanism of oxide electrode was studied and the relation of EMF and NO/NO₂ concentrations was elucidated. Moreover, for highly sensitive NO_x sensor, modified mixed potential sensor which has at least two oxide electrodes was proposed.

Key Words : mixed potential, NO_x sensor, oxide electrode

1. 서 론

내연기관에서 배출된 NO_x(NO와 NO₂)는 대기 중에서 각종 탄화수소와 함께 햇빛과 반응하여 오존을 생성하며, 인체의 호흡기장애 및 산성비와 광화학스모그의 원인이 되는 대표적인 대기 오염 물질이다^[1-3]. 자동차 배기가스는 이러한 NO_x 배출의 주된 요인으로 세계 각국은 NO_x를 포함한 자동차 배출 유해가스의 양을 줄이기 위해 점차 강화되는 규제법을 만들고 이를 엄격히 준수하도록 하고 있다.

자동차에서 배출되는 NO_x의 양을 줄이기 위해서는 SCR(Selective Catalytic Reaction)과 LNT(Lean NO_x Trap)등의 후처리 과정인 DeNO_x 시스템이 필요하게 되는데, DeNO_x 시스템의 효율적인 운영을 위해서는 실시간으로 측정가능한 NO_x 센서가 필수적이다. 자동차 배기가스용 NO_x센서의 구동 요건은 자동차용 산소 센서와 유사하여 300-1000 °C의 고온에서 작동 가능하여야 하고, CO, C_mH_n 등의 부식성 가스와 다량의 수분에도 안정적이어야 한다. 또한 자동차 배출가스의

NO와 NO₂의 총합인 NO_x총량을 지시할 수 있어야 하며 감지범위는 100 ppm에서 1000 ppm이다^[4].

배기가스의 높은 온도와 부식성 환경에서 장기간 그리고 안정적으로 거동 가능한 NO_x 센서는 산화물 반도체나 고체전해질을 이용하는 것이 적합하다. 그러나 산화물 반도체를 이용한 저항식 센서는 500 °C 이상에서는 NO_x에 대한 반응성이 사라지며^[5-7], 고체 전해질을 이용한 농담전지식 NO_x는 감지물질의 녹는점이 센서가 구동해야 할 배기가스 온도보다 낮다는 한계점이 있다^[8,9].

현재 유망한 자동차용 NO_x센서는 산소이온 전도체를 이용한 전류 측정식 센서와 혼합전위 센서이다. 전류식 NO_x센서는 고온에서 구동가능하고 산화성 방해가스 효과가 없는 장점이 있다. 그러나 센서 내의 잔류 산소에 의한 신호 부정확성, 고온에서 장기간 구동시 다공성 확산방지막의 기공변화, NH₃가스에 방해효과, 그리고 복잡한 적층형 구조가 단점이다^[10]. 혼합전위 방식의 센서는 고온안정성이 우수한 물질로 이루어져 있는 것이 장점이나, NO와 NO₂의 신호방향이 반대이므로, NO_x를 단일화하는 전처리과정이 필요하고, 고온에서 NO가 NO₂로 불완전 산화되며, 700 °C 이상의 고온에서는 감도가 크게 감소하는 단점이 있다. 또한 전류식 NO_x센서처럼 복잡한 적층형구조 및 확산방지막

한국과학기술원 신소재공학과(Department of Material Science and Engineering, KAIST)

[†]Corresponding author: cops@kaist.ac.kr

(Received : December 20, 2007, Accepted : December 26, 2007)

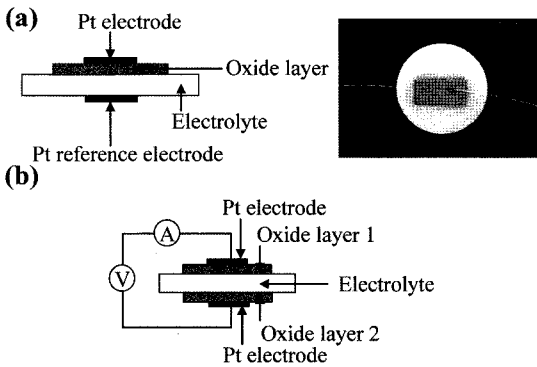


그림 1. 제작된 (a) 단순 혼합전위 NOx 센서의 모식도와 광학사진, (b) 개선된 측정방식의 혼합전위 NOx 센서의 모식도

Fig. 1. (a) Schematic structure of simple mixed potential NOx sensor and its optical image, (b) schematic diagram of modified mixed potential NOx sensor.

기공의 고온 불안정성 또한 단점이다^[10,11].

본 연구에서는 자동차용 NOx센서로 가장 유망한 혼합전위 방식의 NOx센서가 갖는 단점을 극복하고자 700 °C 이상의 고온에서도 높은 감도를 나타내는 새로운 산화물 감지물질질을 개발하고 이를 이용하여 NOx감지 메커니즘을 규명하였다. 또한 단순 혼합전위 방식을 탈피하여 산화물 감지전극에서 NO와 NO₂의 산화·환원 속도를 조절하여 향상된 감도를 갖는 새로운 방식의 NOx센서를 제안하였다.

2. 실험 방법

측정에 사용된 센서의 고체 전해질은 상용화된 YSZ 분말(8 mol% Y₂O₃, Tosho zirconia)을 펠렛 형태로 건식 성형 하고, 1450 °C 3시간 열처리하여 직경 10 mm, 두께 0.5 mm로 하였다. 감지물질은 산화물 분말을 organic binder와 혼합한 잉크형태로 제조되었으며, 단순 혼합전위 센서의 경우 고체 전해질 한면에, 개선된 혼합전위 방식의 센서는 고체 전해질의 양면에 스크린 프린팅 기법으로 형성시키고 열처리하였다. 마지막으로 전기적 접합을 위하여 감지 물질과 YSZ 전해질 위에 각각 Pt paste와 Pt wire를 이용하여 전극을 형성하고 1000 °C, 30분간 열처리하였다. 그림 1은 이렇게 해서 제작된 단순 혼합전위의 모식도와 광학사진 그리고 개선된 혼합전위 센서의 모식도를 나타내고 있다.

제작된 센서는 그림 2의 측정장치에서 NOx감지특성이 평가되었다. 100 ppm과 1000 ppm (N₂ balanced)의 NO와 NO₂ 가스, air 그리고 질소 가스가 flow

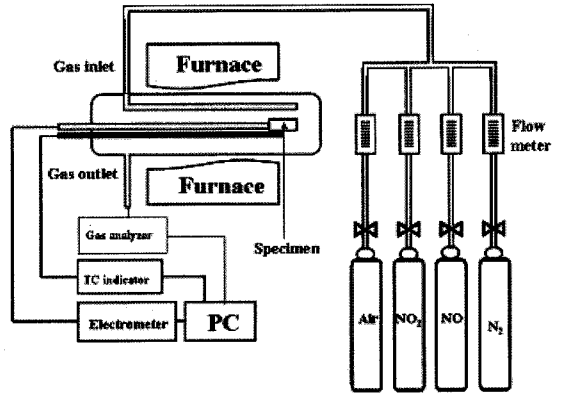


그림 2. 측정 장치의 개략도

Fig. 2. The schematic diagram of experimental apparatus for measuring NOx.

meter을 통하여 조절된 유량으로 측정 챔버로 유입되었고, 측정 챔버내의 온도는 전기로를 이용하여 일정하게 유지되었다. 센서에서 나오는 전기적 신호는 Hewlett Packard사의 34401A Multimeter와 Autolab사의 Potentiostat/Galvanostat인 μ -Autolab type III를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 또한 측정챔버의 가스 배출관에 연소 효율 분석기(KM9106)를 직접적으로 연결하여 측정챔버내의 가스 종류와 양을 분석하였고, 이와 센서의 신호변화를 실시간으로 비교하였다. 이때의 측정 조건은 700 °C, 총 유량 4000 cc/min, 산소의 농도 10 %로 자동차 배기가스와 유사하게 설정하였다.

3. 실험 결과

3.1. 산화물 전극의 NOx 반응특성

본 연구에서는 다양한 종류의 감지 전극을 형성하여 700 °C에서 그 감도를 측정하였다. 표 1은 동일한 실험 조건으로 얻어진 다양한 감지 물질의 감도를 나타낸 것이다. 순수한 NO₂나 NO를 측정챔버에 유입시켜도 고온에 의하여 일부분의 NO₂가 NO로 분해되거나 일부분의 NO가 NO₂로 산화되어 측정챔버내에는 항상 NO와 NO₂가 함께 존재하였다. NO₂가 355 ppm, NO가 135 ppm에 대한 감지 전극의 감도는 NiO 감지물질이 69 mV로 가장 큰 것으로 나타났으며 다음으로는 CuO가 64 mV로 가장 좋은 것으로 나타났다. 그러나 불행히도 NO에 대한 기전력(EMF)의 변화는 NO₂에 비해 그 영향이 매우 작거나 혹은 그 영향이 거의 없음을 확인할 수 있었다.

감도 특성이 우수한 두 물질 CuO와 NiO에 대하여

표 1. 700 °C에서 다양한 감지물질의 NO/NO₂에 대한 기전력변화

Table 1. NOx Sensitivities of Various Oxide Materials at 700 °C

Material	NO 460 ppm + NO ₂ 40 ppm	NO ₂ 355 ppm + NO (135 ppm)
ZnO	0 mV	25 mV
NiO	-10 mV	69 mV
CuO	-5 mV	64 mV
2CuO +Cr ₂ O ₃	0 mV	30 mV
Cr ₂ O ₃	-2 mV	50 mV
LaSrCrFO ₃	0 mV	40 mV
LaSrMnO ₃	-3 mV	35 mV
LaSrCrO ₃	0 mV	45 mV
LaNiO ₃	-2 mV	50 mV
LaCoO ₃	-2 mV	50 mV

다양한 NO와 NO₂ 농도에 따른 EMF 변화를 측정하였다. 측정 조건은 온도 700 °C, 측정용 챔버에 들어가는 가스의 총 유량은 4000 cc/min로 NO와 NO₂ 농도를 변화 시키며 실험을 수행하였다. 그림 3과 그림 4는 두 물질 모두 NO₂ 농도가 증가함에 따라 기전력 값이 증가함을 알 수 있다. 그러나 NO₂ 가스와 반응 하여 안정된 값을 얻기까지 걸리는 반응 시간과 반응후 원래의 기전력을 회복하는데 걸리는 회복 시간은 CuO가 빠른 반면에 NiO의 경우는 늦어서 일정한 농도의 NO₂에 일정한 기전력을 보이지 않을 뿐만 아니라 회복시에도 원래의 기준 기전력 값으로 돌아오기까지 많은

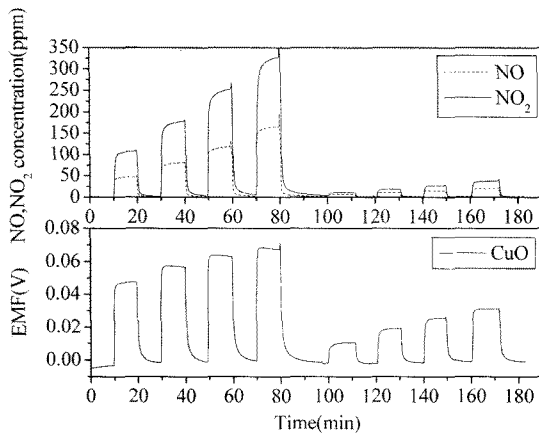


그림 3. 700 °C 산소 10 %에서 CuO감지물질의 NOx감지 특성

Fig. 3. NOx sensing characteristics of CuO at 700 °C and 10 % oxygen.

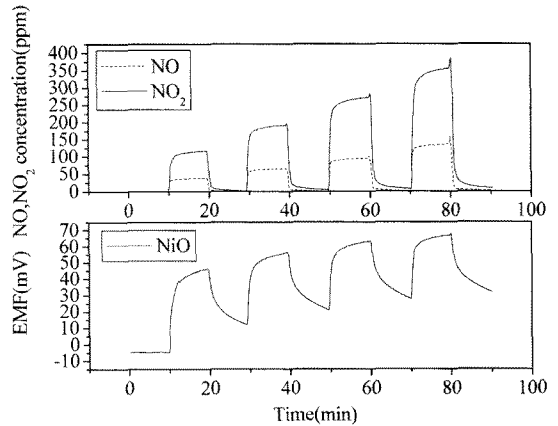


그림 4. 700 °C 산소 10 %에서 NiO감지물질의 NOx 감지 특성

Fig. 4. NOx sensing characteristics of NiO at 700 °C and 10 % oxygen.

시간이 소요 되었다.

이와 같은 NiO 감지 전극의 반응시간과 회복시간을 향상 시킬 목적으로 NiO 분말과 YSZ분말을 몰 비 75:25로 혼합하여 페이스트를 제조하여 감지 전극을 형성하였다. 그림 5는 NiO-YSZ를 감지물질로 하여 700 °C의 온도에서 기전력을 측정한 그래프이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 NO₂의 농도에 따른 반응 시간과 회복 시간이 훨씬 짧아 졌을 뿐만 아니라 같은 농도에서의 EMF 값이 NiO 감지 전극 보다 11 mV 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 이에 NOx에 따른 감도가 좋고 반응속도와 회복속도가 우수한 NiO-YSZ와 CuO를 감지 전극 물질로 선정하였다.

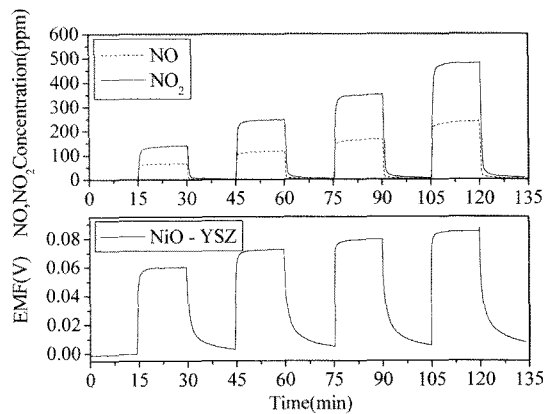


그림 5. 700 °C 산소 10 %에서 NiO-YSZ 감지물질의 NOx 감지특성

Fig. 5. NOx sensing characteristics of NiO-YSZ at 700 °C and 10 % oxygen.

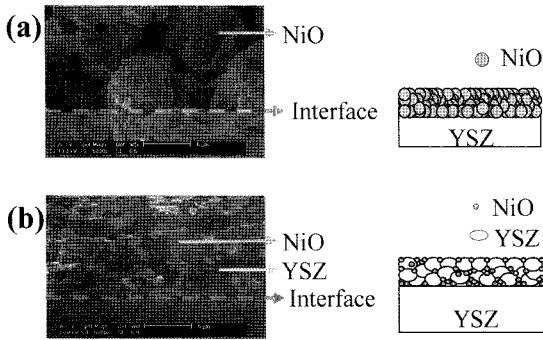


그림 6. NiO(a)와 NiO-YSZ(b) 감지 물질과 전해질의 단면 SEM사진과 이를 모사한 모식도
 Fig. 6. SEM images and schematic diagrams of interfaces of YSZ electrolyte and oxide electrodes : (a) NiO ; (b) NiO-YSZ.

감지물질 NiO와 NiO-YSZ의 반응 속도와 회복 속도가 차이 나는 이유를 분석하기 위해 SEM을 이용하여 각각의 미세구조를 관찰하였다. 그림 6는 각각 NiO와 NiO-YSZ 감지 물질과 전해질의 단면 SEM사진과 이를 모사한 모식도로 NiO감지 물질의 NiO의 크기가 평균 5 um이상으로 조대한 반면에 NiO-YSZ 감지 물질의 표면은 NiO와 YSZ 상이 혼재해 있으며 NiO의 입자 성장이 YSZ에 의해 제한됨으로 그 크기가 작은 것을 확인할 수 있다. 이러한 감지물질의 분포를 모식화한 것에서 보면 NiO 감지전극의 경우 YSZ전해질, NiO층배로 이루어진 전극 물질 그리고 가스의 TPB (Triple Phase Boundary)가 전해질과 NiO 전극 계면에

서만 형성된 반면, NiO-YSZ 감지 전극의 경우는 TPB(Triple Phase Boundary)가 NiO에 YSZ를 혼합해 줌으로써 YSZ계면 뿐만 아니라 NiO 전극내에도 무수히 많이 형성되어 빠른 반응 속도와 회복 속도 특성을 보이는 것으로 볼 수 있다.

3.2. 산화물 전극의 감지 기구

선정된 감지 전극 물질 NiO-YSZ와 CuO의 NO와 NO₂동시 반응을 통하여 NOx 감지 특성을 알아보았다. 그림 7은 감지 전극이 NiO-YSZ, 그림 8은 감지전극이 CuO일 경우의 NO₂와 NO의 농도 동시 변화에 따른 기전력 변화이다. 두 감지전극 모두 NO₂의 농도가 증가함에 따라 기전력 또한 증가하는 양상을 보이고 있다. 그러나 NO₂ 농도를 가지고 있는 영역인 각각의 그룹 A, B, C, D에서는 비슷한 NO₂ 농도에도 불구하고 NO의 양이 증가함에 따라 기전력이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 NO 농도와 기전력의 상관관계를 나타낸 그림 7(b)와 그림 8(b)에 더욱 명확히 나타난다. 그림 7(b)와 그림 8(b)에서의 직선은 NO₂ 농도가 같은 점을 연결한 것으로 NO₂ 농도가 일정할 경우 NO농도와 기전력의 상관관계는 선형적임을 보여주며, NO농도가 일정할 경우 NO₂ 농도와 기전력과는 대수적 상관관계를 보인다.

그림 7과 8에 나타난 기전력과 NO/NO₂농도와의 관계식을 구체적으로 구하여 보았다.

혼합전위 NOx센서의 산화물 감지전극위에서 일어나는 반응은 반응식 (1)-(4)와 같다. 산화물 감지전극에

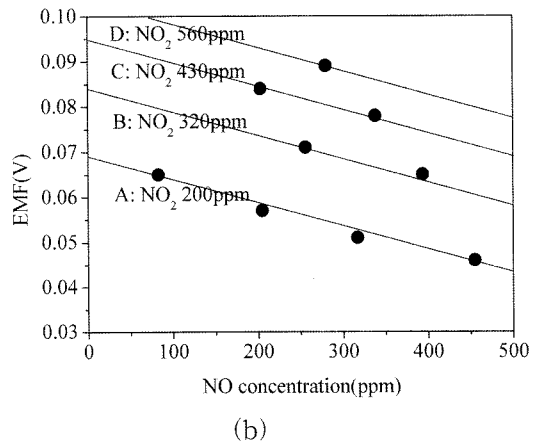
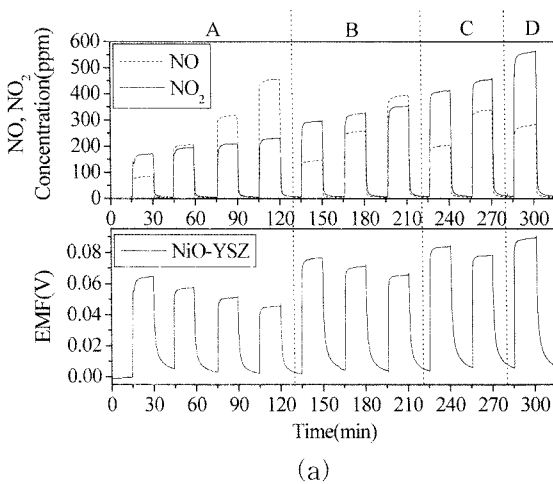


그림 7. 700 °C, 산소10 %에서 NiO-YSZ 전극의 다양한 NO/NO₂ 농도에 따른 기전력 변화 (a) 시간에 따른 기전력 변화 (b) NO농도에 따른 기전력 변화
 Fig. 7. EMF response with various NO/NO₂ concentration ratio on the NiO-YSZ sensing electrode at 700 °C and 10 % oxygen (a) Time vs EMF (b) NO concentration vs EMF.

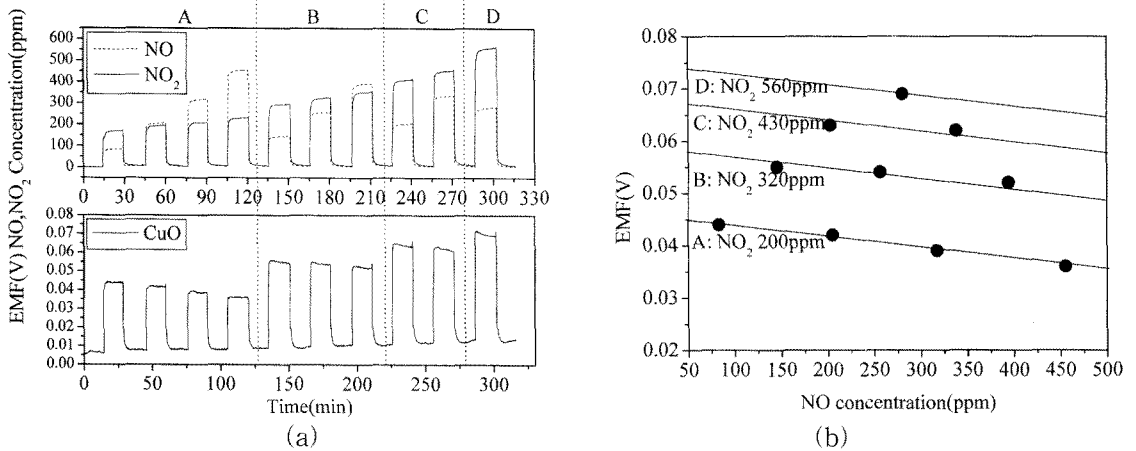
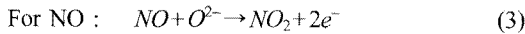
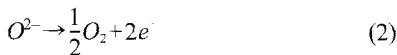
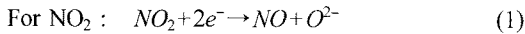


그림 8. 700 °C, 산소 10%에서 CuO 전극의 다양한 NO/NO₂ 농도에 따른 기전력 변화 (a) 시간에 따른 기전력 변화(b) NO농도에 따른 기전력 변화

Fig. 8. EMF response with various NO/NO₂ concentration ratio on the CuO sensing electrode at 700 °C and 10 % oxygen (a) Time vs EMF (b) NO concentration vs EMF.

NO₂와 O₂가 존재할 경우 식 (1)의 NO₂ 환원반응속도와 식 (2)의 O₂ 산화반응속도가 같아지는 곳에서 혼합전위가 결정된다. 이러한 경우 혼합전위와 NO₂와의 상관관계는 식 (5)와 같이 대수적으로 비례하거나 선형적으로 비례하게 된다. 산화물 감지전극에 마찬가지로 NO와 O₂가 존재할 경우에도 식 (3)의 NO 산화반응속도와 식 (4)의 O₂ 환원반응속도가 같아지는 곳에서 혼합전위가 결정되며, 혼합전위는 NO 농도에 대수적으로 비례하거나 선형적으로 비례하게 된다^[12,13].



$$E_{\text{mix}} \propto \ln P_{\text{NO}_2(\text{NO})} \text{ or } E_{\text{mix}} \propto P_{\text{NO}_2(\text{NO})} \quad (5)$$

본 연구결과에 의한 NO와 NO₂동시 반응시의 기전력과 NO₂와 NO농도관계는 그림 7(b)와 8(b)에서 알 수 있듯이 식(6)으로 표현될 수 있다. 다시 말해서 NiO-YSZ와 CuO산화물 전극의 NO와 NO₂동시 반응시의 기전력은 NO₂농도에 대수적으로 비례하며, NO농도에는 선형적으로 비례한다.

$$E_{\text{mix}} = \alpha \ln P_{\text{NO}_2} + \beta P_{\text{NO}} + \gamma \quad (6)$$

그림 7과 8에서의 센서의 기전력과 가스 분석기에서 측정된 NO₂와 NO농도를 식 (6)에 대입하여 각 상수값인 α, β, γ 를 구하면 다음 식 (7)과 (8)과 같다. 식 (7)은

NiO-YSZ전극의 기전력과 NO₂와 NO농도관계식이고, 식 (8)은 CuO전극의 기전력과 NO₂와 NO농도관계식이다. 계산된 식 (7)과 (8)을 확인하기 위하여 측정된 NO₂와 NO농도를 식 (7)과 (8)에 대입하여 계산된 기전력과 실제 측정된 기전력을 비교하여 보면 그림 9와 같이 일치함을 알 수 있다.

$$\text{EMF} = 0.03635 \ln P_{\text{NO}_2} - 72.31 P_{\text{NO}} + 0.3829 \quad (7)$$

$$\text{EMF} = 0.02866 \ln P_{\text{NO}_2} - 37.40 P_{\text{NO}} + 0.2941 \quad (8)$$

3.2. 개선된 방법의 혼합전위 NOx 센서

앞서 기술한 새로운 감지물질 NiO, NiO-YSZ, CuO의 NOx감지 특성을 나타낸 그래프인 그림 3, 4, 5, 7, 8은 NO₂가 NO보다 많거나 비슷한 농도를 나타내는 경우의 센서의 기전력이다. 그러나 실제 자동차 배기가스는 대부분이 NO로 이루어져 있다. 이러한 경우의 단순 혼합전위의 NOx 센서의 감지특성을 나타내는 그래프가 그림 10이다. 그림 10(a)는 CuO, (b)는 NiO-YSZ를 감지전극으로 하고 700 °C, 산소 5%에서 NO가 대부분인 NOx와 NO₂가 전체 NOx에서 50%이상을 차지하는 경우의 센서 기전력 차이를 보여주고 있다. 두 감지물질 모두 NO₂가 전체 NOx에서 수십 %정도를 차지할 경우에는 센서의 기전력이 수십 mV정도로 측정 가능한 신호를 얻을 수 있지만 NO가 대부분인 경우에는 수 mV정도의 작은 신호로 인하여 측정불가능하다. 자동차 배기가스와 같이 NO가 대부분인 경우에도 측정가능하도록 하기 위해서는 NO를 NO₂로 전환하는 변환셀이 필요하게 되나 앞서 기술한 바와 같이

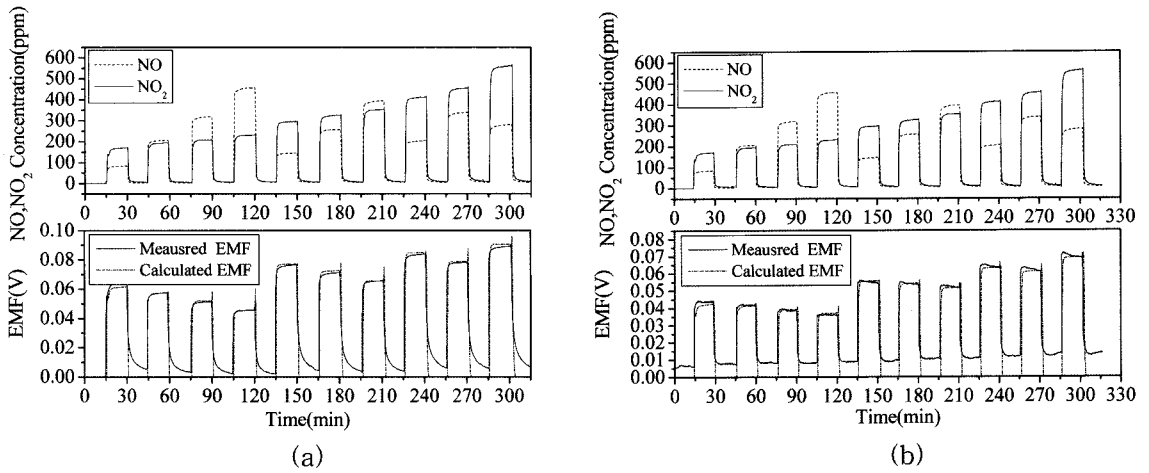


그림 9. 측정된 기전력과 계산된 기전력의 비교 (a) 식 (7), NiO-YSZ전극 (b) 식 (8), CuO전극
 Fig. 9. Comparison of measured EMF and calculated EMF based on (a) eq. (7), NiO-YSZ electrode and (b) (8), CuO electrode.

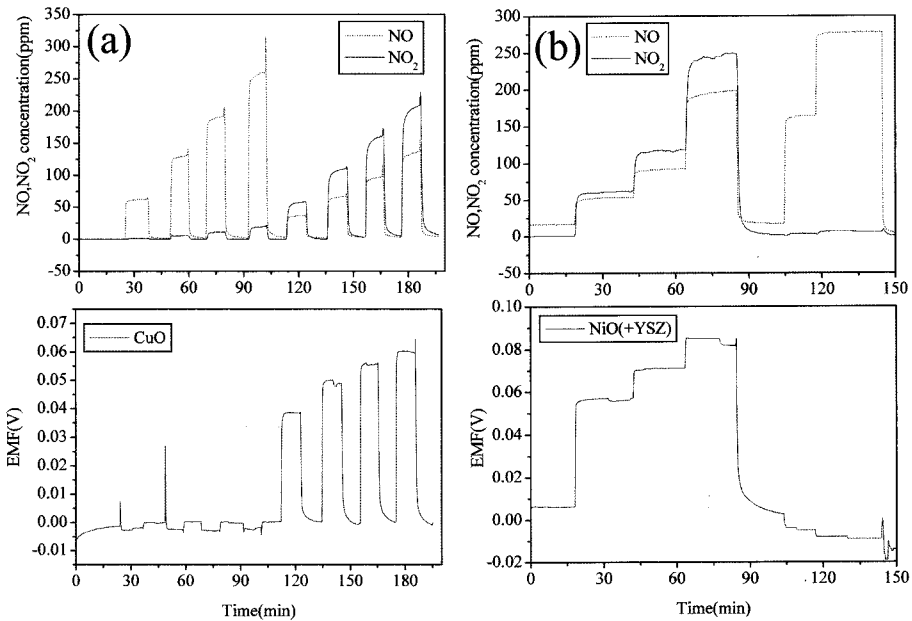


그림 10. 700 °C, 산소 5%에서 (a) CuO, (b) NiO-YSZ감지전극의 NO가 대부분인 경우와 NO₂가 전체 NO_x의 50% 이상인 경우의 센서 기전력비교
 Fig. 10. Comparison of EMF to NO rich region and EMF to NO₂ rich region at 700 °C and 10% oxygen, (a) CuO electrode and (b) NiO-YSZ electrode.

변환셀에 인하여 복잡한 적층형구조를 필요로 하고, 확산방지막 기공의 고온 불안정성에 의한 문제점이 생긴다.

그러므로 본 연구에서는 NO_x변환셀 없이 NO가 대부분인 경우에도 큰 센서의 신호를 얻을 수 있도록 단 순혼합전위의 감도를 향상시키는 개선된 측정방식의 혼

합전위 센서를 고안하였다. 새로운 센서의 구조는 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 전해질의 위와 아랫면에 각각 산화물 감지물질이 형성되어 있고, 각 감지물질 사이에 bias를 가하여 전극의 포텐셜을 변화시키도록 하였다. 두 개의 산화물 중에서 음극에서는 반응식 (1)이 증진 되어 NO₂에 대한 반응성이 향상되며, 양극에서는 반응

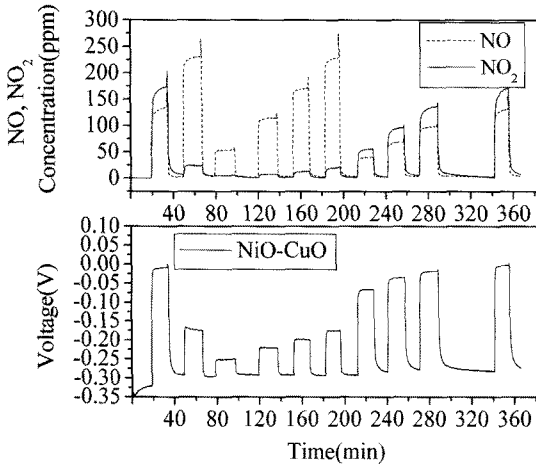


그림 11. 음전극으로 NiO가 양전극으로 CuO가 형성된 센서의 700 °C, 산소 분압 10 %에서 5 μA의 전류를 인가하였을 때의 NOx 감지특성
 Fig. 11. Sensing behavior of NiO-CuO electrode pair at 700 °C and 10 % oxygen.

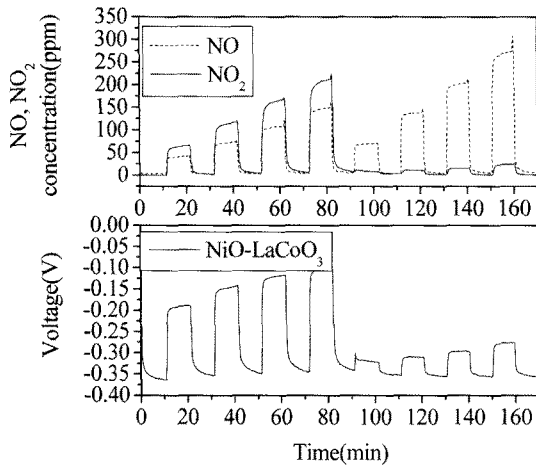


그림 12. 음전극으로 NiO가 양전극으로 LaCoO3가 형성된 센서의 700 °C, 산소 분압 10 %에서 5 μA의 전류를 인가하였을 때의 NOx 감지특성
 Fig. 12. Sensing behavior of NiO-LaCoO3 electrode pair at 700 °C and 10 % oxygen.

식 (3)이 증진되어 NO에 대한 반응성이 향상된다.

그림 11은 그림 1(b)의 구조를 갖고 음전극으로 NiO가 양전극으로 CuO가 형성된 센서의 700 °C, 산소 분압 10 %에서 5 μA의 전류를 인가하였을 때의 NOx 감지특성을 나타낸 그래프이고 그림 12는 음전극으로 NiO가 양전극으로 LaCoO3가 형성되고 700 °C, 산소 분압 10 %에서 5 μA의 전류를 인가하였을 때의 NOx 감지특성을 나타낸 그래프이다.

그림 11과 12에 보아 알 수 있듯이 종래의 하나의 계면만을 갖는 단순 혼합전위 센서 감도와 비교하여 보면 감도가 매우 상승했을 뿐만 아니라 NO가 대부분인 경우에도 수십 mV 이상의 신호변화를 얻을 수 있었다.

그림 11과 12의 그래프를 기반으로 NO와 NO2의 농도와 전압과의 상관관계는 식 (9)와 (10)으로 표현될 수 있다.

$$EMF = 0.0723 \ln P_{NO_2} - 192.9 P_{NO} - 0.352 \quad (9)$$

$$EMF = 0.0643 \ln P_{NO_2} - 91.29 P_{NO} - 0.436 \quad (10)$$

식 (9)는 음전극으로 NiO가 양전극으로 CuO인 센서의 전압식이고, 식 (10)은 음전극으로 NiO가 양전극으로 LaCoO3인 센서의 전압식이다. 위 식(9) 및 (10)을 식 (7) 및 (8)과 비교하여 보면 변형된 혼합전위 NOx 센서의 NO2에 대한 감도는 약 2배 이상, NO에 대한 감도는 약 3배 이상 높아졌다.

위와 같은 변형된 혼합전위 NOx센서 두 개를 이용하여 NOx변환셀 없이도 NO가 대부분인 영역에서 전체 NOx 농도뿐 NO와 NO2의 농도를 모두 측정가능하다. 즉 NiO-CuO 센서와 NiO-LaCoO3센서에서 측정되는 두 개의 기전력을 식 (9)와 식(10)에 대입하면 연립 방정식의 해를 통하여 NO와 NO2의 개별 농도를 계산할 수 있게 되고 이를 합하여 전체 NOx총량을 측정할 수 있게 된다.

3. 결 론

새로운 감지물질은 NiO, CuO, NiO-YSZ 등 이었으며, 이중 CuO와 NiO-YSZ가 가장 반응속도, 회복속도 및 반응성이 우수하였다. 단순 혼합전위 센서는 NO가 NOx중에서 대부분을 차지하는 경우 신호크기가 매우 작아 측정하기 어려우므로 감도를 높이기 위하여 혼합전위 센서를 변형하여 두 개의 산화물 감지전극을 형성하고 이 사이에 bias를 가하여 전극 포텐셜을 변화시켰다. 이와 같이 변형된 혼합전위 센서는 단순 혼합전위 센서보다 NO에 대한 감도는 3배, NO2에 대한 감도는 2배정도 증가하였다. 변형된 혼합전위 NOx센서 두 개를 이용하면 측정되는 두 개의 기전력으로부터 NO와 NO2에 대한 개별 농도와 NOx총량을 NOx 변화셀 없이도 구할 수 있다.

Acknowledgement

이 논문은 한국과학기술원의 재원으로 “과학기술선

도 기초연구사업”, 산업자원부의 재원으로 “지역산업 기술개발사업 (과제번호: 10027621)”, 환경부의 재원으로 “차세대 핵심환경기술개발사업”의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] M. Penza, C. Martucci, and G. Cassano, “NOx gas sensing characteristics of WO₃ thin films activated by noble metal (Pd, Pt, Au) layers”, *Sensors and Actuators B*, vol. 50, pp. 52-59, 1998.
- [2] 최무희, 마대형, “진공증착법으로 제조한 In₂O₃ 나노벨트막의 NO가스감지특성”, *센서학회지*, 제15권, 제6호, pp. 406-410, 2006.
- [3] 조우성, 문승일, 백경갑, 박정호, 주병권, “패턴이 형성된 탄소나노튜브 매트릭의 이산화질소 감응 특성”, *센서학회지*, 제15권, 제3호, pp. 199-204, 2006.
- [4] Francis Ménil, Véronique Coillard, and Claude Lucat, “Critical review of nitrogen monoxide sensors for exhaust gases of lean burn engines”, *Sensors and Actuators B*, vol. 67, pp. 1-23, 2000.
- [5] N. Rao, C. M. van den Bleek, and J. Schoonman, “Taguchi-type NOx gas sensors based on semiconducting mixed oxides”, *Solid State Ionics*, vol. 59, pp. 263-270, 1993.
- [6] Geraint Williams and Gary S. V. Coles, “NOx response of tin dioxide based gas sensors”, *Sensors and Actuators B*, vol. 15-16, pp. 349-353, 1993.
- [7] K. Satake, A. Katayama, H. Ohkoshi, T. Nakahara, and T. Takeuchi, “Titania NOx sensors for exhaust monitoring”, *Sensors and Actuators B*, vol. 20, pp. 111-117, 1994.
- [8] N. Miura, S. Yao, Y. Shimizu, and N. Yamazoe, “New auxiliary sensing materials for solid electrolyte NO₂ sensors”, *Solid State Ionics*, vol. 70-71, pp. 572-577, 1994.
- [9] H. Kurosawa, Y. Yan, N. Miura, and N. Yamazoe, “Stabilized zirconia-based NOx sensor operative at high temperature”, *Solid State Ionics*, vol. 79, pp. 338-343, 1995.
- [10] B. G. Nair, J. A. Nachlas, and M. Middlemas, “NOx gas sensor method and device”, *United States Patent*, patent no. US007217355B2, 2007.
- [11] A. Kunitomo, M. Hasei, Y. Yan, Y. Gao, T. Ono, and Y. Nakauchi, “New total-NOx sensor based on mixed potential for automobiles”, *SAE technical paper series*, 1998-01-70.
- [12] G. Lu, N. Miura, and N. Yamazoe, “High-temperature sensors for NO and NO₂ based on stabilized zirconia and spinel-type oxide electrodes”, *J. Mater. Chem.*, vol. 7, no. 8, pp. 1445-1449, 1997.
- [13] F. H. Garzon, R. Mukundan, E. L. “Solid-state mixed potential gas sensors; theory, experiments and challenges”, *Solid State Ionics*, vol. 136-137, pp. 633-638, 2000.



박진수

- 2002년 2월 고려대학교 재료금속공학부 (공학사)
- 2004년 2월 한국과학기술원 신소재공학과(공학석사)
- 2004년~현재 한국과학기술원 신소재공학과 박사과정
- 주관심분야 : 자동차용 센서, 전기화학센서, 고체전해질



윤병영

- 2005년 2월 성균관대학교 재료공학과(공학사)
- 2005년 3월 한국과학기술원 신소재공학과 석사과정
- 주관심분야 : 자동차용 센서



박종욱

- 1979년 2월 서울대학교 금속공학과(공학사)
- 1985년 9월 Ohio State University 금속공학과(공학박사)
- 1985년~1986년 Univ. of Pennsylvania, Post Doctor
- 1986년~1988년 금성중앙연구소 연구실장
- 1988년~현재 한국과학기술원 신소재공학과 교수
- 주관심분야 : 전기화학, 화학센서, 바이오센서