

QCA를 이용한 유기 박막의 전기적 해석과 유기가스 반응특성



신 훈 규

(동아대 항만관리연구센터 연구전담 교수)



권 영 수

(동아대 전기전자컴퓨터공학부 교수)

1. 압전효과와 QCM

압전효과는 1880년경 Curie[1] 형제에 의해서 최초로 관찰되었다. 압전효과란 수정 결정에 압력을 가하면 변형된 표면에 전위가 유발되는 것을 말하며, 이러한 것을 1차압전효과라 한다. 역으로 전계를 인가하면 물리적인 변위, 즉 기계적인 변형을 유발한다. 이러한 효과를 2차 압전효과라 한다. 수정진동자에 일정한 주파수를 가진 RF(Radio -Frequency) 전압을 인가하면 1차압전효과와 2차압전효과가 반복적으로 발생하면서 일정주파수를 가진 체적탄성파(Bulk Acoustic Wave)로 변화된다. 체적탄성파를 발생시키기 위한 기관으로는 자연 혹은 합성 단결정 수정을 얇게 자른 것을 사용한다. 이러한 체적탄성파의 발진 특성은 광학적인 축을 중심으로 절단하는 각도에 따라서 다르며, 응용되는 분야 또한 다양하다. 표 3에는 서로 다른 수정결정의 절단면들에 대한 센서의 응용분야를 나타내고 있다[2].

압전효과를 이용한 센서는 광학적인 결정축을 중심으로 일정한 방향으로 잘리어진 수정편위에 전극을 입히고 일정한 주기를 가진 RF(Radio Frequency)전압을 인가함으로써 고주파수로 발진할 수 있다. 발진 주파수특성과 기관위에 누적된 질량과의 상관관계를 이용해서 고감도의 질량감지소자로 사용되고 있으며, 흔히 수정진동자(QCM, Quart crystal

표 1. Sensor application for different quartz crystal cuts.

Crystal cuts		X	X	Y	AT,BT	AC,LC	ST
		longitudinal	transverse	shear	thickness shear	thickness shear	surface
Ultrasonic transmitter/receiver		○	○	○			
Temperature sensor						○	○
Mechanical sensor	force	○	○	○			○
	pressure	○	○				○
	torque			○			○
	acceleration	○	○				
Thickness monitoring					○		○
Chemical Sensor	gases				○		○
	vapours				○		○
	liquids				○		
	particles				○		

microbalance)라 불리어 진다. 특히 현재 널리 사용되고 있는 AT-cut 수정진동자의 경우는 결정축에 대해서 35.15(°)로 절단된 것이다. 결정축에 대한 수정판의 절단된 각도의 차이는 공진주파수를 변화시키지는 않지만 민감한 온도 특성을

가지고 있다. 화학센서와 같은 많은 응용분야에 있어서 온도 에 따른 수정진동자의 공진주파수에 대한 온도의존성은 매우 중요한 요소이다. AT-cut 수정진동자에 대해서는 0(℃)에서 40(℃)까지 안정된 공진주파수 영역을 나타내고 있으며, 그러한 특성은 실온영역에서 응용되는 여러 가지의 화학센서 혹은 가스센서에 있어서 매우 중요하며, 유용한 특성이다[3].

채적탄성파의 속도와 공진주파수는 압전성물질의 표면에 누적된 물질의 질량 부하효과(mess loading effect)를 포함해서 여러 가지의 파라미터에 의해서 영향을 받는다. 압전효과에 의해서 발생한 채적탄성파의 공진주파수 변화와 수정진동자위에 누적된 물질의 질량사이의 상호 관계는 Sauerbrey[4]에 의해서 최초로 실험적으로 유도되었다. 채적탄성파를 이용한 화학센서는 1960년대 King[5] 등에 의해서 수정진동자위에 선택성이 있는 기능성막을 입혀서 가스센서로서 활용함으로써 최초로 보고되었으며, 현재까지도 채적탄성파가 가진 간단한 발전특성, 제작의 간편성과 상업성 등의 잇점으로 인해서 수정진동자를 이용한 가스센서 및 화학센서에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 최근에는 전기-기계 동가변환에 의해서 수정진동자위에 누적된 점탄성을 가지는 유기박막의 점성 변화를 측정할 수 있게 됨으로서 그의 응용범위가 확대될 것으로 기대되고 있다.

2. 수정 진동자의 발전

QCM의 동작원리[6]는 그림 1에서와 같은 이상적인 수정편에 의해서 유도될 수 있다. 즉, 두께 방향에서 진동하는 QCM에 대해서는 다음 식을 만족한다.

$$t_q \lambda_q / 2 \quad (1)$$

여기서 t_q 는 수정편의 두께이고 λ_q 는 두께방향의 탄성파의 파장이다.

수정편의 양면에 부착된 전극의 영향은 이러한 모드에서 무시한다. 발전 주파수에서 f_0 와 두께방향의 속도, v_q 는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_0 t_q = v_q / 2 \quad (2)$$

이다. 식 (2)로부터 두께 변화 $v_q = \lambda_q f_0$ 에 의해서 유발된 발전주파수의 변화, dt_q 는 다음과 같이 된다.

$$df_0 / f_0 = -dt_q / t_q \quad (3)$$

식 (3)은 수정의 질량, m_q 와 질량변화, dm_q 에 의해서 표현될 수 있다.

$$df_0 / f_0 = -dm_q / m_q \quad (4)$$

Sauerbrey는 미소한 질량 증가에 대해서 이러한 질량 증가는 수정자신의 질량증가와 같이 취급할 수 있다고 가정하였다. 따라서 식 (4)는 다음과 같이 된다.

$$df_0 / f_0 = -dm / m_q \quad (5)$$

여기서 dm 은 수정의 표면에 균일하게 분포된 질량부하이다. 만약 박막과 같은 질량부하, Δm 에 대해서 적용한다면 식 (5)는 다음과 같은 근사식으로 나타낼 것이다.

$$(f - f_0) / f_0 = \Delta f / f_0 = -\Delta m / m_q \quad (6)$$

여기서 f 는 질량부하를 가지는 수정의 발전 주파수이다. $f - f_0$ 는 공진주파수의 변화 Δf 로 표시할 수 있다. 수정의 질량변화, m_q 는 $A t_q$ 이며, 여기서 ρ_q 는 밀도이다. A 는 면적이며, 식 (2)로부터 다음식과 같이 된다.

$$\Delta f = -\Delta m f_0 / \rho_q A t_q = -(2f_0^2 / \nu_q \rho_q) \Delta m / A \quad (7)$$

여기서 $2f_0^2 / \nu_q \rho_q$ 는 QCM의 calibration 상수 혹은 질량 감도로서 정의된다.

기본 발전주파수가 9(MHz)인 AT-cut 수정진동자의 경우, 밀도 ρ_q 는 2650(kg/m³)이고, 속도 ν_q 는 1670(m/s), 직경이 5(mm)인 전극을 사용할 경우는 식(7)에 의해서 다음과 같이 변환된다.

$$\Delta F = -0.95 \times 10^9 \cdot \Delta m \quad (8)$$

즉, 약 1(ng)의 질량 변화에 의해서 1(Hz)의 공진주파수가 감소하게 됨으로서 수정진동자의 표면 위에 흡착된 질량을 nano gram 정도로 정밀하게 감지할 수 있다.

그림 2는 25(℃)에서의 분자량이 서로 다른 유기가스에 대한 수정진동자의 공진주파수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 LB막을 누적하지 않은 경우이고, 그림 2(b)는 LB막을 10층 누적한 수정진동자의 공진주파수 변화를 나타낸 것이다. 그림 2(a)와 그림 2(b)에서 알 수 있듯이, 분자량이 큰 유기가스에 대하여 공진주파수 변화가 크게 나타났으며, LB막을 10층 누적한 경우가 LB막을 누적하지 않은 경우보다 각 유기가스에 대해서 약 2~3배 공진주파수 변화가 크게 나타났다. 이것은 동일한 면적의 LB막이 누적된 수정진동자에 분자량이 서로 다른 유기가스가 흡착될 때, 분자량이 큰 유기가스가 분자량이 작은 유기가스보다 질량 부하 효과가 크기 때문에 수정

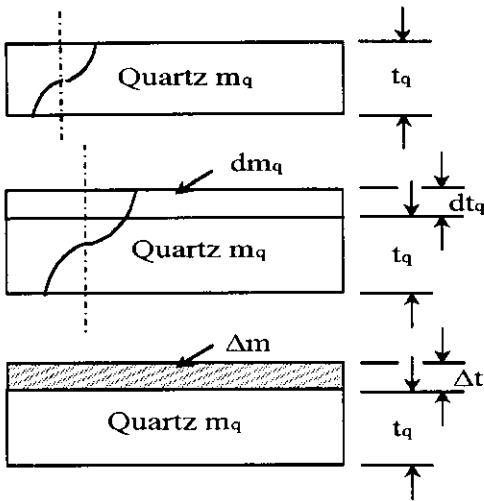
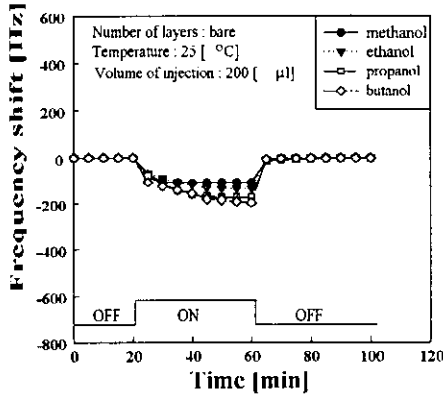
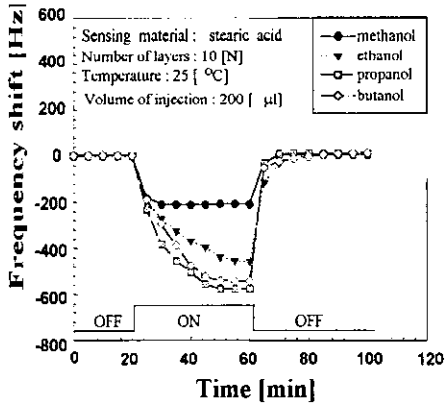


그림 1. 단순화된 수정진동자의 진동모델.



(a)



(b)

그림 2. 25(°C)에서 유기가스에 대한 수정진동자의 공진주파수 변화 (a) bare (b) quartz crystal coated with LB films

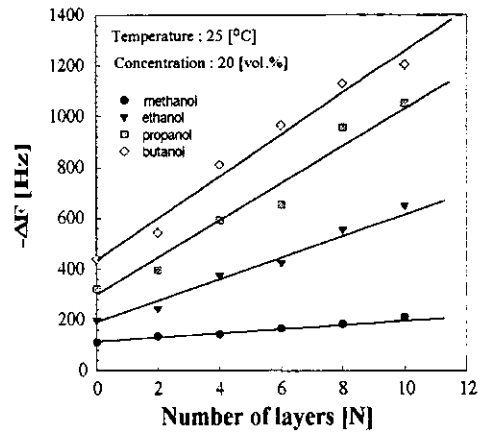


그림 3. 25(°C)에서 동일 농도의 유기가스에 대한 수정진동자의 공진주파수 변화.

진동자의 공진주파수가 크게 변화된다. 그리고, LB막을 10층 누적한 경우는 LB막을 누적하지 않은 경우보다 공진주파수 변화가 크게 나타났으며 이는 가스분자와 LB막의 상호작용 흡착될 수 있는 면적의 증가등에 의해서 설명될 수 있다.

또한, 그림 2(b)에서 분자량이 상대적으로 큰 1-부탄올 가스보다 분자량이 상대적으로 작은 1-프로판올 가스에 대한 공진주파수의 변화가 크게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 동일한 양의 유기가스 주입량이지만, 반응셀 내부의 가스의 농도가 다르기 때문인 것으로 생각된다. 본 연구에 사용된 유기가스가 이상기체라고 가정한다면, 25(°C)에서의 반응셀 내부의 1-부탄올 가스와 1-프로판올 가스의 농도는 각각 9(vol.%)와 11(vol.%)이다.

따라서, 유기가스의 농도를 20(vol.%)로 동일하게 하였을 때, 누적층수의 증가에 대한 공진주파수의 변화를 각 유기가스의 종류에 따라 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 동일한 농도의 유기가스에 대한 공진주파수의 변화는 LB막의 누적층수가 증가할수록, 분자량이 큰 유기가스에 대하여 공진주파수의 변화가 크게 나타났다.

3. QCM의 등가회로 변환과 임피던스해석

수정진동자에 대한 기계적인 진동모델과 전기적인 등가회로는 널리 알려진 사실이다[7]. 수정진동자의 전기적인 등가회로와 기계적인 모델을 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 (a)에 나타난 수정진동자의 기계적인 모델에 대한 상태 방정식은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + \frac{1}{C_m} x = F \quad (9)$$

여기서 x 는 변위이고, m 은 질량, r 은 점성계수, C_m 은 컵플라이언스이다.

또한, 그림 4의 (b)에는 AT-cut 수정진동자의 전기적인 동가회로를 나타내었으며, 상태방정식은 R_1, L_1, C_1 직렬회로의 방정식과 같이 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$m \frac{d^2 q}{dt^2} + R_1 \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C_1} q = V \quad (10)$$

여기서 q 는 전하를 나타내며, V 는 인가전압이다. 이와같이 수정진동자의 기계적인 모델이 전기·기계결합계수 k 에 의해서 전기적인 동가회로로 변환될 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서 식 (9)와 (10)의 비교에 의해서 다음과 같은 전기·기계계수사이에 다음과 같은 상호관계를 얻었다.

$$\begin{aligned} L_1 &= m/k^2 \\ C_1 &= C_m k^2 \\ R_1 &= r/k^2 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 전기적인 회로의 인덕턴스는 기계적인 모델에 있어서 질량출작, 저항과 점성계수, 컵패시턴스와 컵플라이언스가 상호관계가 있음을 나타낸다.

QCM의 전기적 동가회로에 대한 상태방정식은 식 (12)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Y &= \frac{1}{(R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1)} + j\omega C_0 \\ &= \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L_1 - 1/\omega C_1)^2} \\ &\quad + j\left(\omega C_0 - \frac{\omega L_1 - 1/\omega C_1}{R_1^2 + (\omega L_1 - 1/\omega C_1)^2}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

그림 4(b)의 전기적 동가회로에서 수정진동자의 어드미턴스는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 그리고, 식 (12)을 풀이하여 정리하면, 어드미턴스는 실수부인 콘덕턴스 G 와 허수부인 서셉턴스 B 로 구분할 수 있다. 식 (13)은 콘덕턴스 G 를 나타내며, 식 (14)는 서셉턴스 B 를 나타낸다.

$$G = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})^2} \quad (14)$$

$$B = \omega C_0 - \frac{(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})}{R_1^2 + (\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})^2} \quad (15)$$

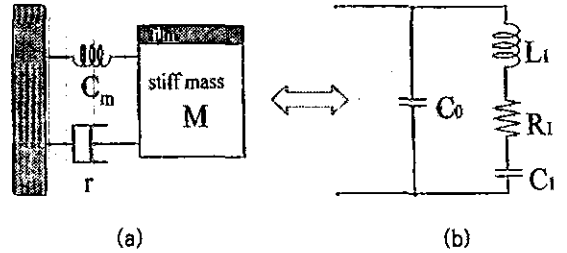


그림 4. 수정진동자의 기계적 모델 (a)과 전기적 동가회로 (b)

직렬회로에서의 공진조건인 식 (16)을 식(14)와 (15)에 대입하면, 식 (17)와 (18)이 된다.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (16)$$

$$G - \frac{1}{2R_1} = \frac{1}{2R_1} \quad (17)$$

$$B - \omega C_0 = 0 \quad (18)$$

그림 4의 동가회로에 대한 콘덕턴스 G 와 서셉턴스 B 의 상호관계식은 식 (19)와 같다.

$$\left(G - \frac{1}{2R_1}\right)^2 + (B - \omega C_0)^2 = \left(\frac{1}{2R_1}\right)^2 \quad (19)$$

식 (19)는 중심이 $(1/2R_1, \omega C_0)$ 이고, 반경이 $1/2R_1$ 인 원을 나타내고 있다. 이것을 어드미턴스 다이어그램(B-G diagram)이라고 한다[8]. 이것은 주파수 변화에 대한 도전율과 감수율의 변화를 나타낸 것이며, 그림 5에 일반적인 B-G 다이어그램을 나타내었다. 식 (19)에서 원의 직경은 직렬 공진에서의 저항의 역수에 해당된다. 수정진동자의 표면에 LB막을 누적했을 때, 어드미턴스 다이어그램의 직렬 공진에서의 저항 R_1 과 주파수 f_s 의 변화 때문에 발생하는 원의 직경의 변화를 통해 LB 막의 누적특성을 조사할 수 있다(9).

한편, 주파수의 변화에 대한 임피던스와 임피던스의 저항성분과 리액턴스 성분이 이루는 위상각의 변화를 나타낸 것이 $Z-\theta$ 플롯이다. 임피던스 Z 와 위상각 θ 는 전기적 동가회로의 어드미턴스 값에 역수를 취한 것으로 식 (20) 및 식 (21)로 각각 표시할 수 있다. LB막의 누적특성을 평가하기 위해 수정진동자 표면에 LB막의 누적층수를 다르게 할 경우, 병렬 공진일 때의 주파수 f_p 와 그 때의 임피던스 Z_p 의 변화를 나타내는 $Z-\theta$ 플롯을 이용하였다[10].

$$Z = R + jX = \frac{1}{G + jB}$$

$$= \frac{G}{G^2 + B^2} + j \frac{-B}{G^2 + B^2} \quad (20)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) \quad (21)$$

본 논문에서는 수정진동자의 전기적 등가회로에서 주파수의 변화에 대한 직·병렬 임피던스의 값의 변화를 수식적으로 정의하였다. 식 (22)와 식 (23)은 직렬 공진에서의 임피던스 $|Z_s|$ 와 위상각 θ 를 각각 나타낸다.

$$|Z_s| = \frac{R_1}{\sqrt{1 + (\omega C_0 R_1)^2}} \quad (22)$$

$$\theta = \tan^{-1}(-\omega C_0 R_1) \quad (23)$$

식 (22)와 식 (23)은 식 (24)와 같이 간단하게 된다.

$$\therefore |Z_s| = R_1, \theta = 0^\circ \quad (24)$$

또한, 병렬 공진 임피던스 Z_p 와 위상각 θ 를 나타낸 것이 식 (25)이다.

$$|Z_p| = \frac{1}{(\omega C_0)^2 R_1}, \theta = 0^\circ \quad (25)$$

직·병렬 임피던스와 위상각 θ 에 대한 식 (22)와 식 (23)에서 볼 수 있듯이, 직·병렬 공진일 때의 위상각은 0이고, 직렬 공진에서의 임피던스 Z_s 의 값이 증가할수록 병렬 임피던스 Z_p 의 값이 감소함을 알 수 있다[11].

그림 6에 strearic acid LB막을 누적한 층수에 따라서 조사한 수정진동자의 전기적인 파라미터를 나타내었다. 실험결과, strearic acid LB막의 누적 층수가 증가할수록 누적된 질량만큼 공진주파수가 감소하였다. B-G 다이어그램에서 원의 직경이 감소함으로써 R_1 값이 증가함을 알 수 있다. 이러한 사실을 통하여 누적된 LB막은 저항으로서 작용을 하는 것으로 생각할 수 있다.

그림 7은 알킬체인의 길이가 다른 각각의 지방산을 LB법으로 누적하여 공진주파수와 저항의 변화값을 조사한 것이다. 공진주파수의 변화가 선형적으로 감소하고 있으므로 누적이 일정하게 되고 있음을 알 수 있다. 각 지방산 LB막의 누적에 따른

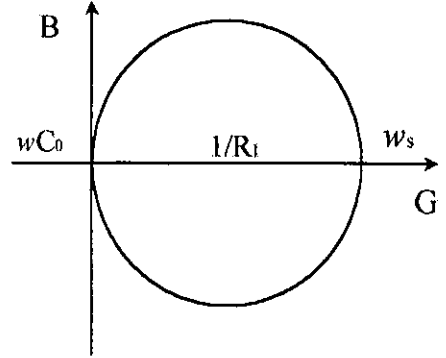
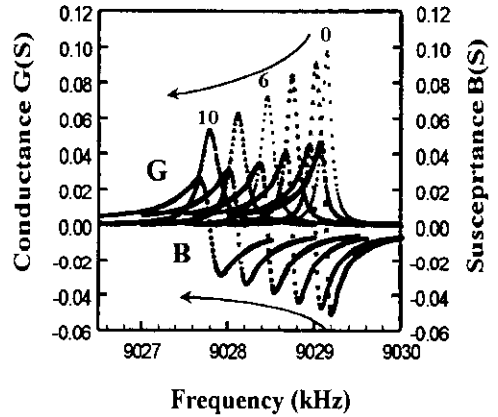
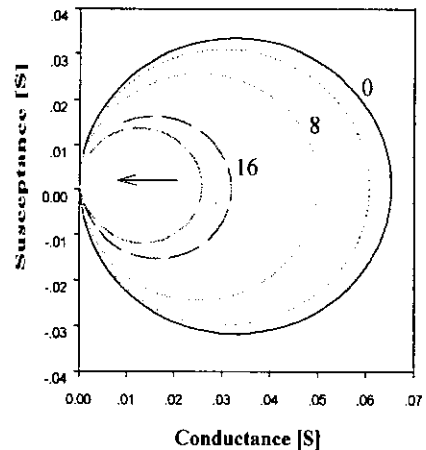


그림 5. QCM의 전기적 등가회로 해석을 위한 B-G Diagram.



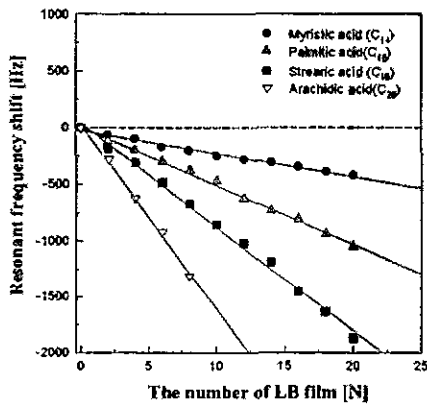
(a)



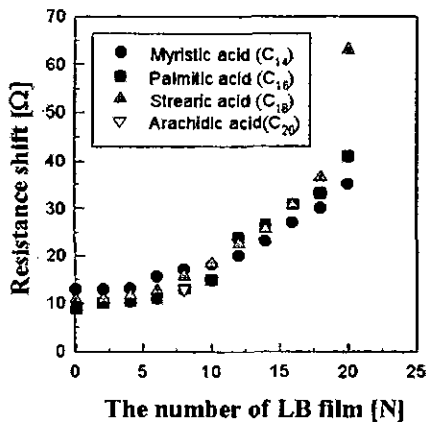
(b)

그림 6. LB막의 누적층수에 따른 공진주파수(a)와 등가 저항의 변화(b)

공진주파수의 감소는 선형성을 나타내고 있으며, 기울기는 지방산의 알킬 chain의 길이가 길어짐에 따라서 증가하고 있다. 즉, 누적되는 지방산 LB막의 분자량이 증가함으로써 공진주파수의 변화가 커지는 것을 나타내었다. 누적층수가 증가함에 따라서 저항이 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. chain 길이에 대한 상관관계는 얻을 수 없었으며, 지방산 LB막의 종류와 무관하게 유사한 형태를 나타내었다. 따라서 지방산 LB막의 누적에 의한 저항의 변화는 분자량이 아니라 LB막의 packing 상태, 점탄성과 같은 다른 조건에 의존한다고 할 수 있다. 그림 8은 impedance analyzer를 이용하여 직렬 공진주파수의 변화 (Δf_s)와 그 때의 임피던스의 변화 (ΔZ_s)를 조사하여 나타낸 것이다. 그림 8에서 볼 수 있듯이, 1층의 LB막이 수정진동자의 표면에 누적됨에 따라 직렬 공진주파수는 약 100 Hz 감소되었다. 즉, 누적층수가 증가할수록 직렬 공진주파수 f_s 는 선형적으로 감소하여 질량변화와 주파수 변화와의 상호관계를 나



(a)



(b)

그림 7. LB막의 누적층수에 따른 공진주파수의 변화(a)와 동가저항의 변화(b)

타내는 Sauerbrey의 이론식을 만족하였다(4). 또한, 그 때의 임피던스 Z_s 는 증가를 하고 있다. 이것은 그림 6의 어드미탄스 다이어그램에서 누적층수가 증가할수록 원의 반경이 감소하는 것과 일치하는 결과이며, 누적층수가 증가할수록 누적물질의 점성과 밀도가 변화하여 저항 R_1 이 변화하는 상호관계식과 일치하는 결과이다(12). 따라서, stearic acid LB막이 수정진동자의 표면에 누적이 되었을 때, 누적층수가 증가함에 따라 누적물질의 점성과 밀도가 증가함을 알 수 있었고, 이 결과는 stearic acid LB막이 점탄성막인 것을 의미하는 것이다.

그림 9는 누적층수가 증가할 때의 병렬 공진주파수 f_p 와 그 때의 임피던스 Z_p 의 변화를 확인하였다. 즉, 누적층수가 증가할수록 병렬 공진주파수 f_p 는 누적된 LB막의 질량에 반비례하여 변화하였다. 이 주파수의 감소는 직렬 공진주파수 f_s 의 변화와 거의 일치하였으며, Sauerbrey의 공식을 만족하였다. 또한, 병렬 공진임피던스 Z_p 는 누적층수가 증가할수록 감소하였다. 즉, 누적층수가 증가할수록 LB막의 밀도와 점성이 증가하기 때문에 저항 R_1 이 증가한다. 병렬 공진임피던스 Z_p 는 누적층수가 증가할수록 저항 R_1 이 증가하기 때문에 감소함을 확인할 수 있었다.

그림 10은 일정한 주파수(9018.00 kHz)에서의 LB막의 누적층수에 대한 인덕턴스 L1과 커패시턴스 C1의 변화를 나타내었다. 그림 10에서 볼 수 있듯이, 누적층수가 증가할수록 수정진동자의 전채질량이 증가하기 때문에, 인덕턴스 L1은 비선형적으로 증가하였고, 커패시턴스 C1은 비선형적으로 감소하였다. 그림 11은 그림 10의 일정한 주파수(9018.00 kHz)에서 누적층수를 증가하였을 때, 인덕턴스 L1과 커패시턴스 C1의 측정값을 역으로 계산한 주파수의 변화이다. 그림 11의 결과는 누적층수에 관계없이 주파수가 거의 9018.00 kHz로서 일정하게 나타내고 있다. 이것은 stearic acid LB막이 균일하게 수정진동자의 표면에 누적이 되었음을 의미하는 것이다(13).

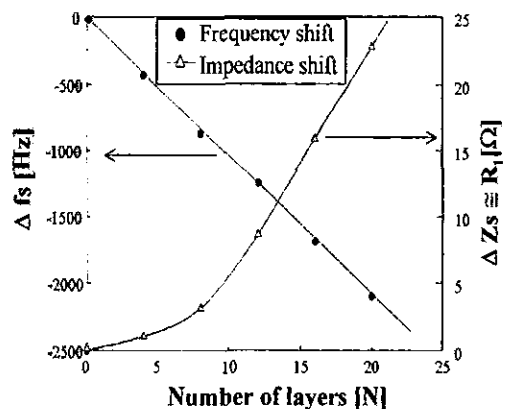


그림 8. 누적층수에 대한 직렬 공진주파수 (f_s)와 임피던스 (Z_s)

4. 결론

수정진동자 위에 누적된 유기박막의 기본 물성 및 질량변화를 발진 특성에 의하여 조사할 수 있다. 주파수에 따른 Conductance와 Susceptance의 변화를 측정함으로써, 지방산 LB막을 누적한 후 특성 변화의 확인이 가능하다. B-G Diagram을 이용하여 수정진동자의 공진특성을 전기적으로 해석할 수 있으며, 수정진동자위에 유기박막의 누적은 전기적인 저항의 변화로 확인 가능하다. 이러한 전기적인 저항은 기계적인 진동모델에서 점성의 변화에 상응하므로 전기적인 저항 측정을 통하여 물리적인 특성변화를 검출할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, chain 길이가 다른 4가지 지방산을 사용하여 공진주파수 및 저항의 변화를 조사한 결과, 변화가 발생하였으며, 이것은 공진주파수의 변화가 질량에 크게 의존함을 의미한다고 할 수 있다. 저항의 변화는 비선형적인 특성을 가지고 있으므로 수정진동자 표면의 유기박막의 정성적인 특성의 변화를 파라미터로부터 알 수 있다.

이상의 응용성을 고려해 볼 때, 수정진동자를 이용한 시스템은 미세한 특정물질의 변화를 감지할 수 있는 능력을 가지고 있기 때문에 향후 특정물질을 감지하는 센서로서의 응용이 기대된다.

참고문헌

- [1] Curie J. and Curie P., Bull. Soc. Min. Paris, 3, p.90, 1880.
- [2] W. G pel, "Ultimate limits in the miniaturization of chemical sensors", Sensors and Actuators A, 56, pp.83-102, 1996.
- [3] W. G pel, "New materials and transducers for chemical sensors", Sensors and Actuators B, 18-19, pp.1-21, 1994.
- [4] G. Sauerbrey, "The uses of a quartz crystal vibrator from weighting thin films on a microbalance", Z. Phys., 155, p.206, 1959.
- [5] W.H. King, "Analytical uses of the piezoelectric crystal", J. Anal. Chem., 36, pp. 145-169, 1964.
- [6] G. Sauerbrey, "The uses of a quartz crystal vibrator from weighting thin films on a microbalance", Z. Phys., 155, p.206, 1959.
- [7] H. Muramatsu, e. Tamiya and I. Karube, "Computation of Equivalent Circuit Parameters of Quartz Crystal in Contact with Liquids and Study of Liquid Properties", Anal. Chem., 60,

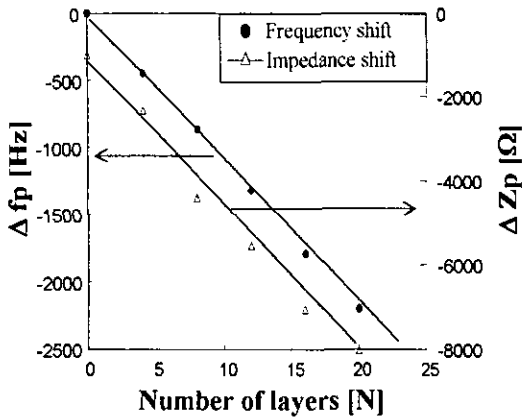


그림 9. 누적층수에 대한 병렬 공진주파수 (f_p)와 임피던스 (Z_p)

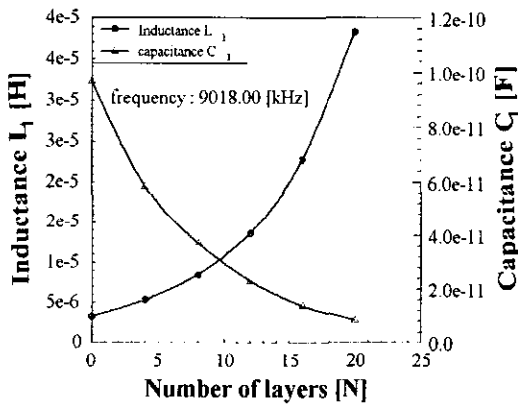


그림 10. 누적층수에 대한 인덕턴스 L_1 과 커패시턴스 C_1

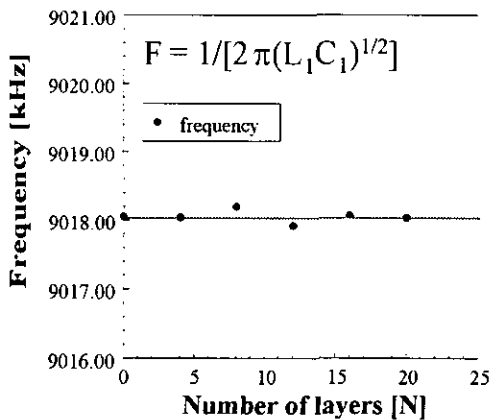


그림 11. 누적층수에 대한 계산된 인덕턴스 L_1 과 커패시턴스 C_1

pp.2142-2146, 1988.

- [8] H. Muramatsu et al. "Quartz Crystal Detector for Microrheological Study and its Application to Phase Transition Phenomena of Langmuir-Bolgett Films", Anal. Chem. 64, pp.2502-2507, 1992.
- [9] C. Lu and A.W. Czanderna. "Application of piezoelectric quartz crystal microbalances", Elsevier, Amsterdam, 1984
- [10] David M. Soares, "Impedance Analysis of the Quartz Crystal Microbalance Signal", Ber. Bunsenges. Phys. Chem., Vol.97, pp.475-478, 1993.
- [11] H. W. Kang, J. M. Jung, H. K. Shin and Y. S. Kwon, "Organic gas detection using resonant frequency shift and resonant resistance change of QCA", J. Korean Phys. Soc., Vol. 32, pp. S1750-S1752, 1998.
- [12] H. Muramatsu et al., "Viscosity monitoring with a piezoelectric quartz crystal and its application to determination of endotoxin by gelation of limulus ameocyte lysate", Anal. Chim. Acta, Vol.215, pp.91-98, 1988.
- [13] C.-N. Jin, H.-W. Kang, K.-K. Kim, Y.-S. Kwon, "The response of quartz crystals coated with thin fatty acid film to organic gases", J. Korean Phys. Soc., Vol. 35, pp. S433-435, 1999.

서 사 의 령

성명 : 신 훈 규

◆학역
 1995년 동아대 대학원 전기공학과(석사)
 1999년 동아대 대학원 전기공학과(박사)

◆경력
 1996년 일본전자기술총합연구소 객원연구원
 1997년-1999년 일본전자기술총연합연구소 객원연구원
 2001년-현재 동아대 항만관리연구센터 연구전담교수

성명 : 권 영 수

◆학역
 1976년 경북대 대학원 전기공학과(석사)
 1988년 일본 동경공업대학 전자물리학과 박사

◆경력
 1988년-현재 동아대 전기전자컴퓨터공학부 교수
 1998년-현재 동아대 지능형통합항만관리연구센터 소장
 2000년-현재 부산테크노파크 사업단장