



공학석사학위논문

마이크로 구조물 표면의 분극 정도에 의존적인 액체의 전기 습윤 현상

Polarizability-Dependent Electrowetting of Liquid on Microstructured Surfaces

2013년 2월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

송 윤 모

마이크로 구조물 표면의 분극 정도에 의존적인 액체의 전기 습윤 현상

Polarizability-Dependent Electrowetting of Liquid on Microstructured Surfaces

> 지도교수 이 신 두 이 논문을 공학 석사 학위 논문으로 제출함 2012년 10월 서울대학교 대학원 전기 컴퓨터 공학부 송 윤 모

송윤모의 공학 석사 학위 논문을 인준함

2012년 12월

<u>위</u> 위	<u> 원 장</u>	박 남 규 (인)
<u>부위</u>	원장	이 신 두 (인)
위	원	정 윤 찬 (인)

초록

최근 많은 연구가 되고 있는 Electrowetting(전기습윤) 기술은 유체의 거동을 전압에 따라서 조절할 수 있다는 점에서 많은 각광을 받고 있다. 그러나 유체의 거동을 원하는 방향으로 퍼지게 하는 비등방적 퍼짐 특성과 전압에 따른 액체 퍼짐의 메모리 효과 등에 대해서는 연구가 미흡하다.

이에 본 논문에서 기판 표면 물질의 분극 정도의 차이와 구조물의 도입을 통해서 EW를 이용하여 유체의 부분적인 거동을 제어하는 연구를 하였다. 그 결과 표면 물질의 분극에 의한 극성의 차이에 의해서 트랩되는 전하의 정도가 달라지고 이는 전압에 따른 액체 젖음에 대한 메모리 효과와 연계됨을 알 수 있었다. 이러한 전하 트랩은 마이크로 구조물 위에서 역시 관찰되며 메모리 효과와 비등방적 퍼짐을 관찰할 수 있다. 이를 통해 마이크로 구조물 위에서의 메모리 효과로 유체의 부분적 거동에 대한 방향을 제어할 수 있다. 이는 유체의 합성 및 검출을 위한 응용분야에 쓰일 수 있다.

i

주요어: 전기 습윤, 메모리 효과, 비등방성 **학번:** 2011-20865

목	차
---	---

초록i
목차······ii
그림 목차iv
표 목차······ix
제 1 장 서론
제 2 장 이론
2.1. Electrowetting의 동작원리 4
2.2. 굴곡이 있는 표면에서의 젖음 상태8
2.3. 구조적 비등방적 젖음 현상
제 3 장 실험 방법······13
3.1. 배향막의 제작 ······14
3.2. 기판의 제작······ 17

ii

제 4장 결과 및 분석
4.1. 배향막에서의 EW 결과 25
4.2. 표면 물질에 따른 메모리 효과에 대한 비교
4.3. 이완 시간에 따른 트랩된 전하에 대한 관찰36
4.4. 마이크로 구조물이 형성된 기판서에서의 퍼짐의 등방성 정도에
대한 EW 관찰 ······39
제 5장 결론
참고문헌
Abstract60

iii

그림 목차

그림 2.1. EW의 동작원리5
(a) 전압을 인가하지 않았을 때
(b) 전압을 인가하였을 때
그림 2.2. 구조물 위에서의 젖음에 관한 상태9
(a) Wenzel 상태
(b) Cassie-Baxter상태
그림 2.3. 비등방성 표면을 만드는 방법
(a) 리소그래피
(b) 에칭
(c) 엠보싱과 임프린팅
(d) 표면 주름 패턴
(e) 비대칭적 나노 구조물
그림 3.1. 수직 배향막의 AFM결과
(a) 10um*10um에 대한 기관 표면
(b) 기판의 높이
그림 3.2. 수평 배향막의 AFM결과16
(a) 10um*10um에 대한 기관 표면

iv

(b) 기판의 높이

(a) PMMA 25/10 주기 (b) PMMA 100/40 주기 (c) CYTOP이 올라간 PMMA 25/10 주기 (d) CYTOP이 올라간 PMMA 100/40 주기 (a) 기판 구조물 위에서의 모식도 (b) Parallel to line에 대한 개념 (c) Perpendicular to line에 대한 개념 (a) 수직 배향막 (b) 수평 배향막 (a) PMMA 표면 (b) PMMA 위에 CYTOP을 올린 표면 그림 4.3. PMMA 표면에서 인가하는 전압을 다르게 해주었을 때의

(b) 60V (c) 360V (d) 60V (e) 0V 그림 4.4. PMMA 위에 CYTOP을 올린 표면에서 인가하는 전압을 다르게 (a) 0V (b) 60V (c) 360V (d) 60V (e) 0V (a) PMMA 표면 (b) PMMA 위에 CYTOP이 올라간 표면 (a) PMMA 25/10 기관 (b) PMMA 100/40 기관

(a) 0V

vi

(a) PMMA 25/10 기판

(b) PMMA 100/40 기관

(a) PMMA 25/10 위에 CYTOP 올린 기관

(b) PMMA 100/40위에 CYTOP올린 기판

그림 4.9. 전압 인가에 따른 BD의 변화......50

(a) PMMA 25/10 위에 CYTOP 올린 기관

(b) PMMA 100/40위에 CYTOP올린 기관

- (a) PMMA 100/40 표면에 대한 0V에서의 EW
- (b) PMMA 100/40 표면에 대한 360V에서의 EW
- (c) PMMA 100/40 위에 CYTOP 올린 표면에 대한 0V에서의 EW
- (d) PMMA 100/40 위에 CYTOP 올린 표면에 대한 360V에서의 EW

(a) 수평

(b) 수직

그림 4.12. PMMA 100/410 표면에서 전압 인가와 이완 시간에 따른

접촉	각 변화
	(a) 수평
	(b) 수직
그림	4.13. PMMA 25/10 위에 CYTOP올린 표면에서 전압 인가와 이완
시간	에 따른 접촉각 변화
	(a) 수평
	(b) 수직
그림	4.14. PMMA 100/40 위에 CYTOP올린 표면에서 전압 인가와 이완
시간	에 따른 접촉각 변화
	(a) 수평
	(b) 수직

viii

표 목차

표 3.1. 각 물질의 유전 상수, 표면 장력 및 절연강도 특성
표 4.1. 마이크로 구조물을 지닌 PMMA 표면에 대한 전압 인가에 따른
접촉각과 초기 0V 에서의 BD
표 4.2 마이크로 구조물을 지닌 PMMA 표면에서 전압 인가에 따른 BI
값의 변화와 그 증감량의 변화
표 4.3. 마이크로 구조물이 형성된 PMMA에서 방향별 접착일44

ix

제 1 장 서론

최근 많은 연구가 되고 있는 Electrowetting(EW, 전기습윤) 기술은 유체의 거동을 전압에 따라서 조절할 수 있다는 점에서 많은 각광을 받고 있다. 이 현상은 lab-on-chip [1], adjustable lenses [2], display technology [3] 와 같은 다양한 응용분야에 널리 사용된다.

EW는 절연층을 올린 전극 기판 위에 액체를 올리고 액체와 기판 사이에 전압을 인가하여 표면장력(surface tension)을 바꾸어서 액체의 젖음 정도를 제어하는 기술로써 구동 전압을 낮추는 연구 [4]와 응답속도를 높이는 연구 [5], 비등방적(anisotropic) 퍼짐에 대한 연구 [6] 등이 수행되었다. 하지만 전압에 따른 액체 퍼짐에 대해서 메모리 효과(memory effect)를 지니면서 원하는 방향으로 젖게 하는 연구는 미흡하다.

따라서 본 연구진은 표면 물질의 분극 정도와 표면에 구조물을 도입하여 메모리 효과를 지니면서 비등방적으로 젖는 유체의 부분적 거동에 대한 특성을 연구하였다. 그 결과 마이크로 구조물이 형성된 표면에서 액체가 메모리 효과를 보이면서 비등방적으로 퍼짐을 확인하였다. 메모리 특성을 지닌 비등방적 퍼짐 특성과 전압을 인가하는 시간과 인가하는 정도에 따라서 액체의 젖음을 조절할 수 있다는 EW의

기본적인 특성을 이용하면 유체의 혼합 및 분석 등에 응용할 수 있다.

본 논문의 제 2 장에서는 EW 에 대한 이론 설명, 젖음에 대한 상태 및 비등방적 젖음에 대한 설명을 하였다. 제 3 장에서는 본 연구에서 수행한 실험과정들이 소개되었고, 이를 바탕으로 제 4 장에서는 그 결과를 분석하였다. 제 5 장에서는 이를 통해 결론을 내렸다.

제 2 장 이론

이 장에서는 EW의 기본 동작 원리를 알아보고 본 논문에 도입한 마이크로 구조물(microstructure)에서의 Wenzel과 Cassie-Baxter 젖음 상태를 알아 보았다. 그리고 본 실험에서 적용한 구조물 위에서의 비등방적 젖음(anisotropic wetting)에 대한 현상을 알아보았다.

2.1. Electrowetting의 동작원리

EW 현상의 기원은 1875년 Gabriel Lippmann에 의해서 발견된 전기 모세관 현상(electrocapillarity)이다. 이는 모세관 안에 전해질 용액과 맞닿은 수은의 모세관력이 수은과 전해질 용액 사이에 인가된 전압에 의해서 바뀌는 것이다. 하지만 전해질 용액에서 전압에 의해서 전기분해 현상이 일어나는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 1990년대 초 B. Berge가 전도성 액체를 금속 전극으로부터 분리시키기 위해서 절연층을 도입하였다 [7]. 현재 이는 Electrowetting on dielectric(EWOD, 앞으로 EW라고 칭하겠다)이라는 개념으로 lab-onchip [1], adjustable lenses [2], display technology [3]와 같은 다양한 분야에서 응용되고 있다.

그림 2.1처럼 EW 현상은 절연층을 올린 전극 기판과 그 기판 위에 위치한 액체 사이에 전압을 인가하여 액체의 젖음 정도를 제어한다. 이는 전압에 의해서 액체와 절연층 위에서 유도된 전하에 의해 일어나는 현상이다.

액체와 전국 사이에 형성된 전하의 변화는 커패시터(capacitor)와 같은 역할을 하고 그때의 정전용량(capacitance)은 유전체 물질의 유전상수와 두께에 영향을 받는다.

전압이 인가되면, 정전용량의 충전이 일어나고 액체와 절연층 계면에 전하가 축적된다. 그 결과 절연층과 전극 기판 사이에 그림2.1의 (b)와 같이 같은 정도의 반대 전하가 유도된다. 이때 절연층에 의해서 전도성 액체의 전기분해 문제는 방지된다.



그림 2.1. EW의 동작원리 (a)전압을 인가하지 않았을 때 (b)전압을 인가하였을 때

인가된 전압에 의해서 액체와 기판 사이의 접촉각(contact angle)이 변하는데 이는 다음 식 2.1의 Young's-Lippmann 식에 의해서 표현된다.

$$\cos\theta_Y = \cos\theta_0 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r V^2}{\gamma_{l\nu} d} \tag{4 2.1}$$

 $heta_{Y}$ 는 전압 인가에 의해서 변화된 접촉각, $heta_{0}$ 는 0V에서의 접촉각, d 는 절연층의 두께, $heta_{0}$ 는 자유공간에서의 유전율, $heta_{r}$ 는 절연체의 유전상수, γ_{lv} 은 액체와 공기 중의 표면에너지(liquid-vapor surface energy)이다. 표면 에너지 밀도(surface energy densitu)는

표면장력으로 단위 면적당 표면적을 증가시키는데 필요한 힘으로써 액체의 표면장력은 분자들 사이의 응집력(cohseive force)인 분자들끼리 끌어당기는 힘(intermolecular attractive forces)의 불균형으로부터 발생한다.

위 식에서도 알 수 있다시피, EW에서 접촉각에 영향을 주는 요소는 인가한 전압 외에도, 절연체의 유전상수와 두께, 접촉 계면에서의 액체 표면 장력이 있다.

전압의 경우 직류전압을 인가할 때보다 교류전압을 인가할 때 표면에 흡착되는 전하가 더 적고 그에 따라 접촉각의 차이가 더 커질 수 있다 [8]. 교류 전압을 사용할 경우 주파수가 액체의 유체역학적 응답속도(hydrodynamic response time)를 초과할 경우 액체의 응답은 전압의 실효값(V_{rms}, root mean square value)에 영향을 받는다 [9].

계면의 표면 장력은 주어진 표면이 편평하든 구조물이 형성되어 있는 상태이든 상관없이 액체의 접촉각에 영향을 주는 기본적인 요소이다. 열역학 법칙에 따르면 평형상태의 시스템은 가장 낮은 에너지 상태에 이르고자 한다. 예를 들어, 표면 위의 액체가 있을 때 그 액체는 반구형태를 띈다. 이는 계면의 표면장력에 의한 것이다. 물과 같이 높은 표면 장력(~72mN/m)을 가진 액체는 기판 위에서 강하게 구형태를 띈다. 이때 기판 표면 물질의 분극 정도(polarizability)의 특성에 따라서 같은

전압에서도 액체의 퍼짐 정도가 달라진다. 분극이 큰 표면은 일반적으로 소수성(hydrophobic) 성질을 띄고 액체의 접촉각은 90도 이상을 이룬다. EW에서는 표면을 소수성 물질로 사용하면 초기 0V에서의 접촉각과 전압 인가 후의 접촉각의 변화를 극적으로 볼 수 있다 [10]. 또한 EW현상에서 절연층의 절연 강도(dielectric strength)가 중요하다. 절연 강도는 절연파괴 전계와 같은 의미로써 이 숫자는 절연체의 최소 두께를 결정하는 요소이다.

2.2. 굴곡이 있는 표면에서의 젖음 상태

표면 거칠기의 젖음 특성에 대한 이론은 그림 2.2과 같이 Wenzel 상태와 Cassie-Baxter 상태가 존재한다.

그림 2.2의 (a)는 Wenzel 상태로써, 표면 거칠기로 인해서 표면과 액체 사이의 접촉면적(actual solid-liquid interfacial area, *A_{sl}*)이 편평한 표면에서의 접촉면적(projected actual solid-liquid interfacial area *A_{sl,p}*)보다 증가한다. 그 결과 거친 표면에서의 접촉각이 변하는데, 이는 평평한 표면에서의 접촉각 상태에 따라 달라진다. 평평한 표면에서의 접촉각(*θ_v*)이 90도 이상이었을 경우, 구조물이 있는 거친 표면에서의 접촉각(*θ*)은 증가하고 *θ_v*가 90도 이하일 경우에는 *θ*는 감소한다. 이는 식 2.2인 Wenzel 식에 의해서 표현된다.

cos θ = r · cos θ_ν (식 2.2) 이때 거칠기 정도(roughness ratio)를 나타내는 r = A_{sl}/A_{sl,p}이다.

그림 2.2 (b)는 Cassie-Baxter상태로써 이 상태에서는 구조물의 공간들 사이에 액체가 젖지 않고 공기층이 자리한다. A_{sl} 은 감소하고 대부분의 실질적인 기판과 액체 계면(apparaent solid-liquid interface)은 액체와 기체의 계면(liquid-vapour interface)으로 된다. A_{sl} 의 감소는 액체의 낮은 접촉각 히스테리시스(hysteresis)와 높은

이동성을 야기시킨다. 이 때의 접촉각은 Cassie-Baxter식인 다음으로 표현된다.

 $\cos \theta = -1 + f \cdot (1 + \cos \theta_v)$ (식 2.3) 이때 f는 구조물 윗부분의 부분적인(fractional) 표면적이다.

이 식에서 볼 수 있다시피 편평한 표면에서의 접촉각이 90° 이상일 경우에 Cassie-Baxter 상태의 액체는 표면의 거칠기 때문에 실질적인 접촉각이 증가한다. 이는 Wenzel의 경우와 반대되는 것으로 그 이유는 구조물 사이에 존재하는 공기층 때문이다.



그림 2.2. 구조물 위에서의 젖음에 관한 상태 (a)Wenzel 상태 (b)Cassie-Baxter상태

구조물이 형성된 기판에서 Cassie-Baxter 상태로부터 Wenzel 상태로 액체의 상태를 변화시키기 위해서는 두 상태의 에너지 장벽을 넘을 만한 외부의 힘이 필요하다. 이때 전압을 인가하는 EW 현상을 이용할 수 있다 [10].

2.3. 구조적 비등방적 젖음 현상

자연에는 특정 식물의 잎, 꽃잎 등에서 비등방적 젖음 현상이 발견된다. 또한 나비의 날개, 사막 딱정벌레와 같은 동물들의 특정 부분에서도 특별한 젖음 특성이 관찰된다 [11]. 식물과 동물들은 이 특성으로 인해서 주변 환경에 적응을 하고 살아남을 수 있다.

이런 동식물의 표면 특성에 영향을 받아 biomimetic 표면을 연구하고 그와 관련된 응용분야가 개발되고 있다. 이러한 젖음에 대한 제어 기술은 lab-on-a-chip과 같은 유체 이동의 부분적 제어에 응용될 수 있다.

비등방성 젖은 현상은 축의 방향에서의 이동 각도(sliding angles) 차이와 같은 역학적 특성과 방향에 따른 접촉각의 차이와 같은 정적 특성을 포함한다.

화학적 또는 구조적으로 비등방성을 갖는 표면 위에서 액체에 대한 비등방적 젖음은 두 가지 방법으로 표현된다. 첫 번째는 비등방적 젖음 정도를 굴곡의 방향에 대해서 수직하고 수평한 부분의 접촉각의 차이로 확인하는 것이다. 두 번째 방법은 액체가 퍼진 정도를 굴곡에 대해서 수직하고 수평한 부분에 대해 접촉면적에서의 액체의 지름 차이를 측정하는 것이다.

비등방적 젖음의 물리적 원인은 표면 구조의 급격한 경사면에서의 물리적으로 단절된 부분과 맞닿은 액체 접촉선(contact line)에 의한 것이다.

비등방성 표면을 만드는 방법에는 그림 2.3과 같이 광학적 리소그래피(optical lithograpy), 에칭(etching), 엠보싱(embossing)과 임프린팅(imprinting), 표면 주름 패턴(surface wrinkled patterns), 비대칭적(asymmetric) 나노 구조물 형성 등의 기술이 있다 [12]. 이런 기술을 이용하여 만들어진 구조물이 형성된 표면에서 액체는 비등방적으로 퍼진다.



(e)

그림 2.3. 비등방성 표면을 만드는 방법 (a)리소그래피 (b)에칭 (c)엠보싱과 임프린팅 (d)표면 주름 패턴 (e)비대칭적 나노 구조물

제 3장 실험 방법

이 장에서는 PI(Polyimide)기판을 러빙하여 증류수가 러빙 방향을 따라서 비등방적으로 젖는지 확인하였다. 그 후 마이크로 구조물 위에서의 액체의 전압에 따른 젖음 현상에 대해서 확인하였다. 이때 구조물은 25/10 과 100/40 주기를 갖는 두 가지를 사용하였고, 표면은 PMMA((Polymethyl methacrylate, MicroChem Co.)와 PMMA 위에 CYTOP(Poly[perfluoro(4-vinyloxy-1-butene)], CTL-809M, Asahi glass Co., Ltd.)을 올린 것을 사용하였다.

3.1. 배향막의 제작

본 연구에서는 액정분자가 배향막 위에서 배향되는 특성이 EW에서도 적용되는지를 살펴보기 위해서 배향막을 제작하였다. 배향막은 액정을 배향막에 수직으로 배향시키는 수직 배향막(AL00010, Japan Synthetic Rubber Co.)과 액정을 배향막에 수평으로 배향시키는 수평 배향막(RN1199A, Nissan Chemical Industries, Ltd)을 사용하였다.

배향막들은 ITO(Indium Tin Oxide)가 증착된 유리기판(ITO 기판) 위에 3000rpm(revolution per minute)으로 30 초 동안 스핀 코팅된 후 180℃에서 1 시간 동안 thermal annealing 되었다. 배향 특성을 주기 위해서 러빙천을 이용하여 손으로 3 번 러빙하였다. 이 때 형성된 배향막을 AFM(XE150, PSIA Inc.)으로 관찰한 결과 그림 3.1 과 3.2 에서 볼 수 있다시피 수직 배향막은 깊이 5nm, 수평 배향막은 깊이 16nm 인 주기가 일정하지 않은 폭을 가진다.

수직과 수평 배향막에 관해서 러빙을 하지 않은 기판과 러빙을 한 기판 총 4개에 대해서 전극을 연결하여 주고 EW현상의 관찰을 위해서 2000Hz로 0, 40, 80, 120, 160V를 인가해주었다.







(b)

그림 3.1. 수직 배향막의 AFM결과 (a)10um*10um에 대한 기판 표면 (b)기판의 높이



(a)



(b)

그림 3.2. 수평 배향막의 AFM결과 (a)10um*10um에 대한 기판 표면 (b)기판의 높이

3.2. 기판의 제작

비등방적 EW 현상을 관찰하기 위하여 마이크로 구조물을 가진 PMMA 와 CYTOP 물질을 올린 기판을 그림 3.3 과 같은 방식으로 제작하였다. 앞선 실험에서의 PI 와 비교해서 PMMA 와 CYTOP 의 유전상수와 표면장력은 표 3.1과 같은 특성을 가진다..

표 3.1. 각 물질의 유전 상수, 표면 장력 및 절연강도 특성

	Dielectric	Surface	Dielectric
	constant	tension(mN/m)	strength(MV/m)
PI	3.4-3.62	40	22
PMMA	4	39	25
CYTOP	2.1	19	110

우선 PI 기판과의 전기적 특성을 확인하기 위해서 ITO 기판 위에 PMMA 를 스핀 코팅한 기판과 PMMA 위에 CYTOP 까지 스핀 코팅한 기판을 만들었다.

PMMA를 ITO기판 위에서 2000rmp에서 30초간 스핀 코팅한 후 200℃에서 10분간 thermal annealing했다. PMMA위에 CYTOP을 올린 기판은 PMMA를 올리고 thermal annealing까지 한 기판에 CYTOP을 3000rpm에 30초간 스핀 코팅 후 185℃에서 30분간 thermal

annealing하여 만들었다.

마이크로 구조물을 가진 기판을 만들기 위해서 그림 3.3와 같이 PDMS (poly(dimethylsiloxane), Sylgard 184, Dow Corning, Midland, MI, USA)를 이용하여 임프린팅하였다. 마이크로 구조물을 가진 PMMA 의 경우는 CYTOP을 올리기 전까지의 공정을 통해서 만들었고, 마이크로 구조물이 형성된 PMMA위에 CYTOP을 올리면 CYTOP이 올라간 PMMA 기판이 만들어진다.



그림 3.3. 마이크로 구조물 만드는 방법

이때 25/10 주기(g=25, w=10)와 100/40 주기(g=100, w=40)를 가지는 PDMS 몰드를 사용하였다. 마이크로 구조를 갖는 PMMA 기판을 만들기 위해서는 PMMA 를 2000rpm, 30 초의 조건에서 스핀 코팅한 후 핫플레이트에 올리기 직전 마이크로 단위의 주기를 가지는 PDMA 몰드를 올리고 그 위해 3kg 짜리 추를 올려서 압력을 가하면서 임프린팅 하였다. 이때, PDMS 몰드 두께가 너무 얇거나 높으면 추를 올렸을 때 밀려서 패턴이 원하는 데로 형성되지 않기 때문에 몰드의 두께는 0.7cm 로 만들었다. PDMS 몰드는 PMMA 가 접착되면서 변형이 일어나서 일회용으로 사용하였다.

마이크로 구조물이 형성된 PMMA 위에 CYTOP이 올라간 표면을 만들기 위해서는 앞과 같은 방식으로 마이크로 구조물이 형성된 PMMA기판을 만든 후 CYTOP을 3000rpm, 30초 조건에서 스핀코팅하고 thermal annealing했다.

이렇게 만들어진 기판은 현미경을 통해 그림 3.4와 같이 그 주기가 제대로 나왔는지 확인 하였다. 또한 Alpha-step(KLA-TENCOR Co.)를 통해서 그 높이를 확인한 결과 PMMA 의 마이크로 구조물의 높이(h)는 1um 이고 CYTOP이 올라간 PMMA 구조물의 높이(h)는 600nm였다.



그림 3.4. 구조물이 형성된 표면의 현미경 사진 (a)PMMA 25/10 주기 (b)PMMA 100/40 주기 (c)CYTOP이 올라간 PMMA 25/10 주기 (d)CYTOP이 올라간 PMMA 100/40 주기

이렇게 만들어진 기판에 그림 3.5와 같이 전극을 연결하고 증류수(Dionized water)를 5ul 떨어뜨려 전압을 인가하면서 EW현상을 관찰하였다.



그림 3.5. 마이크로 구조물 위에서의 EW 모식도 (a)기판 구조물 위에서의 모식도 (b)Parallel to line 에 대한 개념 (c)Perpendicular to line 에 대한 개념

편평한 PMMA와 25/10주기와 100/40주기를 갖는 구조물이 형성된 PMMA, 평평한 PMMA위에 CYTOP을 올린 것, 25/10와 100/40짜리

구조물을 형성한 PMMA기판 위에 CYTOP을 올린 기판으로 총 6개의 기판을 제작하였다.

이 6개의 기판에 전극을 달아주고 3000Hz로 0에서 360V까지 순차적으로 전압을 인가하고 360V부터 0V까지 점차로 낮은 전압을 인가해서 EW현상의 메모리 효과 및 가역성을 확인하였다.

트랩된 전하(trapped charge)가 이완(relaxation)되는지를 확인하기 위해서 각 기판에 대해서 동일 액체에서 0, 60, 120, 240, 120, 60, 0V를 인가하고 1분 간의 이완시간을 주는 실험을 3번 반복하였다.

이렇게 제작된 기판은 평션 제너레이터(Standard Research Systems Inc.)와 앰플리파이어(AVTECH Inc.)를 사용하여 전압을 인가하고 GSA10(KRUSS Co., Ltd.)기계를 사용하여 접촉각의 변화와 퍼짐 정도를 측정하였다. 이 때 퍼짐 정도에 대한 액체의 지름은 BD(base diameter)로 표현한다.

본 연구에서는 액체로써 증류수 5ul로 사용하고 액체에 꽂는 탐침으로는 nickel 소재의 침핀을 사용하였다.

제 4장 결과 및 분석

이 장에서는 앞의 실험의 결과로 러빙된 배향막에서의 액체의 젖음 상태를 살펴보았다. 그리고 PMMA 와 PMMA 위에 CYTOP 을 코팅한 표면에서의 액체의 EW 현상을 통해 메모리 특성 및 가역적 특성을 확인하였다. 그 후 구조물이 형성된 표면 위에서의 EW 현상을 통해서 PMMA 표면에 대한 메모리 효과를 지닌 비등방적 특성 및 CYTOP 표면에서의 등방적 퍼짐 특성에 대해서 확인하였다.
4.1. 배향막에서의 EW 결과

1900 년대 초 Mauguin 이 액정의 배향 방법으로 러빙을 보고한 이후로 배향막을 러빙시키는 것이 액정을 배향시키는 가장 주된 배향공정으로 사용되어 왔다. 러빙을 통해서 형성된 나노 단위의 거칠한 표면은 액정을 배향시키는 한 요소이다.

이를 응용하여 증류수를 러빙된 배향막 위 두고 EW 현상을 관찰할 경우 증류수가 배향막의 러빙 방향으로 퍼지는지를 확인했다. 수직 배향막인 AL00010 과 수평 배향막인 RN1199A 에 대해서 러빙하지 않은 기판과 러빙한 기판의 수직방향, 수평방향에서의 접촉각을 관찰했다.

그 결과 그림 4.1 에서처럼 동일 전압에서 러빙의 유무에 따른
기판에 대해서 변화된 액체의 접촉각에 차이가 없음을 확인하였다.
그러나 두 배향막 모두 전압이 160V 이상에서는 액체와 맞닿은 기판이
검게 타는 문제가 발생하였다.

러빙 방향에 무관하게 액체가 등방적으로 퍼지는 이유는 액정 분자와 5ul 물과의 크기(dimension)차이로 인해 물이 표면의 거칠기를 감지하지 못하기 때문이다. 일반적으로 배향막인 PI 기판 두 개를 10um 이내의 두께로 만들어서 그 사이에 액정을 모세관 효과(capillary

effect)를 이용하여 주입하고 배향이 잘 되었는지를 관찰한다. 이때 1.3nm 의 크기를 갖는 액정 분자는 셀 내에서 배향막의 2-20nm 의 깊이를 가지고 100-400nm 의 폭을 가지는 불규칙한 스크래치인 러빙에 대해서 표면의 굴곡을 느낄 수 있다. 하지만 5ul 의 물방울은 그 정도의 거칠기를 갖는 표면에 대해서 굴곡을 느낄 수 없다.





그림 4.1. PI 표면에서의 전압 인가에 따른 접촉각 변화 (a)수직 배향막 (b)수평 배향막

4.2. 표면 물질에 따른 메모리 효과에 대한 비교

앞 장에서 배향막의 러빙 효과만으로는 액체의 퍼짐 정도를 제어할 수 없음을 확인하였다. 이에 따라 마이크로 단위의 패턴을 형성하여 물방울의 수직, 수평으로의 퍼짐 정도를 확인하였다. 마이크로 구조물 형성을 위해서는 배향막이 아닌 PMMA물질을 이용하였다. 배향막은 두께가 얇아서 구조물을 형성시키기 어렵고 160V에서 액체 아래의 기판이 검게 타는 문제가 생기는 것으로 보아 높은 전압에서의 구동에 문제가 있다. 이는 PI의 절연 강도(22MV/m)가 적으면서 두께도 얇아서 생긴 문제이다. 그리하여 본 실험에서는 마이크로 구조물을 갖는 절연층으로써 절연 강도가 25MV/m이고 PI보다 두껍게 코팅되는 물질인 PMMA를 사용하였다.

전압이 액체와 기판 사이에 인가되면 인가된 전하들이 액체와 기판 사이의 계면에 형성되어 커패시턴스를 형성한다. 이 전하들은 계면의 자유에너지에 변화를 일으켜서 액체를 기판에 퍼지게 함으로써 안정된 상태가 된다. 전압을 제거하기 전까지는 다른 외부 자극이 없는 한 액체의 변화된 접촉각은 유지된다. 전압을 제거하면 표면에 있던 전하가 제거되면서 액체가 초기의 접촉각을 지닌 상태로 돌아간다. 하지만 각 물질마다 특정 전압 이상에서는 인가된 전압을 제거하여도 액체가

초기의 접촉각 상태로 돌아가지 않는다. 이를 PMMA와 PMMA위에 CYTOP을 올린 기판을 통해서 확인하였다.

그림 4.2 의 (a)에서처럼 PMMA 를 코팅한 기판에 5ul 물방울을 떨어뜨린 후 전극을 형성하여 전압을 0V 에서 360V 까지 순차적으로 인가한 결과 60V 이후의 접촉각은 360V 까지 변화가 없었다. 그 후 360V 에서 다시 0V 로 전압을 낮추어 인가하면서 관찰한 결과 접촉각이 초기의 0V 일 때의 상태로 돌아가지 않았다. 그림 4.3 의 PMMA 위에서의 전압 인가에 따른 접촉각 변화 사진을 통해서도 확인할 수 있다. 이는 EW 의 메모리 특성이다.

EW현상의 메모리 특성이 나타나는 이유는 기판 표면의 극성과 액체의 극성이 서로 반대 극을 끌어당기는 힘과 액체 내의 이온들이 액체와 기판 사이의 계면에서 전하의 트랩으로 인한 것이다 [13]. 액체와 전극 기판 사이에 전압을 인가하면, 전기적 힘은 액체 내의 극성 분자 및 이온들에 일을 주어 이들을 유전체 층으로 밀어낸다. 극성 분자의 경우 기판 표면의 분극 정도에 따라서 기판과의 접착력에 영향을 주어 액체의 퍼짐 정도가 기판 표면의 분극 정도에 따라서 달라질 수 있다. 그리고 유전체 표면과 이온들의 상호작용이 액체와 이온들간의 상호작용보다 강할 때, 전하들이 유전체의 표면이나 그 내부에 트랩된다. 즉, 서로 다른 전하끼리는 끌어당기고 같은 전하끼리는 밀어내는 힘인

정전기적 힘(electrostatic force)에 의해 액체 내의 이온들이 기판의 표면에 갇히게 되면서 전하의 트랩이 발생한 것이다. 전하의 트랩으로 액체와 기판 사이에 균일한 전하 분포가 형성되어 EW 힘이 감소한다. 전하 트랩을 고려한 EW를 수식적으로 표현하면 다음과 같다 [13]

$$\cos\theta(V_{app}) = \cos\theta_0 + \frac{c[(V_{app} - V_{pzc}) - V_c]^2}{2\gamma_{lv}}$$
(4.1)

이 때 θ는 인가한 인가한 전압에서의 접촉각, V_{app}은 인가한 전압, θ₀ 는 전압을 인가하기 전의 접촉각, C는 유전체의 단위 면적당 커패시턴스, V_{pzc}는 전하가 없을 때의 전압(이는 OV와 같지 않을 수 있다 [13]), V_c는 전하가 트랩되었을 때의 전압, γ_{lv}는 액체의 표면 에너지이다.

수식을 통해서 확인할 수 있다시피 인가한 전압과 트랩된 전하의 차이가 액체의 접촉각을 변화시키는 힘으로 작용한다. Vpzc 를 0V라고 가정했을 때 PMMA의 경우 전압 인가를 더 했음에도 불구하고 접촉각이 더 이상 줄어들지 않는 contact angle saturation이 일어나는 80V에서의 Vc 는 50V이고 PMMA위에 CYTOP을 올린 경우에는 접촉각의 saturation은 240V에서 일어나며 이때의 Vc는 210V이다. 트랩된 전하의 차이는 각 물질의 극성 차이에 의한 것으로 이들은 contact angle saturation이 되는 전압과 연계된다.

PMMA 만 올린 기판과 다르게 PMMA 위에 CYTOP 을 코팅한 기판에서는 전압에 따른 액체 젖음의 가역적인 현상을 관찰하였다. 이때, CYTOP 만을 올린 기판을 사용할 경우 CYTOP 의 얇은 두께 때문에 마이크로 구조를 형성하기 힘들기 때문에 PMMA 위에 CYTOP 을 올렸다.

그림 4.2 의 (b)를 보면 PMMA 위에 CYTOP 을 올린 경우 80V 이상에서는 전압의 인가에 따른 접촉각에 변화가 없다. 그 후 인가된 전압을 순차적으로 제거할 경우 접촉각은 전압을 인가하기 전의 상태와 같아진다. 그림 4.4 의 PMMA 위에서의 CYTOP 이 있는 표면에서의 전압 인가에 따른 접촉각 변화 사진을 통해서도 확인할 수 있다. 이는 전압 인가에 따른 EW 현상의 가역적인 특성이다.

PMMA 표면인 기판의 경우 전압인가에 따른 접촉각 상태의 메모리 특성을 보인데 반해 CYTOP 이 추가로 올라간 기판이 가역적인 특성을 보인다.

두 기판이 전압 인가와 제거에 따라서 접촉각 변화의 메모리 효과 및 가역적이라는 서로 다른 특성을 보이는 이유는 두 기판 표면의 분극 정도에 따른 극성 차이 때문이라고 생각된다. 일반적으로 기판의 극성 차이는 유전상수의 차이로 확인할 수 있으며 이는 표면 장력에 영향을 미친다.

일반적인 경우 극성이 큰 물질일수록 물질 양단의 전압 차이에 의해 축적되는 전하의 정도가 크므로 유전상수가 크다. 또한 극성이 크다는 것은 물을 비롯한 극성분자와 높은 친화성을 지니는 극성기를 많이 가졌다는 뜻이다. 그러므로 극성이 크다는 것은 친수성(hydrophilic)을 띈다고 할 수 있으며, 친수성이 높은 물질일수록 표면장력은 커진다.

전하의 트랩은 액체 내 이온들과 전극 표면 사이의 끌어당기는 정전기적 힘에 의해서 발생한다. 이온들의 정전기적 힘이 액체와 이온들 사이의 힘을 넘어서면, 이온들은 유전체쪽으로 이동해서 유전체 층의 위나 그 내부에 존재하게 된다. 그 이온들은 표면에서 수화막(hydration shell)을 형성하게 된다 [14]. 즉, 극성이 큰 특성을 갖는 PMMA 물질을 표면으로 갖는 기판의 경우 전압 인가에 의해서 표면에 극성분자들이 많이 배열하게 되고 그 극성분자들은 트랩된 전하들과 수화막을 형성하게 된다. 인가했던 전압을 제거하여도 빠른 시간 내에 수화막을 형성한 이온들이 원상 복구되지 않으면 전하 트랩이 계속 존재하게 되어 접촉각의 메모리 효과를 볼 수 있다. 반면 극성이 PMMA 보다 작은 CYTOP 의 경우, 전압 인가에 의해서 표면에 트랩된 전하들이 적고 이들은 전압을 제거하면 원래 상태로 복구되며 이때 전압 인가에 따라서 접촉각은 가역적으로 변한다.





그림 4.2. 전압인가에 따른 접촉각 변화 (a)PMMA 표면 (b)PMMA 위에 CYTOP을 올린 표면









(d)





그림 4.3. PMMA 표면에서 인가하는 전압을 다르게 해주었을 때의 접촉각 변화 (a)0V (b)60V (c)360V (d)60V (e)0V









(d)





그림 4.4. PMMA 위에 CYTOP 을 올린 표면에서 인가하는 전압을 다르게 해주었을 때의 접촉각 변화 (a)0V (b)60V (c)360V (d)60V (e)0V



4.3. 이완 시간에 따른 트랩된 전하에 대한 관찰

앞의 4.2절에서 전하의 트랩 때문에 접촉각의 변화가 메모리 특성을 나타낸다는 결론을 내렸다. 본 절에서는 기판에 트랩된 전하가 시간이 지남에 따라서 제거되면 EW현상의 메모리 특성 및 가역성에 어떤 차이가 발생하는지 관찰했다.

앞의 실험에서는 전압을 순차적으로 인가하였다가 순차적으로 제거하여 총 실험이 1분 40초간 진행되었다. 이번 실험에서는 순차적으로 전압을 인가하였다가 제거한 후(1st time) 이완 시간을 1분간 준 후에 다시 또 순차적으로 같은 전압을 인가하고 제거하는 과정(2nd time)의 실험을 3세트 진행하였다. 앞선 실험과 다르게 더 적은 횟수의 전압을 인가하여 한 세트당 실험은 40초간 진행되었고 세트들 사이에 1분간의 이완 시간을 두어 총 3세트의 실험이 4분 내에 진행되어 증류수의 시간에 따른 증발 문제를 배제하였다.

그림 4.5의 (a)에서 보듯이 PMMA기판의 경우 초기에 69.9°이던 접촉각이 1세트(1st time)를 거치면서 61.8°가 되었다. 2번째 세트(2nd time)의 전압을 인가하기 전 접촉각이 64°로 1세트의 마지막 접촉각보다 커졌다. 그러나 전압을 인가하기 전 초기 상태의 접촉각보다는 작은 것으로 보아 여전히 전하가 트랩되어 있음을 알 수 있다. 두 번째

세트의 전압을 인가하고 제거함에 따라서 접촉각은 다시 61.5°도로 되었다. 그 후 3번째 세트(3rd time)의 실험을 할 때 접촉각이 63.4°에서 60.9°로 됨을 확인할 수 있다. 결과적으로 이완 시간을 주어도 트랩된 전하가 충분히 제거되지 않아 메모리 특성을 지님을 확인하였다.

반면 그림 4.5의 (b)를 보면 PMMA위에 CYTOP을 코팅한 기관의 경우에는 애초에 트랩된 전하가 없기 때문에 이완시간을 주어도 3세트를 거치는 실험 동안 각 세트의 간의 접촉각에 차이가 없음을 확인하였다. 이로써 PMMA위에 CYTOP을 코팅한 경우는 여러 번 실험하여도 전압에 따른 액체의 접촉각이 가역적이라고 할 수 있다. 이를 통해 여러 번 동일 실험을 하여도 PMMA위에 CYTOP을 올린 기판의 경우에는 트랩된 전하가 적으며 수화막 현상이 잘 일어나지 않아서 EW현상이 가역적으로 일어남을 알 수 있다.

PMMA 표면의 기판에 관한 이완시간 실험에서 세트 2의 초기 접촉각(64.0°)이 세트 1의 초기 접촉각(69.9°)보다는 작지만, 세트 1의 전압 제거 후 접촉각(61.8°)보다 커진 것을 통해서 1분간 적게나마 전하가 제거되었다고 할 수 있다. 이를 통해서 PMMA 기판의 경우 더 긴 시간을 이완시간으로 줄 수 있다면 트랩된 전하가 충분히 제거되어 액체의 접촉각이 전압을 걸기 전 초기 접촉각의 값으로 돌아올 수 있을 것으로 예상된다.





그림 4.5. 이완시간에 따른 EW 현상 (a)PMMA 표면 (b)PMMA 위에 CYTOP 이 올라간 표면

4.4. 마이크로 구조물이 형성된 기판에서의 퍼짐의 등방성 정도에 대한 EW 관찰

EW에서 액체의 젖음 정도에 영향을 주는 요소는 인가전압, 액체의 종류, 기판에 코팅된 물질의 화학적 특성 및 표면 거칠기 등이 있다. 본 장에서는 이 요소들 중 물질 표면의 거칠기에 차이를 만들어 액체의 젖음 정도를 확인하였다.

표면 거칠기가 nm단위일 경우에는 PI에 대한 앞선 실험에서 확인했다시피 표면 거칠기의 수직과 수평 방향에 대해서 5ul 물방울에 젖음 정도에 대한 차이를 줄 수 없어서 표면 거칠기를 충분히 주기 위해서 마이크로 단위의 구조물을 만들었다. 마이크로 단위 구조물은 주기 25/10짜리와 100/40짜리를 만들었다. 이는 액체가 단위 면적당 구조물을 덮은 정도에 차이를 주어 액체 내에 존재하는 구조물의 경사면에서의 전계에 차이를 주기 위함이다.

그림 4.6과 그림 4.8을 통해 확인할 수 있다시피 PMMA로 마이크로 구조물을 형성한 표면의 경우 EW는 메모리 특성을 보이고 PMMA 위에 CYTOP이 올라간 표면의 경우에는 가역적인 EW 특성을 보인다.

또한 마이크로 구조물 위에서는 그림 4.2의 편평한 기판일 때보다 접촉각이 증가한다. 이는 마이크로 구조물 위에서 액체가 Wenzel

상태보다는 Wenzel과 Cassie-Baxter상태가 혼재된 상태로 되었기 때문이라고 할 수 있다. 이 상태에서 액체의 접촉면적은 감소하며 접착력이 감소된다 [15].

이때 전압을 인가하면 액체가 기판 표면에 젖으면서 마이크로 구조물 사이의 공간을 채우게 되고 이로써 접촉면적이 증가하게 된다. 액체와 기판 계면에서의 이런 변화는 접착력을 증가시키고 이로써 액체는 표면을 따라 퍼지게 된다.

표 4.1 은 그림 4.6 와 4.7 의 수치에 대한 정리로써 전압을 인가하기 전의 0V 일 때의 접촉각과 전압을 순차적으로 360V 까지 인가 후 다시 0V 로 낮추어가며 인가하였을 때 측정된 접촉각의 차이(△*θ*)와 0V 에서의 물방울 지름에 대한 값을 구조물에 수평한 것과 수직한 것에 대해서 나타내었다.

표 4.1의 △ *θ*에서 확인할 수 있다시피 PMMA의 경우 모든 패턴에 대해서 수평한 방향으로의 접촉각의 변화가 더 크다. 전압을 인가하기 전 OV 상태의 물방울 지름을 통해서도 액체가 구조물의 주기에 상관없이 구조물의 라인에 수평한 방향으로 퍼짐을 확인하였다.

하지만, 전압을 인가하기 전 0V에서 액체의 지름을 보면 25/10주기와 100/40주기에서 초기의 퍼진 정도에 차이가 있다. PMMA 100/40에 비해서 PMMA 25/10의 경우 전압을 인가하기 전 이미 충분히

표 4.1 마이크로 구조물을 지닌 PMMA 표면에 대한 전압 인가에 따른 접촉각과 초기 0V 에서의 BD

	$ riangle heta(ext{Deg.})$		BD(mm) at 0V	
	수평	수직	수평	수직
25/10	27.1	25.8	3.02	2.53
100/40	29.7	23.6	3.11	2.90

표 4.2를 통해서 전압 인가에 따른 각 구조물에 대한 액체 지름의 변화를 살펴보았다. 전압 인가에 따른 액체 지름의 변화(△BD)를 확인하면, 액체가 구조물의 주기에 상관없이 구조물의 라인에 수평한 방향으로 더 퍼졌음을 알 수 있다. 퍼진 정도에 대한 퍼센트를 확인하면(△BD(%)) 수평과 수직 방향에 대해서 25/10짜리의 변화율의 차이(4.78 %)는 100/40짜리의 변화율의 차이(8.32 %)보다 적다. △BD와 △BD(%)의 차이를 확인해보면 25/10주기는 전압을 인가하기 전 충분히 비등방적으로 퍼진 상태여서 전압으로 인한 퍼짐 효과가 상대적으로 적다. 반면 100/40주기의 경우 전압으로 인해서 초기보다 더 비등방적으로 퍼지기 때문에 △BD(%)의 수평과 수직의 차이가 25/10주기의 것보다 크다.

표 4.2 마이크로 구조물을 지닌 PMMA 표면에서 전압 인가에 따른 BD 값의 변화와 그 증감량의 변화

	△BD	(mm)	riangle BD(%)		
	수평	수직	수평	수직	
25/10	0.70	0.46	22.9	18.2	
100/40	0.72	0.43	23.0	14.7	

주기 25/10과 주기 100/40의 구조물에서 전압 인가에 따른 액체의 수평 및 수직에 대한 퍼짐의 차이는 접착력과 관계된 모세관 효과와 전압으로 인한 효과의 관계를 통해 설명된다.

모세관 현상은 액체가 담긴 작은 크기의 튜브 내에서 액체를 위로 끌어올리는 현상으로써 액체와 고체 기판 사이에 끌어당기는 힘인 접착력에 의한 힘이다. 접착력의 변화는 다음의 단위 면적당 접착일인 접착일 밀도(adhesion work density)의 계산에 의해서 설명된다 [16].

 $W = \gamma_{ls} (1 + \cos \theta_0) \tag{4.2}$

W는 접착일 밀도, γ_{ls}은 액체와 기판의 표면장력, θ₀는 실질적인 접촉각이다. 각 기판에서의 증류수(γ_{ls}=72 mN/m)에 대한 접착일 밀도를 살펴보면 표 4.3과 같다. 이때 전압을 순차적으로 인가하였다가 낮추어가면서 0V가 되었을 때를 실험 후 0V라고 정의하였다. △W는 수평 및 수직에 대해서 각각의 실험 후 0V의 접착일 밀도와 초기 0V에서의 접착일 밀도의 차이라고 정의하였다.

표 4.3 의 초기 0V 와 실험 후 0V 의 접착일 밀도의 변화를 확인해보면, 어떤 주기의 구조물이든 그리고 어떤 방향이든 모두 실험 후의 접착일 밀도가 증가하였다. 이를 통해서 인가된 전압이 액체의 총 에너지에 변화를 일으켰음을 알 수 있다. 액체가 구조물에 수평 및 수직으로 펴진 것에 대해서 전압을 인가하기 전의 0V 상태와 전압을 인가하였다가 제거한 후의 0V 상태에서의 접착일 밀도의 차이를 살펴보면(Δ W) 주기가 25/10 인 경우에는 수평에 대한 접착일 밀도의 변화가 수직일 때보다 1.0 mN/m 만큼 더 크다. 그리고 주기가 100/40 인 경우에는 수평으로의 접착일 밀도 변화가 수직으로의 접착일 밀도 변화보다 6.1 mN/m 만큼 크다. 이를 통해서 전압 인가에 따라서 주기가 100/40 인 경우의 PMMA 구조물 위에서의 액체가 주기가 25/10 인 구조물 위의 액체에 비해서 수직보다는 수평으로 더 잘 퍼짐을 확인하였다. 접착일 밀도의 변화에 대한 이 결과는 표 4.2 의 BD 의 변화에 대한 결과와 동일하다.

전압을 걸기 전 초기 0V 일 때의 수평과 수직의 W의 차이(ΔW₂₅₁₀ =22.5, ΔW₁₀₀₄₀=19.0)를 통해서 25/10 짜리의 비등방적으로 퍼진 정도가 100/40 짜리의 퍼짐 정도보다 큼을 확인하였다. 실험 후의 0V 에서의 수평과 수직의 접착일 밀도의 차이를 (ΔW₂₅₁₀=23.5, ΔW₁₀₀₄₀=25.1) 통해서 전압 인가에 의해서 100/40 주기의 구조물에서의 액체의 접착

정도가 주기 25/10 구조물 위에서의 것보다 증가함을 알 수 있다. 접착 정도의 증가에 따라 액체는 그 방향으로 비등방적으로 길게 퍼진다.

접착일 밀도의 변화를 통해서 마이크로 구조물의 주기가 25/10 일 때는 전압을 인가하기 전에도 이미 충분히 접착일 밀도가 커서 비등방적으로 퍼진 상태여서 전압에 따른 비등방적 변화가 주기 100/40 인 구조물에서의 액체의 젖음에 비해 상대적으로 크지 않음을 확인하였다.

표 4.3 마이크로 구조물이 형성된 PMMA에서 방향별 접착일 밀도

	수평			수직		
	초기 0V	실험 후 0V	$\bigtriangleup W$.	초기 0V	실험 후 0V	$ riangle W_{\perp}$
25/10	70.7	103.7	33.0	48.2	80.2	32.0
100/40	72.9	108.4	35.5	53.9	83.3	29.4

이 실험에서 예상과 다르게 액체의 퍼짐이 양쪽 라인에서 완벽히 동일하거나 퍼짐의 앞뒤가 완벽히 동일하지는 않았다. 그 이유는 채널 내의 표면 거칠기와 결함들에 의한 채널 내에서 계면의 pinning 때문이라고 생각된다.

PMMA로 마이크로 구조물을 형성하고 그 위에 CYTOP을 올린 경우에는 그림 4.8과 4.9를 통해서도 확인하듯이 구조물의 폭에

상관없이 전압 인가에 따라서 가역적이면서도 등방적인 퍼짐을 보인다. 이때 EW현상이 가역적인 이유는 마이크로 구조물을 형성하기 전의 실험을 통해서 설명한 이유와 같다. 한편 마이크로 구조물로 형성된 PMMA 위에 CYTOP을 올린 경우에는 비등방적 젖음을 확인하기는 어렵다. 이는 구조물의 도입으로 인한 수평, 수직 접착력의 변화 가능성보다 CYTOP의 낮은 표면 장력(19mN/m)의 힘이 액체 젖음 정도에 영향을 더 많이 주기 때문으로 해석된다. 만약 구조물의 주기와 높이에 대한 aspect ratio를 잘 제어한다면 CYTOP의 경우에도 비등방적인 퍼짐을 관찰할 수 있을 것으로 예상된다 [17].

그림 4.10과 4.11를 보면 PMMA 마이크로 구조물 위에 CYTOP이 올라가지 않은 표면과 올라간 표면에서의 전압을 인가하기 전 초기 상태의 0V일 때와 360V일 때의 젖음 차이를 확인할 수 있다. PMMA 표면일 경우 액체가 구조물에 수평하게 퍼지는데 반해, CYTOP 표면의 경우에는 등방적으로 액체가 퍼짐을 현미경을 통해서도 확인하였다.

구조물이 형성된 표면의 기관들에 대해서도 이완 시간을 주어서 트랩된 전하가 이완되는지 정도를 확인해보았다.

그림 4.12와 그림 4.13를 보면 앞선 4.3절에서의 실험과 마찬가지로 PMMA로 구조물을 형성한 경우에는 1분 내에 트랩된 전하가 충분히 제거되지 않았다.

그림 4.14와 그림 4.15를 보면 PMMA로 구조물을 형성하고 CYTOP을 올린 경우도 앞선 4.3절에서의 실험과 마찬가지로 각 실험 세트에서 트랩된 전하가 적게 존재하기 때문에 이완 시간을 주어도 같은 정도로 젖음 현상이 일어났다.





그림 4.6. 전압 인가에 따른 접촉각의 변화 (a)PMMA 25/10 기판 (b)PMMA 100/40 기판





그림 4.7. 전압 인가에 따른 BD 의 변화 (a)PMMA 25/10 기판 (b)PMMA 100/40 기판





그림 4.8. 전압 인가에 따른 접촉각의 변화 (a)PMMA 25/10 위에 CYTOP 올린 기판 (b)PMMA 100/40위에 CYTOP올린 기판





그림 4.9. 전압 인가에 따른 BD의 변화 (a)PMMA 25/10 위에 CYTOP 올린 기판 (b)PMMA 100/40위에 CYTOP올린 기판







(c)

(d)

그림 4.10. 구조물이 형성된 PMMA 표면에서의 EW (a)PMMA 100/40 표면에 대한 0V에서의 EW (b) PMMA 100/40 표면에 대한 360V에서의 EW (c)PMMA 100/40 위에 CYTOP 올린 표면에 대한 0V에서의 EW (d)PMMA 100/40 위에 CYTOP 올린 표면에 대한 360V에서의 EW





그림 4.11. PMMA 25/10 표면에서 전압 인가와 이완 시간에 따른 접촉각 변화 (a)수평 (b)수직





그림 4.12. PMMA 100/40 표면에서 전압 인가와 이완 시간에 따른 접촉각 변화 (a)수평 (b)수직





그림 4.13. PMMA 25/10 위에 CYTOP 올린 표면에서 전압 인가와 이완 시간에 따른 접촉각 변화 (a)수평 (b)수직





그림 4.14. PMMA 100/40 위에 CYTOP 올린 표면에서 전압 인가와 이완 시간에 따른 접촉각 변화 (a)수평 (b)수직

제 5장 결론

최근 다양한 분야로의 응용이 가능한 EW 에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 유체의 부분적 거동의 방향 및 그 상태를 제어하는 기술에 대한 연구가 미흡하다.

이에 본 연구에서는 전기 습윤 현상을 액체의 부분적 거동을 위한 측면에서 연구하였다. 우선 러빙된 배향막을 이용하여 액정처럼 증류수에 전압을 걸었을 때 한 방향으로 정렬하는지를 살펴보았다. 그 결과 러빙된 배향막에서는 증류수가 수 nm로 파인 깊이와 폭을 감지하지 못해서 한 방향으로 퍼지지 않았다. 그리고 기판 표면에 사용하는 물질의 극성 정도의 차이에 따라서 다른 퍼짐 특성을 보였다. PMMA를 올린 표면에서의 경우 액체는 메모리 효과를 보였고 PMMA위에 CYTOP을 올린 표면에 대해서 액체는 가역적인 EW현상을 보였다.

이들 물질을 이용하여 액체에 영향을 미칠 수 있는 단위의 구조물을 형성하기 위해서 PMMA로 마이크로 구조물을 형성하였고, 그 위에 CYTOP을 코팅하여 PMMA 구조물만 있을 때와의 표면 특성에 변화를 주어 그 차이를 관찰하였다. PMMA 마이크로 구조물에서 액체는 구조물에 수평하게 비등방적으로 퍼지면서 전압 인가에 따라서 메모리 특성을 보였다. PMMA 구조물 위에 CYTOP이 올라간 경우에 액체는

구조물에 등방적으로 퍼지고 전압 인가에 따라서 가역적인 특성을 보였다.

각 물질에 대해서 서로 다른 주기를 갖는 구조물을 형성하여 접착력에 대한 관계도 살펴보았다. 그 결과 PMMA 25/10주기의 경우가 100/40주기보다 전압을 인가하기 전 초기에도 더 비등방적으로 퍼져있어서 전압에 의한 퍼짐 효과가 상대적으로 적었다.

마이크로 구조물이 형성된 PMMA의 표면에서 EW의 메모리 특성 및 비등방성 젖음 특성을 이용하여 액체를 원하는 방향으로 퍼지게 하며 한번 인가한 전압으로 그 상태를 유지하여 액체의 혼합 및 검출에 응용할 수 있다.

참고문헌

[1] V. Srinivasan, V.K. Pamula, and R.B. Fair, *Lab Chip* 4, 310-315(2004)

[2] B. Berge and J. Peseux, *Eur. Phys. J. E* **3**, 159–163 (2000)

[3] R.A. Hayes and B.J. Feenstra, Nature 425 383-385 (2003)

[4] Y. Y. Lin, R. D. Evans, E. Welch, and R. B. Fair, *Sensors and Actuat. B-Chem.* **150**, 465–470 (2010)

[5] A. N. Banerjee, S. Qian, and S. W. Joo, *J. Colloid Interface Sci.* 362, 567–574 (2011)

[6] R. J. Vrancken, H. Kusumaatmaja, K. Hermans, A. M. Prenen, O. Pierre-Louis, C. W. M. Bastiaansen, and D. J. Broer, *Langmuir* 26, 3335–3341 (2010)

[7] B. Berge, C. R. Acad. Sci. II 317, 157-163 (1993)

[8] Y. S. Nanayakkara, S. Perera, S. Bindiganavale, E. Wanigasekara,

H. Moon, and D. W. Armstrong, Anal. Chem. 82, 3146-3154 (2010)

[9] A. Wixforth, C. Strobl, C. Gauer, A. Toegl, J. Scriba, and Z. V.Guttenberg, *Anal. Bioanal. Chem.* 379, 982-991 (2004)

[10] F. Mugele and J.-C. Baret, J. Phys.: Condens. Matter 17, R705– R774 (2005)

[11] T. N. Krupenkin, J. A. Taylor, T. M. Schneider, and S. Yang, Langmuir 20, 3824-3827 (2004)

[12] L. Zhai, M. C. Berg, F. C. Cebeci, Y. Kim, J. M. Milwid, M. F. Rubner, and R. E. Cohen, *Nano Lett.* 6, 1213–1217 (2006)

[13] D. Xia, L. M. Johnson, and G. P. López, Adv. Mater. 24, 1287– 1302 (2012)

[14] S. Berry, J. Kedzierski, and B. Abedian *Langmuir*, 23, 12429-12435 (2007)

[15] H. J. J. Verheijen and M. W. J. Prins, *Langmuir* 15, 6616-6620 (1999)

[16] Z. Burton and B. Bhushan, Nano Lett. 5, 1607–1613 (2005).

[17] S.-J. Park, H.-C. Kim, and H.-Y. Kim, *J. Colloid Interface Sci.*255, 145–149 (2002)

Abstract

The researches of Elwctrowetting have attracted a lot of interests owing to its useful applications such as display technology, lens and lab-on-a-chip. However, there are few researches for controlling memory effect and anisotropic electrowetting. In this work, we give studies based on electrowetting to control fragment movements of liquids by using different surface materials and introducing microstructured surfaces. The surfaces were made by different chemicals and different period structures, which are related to memory effect and anisotropic wetting of liquid. The memory effect is attributed to trapped charges in or on dielectric layer and anisotropic wetting results from the difference between adhesion force and applied voltage effect. This study is expected to use for memory effect and anisotropic electrowetting on microstructured surface.

Key Word: Electrowetting, Memory effect, Anisotropy Student Number: 2011–20865