



열 재유동 공정을 통해 제작된 마이크로렌즈 배열의 곡률 및 높이 변화에 대한 가해지는 열 에너지의 영향에 관한 연구

김명서^a, 신승우^b, 김우영^a, 박서림^a, 이상훈^a, 조영태^a, 김 석^{a,*}

Effect of Thermal Energy on Change in Curvature and Height of Fabricated Microlens Array using Thermal Reflow Process

Myung Seo Kim^a, Seungwoo Shin^b, Woo Young Kim^a, Seo Rim Park^a, Sang Hoon Lee^a, Young Tae Cho^a, Seok Kim^{a,*}

^a Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University

^b Department of Advanced Battery Manufacturing Systems, Korea Institute of Machinery & Materials

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 April 2024
Revised 25 May 2024
Accepted 27 May 2024

Keywords:

MLA(microlens array)
Thermal reflow process
Glass transition temperature
Curvature

ABSTRACT

Micro Lens Arrays (MLAs) are modeled after insect eyes and comprise a (50–150) micrometer-sized array of lenses with multiple applications. We used photoresists (PR) in MLA construction to improve cost-efficiency over conventional methods. Reflow processes at temperatures beyond the glass-transition (glassy to rubbery state temperature) are used to mold lens shapes, making reflow ideal for shape reassembly. PR reflow in MLA production is rapidly adaptable, cost-effective and ensures uniform lens shapes in large-scale production. Experimental results show that, at constant temperatures, the lens curvature and height vary with reflow time. We empirically analyzed the influence of temperature and time on MLA curvature and height characteristics during reflow and proposed an approach to manipulate lens shape for desired focal lengths. Precise MLA fabrication offers insights into optimal process selection based on desired lens shapes in MLA production.

1. 서론

근층의 눈에서 영감^[1]을 얻어 제작된 마이크로렌즈 배열(microlens array)^[2,3,4]은 마이크로미터 크기의 렌즈 배열로 이뤄져 있으며, 평균 50~150 μm 의 크기를 가진다. 이러한 마이크로렌즈 배열 구조는 OLED(organic light emitting diode)의 전반사 방지, 현미경의 초점 조절 및 해상도 향상 등의 다양한 분야에서 이용이 각광받고 있다^[5-8]. 현재 제작되는 마이크로 렌즈 배열은 레이저 가공, 공구를 통한 가공, 등의 방법으로 제작이 이뤄지며, 이러한 방식을 사용할 경우 비용 효율적이지 못하다는 단점^[9-12]을

가지고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 제시되는 것이 포토레지스트(photoresist) 통해 구조물을 생성한 후 유리전도온도 이상의 온도에서 가열을 통해 렌즈의 형상으로 변환하는 열 재유동 공정이다^[13-15].

유리전이온도^[16-19] 가교 결합을 하고 있지 않은 고분자 물질이 유리상태에서 고무상태로의 전이가 이뤄지는 온도를 말한다. 일반적으로 물질을 정의할 때 고체가 액체가 되는 온도를 녹는점, 액체에서 기체가 되는 온도를 끓는점이라 정의하였을 때 일정 온도 이상의 온도로 가열 과정이 이뤄졌을 때 녹는점 보다 낮은 온도에서 분자의 배열이 자유로워지며 형상이 고체상에 비해 자유로워지

* Corresponding author. Tel.: +82-55-213-3604

E-mail address: kimseok@changwon.ac.kr (Seok Kim).

는 상태를 말한다. 이러한 리플로우 공정은 형상 재조립에 주로 이용된다.

포토레지스트의 리플로우 공정을 통한 마이크로 렌즈 배열 제작의 경우 매우 비용 효율적인 공정이며, 대면적의 마이크로 렌즈 배열 제작에 있어서도 균일한 렌즈의 형상 제작이 가능하며 빠른 대응이 가능하다는 장점이 있다. 초점거리^[20]에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 렌즈의 두께가 있지만 두께가 일정하다면 렌즈의 초점거리를 조절할 수 있는 인자는 곡률과 지름이다. 이를 제어하기 위해서는 온도와 시간이 가장 중요한 요인으로써 작용한다. 원형 배열로 크롬 도금된 마스크를 이용하여 노광을 진행한 후 포토레지스트의 현상과정을 거쳐 원기둥 배열을 생성한다.

이후 이 원기둥 배열을 유리전이온도 이상의 온도에서 가열과정을 거쳐 리플로우를 진행한다. 실험 결과 동일한 온도 하에서도 리플로우시 시간에 따라 곡률, 높이가 변화하는 것을 확인하였다. 또한 동일한 시간에서 온도를 다르게 리플로우를 진행했을 경우에도 시간을 제어했을 때와 같이 곡률, 높이가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 리플로우 공정을 이용하여 마이크로 렌즈 배열을 제작 시 리플로우 온도와 시간에 따라 제작되는 마이크로 렌즈 배열의 형상(지름, 렌즈 곡률, 높이)의 상관관계를 실험적으로 분석하여 마이크로 렌즈 배열 제작 시 원하는 초점거리를 가지는 렌즈의 형상을 제작할 수 있는 접근 방법을 제시한다. 동시에 마이크로 렌즈 배열 제작 시 정밀도 향상을 목표로 하며, 리플로우를 통해 렌즈의 형상을 제작 시 제작하고자 하는 렌즈의 형상에 따른 공정 선택에 통찰력을 제공한다.

2. 마이크로렌즈 배열의 제작

2.1 포토리소그래피 공정

본 연구에서는 초점거리 조절에 이용되는 마이크로 렌즈 배열의 제작을 위해 일련의 공정을 진행하였다. 마이크로 렌즈 배열의 형상이 제작될 기판은 유리 기판으로 56 mm × 73 mm × 3 mm의 크기를 가진다. 포토레지스트의 코팅에 앞서 유리 기판 위에 positive type의 AZ-4620 포토레지스트를 코팅 후 노광, develop 공정을 거쳐 원기둥 패턴을 생성하였고, 생성된 원기둥에 유리전이온도 이상의 온도에서 가열 과정을 거쳐 마이크로 렌즈 배열을 제작하였다. 기판으로 사용된 유리 기판의 세척을 위해 초음파 세척기 내부에 비치된 아세톤, 이소프로필알코올(IPA), 초순수(D.I. water)에서 각각 15분 동안 초음파 세척을 통해 기판을 세척한다. 이후 기판에 남아있는 잔여 수분을 모두 제거하기 위해 핫 플레이트에서 120°C, 20분간 건조 과정을 거친다. 기판의 건조 이후에 포토레지스트(AZ - 4620 : positive type) 5 ml를 고르게 도포한 후 스핀 코팅을 진행하였으며, 9 μm의 원기둥 배열을 생성하기

위해 500 RPM에서 10초, 1875 RPM에서 50초간 스핀 코팅을 진행하였다. 기판에 고르게 포토레지스트를 코팅한 이후 포토레지스트를 단단하게 굳히며 휘발성분을 제거하기 위해 95°C 핫 플레이트 위에서 10분간 가열 과정을 거친다. 이후 collimated LED를 광원으로 하여 포토레지스트가 경화되어 있는 기판에 노광을 진행하였다. 일반적인 LED를 사용하게 되면 빛의 특성상 직선으로 진행하지 않고 퍼지게 되므로 크롬 마스크의 크롬 도금되지 않은 부분을 빛이 통과할 때 산란하며 생성하고자 하는 구조물을 생성하기에 어렵다. 본 연구에서 사용된 collimated LED는 일정 부분에서의 빛이 직선으로 이동하는 성질을 가지고 있으므로 이를 조절하여 마스크를 통과하는 빛이 기판에 코팅된 포토레지스트에 닿을 때 직선 성분의 빛이 접촉할 수 있도록 하였다. 10회의 반복 측정을 통해 나타나는 collimated LED의 광량은 10.0 mW/cm²으로 측정되었다.

마스크는 직경 95 μm, 피치 100 μm의 원형이 사각 배열로 크롬 도금된 마스크를 사용하였으며, Fig. 1은 실험에 사용된 마스크를 나타낸다.

노광 공정은 collimated LED의 빛이 직선으로 이동하는 부분에 크롬 도금된 마스크를 위치시키고 그 위쪽으로 포토레지스트가 코팅된 유리 기판의 코팅된 면을 마스크와 접촉시켜 노광 공정을 진행하였다. 노광 공정 이후 AZ-400K 용액을 통해 develop 공정을 진행하였으며 기판에 원하는 형상을 제외한 나머지 부분을 습식 식각을 통해 제거하였다. 일련의 공정을 통해 제작된 원기둥 배열의 형상 정밀도는 레이저 컨포컬 현미경을 통해 확인하였으며 25 mm × 25 mm 크기의 정사각형 면적에서 각 모서리 및 중심을 측정하여 전체 면적에 대한 형상 정밀도를 측정하였다. 측정 결과 마스크의 형상과 유사한 96 ± 0.3 μm의 직경을 가지는 원기둥 배열이 생성되는 것을 확인하였고, 기둥의 높이는 목표로 설정한 9 ± 0.1 m로 생성되었다. Fig. 2는 유리 기판 위 포토레지스트

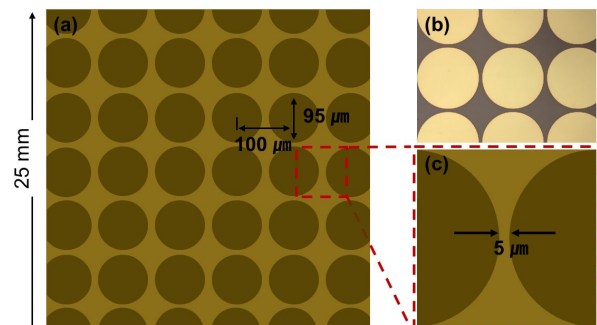


Fig. 1 Chrome plating mask used in the exposure process (a) Diameter, pitch, and overall size of the chrome mask (b) Chrome mask image taken through laser confocal microscopy (c) Distance between circular plated chrome

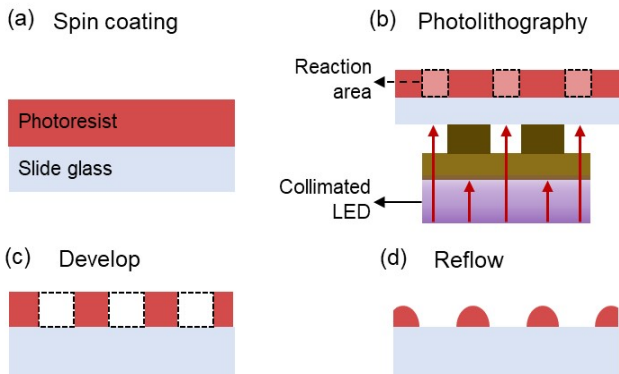


Fig. 2 Schematic diagram of the microlens array creation process
 (a) Spin coating of AZ-4620 photoresist on a glass substrate (b) Exposure process through chrome plating mask and collimated LED (c) After the exposure process, parts that reacted to UV light are removed to create a cylindrical structure (d) Shape reassembly through reflow using a hot plate

코팅 이후 노광을 통해 원통형 구조물을 생성하고, 핫 플레이트를 이용한 리플로우 과정을 통해 마이크로 렌즈 배열을 생성하는 일련의 과정을 나타낸다.

2.2 열 재유동 공정

우리는 제작된 원기둥 배열을 렌즈의 형상으로 바꾸기 위해 유리전이온도 이상의 온도로 가열하는 과정을 거쳤다. 우리는 유리전이 온도에서의 형상 재 조립되는 현상을 이용하여 원기둥 형상을 렌즈의 모양과 같은 반구형 형상으로 재 조립하고자 하였다. 사용된 포토레지스트(AZ-4620)는 유리전이온도가 110°C이며, 110°C 이상의 온도에서 가열 시 형상의 재조립이 나타난다. 가열은 핫 플레이트를 사용하였으며 시간과 온도에 따른 리플로우시 곡률, 높이, 직경의 변화에 대해 분석을 진행하였다. 리플로우를 통해 마이크로 렌즈 배열의 형상으로서의 형상변화에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔다. 우리는 포토레지스트의 형상 재조립을 진행하였다. 리플로우 공정의 시작 온도는 선행 연구를 통해 160°C에서 시작하였으며, 유리기판 위 원기둥 배열에 가해지는 총 에너지를 조절하며 실험을 진행하였다. 가해지는 총 에너지는 시간과 온도를 조절하여 설정하였으며, 순서대로 시간은 줄이고 온도는 늘리는 방식으로 각각 160°C 10분, 165°C 8분, 170°C 8분, 200°C 5분, 250°C 4분의 조건 하에 진행하였다. 각각의 경우에서 모두 리플로우가 진행될 때 원기둥 배열이 반구형 렌즈 형상으로 재 조립된 것을 확인할 수 있었으며, 유리전이온도 이상의 온도에서 원기둥 형상이 재조립되는 과정을 통해 높이, 직경, 곡률의 변화가 관찰되었다. 리플로우 공정 진행 시 핫 플레이트로부터의 열에너지에 의해 포토레지스트를 구성하는 분자들의 배열이 자유로워지며 에너지를 최소화할 수 있는 형태인

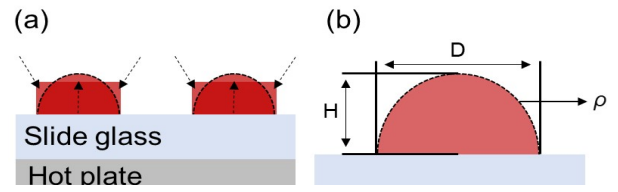


Fig. 3 Change in shape of structure through reflow (a) Reassembly of the cylindrical structure into a lens shape through reflow (b) Shape control variables of the microlens array created through the reflow process

반구 형태로의 변화가 나타난다. 리플로우 공정에서 포토레지스트는 액체와 고체 사이 고무 상태를 가지게 되는데 이때 포토레지스트와 기판의 상호작용 보다 포토레지스트가 가지는 표면장력의 영향이 강하게 작용하여 직경에 대한 변화는 관찰되지 않았으며, 상대적으로 구속이 적은 원기둥과 기판이 접촉하지 않는 부분은 마치 액체와 같은 거동을 하며 렌즈의 형상으로 형상변화 하였고 표면장력에 의해 렌즈 형상이 되었다. Fig. 3은 리플로우 공정을 거쳐 원통형 구조물이 마이크로 렌즈 배열로 변화하며 발생하는 높이(H), 곡률(θ), 직경(D) 정보를 나타낸다.

측정은 3D 레이저 현미경을 통해 진행하였으며, 25 mm × 25 mm 정사각형 면적의 모서리와 중심 총 5 포인트를 측정하여 데이터를 비교 분석하였다. Fig. 4(a)는 리플로우 공정 전 원기둥 형상과 리플로우를 통해 제작된 마이크로 렌즈 배열의 온도에 따른 형상을 나타낸다. 온도 변화와는 무관하게 모든 경우에서 렌즈의 형상으로 형상 재조립이 나타난 것을 확인할 수 있다. 각 리플로우 공정에 사용된 에너지별 높이, 직경 측정 결과 직경은 일정하며, 높이는 온도가 높아질수록 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 직경의 균일성은 표면장력의 영향에 의한 것으로 온도가 낮은 경우와 높은 경우 모두에서 표면장력이 강하게 작용하며 원기둥 형상에서 렌즈 형상으로 리플로우 될 때 직경을 유지하도록 하였기 때문이다. 이에 반해 높이는 공정 온도가 높아질수록 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 온도가 상승함에 따라 포토레지스트를 구성하고 있는 분자의 자유도가 상승하였기 때문이다. 구조물이 직접 기판과 접촉하고 있는 바닥면에서는 기판과의 접착력이 분자의 운동 에너지보다 높아 직경을 유지하였으나, 구조물의 기판과 먼 부분일수록 운동에너지가 더 크게 작용하여 상단부로의 유동이 활발히 발생하고 이로 인해 한 번에 높은 에너지를 전달받는 높은 공정 온도에서 낮은 높이를 가지게 된다. 이러한 결과를 뒷받침하는 결과로 곡률의 감소를 들 수 있다.

Fig. 4(b)는 온도의 증가에 따른 곡률과 높이 변화를 나타낸다. 공정 온도의 증가에 따라 높이가 감소하였고, 이로 인해 곡률 값 또한 감소하는 것을 확인하였다. 곡률 값은 공정 온도가 낮은 순서대로 160°C 10분, 165°C 8분, 170°C 8분, 200°C 5분, 250°C

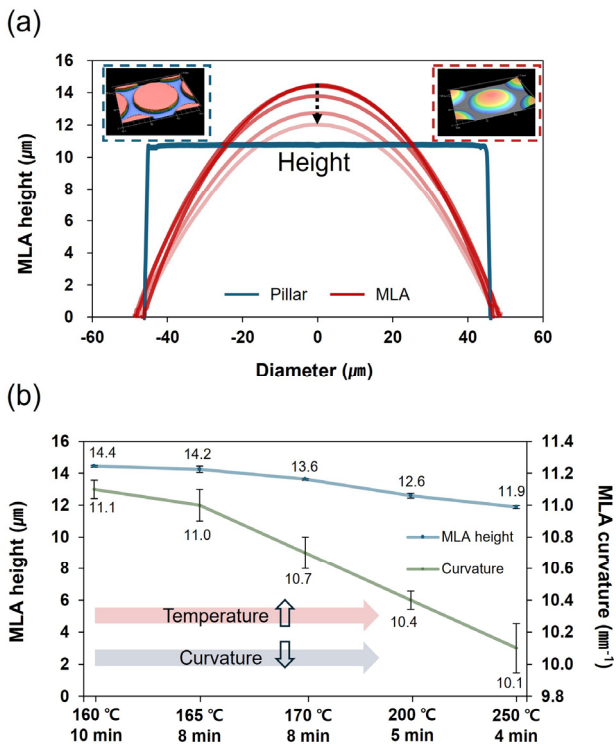


Fig. 4 Comparative analysis of MLA formed via initial pillar formation and reflow process (a) Alteration in pillar height pre-reflow and MLA height change post-reflow relative to temperature, (b) Diminution in height and curvature due to temperature elevation during reflow

4분에서 각각 0.0111 μm^{-1} , 0.011 μm^{-1} , 0.0107 μm^{-1} , 0.0104 μm^{-1} , 0.0101 μm^{-1} 로 나타났다. 200°C 5분, 250°C 4분의 경우 동일한 에너지를 다른 온도, 시간을 변수로 공정을 진행하였으나 온도가 상승함에 따라 높이, 곡률이 감소하는 경향성을 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 실험 결과를 통해 원하는 초점거리가 짧은 경우에는 낮은 온도, 긴 경우에는 높은 온도에서 공정을 진행하는 것이 타당하다 할 수 있다.

Fig. 5는 현미경의 투과모드를 통해 측정된 리플로우 공정 전후의 2차원 초점 광도 분포를 나타낸다. 초점 광도 측정은 제작된 렌즈의 집광 성능 테스트를 위해 진행되었다. 실험은 리플로우 공정을 거치지 않은 원통형 구조물과 리플로우 공정 이후 형상 재조립된 마이크로렌즈 배열의 집광 성능 비교를 통해 진행되었으며, 현미경의 스테이지 하단에서 백색광을 조사하여 현미경의 렌즈에 집중되는 빛의 이미지를 비교하였다. Fig. 5의 (a)와 (c)는 리플로우 공정을 거치기 전 원기둥 형상의 구조물을 통해 측정된 이미지이며, (b)와 (d)는 리플로우 공정을 통해 형상 재조립된 마이크로렌즈 배열을 통해 측정된 이미지이다. 리플로우 공정 전 구조물은 원기둥의 형상을 가져 상단이 평평하기 때문에 초점 광도 측정 시 마스크의 배열과 동일한 원의 형상이 나타나는 것을 확인하였다.

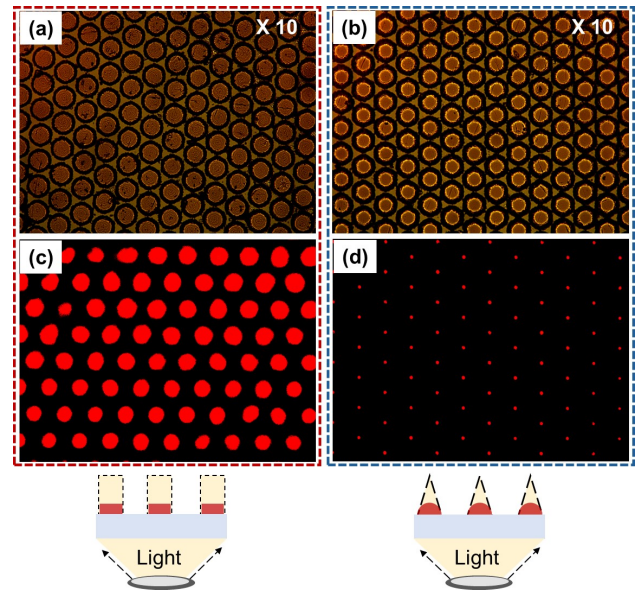


Fig. 5 Analysis of pillar array and MLA using fluorescence microscopy (a) Image captured with a fluorescence microscope showing the pillar array before the reflow process (b) Visualization of light gathering through MLA formation after the reflow process (c) Visual representation of the upper section of the pillar array and MLA (d) Enhanced light-gathering visualization of the pillar array and MLA accentuated using black & red image processing

리플로우 공정 이후 구조물은 원기둥의 형상에서 렌즈의 형상으로 형상 재조립되었으며, 초점 광도 측정 시 렌즈에 의해 마스크의 배열과 동일하게 집광 되는 것을 확인할 수 있었으나, 성능의 확연한 차이는 나타나지 않았다. 따라서 측정 성능의 향상을 위해 빛이 집광되는 정도를 흑색과 적색으로 나타내게 이미지 처리를 진행하였다. 이미지 처리 결과 원기둥 형상에서는 큰 원의 형상으로 이미지가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 형상 재조립이 진행된 마이크로렌즈 배열에서는 집광된 부분이 점과 같이 측정되어 렌즈가 잘 형성되었다는 것을 알 수 있다. 초점 광도 측정을 통해 리플로우 공정 이후 원기둥 구조물이 반구형 렌즈의 형상으로 형상 재조립되었음을 확인하였으며, 집광도 분석을 통해 제작된 마이크로렌즈 배열의 성능을 입증하였다.

실험 결과 온도가 증가함에 따라 리플로우 된 렌즈의 높이와 곡률이 감소하는 경향을 보인다. 렌즈의 곡률 값은 더 높은 온도에서 더 낮게 나타나는데, 이는 고온에서 분자의 자유도가 더욱 높아지기 때문으로 해석할 수 있다. 가장 낮은 온도인 160°C에서 10분간 가해진 열에너지에 의해 리플로우를 진행했을 때 보다 200°C에서 5분간 가해진 열에너지에 의해 리플로우를 진행한 마이크로렌즈 배열의 곡률이 더욱 작게 나타났다. 앞선 두 경우에서 160°C에서 10분간 리플로우를 진행한 경우가 온도는 40°C, 시간은

2배 많은 시간동안 리플로우가 진행되었다. 이는 같은 열에너지를 가하더라도 더욱 낮은 곡률을 가지는 마이크로 렌즈 배열의 제작을 위해서는 짧은 시간, 높은 온도에서 리플로우를 진행하는 것이 유리함을 나타낸다. 리플로우를 진행할 때 빠른 시간 내에 열에너지가 유입되는 경우 단시간에 고에너지가 포토레지스트에 유입되어 분자의 움직임이 매우 활발한 상태에 접어들게 된다. 이때 유리 기판과 가까운 포토레지스트의 경우 유리 기판과의 상호작용에 의해 움직임이 어렵기 때문에 상대적으로 움직임이 자유로운 상단부로의 변화가 활발히 나타나 곡률 값이 변화하게 된다. 반면에 직경은 온도가 높아져도 일정하게 유지되었으며, 이는 기판과 포토레지스트가 접촉하고 있는 바닥면에서의 표면장력이 강하게 작용하였기 때문이다. 정리하면, 온도가 높아질수록 렌즈의 형상이 더욱 안정화되면서 더 낮은 곡률값을 가지며, 온도가 동일하더라도 열에너지가 가해지는 시간이 낮을수록 낮은 곡률값을 가진다. 본 실험 결과는 핫 플레이트를 통한 리플로우 공정에서 열에너지를 가할 때 온도 및 시간의 제어가 렌즈의 형상 제어에 지대한 영향을 미치는 것으로 확인되었으며, 높이, 곡률 값이 중요하게 작용하는 광학 소자로써의 마이크로 렌즈 배열을 제작 시 안정적으로 원하는 렌즈의 형상을 제작 및 성능 향상을 위한 제작법에 중요한 정보를 제공할 수 있다.

3. 결 론

본 연구는 리플로우를 통해 마이크로 렌즈 배열 형상을 제작하였으며, 총 열에너지 및 시간과 온도의 변화에 따른 형상 변화를 분석하여 리플로우를 통한 마이크로 렌즈 배열의 제작에 대한 통찰력을 제공한다. 유리 기판 위에 positive type의 AZ-4620 포토레지스트를 코팅하고, 노광 및 개발 공정을 통해 원기둥 패턴을 형성한 후, 이를 가열하여 마이크로 렌즈 배열을 제작하는 과정을 수행하였다. 노광에는 직경 95 μm , 피치 100 μm 의 크롬 마스크를 이용하였으며, 원기둥 배열을 성공적으로 형성하였다. 이후, 포토레지스트를 굳히기 위해 95°C 핫 플레이트에서 10분 동안 가열을 진행하였다. 이후 직선 성분의 빛을 이용하기 위해 collimated LED를 이용하여 노광 하고, 마지막으로 AZ-400K 용액을 사용하여 현상 과정을 거쳐 원하는 형상을 제외한 나머지 부분을 습식 식각을 통해 제거하여 원기둥 직경 95 μm 의 원기둥 배열을 생성하였다. 제작된 원기둥 배열의 형상 정밀도는 레이저 컨포컬 현미경을 사용하여 확인하였으며, 높이는 평균 $9 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 그 후, 원기둥 형상의 배열을 렌즈 형상으로 변환하기 위해 리플로우 공정을 진행하였다. 핫 플레이트를 이용한 가열과정을 통해 유리전이온도 이상의 고온에서 포토레지스트 분자들의 배열이 반구형 렌즈 형상으로 재조립되었다.

실험 결과에 따르면, 리플로우 공정 중 온도가 증가함에 따라 렌즈의 높이와 곡률이 감소하는 경향을 나타내었으며, 같은 열에너지를 통해 가열을 진행한 경우에도 짧은 시간 가열을 통해 리플로우를 진행한 경우에서 곡률이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 고온에서 분자의 운동이 더 활발해지기 때문이다. 유리 기판과 상대적으로 먼 포토레지스트의 경우 고온일수록 열에너지에 의한 분자들의 움직임이 활발하여 형상 재조립이 활발하게 나타난다. 또한 고온에서의 곡률 감소는 분자의 자유도가 상승함에 따라 발생하는 결과로 추론이 가능하다. 놀라운 점은 렌즈의 직경이 온도가 높아져도 일정하게 유지된다는 것이다. 이러한 결과는 유리 기판과 포토레지스트가 직접 접촉하고 있는 부분에서의 표면장력의 영향으로 원기둥 형상에서 렌즈 형상으로의 형상 변화가 진행되는 동안에도, 직경을 효과적으로 유지함으로써 안정성을 유지하는 특성을 나타낸다. 결론적으로, 실험을 통해 얻은 결과는 리플로우 공정을 통해 마이크로 렌즈 배열의 안정성과 성능을 향상시키는 데 중요한 정보를 제공한다. 이러한 정보를 활용하여 안정적으로 렌즈의 형상을 제어할 수 있는 적절한 공정 파라미터를 식별할 수 있다면, 광학 소자의 성능 향상 및 안정성을 동시에 확보하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 연구 결과는 초점거리 조절을 위한 렌즈의 곡률 조절을 통한 광학 소자 제조 분야에서의 응용 가능성을 크게 높일 수 있다.

후 기

이 논문은 2023-2024년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

References

- [1] Brückner, A., Duparré, J., Leitel, R., Dannberg, P., Bräuer, A., Tünnermann, A., 2010, Thin Wafer-level Camera Lenses Inspired by Insect Compound Eyes, *Opt. Express*, 18:24 24379-24394, <https://doi.org/10.1364/OE.18.024379>.
- [2] Dan, D., 2000, *Microlens Arrays*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- [3] Borrelli, N. F., 2017, *Microoptics Technology: Fabrication and Applications of Lens Arrays and Devices*, CRC Press, Boca Raton, <https://doi.org/10.1201/9781420030907>.
- [4] Lee, N. S., 2023, Replication of Microlens Array via Partial-filling Compression Molding, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 32:1 17-23, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2023.32.1.17>.
- [5] Tien, C.-H., Hung, C.-H., Yu, T.-H., 2009, Microlens Arrays by Direct-writing Inkjet Print for LCD Backlighting Applications,

- J. Disp. Technol., 5:5 147-151, <https://doi.org/10.1109/JDT.2009.2013874>.
- [6] Levoy, M., Zhang, Z., McDowall, I., 2009, Recording and Controlling the 4D Light Field in a Microscope using Microlens Arrays, *J. Microsc.*, 235 144-162, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.2009.03195.x>.
- [7] Nakamura, M., Mano, I., Taniguchi, J., 2019, Fabrication of Micro-lens Array with Antireflection Structure, *Microelectron. Eng.*, 211 29-36, <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.03.020>.
- [8] Yuan, W., Li, L.-H., Lee, W.-B., Chan, C.-Y., 2018, Fabrication of Microlens Array and its Application: A Review, *Chin. J. Mech. Eng.*, 31:16 1-9, <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0204-y>.
- [9] Yabu, H., Shimomura, M., 2005, Simple Fabrication of Micro Lens Arrays, *Langmuir*, 21:5 1709-1711, <https://doi.org/10.1021/la046996z>.
- [10] Sohn, I.-B., Choi, H.-K., Noh, Y.-C., Kim, J., Ahson, Md. S., 2019, Laser Assisted Fabrication of Micro-lens Array and Characterization of Their Beam Shaping Property, *Appl. Surf. Sci.*, 479 375-385, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.083>.
- [11] Nussbaum, Ph., Völkel, R., Herzig, H. P., Eisner, M., Haselbeck, S., 1997, Design, Fabrication and Testing of Microlens Arrays for Sensors and Microsystems, *Pure Appl. Opt. : J. Eur. opt. soc. part A*, 6:6 617-636, <https://doi.org/10.1088/0963-9659/6/6/004>.
- [12] Yi, A. Y., Li, L., 2005, Design and Fabrication of a Microlens Array by use of a Slow Tool Servo, *Opt. Lett.*, 30:13 1707-1709, <https://doi.org/10.1364/OL.30.001707>.
- [13] Park, M.-K., Lee, H. J., Park, J.-S., Kim, M., Bae, J. M., Mahmud, I., Kim, H. -R., 2014, Design and Fabrication of Multi-focusing Microlens Array with Different Numerical Apertures by using Thermal Reflow Method, *J. Opt. Soc. Korea.*, 18:1 71-77, <https://doi.org/10.3807/JOSK.2014.18.1.071>.
- [14] Huang, S., Li, M., Shen, L., Qiu, J., Zhou, Y., 2018, Fabrication of High Quality Aspheric Microlens Array by Dose-modulated Lithography and Surface Thermal Reflow, *Opt. Laser Technol.*, 100 298-303, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.10.026>.
- [15] Qiu, J., Li, M., Ye, H., Zhu, J., Ji, C., 2018, Fabrication of High Fill-factor Microlens Array using Spatially Constrained Thermal Reflow, *Sens. Actuator A-Phys.*, 279 17-26, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.05.039>.
- [16] Moynihan, C. T., Eastale, A. J., Wilder, J., Tucker, J., 1974, Dependence of the Glass Transition Temperature on Heating and Cooling Rate, *J. Phys. Chem.*, 78 2673-2677, <https://doi.org/10.1021/j100619a008>.
- [17] Roudaut, G., Simatos, D., Champion, D., Contreras-Lopez, E., Le Meste, M., 2004, Molecular Mobility around the Glass Transition Temperature: A Mini Review, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 5:2 127-134, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2003.12.003>.
- [18] Pascault, J. P., Williams, R. J. J., 1990, Glass Transition Temperature Versus Conversion Relationships for Thermosetting Polymers, *J. Polym. Sci. Pt. B-Polym. Phys.*, 28:1 85-95, <https://doi.org/10.1002/polb.1990.090280107>.
- [19] Dudowicz, J., Freed, K. F., Douglas, J. F., 2005, The Glass Transition Temperature of Polymer Melts, *J. Phys. Chem. B*, 109:45 21285-21292, <https://doi.org/10.1021/jp0523266>.
- [20] Hsieh, H.-T., Lin, V., Hsieh, J. -L., John Su, G. -D., 2011, Design and Fabrication of Long Focal Length Microlens Arrays, *Opt. Commun.*, 284:21 5225-5230, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.07.037>.

| | |
|--|---|
|  | <p>Myung Seo Kim M. S. Students in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is Nano-micro Technology. E-mail: 20215000@gs.cwnu.ac.kr</p> |
|  | <p>Seungwoo Shin Postdoctoral Researcher in the Department of Advanced Battery Manufacturing Systems, Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM). His research interests are Manufacturing system for Nano-imprintlithography and DLP 3D Printing. E-mail: swshin@kimm.re.kr</p> |
|  | <p>Woo Young Kim Ph. D. Candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interests are Surface Engineering and Nano-micro Technology. E-mail: wooyoung0329@changwon.ac.kr</p> |



Seo Rim Park

Ph. D. Student in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University.

Her research interests are 3D Printing and Nano-micro Technology.

E-mail: qkrtjflakr@changwon.ac.kr



Sang Hoon Lee

M. Sc. Candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University.

His research interests are Surface Engineering and Nano-micro Technology.

E-mail: netsh2@changwon.ac.kr



Young Tae Cho

Professor in the Department of Mechanical Engineering in Changwon National University.

His research interests are Welding/Joining, Additive Manufacturing, Laser applied Material Processing, Nano-Micro Fabrication, Imprint Process, Super-Hydrophobic Surface Fabrication, Printed Electronics, and Precision Manufacturing System.

E-mail: ytcho@changwon.ac.kr

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7545-4646>



Seok Kim

Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering in Changwon National University.

His research interests are Multiscale Manufacturing with Functional Materials for Energy, Environmental, and Biological Applications.

E-mail: kimseok@changwon.ac.kr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6049-6461>