

환경 가스 센서의 개발

기술해설 2

Development of Environmental Gas Sensors

정일형*, 김진사*, 이수길*, 박건호*, 이준웅**

(Il-Hyung Jung, Jin-Sa Kim, Soo-Kil Lee, Geon-Ho Park, Joon-Ung Lee)

Key Words(중요 용어) : Gas Sensor(가스 센서), Solid Electrolyte Sensor(고체 전해질 센서), Semiconductor Sensor(반도체 센서), Piezoelectric Gas Sensor(압전체 가스센서)

1. 서 론

가스센서의 보급 발전에 따라 검지 대상 가스의 종류도 매우 다양하게 되었으며, 고성능·고신뢰성의 가스센서에 대한 요구가 한층 심화되어 최근의 연구, 개발의 동향도 변화를 갖게 되었다. 구체적으로로는,

- ① 센서재료의 미세구조, 첨가물의 첨가, 표면구조 등의 제어에 의한 고감도화, 선택성의 부여, 장기적 안정성의 개선
- ② 지구 환경 문제에 관련된 가스를 검지 대상으로 하는 환경 가스 센서의 개발
- ③ 출력신호의 처리방법 및 시스템의 개발

④ 에너지 절약 센서의 개발

등을 들 수 있다. 이러한 흐름속에서 특히 부각되고 있는 환경 오염 가스의 검지는 자연 환경의 보전을 위해서도, 공해 대책상으로도 중요하게 되었다. 화석 연료의 대량소비에 따라 배출되어 지구 온난화의 주요 원인이 되고 있는 CO₂와 연소 배출 가스 포함된 SO_x, NO_x, HCl은 독성이 강하여 대기 오염의 주요한 원인이 되고 있다. 또한 H₂S와 NH₃ 등은 악취만이 아니라 유독하여 주거 환경의 관점에서 간과할 수 없는 문제로 되고 있다.

현재 이러한 환경가스의 측정은 거의 분광분석을 중심으로 하는 분석기기에서 행하여지고 있다. 비교적 존재 농도가 높은 CO₂, NH₃, H₂S, HCl의

표 1. 환경 가스의 종류와 그 측정법

Table 1. The Kinds and Their Measuring Method of Enviromental Gases.

가스	측정법	측정농도범위	환경문제
SO ₂	용액도전율 자외선형광 염광광도검출 전량방식	대기오염 : 1ppb~10ppm 배기가스 : 10ppm~수천 ppm	산성비
NO _x	흡광광도법 적외선흡수	대기오염 : 1ppb~10ppm 배기가스 : 10ppm~수천 ppm	
HCl	이온전극	수 ppm~1000ppm	
CO ₂	적외선흡수 pH 가스전극 열전도도	대기오염 : 100ppm~1000ppm 배기가스 : 1%~수십%	지구 온난화
O ₃	화학발광 자외선흡수	대기오염 : 1ppb~1ppm	오존층 파괴
프레온가스	양이온방출,아크자외선	대기오염 : 1ppt~1ppb 리크검지 : 1ppm~수천 ppm	
H ₂ S	이온전극 흡광광도법	수 ppm~1000ppm	악취
NH ₃	흡광광도법 가스클로마트그래피	수백 ppm~1%	
CO	적외선흡수 정전위전해	수백 ppm~2000ppm	

측정에는 이온 선택성 전극을 사용한 화학센싱이 이용되고 있다. 그러나, 이 경우에는 가스를 일괄 용액에 흡수시킨 뒤에 분석하는 간접적인 방법이 취해지며, 다른 가스의 영향을 극소화시키는데 많은 어려움이 있다. 따라서, 최근에는 소형이며 가격이 저렴하고, 신뢰성이 높고, 유지 보수가 용이한 가스센서가 요구되고 있으며, 그에 따른 많은

3. 가스센서의 종류와 기본원리

3.1 고체 전해질 가스 센서

고체 전해질형 센서는 지루코니아의 표면에서의 산소 이온의 농담 분극에 의한 기전력과 같은 고체 전해질의 이온 전도성을 이용하는 기전력 방식과, 고체 전해질에 세라믹 다공질 막을 붙여 그 기

표 2. 환경가스센서의 검출방식과 대표적인 예
Table 2. The Detecting System and the Representative Examples.

재 료	방 식	대상가스	대표적인 예
고체전해질	제 2 종	SO ₂ NO ₂ CO ₂	Li ₂ SO ₄ -Ag ₂ SO ₄ , Na ₂ SO ₄ Ba(NO ₃) ₂ -AgCl K ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃ -Ag ₂ SO ₄
	제 3 종	SO ₂ NO ₂ CO ₂ H ₂ S	Na ₂ SO ₄ Na ⁺ 도전체 보조극, Li ₂ SO ₄ -Ca ₃ O ₄ MgO-ZrO ₂ 보조극 AgNO ₃ Ag-β/β"-알루미늄 보조극, NaNO ₃ Na ⁺ 도전체 보조극 NaNO ₂ Na ⁺ 도전체 보조극 MoS ₂ -CaS CaF ₂ 보조극
반 도 체	도 전 율	NO ₂ H ₂ S O ₃ NH ₃ 프레온가스	In ₂ O ₃ , SnO ₂ -In ₂ O ₃ , WO ₃ , 금속(Zn, Cu, Pb) 프탈로시아닌 ZnO-SnO ₂ , CuO-SnO ₂ In ₂ O ₃ Au-WO ₃ , Al-ZnO (V-Mn-Al ₂ O ₃)-ZnO, S-SnO ₂
유 전 체	전기용량식	CO ₂	PbO-BaTiO ₃ , CuO-BaSnO ₃
전기화학식	용 액 계	NO, NO ₂ , CO	Au, Pt, Pd, Co 포르페린+H ₂ SO ₄ (AgI)
	액 막 계	CO ₂	K ₂ CO ₃ -폴리피롤
압 전 체	공진주파수	SO ₂ NO ₂ NH ₃ H ₂ S	트리에탄올아민+피에조소자 금속 프탈로시아닌+피에조소자 (아스칼핀산-AgNO ₃)+피에조소자 카아본+피에조소자

연구와 개발이 급속히 진행되고 있다.

2. 환경가스의 종류와 검지

표 1에는 지구의 환경문제에 관련된 주요 가스의 종류, 존재 농도와 그 측정법을 나타낸다. 환경 가스 센서의 검출방식은 일반적으로 고체전해질이나 전해질용액을 이용한 전기화학셀의 기전력이나 가스에 의한 전해전류의 변화를 이용하며, 또한 반도체, 유전체, 압전체의 물성이 가스의 흡착이나 반응에 의한 변화를 이용한다. 표 2는 환경 가스 센서의 검출방식과 그 대표적인 예를 나타내고 있다.

상 확산에 따른 한계 전류를 이용한 한계 전류방식이 있다.

고체 전해질 센서의 기본원리는 평형 상태에 있는 전기 화학 셀의 전해질과 전극의 계면에서는 도전 이온의 전기화학 포텐셜은 같지 않으면 안 된다라는 것을 이용한 것이다.

Weppner 등은 기전력 방식의 고체 전해질 가스 센서를 검지 가스종과 도전 이온종과의 조합에 따라 표 3에 나타낸 것과 같이 크게 3가지로 분류하였다.¹⁾ Type I은 지루코니아 산소 센서가 대표적인 예로서, 기상 산소의 전극반응에 의한 산소 농담 전지이다. 그림 1은 지루코니아의 이온 전도 현상을 간략하게 나타낸 것이다. 지루코니아판 양면에 백금 전극을 형성시키고, 판의 양측의 산소 분

표 3. 고체 전해질 센서의 분류

Table 3. The Division of Solid Electrolyte Sensor

분 류	셀 구조	고 체 전 해 질
Type I 피검지 가스로부터 발생한 이온종과 도전 이온종이 동일한 경우		안정화 지루코니아 $\text{HUO}_2\text{PO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Sb}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Type II 도전 이온종의 상대이온종이 피검지 가스의 종과 동일한 경우		$\text{Li}_2\text{SO}_4\text{-Ag}_2\text{SO}_4$, $\text{Y}_2(\text{SO}_4)_3$ $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2\text{-AgCl}$ K_2CO_3 AgBr
Type III 피검지 가스에서 발생하는 이온종이 고체 전해질의 정부 어느 이온종과도 일치하지 않는 경우	a 	β -알루미나 (Na_2SO_4) β -알루미나 (NaNO_3) NASICON (Na_2CO_3) Li^+ -도전체 (Li_2CO_3) LaF_3 (LaOF)
	b 	NASICON (Li_2CO_3)
	c 	MgO-ZrO_2 (Li_2SO_4)

압을 다르게 하면 일정 온도 이상에서 산소 분압이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 O^{2-} 가 이동하여 기전력이 발생한다(그림 1. a). 여기에서 부가적으로 백금 전극간에 전압을 인가하면 일정 온도 이상에서 전압이 낮은 쪽에서 높은 쪽을 향해서 O^{2-} 가 이동한다(그림 1. b). 이러한 현상은 지루코니아가 전지로서 혹은 산소 펌프로써 사용된다는 것을 의미한다.

Type II는 금속 탄산염이나 금속 황산염을 이용한 CO_2 , SO_x 센서가 이에 속한다. Type III은 다시 Yamazoe 등이 의해서 세가지로 분류하였다. 이것은 전기 화학셀이 실제로는 두개의 전지의 집합으로 구성되었다는 생각에 의한 것이다.²¹ 예를 들면, NASICON과 Na_2CO_3 보조상을 조합하면 전기 화학셀은 다음과 같이 구성된다.³¹

공기, Au | NASICON | Na_2CO_3 | Au, CO_2 , 공기
 NASICON을 이용한 전지 (Na^+ 도전체) Na_2CO_3 를 이용한 전지 (Na^+ 도전체)

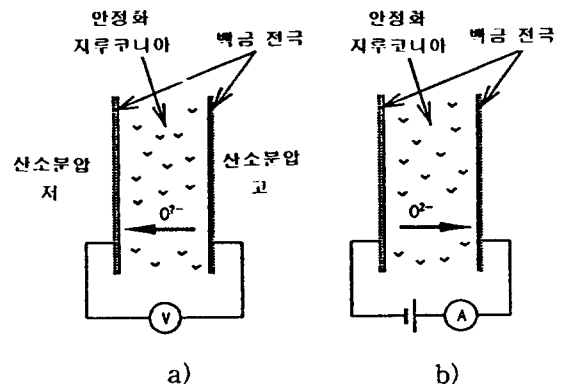


그림 1. 고체 전해질 센서의 이온전도

Fig. 1. Ionic conduction of solid electrolyte sensor

양 전지는 Type II에 속하고 Na^+ 도전체이다. 이와 같이 도전 이온종이 동일한 전지의 조합을 Type III. a로 하고 있다. Type III. b는 양 전지의

도전 이온종이 다르지만 부호가 같은 경우, Type III. c는 양 전지의 도전 이온종이 부호까지도 다른 경우에 해당한다.

3.2. 반도체 가스센서

반도체 가스센서는 일반적으로 세라믹의 표면이나 내부의 변화에 의하여 전기 전도도의 변화를 이용한 센서이다.

세라믹 소자 표면에 가스가 흡착할 때에 일어나는 도전을 변화를 센서신호로서 출력하는 것이 주류이다. 그림 2에 세라믹스를 이용한 표면 제어형 가스 센서의 동작 기구를 a)는 환원성 가스의 흡착전, b)는 흡착후의 변화로 구분하여 나타내었다. 흡착하는 가스의 종류와 그 양에 따라 세라믹 표면에 형성되는 표면의 캐리어가 결손, 축적하여 세라믹의 표면 도전율이 변화한다.¹⁾

이것을 SnO₂ 가스 센서를 예를 들어 살펴 보면, 우선 산소 분자가 세라믹 입자(grain)의 표면에 흡착하면, 전자는 전도대로부터 흡착 산소의 원자층

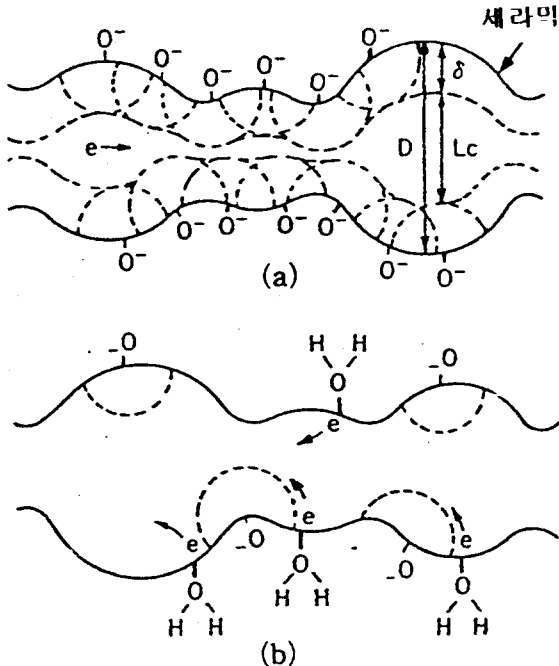


그림 2. 반도체형 가스센서의 검출기구

Fig. 2. Gas detection mechanism of semiconductor type gas sensor.

으로 전이하고 입자의 표면은 음의 전하층으로 대전되고 근처에 전자 결핍층이 형성된다. 이때 환원성 가스가 흡착하면 O²⁻ 이온의 일부는 표면으로

부터 제거되고 전자가 방출되므로 도전율이 증가한다.

한편, Fe₂O₃나 Ln_{1-x}Sr_xCoO₃ 등의 벌크 제어형 가스 센서는 가스 흡착에 의하여 벌크의 조성이 변화(상변화, 격자결합의 생성 등)에 의하여 그 도전율이 변화함을 이용한 것이다.

일반적으로 반도체 가스센서는 검지 대상 가스 선택성이 부족하다는 단점이 있었으나, Pt 촉매를 사용하여 탄화 수소 가스에 대하여 높은 감도를 보이는 ZnO계 가스 센서와 같이 재료의 선택이나 결정 표면의 처리에 따라 가스 선택성을 변화시킬 수 있다. 반도체 가스 센서는 대부분이 세라믹계이므로 박막화하여 그 구조가 간단할 뿐만 아니라, 고온에서도 신속하게 응답할 수 있어 자동차나 보일러 등의 연소제어용 센서로 응용이 가능하다.

3.3. 전기화학식 가스센서

피검지 가스를 전해질용액을 함유한 전해셀에 주입해서 정전위에서 전기화학적 산화 혹은 환원을 행하고, 그 때 외부회로에 흐르는 전류를 센서신호로 출력한다. 환경 가스센서로는 CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂ 등을 측정하는 센서가 검토되고, 일부는 실용화되고 있다. 대기중의 가스는 가스 투과막을 통해서 셀에 주입시키지만, 그 때 발생하는 한계전류의 값으로 부터 농도를 결정한다. 이 형태의 센서는 전극, 설정전위, 전해질 등을 선택하는 것에 따라 가스 선택성을 갖게 된다.

3.4 그 외의 가스센서

기존의 방식 이외에도 전기 용량형 가스센서, 압전체를 이용한 가스센서 등이 있다.

가스 흡착에 의해서 일어나는 센서소자의 정전용량 변화를 이용한 용량형 가스센서는 습도 등의 검지에 많이 이용되고 있지만, 최근에는 CO₂의 검지에도 적용되고 있다.

압전체 가스센서는 그림 3과 같이 가스 흡착에 의해서 공진주파수나 표면탄성파의 속도가 변화한다. 이것을 신호로 하여 출력하는 방식으로, 일반적으로 수 ppb 수준의 가스의 검지가 가능하다. 도포막 재료(흡착매)의 선택에 따라 NO₂, SO₂, NH₃, H₂S, CO₂, O₃ 등 거의 모든 가스에 대한 검지가 보고되고 있다. 그러나 수증기의 방해나 드리프트 등 해결해야할 문제도 적지 않다.

4. 환경 가스 센서의 연구 동향

환경 가스 센서의 검지 방식과 그에 따른 다양

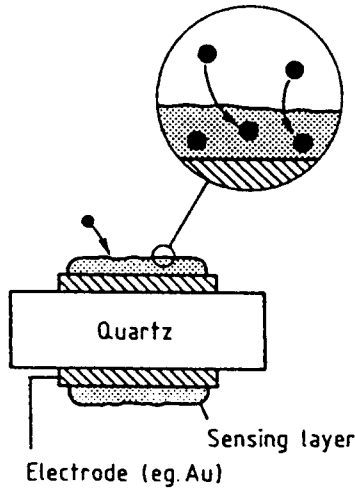


그림 3. 압전체 가스 센서의 구조
Fig. 3. Structure of piezoelectric gas sensor.

한 재료에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 여기에서는 주요 환경 가스에 대하여 최근의 대표적인 연구 결과와 앞으로의 동향에 대하여 세라믹계 센서를 중심으로 서술한다.

4.1. CO₂ 센서

주거 공간에 있어서 공조·환기 설비의 제어, 연소기에 있어서의 효율적 연소, 그리고 생물의 육성 등에 관련된 프로세스에 있어서 CO₂ 농도의 제어 등에서의 CO₂ 센서의 성능 및 신뢰성은 매우 중요하게 되었다.

최근에는 고체전해질을 이용한 것과 복합산화물을 이용한 CO₂ 센서에 대한 연구와 개발이 활발하게 진행되고 있다.

전해질을 이용한 것은 수증기에 의한 방해를 받는 것이 많다. Na⁺ 도전체인 NASICON (Na₂Zr₂Si₂PO₁₂)와 보조 전극재료로서 Na₂CO₃를 이용한 것도 수증기에 크게 영향을 받는다. 따라서, Na₂CO₃-BaCO₃의 보조 전극을 이용하면 수증기의 분압에 영향을 받지 않는 안정한 CO₂ 센서가 얻어지며, 그림 4에 그 응답 특성을 나타낸다.⁵⁾ 또한, Na⁺ 도전체의 보조 전극으로서 Li₂CO₃-CaCO₃를 사용한 고체전해질 센서도 보고되고 있다. 이들 센서들은 넓은 범위의 CO₂에 대해서 90% 응답 시간 8초 이하의 응답 특성을 나타낸다.

전기 용량형 가스 센서로는 표 4에 나타낸 바와 같이, BaTiO₃와 여러가지의 금속산화물과의 복합산화물의 CO₂ 감도특성이 조사되었다. 일반적으로 탄산염의 안정한 CaO나 MgO 등의 산화물을 함유

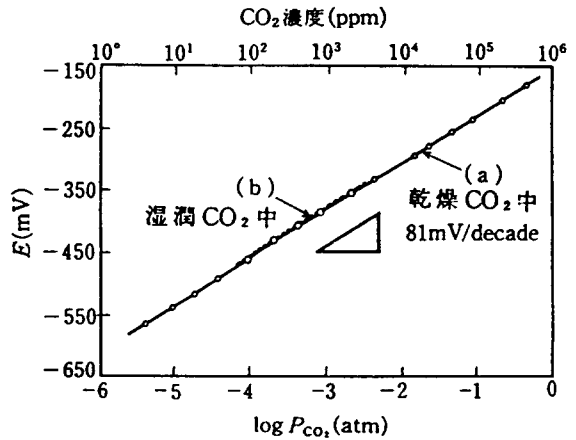


그림 4. Na₂CO₃-BaCO₃를 보조전극으로 한 센서의 CO₂에 대한 응답 특성
Fig. 4. Response characteristics of NASICON to CO₂.
Reference electrode: Na₂CO₃-BaCO₃

한 소자는 CO₂에 비교적 고감도이다. 이에 비해서 탄산염이 존재하지 않는 SiO₂나 V₂O₅의 복합산화물은, CO₂에 거의 감도를 갖지 않는다. 그러므로, BaTiO₃계 복합산화물의 CO₂에 대한 감지는 혼합된 금속산화물의 탄산화반응에 기인한다고 생각할 수 있다. CO₂ 감도, 작동온도 등의 차원에서는 CuO-BaTiO₃ 및 NiO-BaTiO₃ 소자가 CO₂ 센서로서 적당하다. CuO-BaTiO₃계에 Ag의 첨가에 의한 증감효과 등도 조사되어지고 있다.⁶⁾

4.2. NO_x 센서

질소산화물은 일괄해서 NO_x로서 말하고 있지만, 그 중에서 NO와 NO₂는 화학적 성질이 완전히 다르며, 일반적으로 배기가스중에는 NO가 NO₂보다도 압도적으로 많이 존재한다. 따라서 양자를 각각 감지하는 것이 바람직하다. NO_x 센서로서는 금속산화물 반도체나 고체전해질을 이용한 것이 개발되고 있다. 그 외에, 유기반도체를 이용한 것 등 여러 재료와 원리로 개발이 진행되고 있다.

고체전해질 센서는 대부분이 NO₂ 센서이다. Na-β/β"-알루미나나 NASICON(Na₃Zr₂Si₂PO₁₂) 등의 Na⁺ 도전체, 혹은 Ag-β/β"-알루미나(Ag⁺ 도전체)에 NaNO₃ 또는 AgNO₃를 보조 전극으로 사용한 NO₂센서가 보고되고 있다.

그러나 이들의 센서는 모두 NO₂만을 양호하게 검출하나, NASICON에 NaNO₂를 보조 전극 재료로 사용하면, NO₂만이 아니라 NO에 양호하게 응답하는 센서가 얻어지고 폭 넓은 농도범위의 NO

표 4. BaTiO₃와 각종 금속산화물과의 복합산화물의 CO₂ 감도 특성

Table 4. The Properties of CO₂ Sensitivity in BaTiO₃ and Various Metal Oxide Composed Oxide

산화물	유전상수	작동온도(℃)	감도(C _{CO} /C _{air})	선형성의 상한(%)
CaO	19.64	900	0.891	8
MgO	22.21	867	0.329	10
La ₂ O ₃	11.28	667	0.451	8
Nd ₂ O ₃	11.27	550	0.641	6
Y ₂ O ₃	10.21	759	0.794	10
CeO ₂	22.09	661	0.410	8
PbO	66.94	501	0.711	6
NiO	47.81	555	0.441	20
CuO	109.61	456	2.892	6
ZrO ₂	17.45	642	0.740	10
Co ₃ O ₄	171.93	528	0.362	6

에 대하여 양호한 응답을 나타내는 것이 개발되었다(그림 5).⁷⁾

반도체 가스센서에는, NO에 대해서 In-TiO₂계, In₂O₃계, WO₃계의 센서가 보고되고 있으며, Al, In 등을 고용한 TiO₂계 NO 센서는 이미 실용화되고 있다. 또한, NO₂에 대해서는 Ag-V₂O₅계, In₂O₃-SnO₂계, WO₃계의 반도체 가스센서가 보고되고 있

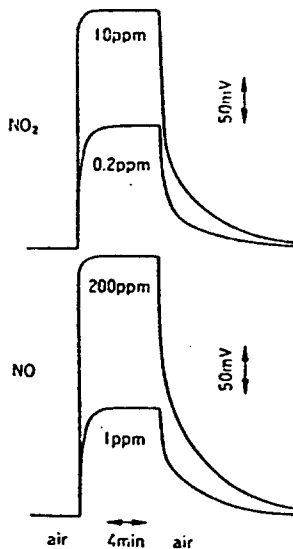


그림 5. NaNO₂ 보조 전극을 사용한 센서의 NO 및 NO₂에 대한 응답

Fig. 5. Response of NASICON to NO and NO₂. Reference electrode: NaNO₂

다. In₂O₃계, WO₃계 센서는 NO, NO₂의 양자에 대해서 감도를 갖고 있다.

4.3. SO_x 센서

SO₂는 공기중 산소에 의하여 산화되고, SO₂와 SO₃의 평형혼합물로 검지된다. SO_x센서는 대표적인 것으로 알카리금속유산염(K₂SO₄, Na₂SO₄, Li₂SO₄)를 고체전해질로 사용한 센서가 보고되었다. 또한 NASICON과 Na₂SO₄(보조상) 혹은 CaF₂와 CaSO₄(보조상)을 조합시킨 SO_x 센서가 제안되었다. 그러나, 부식성이 강한 SO_x가스중에서 NASICON의 화학적 안정성이 문제로 될 가능성이 있다. 안정화 지루코니아는 SO_x에 대해서 극히 안전하여 이들을 고체전해질로서 사용하고, 이것에 황산염(보조상)을 피복한 구조의 SO_x센서가 가능하다. 그림 6은 Li₂SO₄-CaSO₄와 안정화 지루코니아를 이용한 센서의 SO₂에 대한 응답특성을 나타내고 있다.⁸⁾

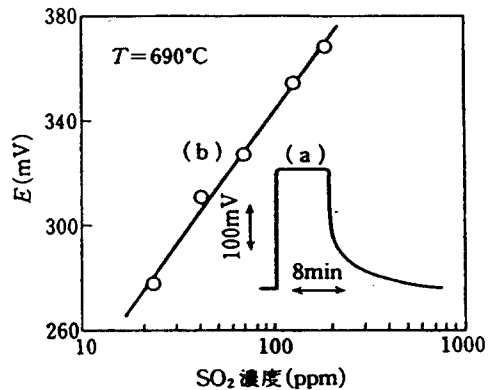


그림 6. Li₂SO₄-CaSO₄와 안정화 지루코니아를 이용한 SO₂센서 응답특성

Fig. 6. Response characteristics of Li₂SO₄-CaSO₄ and Zirconia to SO₂.

4.4. 그 외의 가스센서

악취가스, 프레온, O₃ 등에 대해서는 일반적으로 반도체 센서에 대한 연구가 진행되고 있다. H₂S나 CH₃SH 등의 악취가스에 대해서는, ZnO나 CuO가 첨가된 SnO₂계의 반도체센서가 보고되고 있다. NH₃에 대해서는 Al-ZnO계나 Au-WO₃계의 센서가, 어류의 부패에 의하여 발생하는 (CH₃)₃N에 대해서는 Ru-TiO₂계나 MgO-In₂O₃계의 센서가 제안되고 있다.

O₃에 대해서는, CeO-In₂O₃계 센서가, 프레온 가스에 대해서는 유황에서 수식한 SnO₂계의 센서에 대한 연구가 보고 되었다.

5. 맺음말

지금까지 지구 환경 문제에 관련된 가스와 그들의 검지를 위한 가스센서에 관해서 살펴보았다. 환경 오염을 방지하려는 노력과 대책이 전세계적으로 추진되고 있는 시점에서 특히 대기 오염의 주범인 환경 가스에 대한 고성능 센서의 개발은 필수 불가결하다. 그러나 현재에 사용되고 있는 환경 가스 센서는 차량의 배기계에 사용되는 산소 센서나 연소 배출 가스를 검지하는 소수의 가스 센서 외에는 아직 실용화 되지 못하고 있다. 따라서 고온, 부식 등의 과혹한 조건하에서 안정하고, 고

성능의 센서의 개발은 물론 센서를 구동시키는 대필연적인 신호처리 회로 등 주변 기술 또한 병행해서 발달되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. W. Weppner : Proc. 2nd Int. Meet. Chem. Sensors, Bordeaux, p. 59, 1986.
2. 山添 : 化學 ンサ, Vol. 8, p. 8., 1992.
3. T. Ogawa, S. Fujitsu, M. Miyayame, K. Koumoto & H. Yanagida : J. Mat. Sci. Lett., Vol. 5, p. 285, 1986.
4. N. Yamazoe, N. Miura : Chemical Sensor Technology, Vol. 4, p. 19, 1992.
5. N. Miura, S. Yao, Y. Shimizu, N. Yamazoe : Digest of Technical Papers, Transducers '91, San Francisco, p. 558, 1991.
6. T. Ishihara et al., : Digest of the 14th intern., Meeting on Chemical Sensors, Tokyo, p. 538, 1992.
7. S. Yao, Y. Shimizu, N. Miura, N. Yamazoe : Chem. Lett., 1992, p. 587, 1992.
8. Y. Yongtie, Y. Shimizu, N. Miura, N. Yamazoe : Chem. Lett., 1992, p. 635, 1992.

저자소개



박건호

1965년 9월 20일생. 1988년 2월 광운대학교 공대 전기공학과 졸업. 1990년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



이준용

1940년 10월 24일생. 1964년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1970년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1979년 佛·국립 Montpellier대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 현재 광운대학교 전기공학과 교수, 현재 당 학회 편수위원장.



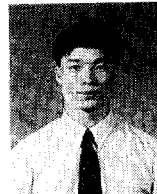
이수길

1970년생. 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 석사. 1995년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



정일형

1967년 12월 8일생. 1990년 2월 광운대학교 전기공학과 졸업. 1992년 2월 동 대학원 전기공학과 석사. 1995년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김진사

1967년 6월 22일생. 1993년 2월 원광대학교 전기공학과 졸업. 1995년 2월 동 대학원 전기공학과 석사. 1995년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.