

## 원형관내의 액체-액체 계면에 대한 전기습윤 현상의 동적 거동

강관형\* · 정원영\*\*

### Dynamics of Electrowetting of a Liquid-Liquid Interface in a Cylindrical Tube

Kwan Hyoung Kang\* and Won Young Chung\*\*

**Keywords :** Electrowetting(전기습윤), Liquid lens(액체렌즈), Dynamic wetting(동적습윤), Interfacial tension(계면장력), Dynamic contact angle(동적 접촉각), Capillary(모세관)

#### Abstract

The contact angle of a meniscus and a droplet can be controlled by using electrowetting phenomena. We investigated the dynamic aspect of electrowetting for an oil-electrolyte interface formed inside a closed glass tube. A step input voltage is applied and the subsequent motion of the interface is recorded by a high-speed camera. A kind of capillary instability is observed near the three-phase contact line, which could degrade the reliability of device utilizing electrowetting such as electrowetting liquid lens. The dynamics of interface motion for different input voltages and the fluid viscosities are analyzed and discussed based on the experimental results.

#### 1. 서론

전기습윤이란 절연 코팅된 전극 면에 놓인 작은 액적과 고체표면간에 전압을 인가하여 액적의 접촉각을 제어하는 기술이다. 전기습윤을 이용한 유체의 이송 또는 제어 방식은 1)전기 영동(electrophoresis) 및 압력 차에 의한 유체의 이송에 비하여 이송 속도가 빠르고(최대 약 30cm/s), 2)전류의 소모가 매우 작으며, 3)시스템이 비교적 단순한 구조로 이루어진다는 장점이 있다. 최근 이러한 장점을 이용하여 전기 습윤 현상을 미소 시약 액적의 생화학 분석 장치[1,2](예, lab-on-a-chip), 전자 종이(electronic paper)[3,4], 액체 렌즈(liquid lens)[5], 광 스위치(optical switch)[6], 마이크로 밸브 등에 응용하려는 노력이 활발히 진행되고 있다. Figure 1은 전기습윤을 응용한 전자 종이의 한 셀의 구성과 액체 렌즈 시스템의 구성을 보여주고 있다.

전기 습윤에 대한 정적 특성에 대해 그 동안 많은 이론적 연구가 진행되어 왔고[7,8] 접촉각 포화(contact-angle saturation) 현상과 같은 일부 현상을 제외하고는 그 정적 상태에서의 특성이 매우 상세하게 밝혀졌다. 그런데 전자 종이나 액체 렌즈의 경우에 있어서는 Fig. 1과 같이 서로 섞이지 않는 두 유체가 채워진 폐쇄형 용기를 이용하게 된다. 이러한 장치 개발에는 인가 전압에 따른 액체의 동적인 응답 특성에 대한 이해가 매우 중요한데 현재 동적 특성에 대한 연구는 거의

진행된 바가 없다.

본 연구에서는 전기습윤 현상의 기본적인 동적 특성을 파악하기 위하여 상용화에 가장 근접한 액체 렌즈를 단순화한 시스템에 대하여 실험을 수행하였다. 또한 기존의 전기습윤 관련 실험들과 달리 계면이 액체와 액체로(기존은 통상 액체와 기체에 대한 실험) 형성되고 유체역학적으로 폐쇄된 시스템을 다루었다. 실험은 가장 단순한 형태인 전압의 스텝(step) 입력에 대해 수행하였다.

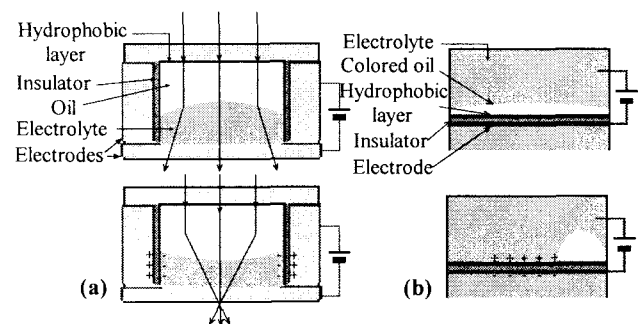


Fig. 1. (a) Electronic paper; (b) Liquid lens

#### 2. 실험장치 및 방법

Figure 2는 실험에서 사용된 유리관의 내부 구조를 보여주고 있다. 사용된 유리관의 외경은 4.5 mm, 두께는 0.8mm 그리고 길이는 20mm이다. 유리관 내부는 여러 박막층이 코팅되어 있는데 먼저 유리관 내부에 전기장을 걸어주기 위한 전극으로서 투명한 산화인듐막(ITO)을 유리관 내부 벽에 코팅하였다. 그

\* 포항공과대학교 기계공학과, khkang@postech.ac.kr

\*\* LG 전자, ewjwy@lge.com

위에 절연을 위하여 5  $\mu\text{m}$ 의 페릴린(Parylene)막을 코팅 하였다. 마지막으로 물/오일이 만났을 때 이루는 계면이 큰 접촉각을 가지게 하고 히스테리시스를 줄이기 위해 소수성(hydrophobic)의 테프론(Teflon® AF1600)을 코팅하였다. 전기력이 없는 평형 조건에서의 TCL에서의 접촉각은 155°로 관측되었다.

전해질을 만들기 위해 초순수(DI water)에 15mM의  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 를 첨가하였다. 실험 시 필요에 따라서 점도를 변화시키기 위하여 글리세린을 일정한 비율로 혼합하여 사용하였다. 오일은 15cP의 점도를 가진 실리콘 오일(ShinEtsu, KF-56)이 사용되었다. 전해질과 오일은 똑 같은 양을 차례대로 코팅된 유리관에 주입하여 하부에는 전해질 용액이 상부에는 절연성 유체(오일)가 있도록 하였다.

앞서 언급한 코팅된 유리관은 XYZ 3축으로 이동이 가능한 평판 위에 올려져 있다. 한편 유리관에 의한 굴절률 때문에 내부 유체의 관측은 물론 접촉각의 계측이 어렵게 된다. 이를 해결하기 위해 유리의 굴절률( $n=1.5$ )과 같은 굴절률을 갖는 오일(ShinEtsu, KF-56)을 유리관 외부에 채웠다. 유리관 내부에 형성된 계면의 운동을 고속카메라(Weinberger AG, SpeedCam)와 확대 렌즈(Questar, QM100)를 이용하여 초당 1000 프레임의 속도로 촬영하였다. 유리관의 전극과 전해질 사이에 전위차를 주기 위해서 전압 상승속도(rise time) 300V/ $\mu\text{s}$ 와 20배의 이득(gain)을 가지는 전압 증폭기(FLC, A400)를 사용하였다. 전압 증폭기에 인가되는 전압신호는 Labview를 통하여 PC로부터 생성되었다. 전원과 고속카메라는 Labview를 사용하여 동기화시켰다.

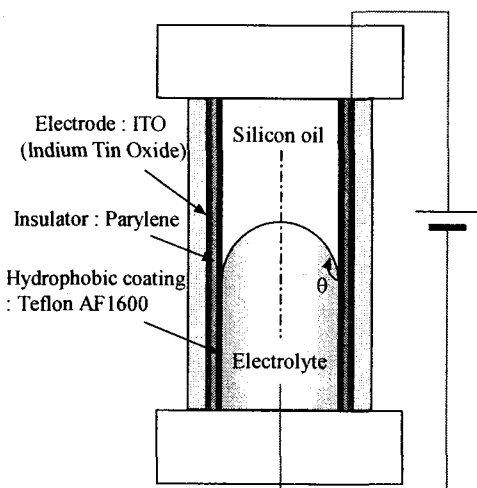


Fig. 2. Schematic diagram of cylindrical tube

### 3. 결과 및 고찰

Figure 3은 순간적으로 80V의 전압이 가해졌을 때 시간에 따라 계면의 형상이 변화하는 것을 보여주고 있다. 이 때 계면을 이루고 있는 두 유체는 실리콘오일(점도: 15cP, 상부)과 75% 글리세린 부피분율을 가진 전해질(점도: 35 cP, 하부)이다.

연속적인 영상으로부터 전압이 인가된 후 약 0.16초가 지나면 계면의 형상이 정상 상태에 도달함을 알 수 있다. Figure 4는 Fig. 3의 이미지에 대하여 이미지 해석 프로그램을 이용하여 각 계면의 위치를 얻어낸 결과이다. 그림에서 TCL은 시간에 따라 하부에서 상부로 이동하게 된다. 곡면의 형상은 거의 구면에 가까우나 경우에 따라 다소 구면에서 벗어나는 형상을 보여준다.

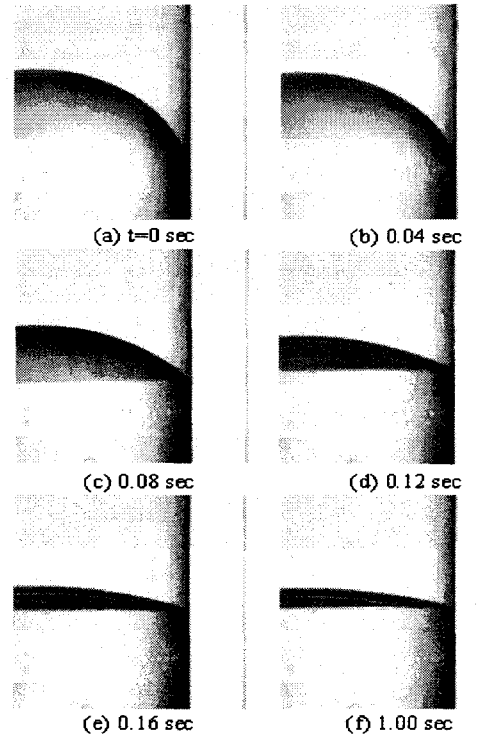


Fig. 3. Pictures showing the change of interface shape inside the tube

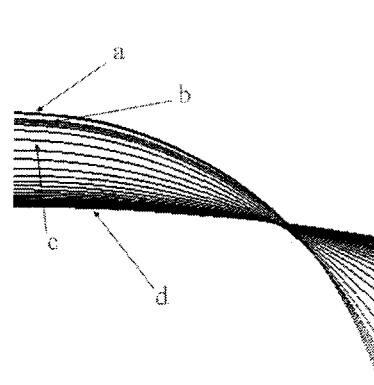


Fig. 4. Temporal change of interface shape at an interval of 0.012 sec.

Figure 5는 시간에 따른 TCL의 위치 변화를 여러 크기의 전압에 대하여 실험한 결과이다. Figure 6은 같은 실험 조건에서 시간에 따른 접촉각의 변화를 나타낸 결과이다. 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 최대 변위와 최대 접촉각은 전압에 비례하는 결과를 보여준다. 약 20V이하의 전압에서는 실험에 사용된 장비로는 그 움직임을 관측할 수 없었다.

삼상점점의 변위( $Y_{TCL}$ )가 정상상태의 90%에 도달하는데 걸리는 시간은 전압이 증가할수록 짧아짐을 알 수 있었으며 30~70V의 전압 범위에서 0.4~0.16sec의 도달시간을 가짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 6에서 정상상태의 접촉각에 도달하는데 걸리는 시간과 거의 일치하였다. 한편 공통적으로 모든 전압에서 약 0.05sec 동안 초기 정체 구간을 관찰할 수 있었는데 이는 이후 자세히 설명하게 될 유리관 상에 형성되는 오일 막에 의한 효과 때문이다.

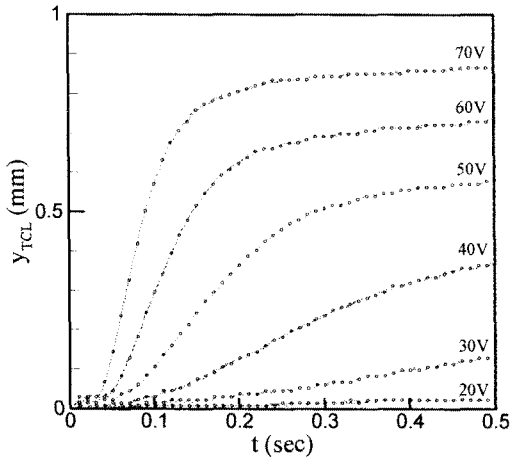


Fig. 5. Temporal change of vertical location of TCL for various voltages.

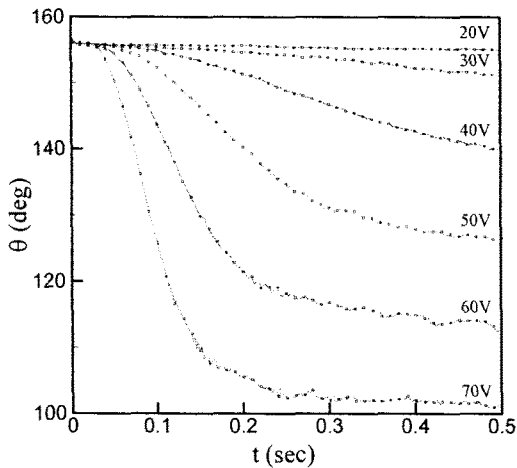


Fig. 6. Temporal change of contact angles for various voltages.

Figure 7는 시간에 따른 TCL의 이동 속도를 보여주고 있다. 먼저 전압에 따라서 최대 이동 속도가 증가함을 알 수 있으며 이는 전압 증가에 따른 전기적 젖음 장력의 증가 때문이다. 최대 속도 도달 시간도 30V에서는 0.22초, 70V에서는 0.07초로 감소하는 경향을 보였다.

Figure 8은 인가 전압이 70V인 경우의 TCL의 속도를 준 로그 눈금 단위로 다시 나타낸 그림이다. TCL의 이동 속도 곡선은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 초기 가속구간(0~a), 초기 감속구간(a~b), 재가속구간(b~c), 재감속구간(c~d)의 총 4개의

구간으로 나눌 수 있다. 각각의 시점에 있어서의 계면의 형상을 그림에 같이 나타내었다. 각각의 시점 a, b, c, d에 있어서의 계면의 형상은 Fig. 4를 참조하기 바란다. 속도 곡선에서 알 수 있는 특이한 사실은 모든 전압에 대하여 전압을 인가한 직후에 일정한 속도로 가속된 후 (a 상태에 도달하기 전까지) 감속 구간을 갖는다는 것이다 (Fig. 8의 a-b 구간). 이러한 초기 감속구간이 발생하는 원인은 계면에 형성되는 오일 막의 영향인 것으로 판단된다.

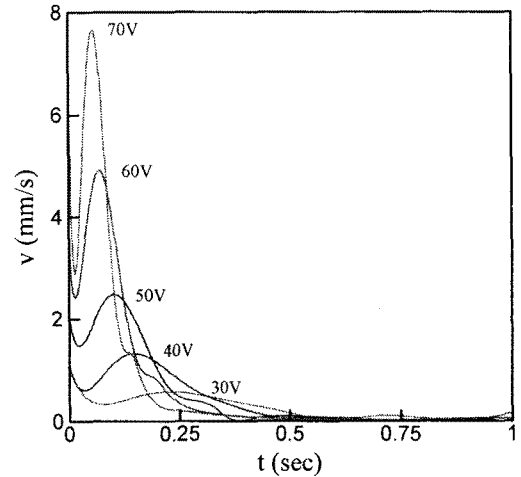


Fig. 7. TCL velocity with respect to time for various voltages

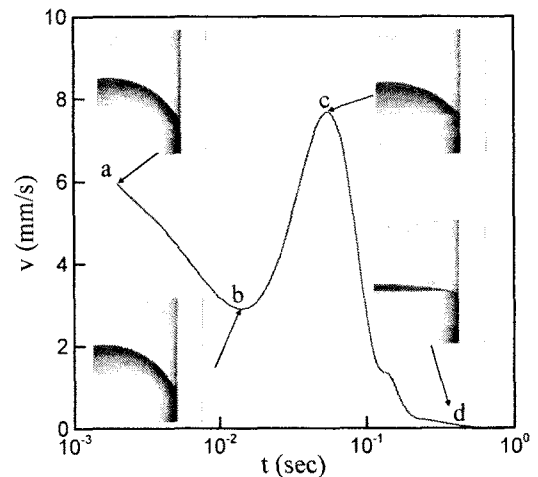


Fig. 8. TCL velocity with respect to time (V=70Volt)

즉, Fig. 9는 전압 인가 후 변화하는 계면을 촬영한 이미지로 오른쪽 이미지는 왼쪽 이미지를 부분적으로 확대한 것이다. 이미지에서 보는 바와 같이 전압 인가 후 밀려 올라가야만 하는 오일의 일부분이 떨어져 나와 아래 쪽 유체 쪽으로 침투하게 되어 튜브 벽면에 미소 액적을 형성하는 것을 볼 수 있다. 액적의 크기는 상부로 갈수록 점점 작아지는 경향을 보였다. 즉 오일 막의 두께가 계면이 상승하면서 점차 감소하는 경향을 갖는다고 유추할 수 있다. 따라서 초기의 감속 구간은 (a-b 구간) 미처 상승하지 못한 이러한 액적 또는 오일

막에 의해 국부적인 절연막의 두께가 증가되는 효과가 발생하고 이로 인하여 절연막이 증가하는 효과를 가져올 수 있다. 결과적으로 절연막의 두께의 증가는 구동력이 되는 전기력의 감소로 나타난다.

이러한 잔류 오일 막은 전해질 용액의 상승과정에 있어서 액체와 고체면과의 마찰에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 이러한 막은 입자를 포함한 용액에 있어서는 입자의 흡착 특성에 큰 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 현재로서는 계면이 상승하면서 지속적으로 튜브 벽면에 오일막을 형성하는지 여부는 알 수가 없다. 본 실험에서 관찰된 계면 불안정성 및 이로 인한 액적의 형성은 그간의 전기습윤 관련 실험에서 보고된 바가 없는 현상이다.

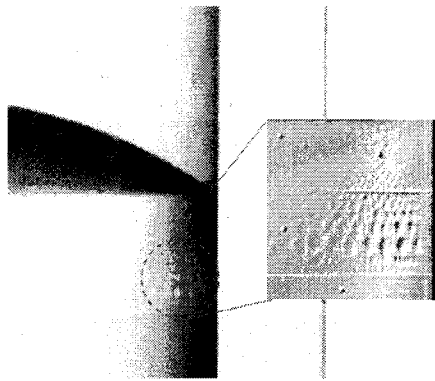


Fig. 9. Formation of small silicon-oil droplet inside the tube wall due to the interfacial instability

동적접촉각( $\theta_d$ )과 TCL(three-phase contact line)의 이동속도( $v_{TCL}$ )의 상관관계를 다음과 같이 모델링하였다 [9].

$$v_{TCL} = \alpha \{ \cos \theta_{LY} - \cos \theta_d \} \quad (1)$$

위에서  $\alpha$ 는 경험 상수,  $\cos \theta_{LY} = \cos \theta_Y + 2\varepsilon V^2 / (\gamma d)$ ,  $\theta_Y$ 는 Young의 접촉각,  $\varepsilon$ 는 절연막의 유전률,  $V$ 는 입력한 RMS 접압,  $\gamma$ 는 오일과 물과의 계면장력 상수,  $d$ 는 절연막의 두께를 나타낸다. Figure 10은 전압 인가 후 벽면 근처의 계면에서 접촉각에 따른 속도 변화를 이론 값과 실험값을 비교하여 나타낸 그림이다. 시간은 Fig. 10의 횡축에 대하여 오른쪽에서 왼쪽으로 증가하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 시간에 따라서 구동력(마찰력)과 접촉각이 감소함을 알 수 있었고 이론 값과 실험값의 기울기 역시 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

(1) 전압에 따른 삼상접점(TCL)의 최종 위치는 전압에 비례하여 선형적으로 증가하였으며 접촉각은 선형적으로 감소하였다.

(2) 삼상접점의 최대 속도 도달 시간은 인가된 전압이 커질수록 짧아졌으며 모든 전압에서 초기

감속 구간을 관측할 수 있었다.

(3) 초기 감속 구간은 전기력(구동력)의 순간적인 감소 때문이며 이는 미처 밀려 올라가지 못한 오일에 의해서 절연층의 두께가 증가되는 효과를 나타내기 때문이다.

(4) 유체의 점성력을 고려하지 않은 식(1)로부터 얻은 속도와 접촉각과의 관계식은 실험값과 일치하였다.

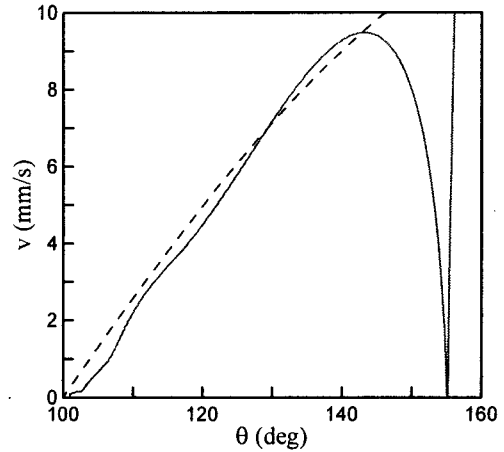


Fig. 10. The experimental result (solid line) is good agreement with the dashed line predicted by Eq. (1), ( $V=70$ Volt)

#### 참고문헌

- [1] Figeys, D., Pinto, D., and Kuschel, M., 2000, "Lab-on-a-chip: A revolution in biological and medical sciences," *Analytical Chemistry*, Vol. 72, pp. 330~335.
- [2] Srinivasan, V., Pamula, V. K., and Fair, R. B., 2004, "An integrated digital microfluidic lab-on-a-chip for clinical diagnostics on human physiological fluids," *Lab Chip*, Vol. 4, pp. 310~315.
- [3] Hayes, R. A. and Feenstra, B. J., 2003, "Video-speed electronic paper based on electro wetting," *Nature*, Vol. 425, pp. 383~385.
- [4] Roques-Carnes, T., Hayes, R. A., and Schlangen, L. J. M., 2004, "A physical model describing the electro-optic behavior of switchable optical elements based on electrowetting," *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, pp. 6267~6271.
- [5] Kuiper, S., and Hendriks, B. H. W., 2004, "Variable-focus liquid lens for miniature cameras," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, pp. 1128~1130.
- [6] Mach, P., Krupenkin, T., Yang, S., and Rogers, J. A., 2002, "Dynamic tuning of optical waveguides with electrowetting pumps and recirculating fluid channels," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 81, pp. 202~204.
- [7] Kang, K. H., 2002, "How electrostatic fields change contact angle in electro wetting," *Langmuir*, Vol. 18, pp. 10318-10322.
- [8] Kang, K. H., Kang, I. S., and Lee, C. M., "Geometry dependence of wetting tension on charge-modified surfaces," *Langmuir*, Vol. 19, pp. 6881-10322.
- [9] 정원영, 2006, 원형관내의 액체-액체 계면에 대한 전기습윤 현상의 동적 거동, 포항공과대학교 기계공학과 석사학위 논문. 73p.