

전기유체분사를 이용한 PDMS 마이크로렌즈 제작

강태호, 양상식
아주대학교 전자공학과

PDMS Microlens Fabrication by Electrohydrodynamic Atomization

Tae Ho Kang, Sang Sik Yang
Ajou University, Division of Electrical & Computer Engineering

Abstract - 본 논문에서는 PDMS 프레폴리머의 전기유체분사를 이용하여 마이크로렌즈를 제작했다. 전기유체분사 시스템에서 인가전압과 기관 온도의 두 가지 변수를 변화시키면서 제작한 PDMS 마이크로렌즈의 특징을 파악하였으며, 인가전압이 증가함에 따라 마이크로렌즈의 직경이 작아지고, 기관 온도가 증가함에 따라 마이크로렌즈의 직경이 작아지고 접촉각이 커지는 것을 확인하였다. 제작된 PDMS 마이크로렌즈의 특성을 평가하기 위하여 가우시안 빔 투과 실험을 하였다. 측정된 초점 거리는 계산된 초점거리와 5 mm 차이가 났으며, 렌즈를 투과된 가우시안 빔은 초점에서 최대의 파워밀도와 최소의 유효반경을 가지는 것으로 측정되었다.

1. 서 론

미소 광학 기술은 광섬유 커플러, 레이저 빔 소자, CCD 카메라뿐만 아니라, 레이저 유도 형광법, 광학 트위저, 마이크로 이미징 등 다양한 분야에 응용되고 있다. 미소 광학 기술은 발광 및 수광 소자, 마이크로 렌즈, 광섬유 등의 다양한 미소 광학 소자를 이용하여 구현된다. 다양한 미소 광학 소자 중에서 마이크로렌즈는 현재까지 열적 환류 [1], 마이크로 이송 성형 [2], 연성 모사 주형 [3], 잉크젯 프린팅 [4] 등의 방법으로 제작되어 왔다. 열적 환류를 이용한 방법은 스핀 코팅되는 포토레지스트 두께의 제한이 있으며 열을 가하는 과정에 따라서 포토레지스트가 변성되어 굴절율이 변할 수 있다. 마이크로 이송 성형, 연성 모사 주형, 잉크젯 프린팅을 이용한 방법은 제작 공정에 사용하는 재료의 제약이 많다. 재료와 기관 사이의 접촉각, 점성 등을 고려하여 공정을 진행해야 하므로 공정상의 최적 조건을 구하는데 시간과 비용이 많이 소모되며, 제작된 마이크로렌즈의 초점 거리, 곡률 등이 재료에 따라 제한된다. 특히, 잉크젯 프린팅을 이용한 방법은 사진식각술을 사용하지 않으므로 비교적 손쉽게 마이크로렌즈를 제작할 수 있으나, 잉크로 사용되는 마이크로렌즈의 재료가 노즐을 통해 기계적으로 분사되어야 하므로 높은 점성의 재료는 사용이 불가능한 단점이 있다.

본 논문에서는 현재까지 제시되었던 방법과는 달리 PDMS 프레폴리머의 전기유체분사를 이용하여 마이크로렌즈를 제작하고자 한다. 전기유체분사는 잉크젯 프린팅처럼 액적을 분사하는 방법의 하나이다. 본 논문에서 제안하는 제작 방법은 마이크로렌즈의 직경과 접촉각을 제작 조건에 따라 변경할 수 있으므로 다양한 목적에 맞추어 적용될 수 있다.

2. 마이크로렌즈의 제작 방법

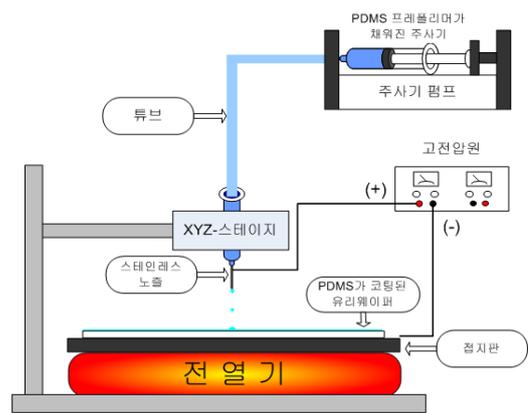
전기유체분사는 정전기장을 이용하여 액적을 분사하는 방법이다. 전기유체분사된 액적은 기계적 분사 방식에 비하여 액적의 크기가 작고 노즐의 크기와 무관한 장점이 있으며, 현재까지 미소입자의 표면코팅, 약물전달 시스템, 나노 섬유 제조 등 다양한 분야에 응용되고 있다 [5]. 전기유체분사는 노즐에서 분출되는 액체의 메니스커스의 모양에 따라 적하, 스핀들, 콘택 모드로 분류된다. 분사된 액적의 크기는 정전기장의 세기, 액체의 주입 속도, 점성, 전도성 등의 영향을 받는다. 본 논문은 적하모드와 스핀들모드로 PDMS 프레폴리머를 전기유체분사를 할 것이다. PDMS 프레폴리머는 주재료와 경화제를 교반한 액체상의 물질이므로 전기유체분사에 적용될 수 있으며 경화된 후 PDMS가 된다. 그림 1은 PDMS 프레폴리머를 전기유체분사하여 마이크로렌즈를 제작하기 위한 시스템이다. 고전압원이 연결된 노즐-접지판 사이는 정전기장이 인가되며, 주사기 펌프는 일정한 주입율로 PDMS 프레폴리머를 노즐 밖으로 밀어준다. 정전기장은 노즐 밖으로 밀려나온 PDMS 프레폴리머의 메니스커스 표면을 정전분극화하며, 이때 생긴 표면전하는 PDMS 프레폴리머의 표면장력을 감소시키며 정전기장에 의하여 접지판 쪽으로 가속되어 길게 늘어지다가 액적으로 분사된다.

전기유체분사에서 액체의 표면장력 감소는 전기장의 세기, PDMS 프레폴리머가 정전분극화 되는 속도, PDMS 프레폴리머의 주입율과 점성의 영향을 받게 된다. 노즐-접지판 사이의 정전기장의 세기를 증가시키면 PDMS 프레폴리머의 메니스커스에 유도되는 표면전하가 증가하

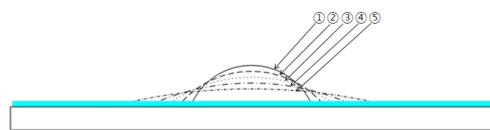
로 표면장력의 감소 정도가 증가할 것이다. 일정한 전기장과 주입율이 전기유체분사 시스템에 인가된 경우 PDMS 프레폴리머 액적은 주기적으로 분사된다. 이러한 주기성은 일정한 정전기장에서 PDMS 프레폴리머의 정전분극 속도가 일정하다는 것을 의미하므로 PDMS 프레폴리머의 주입율은 표면장력의 감소에 직접 영향을 줄 것이다. PDMS 프레폴리머가 정전분극되는 속도는 PDMS 프레폴리머를 구성하는 분자의 이동도 및 전기전도성과 관련이 있을 것이다. 분자의 이동도는 점성이 클수록 낮아지며 일정한 온도에서 일정하게 유지된다. 일정한 주입 온도에서 PDMS 프레폴리머의 주입율과 노즐-접지판 사이에 인가되는 정전기장의 세기를 조절하면 분사되는 액적의 크기를 조절할 수 있다.

PDMS 프레폴리머 액적은 PDMS가 코팅된 유리웨이퍼 위에 전기유체분사되어 마이크로렌즈가 된다. 분사된 PDMS 프레폴리머는 표면장력에 의하여 반구형의 곡면을 형성하며 경화된 후 미소 평철렌즈 (plano-convex microlens)가 된다. PDMS 프레폴리머는 경화되어 PDMS가 되므로 두 물질 사이의 표면에너지 차이는 매우 작으며 경화된 마이크로렌즈의 접착력 또한 우수하다. 최소 표면에너지 차이로 인하여 PDMS 프레폴리머 액적은 PDMS 위에서 작은 접촉각을 형성한다. PDMS 프레폴리머 액적은 노즐에서 분사된 후 기관과 만나는 순간에 그림 2의 ①번과 같은 큰 접촉각의 곡면을 형성하지만, 시간이 지남에 따라 최소 표면에너지 차이에 의하여 그림 2의 ⑤번과 같은 작은 접촉각의 곡면으로 퍼진다. PDMS 프레폴리머는 시간이 지남에 따라 경화가 진행되므로 PDMS 프레폴리머 액적을 ⑤번 곡면으로 완전히 퍼지기 전에 경화시킬 수 있다면 ⑤번 곡면보다 큰 접촉각의 마이크로렌즈를 제작할 수 있을 것이다. 분사된 PDMS 프레폴리머 액적은 부피에 비하여 표면적이 매우 크므로 짧은 시간에 경화될 수 있다. PDMS 프레폴리머의 경화시간은 기관 온도의 영향을 받으므로 전열기를 이용하여 PDMS가 코팅된 기관의 온도를 다양하게 유지시켜준다면 마이크로렌즈의 접촉각을 조절할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 노즐-접지판 사이의 인가전압과 전열기의 온도를 변화시켜서 다양한 직경과 접촉각의 PDMS 마이크로렌즈를 제작하였다.



〈그림 1〉 PDMS 프레폴리머의 전기유체분사를 위한 시스템



〈그림 2〉 분사된 PDMS 프레폴리머 액적의 곡면변화 (①⇒⑤)

3. 인가전압에 따른 마이크로렌즈의 직경

인가전압에 따른 마이크로렌즈의 직경 변화를 측정하기 위해 노즐-접지판 사이에 1200 V에서 1900 V까지의 전압을 인가하여 마이크로렌즈의 제작을 실험하였다. 표 1은 본 실험에서 PDMS 프레폴리머를 전기유체분사하기 위해 적용한 실험 조건이다. 그림 3은 크기의 비교를 위하여 현미경(Olympus, BX51)의 배율을 5배로 고정된 상태에서 화면 캡처 소프트웨어(Image Pro Plus)를 사용하여 찍은 사진이다. 그림 3에서 알 수 있듯이, 인가전압의 크기가 줄어들수록 제작된 마이크로렌즈의 직경은 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 3.D는 큰 것과 작은 것, 두 가지의 사진으로 구성되어 있다. 1600 V의 전압이 인가된 경우에는 큰 액적과 작은 액적이 번갈아가며 분사되는 것을 확인하였는데, 이렇게 되는 이유는 노즐과 접지판 사이에 1600 V를 인가한 경우가 전기유체분사의 모드를 스핀들 모드와 적하 모드가 혼재하는 과도기적 상태이기 때문으로 생각된다. 인가 전압이 1700 V 이상일 때는 스핀들 모드에서, 1500 V 이하일 때는 적하 모드에서 PDMS 프레폴리머가 전기유체분사되는 것으로 생각할 수 있다. 그림 4는 노즐-접지판 사이의 인가전압에 따른 마이크로렌즈의 직경과 접촉각에 대한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이, 본 실험에서 제작할 수 있었던 마이크로렌즈의 최소 직경은 약 471 μm , 최대 직경은 약 2850 μm 이며, 마이크로렌즈의 직경이 증가함에 따라 접촉각이 소폭 상승하는 것을 확인하였다. 측정된 마이크로렌즈의 접촉각은 약 $7^\circ - 9^\circ$ 로 거의 일정하다. 마이크로렌즈의 직경이 증가함에 따라 접촉각이 소폭 상승하는 것은 증착된 PDMS 프레폴리머 액적의 곡면에 표면장력뿐만 아니라 증력도 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다.

4. 기판 온도에 따른 마이크로렌즈의 접촉각

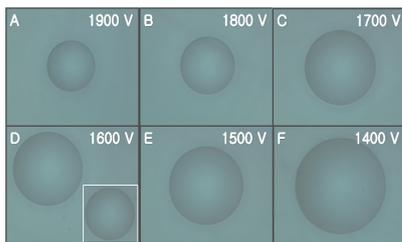
기판 온도에 따른 마이크로렌즈의 접촉각 변화를 측정하기 위해 전열기를 이용하여 기판을 20 $^\circ\text{C}$ 에서 150 $^\circ\text{C}$ 까지 가열하면서 마이크로렌즈의 제작을 실험하였다. 그림 5는 다양한 기판 온도에서 제작된 마이크로렌즈의 사진이다. 그림 6은 기판 온도와 제작된 마이크로렌즈의 직경 및 접촉각의 관계를 나타낸 그래프이다. 기판 온도가 150 $^\circ\text{C}$ 일 때 마이크로렌즈의 직경과 접촉각은 157 μm , 46.8° , 기판 온도가 20 $^\circ\text{C}$ 일 때는 471 μm , 7.4° 로 측정되었다. 그림 6에서 알 수 있듯이 기판 온도가 증가함에 따라 제작된 마이크로렌즈의 직경은 감소하고 접촉각은 증가한다.

5. 마이크로렌즈를 투과한 가우시안 빔의 측정

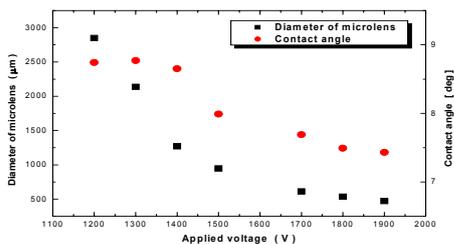
제작된 PDMS 마이크로렌즈의 특성을 평가하기 위하여 렌즈를 투과된 가우시안 빔의 프로파일을 측정해 보았다. 가우시안 빔은 파장이 800 nm인 티탄/사파이어 레이저 빔이며, 직경은 2.6 mm이다. 실험에 사용한 마이크로렌즈는 직경 2850 μm , 높이 109 μm 측정되었고, 초점거리는 21.789 mm로 계산되었다. 측정에 사용된 장비는 Coherent사의 LaserCam HRTM과 Beam Diagnostic Digital CMOS 카메라, Beam

〈표 1〉 PDMS 프레폴리머의 전기유체분사를 위한 실험 조건

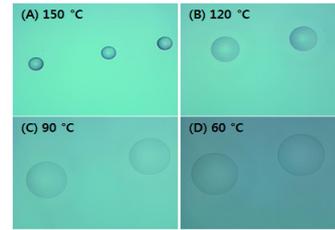
	인가전압	거리	주입율	기판 온도
직경 변화	1200~1900 V	2 mm	0.01 ml/hour	20 $^\circ\text{C}$
접촉각 변화	1900 V	2 mm	0.01 ml/hour	20~150 $^\circ\text{C}$



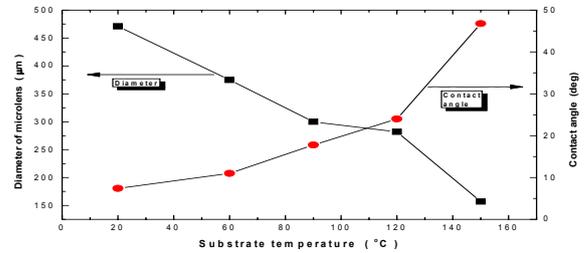
〈그림 3〉 다양한 인가전압에서 제작된 마이크로렌즈



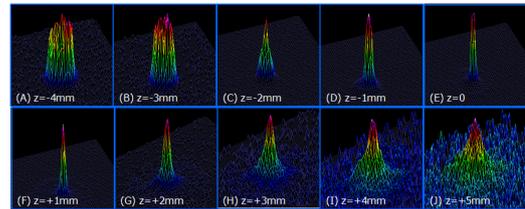
〈그림 4〉 인가전압에 따른 마이크로렌즈 직경과 접촉각



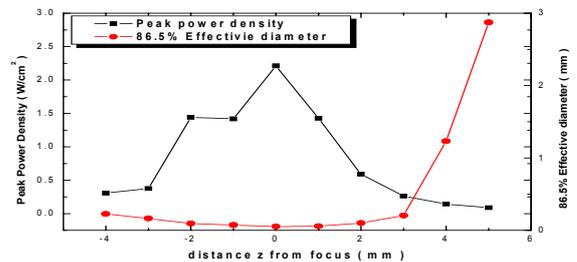
〈그림 5〉 다양한 전열기 온도에서 제작된 마이크로렌즈



〈그림 6〉 전열기 온도에 따른 마이크로렌즈의 직경과 접촉각



〈그림 7〉 마이크로렌즈를 투과한 가우시안 빔 프로파일



〈그림 8〉 마이크로렌즈를 투과한 가우시안 빔의 파워밀도와 빔 직경

View USB-TM 소프트웨어이다. 그림 7은 다양한 거리에서 측정된 가우시안 빔의 프로파일이다. 거리 z는 초점을 기준으로 한 CMOS 카메라의 변위이다. 본 실험에서 측정된 초점거리는 26.54 mm이다. 초점거리가 이론적인 값과 다르고 빔 프로파일 또한 초점에 대해서 대칭이 아니므로 마이크로렌즈에 구면오차가 존재함을 알 수 있다. 그림 8은 마이크로렌즈를 투과한 가우시안 빔의 파워밀도와 빔의 직경에 대한 그래프이다. 마이크로렌즈를 투과한 가우시안 빔은 초점에서 집중되어 파워밀도가 최대가 되고, 빔의 86.5% 유효반경이 최소가 된다.

6. 결론

본 논문에서는 PDMS 프레폴리머의 전기유체분사를 이용하여 마이크로렌즈를 제작했다. 제작된 마이크로렌즈는 인가전압과 기판 온도에 따라 다양한 직경과 접촉각을 가지며, 인가전압과 기판 온도가 증가함에 따라 작은 직경과 높은 접촉각을 갖는다. 두 가지 설계변수를 활용하면 일정한 직경, 다양한 접촉각의 렌즈 제작이 가능할 것이다. 차후 연구는 PDMS 프레폴리머의 전기유체분사를 이용하여 마이크로렌즈 어레이를 제작하는 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Jean-Christophe Roulet, et. al., *JMEMS*, 10, 482, 2001.
- [2] Chih-Yuan Chang, et. al., *J. Micromech. Microeng.*, 16, 999, 2006.
- [3] Ju-Nan Kuo, et. al., *J. Micromech. Microeng.*, 17, 693, 2007.
- [4] Li Yulin, et. al., *Optik*, 118, 395, 2007.
- [5] A. Jaworek, et. al., *Journal of Electrostatics*, 66, 197, 2008.