

# 특집 ■ MEMS

## Electrowetting을 이용한 가변초점의 마이크로 액체렌즈 기술 동향

이종현\*

### 1. 서론

가변초점 마이크로 렌즈는 smart phone 카메라, 내시경, 광커넥션 등에 사용되는 광학계의 핵심 부품중의 하나이다. 기존 렌즈광학계는 초점을 변경하기 위하여 일부 렌즈의 위치를 변경시킨다. 이와 같이 렌즈 이동을 이용한 초점가변 광학계는 소형화할 때 작은 부품의 조립이 어렵고 또한 마이크로 스케일로 작아지면서 마찰력의 영향이 커진다는 단점이 있다. 한편, 초점 변경을 위하여 렌즈의 곡률을 직접 변경시킬 수 있는데, 이 방법은 MEMS (MicroElectroMechanical Systems) 기술을 이용한 마이크로 구동을 이용하기 때문에 소형화에 매우 유리하다는 장점이 있다.

마이크로 렌즈의 곡률을 변경하는 방법으로 공압 [1], 열변형 [2], 정전력 [3] 또는 electrowetting [4-6] 구동 등이 이용되고 있다. 이 중에서 그림 1(a)에 보이는 electrowetting 방법은 구동속도가 빠르고, 제작이 쉬우며, 특히, 기계적

요소에 의한 마찰력이 없기 때문에 마모가 거의 없다는 장점이 있다. 반면에, 곡면을 가진 액체표면의 packaging은 air trap이나 액체 누출로 인하여 그 동안 대량생산의 제약요소로 작용해 왔다. 그림 1(b)에 보이는 바와 같이, 폴리머가 증착된 유체 렌즈 위에 정전구동을 위한 금속박막 전극을 제작하는 연구가 보고되었으나 [3], 가변 렌즈 구동에 따른 금속박막의 피로 파괴 및 투과도 저하가 문제점으로 대두되고 있다.

이를 해결하기 위하여 electrowetting으로 구동되는 초점가변 유체렌즈를 폴리머로 spherical encapsulation 함으로써 웨이퍼 레벨의 패키징이 가능한 구조가 그림 2와 같이 제안되고 있다[7]. 이 렌즈 구조는 안쪽 렌즈가 정전력으로 구동될 때에도 바깥 렌

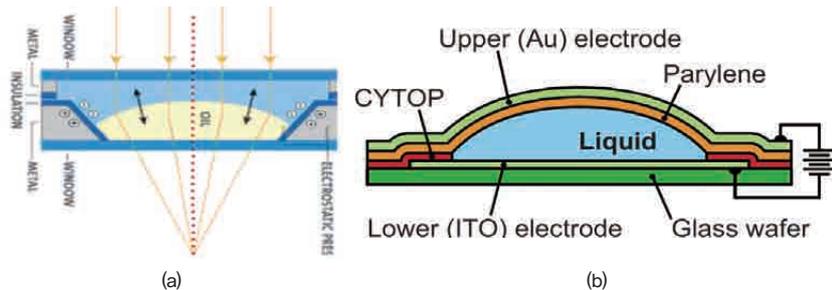


그림 1. 기존 액체렌즈: (a) 수직형 electrowetting 액체렌즈, (b) 정전구동형 액체렌즈.

\* 광주과학기술원 기계공학과

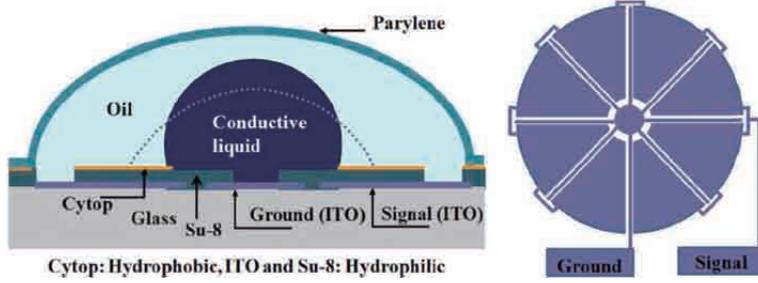
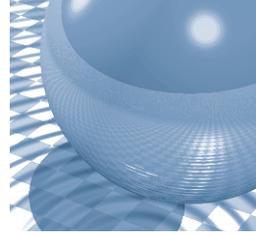


그림 2. (a) 초점가변형 액체렌즈의 단면구조 및 구성요소, (— : liquid shape change during the operation), (b) pinwheel-shape의 신호전극 및 spoke-shape의 접지전극

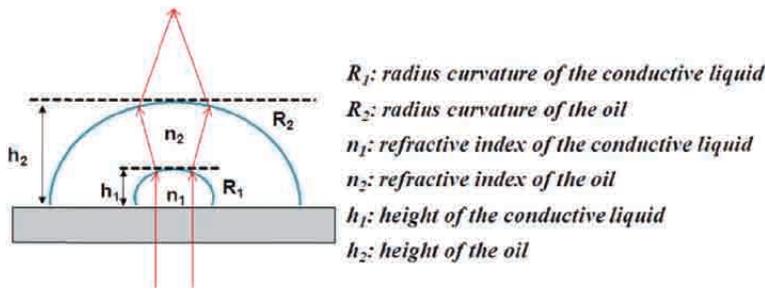


그림 3. 초점가변형 액체렌즈에 대한 ray tracing

는 표면장력에 의하여 구면이 유지된다. 여기서 안쪽렌즈는 전도성 유체로서 전기적으로 표면장력을 조절하여 렌즈의 초점을 변화시키며, 폴리머 encapsulation 되는 바깥 렌즈는 낮은 증기압의 비전도성 유체, 예를 들면 실리콘 오일 등을 사용할 수 있다. 본 기술 논문에서는 새로 제안되고 있는 유체렌즈의 제작 및 패키징 방법을 설명하고, 구동 특성, 광학적 성능 및 최근 기술동향을 소개하고자 한다.

## 2. 소자 구조 및 원리

그림 2(a)에 제안된 초점가변 유체 렌즈의 구조를 보였으며 구성요소는 다음과 같다: 유리기판, 패키징층(parylene), 신호 및 접지용의 ITO(indium-tin-oxide) 전극, 2개의 유전층(Cytop/SU-8), 초점변경을 위한 전도성 액체(glycerin mixture)의 안쪽렌즈, 전도성 액체와 섞이지 않은 비전도성(실리콘 오일)의 바깥렌즈. 중앙의 친수성 영역에 전도성 액체를 떨어뜨리면 반구형으로 유지되며, 이 영역은 액체렌즈의 곡률 변경을 통한 초점가변 중에도 광축을 유지시키는 역할을 한다. 이어서 이 위에 비전도성 액체를 떨어뜨리면 바

깁쪽 영역(SU-8)에 반구형의 렌즈를 형성한다. 안쪽렌즈의 표면을 보다 구면에 가깝게 만들기 위하여 렌즈 구동을 위한 coplanar 전극은 그림 2(b)와 같이 pinwheel 패턴으로 설계할 수 있다.

한편, 액체렌즈의 안정적인 제작 및 구동을 위해서는 액체렌즈를 패키징할 때 액체 손실이 없어야 하며, 또한 공기가 갇혀있지 않아야 한다. 기존의 epoxy 본딩은 위 문제에 매우 취약하며, 따라서 액체렌즈 위에 CVD(chemical vapor deposition) 공정으로 직접 폴리머(parylene)를 증착하는 것이 필요하다. 이 방법은 액체렌즈의 까다로운 패키징을 직접적인 CVD 증착으로 수행하기 때문에

공정이 간단하며, 또한 투과도 및 표면거칠기와 관련된 성능도 우수하다는 특징이 있다. 이 패키징 재료로는 패릴린(parylene)이 많이 이용되며, 기존의 글래스 본딩 방법에 비하여 wafer-level 패키징, 공정가격 및 대량생산 관점에서 매우 유리하다.

그림 3은 안쪽렌즈의 굴절률( $n_1$ )이 바깥렌즈의 굴절률( $n_2$ )보다 작은 경우에 대한 ray tracing 결과를 보여준다. 빛이 렌즈 아래로 부딪힐 때, 두 렌즈의 경계면에서 1차적으로 퍼지며, 바깥렌즈와 공기의 경계면에서 다시 모아지는 것을 알 수 있다. 바깥렌즈 표면은 평면보다 곡면인 경우가 focusing 효과를 증대시킨다.

액체렌즈의 핵심기능인 가변초점을 위해서는 안쪽 렌즈 아래에 연결된 유전층을 교류전압으로 modulation 시킴으로써 접촉각(contact angle)을 변경시킨다. 액체렌즈에 전압이 가해지면 도전체인 안쪽 렌즈는 흡수성 영역(SU-8)으로 확장되므로 곡률반경이 커지면서 초점거리는 길어지게 된다. 접촉각과 가진전압과의 관계는 Young-Lipmann equation으로 불리는 식 1로 표현된다 [8].

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

## Electrowetting을 이용한 가변초점의 마이크로 액체렌즈 기술 동향

- $\gamma_a$  : surface tension between liquid and air
- $\theta_0$  : initial contact angle,
- $\theta$  : resulting contact angle
- $\epsilon$  : relative permittivity of dielectric layer
- $V$  : applied voltage
- $d$  : thickness of dielectric layer

### 3. 제작공정

Electrowetting 표면과 coplanar 전극을 제작하기 위해서는, 첫 번째로, sputtered Cr(200 nm) 위에 alignment marks를 제작한 후, ITO(250 nm)가 코팅된 글래스 위에 습식식각 공정으로 전극을 제작한다. 두 번째로, SU-8 유전층(1.4  $\mu\text{m}$ )을 spin 코팅한 후 ground 전극을 photolithography로 노출시킨다. 이후 흡수성 표면은 Cytop(70 nm)을 스핀 코팅하여 제작한다. 기관제작의 마지막 공정으로서, 중앙부의 Cytop을 직경 1 mm 범위에서 반응성 식각 (RIE: reactive ion etching) 공정으로 제거하면 SU-8 층이 드러나며, 노출된 친수성 영역은 안쪽렌즈를 광축에 고정하는 역할을 한다.

안쪽렌즈 재료인 전도성 물질의 굴절율은 1.42로 설계되었으며, glycerin과 KCL(0.1 M)을 0.65/0.35 중량비율로 섞어 제조할 수 있다. 바깥렌즈는 낮은 증기압(2 Torr)의 실리콘 오일(silicone oil, Dow Corning 704, 굴절율 1.556)을 사용하며, 이것은 이후 공정인 액체 위의 폴리머 패키징을 용이하게 한다. 제조된 안쪽렌즈 재료인 glycerin mixture (용량: 0.5  $\mu\text{l}$ , 밀도: 1.16  $\text{kg}/\text{m}^3$ )와 바깥렌즈 재료인 실리콘 오일 (용량: 4.8  $\mu\text{l}$ , 밀도: 1.07  $\text{kg}/\text{m}^3$ )을 중앙의 친수성 영역 위에 pipette을 이용하여

순차적으로 올려 놓는다. 최종적으로, 반구형의 실리콘 오일에 대한 parylene C (1.5  $\mu\text{m}$ ) 패키징은 진공환경 (15 mTorr)의 CVD 공정으로 수행되었으며, 패럴린 증착 후의 바깥렌즈 직경은 2.7% 감소하였다.

그림 4는 제작된 액체렌즈 소자를 보여주며, 바깥렌즈의 직경은 3.4 mm이고 전체 면적은  $15 \times 15 \text{ mm}^2$ 로서 실험을 위하여 약간 크게 제작되었다. 제작 가능한 바깥렌즈의 최소 및 최대 직경은 각각 0.02 mm 및 30 mm이며, capillary length(1.8 mm)의 17배까지는 중력 효과에 의한 왜곡없이 제작이 가능하다 [3].

### 4. 광학 특성 평가

제작된 액체렌즈의 인가전압에 따른 가변초점 특성은 다음과 같다. 광원으로는 laser diode(LD, 633 nm)를 사용하고, collimator를 연결하였다. 초점거리는 그림 5(a)에 보인 바와 같은 confocal microscope (Nanofocus™)로 측정하였다. 오일과 glycerin mixture의 곡률반경은 각각 2080  $\mu\text{m}$ 와 548  $\mu\text{m}$ 로 구동되는 안쪽 렌즈의 반경이 매우 작지만, 그 굴절률이 바깥렌즈와 차이가 크지 않아 초기 초점거리는 27 mm이다.

그림 5(b)에 보인 바와 같이 glycerin mixture와 친수성 SU-8 사이의 마찰로 인하여 30  $V_{\text{rms}}$  이하에서는 변화가 없었으며, 65  $V_{\text{rms}}$  (5 kHz)를 인가하였을 때 초점거리가 9 mm까지 변경되었다. 제작된 액체렌즈의 초점가변 범위는 9-27 mm로서, 동일한 구조의 기존 평판형 액체렌즈(9-18 mm [4], 10-15 mm [6]) 보다 우수함을 보인다. 초점가변 범위가 확장된 이유는 두 액체렌즈의 굴절율 차이에 기인하며, 유체의 굴절율 또는 액체렌즈의 용량을 변경할 경우 가변범위는 조절이 가능하다. 그림 5(b)에 보인 바와 같이 인가전압을 오르내리면서 초점가변의 hysteresis를 측정하였으며, 인가전압 40 V에서 최대 hysteresis error가 8.9%로 측정되었다. 0-50V의 구동전압으로 초점거리에 대하여 20회 반복 실험한 결과 측방향 오차는 6  $\mu\text{m}$ (표준편차)였으며, 최대 소모전력은 65  $V_{\text{rms}}$  에서 4.2 mW에 불과하였다.

액체렌즈의 이미징 특성을 측정하기 위하여 L&S (line and space) 패턴에 대한 이미지를 그

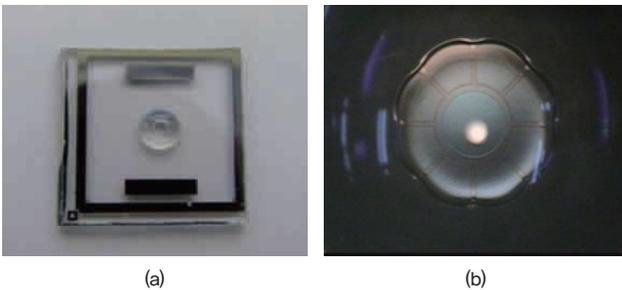


그림 4. 제작된 액체렌즈 사진: (a) 전체 사진 (크기:  $15 \times 15 \text{ mm}^2$ ), (b) 전압 인가상태에서 확대된 안쪽렌즈와 자세한 전극구조가 보이는 사진 (안쪽렌즈 직경: 1 mm, 바깥렌즈 직경: 3.4 mm)

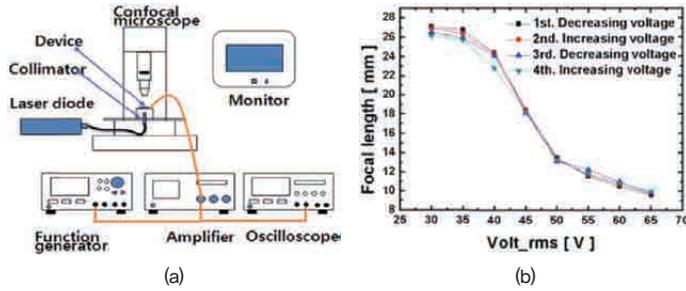
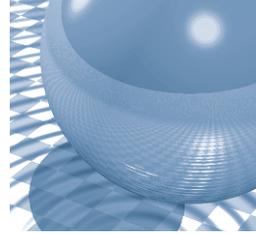


그림 5. 초점거리 측정장치: (a) 실험 setup, (b) 인가전압(5 kHz)에 따른 초점거리 변화.

림 6과 같이 CCD 카메라로 촬영하였다. 그림 6(a)는 초기(0V)에 초점이 맞지 않았을 때의 이미지이며, 그림 6(b)는 50 V<sub>rms</sub>를 인가하여 초점을 맞춘 이미지를 나타낸다. 렌즈 이미지를 정량적으로 평가하기 위해서는 공간주파수(line pairs/mm)에 따른 modulation transfer function (MTF) 값을 측정해야 한다. 그림 6(c)는 white light 조명조건에서 현미경으로 촬영된 MTF 측정용 사진의 예시(공간주파수 20 lp/mm)이다. MTF 기준값을 50% 라고 가정했을 때, 20 lp/mm 과 50 lp/mm에서 직경 0.35 mm(aperture 직경의 70%)와 직경 0.2 mm(aperture 직경의 40%)까지 각각 이미징이 가능함을 알 수 있다.

제작된 액체렌즈에 anti-reflection coating(ARC)이 없는 상태에서 투과도(transmittance)를 UV-VIS spectrometry(Cary 500, Varian)를 이용하여 측정하였다.

측정된 투과도는 가시광선 영역에서 80% 이상으로서, 기존 정전구동 액체렌즈[3] 보다 우수하였다. 패키징된 렌즈표면의 거칠기를 AFM으로 측정하였을 때, 5 nm(Quadratic mean value)에 불과하였으며, 반응속도는 인가전압 상승 및 하강 조건에서 모두 100 ms 이내로 측정되었다.

한편, 중력에 의한 액체렌즈의 변형을 최소화하기 위하여 두 액체의 밀도는 비슷하게 설계되는 것이 바람직하다 [4-6]. 중력효과를 실험적으로 검증하기 위하여 직경 10 mm의 액체렌즈를 제작한 후 폴리머로 패키징하였다. 액체렌즈를 수직으로 세웠을 때, 중력효과가 작을 것으로 추정되는 수평축의 이미지 shift는 측정할 수 없을 정도로 작았으며, 수직축에 대해서는 6 mm 직경(60% of the lens diameter) 내에서 2.4% 이하로 측정되었다. 이와 같이 중력효과가 작은 이유는 액체렌즈의 용량이 작고, 또한 패키징에 사용된 폴리머 박막에 0.8 MPa의 인장력이 존재하기 때문으로 판단된다 [9]. 실제 가변초점 성능이 평가된 바깥렌즈의 직경은 3.4 mm 이기 때문에 이미지 shift는 훨씬 적을 것으로 판단된다.

## 5. 광축 개선

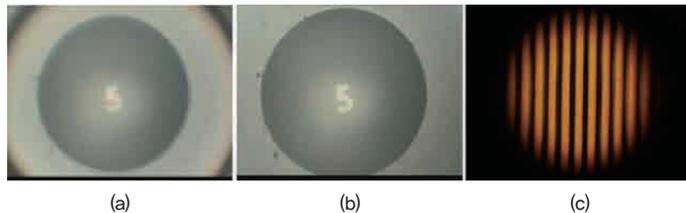


그림 6. 제작된 액체렌즈의 이미징 특성: (a) 초점이 맞지 않은 초기 상태 (0 V), (b) 초점이 맞은 상태 (50V<sub>rms</sub>, 5 kHz; 배율: 1.14), (c) 20 lp/mm line pair에 대한 이미지 사진 (안쪽렌즈 직경: 1 mm; aperture 직경: 0.5 mm; 배율: 1.05).

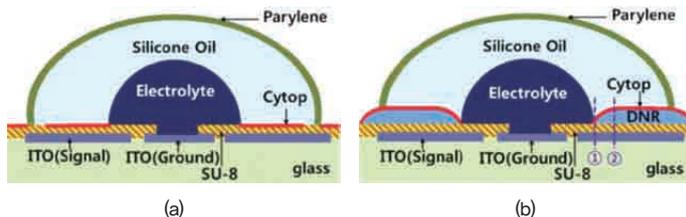


그림 7. coplanar 액체렌즈의 단면 구조: (a) 균일한 두께의 유전체, (b) thickness gradient를 갖는 유전체

전술한 바와 같이, 액체렌즈의 기관 중앙부는 친수성 영역이므로 전도성 액체를 떨어뜨리면 반구형태로 바뀌면서 광축을 유지시키는 역할을 한다. 그러나 친수성 영역이 안쪽렌즈와 항상 일치하지 않으므로 광축에 오차가 발생할 수 있다. 한편, 구동전극을 x, y 방향으로 따라 분리하는 경우 액체렌즈의 수평이동이 가능하므로 빛을 tilt 시킬 수 있다 [10]. 이와는 달리, 광축상으로 초점을 변경하기 위해서는 electrowetting 액체렌즈의 유전층 두께를 반경에 따라 두껍게 만드는 방법이 적용된다 [11].

그림 7(a)는 기존 구조의 액체렌즈이며, 그림 7(b)는 그림 7(a)에서 두 번째 유전층

# Electrowetting을 이용한 가변초점의 마이크로 액체렌즈 기술 동향

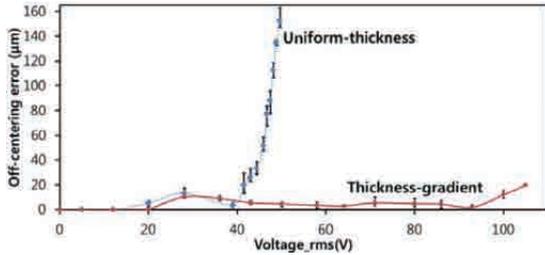


그림 8. 균일한 두께의 유전층 및 thickness gradient 가 있는 액체렌즈에 대하여 측정된 off-centering 오차 비교(반복정밀도 측정을 위하여 5회 측정).

의 두께가 반경에 따라 두꺼워지는 구조를 보여준다. Thickness-gradient 구조를 제작하는 방법은 다음과 같다. 1) Negative PR (photoresist)을 코팅한 후 중앙부위를 photolithography 공정으로 제거한다. 2) PR의 hard-baking을 160 °C에서 3분동안 수행하는 과정에서 PR이 melt되며, 이에 따라 표면장력이 발생하면서 최소의 표면적을 갖도록 둥그렇게 reflow 된다.

그림 8은 제작된 액체렌즈에 대한 off-centering 오차를 측정한 결과를 보여 준다. 기존 액체렌즈의 경우 162 μm으로 매우 큰 값이었지만, thickness gradient의 경우에는 20 μm(= tilt angle 0.05°)로서 개선 효과가 큰 것으로 나타났으며, conical 구조 [12]에서의 50 μm에 비교해서도 상당히 우수함을 알 수 있다.

## 6. 결론

Coplanar 전극이 있는 글래스 기판 위에 초점가변형 액체렌즈를 제작한 후, 대량생산이 가능한 폴리머 증착공정을 이용하여 반구형으로 패키징하였다. 초점변화를 실험하기 위하여 전도성 액체로 만들어진 안쪽 렌즈를 구동시켰으며, 바깥렌즈는 증기압이 낮은 비전도성의 실리콘오일을 사용하여 증착 패키징을 용이하게 하였다. 제안된 액체렌즈는 tuning 범위가 증대되었으며, 유전층의 두께를 반경에 따라 크게 함으로써 광축정렬을 개선할 수 있어 향후 응용 확대가 기대된다.

## 참고문헌

- [1] P.M.Moran, S. Dhamatilleke, A. H. Khaw, K.W. Tan, M. L. Chan, and I. Rodriguez, "Fluidic lenses with variable focal length," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, p. 041120, Jan. 2006.
- [2] W. Wang, J. Fang, and K. Varahramyan, "Compact variable-focusing microlens with integrated thermal actuator and sensor," *IEEE Photon. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2643–2645, Dec. 2005.
- [3] N. Binh-khiem, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Polymer thin film deposited on liquid for varifocal encapsulated liquid lenses," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, p. 124101, Sep. 2008.
- [4] B. Berge and J. Peseux, "Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting," *Eur. Phys. J. E*, vol. 3, pp. 159–163, Oct. 2000.
- [5] S. Kuiper and B. H.W. Hendriks, "Variable-focus liquid lens for miniature cameras," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, pp. 1128–1130, Aug. 2004.
- [6] C. X. Liu, J. Park, and J. W. Choi, "A planar lens based on the electrowetting of two immiscible liquids," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 18, p. 035023, Feb. 2008.
- [7] J. Y. An, J. H. Hur, S. Kim, and J.-H. Lee, "Spherically encapsulated variable liquid lens on coplanar electrodes," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 22, pp. 1703–1705, Nov. 15, 2011.
- [8] F. Mugele and J. C. Baret, "Electrowetting: From basics to applications," *J. Phys., Condens. Matter*, vol. 17, pp. R705–R774, Jul. 2005.
- [9] N. B. Khiem, K. M. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Tensile film stress of parylene deposition on liquid," *Langmuir*, vol. 26, no. 24, pp. 18771–18775, Nov. 2010.
- [10] S. Seo Y. Park C. Park and J.-H. Lee, "Adjustable tilting angle of liquid microlens with four coplanar electrodes," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 28, no. 1 pp. 79-82, 2015
- [11] Y. Park, S. Seo, P. Gruenberg, and J.-H. Lee, "Self-centering effect of a thickness-gradient dielectric of an electrowetting liquid lens," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 25, no. 6, pp. 623–625, Mar. 15, 2013.
- [12] B. Berge, "Liquid lens technology: Principle of electrowetting based lenses and applications to imaging," in *Proc. 18th IEEE MEMS 2005*, Jan./Feb., pp. 227–230.

## 약력



### 이종현

이종현 교수는 1986년에 KAIST 기계공학과에서 박사학위를 취득하였고, 2000년까지 한국전자통신연구원에서 선임, 책임연구원 및 실장으로 재직하였다. 2000년 광주과학기술원 기계공학과에 부임하여 교수로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 Optical MEMS, Medical MEMS, Micro sensor & actuator, Micro/nano fabrication 이다.