

광량 측정을 통한 전자습윤 현상의 동작 특성 평가

박승룡 · 송석호[†] · 오차환 · 김필수

한양대학교 물리학과 마이크로광학 연구실
(우) 133-790 서울특별시 성동구 행당동 17번지

오병도

삼성전기 OS 사업부 ISM
(우) 442-743 경기도 수원시 영통구 매탄3동 314번지

정상국

Department of Mechanical Engineering, University of Pittsburgh

(2006년 6월 9일 받음, 2006년 8월 18일 수정본 받음)

전자습윤현상에 기초한 응용 기술들은 액체렌즈로 대표되는 광학분야에서부터, 바이오 칩 등의 생체분야까지 다양하지만, 아직 동적 특성에 대한 이해가 부족하고, 수 미리 초에 발생하는 현상을 측정하는 방법도 매우 제한적이다. 전기 습윤의 동적인 현상을 측정, 평가하기 위해서는 전압 인가 후 빠르게 움직이는 계면의 동적 현상이 계면의 정보를 표현할 수 있는 수치로 표현되어야 하며, 연속적인 측정이 가능해야 한다. 본 연구에서는 전자습윤 현상에 의한 액체 계면의 동적인 변화를 광량변화를 통해 실시간적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하였고, 실험을 통하여 제시된 방법의 정확도를 검증하였다. 제시된 광량변화 측정 방법은 장치가 단순하여 기존의 방법에 비해 고가의 장비 및 추가의 데이터 분석 기술이 필요치 않으면서도 연속적인 실시간 데이터를 얻을 수 있다.

주제어 : Electro-wetting, Real time measurement, Liquid lens.

I 서 론

전자습윤(electro-wetting)현상이란 절연막으로 분리된 도체와 전도성 액체 사이에 전압을 인가하면 액체의 접촉각이 변화되는 현상이다(그림 1). 전극(Metal electrode) 위에 절연막(Insulating layer)을 입히고 그 위에 전해액(Conductive liquid drop)을 위치시킨 후 금속판과 전해액 사이에 전압(V)을 인가하면 액체의 표면에 전하가 축적되면서 표면장력을 바꾸게 되고, 따라서 접촉각(θ)이 변하게 된다. 접촉각(θ)은 전해액의 경계면이 금속판과 이루는 각을 말하며 접촉각(θ)이 변함에 따라 그림 1에서와 같이 점선($V=0$) 모양의 곡면이 V 값이 증가함에 따라 실선 모양의 곡면과 같이 점차 바뀌게 된다. 즉, V 에 의해 θ 값이 변함에 따라 유체의 형상 또한 변하게 된다.

이러한 전자습윤현상은 가역적인(reversible) 현상이고 저전력으로 고속의 움직임을 일으킬 수 있으며 작은 양의 액적을 제어할 수 있기 때문에 미세물리학, 생명공학 등의 다양한 응용 분야에서 각광받고 있다. 특히 상대적으로 낮은 전력을 이용해 수 nL 단위의 액체를 빠르고 효율적 제어할 수 있기 때문에 미세유체구동을 이용한 가변초점렌즈, 엑츄에이

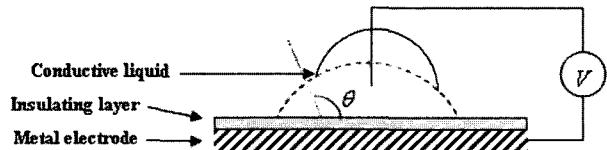


그림 1. 전자습윤현상 개략도.

터 등의 소자 개발에 크게 주목 받고 있다.^[1-3]

액체 계면의 전체 형상 또는 접촉각을 분석하기 위한 기술에는 영상분석을 이용하는 방법, 장력 측정법,^[4,5] 전기적 특성 측정법 등이 제시되었다. 영상을 분석하는 방법은 적절한 조명하에 고배율의 카메라를 이용해 접촉각 부분의 이미지를 얻어 분석함으로써 접촉각을 1° 미만의 정밀도로 측정할 수 있다.^[6,7] 전기적인 방법은 정지상태에서 전해액과 전극 사이의 전기용량을 측정하여 이를 접촉각으로 환산하는 방법이다.^[8,9] 이 방법은 전압 인가 후 시간에 따른 전류의 변화를 접촉각 변화로 환산해 접촉각에 대한 정보를 비교적 정확하게(<2°) 연속적으로 얻을 수 있다. 계면의 전체적인 형상을 분석하는 데는 영상분석방법이 주로 사용되고 있는데,^[10,11] 적절한 조명을 이용해 계면의 형상을 측면에서 촬영하여 이미지 처리를 통해 계면의 정보를 얻는 방법이다. 그 외에 계면에 수직으로 레이저 빔을 통과시킨 후 굴절된 파면

[†]E-mail: shsong@hanyang.ac.kr

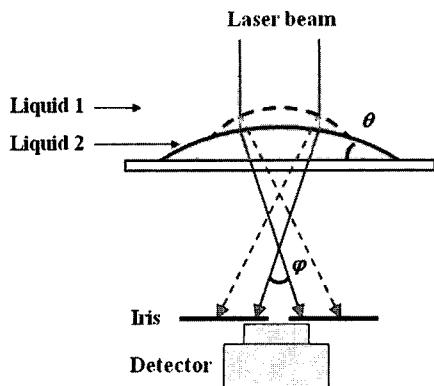


그림 2. 계면의 곡률반경 변화에 의한 광량의 변화 측정 개략도.

을 파면분석기를 이용하여 측정함으로써 계면의 형상을 관측하는 것도 가능하다. 이러한 방법들은 대부분 정지상태의 특성을 분석하기 위한 방법이며 고가의 장비와 데이터 분석 기술이 추가로 요구되어 연속적인 동작 특성을 분석하는 데는 어려움이 있다.

본 논문에서는 액체 계면에 레이저 빔을 투과시키고, 계면이 연속적으로 변화함에 따라 측정면에서 변화되는 레이저 빔의 광량 값을 측정하여 액체 계면의 곡률을 결정할 수 있는 새로운 방법을 제시한다. 그림 2를 통해 제안된 측정 방법의 원리를 간략히 설명하면 다음과 같다. 계면장력에 의해 곡면을 이루고 있고 굴절률이 다른 두 유체(Liquid 1, Liquid 2)의 계면은 일반적인 렌즈의 역할을 할 수 있다. 때문에 접촉각(θ) 변화에 의한 계면의 곡률반경 변화는 계면을 통과하는 빔(Laser beam)의 발산각(φ)을 변화시킨다. 이 경우 계면을 통과한 빔은 조리개(Iris)를 거쳐 검출기(Detector)에서 광량 변화를 가져오기 때문에 이를 계면의 정보로 환산하면 시간에 따른 계면의 변화를 연속적으로 측정하는 것이 가능하다.

II. 계면 형상 측정

2.1 계면의 특성

유체 계면의 형상을 결정하는 요소에는 접촉각(θ)과 계면장력(γ_{12}), 밀도차($\Delta\rho$)등이 있다. γ_{12} 는 두 유체와 절연층의 젖음성(wettability)에 의해 결정되며 계면의 형상은 라플라스 방정식과 유체 정역학에 의해 다음과 같이 결정된다.^[12]

$$\gamma_{12} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P \quad (1)$$

R_1, R_2 는 계면의 주곡률 반경으로 $R_1 = d\phi/ds$, $R_2 = \sin\phi/r$ 이고 ΔP 는 유체 계면의 수직방향 압력차이다. 그림 3은 유체계면에서의 R_1, R_2 의 정의와 단면의 좌표계를 보여준다.

이 좌표계를 각각 $X = r/R_0$, $Z = z/R_0$, $S = s/R_0$ 의 단위 없는 값으로 치환하면 식 (1)의 1차 방정식은 다음과 같은 해

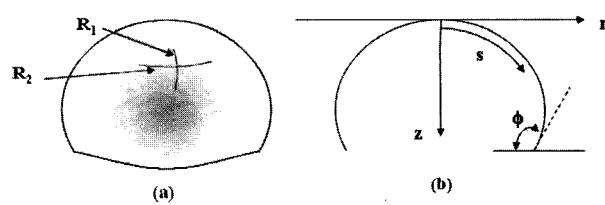
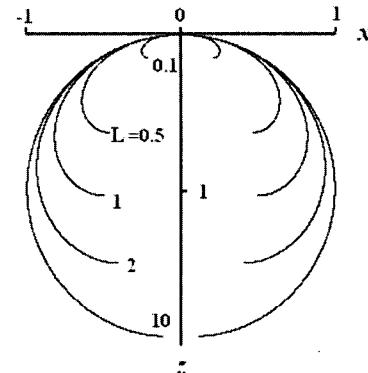


그림 3. 액체 계면 위에서 (a)곡률반경과 (b)계면 단면의 좌표계.

그림 4. 모세관 상수(L)의 변화에 따른 계면 형상의 변화 ($R_0=1$).

를 갖는다.^[13]

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{ds} = 2 + \frac{2R_0^2}{L^2}Z - \frac{\sin\phi}{X} \\ \frac{dX}{ds} = \cos\phi \\ \frac{dZ}{ds} = \sin\phi \end{cases} \quad (2)$$

여기서 L 는 $(2\gamma_{12}/\Delta\rho g)^{1/2}$ 로 정의되는 모세관 상수(capillary constant)^[14]이고, g 는 중력상수이다. 그림 4는 L 에 따라 변하는 계면의 형상을 전산모사한 결과이다. L 이 클 수록 계면의 형상은 구에 가까워지고 작을 수록 중력의 영향으로 구의 형상에서 벗어나게 된다.

전자슬윤현상에서 전압의 변화에 의해 생기는 접촉각의 변화 $\theta(V)$ 는 일반적으로 다음과 같은 식으로 표현된다.^[15]

$$\cos\theta(V) = \cos\theta_0 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0\varepsilon_1}{d\gamma_{12}} V^2 \quad (3)$$

$\theta_0 = \theta(V=0)$, ε_1 은 절연막의 유전상수, d 는 절연막의 두께이다. 따라서 접촉각의 변화는 계면 접촉부분에 모이는 전하에 의해 전기장 ($\sim V/d$)의 분포가 바뀌어 접촉각을 변화시키는 것으로 설명될 수 있다. 이때, 전기장이 주로 영향을 미치는 범위는 계면의 전체 넓이에 비해 절연체와의 접촉면근방의 매우 적은 범위이며, 그 밖의 계면은 γ_{12} 에 의해 자유에너지가 최소가 되는 형태로 모양을 형성하게 된다.^[16,17] 따라서, 전자슬윤에 의한 계면의 변화는 먼저 접촉각이 변하고

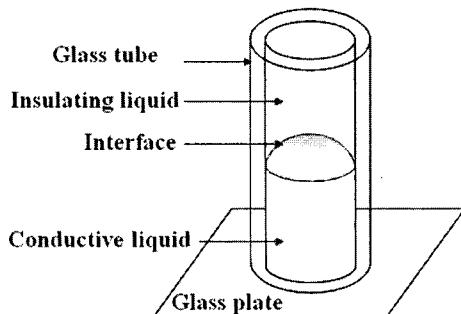


그림 5. 유리관을 이용한 액체 계면의 형상 관측 개략도.

이에 의해 계면의 전체 형상이 변하는 두 단계로 생각할 수 있으며, 각각의 변화는 시간적으로 차이가 생기게 된다. 그러므로 액체 계면의 동작특성을 정의하는 경우 시간에 따른 변화의 기준은 동작이 시작되는 부분인 접촉각 변화를 기준으로 정의하기 보다는 최종적으로 변화가 완료되는 계면의 형상을 기준으로 하는 것이 보다 타당하다.

2.2 계면의 정지상태 특성

전자습윤현상에 의해 발생되는 계면의 형상을 분석하기 위하여 본 연구에서는 그림 5와 같이 유리관(Glass tube) 내에 두 액체(Insulating liquid, Conductive liquid)를 넣어 측정하는 방법을 사용하였다. 이러한 구조는 그림 1, 그림 2의 구조와는 차이를 가지나, 수식 (1)~(3)의 관계는 일반적인 경우로서 동일하게 적용될 수 있다. 유리관을 사용하는 방법은 계면을 수평면에서 관측할 수 있고 적은 양의 액체로 측정을 할 수 있으며 액체의 양에 따라 계면의 모양이 달라지지 않는 장점이 있다.

그림 6(a)는 실제 두 액체가 유리관에 담겨있는 계면을 보여주는 사진이며 그림6(b)는 계면형상과 관련된 변수들이 표기되어 있다. 그림 6(b)와 같이 계면을 반경이 R 인 구면으로 가정할 경우 다음과 같은 관계가 있다.

$$R = \frac{r}{\sin \phi} \quad (4)$$

여기서 ϕ 를 수평면과 계면의 유리관 접촉면 사이의 각도, 높이를 h , 유리관의 내부반지름을 r 라 할 때, $\phi = 2\alpha$, $\alpha = \tan^{-1}(h/r)$ 이므로 식 (4)에 의해 R 과 r , h 의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{r}{\sin [2\tan^{-1}(h/r)]} \quad (5)$$

계면의 형상을 옆면에서 보면 원통형의 유리관을 통해 보여지기 때문에 그림 6(a)와 같이 원래의 곡면(B)과는 다르게 크게 왜곡된 곡면(A)으로 보인다. 하지만 계면의 높이를 측정할 경우 높이의 기준이 되는 두 점(액체 계면의 봉우리점,

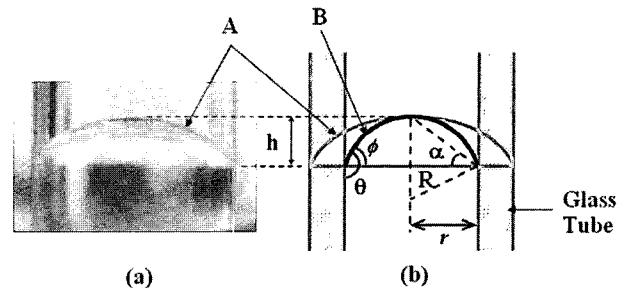


그림 6. (a)유리관에 의해 왜곡되어 보여지는 액체 계면 모습과 (b)유리관 속의 액체 계면 모습의 개략도. A : 왜곡되어 보이는 계면, B : 실제 계면.

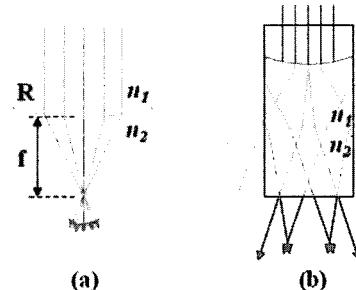


그림 7. (a)곡률반경 R 인 단일 계면에 의한 빛의 진행의 예, (b) 복합 계면에 의한 빛의 진행의 예.

액체와 유리관 간의 접촉점)을 수평면에서 관측하면, r 과 h 값을 정확하게 측정할 수 있다. 따라서 식 (5)에 의해 R 값을 결정하는 경우 유리관을 통해서 나타나는 계면형상의 왜곡이 주는 영향은 무시될 수 있다.

2.3 광량 변화 측정

굴절률이 다른 물체가 만드는 경계면은 광학적 굴절매질의 역할을 한다. 특히 그림 7(a)에서와 같이 굴절률이 각각 n_1 , n_2 인 계면의 곡률이 R 로 정의되는 경우 초점거리가 $f = R/(n_1 - n_2)$ 인 렌즈가 된다. 이 경계면에 빛을 통과시키면 θ 의 변화에 따른 곡률반경의 변화에 따라 빛의 초점거리를 변화시킬 수 있다. 따라서 그림2와 같은 실험장치에서 발산각(ρ) 변화가 일어나 관측면(detector)에서의 광량 변화를 일으킨다. 그러나, 실제 유리관에서는 그림 7(b)와 같이 n_1 유체의 윗면도 공기와 접촉되어 또 다른 형태의 곡면을 가지며, 투과되는 빔도 굴절과 반사를 여러 번 반복하는 경우가 생기게 되는데, 이러한 경우 측정한 광량으로부터 계면의 곡률반경을 계산하기는 어렵다. 따라서 간접적인 방법에 의해 광량을 곡률반경으로 치환하는 과정이 필요하다.

그림 8은 시간에 따른 계면의 곡률의 변화값을 얻기 위한 치환 과정을 보여준다. 먼저 고정된 크기의 전압에 대한 정지된 상태의 계면의 곡률반경(그림 8(a))과 측정된 광량(그림 8(b))을 통하여 계면의 곡률과 광량의 관계(그림 8(c))를 얻는다. 이후 계면의 시간적인 변화에 따른 광량의 변화를 연

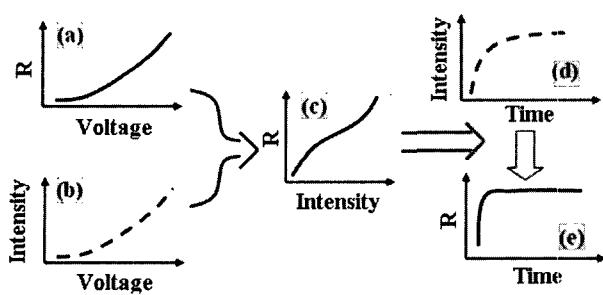


그림 8. 시간에 따른 광량변화를 곡률반경의 변화로 환산하는 과정. (a)전압-곡률반경, (b)전압-광량, (c)곡률반경-광량, (d)시간-광량, (e)시간-곡률반경의 그래프.

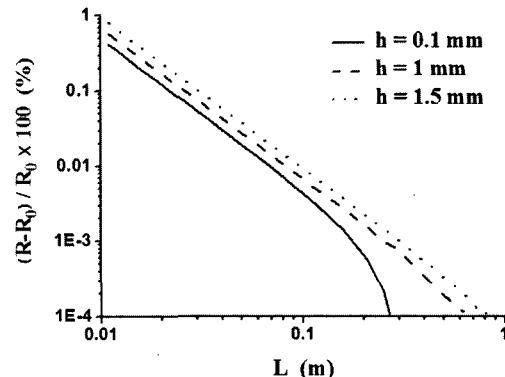


그림 10. 내경 4mm의 유리관에서의 액체의 모세관 상수에 대한 곡률반경 오차의 변화

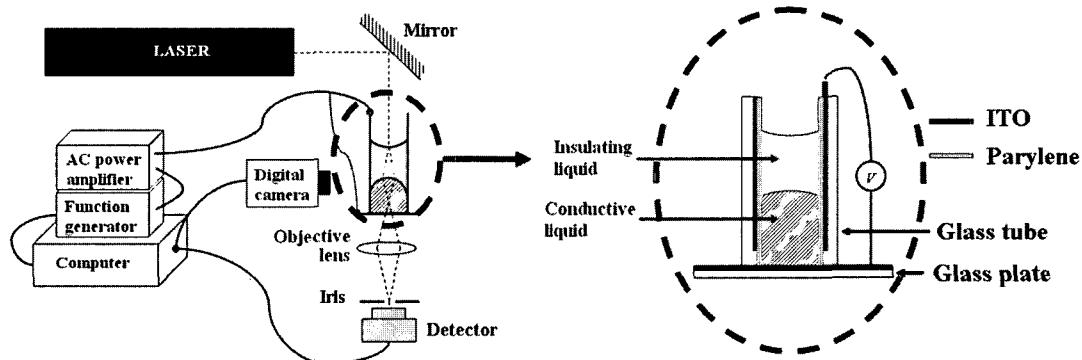


그림 9. 유체 계면의 동작특성 측정을 위한 실험 장치 개략도 및 유리관 상세도

속적으로 측정(그림 8(d))하여 그림 8(c)의 관계로부터 광량을 곡률반경으로 환산(그림 8(e))하면, 계면형상의 시간적 변화에 따른 곡률반경의 변화를 연속적으로 얻을 수 있다.

III. 측정 및 분석

3.1 측정 장치

전자습윤 현상의 동작 특성을 측정하기 위한 실험장치도는 그림 9과 같다. 그림 9의 오른편 그림은 측정에 사용한 유리관(Glass tube)의 구조로서, 내부 직경은 4mm, 길이는 15mm이고, 유리관의 내부에는 전도층으로 투명전극(ITO ; indium tin oxide)이 도포되어 있어 외부에서 전압을 인가할 수 있도록 하였으며 절연층으로는 패럴린(parylene)막이 입혀져 있다. 유리판(Glass plate)의 두께는 1mm였으며 표면에는 전해액에 전압을 인가하기 위한 전극으로 ITO를 코팅하였다. 전압 인가를 위해서는 파형 발생기(function generator)와 교류 증폭기(AC power amplifier)를 사용하였고 카메라(Digital camera)는 1.3M 픽셀의 화소수를 갖고 있다. 전해액(Conductive liquid)은 염화나트륨이 첨가된 물을 사용하였고 절연액(Insulating liquid)으로는 실리콘 계열의 오일을 사용하였다.

그림 10은 지름이 4mm의 유리관 안에서 두 유체가 만드는 계면의 높이가 0.1mm와 1mm, 1.5mm인 경우에 대하여식 (2)를 이용해 전산묘사한 결과로 모세관 상수 L 이 10mm 이상인 액체에 대해서는 계면의 형상이 1% 이내의 오차로 구에 가까움을 확인할 수 있다.

3.2 정적 특성 측정

정지상태의 특성을 측정하기 위하여 전압을 0 ~ 40 V까지 5 V 간격으로 변화시키면서 계면의 높이와 광량을 동시에 측정하였다. 마이크로미터가 부착된 이동 스테이지로 카메라의 높이를 움직여 계면의 높이를 10 μ m 이내의 정밀도로 측정하였으며, 광량의 측정은 HeNe 레이저와 광량 측정기(Si photodiode), 직경 1 μ m인 조리개(Iris)를 사용하였다. 그림 11은 5 Volt 간격으로 가해준 V 에 따라 정지상태에서 계면 높이를 측정한 결과로, 0 V ~ 5 V 사이에는 h 의 변화가 없었으며 0 V와 40 V에서 계면의 높이는 각각 1.91mm, 0.61mm였다.

그림 6(b)에서 $\theta = \pi/2 + \theta$ 의 관계가 있으므로, 식 (3)과 (4)로부터 θ 와 V 의 관계는 다음과 같이 된다.

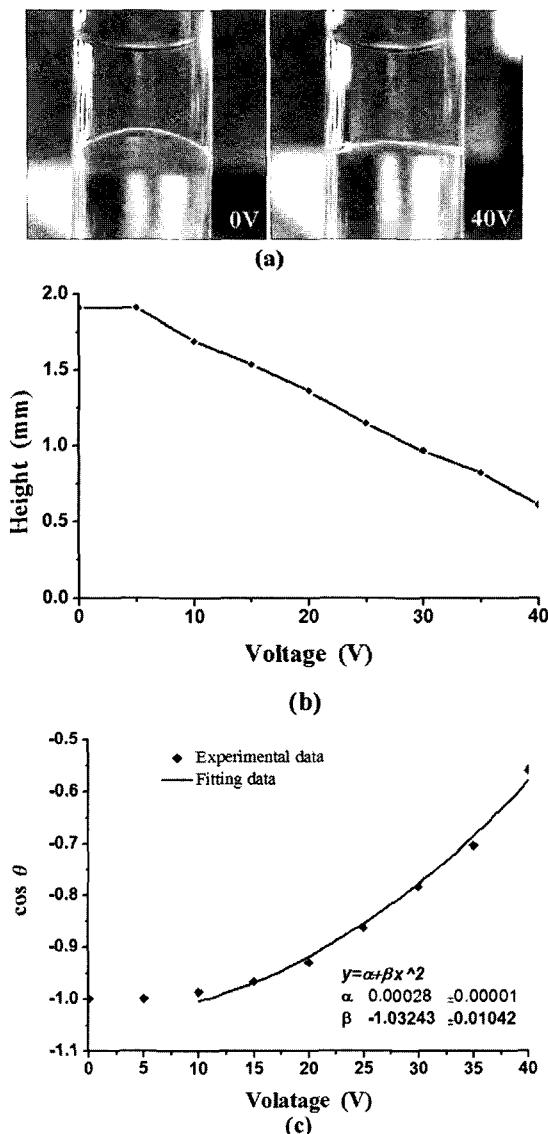


그림 11. (a) 0 V 와 40 V에서의 계면의 형상 사진, (b) 전압 변화에 따른 정지상태 계면의 높이 변화 측정 결과 및 (c) $\cos \theta$ 과 fitting 결과.

$$\cos \theta = \frac{r}{R} = \alpha + \beta V^2 \quad (6)$$

그림 11(c)는 그림 11(b)의 $h = h(V)$ 와 식 (5)로부터 얻어지는 R 값을 통하여 식 (6)의 $\theta = \theta(V)$ 의 관계를 구한 결과(실선)로 $\alpha = -1.03$, $\beta = 2.810-4$ 이다. 이 결과는 실험결과(◆)와 계면의 동작구간인 10 ~ 40 V 사이에서 5% 이내의 오차를 보여주며 이로부터 유리관에서 일어나는 전자습윤현상이 식 (3)에 의해 설명되는 전자습윤현상에 의한 접촉각 변화에 부합됨을 알 수 있다. 그림 12는 높이로부터 얻어진 곡률반경과 광량, 그리고 이로부터 얻어진 곡률반경과 광량의 관계이다.

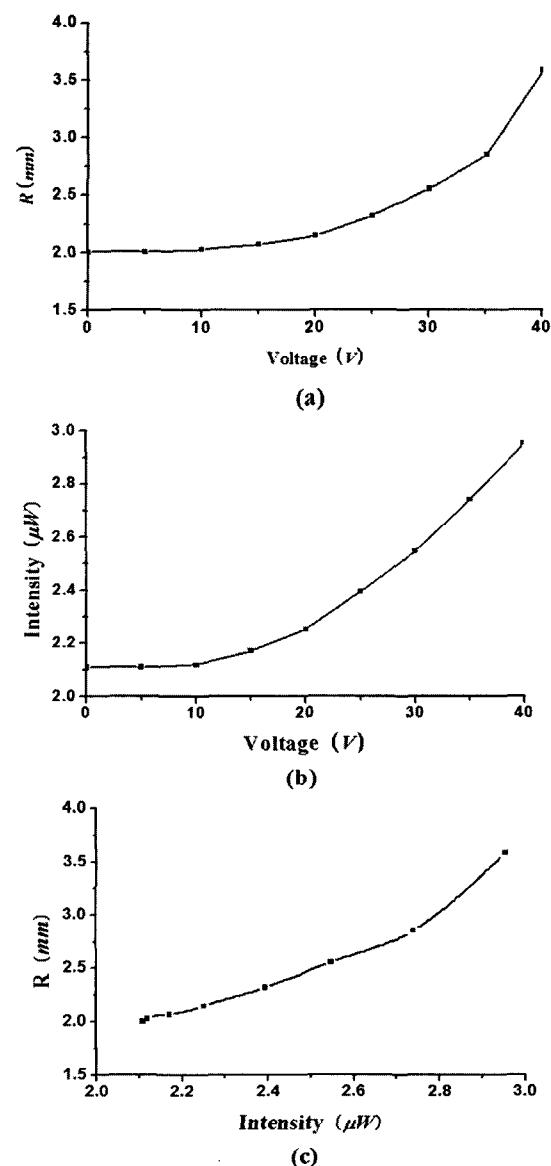


그림 12. 전압 변화에 따른 (a) 정지상태 계면의 곡률반경 변화 및 (b) 광량변화와 (c) 곡률반경과 광량의 관계.

3.3 동적 특성 측정

동적 특성 측정을 위하여 0 V에서 40 V로 전압을 순간적(<1 mec)으로 인가하고 시간에 따라 변하는 광량을 측정하였다. 측정 시간은 1 mec 간격으로 400 mec 동안 하였다. 그림 13은 시간에 따른 광량의 변화 모습과 이를 그림 12(c)의 관계에 의해 곡률반경(R)의 변화로 환산한 그림이다. 그림 13(a)의 #1과 #2는 광량측정 위치를 달리한 데이터로서, 측정 시 조리개의 위치에 따라 측정되는 광량의 분포도 달라지지만 그림 13(b)처럼 각각에 대하여 R 로 변환한 경우에는 유사한 결과를 볼 수 있다.

광량변화 측정으로부터 얻어진 결과와의 비교를 위하여 동일한 조건에서 고속카메라를 이용하여 계면의 형상 변화를

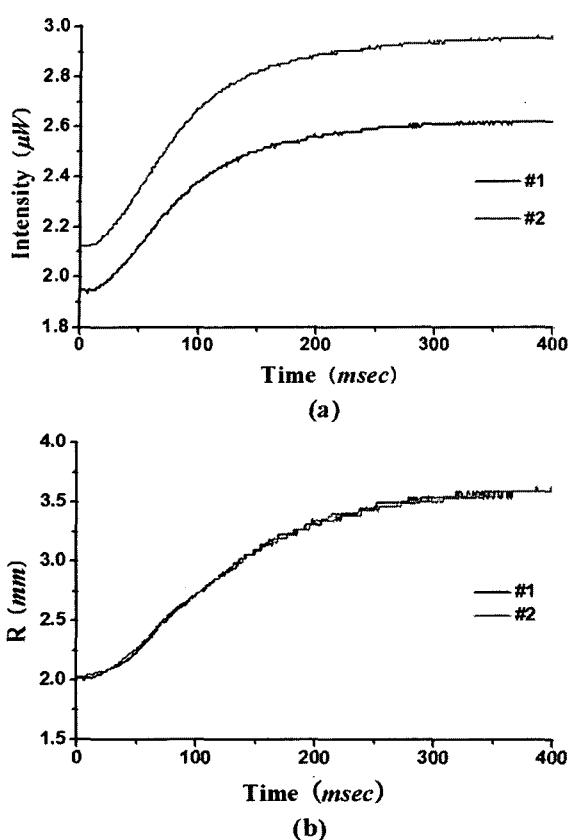


그림 13. 계면의 동작특성 측정 결과 (a)광량값의 변화 측정 결과 및 (b)곡률로 변환된 결과.

관측하였다. 광량측정과 동시에 1000 fps의 동일한 속도로 계면의 이미지를 얻었으며 계면 최상부의 좌표를 계면의 곡률반경으로 환산하였다. 환산 방법은 앞서 사용한 광량값의 곡률반경으로의 환산 과정과 동일한 방법으로, 그림 8의 과정 중 광량이 측정되는 과정을 고속카메라 이미지에서 계면 최상부의 좌표로 대체함으로써 결과를 얻었다. 그림 14의 측정결과를 보면 고속카메라로부터 얻어진 데이터는 계면 이미지로부터 곡률을 얻기 위한 추가의 이미지 처리법^[7,8]이 쓰이지 않았기 때문에 곡률반경에 대해 연속적이지 못한 모습을 보인다. 그리고, 약 100 msec 이후로는 3% 이내의 오차로 두 측정결과가 일치하는 반면 그 이전에는 서로 다른 경향의 변화를 보이는데, 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 전자습윤에 의한 계면 형상의 변화는 앞서 말한 바와 같이 전압 변화에 대해 먼저 접촉각이 바뀌게 되고 그 이후 계면 전체로 형상이 바뀌어 가기 때문에 접촉각과 계면 중심의 변화에 시간차이가 있게 된다. 따라서 계면의 곡률반경을 직접 반영하는 광량 변화로부터의 데이터와, 계면의 높이만을 관측한 고속카메라 이미지로부터의 데이터 사이에 차이가 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

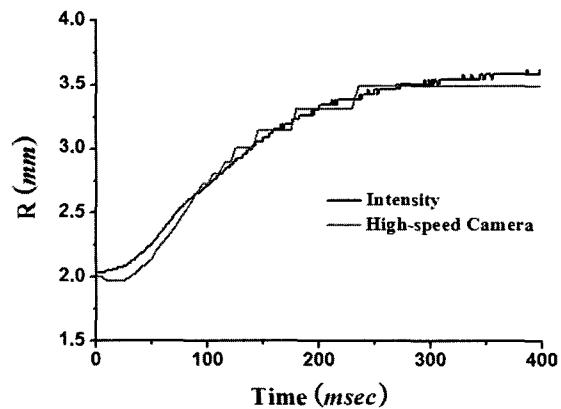


그림 14. 광량 측정을 이용한 곡률반경과 고속카메라를 이용하여 측정한 곡률반경의 시간적 변화 비교.

IV. 결 론

액체 계면의 곡률반경에 따라 지나가는 빔의 발산각이 변하는 것을 이용하여, 시간에 따른 광량의 변화로부터 계면의 곡률반경을 연속적으로 얻을 수 있는 방법을 제시하고 실험적으로 검증하였다. 정지상태에서 계면의 높이 측정을 통해서 전압에 따른 접촉각의 변화를 4% 이내의 오차 범위에서 이론과 일치하는 결과를 얻었으며 동작상태의 특성을 고속 카메라로부터 얻어진 이미지와 비교 분석하였다.

경계면 변화의 동작 기준은 접촉각보다 계면 중심부 형상의 정보로 표현되는 것이 적합한데, 광량으로부터 얻어지는 곡률반경은 계면 중심부의 형상을 직접 표현하므로 본 논문에서 제시한 평가 방법은 전자습윤현상에 의한 동작 특성을 판단하기 위한 적절한 기준이 된다. 전자습윤 현상의 응용을 위한 초기 개발단계에서는 수많은 종류의 액체가 개발되는데 이 모든 액체를 실제로 적용하여 테스트하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 쉬우면서도 분별력 있는 액체 동작특성 평가 방법이 요구되는데 광량 측정을 통한 평가방법은 유리판을 이용하므로 측정 샘플의 제작에 어려움이 없고 기타의 정밀 측정 장비나 여타의 데이터 분석 기술이 필요치 않으므로 이러한 개발단계에서 적용하기에 적절한 평가 방법이라 하겠다. 또한 최근에 전자습윤 현상을 이용한 광학소자의 개발이 활발히 진행되고 있는데, 광량에 의한 동작특성 평가 방법은 광학적으로 중요한 정보가 되는 계면의 곡률반경 측정을 위해 더욱 적절한 방법이다.

감사의 글

본 연구 결과는 박승룡의 삼성전기 방문연구 과정에서 수행된 결과로서, 연구개발 기회를 주신 삼성전기 측에 감사를 드립니다.

그리고, 산업자원부 중기거점사업 ‘Replication Process’를 이용한 차세대 다기능 슬림폰 용 카메라 모듈 개발(과제번호

: 10024878-2005-31)”의 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] M. W. J. Prins, W. J. J. Welters and J. W. Weekamp, “Fluid control in multichannel structures by electrocapillary pressure”, *Science* 291, 277-280, 2001.
- [2] C. Quilliet and B. Berge. “Electrowetting : a recent outbreak”, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 6, 34-39, 2001.
- [3] J. Lee, H. Moon, J. Fowler, T. Schoellhammer and C. J. Kim, “Electrowetting and electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling”, *Sens. Actuators*, 95, 259-268, 2002.
- [4] R. A. Hayes and J. Ralston, “Forced Liquid Movement on Low Energy Surfaces”, *J. Colloid Interface Sci.* 159, 429, 1993.
- [5] R. E. Johnson and R. H. Dettre, in *Surface and Colloid Science*, edited by E. Matijevic (Wiley, New York, 1969), Vol. 2, p. 85.
- [6] R. Enrique and Stephen G, “Microscopic and Macroscopic Dynamic Interface Shapes and the Interpretation of Dynamic Contact Angles”, *Journal of colloid and interface science* 177, 234244, 1996.
- [7] J. A. Marsh, S. Garoff and E. B. Dussan V., “Dynamic Contact Angles and Hydrodynamics near a Moving Contact Line”, *Physical review letters* vol. 70, 18, 1993.
- [8] H. J. J. Verheijena and M. W. J. Prinsb. “Contact angles and wetting velocity measured electrically”, *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 70, No. 9, September, 1999.
- [9] H. J. J. Verheijen and M. W. J. Prins. “Reversible Electrowetting and Trapping of Charge : Model and Experiments”, *Langmuir*, Vol. 15, No. 20, 6616-6620, 1999.
- [10] C. Atae-Allah, M. Cabrerizo-Vilchez, J. F. Gomez-Lopera, J. A. Holgado-Terriza, R. Roman-Roldan and P. L. Luque-Escamilla, “Measurement of surface tension and contact angle using entropic edge detection”, *Meas. Sci. Technol.* 12, 288298, 2001.
- [11] M. Bienia, C. Quilliet and M. Vallade. “Modification of Drop Shape Controlled by Electrowetting”. *Langmuir*, 19, 9328-9333, 2003.
- [12] S. B. G. M. O'Brien and H. A. A. van den Brule, “Shape of a Small Drop and the Determination of Contact Angle”, *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* 87, 1579, 1991.
- [13] A. Y. Lin, H. C. Chang, L. W. Lin and P. Y. Huang. “Measurement of dynamic/advancing/receding contact angle by video-enhanced sessile drop tensiometry”, *Rev. Sci. Instrum.* 67 (8), August, 1996.
- [14] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics*, 2nd ed., part 1 (Pergamon, Oxford, 1987), pp. 240, 247.
- [15] W. J. J. Welters and L. G. J. Fokkink, “Fast Electrically Switchable Capillary Effects”, *Langmuir* 14, 1535, 1998.
- [16] H. K. Kwan, “How Electrostatic Fields Change Contact Angle in Electrowetting”, *Langmuir*, Vol. 18, No. 26, 10318-10322, 2002.
- [17] H. J. J. Verheijen and M. W. J. Prins, “Reversible electrowetting and trapping of charge: model and experiments”, *Langmuir*, 15, 6616-6620, 1999.

Characterization of Electro-wetting Velocity by Measuring Transmission Intensity

Seung-Ryong Park, Seok Ho Song[†], Cha-Hwan Oh, and Pill-Soo Kim

Micro Optics Laboratory, Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, KOREA

[†] *E-mail: shsong@hanyang.ac.kr*

Byoung Do Oh

ISM team, OS Division, SEMCO, Suwon 442-743, KOREA

Sang Kug Chung

Department of Mechanical Engineering, University of Pittsburgh

(Received June 9, 2006, Revised manuscript August 18, 2006)

The electro-wetting effect can be implemented as a fast means to move liquid interfaces. A continuous and numerical method would be required in measurement of electro-wetting liquid interfaces. We propose an *in-situ* measurement method to characterize the dynamic change in curvature of liquid interfaces. In the proposed method, variation of light intensity transmitted through the liquid interfaces is measured, leading to numerical determination of the liquid curvatures. Experimental results obtained from our efficient method are confirmed by the direct images of a streak camera.

OCIS code : 120.4530, 230.2090, 350.4800.