



부분 압축 성형 공정에서 절연층이 성형 렌즈의 부분 충전 특성에 미치는 영향에 관한 연구

이남석^{a,*}

Study on the Effects of an Insulation Film on the Cooling Process and Filling Properties of Mold Cavities During Partial Compression Molding

NamSeok Lee^{a,*}^a Department of Smart Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received	28	February	2024
Revised	21	March	2024
Accepted	26	March	2024

Keywords:

Compression molding
Micro mold
Partial-filling
Strain gauge
Thermal strain

ABSTRACT

We investigated the effects of an insulation layer on the replication quality of micro lenses using partial-filling compression molding processes. A polyimide film with high thermal stability was applied to a mold insert to delay cooling, and a strain gauge was used to measure the surface temperature of the mold insert. Under this method, the thermal history during molding and cooling was analyzed with and without the insulation layer. Finally, we analyzed and experimentally compared the surface profiles of the molded lenses with and without the insulation layer. Results showed that compared to the case without an insulation layer, the height of the partial-filling molded lens increased by 1.4 μm after the insulation layer was applied.

1. 서론

미세 압축 성형 공정 및 사출 성형 공정은 미세 렌즈 등의 플라스틱 제품을 대량으로 제작하는데 적합한 제조 방식이다^[1-3]. 하지만, 성형되는 제품 형상의 크기가 점차 미세 해짐에 따라, 성형후 이형 과정에서의 몰드 표면과 성형품간 접촉에 의한 뜯김 불량 등이 발생될 수 있다^[4,5]. 이에, 최근 연구에서는 기존의 미세 압축 성형 공정에서의 이형 시에 뜯김 불량을 개선하기 위한 부분 충전 압축 성형 공정이 연구된 바 있다^[6-8].

이러한 부분 충전 압축 성형 공정을 이용한 미세 렌즈 성형에서, 압력 및 온도, 시간 등의 공정 조건 제어는 성형되는 렌즈의 높이 등의 형상을 제어할 수 있다. 또한, 압축 성형 공정 진행 후에, 지연

시간 및 냉각 시 온도 강하 속도는 렌즈 형상에 큰 영향을 끼친다. 또한, 급격한 온도 강하 등이 발생할 경우, 렌즈 측면 형상이 무너져서 전체 렌즈의 품질을 저하할 수 있다.

성형 공정 및 냉각 공정 중, 금형 표면에 대한 정밀한 온도 측정은 매우 중요하다. 표면 온도를 측정하는 방법에는 프로브(probe) 등을 이용한 열전대 측정 방식이 있으나, 표면과의 정확한 접촉이 어렵고 표면에 이물질 등이 있을 경우 측정 오차가 존재할 수 있다. 또한, 열복사를 이용한 비접촉 온도 측정 방식이 있으나, 빛의 경로 중에 빛의 흡수 및 산란에 의한 오차가 발생할 수 있다. 반면, 스트레인 게이지(strain gauge)는 미세한 금속 배선 패턴의 변형을 저항 등의 미세한 전기적 특성 변화의 측정을 통해 재료 및 구조물의 변형 정도를 측정하는 기구로서 측정 민

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

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

감도가 매우 우수한 측정 방식이다. 특히, 필름 타입의 스트레인 게이지는 금형 등의 측정 표면에 직접 부착하여 측정하는 방식으로 표면과의 접촉점에서 오류 발생이 적고, 폴리이미드(polyimide, PI) 계열의 고내열 필름을 사용할 경우, 고온에서도 변동 없이 정밀한 측정이 가능하다⁹⁻¹².

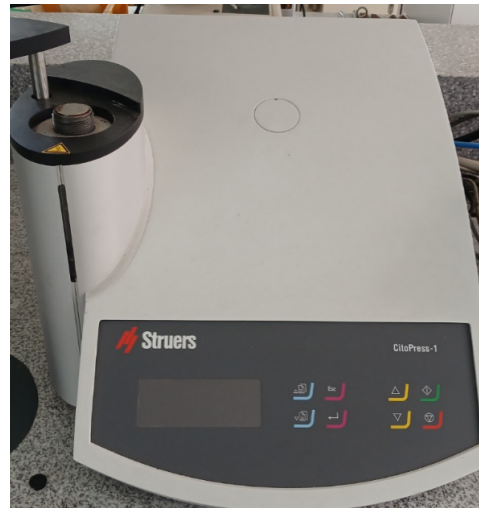
본 연구에서는 냉각 속도 제어를 위한 절연층을 적용하여, 부분 충전 압축 성형 공정에서 냉각 속도 및 성형 높이 제어에 관한 연구를 수행하였다. 압축 성형 공정 중, 가열 후 냉각 시에 급격한 온도 강하 속도를 제어하기 위해 고내열의 절연 특성을 지니는 PI 필름을 적용한 절연층을 금형의 후면에 부착 적용하였다. 기존 금형과 절연 필름 부착 후의 온도 강하 특성을 정밀하게 분석하기 위해, 스트레인 게이지를 이용한 표면 온도를 측정하였다. 최종적으로, 절연층 부착에 따른 부분 충전 특성을 분석하기 위해, 절연층이 적용되기 전과 후에 부분 압축 성형을 진행하여 비교하였다.

2. 실험 방법

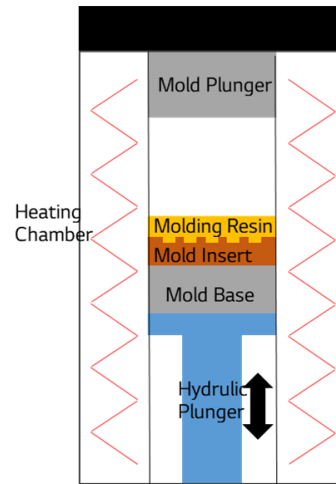
2.1 압축 성형 공정 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 적용된 압축 성형 장비의 사진 이미지 및 개략도를 보여준다. 압축 성형 장비는 Struers사의 CitoPress-1 장비를 사용하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이, 본 압축 성형 장비는 가열 방식의 성형 장비이며, 성형 공정 중 하부에 있는 유압 플런저가 상승하면서 가압하는 방식이다. 몰드 베이스 상에 몰드 인서트를 장착하고 그 위에, 성형 재료를 올려 놓고 성형을 진행한다.

렌즈 성형 재료로는 투과율 92%, Haze 0.5% 등 우수한 광학 특성을 지니는 Polymethyl methacrylate(PMMA)를 사용했으며, 두께 1 mm, 직경 25 mm의 필름 타입 시료를 준비하여 적용했다. 또한, 두께 0.5 mm, 크기 20 mm×20 mm, 캐비티 깊이 33.9 μm를 지니는 니켈(Nickel) 몰드 인서트(mold insert)를 전주 공정을 통해서 제작하였다. 니켈 몰드 인서트를 Mold Base 상부에 올려



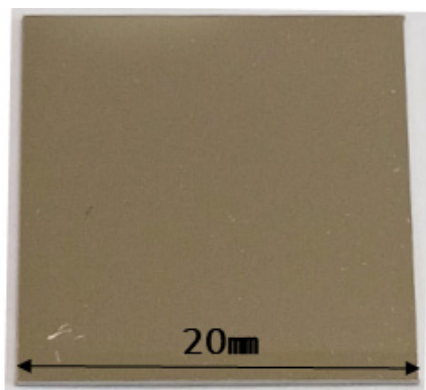
(a) Photograph



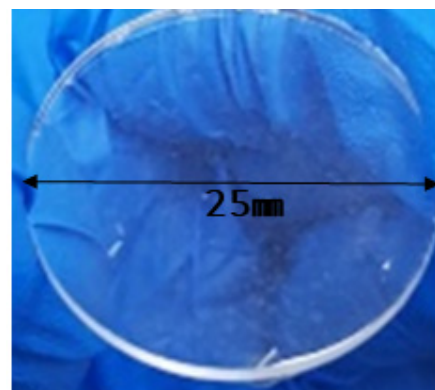
(b) Schematic Diagram

Fig. 1 (a) Photograph and (b) schematic diagram of the compression molding machine with the mold insert

놓은 후, 그 위에 PMMA Film을 니켈 몰드 인서트 위 놓은 상태에서, 성형 공정을 진행하였다. Fig. 2는 본 연구에서 적용된 니켈



(a) Ni mold insert



(b) PMMA film

Fig. 2 Photographs of (a) the Ni mold insert and (b) the PMMA film

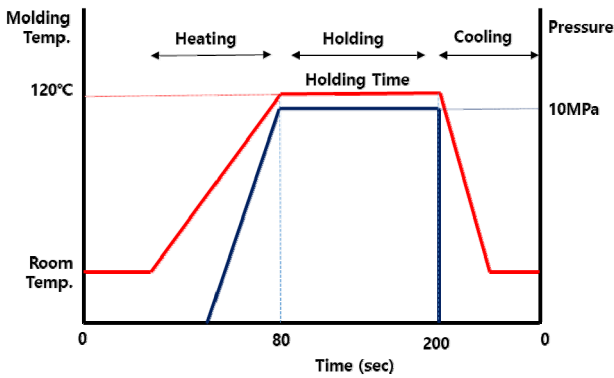
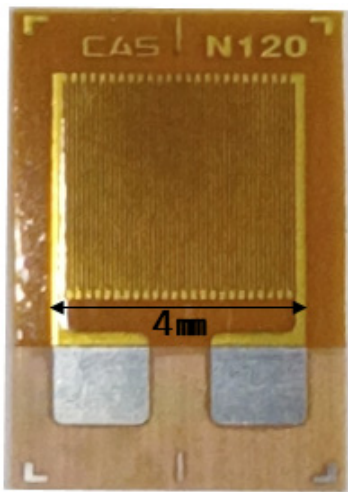
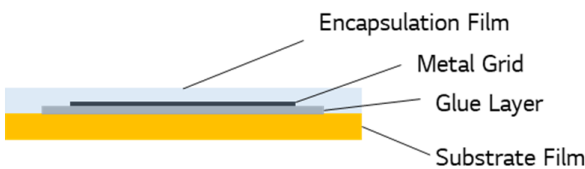


Fig. 3 Time plots of the temperature and pressure during the compression molding process



(a) Photograph



(b) Cross-sectional structure

Fig. 4 (a) Photograph and (b) cross-sectional structure of the strain gauge

몰드 인서트 및 PMMA 필름 시료의 사진을 각각 보여준다.

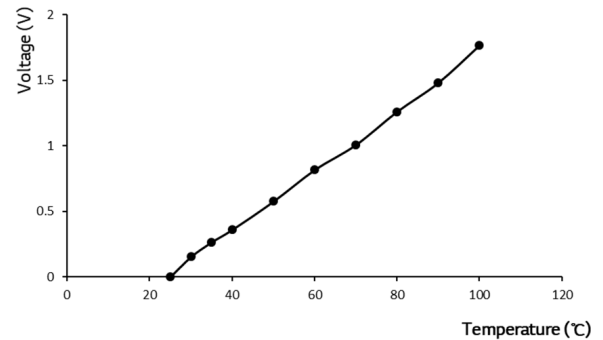
부분 압축 성형 공정 중, 재료의 유리화 온도를 감안하여 성형 온도를 120°C로 설정했고, 부분 충전 특성을 고려한, 성형 압력 및 온도 유지 시간을 최적화하였고, 12 결과 120°C/3분/20 MPa 조건에서는 완전 충전되었고, 120°C/2분/20 MPa 조건에서 부분 충전이 시작되었고, 120°C/2분/10 MPa에서 높이 7.5 μm 렌즈 형상이 형성되었다. 이에, 본 연구에서는 최적화된 조건(120°C/2분/10 MPa) 으로 절연층을 적용한 부분 압축 성형 실험을 진행하였다^[8]. Fig. 3은 본 연구에서의 부분 압축 성형 공정 중, 성형 시간에 따른 성형 온도, 압력의 히스토리를 보여준다. 그림에서 보는 바와

같이, 압축 성형 공정은 시간 순서에 따라, 가열 및 승온 구간 (heating region), 온도 유지 구간(holding region), 냉각 구간 (cooling region)으로 구분된다. 부분 충전 압축 성형 공정에서는, 성형 온도, 유지 시간, 냉각 시간/속도 조건 등의 제어를 통해 최종적으로 형성되는 성형 높이(lens height)를 결정할 수 있다.

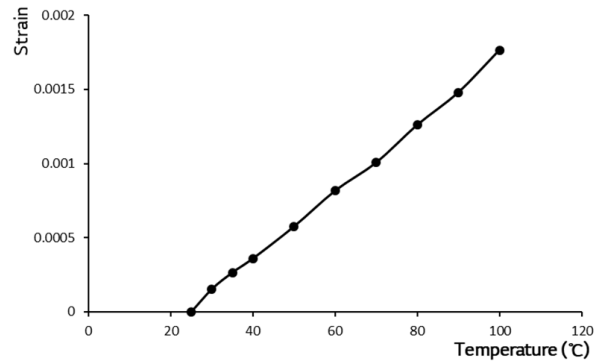
2.2 스트레인 게이지를 이용한 몰드 표면 온도 측정

Fig. 4는 필름 타입 스트레인 게이지의 이미지 및 단면 구조도를 보여준다. 필름 타입의 스트레인 게이지는 기판 필름(substrate film), 금속 배선(metal grid), 보호 필름(encapsulation film) 층으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 저항 120 Ω, 그리드(grid) 사이즈 4×4 mm의 사양을 지니는 단방향 패턴의 Ni(Nickel) 게이지 (CAS 사)를 적용하였다. 또한, 스트레인 게이지의 기판 필름은 고내열 특성을 지니는 25 μm 두께 PI 필름이 적용되었다.

Fig. 5는 온도 변화에 따른 변형률 변화 및 전압값의 변화량을 스트레인 게이지를 통해 측정된 결과를 각각 보여준다. 본 그래프에서 보는 바와 같이, 온도 증가에 따라서 스트레인 게이지의 변형률 및 전압이 선형적으로 증가됨을 볼 수 있다. 이를 통해 본 스트레인 게이지를 이용한 전압 및 표면 온도 측정값이, 이론대로 선형적인 관계를 보여줌을 확인할 수 있었다.



(a) Voltage-temp. curve



(b) Strain-temp. curve

Fig. 5 History of the voltage (a) and the strain (b) measurements plotted as functions of temperature by using strain gauge sensor

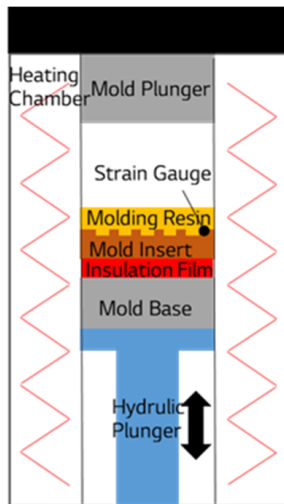
3. 결과 및 토의

3.1 절연층 부착에 따른 냉각 공정 온도 변화 측정

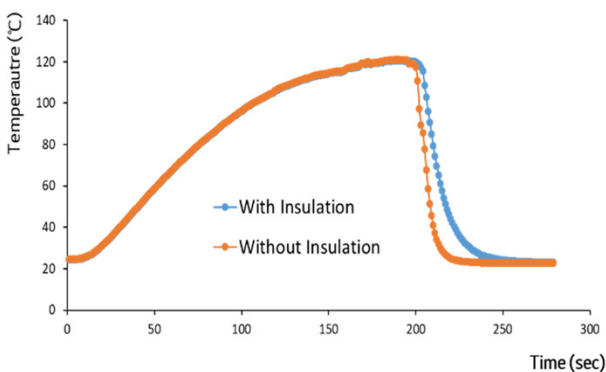
압축 성형후 냉각 공정(cooling process) 중의 냉각 속도 지연의 효과를 얻기 위해 몰드 인서트 후면에 절연 필름을 부착하였다. 절연 필름으로 고온에서 내열성이 우수한 두께 50 μm 의 PI 필름을 사용하였다. Fig. 6(a)는 PI 절연층을 추가한 후의 몰드 인서트 및 압축 성형 장비 개략도를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 절연층에 의한 성형후 냉각 속도의 영향성을 정밀하게 측정하기 위해서, 니켈 몰드 인서트의 전면부에 스트레인 게이지 필름을 부착하였다. 니켈 몰드 인서트 표면을 세정제로 세척한 후, 아크릴 계열의 접착 레진을 도포한 상태에서, 스트레인 게이지 필름을 압착하여 금형과 스트레인 게이지 필름 간의 접착력을 확보하였다. 스트레인 게이지의 측정 값을 전압 형태로 전송하기 위한 Strain

Amplifier(LCT Pro. Cas 사)를 사용하였으며, 스트레인 게이지의 측정 조건은 1 Hz(1 sample/sec)의 시간 간격을 설정하여 측정하였다.

Fig. 6(b)는 PI 절연층 적용 유무에 따라서, 성형 공정 중, 가열, 유지 및 냉각 과정에서의 표면 온도 변화 측정 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 가열 및 가열 유지 구간에서는 절연층 유무에 따라 온도 히스토리의 차이가 크지 않음을 볼 수 있다. 가열 동안에는 전체 분위기의 온도가 제어되므로 열 에너지 전달에 큰 영향이 없음을 볼 수 있다. 반면에 냉각 과정에서는, 절연층을 적용했을 경우, 절연층이 없는 경우와 비교하여, 냉각 과정에서는 온도 강하가 지연됨을 확연하게 볼 수 있다. Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이, 절연층을 적용한 경우, 성형 온도에서 상온까지 도달하는데 약 40초 정도의 냉각 지연이 됨을 볼 수 있다. 이는 PI 절연층을 부착한 경우, 가열된 니켈 몰드 인서트가 냉각 시에, 열의 방출이 지연되어 냉각 속도를 저하시키는 영향이 있음을 확인할 수 있다.



(a) Compression molding machine with insulation layer



(b) Temp.-time curve

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the compression molding machine and the mold insert with the insulation layer film and (b) thermal history of the surface temperature on the mold insert during molding and cooling

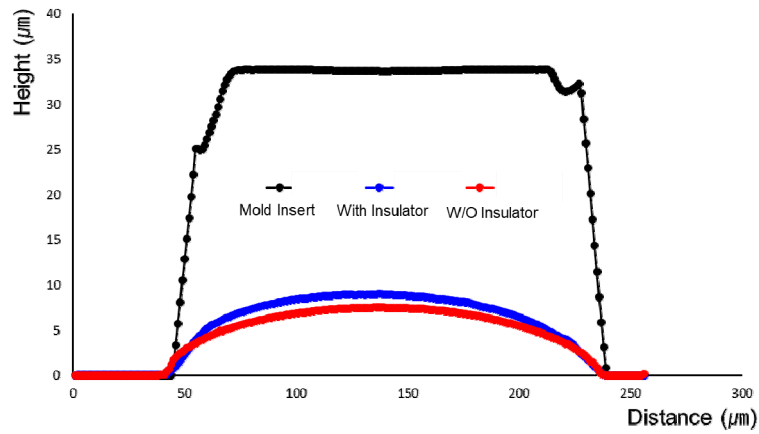
3.2 절연층에 따른 부분 압축 성형 결과

Fig. 3에서 언급한 바와 같이, 성형 조건은 성형 온도(molding temperature)와 성형 압력(molding pressure), 온도/ 압력 유지 시간(holding time)을 각각 120°C/10 MPa/2분으로 설정해서 적용했다. Fig. 1(b) 및 Fig. 6(a)와 같이, 압축 성형 장비 안에 니켈 몰드 인서트 및 절연층을 설치한 후에, 동일한 성형 온도/압력/시간 조건에서, 절연층 적용이 실제 부분 압축 성형 결과에 미치는 영향을 실험적으로 검증해 보았다.

Fig. 7은 금형 인서트의 캐비티 패턴과 절연층 적용 전과 후에, 부분 압축 성형으로 제작된 미세 렌즈의 표면 형상 및 SEM 이미지를 비교한 결과이다. Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이, 미세 렌즈의 프로파일을 비교한 결과, 동일한 성형 조건에서, 절연층 적용 후에 렌즈 높이가 7.5 μm 에서 8.9 μm 로 1.4 μm 높아짐을 볼 수 있다. 또한, Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이, SEM 측정 결과에서도 절연층 적용 후에, 렌즈의 높이가 1.4 μm 증가함을 볼 수 있다. 이 결과들로 볼 때, 절연층의 적용을 통해서, 성형 공정 후, 냉각 속도의 지연이 발생되어 결과적으로 부분 충전 압축 성형을 통한 렌즈의 높이가 증가함을 확인할 수 있었다.

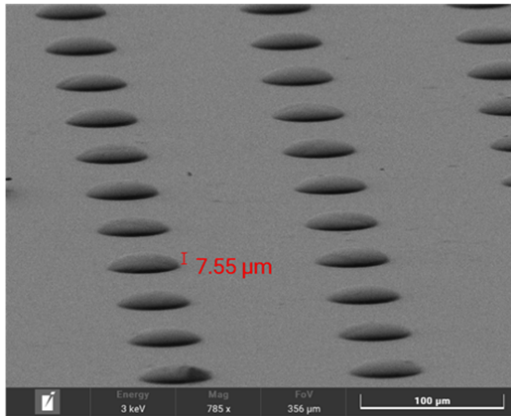
4. 결론

본 연구에서는 부분 압축 성형 공정에서 절연층에 의한 단일 효과가 성형 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 압축성형 공정에서 단일 효과를 확보하기 위해 고내열 특성을 지니는 두께 50 μm PI 필름을 부착함으로써 열의 방출을 지연시켰다. 압축성형 공정 중 미

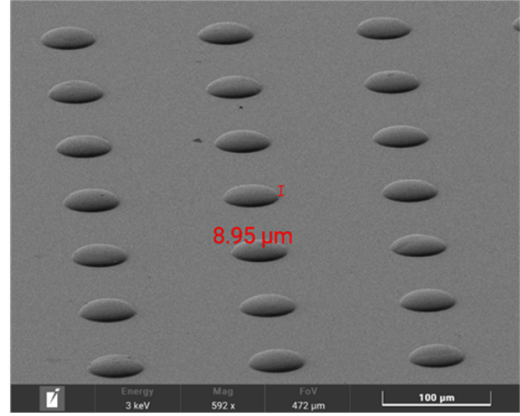


(a) Surface profiles

Without Insulator



With Insulator



(b) SEM image

Fig. 7 (a) Surface profiles and (b) SEM images of the molded lenses with and without the insulation layer film

세 금형의 표면 온도를 정밀하게 측정하기 위해 스트레인 게이지를 이용한 표면 온도 측정을 수행하였다. 절연층 유무에 따른 부분 압축 성형 결과, 절연층을 적용하였을 경우, 성형 온도에서 상온까지 도달하는데 약 40초 정도의 냉각 속도 지연이 발생됨을 볼 수 있었다. 또한, 동일 성형 조건에서, 절연층 적용 후에 렌즈의 패턴 높이가 1.4 μm 높아짐을 볼 수 있다.

결론적으로, 절연층이 적용될 경우에 열 방출 지연으로 인한 냉각 속도의 저감 효과가 충분히 있음을 확인하였다. 실제 부분 압축 성형 공정 시 니켈 몰드 인서트의 후면에 절연층을 적용할 경우에, 부분 압축 성형된 렌즈의 높이가 증가 효과를 확인하였다. 또한, 절연층을 적용 전과 후에, 성형 공정 및 냉각 공정 중에 스트레인 게이지를 통한 미세 금형의 표면 온도가 정밀하게 측정되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로, 부분 압축 성형 공정에서 절연층의 적용에 의해서, 성형되는 렌즈의 높이를 제어할 수 있으며, 향후, 절연층 두께의 조절 등에 의해서 성형 높이에 대한 추가적으로 정밀한 제어가 가능할 것으로 기대된다.

후기

이 연구는 연암공과대학교 교비연구과제 (과제번호: 202208) 지원으로 진행되었습니다.

References

- [1] 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>.
- [2] Yao, D., 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>.
- [3] 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>.
- [4] Lee, N., Moon, S., Kang, S., Ahn, S., 2003, The Effect of Wettability of Nickel Mold Insert On the Surface Quality of Molded Microlenses, *Opt. Rev.*, 10 290-294, <https://doi.org/10.1007/s10043-003-0290-6>.
- [5] Lee, N., Kim, Y.-K., Kang, S., 2004, Temperature Dependence of Anti-adhesion between a Stamper with Submicron 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>.
- [6] Moore, S., Gomez, J., Lek, D., You, B. H., Kim, N., Song, I.-H., 2016, Experimental Study of Polymer Microlens Fabrication using Partialfilling Hot Embossing Technique, *Microelectron. Eng.*, 162 57-62, <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.05.009>.
- [7] Chang, C.-Y., Yang, S.-Y., Huang, L.-S., Hsieh, K.-H., 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>.
- [8] 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>.
- [9] Senesky D. G., Jamshidi, B., 2011, MEMS Strain Sensors for Intelligent Structural Systems, *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring, Lecture Notes in Electrical Engineering(LNEE)*, 96 63-74, https://doi.org/10.1007/978-3-642-21099-0_4.
- [10] Zhao, Y., Liu, Y., Li, Y., Hao, Q., 2020, Development and Application of Resistance Strain Force Sensors, *Sensors*, 20:20 5826, <https://doi.org/10.3390/s20205826>.
- [11] Mohammed, A. A. S., Moussa, W. A., Lou, E., 2008, High Sensitivity MEMS Strain Sensor: Design and Simulation, *Sensors*, 8:4 2642-2661, <https://doi.org/10.3390/s8042642>.
- [12] Lu, D., Cai, C. S., 2007, Applications of Fiber Optic Sensors in Civil Engineering, *Struct. Eng. Mech.*, 25:5 577-596, <https://doi.org/10.12989/sem.2007.25.5.577>.



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