

기술논문

355nm UV 레이저를 이용한 마이크로 렌즈 어레이 쾌속 제작

제순규*, 박강수*, 오재용**, 김광렬***, 박상후*, 고정상*, 신보성*

*부산대학교, **SFA Engineering corporation, ***한양대학교

Rapid Fabrication of Micro Lens Array by 355nm UV Laser Irradiation

Soonkyu Je*, Kangsu Park*, Jaeyong Oh**, Kwangryul Kim***, Sanghoo Park*,

Cheongsang Go*, Bosung Shin*

*Busan University, **SFA Engineering corporation, ***Hanyang University

ABSTRACT

Micro lens array (MLA) is widely used in information technology (IT) industry fields, for examples such as a projection display, an optical power regulator, a micro mass spectrometer and for medical appliances. Recently, MLA have been fabricated and developed by using a reflow method, micro etching, electroplating, micromachining and laser local heating. Laser local thermal-expansion (LLTE) technology demonstrates the formation of microdots on the surface of polymer substrate, in this paper. We have also investigated the new direct fabrication method of placing the MLA on the surface of a SU-8 photoresist layer. We have obtained the 3D shape of the micro lens processed by UV laser irradiation and have experimentally verified the optimal process conditions.

Key Words : MLA (Micro Lens Array), direct fabrication, LLTE (Laser Local Thermal-Expansion)

1. 서론

마이크로렌즈 어레이 (micro-lens array, MLA)는 일반적으로 직경이 수십 마이크로미터 내지 수백 마이크로미터 정도의 렌즈들이 바둑판 모양으로 배열된 것을 말한다. 이러한 MLA는 광커넥터, WDM (wavelength division multiplexing) 광통신 모듈, 차세대 광정보저장기기, 영사기(projection display), 광출력단속기(luster power regulator), 초미세 물질분석기, 의료용 진단기 등의 차세대 고부가가치 제품 개발의 주요 부품이다.

기존의 MLA는 주로 반도체 공정을 응용한 미소가공법으로 제작된다. 감광제를 유리 재질의 기판에 도포하고 반도체 공정에서의 사진식각공정을 이용하여 원기둥의 형태만 남도록 가공한다. 그 후 열을 가하여 원기둥 형태로 남아 있는 감광제를 녹여 표면장력에 의해 감광제가 곡면이

형성되도록 하고 다시 온도를 낮추어 감광제를 경화시키거나 경화 후 이온식각을 추가적으로 수행하는 것에 의해 제작된다. 이를 리플로우(reflow) 법이라 한다. 일반적으로 감광제는 빛을 투과시키므로 이러한 방법으로도 MLA를 제작할 수 있지만 사용 목적에 따라서는 유리 이외의 기판을 사용하여 리플로우 방법으로 원형틀을 형성하고 이를 이용하여 복제용 음각틀을 형성한 후 이 음각틀을 통해 다수의 MLA를 복제할 수도 있다. 하지만 형상의 변화에 따른 변형이 어렵고 공정이 복잡하여 쉽게 가공하기 어렵다.

최근에는 변형 LIGA 공정을 이용한 MLA 제작 방법^[1], 물드를 이용하여 적절한 압력과 온도 조건에서 유리 마이크로렌즈를 성형하는 방법^[2], 레이저의 기상 증착(chemical vapor deposition, CVD)에 의한 MLA 제작 방법^[3], 롤러 스탬핑(roller stamping) 공정에 의한 MLA 제작법^[4], 광

경화성 폴리머를 이용한 스테레오 리소그래피 (stencil lithography) 공정에 의한 마이크로 렌즈 제작 방법^[5], 강화 유리에 레이저를 이용하여 열풀림(thermal relaxation)을 이용한 마이크로 렌즈 제작법^[6] 그리고 레이저 어블레이션을 이용한 마이크로 렌즈 몰드 제작 방법^[7] 등 다양한 마이크로 렌즈 제작 방법들이 연구되고 있다. 그리고 이러한 제작 공정들은 재료의 특성에 많은 영향을 받으며 대부분은 PMMA 혹은 유리 재료를 사용한다. 그러나 이러한 가공들은 비용이 많이 들고, 시간이 오래 걸리며 마스크가 필요하거나 리플로우와 같은 후처리 공정이 필요한 가공이다.

따라서 본 논문에서는 레이저를 이용한 직접적인 패속제작 기법(direct fabrication)을 활용하여 MLA를 제작하고자 한다. 즉, UV 레이저를 PR의 일종인 SU-8의 표면에 국부적으로 가열하면 팽창하는 현상을 실험적으로 검증하고자 한다. 그리고 제작된 마이크로 렌즈 어레이의 형상을 표면 측정하여 열팽창에 의한 MLA의 최적가공조건을 규명하였다. 또한 최적가공조건을 실험적으로 연구하고자 한다.

재료의 표면에 레이저가 조사되면 광열적인 영향과 광화학적 영향에 의해 재료는 가열, 증발, 화학적 분해에 의해 어블레이션(ablation)이 일어나게 된다^[8]. 본 논문에서는 재료에 어블레이션이 야기되지 않고 국부적으로 가열만 하는 문턱값(threshold) 이하의 낮은 에너지의 레이저만 조사하여 열팽창을 유도하였다. 고분자 물질의 자유체적론(free volume theory)에 따르면 자유체적은 고체 또는 액체 상태에서 고분자 분자에 의해 차지하지 않은 공간, 즉 분자들 사이의 빈 공간이다. 분자들이 운동이 활발하면 자유체적이 크고 온도가 낮아지면 열에너지가 낮아져 분자의 운동이 줄어들고 따라서 자유체적은 감소한다. 따라서 열팽창계수와 자유체적은 거의 비례관계에 있다. 그리고 온도가 Tg(유리전이온도)에 도달하면, 분자의 이동은 불가능하고, 분자는 진동 등의 운동만이 가능하다. 따라서 고분자 물질은 유리전이 온도에서 부피 팽창계수의 큰 변화가 일어나며, 융점 부근에서는 결정의 용해로 인해 급격하게 부피가 증가된다. 그리고 이러한 팽창은 분자가 고온에서 공간을 자유로이 운동하기 전이며 물리

적 구조가 변하기 전이므로 분자가 열화되는 것은 화학구조가 변화되었다고 볼 수 있다. SU-8의 결합구조는 C-H의 결합이 주를 이루고 있으며 O-O, H-H, C=C의 결합도 이루어져 있다. 기존의 연구인 Lewis 산광생성(acid photogeneration)을 보면 엑시머 레이저인 193nm 파장의 ArF 레이저를 이용하여 SU-8의 화학적인 구조를 변화시켜 가공하였다. Table 1을 보면 폴리머에서 원소들 사이의 결합 에너지가 나와 있으며 ArF 레이저의 평균출력을 에너지로 변환하여 보면 약 8.4 eV 정도가 된다. 따라서 모든 결합에서 반응이 일어나는 것을 확인할 수 있다. 355nm UV 레이저 가공조건의 평균출력을 에너지로 변환하여 보면 약 4.369 eV가 된다. 그러므로 C-N, C-C, C-H의 결합에서 열에 의한 변형이 일어났다고 볼 수 있다.

Table 1. Chemical bonds in polymer

Polymer bonds	C-N	C-C	C-H	H-H	O-O	C=C	C≡C
Bond energy (eV)	3.04	3.62	4.30	4.48	5.12	6.40	8.44

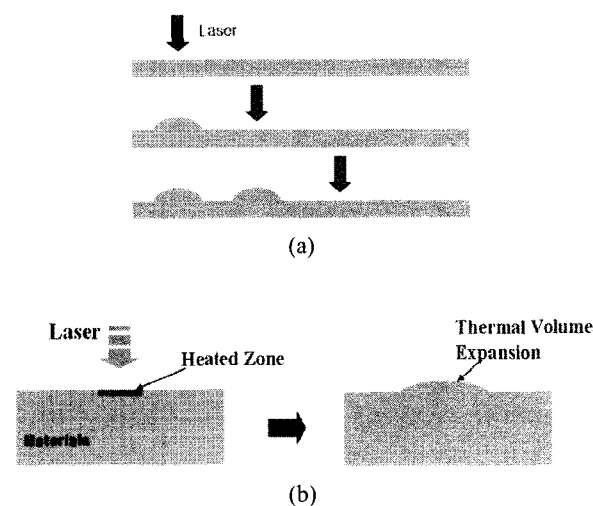


Fig. 1 The principle of micro lens fabrication by LLTE, (a) the phenomena of LLTE, (b) micro lens array.

본 논문에서 제안하는 MLA의 제작의 기본원리는 고분자 물질의 열적 팽창현상을 이용한 것이다. Fig. 1에서 보는바와 같이 레이저가 포커싱된 영역에 대하여 재료는 국부적으로 광에너지를 흡수하고 가열되어 열팽창이 유도된다. 그리고

갈바노 스캐너(galvano scanner)에 의해 빔은 고속으로 이동되어 어레이를 제작한다.

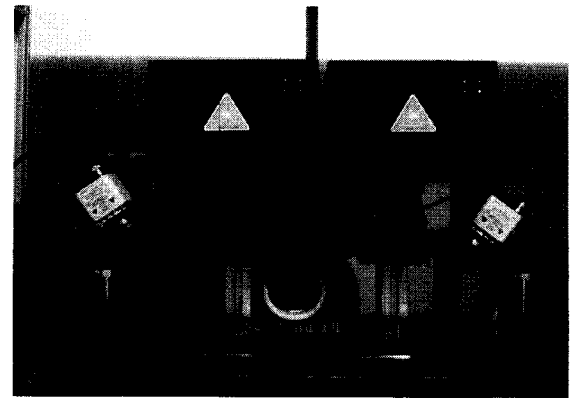
2. 실험

본 실험에 사용된 레이저는 355 nm UV 펄스 레이저로 펄스 반복률 30 kHz, 펄스폭 20 nsec, 평균 출력 3 W이다. 출사빔은 TEM₀₀ 모드로 가우시안 에너지 분포이며 직경은 1.5 mm(1/e²)이다. Fig. 2는 레이저 장비 사진으로 발진기에서 나온 레이저는 반사미러(mirror)를 거쳐 빔익스팬더(bean expander)에서 1-8배 확대되며 감쇄기(attenuator)에서 일정 에너지 감쇄 후 갈바노 스캐너(galvano scanner)로 입사되며 F-θ 렌즈에서 초점 크기(spot size) 약 20 μm로 포커싱되어 재료의 표면에 조사된다.

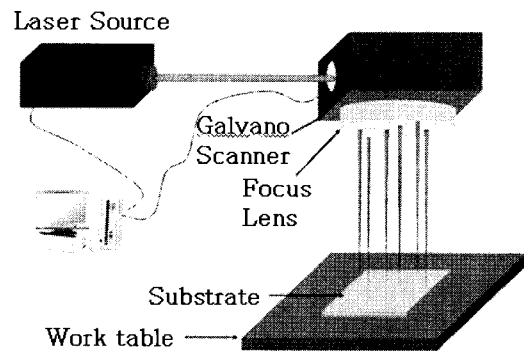
실험에 사용된 재료는 MicroChem Corp.의 SU-8 2050이다. SU-8은 기계적 성질이 좋기 때문에 마이크로 구조물의 금형으로도 사용되기도 하지만 가공이 쉽지 않다. 가공법으로는 습식 식각, 전자빔 및 레이저를 이용한 가공법 등이 있다⁹⁾. 실험을 위해 SU-8 을 실리콘 웨이퍼 위에 60 μm 두께로 스핀 코팅하여 65℃ 2분, 95℃에서 5분 동안 소프트 베이킹(soft-baking) 하였다. SU-8의 물리적 특성은 Table 2 와 같다. SU-8은 유리전이 온도가 210℃로 다른 PR 에 비해 열저항성이 비교적 크며 금속 구리의 경우 열팽창 계수가 16.5 ppm/K인 것과 비교하면 SU-8 은 52 ppm/K로서 열팽창 계수도 매우 크다. Fig. 3 는 SU-8의 빛의 파장에 대한 투과율로서 320 nm 이하의 파장은 투과되지 않으며 345-380 nm에서 투과율은 급격하게 증가하여 450 nm 이상에서는 거의 100% 투과된다. 그리고 베이킹 조건에 따라 투과율의 증가폭이 저하되는 것을 알 수 있다.

Table 2. Thermo-physical properties of SU-8

Glass Transition Temp. (Tg °C)	210
Thermal Stability (°C@5% wt. loss)	315
Thermal Conductivity (W/mK)	0.3
Coeff. of Thermal Expansion (ppm/K)	52
Tensile Strength (MPa)	60
Young's modulus (GPa)	4.4



(a)



(b)

Fig. 2 Setup of laser machining system, (a) setup system, (b) schematic.

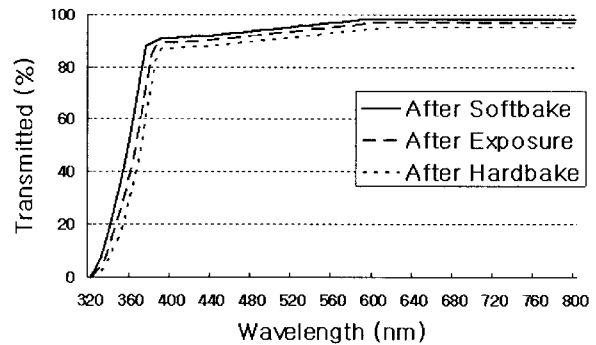


Fig. 3 Optical transmittance of SU-8.

3. 실험결과 및 고찰

SU-8 재료의 표면에 어블레이션이 없이 열팽창만 유도하기 위해서 문턱값보다 낮은 에너지를 조사하였다. 실험적으로 SU-8의 문턱값을 측정한 결과 0.39 J/cm²이었다. 그리고 부풀어 오를 만큼 열팽창이 유도되기 시작한 레이저 플루언스는 0.19 J/cm²이었으며 이보다 낮을 경우 재료의 표면에는 변화

가 없었다. Fig. 4은 0.22 J/cm^2 의 레이저 플루언스로 조사되었을 때 SU-8 표면에 열팽창에 의해 형성된 마이크로렌즈 사진으로 직경 $30 \mu\text{m}$ 의 마이크로렌즈가 형성되었음을 알 수 있다. Fig. 5은 레이저 플루언스에 따라 형성된 MLA의 사진으로 (a)는 레이저 플루언스 0.21 J/cm^2 , (b)는 0.25 J/cm^2 그리고 (c)는 0.34 J/cm^2 으로 각각 조사하였을 때이며 마이크로렌즈 간 간격은 $100 \mu\text{m}$ 이다. 레이저 플루언스가 변함에 따라 형성되는 마이크로렌즈의 직경이 점점 커지는 것을 알 수 있다. 정확한 형상 측정을 위하여 비접촉식 광학 표면 프로파일 측정기(나노시스템: NANOVIEW, resolution 10nm)를 사용하여 측정하였으며, 그 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 레이저 플루언스 0.21 J/cm^2 일 때의 형상으로 (a)는 10배율 (b)는 50배율로 측정된 것이며 마이크로렌즈의 직경은 $23.26 \mu\text{m}$, 높이 $1.33 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 7은 레이저 플루언스 0.25 J/cm^2 일 때의 형상으로 (a)는 10배율 (b)는 50배율로 측정된 것이며 마이크로렌즈의 직경은 $45 \mu\text{m}$, 높이 $1 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 8은 레이저 플루언스 0.34 J/cm^2 일 때의 형상으로 (a)는 10배율 (b)는 50배율로 측정된 것이며 마이크로렌즈의 직경은 $74 \mu\text{m}$, 높이 $0.4 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 9는 레이저 플루언스 0.41 J/cm^2 일 때의 형상으로 (a)는 10배율 (b)는 50배율로 측정된 것이며 문턱값인 0.39 J/cm^2 을 넘어가면서부터 가공이 되는 현상을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 측정된 레이저 플루언스에 변화에 따라 형성된 마이크로렌즈 단면 형상을 비접촉식 광학 표면 프로파일 측정기에 의해 나타낸 그림이다. 플루언스가 증가함에 따라 마이크로렌즈의 반경은 증가하지만 오히려 높이는 감소함을 알 수 있다. 레이저 플루언스 증가에 따라 마이크로렌즈의 높이가 점점 작아진 것은 레이저가 조사된 영역뿐만 아니라 주위도 같이 표면이 전체적으로 부풀어 올라 표면에서부터 마이크로렌즈 높이 측정값이 오히려 감소하였다. 가공이 되어있는 부분의 높이와 가공이 되지않은 부분의 높이를 측정한 결과 레이저 플루언스 0.21 J/cm^2 일 때 높이는 $1.36 \mu\text{m}$ 이고 0.25 J/cm^2 일 때 높이는

$1.63 \mu\text{m}$, 0.34 J/cm^2 일 때 높이는 $2.23 \mu\text{m}$ 이다. 다시 말하면 레이저 플루언스 0.21 J/cm^2 일 때 $0.03 \mu\text{m}$, 0.25 J/cm^2 일 때 $0.63 \mu\text{m}$ 그리고 0.34 J/cm^2 일 때 $1.82 \mu\text{m}$ 만큼 주변이 부풀어 올랐다. 즉 높은 에너지가 조사되면 더 많은 에너지가 SU-8에 흡수되고 더 많은 열팽창량이 야기되어 높이 방향뿐만 아니라 반경 방향의 팽창도 크기 때문에 재료의 표면 전체가 부풀어 오른다. 그리고 높은 플루언스에서 형성된 마이크로렌즈 반경의 증가 역시 반경 방향의 열팽창량 증가에 의한 것으로 판단된다. 따라서 레이저 플루언스가 높아질수록 마이크로렌즈의 높이는 주변부와 비교하여 점점 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

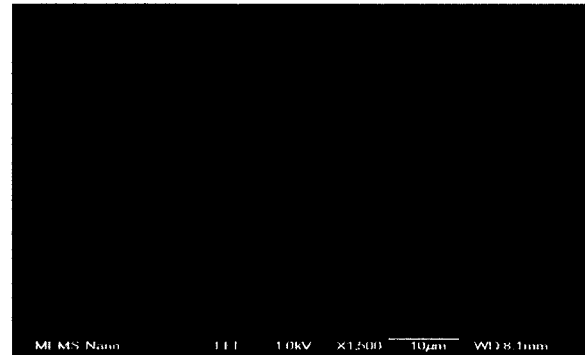
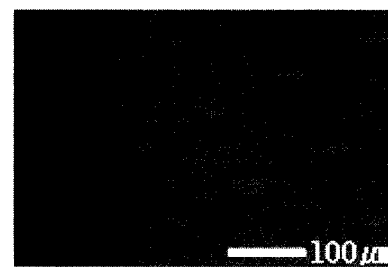
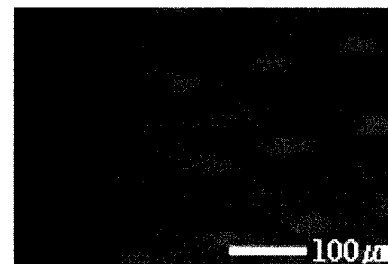


Fig. 4 SEM image of micro lens formed by thermal expansion at laser fluence of 0.22 J/cm^2 on SU-8 surface.



(a)



(b)

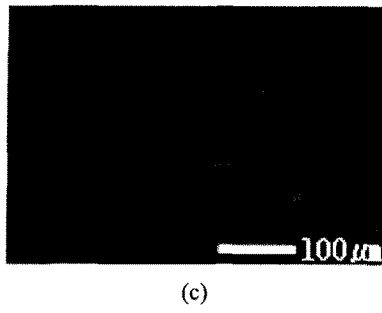


Fig. 5 Photos of SU-8 surface at laser fluence of, (a) 0.21 J/cm², (b) 0.25 J/cm² and (c) 0.34 J/cm².

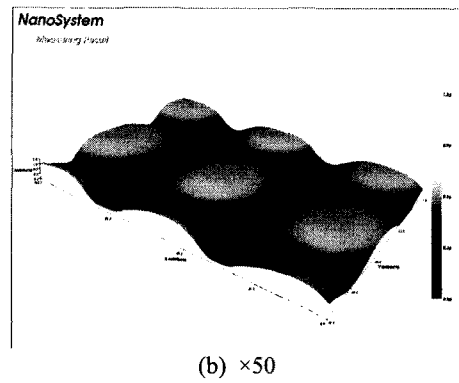


Fig. 7 Surface profile of microlens on SU-8 surface formed by LLTE at laser fluence of 0.25 J/cm.

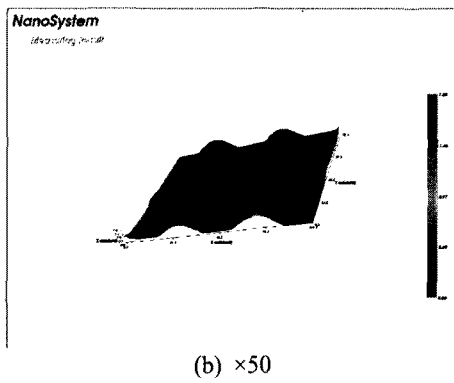
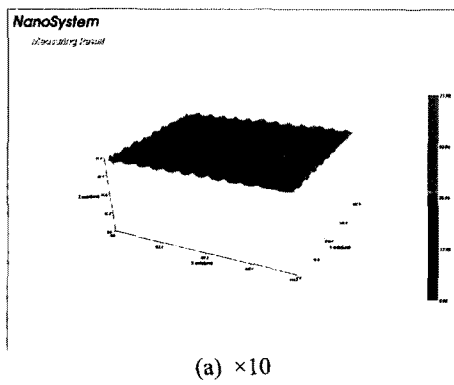


Fig. 6 Surface profile of microlens on SU-8 surface formed by LLTE at laser fluence of 0.21 J/cm².

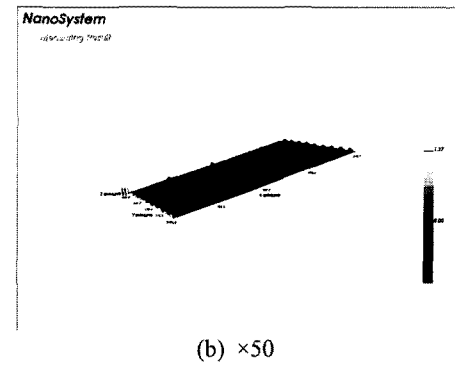
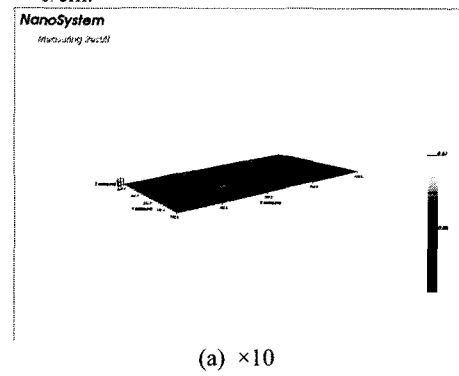
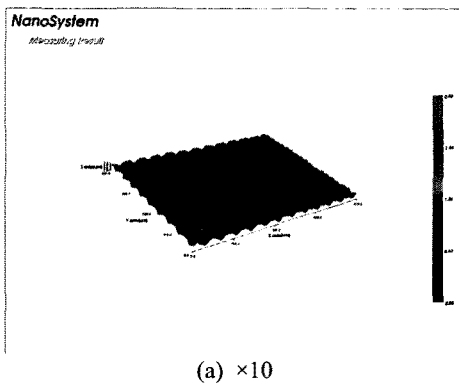
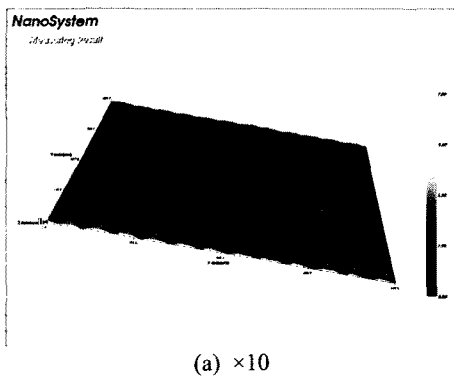


Fig. 8 Surface profile of microlens on SU-8 surface formed by LLTE at laser fluence of 0.34 J/cm².



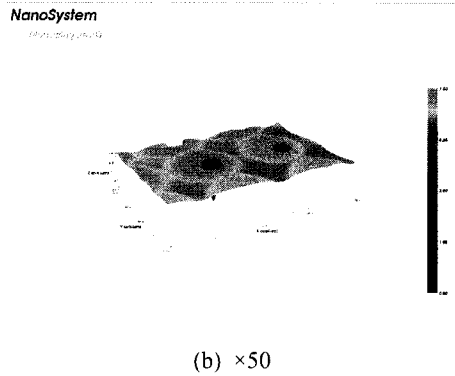


Fig. 9 Surface profile of microlens on SU-8 surface formed by LLTE at laser fluence of 0.41 J/cm^2 , which is above the threshold value of 0.39 J/cm^2 .

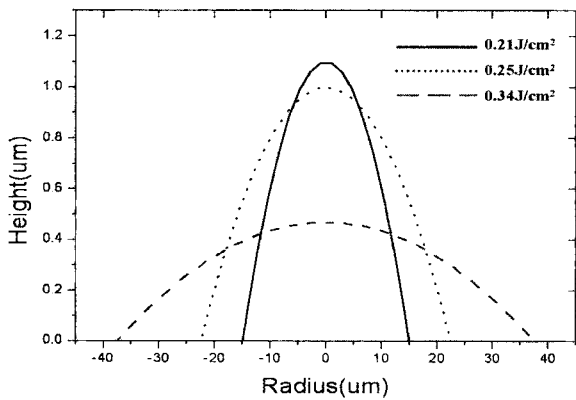


Fig. 10 Cross sections of microlens surface profiles with respect to laser fluence.

4. 결론

본 연구에서는 열팽창을 이용한 MLA 성형 공정을 제안하고 제작하여 그 가능성을 확인하였다. SU-8 PR에 355 nm UV 펄스 레이저를 조사하여 열팽창을 유도하였으며 열팽창이 유도되는 플루언스 범위는 $0.19 \text{ J/cm}^2 - 0.39 \text{ J/cm}^2$ 이었다. 형성된 마이크로렌즈는 최소 반경 $30 \mu\text{m}$, 최대 높이 $1.1 \mu\text{m}$ 였다. 플루언스가 증가할수록 형성된 마이크로렌즈의 반경은 증가하였고 높이는 감소하였으며 이는 주위의 표면까지 팽창되어 표면 높이가 상승하였기 때문이다. 본 연구를 통해 유연하고 저비용의 고속 MLA의 성형 공정에 응용이 가능할 것이라 사료된다.

5. 참고문헌

- 1) D.S. Kim, H.S. Lee, B.K. Lee, S.S. Yang S.S. Lee and T.H. Kwon : Modeling and Replication of Microlens Arrays Fabricated by a Modified LIGA Process, Transactions of Materials Processing, Vol. 15, No. 1, pp. 34-41, 2006.
- 2) H.D. Bae, M.S. Choi and S.I. Kang : Optimization of Glass Micro Molding Process for Glass Microlens Arrays, The Society of Information Storage Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 236-239, 2006.
- 3) Q. Wang, Y. Zhang, D. Gao : Theoretical study on the fabrication of a microlens using the excimer laser chemical vapro deposition technique, Thin Solid Films, Vol. 287, No. 1-2, pp. 243-246, 1996.
- 4) C.Y. Chang, S.Y. Yang, M.H. Chu : Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process, Micro-electronic Engineering, Vol. 84, No. 2, pp. 355-361, 2007.
- 5) K.S. Park, H.J. Lee, S.I. Kim and B.S. Kim : Preparation of the relief optical microlense by self-processing dry Photopolymers, Applied Chemistry, Vol. 2, No. 2, pp. 551-554, 1998.
- 6) N. Kiramura, K. Fukumi, J. Nishii, T. Kinoshita and N. Ohno : Formation of Microdots on the Surface of Densified Silica Glass by Thermal Relaxation, The Japan Society of Applied Physics, Vol. 42, No. 6B, pp. L712-L714, 2003.
- 7) C.S. Kim, J.D. Kim, K.K. Y : Microlens Fabrication by using Excimer Laser, Jorunal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 33-39, 2003.
- 8) B.S. Shin, J.Y. Oh, H. Sohn : Theoretical and experimental investigations into laser ablation of polyimide and copper films with 355nm Nd:YVO₄ laser, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, No. 12,

pp. 260-263, 2007.

- 9) J.Y. Oh, B.S. Shin, H.S. Kim : A study on the ablation of AZ5214 and SU-8 photoresist processed by 355nm UV laser, Korea Society of Laser Processing, Vol. 10, No. 2, pp. 17-24, 2007.