

센서 감응막으로서의 계면활성 물질의 이용과 응용

한국과학기술원 화학공학과

김 종 득, 김 승 렬

차 례

I. 서 론

II. 계면활성 물질의 특성

II-1. 단분자막과 LB막을 형성하는 물질

II-1-1. 지방산과 그 유도체

II-1-2. 5- 또는 6-고리구조 화합물

II-1-3. Porphyrines와 Phthalocyanines

II-1-4. 혼합막

II-1-5. 고분자 물질 및 계면 중합이 가능한 물질

II-2. 단분자막의 형태와 상전이

II-3. 다층 구조막의 제조

III. 센서 감응막으로서의 응용

III-1. 화학 센서의 원리

III-2. 특 성

III-2-1. 전기화학 센서

III-2-2. 압전 소자를 이용한 BAW 센서

IV. 결 언

V. 참고 문헌

I. 서론

센서는 측정하고자 하는 대상을 감지할 수 있는 감응성 부분과 여기서 발생하는 정보를 전기적 신호로 바꾸는 변환기로 구성되며, 크게 물리 센서와 화학 센서로 구분할 수 있다. 화학 센서는 공정 조건을 조절하거나 유독 물질의 농도를 감지함으로써 생명체를 보호하는데 이용되고 있으며, 물리적 신호를 이용하는 물리 센서와는 달리 센서의 주변에는 다양한 화학 신호가 존재하기 때문에 선택성이 매우 중요하다. 따라서 높은 선택성으로 감지 물질과 반응하여 센서의 물리적 신호량을 조절할 수 있는 감응막(생·화학 계면)의 사용이 필요하다. 이러한 물리적 신호는 변환기의 전기적 신호로부터 얻어지지만, 생·화학 계면은 그 자체가 변환기로 작용하여 신호를 화학 영역에서 물리 영역으로, 또는 전기 영역으로 직접 전달한다. 여기서 센서는 감지 대상 및 변환기의 형태에 따라 다양하게 구분되지만, 모든 경우에 있어서 감응막은 감지하고자 하는 물질에 따라 높은 선택성과 감도를 가질 수 있도록 감응성 물질의 선택 및 구조의 제작이 이루어져야 한다.

감응막의 제작에 있어서 감응성 물질의 선택 및 막 형성 방법은 매우 중요하다. 감응막 즉, 생·화학 계면과 감지 물질 간의 상호 작용은 흡수/흡착에서부터 화학 흡착에 이르기까지 매우 다양하며, 이러한 상호 작용 및 생·화학 계면의 형태는 궁극적으로 센서의 성능 특성을 결정한다. 또한 화학 센서는 환경과 직접 접촉하기 때문에 밀봉되어 있는 물리 센서와는 달리 생·화학 계면과 센서의 다른 부분이 외부 환경에 의해 파손되는 것을 최소화해야만 한다. 생·화학 계면의 안정성은 센서 표면에 대한 물질의 부착에 강하게 의존하지만, 막 제조에 대한 정보는 부족한 것이 사실이다. 감응막을 제조하는 방법으로는 크게 물리적인 흡착과 화학적인 고정 방법이 있다. 물리적인 방법에는 casting, spin coating과 같은 간단한 방법에서부터 LB법, CVD, PVD 등의 복잡한 기술이 있다. 각각의 방법들은 각기 장단점을 지니고 있지만, LB법은 막의 두께가 매우 얇고(nm scale) 균일하며, 방향성, 배열 상태, 구조 등을 분자 단위에서 조절할 수 있다는 장점을 지니고 있기 때문에 응용 잠재력이 매우 크다.

LB법을 사용하여 감응막을 제조하기 위해서 물질은 계면 활성을 지녀야 한다. 하지만, 이러한 제한은 막 제조에 있어서 큰 문제가 되지는 않는다. 왜냐하면, 이용할 수 있는 물질의 폭이 넓고, 합성에 의해 그 폭은 더욱 커질 수 있기 때문이다. 따라서 대상물질에 대해 선택성과 감도를 지닌 계면활성 물질을 사용함으로써 LB막의 우수한 특성을 이용한 센서의 개발이 이루어질 수 있다.

II. 계면활성 물질의 특성

계면에서 분자들은 일반적으로 벌크상에서보다 높은 에너지 준위를 갖는다. 즉, 계면에서 분자들이 느끼는 외부와의 상호 작용력은 벌크에서와는 상당히 다르다. 따라서 계면에서 분자들 상호간에는 더 큰 힘이 작용하게 되므로, 벌크로부터 계면으로 분자를 이동시키기 위한 에너지가 필요하게 된다. 계면활성 물질이란 이용가능한 계면에 우선적으로 흡착하는 물질로서, 벌크상 분자들이 계면에서 갖는 높은 에너지를 대치하여 전체 계의 자유 에너지를 낮추는 역할을 한다. 이러한 계면활성 물질들은 그림 1에 나타낸 바와 같이 화학 구조상 다음과 같은 특성을 지닌 관능기로 구성된다[1] : (1)용매나 벌크상에 대한 인력이 거의 없는 소수성 부분과 (2)강한 인력을 지닌 친수성 부분. 여기서 친수성 부분과 소수성 부분간의 균형은 불용성 단분자막의 형성을 가능하게 한다. 물론 acetic acid나 ethyl alcohol과같이 짧은 탄화수소 사슬을 지닌 물질들은 완전히 물과 섞이지만, 탄화수소 사슬의 길이가 증가함에 따라 물에 대한 용해도가 작아져 기/액 계면에서 안정한 불용성 단분자막을 형성할 수 있다. 이러한 현상은 탄화수소 사슬 사이의 응집력이 사슬의 길이에 비례하므로 물에 대한 물질의 저항성 역시 커지기 때문에 일어나지만, 절대적으로 불용성을 의미하는 것은 아니다. 여기서 용해도는 액상에 대한 인력으로 고려될 수 있으며, 기/액 계면에서 이러한 인력은 극성을 지니는 관능기에 의해 지배된다.

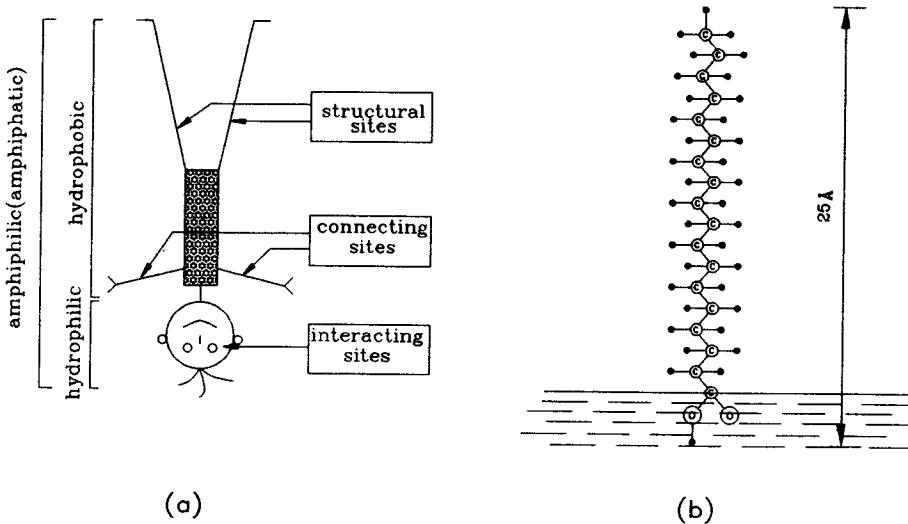


그림 1. 계면활성 물질의 분자 구조.

II-1. 단분자막과 LB막을 형성하는 물질

LB막을 이용한 응용은 그 범위가 너무 넓기 때문에 어디까지라고 예측하기는 어렵다. 1966년에 Gaines는 187 종류의 단분자막을 형성할 수 있는 물질을 소개한 바 있다[2]. 그러나 LB막의 기능성에 관한 연구가 활발해진 최근에는 더욱 많은 물질이 합성되어 그 수가 수천 종에 달하고 있다. 여기서는 지금까지 LB막을 형성하는 것으로 알려진 물질들을 구조적 특성을 근거로 구분하여 소개하고자 한다.

II-1-1. 지방산과 그 유도체

긴 사슬을 지닌 지방산과 같은 단분자막의 연구에 널리 쓰여 온 계면활성 물질들은 소수성 부분으로 탄화수소 사슬을, 친수성 부분으로 $-COOH$ 기를 지니고 있다. 여기서 친수성 부분과 소수성 부분 사이의 균형은 불용성 단분자막의 형성을 가능하게 한다. 짧은 탄화수소 사슬을 지닌 물질들의 경우에는 물과 완전히 섞이지만, 탄화수소 사슬 사이의 길이가 길어짐에 따라 물에의 용해도가 작아지기 때문에 불용성 단분자막을 얻을 수 있다. 지방산의 유도체는 소수성기 또는 친수성기의 구조 변화를 통해 얻을 수 있다. 즉, 탄화수소 사슬에 이중 결합을 도입하거나 side chain을 도입하는 경우와 친수기를 변화시키는 경우를 생각할 수 있다. 표 1에 몇 가지 친수성 말단기의 물에 대한 친화력의 상대적인 비교를 나타내었다. 일반적으로 말단에 $-COOH$, $-OH$, $-COO-$ 등의 친수기를 지닌 화합물은 탄소수가 16-20 정도의 포화사슬 길이를 지닐 때 안정된 단분자막을 형성하는 것으로 알려져 있다 [3].

표 1. 친수기의 물과의 인력 비교.

Very weak (no film)	Weak (unstable films)	Strong (stable film with C_{16} chain)	Very strong (C_{16} chain compounds dissolve)
Hydrocarbon	$-CH_2OCH_3$	$-CH_2OH$	$-SO_3^-$
$-CH_2I$	$-C_6H_4OCH_3$	$-COOH$	$-OSO_3^-$
$-CH_2Br$	$-COOCH_3$	$-CN$	$-C_6H_4SO_4^-$
$-CH_2Cl$		$-CONH_2$	$-NR_3^+$
$-NO_2$		$-CH=NOH$	
		$-C_6H_4OH$	
		$-CH_2COCH_3$	
		$-NHCONH_2$	
		$-NHCOCH_3$	

II-1-2. 5- 또는 6-고리구조 화합물

이것은 N, O, S를 포함하고 2개의 이중결합을 지니는 5-고리구조 화합물과 3개의 이중결합을 갖는 벤젠 유도체로 대별된다. 이러한 고리 구조는 소수성이기 때문에 단분자막을 형성하기 위해서는 친수기를 도입해야 한다. 벤젠 유도체는 수면상에 전개된 분자의 배향에 따른 광학특성 또는 벤젠 고리의 분자배열에의 영향 등에 대한 연구가 진행되고 있다. 한 분자 내에 2개 이상의 벤젠 고리를 포함하는 다중 고리 화합물도 고리 주위에 치환된 R-group의 특성에 따라 계면 현상 및 LB막 제조에 영향을 준다. 고리에 탄소이외의 다른 원소가 들어간 heterocycle 화합물은 탄소로만 이루어진 고리 화합물보다 친수성이 커지게 되지만, R-group에 따라서 안정한 단분자막을 얻을 수 있다. 그림 2과 3은 이러한 구조를 지닌 계면활성 물질의 몇 가지 예를 도시한 것이다[4,5].

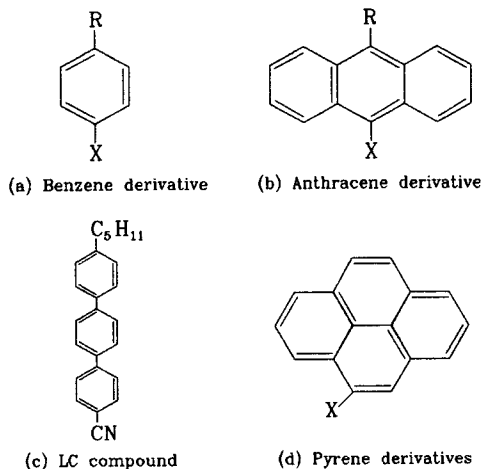


그림 2. 벤젠 유도체의 예.

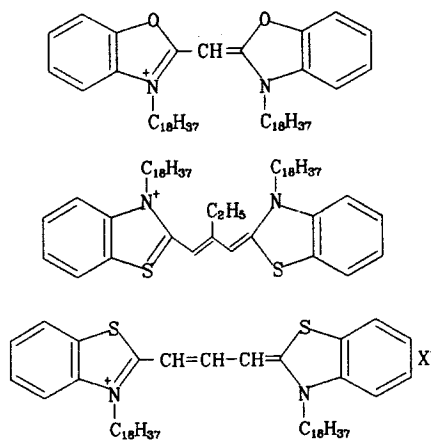


그림 3. Typical cyanine dyes.

II-1-3. Porphyrines와 Phthalocyanines

Porphyrin은 그림 4에서 보듯이 중심의 수소대신에 여러 가지 금속 이온을 치환함으로써, 그리고 porphyrin 주위를 다른 화합물로 치환함으로써 다양한 특성을 보인다. 이러한 현상은 phthalocyanine의 경우에도 동일하게 적용된다(그림 5). 특히 R-group의 치환이 이루어지지 않은 phthalocyanine은 유기 용매에 불용성이지만, R-group의 치환은 유기 용매로의 용해를 가능하게 만들기 때문에 단분자막의 형성을 가능하게 한다[4,5].

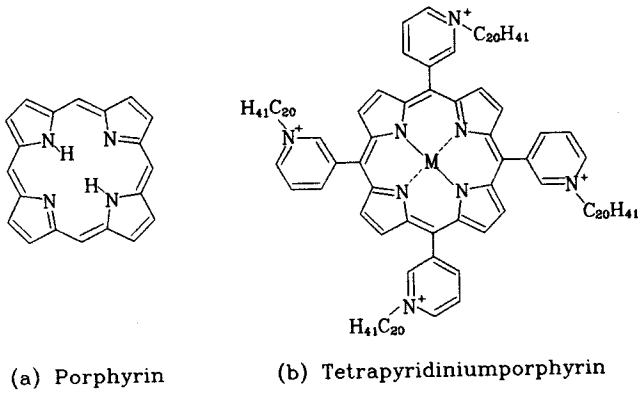


그림 4. Porphyrin 유도체.

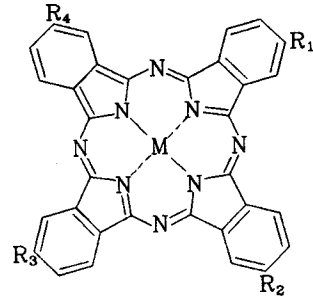


그림 5. Phthalocyanines.

II-1-4. 혼합막

단단한 구조를 지닌 소수성 분자들은 그들 스스로는 기/액 계면에서 단분자막을 형성하지 못하지만, 지방산과의 혼합막은 안정한 단분자막을 형성하는 것으로 알려져 있다. 이 방법은 화학반응에 의한 R-group의 치환이 없이도 쉽게 LB막을 제조할 수 있기 때문에 의미가 있다. 그림 6에 보여진 quinquethienyl은 arachidic acid와, benzperylene은 cadmium arachidate와 안정한 혼합막을 형성한다[4,5].

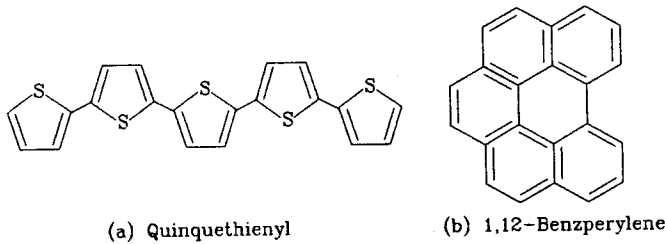


그림 6. 혼합막으로 단분자막 형성이 가능한 물질.

II-1-5. 고분자 물질 및 계면 중합이 가능한 물질

고분자 물질 역시 단분자 물질과 같은 방법으로 전개된다. 하지만, 분자내에 충분한 친수기가 존재해야만 안정한 단분자막을 형성할 수 있다. 즉, 고분자 물질이 안정한 단분자막을 형성하기 위해서는 친수기들이 규칙적인 간격으로 치환되어 있어야만 한다. 많이 연구되고 있는 물질로는 polyacrylate, polymethacrylate, silicon copolymer, poly(vinylbutyral),

poly(vinylmethylether), poly(vinylidene fluoride), poly(vinylacetate), poly(vinyl fluoride) 등이 있다. 그림 7은 고분자 단분자막의 도식적인 모양을 나타낸 것이다[4,5].

분자 내에 이중결합을 갖고 있는 단분자는 기/액 계면에서 UV 또는 electron beam 등을 조사하여 계면 중합을 할 수 있다. 이러한 계면 중합은 분자 수준의 두께로 2차원의 고분자 막을 제조할 수 있으며, 2차원의 계면구조가 변하지 않은 상태로 유지되면서 중합된다는 특징이 있다. 계면 중합이 가능한 물질로는 butadienes, diacetylenes, oxirans 등이 있다. 그림 8은 butadiene 계열인 2,4-hexadecadienoic acid를 계면 중합한 경우를 나타낸 것이다[6].

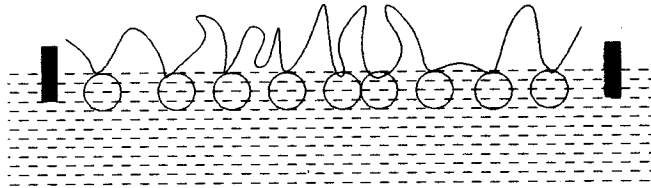


그림 7. 기/액 계면에 형성된 고분자 단분자막.

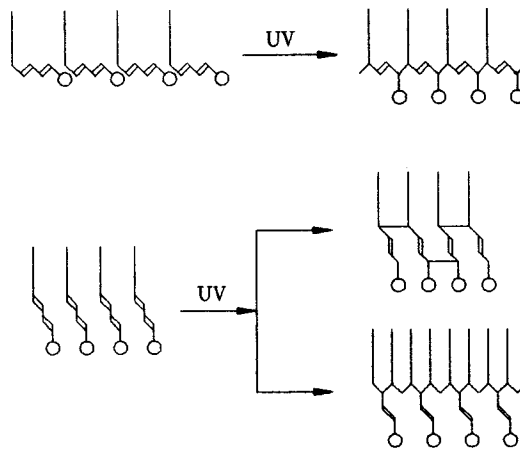


그림 8. 2,4-Hexadecadienoic acid의 계면중합.

II-2. 단분자막의 형태와 상전이

수면위에 단분자막이 형성됨으로써 나타나는 표면압, Π 는 단분자막에 의한 표면압의 감소를 나타내는 지표가 된다. 단분자막을 구성하는 분자들은 2차원적인 의미에서의 삼투압을 갖는 것으로 고려될 수 있으며, 이것은 표면에서의 반발력을 의미한다. 표면압의 정의를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\Pi = \gamma_0 - \gamma \quad (1)$$

여기서 γ_0 는 깨끗한 수면의 표면 장력이고, γ 는 단분자막이 형성되었을 때의 표면 장력이 다. 계면활성 물질이 이용할 수 있는 면적에 따른 표면압의 변화는 Π -A 등온선으로 나타내어지며, 단위는 표면적은 $\text{\AA}^2/\text{molecule}$ (고분자의 경우에는 $\text{\AA}^2/\text{mg}$ 또는 $\text{\AA}^2/\text{repeating unit}$)로, 표면압은 dyne/cm (또는 mN/m)로 표시된다[7]. 따라서 Π -A 등온선은 3차원 P-V 등온선의 2차원적인 표현이라고 할 수 있다. 즉, 단분자막의 두께가 1 nm일 경우에 1 mN/m 의 표면압은 106 N/m^2 ($\approx 10 \text{ atm}$)의 3차원 압력에 해당된다.

2차원 단분자막은 그들의 물성에 있어서 상당히 다른 상태들을 지니며, 그 구분은 여러 가지 명칭으로 제안되고 있으나, 일반적으로 크게 세 가지로 구분된다. 즉, 기체상, 팽창상, 응축상 단분자막 상태로, 이것은 3차원 계에서의 기체, 액체, 고체 상태에 해당한다[8]. 그림 9는 긴 사슬 지방산에 대한 도식적인 Π -A 등온선이다.

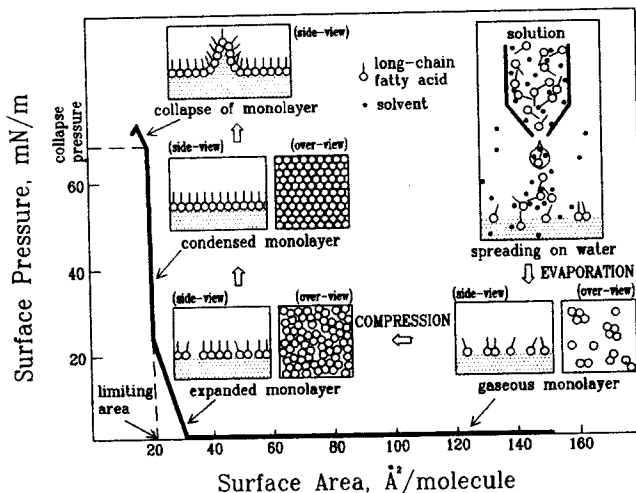


그림 9. 긴 사슬 지방산 단분자막의 Π -A 등온선.

II-3. 다층 구조막의 제조

LB막은 Langmuir trough를 이용하여 제작된다. 수면상에 배열된 유기물 단분자막은 일정한 표면압하에서 고체 기관의 상하 운동에 의해 이전된다. 이러한 이전 방법에는 수직 부착법과 수평 부착법이 있으며, 일반적으로 수직부착법이 널리 사용되고 있다(그림 10). 기관이 기/액 계면을 통과하는 수직 부착법에 의한 막의 형태는 친수기-친수기, 소수기-소수기

가 마주보며 부착되는 Y-형이 일반적이다. 이러한 기판의 반복적인 상하 운동을 통해 여러 층의 유기물 단분자층이 부착되며, nm 크기의 단분자층의 이전을 조절할 수 있기 때문에 이 기술을 무기물의 Molecular Beam Epitaxy(MBE)에 대응하여 유기물 MBE라고도 부른다. 이외에도 이전 형태는 기판을 담글 때만 이전되는 X-형, 뿔 때만 이전되는 Z-형이 있다. 하지만, 이러한 이상적인 형태를 얻는 경우는 거의 없고, XY-형과 같은 복잡한 형태의 막이 얻어 진다. 전통적인 LB막 제조 방법인 수직 부착법에 비하여 수평 부착법은 전자에 비하여 장치가 복잡하고 정밀성을 요구하지만, 막의 극성을 최대로 하는 막의 배열을 얻을 수 있으며, 수직 부착법으로는 막의 제조가 어려운 물질에 대해서도 좋은 이전상태를 보이는 것으로 알려져 있다[4,5].

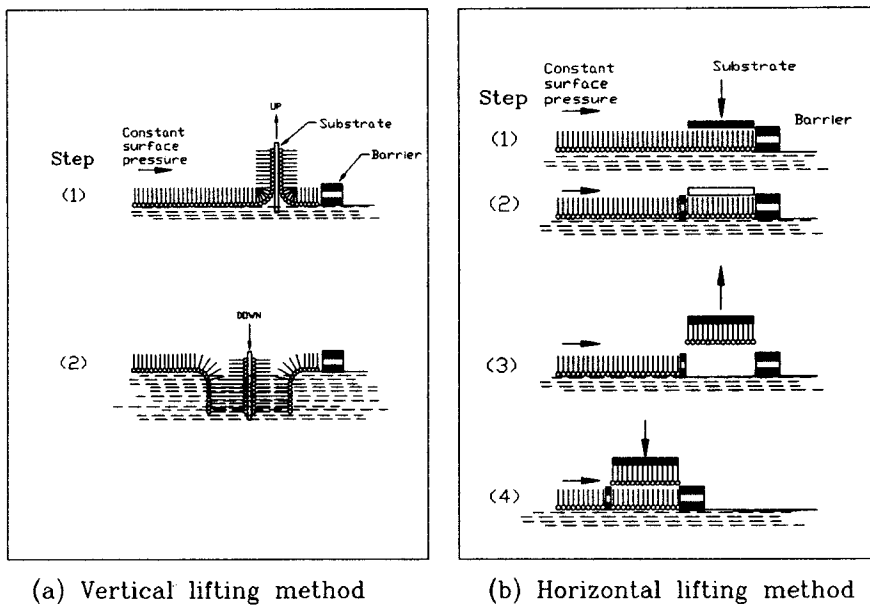


그림 10. LB막의 이전 방법.

LB막이 지니는 우수한 특성 중의 하나는 막의 구조를 분자 단위에서 조절할 수 있다는 데 있다. 즉, 감용막을 제작하는데 있어서 다양한 구조 및 기능성을 부여할 수 있기 때문에 선택성과 감도가 우수한 센서의 개발을 가능하게 해준다. 그림 11은 LB법에 의하여 제작할 수 있는 감용막 구조의 몇 가지 예를 나타낸 것이다.

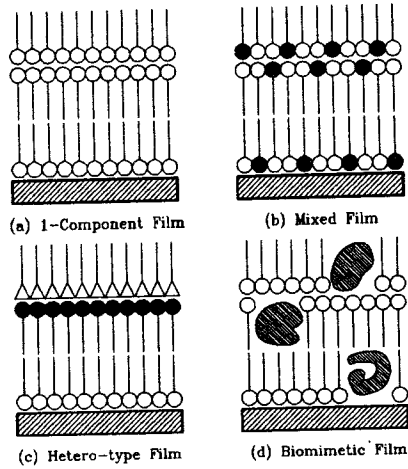


그림 11. LB법에 의한 분자 설계.

III. 센서 감응막으로의 응용

III-1. 화학 센서의 원리

센서의 기본 형태는 그림 12와 같다. 액상 또는 기상에 존재하는 대상 물질은 분자 선택 즉, 물질이 인식되어 반응 site에서 물리적 또는 화학적 변화를 일으킨다. 이러한 결과로 나타나는 반응물 또는 물리적 현상들은 변환기에 의해 전기적 또는 광학적 신호로 바뀌고, 이 신호를 처리함으로써 측정 결과를 얻게 된다. 여기서 감응막으로서의 LB막은 B와 C 부분의 역할을 하게 된다[9]. 이와같은 화학 센서는 측정 대상이 무엇인가에 따라 또는 변환기의 종류에 따라 분류된다. 표 2는 이러한 화학센서를 분류한 것이다.

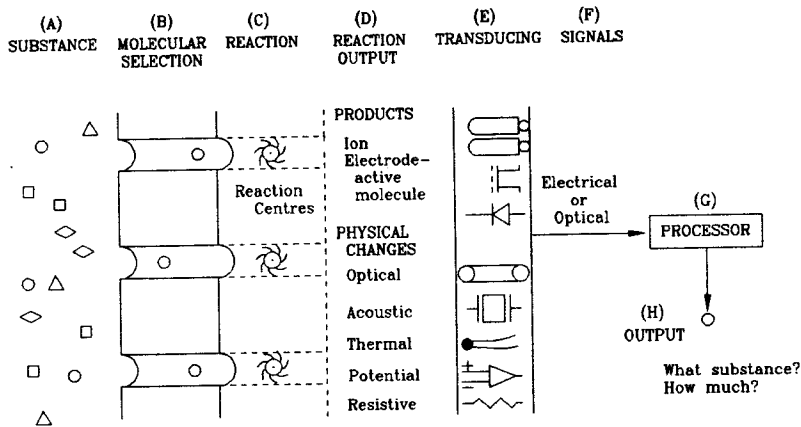


그림 12. 화학 센서의 기본 구조.

표 2. 화학 센서의 분류.

<i>Species detected</i>	<i>Sensors based on the following transducers</i>						
	<i>Electrochemical devices (electrochemical reaction, interface potential)</i>			<i>Resistors (resistance modulation)</i>	<i>Optical devices (adsorption, refractive index, scattering)</i>	<i>Acoustic devices (mass loading, elasticity, viscosity)</i>	
	<i>Potentiometric electrodes</i>	<i>FETs</i>	<i>Amperometric electrodes</i>		<i>Fibre, optoelectronics, surface plasma resonance and other devices</i>	<i>Quartz oscillators</i>	<i>SAW devices</i>
Gas molecules	Oxygen electrodes	Pd FETs Suspended gate FETs (SGFETs)	Oxygen electrodes	Chemiresistors (NO _x , Cl ₂ , NH ₃ , SO ₂ , DMMP)	Optical fibre oxygen sensors NH ₃ sensors	Humidity, Hg, NH ₃ , and H ₂ S sensors BLMs	NO ₂ , H ₂ S, and H ₂ sensor
Ions	BLMs	pH ion-sensitive FETs (ISFETs)			Optical fibre pH sensors		
Organic molecules in a liquid	<i>Enzyme sensors</i>						
		ENFETs	Glucose sensors	Enzyme thermistors	Biophotodiodes (enzyme-luminescence reaction)		Enzyme ultrasonic sensors
	<i>Immunosensors</i>						
	Immuno-electrodes BLMs	Immuno-FETs (IMFETs)			SPR immunodetectors Luminescent immunosensors	Immuno-Oscillators	Immuno-SAW devices
	<i>Others</i>						
	BLM/agar devices				Multichemical sensors	Taste or odour sensors	

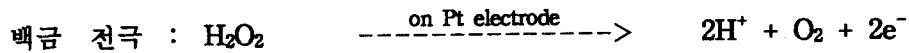
III-2. 특 성

표 2에 열거된 바와같이 LB막을 이용하여 감응막을 제조함으로써 화학 센서에 폭넓게 이용될 수 있다[10]. 이들 가운데 여기서는 전기화학 센서와 압전 소자를 이용한 센서를 예로 들어 설명해 보기로 하겠다.

III-2-1. 전기화학 센서

전기화학을 이용하는 센서는 크게 정전위 분해형과 Galvano 전지형으로 구분된다. 여기서 정전위 분해형은 전해질 수용액에 3개의 전극(working, reference, counter electrode)을 사용하여 working과 reference 전극 사이에 일정한 전압차를 유지한 상태에서 물질 및 농도에 따른 전류량을 working과 counter 전극으로 측정하는 방법이다. 이때 감응막은 측정 대

상에 따라 working 전극 위에 설계된다. 그림 13은 LB막을 이용하여 제작한 glucose 센서의 한 예로, 감응막과 백금 전극에서의 반응은 다음과 같다[11].



여기서 감응막은 GOD(Glucose Oxidase)를 삽입시킨 지질 LB막과, polypyrrole과 GOD의 혼합막으로 이루어져 있다. LB막의 역할은 반응 site를 제공하며, 액상으로의 효소 누출을 방지해 준다. Polypyrrole 혼합막에 있는 GOD_{ox}는 LB막의 GOD_{red}로부터 전자를 전달 받음으로써 LB막의 환원된 GOD를 산화시켜 활성을 유지시켜 주는 역할을 하며, polypyrrole은 이러한 전자의 흐름을 원활하게 해 준다.

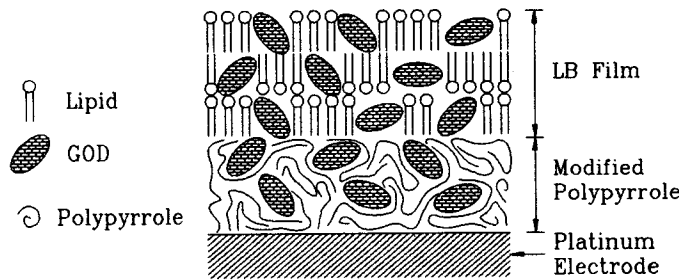


그림 13. LB막을 이용한 glucose 센서의 전극 구조.

III-2-2. 압전 소자를 이용한 BAW 센서

BAW(Bulk Acoustic Wave) 센서인 수정 진동자는 전기적 수단에 의해 쉽게 발현되며, 정확한 발진 주파수를 얻을 수 있다[12]. 진동자는 전기적으로 측정할 수 있는 공진 주파수를 보이며, 결정의 절단 조건에 의해 기본 파형이 결정된다. 질량에 가장 민감한 thickness shear mode에서 작동되는 AT-cut 수정의 발진 주파수(f_0)는 결정의 두께(d)에 반비례한다.

$$f_0 = N/d \quad (2)$$

여기서 N 은 주파수 상수로, AT-cut 수정의 경우에는 상온에서 $0.168 \text{ MHz} \cdot \text{cm}$ 의 값을 갖는다. 결정의 질량은 $m = \rho \cdot d \cdot A$ (ρ ; 결정의 밀도, 2.65 g/cm^3 for AT-cut quartz, A ; 결정의 단면적)이므로, 발진 주파수가 결정의 질량에 반비례함을 보여 준다. 이러한 관계로부터 Sauerbrey[13]는 다음과 같은 질량 변화와 주파수 변화와의 관계를 유도하였다.

$$\Delta f = -f_0 \frac{\Delta m}{m} \quad (3)$$

식 (3)은 BAW를 이용한 화학 센서에 대한 물리적 기초가 된다. 여기서 Δm 은 감지대상 물질과의 상호작용에 의한 감지층의 질량 증가를 의미하며, AT-cut 수정의 경우에

$$\Delta f = -2.3 \times 10^6 f_0^2 \Delta m/A \quad (4)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 Δf , f_0 , Δm , A 의 단위는 각각 [Hz], [MHz], [g], [cm^2]이다. 따라서 f_0 가 9 MHz인 경우에 $\Delta f = 1$ Hz는 5.37 ng/cm^2 에 해당된다.

그림 14는 이러한 원리를 기초로 한 BAW 센서를 개략적으로 나타낸 것이다. 즉, 감지하고자 하는 대상 물질이 감응막에 부가됨으로써 발생하는 질량 변화를 수정 진동자의 주파수 변화로 측정함으로써 센서로서의 기능을 하게 된다.

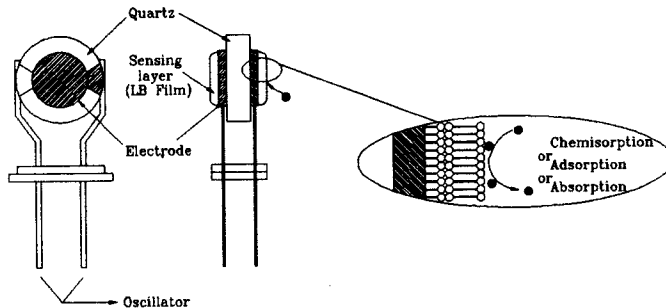


그림 14. 수정 진동자를 이용한 화학 센서.

IV. 결 언

이상에서 화학 센서의 감응막으로서 계면활성 물질의 이용 가능성에 대해 살펴보았다. 이러한 응용은 LB법이라는 분자설계 기법의 우수한 특성을 활용할 수 있기 때문에 선택성과 감도면에서 우수한 센서를 제작할 수 있다. 하지만, 화학센서의 개발에 있어서 중요한 문제점은 센서의 감도 및 선택성의 유지가 어렵다는 것이다. 즉, 앞서서도 언급한 바 있지만, 화학센서는 환경과 직접 접촉하기 때문에 감응막의 파손에 따른 영향을 무시할 수 없고, 따라서 시간에 따른 성능 저하 및 신뢰도가 문제가 된다. 그러나 이러한 문제는 LB법에 국한되어 발생하는 문제가 아니라 모든 유기박막 제조법에 의한 센서 개발에 있어서 동일하게 발생하는 문제이므로, 이러한 문제를 해결하는 것이 센서 개발에 있어서 매우 중요하다. 따라서 이러한 문제를 해결할 수 있는 다양한 LB막 형성 물질의 개발이 요구된다. 이와같은 신물질의 개발에 대한 연구는 계면활성 물질을 센서의 감응막으로 응용하는데 있어서 매우

중요한 과제이다. 특히 우수한 선택성과 감도를 지닌 센서의 개발은 식품의 품질관리, 발효 공정의 조절과 같은 화학 공정의 조절, 공장의 배기가스 및 폐수 측정 등의 환경 관리에의 응용뿐만 아니라 물리화학 반응의 추정 등의 기초연구에 이르기까지 광범위한 응용 잠재력을 지니고 있기 때문에 이 분야는 무한한 가능성을 지니고 있다.

V. 참고 문헌

1. D.Myers, "*Surfactant Science and Technology*", VCH Publishers, New York, 1988.
2. G.L.Gaines, "*Insoluble Monolayers at Liquid-Gas Interface*", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1966.
3. 矢部 明, 谷口 彬雄, 増原 宏, 松田 宏雄, "有機超薄膜 入門", 培風館, 東京, 1989.
4. G.Roberts, "*Langmuir-Blodgett Films*", Plenum Press, New York, 1990.
5. A.Ulman, "*An Introduction to Ultrathin Organic Films : From Langmuir-Blodgett to Self-Assembly*", Academic Press, Inc., New York, 1991.
6. K.-J.Lee and J.-D.Kim, *Macromolecular Reports*, A30, 101(1993).
7. J.T.Davies and E.K.Rideal, "*Interfacial Phenamena*", 2nd ed., Academic Press, New York, 1963.
8. A.W.Adamson, "*Physical Chemistry of Surfaces*", 5th ed., John & Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
9. T.Moriizumi, *Thin Solid Films*, 160, 413(1988).
10. W.M.Reichert, C.J.Bruckner and J.Joseph, *Thin Solid Films*, 152, 345(1987).
11. J.R.Li, M.Cai, T.F.Chen and L.Jiang, *Thin Solid Films*, 180, 205(1989).
12. W.Gopel, J.Hesse and J.N.Zemel(eds.), "*Sensors*", vol. 2, VCH Publishers, Weinheim, 1991.
13. G.Sauerbrey, *Z.Phys.*, 155, 206(1959).