

사진식각공정과 물방울 형틀을 이용한 PDMS 렌즈 제작

김진영¹ · 성중우¹ · 조성진¹ · 김철홍^{2,3,+} · 임근배^{1,4,+}

Fabrication of PDMS Lens Using Photolithography and Water Droplet Mold

Jin Young Kim¹, Jungwoo Sung¹, Seong J. Cho¹, Chulhong Kim^{2,3,+}, and Geunbae Lim^{1,4,+}

Abstract

We developed a novel fabrication method of polydimethylsioxane (PDMS) lens, which can easily control the shapes of the lens using soft lithography with common photolithography and water droplet molding. A mold for PDMS lens was prepared by patterning of hydrophobic photoresist on the hydrophilic substrate and dispensing small water droplets onto the predefined hydrophilic patterns. The size of patterns determined the dimension of the lens and the dispensed volume of the water droplet decided the radius of curvature of the PDMS lens independently. The water droplet with photoresist pattern played a robustly fixed mold for lens due to difference in wettability. The radius of curvature could be calculated theoretically because the water droplets could approximate spherical cap on the substrate. Finally, concave and convex PDMS lenses which could reduce or magnify optically were fabricated by curing of PDMS on the prepared mold. The measured radii of the fabricated PDMS lenses were well matched with the estimated values. We believe that our simple and efficient fabrication method can be adopted to PDMS microlens and extended to micro optical device, lab on a chip, and sensor technology.

Keywords : PDMS, Lens, Water droplet mold, Photolithography, Soft lithography, Radius of curvature

1. 서론

마이크로 렌즈 혹은 마이크로 렌즈 배열은 미소광학 시스템이나 미세유체칩, 공초점 현미경(confocal microscopy) 등의 분야에서 관심을 받아왔다[1-3]. 따라서 이러한 마이크로 렌즈의 제작 방법에 관한 연구도 많이 진행되었는데 그중에서 polydimethylsiloxane (PDMS)과 같은 투명 폴리머를 이용한 다양한 마이크로 렌즈 제작 방법들이 발표되었다. PDMS는 비교적 저렴한 가격과 소프트식각 공정(soft lithography)을 기반으로 하여 가공성이 높고, 높은 투명도를 가지기 때문에 렌즈로 사용하기 매우 적합한 물질이다. 또한

생적합성을 가져 렌즈를 활용한 내시경[4] 등에도 활용이 가능하다.

PDMS를 이용한 소프트식각공정을 이용해 렌즈를 제작할 경우 만들고자 하는 렌즈의 형태를 가지는 형틀을 먼저 제작하고 그 위로 PDMS를 부어서 경화시킨 후 PDMS를 분리하는 방식으로 만들어진다. 대표적인 형틀 제작 방법으로 감광막에 온도를 가해 재응집을 일으키는 방식[5], 디퓨저 마스크를 이용한 감광막의 노광방식[6], 젤에 마이크로 입자를 고정시키는 방식[7] 등이 있다. 그러나 이러한 형틀 제작 방식으로는 렌즈의 형상을 정확하게 조절하기 힘들고 렌즈의 크기에 제한이 있다. 소프트식각공정을 이용한 렌즈제작 방식이 고정된 형태를 가지는데 비해, 최근에는 얇은 PDMS막에 공기 또는 유체를 주입하여 크기 및 곡률을 제어하는 방법이 연구되고 있다[8, 9]. 그러나 이러한 능동적 곡률 제어 방법은 칩의 제작 과정이 어렵고 공압 또는 유압 부품으로 인해 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

일반적으로 PDMS를 이용한 소프트식각공정이 감광막 패턴을 형틀로 이용하는데 비해 물과 같은 액체를 이용하여 형틀을 제작한 소프트식각공정에 관한 연구가 발표되었다[10]. 액체를 이용한 형틀의 경우 비교적 저렴한 방법으로 매끈하고 둥근 형태를 가지면서 같은 층 내에서도 종횡비 조절이 쉬운 형틀 제작이 가능하다는 장점으로 3차원 마이크로 채널[11], 마이크로웰[12] 등의 제작에 응용되어왔다. 최근 이러한 액체 형틀 제작 방식을 응용하여 기판에 플라즈마 처리를 통해 물방울의 접촉각을 변화시켜 PDMS 렌즈를 제작

¹포항공과대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, POSTECH)

²포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, POSTECH)

³포항공과대학교 창의IT융합공학과 (Department of Creative IT Engineering, POSTECH)

⁴포항공과대학교 융합생명공학부 (Division of Integrative Bioscience and Biotechnology, POSTECH)

Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk 790-784, Korea

*Corresponding author: limmems@postech.ac.kr and chulhong@postech.ac.kr
(Received : Aug. 14, 2013, Revised : Sep. 5, 2013, Accepted : Sep. 6, 2013)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 연구결과가 발표되었다[13]. 이러한 방법은 매끄러운 표면의 구형 렌즈를 얻을 수 있다는 장점을 가지지만 원하는 형상을 얻기 위해 시간에 따라 변하는 접촉각과 물방울의 부피를 동시에 고려해야 한다는 점에서 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 물방울 형틀과 일반적인 감광막 광식각공정을 결합해 PDMS 렌즈의 형태와 크기, 곡률을 각각 독립적으로 쉽게 조절할 수 있는 방법을 제안하였다. 앞선 제작 방법과 달리 친수성 표면을 갖는 기판에 광식각공정을 통해 소수성을 가지는 감광막 패턴을 만들기 때문에 시간의 경과에 따라 모양과 크기, 접촉각이 변하지 않는 베이스 기판의 제작이 가능하다. 여기에 물방울 부피만을 조절하여 원하는 곡률반경의 형틀을 쉽게 얻을 수 있다. 최종적으로 제작한 형틀에 PDMS를 부어 제작한 렌즈의 곡률과 이론적으로 예측한 값을 비교해 제안한 PDMS 렌즈 제작방법의 유효성을 검토하였다.

2. 연구 방법

2.1 PDMS 렌즈 형틀의 준비

PDMS 렌즈를 제작하기 위한 형틀을 준비하는 과정은 Fig. 1(a)와 같이 두 가지 단계로 이루어진다. 첫번째로 렌즈의 형상과 크기를 결정하는 단계인 소수성 감광막 패턴을 만드는 과정이다. 먼저 4 inch 실리콘 웨이퍼에 친수성을 갖게 하기 위해 500 nm 두께의 산화막을 증착시킨 기판을 준비한다. 기판 위에 감광막(AZ5214E)을 1.4 μm 두께로 얇게 코팅하고 일반적으로 MEMS공정에서 사용하는 광식각공정을 통해 원형 패턴을 만든다. 두번째 단계는 형상과 크기가 결정된 상태에서 렌즈의 곡률반경을 조절하는 단계이다. 감광막 패턴 사이에 열린 실리콘 산화막 위로 피펫을 이용해 특정 부피의 물방울을 감광막으로 넘치지 않도록 떨어뜨린다. 물방울은 광식각공정에 의해 결정된 친수성 패턴을 따라 구면 렌즈의 형상을 만들 수 있는 형틀로 사용 된다.

2.2 PDMS 렌즈의 제작

준비한 형틀을 이용해 PDMS 오목 렌즈와 볼록 렌즈를 만드는 과정은 Fig. 1(b)와 같다. 먼저 PDMS 프리폴리머(prepolymer, Sylgard 184)와 경화제를 무게비율 10:1로 잘 섞은 후 진공챔버 내에서 기포를 제거한다. 준비한 PDMS를 물방울이 고정된 형틀 위로 부은 후 65 $^{\circ}\text{C}$ 오븐에서 2시간 가량 건조시켜 경화시킨다. 경화된 PDMS를 형틀에서 분리하면 PDMS 오목렌즈를 얻을 수 있다. 제작된 오목렌즈의 역상인 볼록렌즈를 만들기 위해서는 만들어진 오목렌즈를 형틀로 다시 한번 물방울을 수형한다. 경화된 PDMS가 서로 들러붙는 것을 방지하기 위해 오목렌즈 형틀의 표면에 실란

(Trichloro(1H,1H,2H, 2H-perfluorooctyl)silane)처리를 한 후 PDMS를 붓는다. 경화된 PDMS를 분리하면 처음에 물방울을 떨어뜨렸을 때와 같은 모양의 볼록렌즈를 얻을 수 있다.

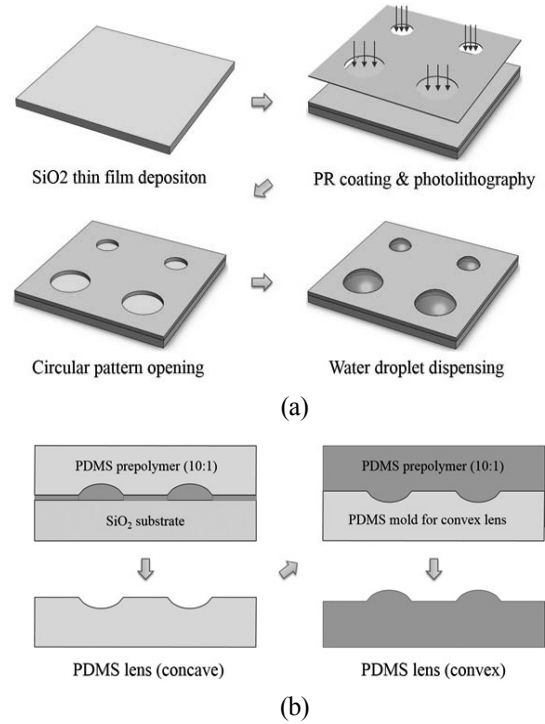


Fig. 1. (a) Preparation of water droplet mold and (b) fabrication process of PDMS lens.

3. 결과 및 고찰

3.1 물방울 형틀의 곡률 및 접촉각 계산

기판 위에 떨어뜨린 물방울은 근사적으로 Fig. 2와 같이 구의 일부분(spherical cap)이라 할 수 있다. 이 때 감광막 패턴의 두께(1.4 μm)에 의한 부피는 전체 떨어뜨리는 양의 1% 이내로 무시하기로 가정한다. 이 때 기판 위의 물방울의 부피는 식(1)로 표현된다.

$$V = \frac{\pi h}{6}(3a^2 + h^2) \quad (1)$$

여기서 V 는 물방울의 부피, a 는 물방울과 기판이 접촉하여 만든 원의 반지름, h 는 기판으로부터의 물방울의 높이이다. 그런데 a 는 광식각공정 공정을 통해 결정되는 패턴의 크기로 상수로 생각할 수 있으므로 V 는 h 만의 3차 함수이다. 따라서 기판에 떨어뜨린 물방울 V 에 의해 h 가 결정된다. h 가 결정되면 기하학적인 근거로 식(2)에 의해 구의 반지름 r 과 접촉각 θ 를 차례로 구할 수 있다.

$$h = r - \sqrt{r^2 - a^2}$$

$$\theta = \sin^{-1}(a/r) \tag{2}$$

결국 반지름이 a 로 고정된 원형 패턴 위의 물방울 부피 V 를 조절함으로써 물방울의 곡률반경 r 과 접촉각 θ 를 조절할 수 있다. 이때, 곡률반경과 접촉각은 상호 종속적이어서 하나의 값이 정해지면 나머지의 값 또한 결정된다.

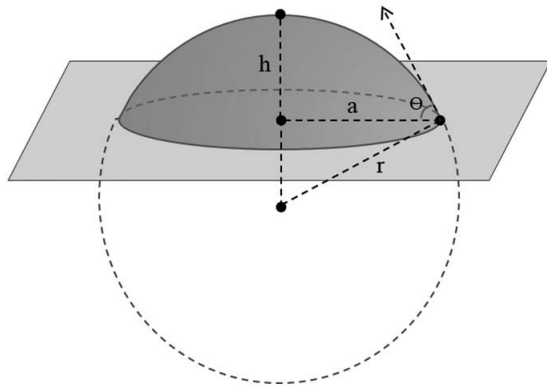


Fig. 2. Configuration between water droplet and substrate.

3.2 PDMS 렌즈의 제작 결과

Fig. 3은 앞서 설명한 PDMS렌즈 제작 방법의 과정과 만들어진 결과를 보여준다. Fig. 3(a)에서 실리콘 산화막이 증착된 4인치 웨이퍼의 표면에 2~5 mm의 크기를 가지는 원형 및 사각형 모양의 패턴을 확인할 수 있다. 이러한 패턴은 광식각공정에 사용하는 포토마스크를 바꿈으로써 모양과 크기 및 개수를 원하는 대로 쉽게 바꿀 수 있다. 패턴들 위로 각각 1~14 μL 의 물방울을 떨어뜨리면 물방울은 패턴 바깥의 감광막에는 접촉하지 않고 산화막의 표면위를 따라 구형의 물방울 형태를 형성한다. 이와 같은 방법을 이용해 형태를 제작할 경우 광식각공정 단계에서 렌즈의 형상과 크기를 조절할 수 있고 물방울의 부피를 변경함으로써 렌즈의 곡률반경을 독립적으로 조절할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 감광막(소수성)과 산화막(친수성) 사이의 큰 젖음성(wettability) 차이에 의해 물방울이 기판에 단단히 고정되어 견고한 형태를 만들 수 있다는 추가적인 장점을 가진다. 준비한 형태에 PDMS를 부어 오븐에서 경화시킨 후 분리하여 Fig. 3(b)와 같이 형태로 사용한 물방울의 역상을 가지는 PDMS 오목렌즈 배열을 제작하였다.

Fig. 3(c)는 개별로 분리한 5 mm의 오목렌즈와 볼록렌즈를 통하여 실제 문자를 관찰한 사진이다. 그림에서 왼쪽의 오목렌즈는 두꺼운 PDMS의 영향으로 넓은 범위의 문자가 축소되어 나타난 것을 알 수 있고 오른쪽의 볼록렌즈는 작은 문자를 확대해서 보여주는 것을 확인할 수 있다.

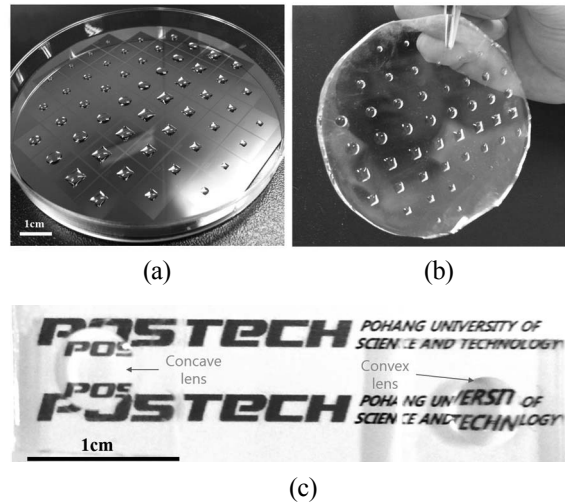


Fig. 3. (a) Water droplet mold on the lithographically defined patterns, (b) detached PDMS concave lens array, and (c) reduction (left) and magnification (right) images.

3.3 PDMS렌즈의 곡률 측정

제작한 PDMS 렌즈의 곡률을 측정하기 위해 drop-shape analysis system (DSA 100, Kruss, Germany)을 이용하여 볼록 렌즈의 외곽 형상을 촬영하였다. Fig. 4는 5 mm의 같은 지름을 가지는 원형 패턴 위에 각각 다른 용량의 물방울을 이용해 제작한 PDMS 볼록렌즈의 사진이다. Fig. 4(a)에서 10 μL 의 부피를 가질 때 렌즈가 곡률 반경 3.7 mm를 가지는데 비해 Fig. 4(b)에서 14 μL 의 부피를 가질 때 3.1 mm의 곡률 반경을 가져 상대적으로 더 볼록한 형상을 가지는 것을 알 수 있다.

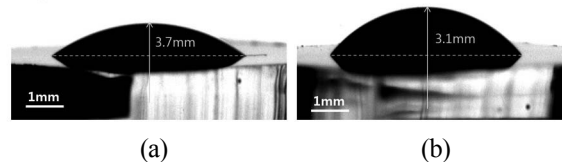


Fig. 4. Shape of PDMS lens of (a) 10 μL volume and (b) 14 μL volume on the circular pattern.

이와 같은 결과는 렌즈의 제작에 이용한 물방울 형태의 부피에 따른 곡률반경 변화로 쉽게 예측할 수 있다. 앞서 식(1), (2)에 의해 이론적으로 예측한 물방울의 부피와 곡률 반경의 관계를 Fig. 5에 그래프를 통해 나타내었다. 그래프에서 렌즈의 베이스 패턴의 크기 2, 3, 4, 5 mm의 4가지 경우 모두 사용한 물방울의 부피가 점점 커질수록 곡률 반경이 점점 작아진다 베이스 패턴의 반지름 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 처음에 작은 부피의 물방울을 떨어뜨릴 경우 친수성 패턴위에 바닥에 납작하게 퍼져서 상대적으로 곡률반경이 큰 형태를 띠다가 물방울의 부피가 점점 커질수록 렌즈의 베이스 크기가 고정된 상태에서 볼록하게 솟아올라 점점 반구 형

태로 수렴하기 때문이다. 이때 더 큰 부피의 물방울을 떨어뜨릴 경우 친수성 패턴을 넘어 감광막 영역에 소수성 접촉을 하게 되는데 이 범위는 렌즈의 형상을 고려할 때 본 연구에서 포함하지 않기로 한다.

마지막으로 사진식각공정과 물방울 형들을 이용한 렌즈 제작방법의 유효성을 검토하기 위해 앞서 구한 Fig. 5의 이론적으로 예측한 그래프에 제작한 PDMS 렌즈의 곡률 반지름 측정값을 대입하였다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 2, 3, 4, 5 mm의 크기를 가지는 PDMS 렌즈의 곡률반경이 예측한 값과 잘 일치하는 경향을 보였다. 여기서 이론적으로 예측한 값에 비해 실제 측정값이 약 1~5% 정도 큰 값을 가지는 오차를 보였다. 이는 물방울이 실제로는 자중에 의해 위아래로 조금 일그러진 형태를 가지는데 이러한 형상을 구로 가정된 상태에서 곡률반지름을 측정하는 과정에서 발생한 오차로 예측된다. 이러한 영향을 고려하였을 때 제작한 PDMS 렌즈는 감광막 패턴과 물방울의 형상을 잘 따른다 할 수 있다.

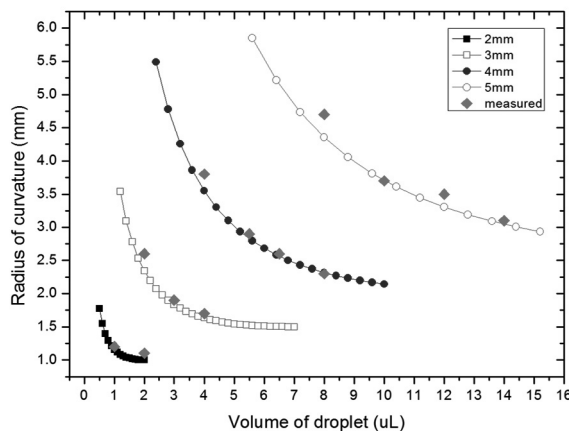


Fig. 5. Relationship between radius of curvature and volume of droplet on fixed base diameter.

4. 결론

본 연구에서는 광식각공정과 물방울을 이용해 원하는 크기와 곡률반지름을 가지는 PDMS 렌즈를 제작할 수 있는 방법을 제시하였다. 광식각공정을 통해 만들어지는 소수성 감광막 패턴은 렌즈의 크기와 형상을 결정하고 물방울의 부피를 조절함으로써 렌즈의 곡률반경을 독립적으로 조절할 수 있었다. 자중에 의한 물방울의 일그러짐에 의한 오차를 고려하였을 때 실제 제작한 PDMS 렌즈의 곡률반경은 이론적으로 예측한 값과 잘 일치하였다. 본 연구에서 제안한 PDMS 렌즈 제작 방법은 MEMS 광식각공정을 기반으로 하였기 때문에 밀리미터 크기 이하의 마이크로 렌즈 또는 마이크로 렌즈 배열의 제작이 가능하여 미소광학시스템 제작에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2012R1A1A2007580). 또한 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 'IT명품인재양성사업'의 연구 결과로 수행되었음 (NIPA-2013-H0203-13-1001)

REFERENCES

- [1] R. Völkel, M. Eisner, and K. J. Weible, "Miniaturized imaging systems", *Microelectron. Eng.*, Vol. 67-68, pp. 461-472, 2003.
- [2] S. Camou, H. Fujita, and T. Fujii, "PDMS 2D optical lens integrated with microfluidic channels: principle and characterization", *Lab Chip*, Vol. 3, No. 1, pp. 40-45, 2003.
- [3] H. J. Tiziani, R. Achi, and R. N. Krämer, "Chromatic confocal microscopy with microlenses", *J. Mod. Opt.*, Vol. 43, No. 1, pp. 155-163, 1996.
- [4] X. Zeng, C. T. Smith, J. C. Gould, C. P. Heise, and H. Jiang, "Fiber endoscopes utilizing liquid tunable-focus microlenses actuated through infrared light", *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 20, No. 3, pp. 583-593, 2011.
- [5] E. Roy, B. Voisin, J. F. Gravel, R. Peytavi, D. Boudreau, and T. Veres, "Microlens array fabrication by enhanced thermal reflow process: Towards efficient collection of fluorescence light from microarrays", *Microelectron. Eng.*, Vol. 86, No. 11, pp. 2255-2261, 2009.
- [6] S. I. Chang and J. B. Yoon, "Shape-controlled, high fill-factor microlens arrays fabricated by a 3D diffuser lithography and plastic replication method", *Opt. Express*, Vol. 12, No. 25, pp. 6366-6371, 2004.
- [7] O. J. Cayre and V. N. Paunov, "Fabrication of microlens arrays by gel trapping of self-assembled particle monolayers at the decane-water interface", *J. Mater. Chem.*, Vol. 14, No. 22, pp. 3300-3302, 2004.
- [8] M. Agarwal, R. A. Gunasekaran, P. Coane, and K. Varahramyan, "Polymer-based variable focal length microlens system", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, No. 12, p. 1665, 2004.

- [9] J. Chen, W. Wang, J. Fang, and K. Varahramyan, "Variable-focusing microlens with microfluidic chip", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, No. 5, p. 675, 2004.
- [10] S. Chao, R. Carlson, and D. R. Meldrum, "Rapid fabrication of microchannels using microscale plasma activated templating (μ PLAT) generated water molds", *Lab Chip*, Vol. 7, No. 5, pp. 641-643, 2007.
- [11] X. Liu, Q. Wang, J. Qin, and B. Lin, "A facile 'liquid-molding' method to fabricate PDMS microdevices with 3-dimensional channel topography", *Lab Chip*, Vol. 9, No. 9, pp. 1200-1205, 2009.
- [12] J. Y. Park, C. M. Hwang, and S. H. Lee, "Ice-lithographic fabrication of concave microwells and a microfluidic network", *Biomed. Microdevices*, Vol. 11, No. 1, pp. 129-133, 2009.
- [13] H. K. Kim and K. S. Yun, "Fabrication method of PDMS microlenses using water-based molding method", *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 17, No. 5, pp. 375-379, 2008.