



## 부분충진 압축성형 방식에 의한 마이크로 렌즈 어레이 제작에 관한 연구

이남석<sup>a\*</sup>

## Replication of Microlens Array via Partial-filling Compression Molding

NamSeok Lee<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Smart Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	15	November	2022
Revised	27	December	2022
Accepted	25	January	2023

## Keywords:

Micro lens array  
Electroforming  
Master pattern  
Micro mold  
Compression molding  
Partial filling

## ABSTRACT

In this study, the fabrication method of a microlens array was investigated using the partial-filling compression molding process. During the full-filling molding process, the sticking that occurs during the release can deteriorate the surface quality of the molded microlens. Compared to full-filling molding, partial-filling compression molding exhibits easy release owing to the minimized contact area between the mold cavity and the molded part. The microlens array was fabricated using partial molding with Ni micromold via photolithography and Ni electroforming. Finally, the microlens array was replicated using the partial molding process, with a diameter and height of 50 and 8  $\mu\text{m}$ , respectively.

## 1. 서론

마이크로 렌즈(micro lens array)는 지름이 수십~수백  $\mu\text{m}$  인 초소형 렌즈로서, 반도체, 디스플레이, 광통신, 의료기기 등의 전자 부품에 다양하게 적용되고 있다<sup>[1-7]</sup>. 최근에는 이미지 센서의 효율 증가에 따른 카메라 성능 개선 및 바이오 칩의 광검출 시스템의 효율 증가 등의 목적으로도 확대되어 활용되고 있다.

이러한 마이크로 렌즈는 다양한 방식으로 제작될 수 있다. 전통적인 방식으로는 기계가공을 이용한 직접 가공 방식을 통해서 렌즈가 제작된 바 있다<sup>[8-10]</sup>. 하지만, 가공 공구 크기의 한계로 인해 500  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 크기 렌즈 제작은 불가능하여, 레이저 가공 방식 등 초정밀 가공을 이용한 직접 가공 방식으로 미세한 렌즈 제작이 이루어졌다<sup>[11,12]</sup>. 100  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 사이즈의 렌즈 어레이 제작을 위해 반도체 공정을 이용한 리플로우(reflow) 방식을

통해 제작되었다<sup>[13-15]</sup>. 또한, 잉크젯 방식을 통해서도 제작 되어진 바 있다<sup>[16,17]</sup>.

위에서 언급되어진 직접 제작 방식으로는 마이크로 렌즈의 대량 생산을 통한 저가 양산이 어려운 한계점이 있다. 반면, 미세 금형(micro mold)을 이용한 미세 압축 성형(micro compression molding) 또는 사출 성형(injection molding) 방식은 동일한 크기 및 형상을 갖는 미세 렌즈를 대량으로 제작하는데 적합한 방식으로 알려져 있다.

이에 다양한 방식을 통한 미세 금형 제작 및 성형에 관한 연구가 진행된 바 있다<sup>[18-22]</sup>. 하지만, 기존 완전 충전(full filling) 방식의 마이크로 렌즈 성형은 이형(release) 과정에서 금형과 성형품간 접촉에 의한 뜯김이 발생되어 렌즈 품질을 저하시킬 수 있다. 더욱이, 마이크로 렌즈의 경우에는, 금형과 성형품 패턴간 부피 대 면적 비율의 증가에 따라 뜯김 현상은 더 심각해질 수 있다<sup>[21,22]</sup>.

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-751-2079

E-mail address: nslee@yc.ac.kr (NamSeok Lee).

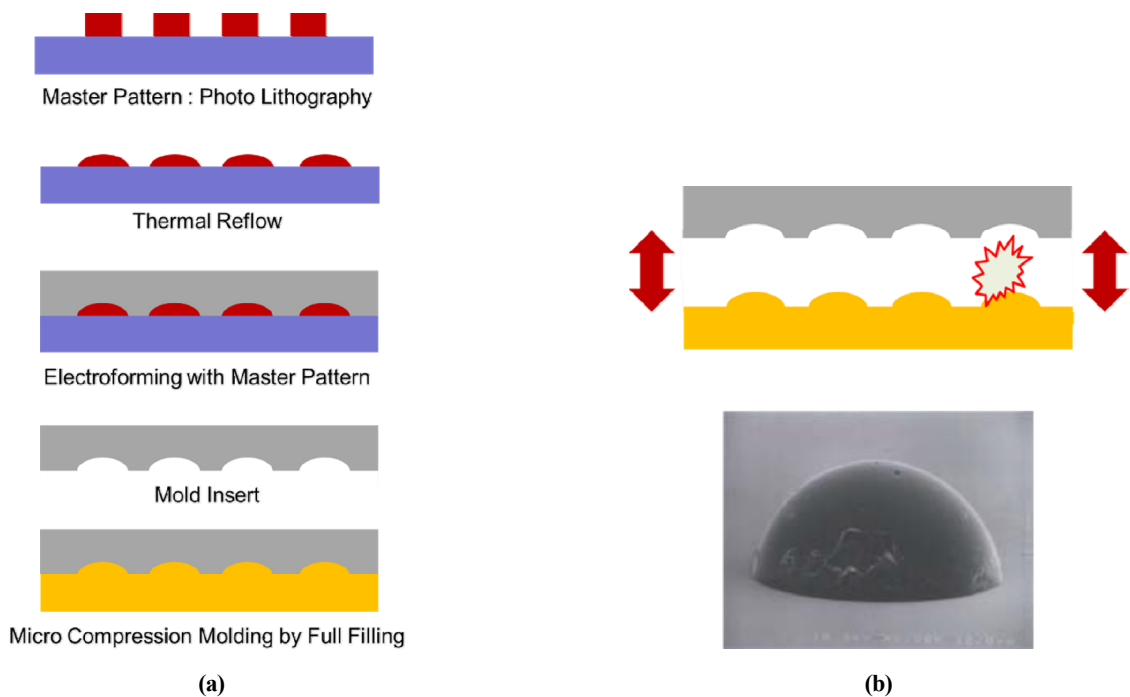


Fig. 1 (a) Fabrication process of micro lens array by micro compression molding with full filling process and (b) sticking problem during releasing process

Fig. 1은 기존 연구에서 수행된 리플로우 방식을 이용한 미세 금형 제작 및 완전 충진을 이용한 미세 렌즈 성형 공정의 개략도를 보여준다<sup>[21]</sup>. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이, 이형 과정에서 미세 금형 및 렌즈 성형품 간 접촉에 의한 뜯김으로 렌즈 품질 저하가 발생할 수 있다.

반면에 부분 충진(partial filling) 성형 방식은 미세 금형과 미세 성형품 간 접촉 면적을 최소화할 수 있으므로, 몰드와 미세 성형품 간의 뜯김 이슈 측면에서 유리할 수 있다<sup>[23,24]</sup>. 또한, 패턴 형성 후, 구면 형성을 위한 리플로우 공정이 필요 없으므로, 금형 제작 과정이 단순해진다. 또한, 부분 충진 성형후 이형 과정에서 성형품 및 미세 금형간 접촉 면적의 최소화가 가능하여 뜯김 발생 문제를 해결할 수 있다.

본 연구에서는 부분 충진 방식을 이용한 마이크로 렌즈 성형에 관해 실험적으로 검증하였다. 노광 공정(photo-lithography) 및 전주(electroforming) 공정을 통해, 캐비티(cavity) 형상을 지닌 니켈 미세 금형을 제작하였다. 제작된 미세 금형을 이용한 부분 충진 성형을 통해 최종적으로 반구형상의 미세 렌즈를 제작했다. 부분 충진 미세 압축 성형 공정에서 지배 공정 변수를 선정 및 조절하여 마이크로 렌즈의 높이를 최적화 하였다.

## 2. 마이크로 금형 제작

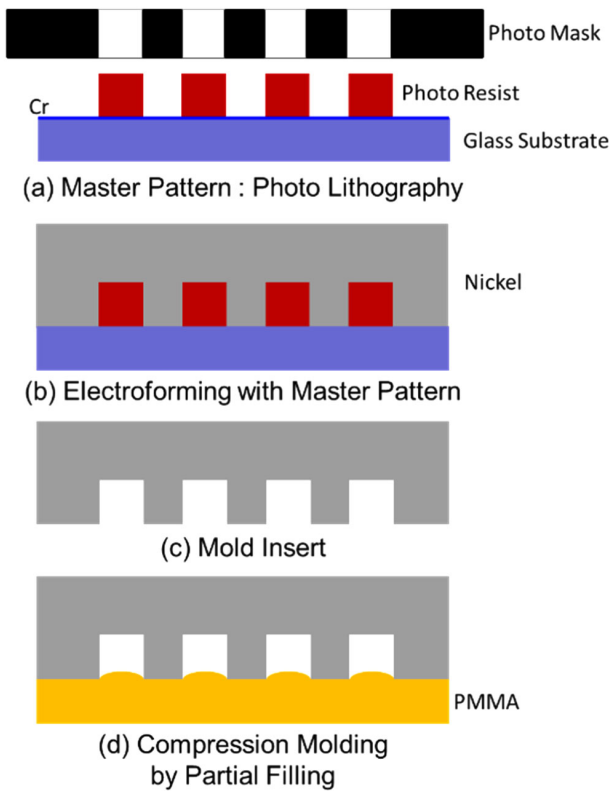
### 2.1 Fabrication of high aspect ratio (HAR) master pattern

Fig. 2는 미세 금형 제작 및 부분 충진 압축성형을 통한 미세

렌즈의 제작 공정 흐름도를 보여준다. Fig. 2(a)~(b)에서 보는 바와 같이, 노광 공정을 통해 마스터 패턴을 제작한 뒤, 이를 이용해서 니켈(Ni) 전주 도금 공정을 통해서 니켈 미세 금형을 제작하였다. 다양한 렌즈 직경 별 성형 특성을 분석하기 위해서, 마스터 패턴의 원기둥 필라 패턴(pillar pattern) 직경을 15/50/100/200  $\mu\text{m}$ 로 설계하였다. 양성 감광막(positive) 방식 노광 공정에 맞추어서 7×7인치 크기 유리(glass) 재질 마스크를 제작했다.

부분충진 성형 공정을 위해서는 몰드 캐비티 벽면과 렌즈 성형품간 접촉을 피하기 위해, 성형할 렌즈 높이보다 깊은 캐비티 형성이 필요하다. 본 연구에서는 고세장비(high aspect ratio) 형상을 지닌 마스터 패턴을 제작하기 위해서, LIGA(lithographic galvanofornung abfornung) 공정을 적용하여 진행했다<sup>[25,26]</sup>. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이, 전도층을 먼저 증착한 후, 그 위에 감광막(photo resist) 코팅 및 노광 공정을 진행하는 순서로 마스터 패턴을 제작했다. 130×130 mm 유리 기판에 스퍼터링(sputtering) 공정을 통해 2000 Å 두께의 크롬 박막을 증착했다. 유리 기판과의 밀착력 확보를 위해, 표면 에너지가 높은 크롬(Cr) 재료를 전도층으로 선택하였다.

크롬 박막이 증착된 유리 기판 상에 상압(atmospheric pressure) 플라즈마 산소(O<sub>2</sub>) 애싱(ashing) 공정을 진행한 후, 스핀 코팅(spin coating)을 통해 34  $\mu\text{m}$  두께의 감광막을 코팅했다. 감광막 코팅 후 110°C/30분 조건으로 소프트 베이킹(soft baking)을 진행 후, 직접 접촉(contact) 방식의 노광 공정을 통해서 원기둥 형상을



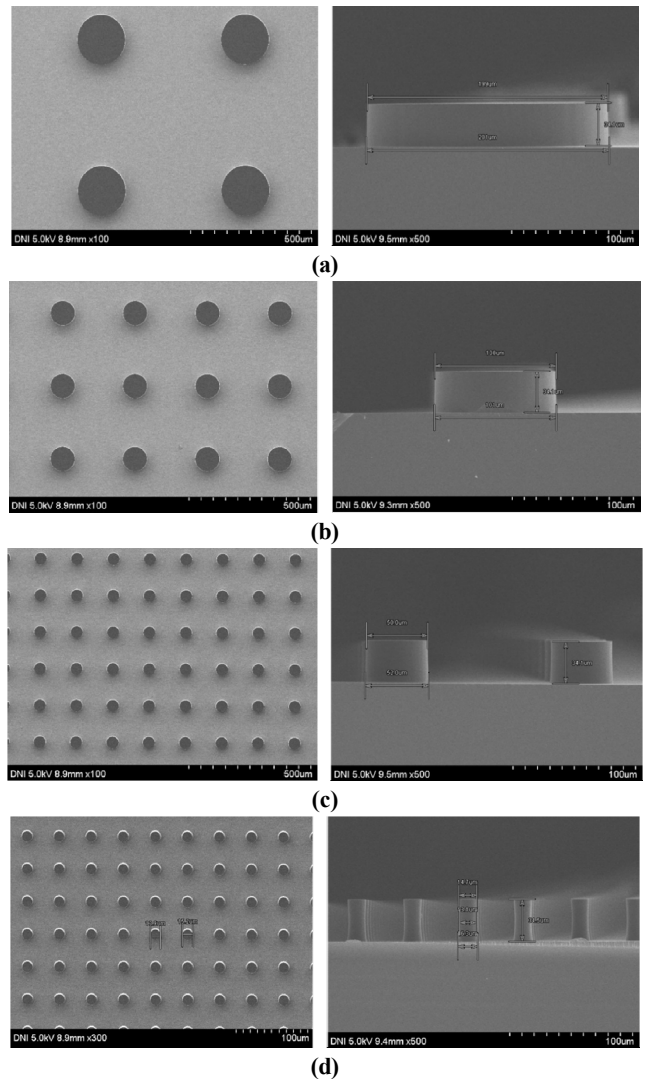
**Fig. 2** Process flow of Ni mold insert and partial filling compression molding; (a) Master pattern by photolithography, (b) Ni electroforming, (c) Micro mold with micro cavity, (d) Partial filling micro compression molding

지니는 마스터 패턴을 제작했다. 노광 조건은 노광 에너지 500 mJ, 노광 시간 31초로 최적화하여 진행했다.

Fig. 3은 본 연구에서 노광 공정을 통해 제작된, 마스터 패턴의 주사 전자 현미경(scanning electron microscopy) 측정 결과를 보여준다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 직경 15/50/100/200  $\mu\text{m}$ 와 높이 34  $\mu\text{m}$ 를 지니는 필라 패턴이 양호하게 형성됨을 확인할 수 있다. 특히, 최소 직경 15  $\mu\text{m}$ , 높이 34  $\mu\text{m}$ 로 세장비 2 이상의 고세장비 패턴이 제작됨을 확인할 수 있다.

## 2.2 Fabrication of Ni mold insert by electroforming

원기둥 형태의 마스터 패턴을 이용하여 음극의 캐비티를 지니는 미세 금형을 제작하기 위해, 니켈 (Ni) 전주 공정을 적용하였다. 니켈 도금액은  $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ 으로 구성된 니켈 설페이트(Ni sulfamate) 도금액을 사용하였다. Fig. 4(a)는 본 연구에서 적용된 Ni 전주 공정 장비의 사진을 보여준다. 음극(cathode) 쪽에 글래스 마스터 패턴을 장착하고 전주 공정을 진행했다. Ni 전주 공정의 조건은 온도 50 $^\circ\text{C}$ , pH 4-4.2, 전류 밀도 10~20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 진행했다. 30시간의 전주 공정을 통해, 두께 500  $\mu\text{m}$ , 면적 130 $\times$ 130 mm의 니켈 금형판



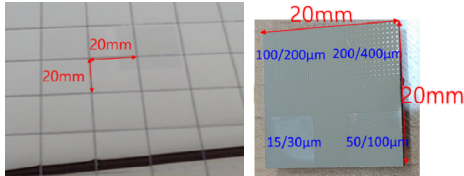
**Fig. 3** Fabrication results of pillar patterns on the master patterns with diameter/space of (a) 200  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ , (b) 100/200  $\mu\text{m}$ , (c) 50/100 $\mu\text{m}$ , and (d) 15/30  $\mu\text{m}$  with a height of 34  $\mu\text{m}$

(plate)을 제작하였다. 제작된 니켈 금형판을 미세 압축성형 장비에 맞추어, 방전 와이어 커팅(wire cutting) 방식으로 20 $\times$ 20 mm 사이즈의 몰드 인서트로 제작하였다. Fig. 4(b)는 제작된 니켈 금형판 및 몰드 인서트를 보여준다.

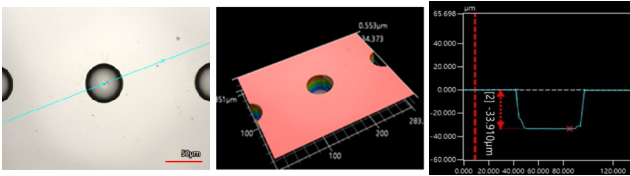
Fig. 4(c)는 니켈 미세 금형 캐비티의 정면 및 단면 형상 측정 결과를 보여준다. 레이저 간섭(laser interferometric) 측정 방식을 통해서, 니켈 금형의 캐비티 형상을 측정했다. Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이, 미세 금형의 캐비티는 직경 50  $\mu\text{m}$ , 깊이 33.9  $\mu\text{m}$ 의 수치를 가지고 있음을 확인하였다. Ni 전주 공정을 통해, 직경 50  $\mu\text{m}$ , 높이 34  $\mu\text{m}$ 의 필라 형상과 정확하게 동일한 직경 및 깊이를 지니는 캐비티 형상이 제작되었음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 (a) Photograph of Ni electroforming system, (b) Ni mold plate (130×130 mm) and Ni mold insert (20×20 mm), and (c) Ni mold cavity with a diameter of 50 μm, depth of 34 μm

Table 1 Molding results under various process conditions

No.	Temperature	Pressure	Molding time	Results
1	120°C	10 MPa	1 min	Unfilling
2	120°C	20 MPa	1 min	
3	120°C	30 MPa	1 min	
4	120°C	10 MPa	2 min	Partial filling
5	120°C	20 MPa	2 min	
6	120°C	10 MPa	3 min	Full filling
7	120°C	20 MPa	3 min	
8	150°C	10 MPa	1 min	
9	150°C	10 MPa	2 min	
10	150°C	20 MPa	2 min	

### 3. 부분 충전 미세 압축 성형 결과

제작되어진 니켈 미세 금형을 적용하여 미세 압축성형 공정을 진행하였다. 렌즈 성형 재료는 광학 특성이 우수한 polymethyl methacrylate (PMMA)을 사용하였다. 1 mm 두께의 PMMA 필름 시료를 이용하여, 가열 방식 압축 성형 공정을 통해서 최종 성형품을 제작하였다. PMMA의 유리화 온도(Tg)를 고려하여, 120~150 도의 온도 조건을 선정하였고, 압력 조건은 10~20 MPa, 성형 시간은 1분~3분 범위에서 조건 최적화를 진행했다. 표 1에서 보는 바와

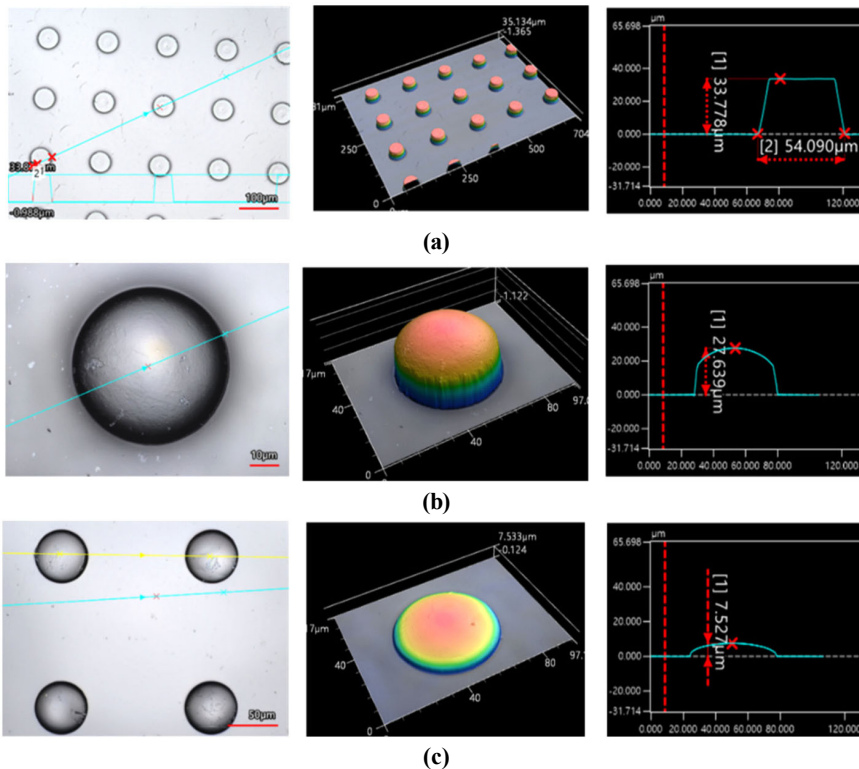


Fig. 5 Compression molding results with Ni mold with a diameter of 50 μm under various molding condition; (a) 120°C/3 min/200bar (20 MPa) (height: 33 μm (full filling)), (b) 120°C/2 min/200bar (20 MPa) (height: 27.6 μm (partial filling start)), (c) 120°C/2 min/100bar (10 MPa) (height : 7.5 μm (partial filling))

같이, 동일한 온도에서도 성형 시간 및 압력 조건을 높일수록 용융된 PMMA 수지가 금형의 cavity 안에 완전하게 채워지는 완전 충전(full filling) 양상을 보인다. 성형온도 120°C, 성형 시간 2분 조건에서 부분 충진이 발생됨을 확인할 수 있으며, 동일한 온도 및 시간 조건에서 압력을 조절하여 렌즈 높이를 조절할 수 있었다.

Fig. 5는 다양한 성형 조건에서 압축 성형 결과를 보여준다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이, 120°C, 3분, 20 MPa 조건에서, PMMA 수지가 미세 금형 캐비티 안에 완전 충전되어 33 μm의 높이가 형성되었음을 볼 수 있다. 반면, 성형 시간 및 압력 조건을 낮출수록, cavity 안에 부분적으로 충전되어 점점 반구형 형상의 렌즈 형상이 형성됨을 볼 수 있다. Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 120°C/2분/20 MPa 조건에서 폴리머의 부분 충진이 시작되어 27.6 μm 높이의 렌즈가 성형되었다. 또한, Fig. 5(c)에서 보는 바와 같이, 120°C/2분/10 MPa 조건에서 높이 7.5 μm의 반구형 렌즈 형상이 형성됨을 볼 수 있다.

반구형 렌즈의 곡률 반경을 분석한 결과, 120°C/2분/20 MPa 조건에서는 반경 30 μm, 120°C/2분/20 MPa 조건에서는 반경 50 μm로 확인된다. 본 결과를 토대로 볼 때, 고압 조건에서 충전 높이는 증가되며 렌즈의 곡률 반경이 작아짐을 확인할 수 있다. 이를 통해, 압축 성형 조건의 조절로 렌즈의 곡률반경이 결정될 수 있음을 확인할 수 있다.

표 2는 본 연구에서 제작되어진 마스터 패턴, 미세 금형 및 마이크로 렌즈의 제작 결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 최종적으로 제작된 직경 50 μm 마이크로 렌즈 어레이의 전자 주사 현미경 측정 결과를 보여준다. Fig. 6(b)는 니켈 미세 금형 캐비티와 부분 충전으로 성형되어진 미세 렌즈의 형상을 비교한 결과를 보여준다. 그림 6에서 보는 바와 같이, 금형 캐비티 벽면에서는 폴리머와 금형 간 마찰에 의해 유동이 지연되고, 캐비티의 중앙에서는 자유 유동이 발생되어 전체적으로 반구형의 렌즈 형상이 형성되었음을 볼 수 있다. 최종적으로, 직경 50 μm, 높이 7.5 μm, 곡률반경 50 μm의 미세 렌즈가 제작되었다. 추가적으로, 성형 압력 및 온도, 시간 등의 성형 조건을 조절하여 다양한 높이를 지니는 마이크로 렌즈 성형이 가능함을 기대할 수 있다.

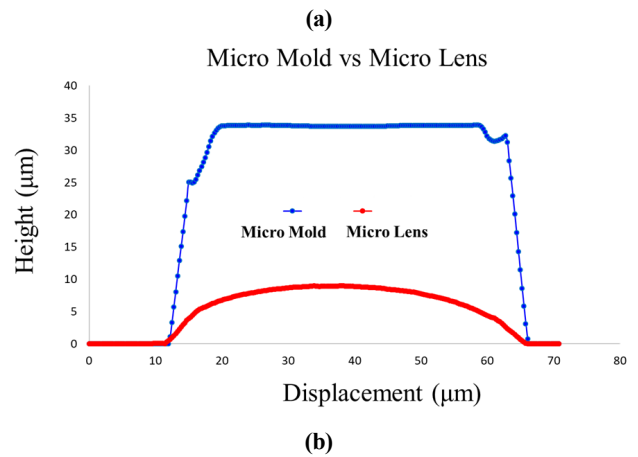
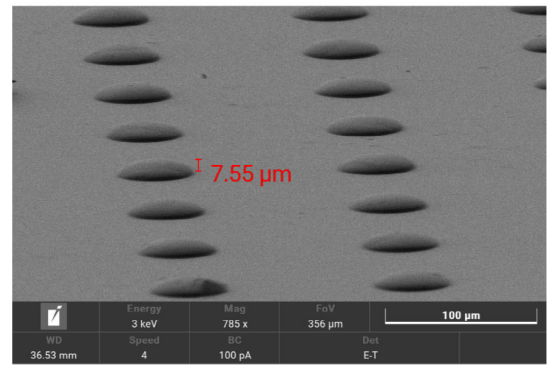


Fig. 6 (a) SEM (scanning electron microscopy) image of micro lens array with a diameter of 50 μm and (b) comparison results of surface profiles between the micro cavity of Ni mold insert and micro lens by partial filling compression molding

#### 4. 결 론

본 논문에서는 부분 충전 미세 압축성형 방식을 통한 마이크로 렌즈 어레이 성형에 관한 연구를 수행하였다. 유리 기판상 크롬 증착 후 감광막 코팅 및 노광 공정을 통해서 고세장비 마스터 패턴을 제작하였고, 니켈 전주 공정을 이용하여 두께 500 μm의 니켈 금형을 제작하였다. 직경 50 μm, 높이 34 μm의 마스터 패턴을 이용한 전주 공정을 통해서, 직경 50 μm, 깊이 33.9 μm의 캐비티를 지니는 니켈 미세 금형을 제작하였다.

Table 2 Process results of master pattern, micro mold and micro lens

<sup>1)</sup> Molding condition : 120°C/2 min/100bar (10 MPa)

	#1 (200/400 μm)			#2 (100/200 μm)			#3 (50/100 μm)			#4 (15/30 μm)			Area/Thickness
	Dia.	Space	Height/Depth	Dia.	Space	Height/Depth	Dia.	Space	Height/Depth	Dia.	Space	Height/Depth	
Mask			NA			NA			NA			NA	7×7 inch/2.3 mm
Master pattern	200	400	34	100	200	34	50	100	34	15	30	34	130×130 mm/0.5 mm
Micro mold			34			34			34			20×20 mm/0.5mm	
<sup>1)</sup> Micro lens			34			34			7.5			1.2	Φ20 mm/1 mm

부분 압축 성형 공정의 다양한 성형 조건을 통해서, 성형 압력 10 MPa, 성형시간 2분, 성형온도 120°C의 조건에서 부분 충전되어 직경 50  $\mu\text{m}$ , 높이 7.5  $\mu\text{m}$ 로 마이크로 렌즈가 성형됨을 확인할 수 있었다. 니켈 금형의 캐비티 및 렌즈 형상을 비교한 결과, 부분 충전 성형에 의해 반구형의 렌즈가 형성됨을 확인했다. 압축 성형 공정 중 캐비티 벽면에서의 유동 저항 및 캐비티 중앙에서의 자유 유동 발생에 의해 반구형의 마이크로 렌즈가 성형된 것으로 분석되어진다. 향후, 부분 충전 성형의 압력 및 충전 시간 등 미세 압축 성형 조건을 조절하여 렌즈의 높이 및 형상을 추가로 조절할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 연암공과대학교 교비연구과제 지원으로 진행되었습니다.

## References

- [1] 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, <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0204-y>.
- [2] Hou, T., Zheng, C., Bai, S., Ma, Q., Bridges, D., Hu, A., Duley, W. W., 2006, Fabrication, Characterization, and Applications of Microlenses, *Appl. Optics.*, 54:24 7366-7376, <https://doi.org/10.1364/AO.54.007366>.
- [3] Song, Y. M., Xie, Y., Malyarchuk, V., Xiao, J., Jung, I., Choi, K.-J., Liu, Z., Park, H., Lu, C., Kim, R.-H., Li, R., Crozier, K. B., Huang, Y., Rogers, J. A., 2013, Digital Cameras with Designs Inspired by the Arthropod Eye, *Nature*, 497 95-99, <https://doi.org/10.1038/nature12083>.
- [4] Dunkel, J., Wippermann, F., Reimann, A., Bruckner, A., Brauer, A., 2015, Fabrication of Microoptical Freeform Arrays on Wafer Level for Imaging Applications, *Opt. Express*, 23:25 31915, <https://doi.org/10.1364/OE.23.031915>.
- [5] Bae, S.-I., Kim, K., Jang, K.-W., Kim, H.-K., Jeong, K.-H., 2021, High Contrast Ultrathin Light-Field Camera Using Inverted Microlens Arrays with Metal-Insulator-Metal Optical Absorber, *Adv. Opt. Mater.*, 9:6 2001657, <https://doi.org/10.1002/adom.202001657>.
- [6] Tanida, J., Shogenji, R., Kitamura, Y., Yamada, K., Miyamoto, M., Miyatake, S., 2003, Color Imaging with an Integrated Compound Imaging System, *Opt. Express*, 11:18 2109-2117, <https://doi.org/10.1364/OE.11.002109>.
- [7] Duparree, J. W., Wippermann, F. C., 2006, Micro-optical Artificial Compound Eyes, *Bioinspir. Biomim.*, 1:1 R1, <https://doi.org/10.1088/1748-3182/1/1/R01>.
- [8] Zhang, X. Q., Wang, Z. D., Zhu, L. M., 2002, Dynamic Rotating-tool Turning of Micro Lens Arrays, *CIRP Annals*, 71:1 65-68, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.04.008>.
- [9] Noh, Y.-J., Yoshikazu, A., Makoto, T., Wei, G., 2008, Fabrication of Large-area Micro-lens Arrays with Fast Tool Control, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 9:4 32-38.
- [10] Scheiding, S., Yi, A. Y., Gebhardt, A., Loose, R., Li, L., Risse, S., Eberhardt, R., Tünnermann, A., 2011, Diamond Milling or Turning for the Fabrication of Micro Lens Arrays: Comparing Different Diamond Machining Technologies, *Proc. of SPIE 7927*, <https://doi.org/10.1117/12.874751>.
- [11] Fricke-Begemann, T., Li, J., Ihlemann, J., Herman, P. R., Marowsky, G., 2011, Micro-lens Machining on Optical Fibers by Direct Laser Ablation, *Proc. of SPIE 5578*, <https://doi.org/10.1117/12.567671>.
- [12] Chiu, C.-C., Lee, Y.-C., 2011, Fabricating of Aspheric Micro-lens Array by Excimer Laser Micromachining, *Opt. Lasers Eng.*, 49 9-10, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.04.011>.
- [13] Lee, J. H., Yum, S. H., Kim, S. M., 2018, Analysis of Thermal Reflow Process for Polymer Microlens Fabrication, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 35:3 319-325, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2018.35.3.319>.
- [14] Roy, E., Voisin, B., Gravel, J.-F., Peytavi, R., Boudreau, D., 2009, Microlens Array Fabrication by Enhanced Thermal Reflow Process: Towards Efficient Collection of Fluorescence Light from Microarrays, *Microelectron. Eng.*, 86:11 2255-2261, <https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.04.001>.
- [15] Ashraf, M., Gupta, C., Chollet, F., Springham, S. V., Rawat, R. S., 2008, Geometrical Characterization Techniques for Microlens made by Thermal Reflow of Photoresist Cylinder, *Opt. Lasers Eng.*, 46:10 711-720, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.05.008>.
- [16] Danzebrink, R., Aegerter, M. A., 2001, Deposition of Optical Microlens Arrays by Ink-jet Processes, *Thin Solid Films*, 392:2 223-225, [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)01031-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)01031-8).
- [17] Biehl, S., Danzebrink, R., Oliveira, P., Aegerter, M. A., 1998, Refractive Microlens Fabrication by Ink-Jet Process, *J. Sol-Gel Sci. Techno.*, 13 177-182, <https://doi.org/10.1023/A>

1008648615758.

- [18] Pan, C. T., Wu, T.T., Chen, M. F., Chang, Y. C., Lee, C. J., Huang, J. C., 2008, Hot Embossing of Micro-lens Array on Bulk Metallic Glass, *Sens. Actuator A-Phys.*, 141:2 422-431, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.10.040>.
- [19] Yao, Do., Nagarajan, P., Li, L., Yi, A. Y., 2007, A Two-Station Embossing Process for Rapid Fabrication of Surface Microstructures on Thermoplastic Polymers, *Polym. Eng. Sci.*, 47:4 530-539, <https://doi.org/10.1002/pen.20721>.
- [20] Roeder, M., Drexler, M., Rothermel, T., Meissner, T., Guenther, T., Zimmermann, A., 2018, Injection Compression Molded Microlens Arrays for Hyperspectral Imaging, *Micromachines*, 9:7 355, <https://doi.org/10.3390/mi9070355>.
- [21] Lee, N., Moon, S., Kang, S., Ahn, S., 2003, The Effect of Wettability of Nickel Mold Insert On the Surface Quality of Molded Micro Lenses, *Opt. Rev.*, 10:4 290-294.
- [22] Lee, N., Kim, Y.-K., Kang, S., 2004, Temperature Dependence of Anti-adhesion Between a Stamper with Sub-micron Patterns and the Polymer in Nano-moulding Processes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 37:12 1624-1629, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/12/006>.
- [23] Moore, S., Gomez, J., Lek, D., You, B. H., Kim, N., Song, I.-H., 2016, Experimental Study of Polymer Microlens Fabrication using Partial-filling Hot Embossing Technique, *Microelectron. Eng.*, 162:16 57-62, <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.05.009>.
- [24] Chang, C., Yang, S., Huang, L., Hsieh, K., 2006, Fabrication of Polymer Microlens Arrays using Capillary Forming with a Soft Mold of Micro-holes Array and UV-curable Polymer, *Opt. Express.*, 14:13 6253-6258, <https://doi.org/10.1364/oe.14.006253>.
- [25] Ehrfeld, W., Gotz, F., Munchmeyer, D., Schelb, W., Schmidt, D., 1988, LIGA Process : Sensor Construction Techniques Via X-ray Lithography, *IEEE Technical Digest on Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, 3278333, <https://doi.org/10.1109/SOLSEN.1988.26418>.
- [26] Son, S. H., Park, S. C., Lee, W., Lee, H.-K., 2013, Manufacture of  $\mu$ -PIM Gear Mold by Electroforming of Fe-Ni and Fe-Ni-W Alloys, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 23:2 366-371, [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62471-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62471-1).



**NamSeok Lee**

Professor in the Department of Smart Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology.

His research interest is Micro/ Nano Fabrication in the OLED and Semiconduct Process.

E-mail: nslee@yc.ac.kr