

논문 97-6-3-07

소산장 흡수를 이용한 박막 광도파로형 칼륨이온센서

이 수 미*, 고 광 락**, 강 신 원**

Thin-film optical waveguide K⁺-ion sensor using the evanescent field absorption

Su-Mi Lee*, Kwang-Nak Koh**, and Shin-Won Kang**

요 약

본 연구에서는 생화학 물질을 정량적으로 분석하기 위하여 소산장(Evanescent field) 흡수를 이용한 박막 광도파로형 칼륨이온센서를 제작하였다. 도파로는 Pyrex glass(26×19×1mm, $n_1=1.485$ at 514nm, Ar laser; Coherent사 M532) 기판위에 RF sputtering법으로 Corning-7059 glass($n_2=1.588$, at 514nm, Ar laser; Coherent사 M532) 2종류의 박막 광도파로를 형성하였으며, 그 두께는 프리즘 결합법으로 측정된 결과 각각 $T_1=1.04\mu\text{m}$ 와 $T_2=1.41\mu\text{m}$ 였다. 칼륨이온 선택성의 이온감지막은 변색성 이온감응물질인 ETH 5294와 중성이온감응물질인 valinomycin을 poly(vinyl chloride-co-vinyl acetate-co-vinyl alcohol) (91 : 3 : 6) 공중합체 막내에 포괄법으로 고정화한 후 도파로 위에 스펀코팅법으로 제조하였다. 그리고, 센서의 특성을 평가하기 위해 감지막의 작용길이, 도파로의 두께 및 변색성 이온감응물질의 조성비 변화에 따른 감도 의존성을 조사하였다. 본 센서는 약 $1 \times 10^{-6} \text{ M} \sim 1.0 \text{ M}$ 의 넓은 측정범위를 가지며, 90%의 응답시간은 약 1분 이내의 빠른 응답특성을 나타내었다. 또한 분광분석법에 의한 투과광도법 및 광섬유를 이용한 optode형 센서를 제작하여 본 센서와 그 특성을 비교한 결과, 본 센서의 우수성을 알 수 있었다. 따라서 본 센서는 생화학 및 의용, 환경감시 분야 등에 응용 가능할 것으로 사료된다.

Abstract

A thin film optical waveguide sensor has been developed to measure and analyze quantitatively some inherent optical properties of biochemical substances. In this paper, two different kinds of thickness of thin film waveguide were prepared by RF sputtering of Corning-7059 glass($n = 1.588$ at $\lambda = 514\text{nm}$, Ar laser) on Pyrex glass substrates. We made a sensing membrane coated on the thin film waveguide with the poly(vinyl chloride-co-vinyl acetate-co-vinyl alcohol) (91 : 3 : 6) copolymer membrane based on H⁺-selective chromoionophore and K⁺-selective neutral ionophore and then proposed the thin film optical waveguide ion sensor which can select a potassium ion. This sensor based on the absorbance change by utilizing chromoionophore and neutral ionophore, which changes their absorption spectrum in the UV-vis region upon complexation of the corresponding ionic species, have been reported. The sensitivity dependence of the proposed sensor on interaction length, waveguide thickness, and content of a chromoionophore was investigated. This sensor has the measurement range of $10^{-6} \text{ M} \sim 1\text{M}$ for K⁺ concentration and 90% response time of duration within 1 min. Also, our thin film optical waveguide sensor using the evanescent field was investigated as compared with conventional transmission sensor or optode sensor by the optical fiber. The sensitivity of thin-film waveguide K⁺ sensor is higher than that of the conventional transmission sensor. The proposed sensor is expected to be useful to biochemical, medical, environmental inspection and so on.

1. 서 론

* 경북대학교 대학원 센서공학(Kyungpook National University Department of Sensor Engineering)

** 센서기술연구소(Sensor Technology Research Center)

※ 본 연구는 경북대학교 센서기술연구소를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것 입니다.

<접수일자 : 1997년 2월 11일>

일반적으로 임상화학검사 중 혈액학적 검사나 세균학적 검사에서 이용되고 있는 분광분석법은 Beer-Lambert 법칙^[1]에 기초를 두고 있으며, 이 측정법은 주

어진 파장에서 시료의 농도가 고농도일 때 흡광도와 농도와의 관계가 비선형적으로 나타나는 근본적인 단점이 있어 시료의 회석, 셀(cell)의 조정 등의 번거로운 전처리 과정이 요구된다. 또한 광섬유를 이용한 optode (optical electrode)는 감응막 두께 조절이 곤란하고, 접촉 단면적이 작아 감도가 낮으며 응답 시간이 늦은 단점을 가지고 있다. 이러한 기존의 문제점들을 개선하기 위한 광학적 측정법의 하나인 고굴절율프리즘에 의한 전반사법(ATR : attenuated total reflection)^[2]은 광의 내부 전반사를 이용하는 측정법으로서, 전반사면의 외측에 장착된 시료층내로의 흡수특성에 의존하는 전반사 광강도의 변화로 시료의 흡수스펙트럼 특성이 얻어진다. 그러나 이 방법 또한 소산파(evanescent wave)의 침투거리가 짧으면서 흡광면적이 작기 때문에 감도가 대단히 낮다는 단점을 가지고 있다.^[3]

위에서 간단히 언급한 바와 같은 종래의 광학적 이온센서들의 단점들을 극복하기 위하여 새로운 형태의 센서들이 연구되고 있으며, 그 중 소산장(evanescent field)^[4-7] 흡수를 이용한 평판광도파로형 이온센서가 큰 주목을 받고 있다.^[3, 4, 8]

본 논문에서는 종래의 투과광도법과 전반사법 등의 단점을 개선하기 위해 박막광도파로에서의 소산장 흡수를 이용한 칼륨이온센서를 개발하였다. 즉, 변색성 H^+ -이온감응물질과 중성 이온감응물질^[9]을 고분자 공중합체 내에 포괄법으로 고정화한 이온감응막을 광도파로 위에 입혀서, 감응막과 K^+ 이온과의 상호작용에 따른 분자상태변화로부터 특정도파모드에서의 소산장 흡수변화를 측정하였다. 또한 도파로의 두께, 감응막의 길이 변화 및 변색성 이온감응물질의 농도변화에 따른 센서의 제특성을 조사하였으며 본 센서와 기존의 투과광도법 및 광섬유를 이용한 optode형 센서와의 특성을 비교하였다.

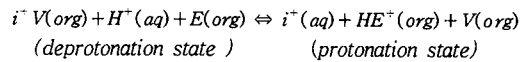
II. 측정원리

2.1. 이온감응막의 이온인식원리

일반적인 이온인식방법은 양이온(음이온) 교환체(charged ionophore)에 의한 전극-전하 상호 작용을 이용하는 방법과 중성 이온감응물질에 의한 전하-쌍극자 작용을 이용하는 방법이 현재 일반적으로 사용되고 있다. 이들 이온감응물질은 Poly(vinyl chloride-co-vinyl acetate-co-vinyl alcohol) (PVC-VAc-VA, 91 : 3 : 6) copolymer와 같은 lipophilic 한 물질내에 고정화한후 측

정하고 전하는 시료 용액과 계면에서의 상호 작용을 바탕으로 이온 인식작용을 한다.

본 연구에서는 K^+ 이온에 대한 중성 이온감응물질인 valinomycin과 변색성 이온감응물질인 ETH 5294^[3]를 이용하였으며, 칼륨이온 추출 반응 메커니즘은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.



여기서, V (valinomycin)은 중성이온감응물질, i^+ 는 측정대상이온(K^+), HE^+ (ETH 5294)는 변색성 이온감응물질을 나타낸다. 위의 반응 scheme에서 나타낸 바와 같이 소수성인 valinomycin-칼륨이온 착체를 형성함에 따라 ETH 5294내에 가지고 있던 수소이온이 수용액상으로 떨어져 나가므로써(지용성 이온 쌍형 착체 형성) 탈프로톤형(deprotonation)으로 될 때의 흡광도 변화를 이용하여, 분석하고자 하는 측정이온농도의 정량분석을 행할 수 있다.

2.2. 센서의 측정원리

박막광도파로센서의 원리는 기본적으로 광의 흡수 및 방출(형광 또는 인광 등의 발광현상)특성을 이용하는 것으로, 투명한 유전체 유리기판의 표면에 이 기판보다 굴절율이 높은 투명한 유전체를 광과장 정도의 두께로 박막을 형성하여 광을 이 고굴절률 박막층내로

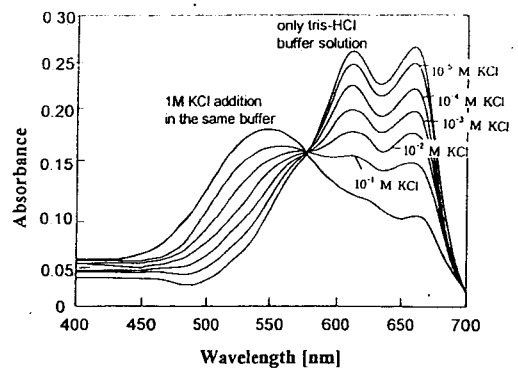


그림 1. 두께 $4\mu m$ 의 이온감응막에 대한 protonation 과 deprotonation에 따른 분광측정 그래프.
Fig. 1. Absorption spectra of the $4\mu m$ thick K^+ -ion sensing film for protonation and deprotonation.

도파시키는 것이다.^[10] 박막층내를 도파하는 광파는 층의 경계면에서 파의 진행방향으로는 파동의 형태를 취하고 경계면의 수직방향으로는 그 방향으로의 진폭이 지수함수적으로 감소하는 연속적인 정재파, 즉 소산장이 형성된다. 본 센서의 경우 광도파로 위에 고정화된 이온감응막이 이온인식을 함에 따라 그림 1에 나타낸 바와 같이 흡광도의 변화와 흡수파장의 천이를 가진다. 또한 이온농도에 따라 약 575nm 파장의 변곡점을 중심으로 흡광도의 크기가 달라짐을 알 수 있다. 출사되는 특정 광도파모드에서 감지막내로 침투되어진 소산장의 흡수변화를 일으키고 이러한 흡광도 변화는 출사되는 도파광의 강도변화를 측정함으로써 이온의 정량 분석이 가능하다.

III. 실험 방법

3.1 도파로 제작

본 연구에서는 Pyrex glass(26×19×1mm, n₁=1.485 at 514nm) 판위에 RF sputtering법으로 Corning-7059 glass(n₂=1.588, at 514nm)의 박막을 형성하였다. 두께가 서로 다른 2종류의 도파로를 제작하였으며, 프리즘 결합법으로 측정된 각각의 두께는 T₁=1.04μm 와 T₂=1.41μm 였다.

3.2 센서 제작

변색성 이온감응물질인 ETH 5294(Fluka 사), 칼륨이온 인식용 중성이온감응물질인 valinomycin (Sigma 사) 그리고 가소제인 dioctyl phthalate(DOP, Sigma 사)를 PVC-VAc-VA copolymer공중합체(Aldrich 사) 막내에 포괄법으로 고정화시켜서 감응막을 제조하였으며, 그림 2에 본 실험에 사용한 ETH 5294와 valinomycin의 화학구조를 나타내었다. 이온감응막의 가소제로 사용한 DOP는 아킬기의 길이가 길어 친유성이 강하여 실제 측정시 내구성과 직결되는 수용액과의 반응에 대해서도 감응막은 안정한 상태를 유지할 수 있다. PVC-VAc-VA 공중합체 지지체는 기존에 사용된 PVC 계열의 고분자 지지체에 비해 센싱막의 기관으로 사용된 Corning-7059 glass 기관과의 점착력(adhesion)이 좋으며, 수용액 내의 금속이온과의 반응에 있어서 응답속도가 빠르다는 특성을 가지고 있으며 가소제와의 혼합 비율에 따라 이온 감지막의 굴절을 변화가 가능하다는 장점 또한 가지고 있다.

THF를 용매로 사용하여 Corning-7059 glass 도파

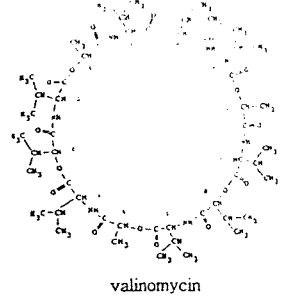
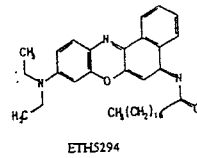


그림 2. ETH 5294와 valinomycin의 분자구조.

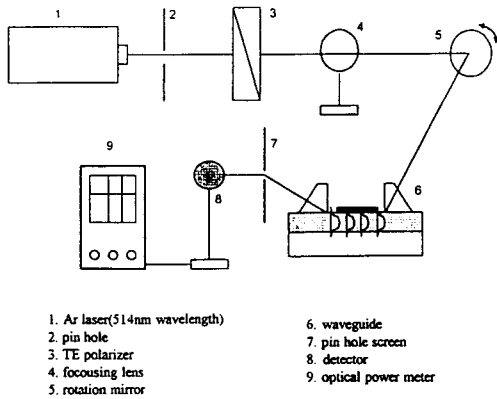
Fig. 2. Molecular structures of the ETH 5294 and valinomycin. .

로 기관위에 스핀 코팅(3500rpm, 15s) 한 후 90℃의 oven내에서 30분간 건조하여 막을 형성시킨 다음 제작한 시료 충전셀을 감응막 위에 부착시킨다. 시료 충전셀은 0.2mm 두께의 염화비닐(10×20mm)과 내경이 1.5mm인 튜브를 이용하여 제작한다. 변색성 이온감응물질의 조성비에 따른 센서의 감도 의존성을 조사하기 위해 서로 다른 양의 ETH 5294를 포함한(0.66wt%, 1.3wt%, 3.21wt%) 감응막을 제조하였다.

3.3 측정

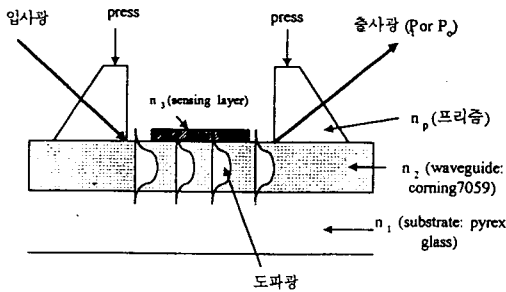
그림 3에 본 실험장치 및 감지부의 모식도를 나타내었다. 황동 도파로내에 프리즘결합법으로 고정화된 센서를 xyz축 가변 stage에 장착하여 514nm의 파장의 Ar laser(Coherent 사, 모델 M532)광원을 입사시켜 편광기, 집광렌즈 및 pin hole을 통과하도록 하였다. 최저차모드(TE₀ 모드)가 출사되도록 입사각을 조절하여 도파로내에 광을 결합시키고 출사프리즘을 통해 출사된 광을 주변광(background light)의 방해를 피하기 위해 pin-holed screen을 통과시켜 optical power meter(Omnichrome사 Labmaxter)로 측정하였다.

센서 특성 평가시, 감응막의 전체를 균일하게 안정화시키기 위해 pH 7.4의 0.05 M Tris-HCl 완충용액을 제작된 시료충전셀에 주입하고 출사광 P₀를 측정한다. 완충용액을 제거하고, 1×10⁻⁶~1.0 M의 KCl 수용액을 기억효과(memory effect)를 없애기 위해 저농도로부터 고농도 차례대로 마이크로피펫을 이용하여 시료충전셀에 충전시킨 후 각각의 출력광 P₀를 측정한다. 여기서 센서 응답 즉, 흡광도 A = -log(P₀/P_i)를 구하였다.



1. Ar laser(514nm wavelength)
 2. pin hole
 3. TE polarizer
 4. focusing lens
 5. rotation mirror
 6. waveguide
 7. pin hole screen
 8. detector
 9. optical power meter

(a)



(b)

P_i : 기초 시료 주입시 광출력
 P_o : 피측정 시료 주입시 광출력

그림 3. 프리즘 결합법에 의한 칼륨이온센서.
 (a) 실험장치, (b) 감지부.

Fig. 3. K^+ ion sensor using the prism coupling method. (a) profile of the experimental setup, (b) profile of the sensing part.

IV. 결과 및 고찰

본 센서의 기본특성을 평가하기 위해 ETH 5294 0.66 wt%, valinomycin 1.05 wt%, DOP 67.63 wt%, PVC-PVAc-PVA 공중합체 30.66 wt%의 기본 조성비로서 이온감응막을 제작하여, $1 \times 10^{-6} M \sim 1.0 M$ 농도 범위의 KCl(pH 7.4) 샘플용액에 대한 센서의 검출특성을 측정된 결과(그림 4) 약 $10^{-5} M \sim 1M$ 농도범위에서 거의 선형응답특성을 나타내었고, 시료용액 주입 후 수초내에 출력광은 급격한 변화를 나타내며 약 1분내에 90%의 응답을 얻었다. 이로서 흡광도 변화를 측정하여 K^+ 이온농도의 정량분석이 가능함을 알 수 있었다.

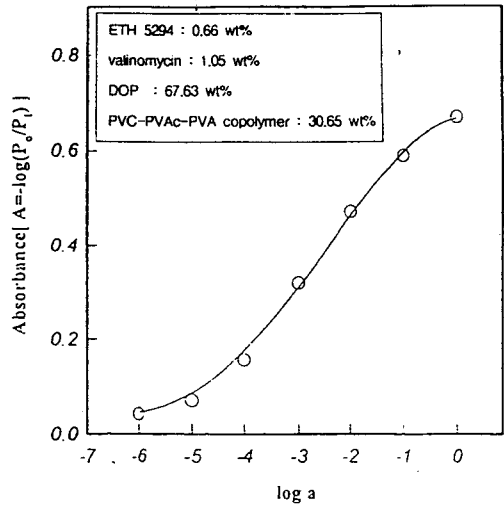


그림 4. 기본조성비에 대한 센서의 응답특성(도파로 두께 : $1.41 \mu m$, 감응막 길이 : 3mm).
 Fig. 4. Sensor response characteristics for the basic membrane.(waveguide thickness : $1.41 \mu m$, interaction length : 3mm).

센서의 감도에 영향을 주는 변수로서는 interaction length(이하 IL이라함), 변색성 이온감응물질의 농도, 도파로 두께의 변화 등임을 알 수 있으며 첫 번째로 IL 즉, 이온감응막의 길이를 3mm, 6mm, 9mm로 변화 시킴에 따른 센서의 감도를 측정하였다.(그림 5) IL이 길수록 흡광도는 선형적으로 증가하며, 6mm의 IL에 대해 가장 안정한 센서특성을 얻을 수 있었다. 다음으로 도파로의 두께가 각각 $1.04 \mu m$ 와 $1.41 \mu m$ 인 2개의 도파로에 대한 응답특성을 검토하였으며(그림 6) 도파로의 두께가 얇을수록 소산파의 침투깊이가 깊어짐에 따른 감도가 증가하였음을 알 수 있었다. 마지막으로 변색성 이온감응물질인 ETH 5294의 조성비 변화에 따른 흡광도 의존성을 조사하였으며 예상한 바와 같이 변색성 이온감응물질의 양이 증가할수록 그 흡광도가 증가하였고 그림 7에서와 같이 변색성 이온감응물질의 조성비가 작을 경우, 저농도에서 쉽게 포화되고 변색성 이온감응물질의 농도가 커질수록 고농도의 칼륨이온에 대해 쉽게 포화상태에 도달하였다.

이상의 측정결과들에서 알 수 있는 바와같이 박막 광도파로 칼륨이온 센서는 이온농도 $1 \times 10^{-6} M \sim 1.0 M$ 까지의 검출범위를 가지며, 샘플용액의 주입과 동시에 반응이 시작되고 90%의 응답시간은 약 1분이며

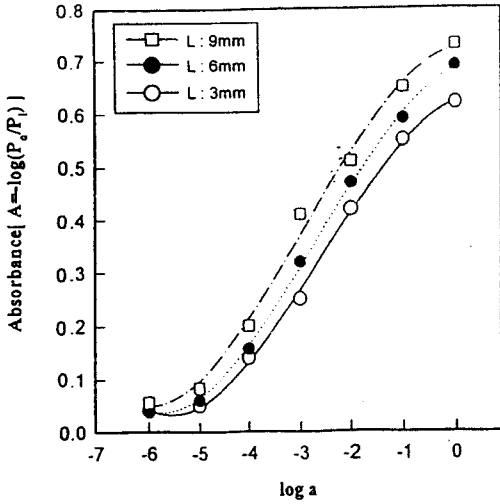


그림 5. 감응막의 길이 변화에 따른 감도변화.(도파로 두께 : 1.41 μ m, 감응막의 조성비 : Fig. 4와 동일조건)

Fig. 5. Sensitivity change for the interaction length, sensing layer length.(waveguide thickness : 1.41 μ m, membrane composition : same as Fig. 4)

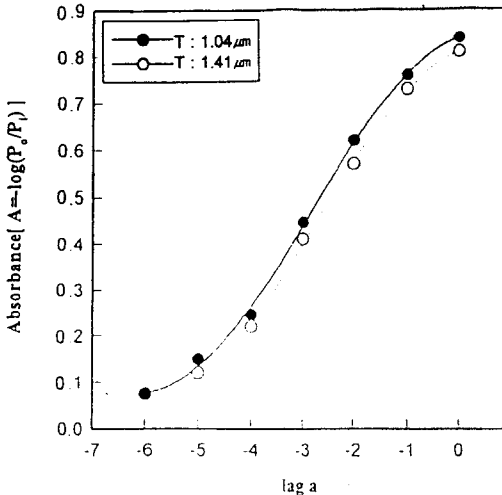


그림 6. 도파로 두께변화에 따른 감도변화.(감응막의 길이 : 3mm, 감응막의 조성비 : Fig. 4와 동일)

Fig. 6. Sensitivity change for the waveguide thickness.(interaction length : 3mm, membrane composition : same as Fig. 4)

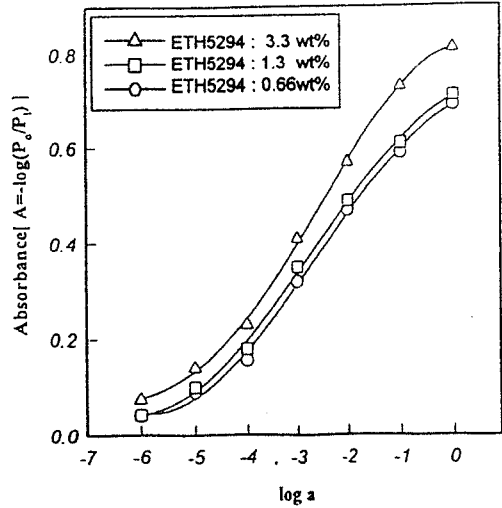


그림 7. 변색성 이온감응물질의 조성비에 따른 센서의 감도변화.

Fig. 7. Sensitivity change for the chromoionophore composition.

약 1×10^{-5} M ~ 1M의 넓은 선형영역을 가지는 등의 우수한 특성을 가지고 있다. 또한 시료층과의 작용 길이가 길어지면 소산장의 흡수 길이가 증가하고, 전파광강도는 대폭적으로 감쇠함을 알 수 있었고 도파로의 막두께 T가 얇아수록 소산장의 시료층으로의 침투가 커져 전파광의 흡수가 증가하고 이에 따른 흡광도의 감소가 현저하게 나타나므로 효율적인 감지기능을 가질 수 있음을 알게 되었다.

또한 박막광도파로 센서의 우수성을 확인하기 위해 투과광도법 및 optode 센서를 제작하여 동일 성분의 감응막에 대한 각각의 센서 특성을 비교 평가하였다. 투과광도법에 의한 센서의 특성평가를 위해 일반적인 UV-vis. 분광분석기(Shimadzu사)를 사용하였으며, optode형 센서는 K. Suzuki^[11]의 논문을 참조하여 제작하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 투과광도법의 경우 $|- \log(P_i/P_o) / \text{decade}| \approx 0.02$ 의 낮은 감도를 나타내었고 특히, 고농도의 시료에 대해 빠르게 포화상태에 도달해버리는 결과를 알았다. 따라서 UV-Vis 분광분석기에 의한 투과광도법 및 광섬유를 이용한 optode형 센서의 감응특성과 비교한 결과 박막 광도파로형의 경우가 훨씬 높은 감도와 넓은 선형영역을 가짐을 알 수 있었다.

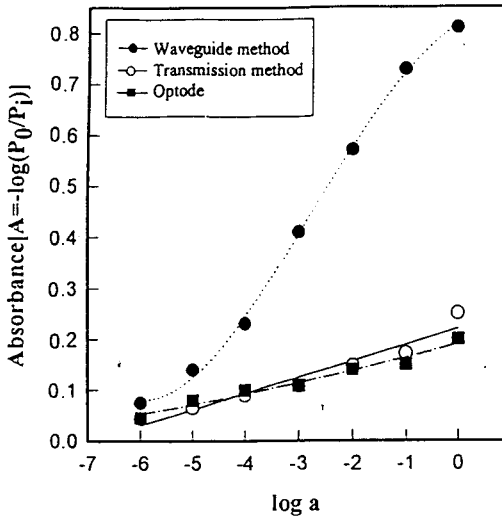


그림 8. 투과광도법, optode형 센서 및 박막광도파로형 이온센서의 특성비교.

Fig. 8. Characteristic comparison of transmission method, optode sensor, and thin-film optical waveguide ion sensor.

V. 결 론

본 연구에서는 평판형 박막광도파로 위에 특정이온에 대해 선택적으로 민감한 물질을 포괄법으로 고정화한 감응막을 이용한 이온센서를 새로이 제작하여 그 특성을 조사하였다. 이러한 소산장 흡수를 이용한 박막광도파로형 이온센서는 전반사법 또는 다중내부전반사법을 이용한 다른 광화학센서에 비해 광의 작용길이 길어 그 흡수면적을 넓힐 수 있는 장점을 가지고 있으므로 기존의 이온 선택성 전극형 이온센서^[12-13]나 투과광도법의 optode형 이온센서의 근본적인 문제점인 좁은 측정범위 및 낮은 감도 및 전기적인 간섭을 배제할 수 있으므로 임상응용에서 안정되게 사용될 수 있다. 또한 1×10^{-6} M ~ 1.0 M의 칼륨이온 농도범위에 대해 본 센서는 약 90%의 응답시간이 1분이내의 빠른 응답 특성을 나타내었다. 특히 약 1×10^5 M 정도의 넓은 농도범위에 걸쳐서 선형응답특성을 나타내며, 감도는 $|\log(P_0/P_1)| / \text{decade} \approx 0.2$ 로서 투과광도법에 의한 감도의 약 10배의 고감도를 나타내며, 1.0 M까지의 고농도에서도 좋은 감응 특성을 가진다. 더구나 변색성 이온감응물질의 조성비를 일정농도까지 증가시켜

좁으므로 그 측정범위를 넓힐 수 있으므로 저농도의 측정범위를 필요로 하는 임상적 응용분야 뿐만 아니라 고농도의 환경감시용 센서로서도 그 적용이 가능하리라 기대된다.

참고문헌

- [1] D. J. Holme and H. Peck, *Analytical Biochemistry*, Longman, London and New York, pp. 36-39, 1983.
- [2] N. J. Harrick, *Internal Reflection Spectroscopy*, Harrick Scientific Corporation, New York, 1979.
- [3] S. W. Kang, H. Minamitani, and K. Sasaki, "Biochemical Sensors Using Thin-Film Optical Waveguide Quantitative Analysis of Hemoglobin Concentration", *SICE*, vol. 29, no. 8, pp. 908-917, 1993.
- [4] D. S. Ballantine, "Optical Waveguide Humidity Detector", *Anal. Chem.*, 58, pp. 2883-2885, 1986.
- [5] J. F. Giuliani and N. I. Jarvis, "A Systematic Investigation and Characterization of Interfacial Hydrated n-Alkane Films by Total Internal Multiple Reflection", *J. Chem. Phys.*, 82, 2, pp. 1021-1024, 1985.
- [6] M. DeGrandpre, L. W. Vurgess, "Long Path Fiber-Optic Sensor for Evanescent Field Absorbance Measurement", *Anal. Chem.*, 60, pp. 2582-2586, 1988.
- [7] D. A. Stephens and P. W. Bohn, "Long Path Length Absorption Measurement in Thin Dielectric Films", *Anal. Chem.*, 59, pp. 2563-2566, 1987.
- [8] S. W. Kang, H. Minamitani, and K. Sasaki, "Sensitivity Analysis of a Thin-Film Optical Waveguide Biochemical Sensor Using Evanescent Field Absorption" *Appl. Opt.*, 32, pp. 3544-3549, 1993.
- [9] S. Ozawa, Peter C. Hauser, K. Seiler, Susie S. S. Tan, W. E. Morf, and W. Simon,

- "Ammonia-Gas-Selective Optical Sensors Based on Neutral Ionophores", *Anal. Chem.*, vol. 63, pp. 640-644, 1991.
- [10] D. R. Miller and P. W. Bohn, "Depth Profiling with Standing Waves. Recovery of Thin-Film Functional Group Distributions", *Anal. Chem.*, 60, pp. 407-411, 1988.
- [11] K. Suzuki, "Fibre-Optic Potassium Ion Sensors Based on a Neutral Ionophore and a Novel Lipophilic Anionic Dye", *Analytica Chimica Acta*, 237, pp. 155-164, 1990
- [12] K. Kimura, A. Ishikawa, H. Tamura, and T. Shono, "Lipophilic Bis(crown ether) Derivatives of 15-Crown-5 and 18-Crown-6 as Neutral Carriers of Ion-selective Electrodes", *J. Chem. Soc. Perkin Trans. II*, pp. 447-450, 1984.
- [13] A. Jyo, R. Minakami, Y. Kanda and H. Egawa, "Role of Membrane Media in Potentiometric Selectivity of Anion Carrier-Based Ion-Selective Electrodes", *Sensors and Actuators B*, 13-14, pp. 200-204, 1993.

著 者 紹 介



이수미

1972년 9월 5일생. 1995년 효성여자대학교 물리학과 졸업(이학사), 1997년 경북대학교 대학원 센서공학과(공학석사), 1997년~현재 동대학원 박사과정, 주관심분야 : 광도파로센서, 바이오 센서, 광전자 공학

강신원

『센서학회지 제4권 제1호』 논문 95-4-1-05, p.34 참조
현재 경북대학교 전자·전기공학부 조교수



고광락

1963년 9월 21일생. 1990년 2월 부산대학교 자연대 화학과 졸업(이학사), 1992년 2월 부산대학교 대학원 화학과 졸업(이학석사), 1992년 4월~1993년 3월 九州(kyushu)대학 공학부 연구생, 1995년 9월

九州(kyushu)대학 대학원 공학연구과 졸업(공학박사), 1996년 3월~현재 경북대학교 센서기술연구소 전임강사, 주관심분야 : 분자전자(Molecular Electronics), 유기전자재료, 분자정보소자(Molecular Information Device), 생체모방센서(Biomimetic Sensor) 등