

**일렉트로웨팅구동형 MEMS기반 액체렌즈**

**이준규\***, 박경우\*, 강현오\*, 김재건\*\*, 김학린\*, 공성호\*  
 경북대학교 전자전기컴퓨터학부\*, 경북대학교 센서 및 디스플레이공학과\*\*

**Electrowetting-based liquid lens fabricated by MEMS technology**

June Kyoo Lee\*, Kyung-Woo Park\*, Hyun Oh Kang\*, Jae Kun Kim\*\*, Hak-Rin Kim\*, Seong Ho Kong\*  
 School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University\*  
 Department of Sensor and Display Engineering, Kyungpook National University\*\*

**Abstract** - 기존의 초소형 렌즈모듈들은 초점 거리 가변을 위한 구동 장치가 필요하여 소형화 한계, 큰 전력소모, 부품의 기계적 결합 등 해결해야 할 부가적인 문제점들이 존재하였다. 액체렌즈는 이러한 문제를 해결할 수 있는 유력한 기술로 주목받고 있으며, 특히 부가적인 구동 장치가 필요없고 비교적 간단한 원리로 렌즈 곡률을 조절할 수 있는 일렉트로웨팅 기반의 액체렌즈는 초점 거리 조절 및 줌 조절이 필요한 휴대 폰, 웹캠 내시경 등에 적용이 가능하다. 그러나 기존의 일렉트로웨팅 기반의 액체렌즈는 렌즈 캐비티의 크기에서 큰 단점이 있으며, 렌즈모듈 구성 시에도 소형화하는데 한계가 존재하였다. 본 연구에서는 렌즈 캐비티를 MEMS 기술을 이용하여 실리콘 기판 상에 제작함으로써 구동회로의 집적이 가능한 액체렌즈를 제작하였다.

각각 절연막의 유전상수와 두께,  $\epsilon_0$ 는 진공유전율,  $\gamma$ 는 액적을 둘러싸고 있는 유체와 액적 사이의 계면장력이며,  $V$ 는 인가전압이다. 이러한 일렉트로웨팅 현상을 이용한 액체렌즈는 동일 밀도를 가지면서 굴절률이 서로 다른 전해액과 절연막을 상기 평판 구조와 동일한 구조의 박막을 가진 액체 캐비티 안에 각각 주입한 후 전해액 계면에 전압을 인가하여 낮은 굴절률을 가지는 전해액이 퍼지는 동시에 상대적으로 굴절률이 높은 절연막이 볼록해지도록 액적의 구조를 변화시킴으로써 초점거리 조절이 가능하다.

**1. 서 론**

정보통신 및 각종 광학 장치들이 소형화됨에 따라 초점조절이 가능한 다양한 초소형렌즈 및 렌즈모듈에 대한 연구가 진행되어져왔다. 그러나 기계적인 구동에 기반을 둔 렌즈모듈들은 초점거리 조절을 위한 부가적인 렌즈 구동 장치가 불가피하며 이는 소형렌즈모듈 개발에 큰 장애가 되고 있다. 이에 따라 구동장치가 필요 없는 액체를 이용한 액체렌즈(liquid lens)에 대한 연구가 최근 많이 진행되고 있으며, 대표적으로 일렉트로웨팅(electrowetting)을 이용한 방법과 유체압(fluid pressure)을 이용한 방법이 각광을 받고 있다[1]. 그러나 유체압 방식의 액체렌즈 역시 렌즈로서 구동하기 위해서는 부가적인 액츄에이터가 필요하며 렌즈 박막의 내구성 및 균일성 등의 제한이 있어 그 응용에 한계가 있다[2].

한편, 일렉트로웨팅 기반의 액체렌즈는 마치 인간의 안구의 수정체가 피사체의 원근 거리에 따라 그 두께가 변화되어 초점이 조절되듯이 액체렌즈 캐비티(cavity) 안에 갇혀있는 액체를 외부 전압으로 조절하여 렌즈의 두께 및 곡률을 조절할 수 있으며, 초소형, 저전력소비, 반영구적 수명 등의 장점이 있다[3-4].

그러나 기존의 일렉트로웨팅 기반의 액체렌즈들은 주로 금속 캐비티 혹은 유리 하우징을 사용하기에 렌즈모듈로 제작 시 소형화에는 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 MEMS (micro electro-mechanical systems) 기술을 이용한 액체렌즈를 실리콘 기판에 제작하여 액체렌즈와 외부 구동 회로의 일괄 공정을 통한 초소형 액체렌즈모듈의 구현 가능성을 보였다.

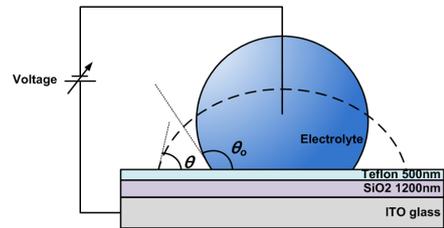
**2. 본 론**

**2.1 동작원리**

일반적으로 직경이 1mm 이하인 액적(droplet)은 중력보다 표면장력에 의한 지배를 강하게 받게 된다. 즉 평판의 표면 위에 놓인 작은 액적은 내부 분자들간의 힘의 작용으로 인해 구형의 표면을 이루게 되고 이는 마치 볼록렌즈와 같은 모양을 이루게 된다. 또한 평판과 액적 사이의 계면장력에 의해 평판의 위치와 상관없이 액적은 항상 동일한 위치와 모양을 유지하게 된다. 한편, 일렉트로웨팅은 그림 1에서와 같이 전도성 평판에 절연막을 올리고 그 위에 놓인 전해액(electrolyte)으로 구성된 액적과 전도성 평판 사이에 전압을 인가해 주면 액적이 퍼지려는 특성으로 인해 액적의 접촉각(contact angle)이 작아지게 된다. 이때, 인가된 전압과 접촉각의 변화는 Young-Lippmann식으로 알려진 다음 식으로 나타낼 수 있다[5].

$$\cos\theta(V) = \cos\theta_0 + \frac{\epsilon\epsilon_0}{2\gamma d} V^2 \quad (1)$$

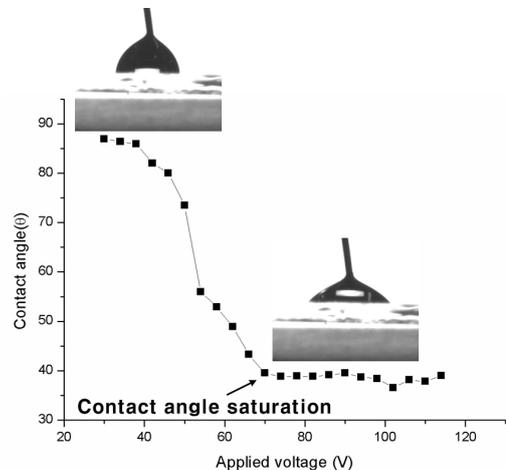
여기서,  $\theta_0$ 는 전압이 인가되지 않은 평형상태에서의 접촉각,  $\epsilon$ 와  $d$ 는



〈그림 1〉 일렉트로웨팅 원리도

**2.2 액체렌즈용 박막의 일렉트로웨팅 특성**

본 연구에서 실리콘 기판을 이용하여 렌즈 캐비티를 제작하기에 앞서, 액적 캐비티를 구성하는 박막들을 평판 상에 형성시켜 일렉트로웨팅 특성을 분석하였다. 그림 1에서처럼 ITO (indium tin oxide)가 증착된 유리 기판위에 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition)로 실리콘산화막을 600 nm에서 1500 nm까지 300 nm의 두께 차이를 주며 증착한 뒤 소수성(hydrophobic)을 가진 테플론(Teflon® AF1601)을 500 nm 두께로 각각 스퍼인 코팅시킨 후 경화시켰다. 완성된 박막층위에 전해액 액적을 10  $\mu$ l 떨어뜨린 후 액적에 전극을 삽입하여 두 전극 사이에 전압을 인가시킨 후 서서히 전압을 증가시켰다. 실리콘산화막의 경우 1200 nm미만의 얇은 박막에서는 낮은 전압에서 쉽게 절연막 파괴가 발생하였으나, 상대적으로 두꺼운 박막에서는 동일한 접촉각 변화를 위한 인가 전압이 너무 커 1200 nm 두께의 절연막이 가장 적합하였다. 그림 2는 1200 nm의 절연막을 가지는 기판의 인가 전압에 따른 액적의 접촉각 변

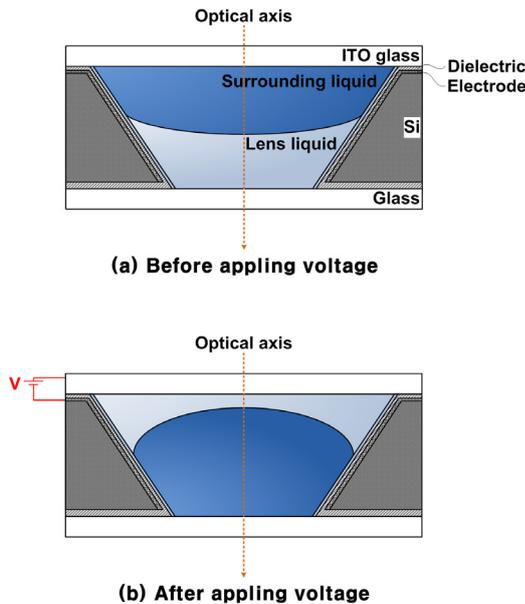


〈그림 2〉 인가전압에 따른 접촉각 변화

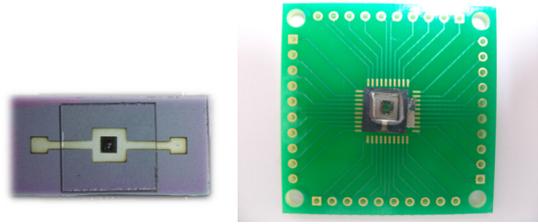
화를 나타낸 것으로 전압이 증가함에 따라 접촉각이 식(1)에 따라 거동함을 관찰할 수 있었으며, 70V 이상에서는 접촉각이 전압의 변화와 무관하게 약 38°로 거의 일정하게 유지되는 접촉각 포화(contact angle saturation) 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 본 실험을 기초로 하여 실제 액체렌즈 제작 시 구동시킴을 위한 최대 전압 및 액적 곡률 변화 등을 예측할 수 있었다.

### 2.3 MEMS 기술을 이용한 액체렌즈 제작

이방성 식각 등 MEMS 기술을 이용하여 그림 3과 같은 단면의 1.5 mm × 1.5 mm 크기의 역피라미드형 캐비티 구조를 가진 액체렌즈를 제작하였다. 먼저 <100> 실리콘 기판의 양면에 습식산화(wet oxidation)를 통해 500 nm 두께의 실리콘산화막을 성장시킨 후 렌즈 캐비티 상부에 BHF (buffered HF) 용액으로 실리콘산화막을 제거하고, 85 °C, 25 wt% TMAH (trimethylammonium hydroxide) 용액에서 실리콘 이방성 식각을 실시하였다. 역피라미드형으로 관통 식각된 렌즈 캐비티의 식각 방지를 위해 실리콘산화막을 제거한 후, 렌즈 캐비티의 전기적 절연을 위해 PECVD로 실리콘산화막을 증착 및 렌즈 상하부에 증착하여 보호막을 형성시킨다. 형성된 보호막 위에 측벽 전극 형성을 위해 전자빔 증착기 및 새도우 마스크를 이용하여 500 nm 두께의 알루미늄을 증착하고 패터닝 하였다. 그 후에 렌즈 전해액의 일렉트로웨팅을 위한 절연층으로 1200 nm의 실리콘산화막을 PECVD로 증착하였으며, 박막의 내구성을 위해 300 °C에서 증착하였다. 절연막 증착 후 하부 전극과 연결된 전극 패드의 노출을 위해 절연막을 패터닝하여 BHF 용액으로 식각하였다. 액체렌즈 측벽의 최종 박막은 전해액에 대한 소수성을 가져 접촉각 변화를 극대화시키는 동시에 액적과 캐비티 표면과의 화학적 반응을 방지하기 위해 일반적으로 불소수지계열의 고분자 물질로 코팅한다. 본 연구에서는 대표적인 소수성 물질인 테프론(Teflon® AF)을 6 wt% 농도로 5000 rpm에서 회전 도포기를 이용하여 500 nm 두께로 코팅한 후 330 °C에서 15분간 경화시켜 박막을 형성하였으며, DNR-L300 음성 감광막을 이용하여 전극 패드 영역을 lift-off법으로 노출시켰다. 실리콘 캐비티와 하부 유리 기판을 에폭시 접착제로 접합시켜 렌즈 캐비티를 완성한 후 절연액, 전해액 순으로 각각 0.4 μl, 1.6 μl의 액적을 주입하였으며, 렌즈 역할을 하는 절연액은 전해액보다 굴절률이 상대적으로 크면서 밀도가 동일하도록 유지하기 위해 실리콘 오일 기반에 화학적 반응성이 적으면서 무극성인 헥산을 섞었으며, 전해액은 LiCl 수용액을 기반으로 제조하였다. 마지막으로 렌즈 캐비티 상부에 ITO가 증착된 유리 기판을 자외선 접착제를 이용하여 렌즈 캐비티와 접합하여 액체렌즈를 완성하였다. 그림 4는 실리콘 기판 상에 제작된 액체렌즈를 나타낸 것으로 렌즈 캐비티의 상부 크기는 1.5 mm × 1.5 mm, 하부 크기는 1.0 mm × 1.0 mm이며 전체 렌즈의 크기는 7.0 mm × 7.0 mm이다. 제작된 실리콘 기판상의 액체렌즈는 PCB (printed circuit board)기판에 접합한 뒤 와이어 본딩하여 외부 전압을 인가할 수 있도록 제작하였다. 상기 MEMS 공정 기술을 이용하여 실리콘 웨이퍼 상에 제작된 액체렌즈는 공정이 비교적 간단하고, 추후 렌즈를 구동하는 구동회로와의 집적화가 가능하여 액체렌즈 모듈의 초소형화가 가능하다.



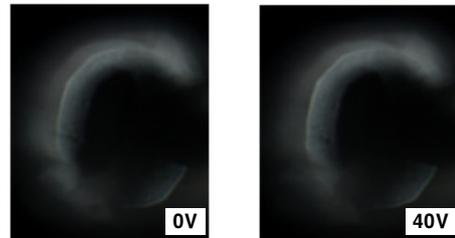
〈그림 3〉 MEMS 기반 액체렌즈의 단면



〈그림 4〉 제작된 액체렌즈

### 2.4 제작된 렌즈의 초점 변화

제작된 액체렌즈는 초점거리의 변화를 확인하기 위해 렌즈 하부에 필름 마스크에 인쇄된 문자를 위치시킨 후 투과형 현미경을 사용하여 전압 인가에 따른 피사체의 초점을 관찰하였다. 그림 5는 전압을 0V와 40V를 스위칭하였을 때의 초점 변화를 보여준다. 제작된 액체렌즈는 앞서 논의한 평판 상에서의 인가 전압보다 낮은 약 50V의 전압에서 절연막 파괴가 발생하여 초점변화의 크기에 한계가 있었다. 특히 절연막 파괴가 렌즈 캐비티의 사면이 만나는 경계 상부에서 주로 발생한 것으로 관찰되었다. 그 원인으로는 역피라미드형 렌즈 캐비티 측벽간의 경계점에서 상대적으로 큰 정전기적 응력(electrostatic stress)이 발생해 평판에서보다 낮은 전압에서 절연 파괴가 일어난 것으로 예상된다. 추가적으로 절연막 증착 시 측벽간의 경계점에서의 잔류 응력(residual stress)으로 인해 절연막의 물리적 파괴가 쉽게 발생하였을 것으로 본다. 따라서 렌즈 캐비티를 원기둥 또는 반구형 구조로 설계할 때 이러한 렌즈 캐비티 자체의 구조적인 문제점을 해결할 수 있다.



〈그림 5〉 제작된 액체렌즈의 초점거리 변화

## 3. 결 론

본 연구에서는 기존에 개발된 금속 캐비티 혹은 유리 하우징에 담긴 액적을 이용한 일렉트로웨팅 기반 액체렌즈 모듈의 소형화 한계를 극복할 수 있는 MEMS기반의 액체렌즈를 제작하였다. 렌즈를 제작하기 앞서 ITO 유리 평판 상에 렌즈 캐비티 박막을 형성시켜 전압에 따른 전해액의 접촉각 변화 측정을 통해 일렉트로웨팅 특성을 파악하였으며, 실리콘 이방성 식각을 이용하여 렌즈 캐비티를 형성시킨 후 액체를 주입하여 전압에 따라 초점거리 조절 기능이 가능한 액체렌즈를 제작하였다. 예측보다 낮은 전압에서 절연막 파괴가 발생한 액체렌즈는 구조적 보완을 통하여 초점가변 특성이 향상될 수 있으며, MEMS 공정 기술을 통하여 제작되어 동일한 기판 상에 구동회로와 집적화하여 초소형 액체렌즈 모듈을 구현할 수 있다.

## 4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업 및 한국과학재단의 지원(No. 2009-0063402)을 받아 수행된 연구결과임.

## [참 고 문 헌]

- [1] D. Graham-Rowe, "Liquid lenses make a splash", Nature Photonics, 2-4, 2006
- [2] H. Ren, S. T. Wu, "Variable-focus liquid lens", Optics Express, 15, 10, 5931-5936, 2007
- [3] C. Quilliet, B. Berge, "Electrowetting: a recent outbreak", Curr. Opin. Colloid & Interface Sci., 6, 1, 34-39, 2001
- [4] S. Kuiper, B. H. W. Hendriks, "Variable-focus liquid lens for miniature cameras", Appl. Phys. Letter, 85, 7, 1128-1130, 2004
- [5] F. Mugele, J. C. Baret, "Electrowetting: from basics to applications", J. Phys.: Condens. Matter, 17, R705-R774, 2005