

포토폴리머 활용 마이크로/나노 UV 성형

강 신 일 · 연세대학교 기계공학부, 교수

e-mail : snikang@yonsei.ac.kr

이 글에서는 자외선에 반응하여 경화하는 포토폴리머를 이용하는 마이크로/나노 UV 성형 기술과 이를 적용한 다양한 응용 분야에 대해 소개하고자 한다.

최 근 다양한 응용분야에서 마이크로/나노 스케일의 패턴 복제가 요구되고 있으며, 특히 이미지 센서, 디지털 디스플레이 등 고효율, 고집적화가 요구되는 제품에서 마이크로/나노 패턴 부품의 수요가 급증하고 있다. 다양한 마이크로/나노 패턴 제작 방법 중 나노 사출 성형(nano injection molding), 핫 엠보싱(hot embossing), UV 성형(UV-molding) 등과 같은 폴리머를 이용한 복제 기술은 고정도의 마이크로/나노 구조물의 저가 양산방법으로 각광받고 있으며, 이 중 UV 성형 공정은 상온저압 공정이 가능하며, 높은 안정성,

낮은 열팽창 계수, 낮은 복굴절 등의 장점을 가져 마이크로/나노 패턴 부품 및 광학 부품의 제작에 매우 적합하다.

UV 성형 공정

UV 성형 공정은 UV에 반응하여 경화되는 상온에서 액상의 형태를 갖는 포토폴리머(photo-polymer)를 성형재료로 이용하는 공정으로, 포토폴리머를 기판 혹은 몰드 상에 도포하고, 자외선을 투과 하는 몰드 혹은 기판으로 덮은 후, 적절한 압력과 자외선을 조사해줌으로써 포토폴리머를 경화시켜 성형품을 제작하는

공정이다. 상온에서 액상의 형태를 갖는 포토폴리머는 열가소성 폴리머를 이용하는 타 복제 방법에 비해 유동성의 문제를 갖지 않아 두께가 얇은 제품, 크기가 작은 마이크로/나노 패턴, 높은 세장비(aspect ratio)를 가진 미소 구조체 등 대부분의 미소 부품 성형에 유리하며, 유동성 문제로 인한 복굴절 문제를 야기하지 않는다. 또한 성형된 제품은 높은 열적/화학적 내구성을 갖으며, 포토폴리머의 조성비 제어를 통한 굴절을 제어가 가능하다. 특히 UV 성형 공정은 상온 저압 공정이 가능하여 전자 기판상에 마이크로/나노 패턴을 집적함에 있어

기판의 손상이 발생하지 않아 전자소자상에 광학 부품을 집적하는 광전소자 제작공정에 매우 유용하다.(그림 1)

포토폴리머는 개시제(initiator), 단량체(monomer), 올리고머(oligomer), 그리고 희석제(solvent) 등의 기타 첨가물로 이루어져 있다. 포토폴리머의 광경화반응은 라디칼 경화 메커니즘 또는 양이온 메커니즘으로 설명된다. 라디칼(radical) 경화 메커니즘에 의해 경화되는 포토폴리머의 경우 자외선을 흡수한 광개시제는 라디칼 형태로 바뀌게

되고 모노머 또는 올리고머의 아크릴 그룹의 탄소 간 이중결합을 끊어 모노머 또는 올리고머의 끝에 새로운 라디칼을 생성시키게 된다. 이러한 광중합 과정을 광개시반응이라 하며, 라디칼을 갖고 있는 모노머 혹은 올리고머가 또 다른 모노머들과 결합하여 사

슬구조가 성장하는 과정을 성장반응이라 부른다. 두 개의 성장중인 사슬이 결합하여 최종적인 정지반응을 이루게 되며 최종적으로 광경화가 완료되게 된다. UV 성형 공정에서 포토폴리머의 충분한 경화도를 확보하는 것은 매우 중요하다. 불충분한 경화 조

● ●

UV 성형 공정은 상온 저압 공정으로 초미세 패턴 성형에 적합하며 높은 열적·화학적 내구성, 낮은 복굴절을 갖는 마이크로/나노 구조물의 저가 양산 공정이다. 특히 전자소자상에 마이크로/나노 광학부품의 집적공정에 매우 유용하다.

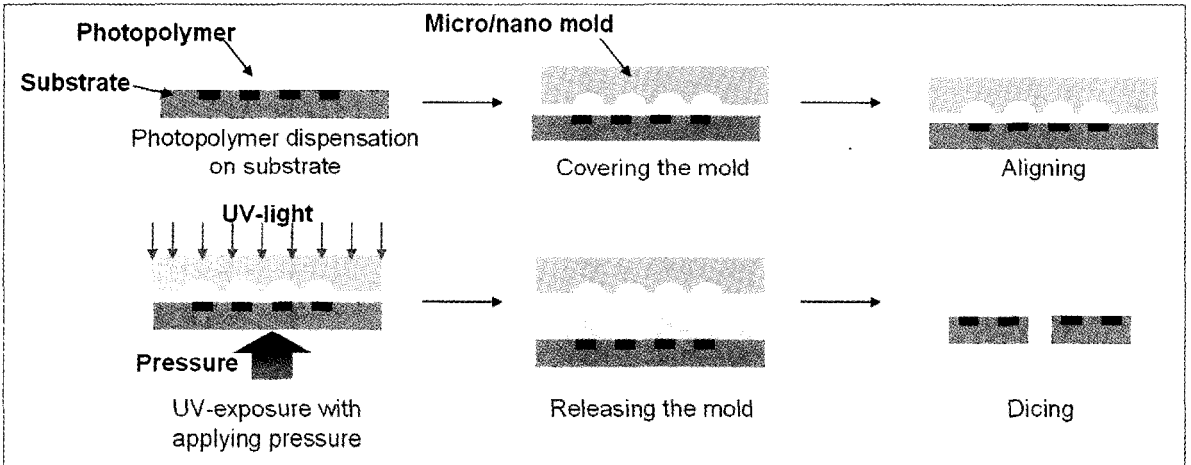


그림 1 UV 성형 공정

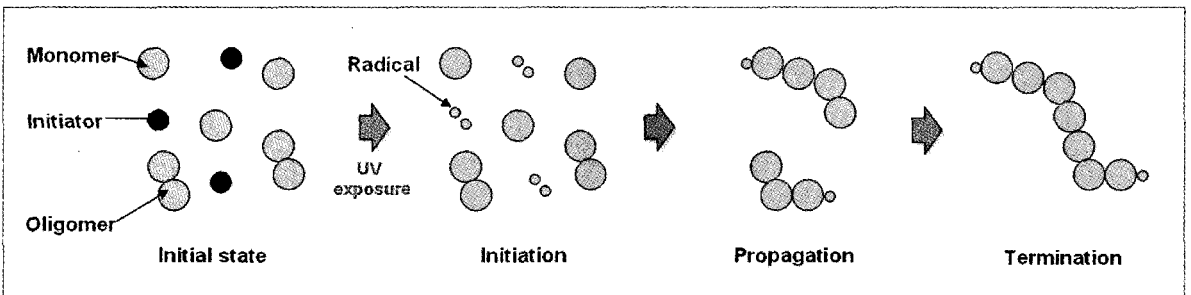


그림 2 포토폴리머 라디칼 경화 메커니즘

건의 경우 성형 제품 내부의 미반응 개시제 및 모노머로 인해 기계적/광학적 특성이 저하될 수 있으며 성형공정 이후 자연적인 후경화로 인해 형상 변형 등이 발생할 수 있기 때문이다. 포토폴리머의 경화도는 다양한 방법으로 평가될 수 있으나 적외선 분광 광도계(Fourier Transform Infrared(FTIR) spectroscopy)를 이용한 내부 화학적 구조 변화 분석이 주로 사용된다. 적외선 분광 광도계는 적외선 영역의 빛을 시료에 조사할 때 물질의 화학 구조에 따라 특정 파장의 빛이 흡수되거나 산란하는 성질을 이용하여 물질의 화학구조를 분석하는 장치이다. 포토폴리머 경화 과정에서 탄소 이중결합이 깨어지고 탄소 1차 결합이 발생하게 되는데 경화도의 증가에 따라 탄소 이중결합에 의한 흡수 파장대가 사라지는 것을 측정함으로써 경화도의 정량적인 측정이 가능하게 된다.(그림 2)

포토폴리머의 경화도 평가는

UV 성형 공정의 공정조건 선정에 있어 매우 중요하며 적외선 분광 광도계를 이용한 평가방법이 주로 사용된다.

UV 성형 공정을 위한 시스템은 자외선을 조사하여 재료를 경화시키기 위한 자외선 램프와 노광 모듈, 몰드와 기판을 고정시키는 치구 유닛, 재료 경화 시 수축을 제어하기 위한 가압 모듈, 필요에 따라 몰드와 기판을 정렬(align)하기 위한 스테이지 및 모니터링 유닛으로 구성된다. 자외선 램프는 사용하는 포토폴리머 개시제의 반응 파장대에 따라 선택될 수 있으며 일반적으로 365nm 파장에서 높은 에너지를 방사하는 고압 수은 램프 혹은 265~420nm의 넓은 파장대의 자외선을 방사하는 메탈 할라이드 램프를 사용한다.

UV 성형 공정은 점성을 갖는 액상의 포토폴리머 재료를 사용하기 때문에 포토폴리머 내부 혹은 몰드와 포토폴리머의 경계면에서 미세 기포가 발생할 소지

가 매우 높으며, 이러한 미세 기포는 제작된 UV 성형품의 다양한 결함으로 나타난다. 미세 기포를 제거하는 방법으로 진공 상태에서 성형공정을 진행 하는 방식이 사용될 수 있으나, 이는 고가의 진공 장비를 요구하며 공정시간이 증가되는 단점을 갖는다. 또 다른 미세 기포 제어 방법으로 사전 가열 방법이 있으며 이는 성형 공정 전 재료를 적정온도로 가열하여 재료의 점도를 감소시키고 재료의 도포 및 몰드 안착을 진행함으로써 기포의 발생 가능성을 저하시키는 방법이다. 이외에도 형성된 미세 기포를 외부로 밀어내는 방법 혹은 몰드 내부의 특정위치로 이동시키는 방법 등 다양한 기포 제어 방법이 제안되고 있다.(그림 3)

UV 성형 공정은 포토폴리머의 경화 반응을 이용하는 것으로 경화반응 과정에서 발생하는 재료 수축에 의한 형상 정밀도 저하가 발생한다. 포토폴리머의 수축은 포토폴리머 재료 조성비 및 경화

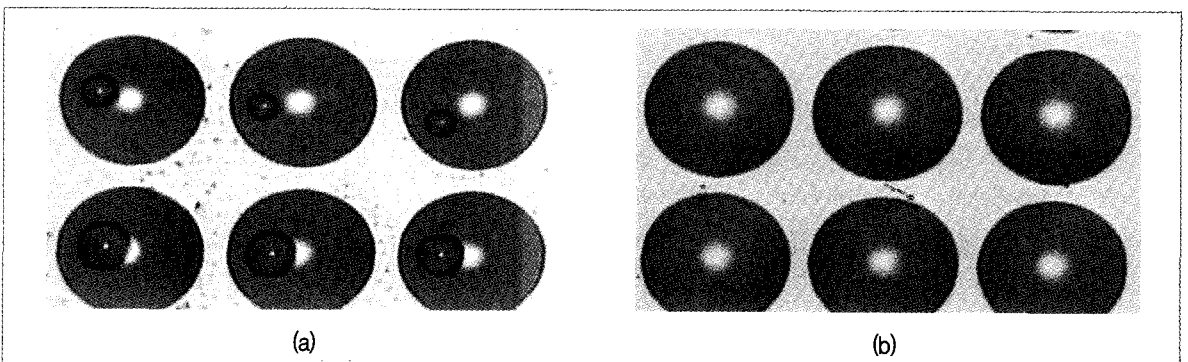


그림 3 (a) 미세 기포가 발생한 마이크로 렌즈 (b) 사전 가열법을 적용하여 미세기포가 제거된 마이크로 렌즈 [S. Kang et al. J. Phys. D Appl. Phys. 36 (2003)]

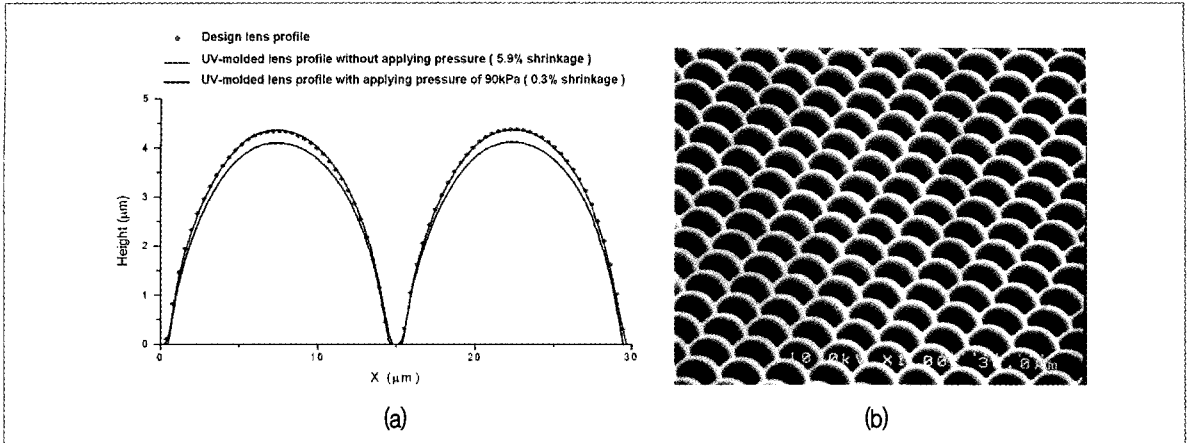


그림 4 (a) 인가압력에 따른 UV 성형 마이크로 렌즈 형상 프로파일 비교 (b) 90kPa 인가압력 하에서 성형된 직경 14 μ m, 피치 15 μ m 마이크로 렌즈 어레이 전자 현미경 사진[S. Kang et al. J. Phys. D Appl. Phys. 36 (2003)]

온도, 시간, 조사되는 자외선의 강도 및 파장 등의 영향을 받으며 이는 재료의 특성으로서 UV 성형 공정에서 피할 수 없는 결함이다. 그러나 인가 압력의 제어를 통해 수축의 방향성을 결정할 수 있으며 특히 미세 패턴 구조물에서 중요 시 판단되는 미세 패턴내의 수축현상의 제어가 가능하다. 실례로 직경 14 μ m, 피치 15 μ m의 마이크로 렌즈 어레이 성형 공정에서 인가압력을 가지 않는 경우 몰드 케비티 깊이 대비 약 5.9%의 재료 수축에 의한 전사성 저하현상이 발생하나 90kPa의 인가압력 하에서 전사성 저하량이 오차범위인 0.3% 이하로 발생함을 확인할 수 있다. 이는 가압 공정으로 인해 대다수의 수축이 잔류층(residual layer)에서 두께방향으로 발생하고 케비티 내에서의 재료 수축이 발생하지 않음을 의미한다.(그림 4)

UV 성형 공정 시 미세 기포에 의한 결함은 진공장비, 사전 가열 등의 방법으로 제어 가능하며 재료 수축에 의한 마이크로/나노 패턴의 전사성 저하는 가압 공정을 통해 제어 가능하다.

연속 UV 성형 공정

UV 성형 공정은 마이크로/나노 패턴의 저가 양산 공정으로 매우 적합하나 최근 디스플레이 등 다양분야에서 요구하는 대면적 패턴 부품의 제작에 있어 기존의 평면 몰드를 이용하는 UV 성형 공정의 경우, 성형 면적에 해당하는 크기의 몰드가 필수적으로 요구되어 대면적 몰드 제작을 위한 비용의 증가가 불가피하며, 대면적 성형품 내에서 균일도를 확보함에 어려움이 따른다. 이에 롤 스탬프를 이용한 연속 UV 성형 공정에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다. 연속 UV 롤 성형

시스템의 경우, 롤 형상의 스탬프를 이용함으로써 지속적인 재료와 기판의 공급에 따라 연속적인 패턴이 가능하여 대면적 패턴팅이 가능하고 매우 높은 생산성 구현이 가능한 장점을 갖는다. 또한 대면적 패턴 성형 시 국부적인 영역별로 순차적으로 성형 공정이 진행되므로 평면 몰드를 사용한 공정에 비해 공정 조건 제어가 용이하고 높은 균일도를 확보할 수 있다.

연속 UV 성형(continuous UV molding) 시스템은 마이크로/나노 패턴이 표면상에 가공된 롤 스탬프와 재료 공급 장치, UV 노광장치 그리고 다양한 기능성 롤러들로 구성된다. 이때 적용 기판의 강성에 따라 서로 다른 형태의 기능성 롤러 구성이 적용된다. 다양한 재료 도포 방법을 통해 기판 상에 균일하게 도포된 포토 폴리머는 기판과 롤 스탬프 간의 접촉을 위한 롤러를 통과하면서 롤 스탬프의 케비티로 충전되고

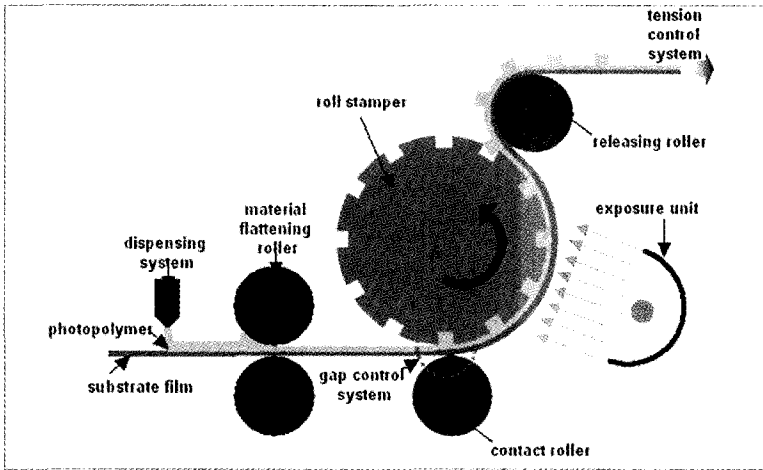


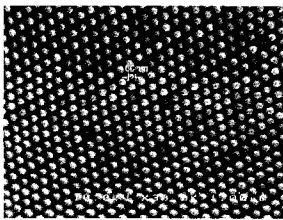
그림 5 연속 UV 성형 시스템 개략도[S. Kang et al. Appl. Phys. Lett. 89 (2006)]

롤 스탬프를 적용하는 연속 UV 성형 공정은 대면적 제품의 생산을 가능하게 하며, 생산 속도의 향상 및 균일도 확보가 가능하다.

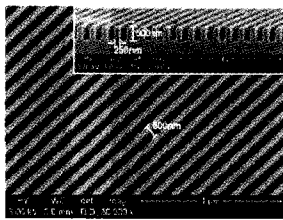
이와 동시에 자외선이 투명 기판을 투과하여 조사된다. 이때 포토폴리머는 케비티의 형상을 유지

한 상태로 경화되어 패턴을 형성하며 롤 스탬프로부터 이형되어 최종으로, 기판 상에 패턴이 전사

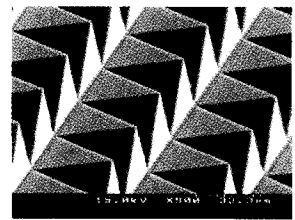
된다. 연속 UV 성형 공정에 적용되는 롤 스탬프의 경우 롤 베이스상에 정밀 기계가공을 진행하는 방법 혹은 박판 스탬프를 부착하는 방법을 이용하여 제작된다. 롤 베이스를 다이아몬드 팁을 이용하여 가공하는 방식은 1차원 어레이 형태의 마이크로 케비티를 갖는 정밀 롤 스탬프의 제작이 가능하나 2차원 어레이형태 혹은 나노 스케일 패턴의 구현이 어려운 단점을 갖는다. 박판 스탬프를 롤 베이스에 부착하는 공정은 다양한 마이크로/나노 패턴링 방법으로 제작된 마스터 기판을 이용한 전주도금 혹은 폴리머 복제 공정을 통해 박판 스탬프를 제작하고 이를 롤 베이스에 부착하는 것으로 복잡한 형상의 마이크로/나노 패턴을 갖는 롤 스탬프의 제작이 가능하나, 박판 스탬프



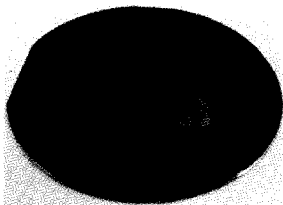
50nm 나노 도트 패턴 [S. Kang et al. Appl. Phys. Lett. 89 (2006)]



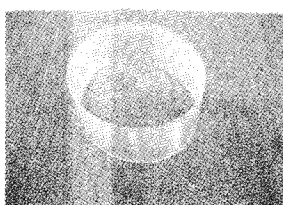
1차원 나노 그레이팅 [S. Kang et al. Appl. Phys. Lett. 89 (2006)]



피라미드 피트 구조물 [S. Kang et al. Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007)]



실리콘 기판상에 성형된 마이크로 렌즈 어레이



연속 UV 성형 공정으로 제작된 마이크로 패턴 기능성 필름



대면적 Glass 기판상에 제작된 렌티큘러 렌즈 패턴

그림 6 UV 성형 공정으로 제작된 다양한 마이크로/나노 패턴

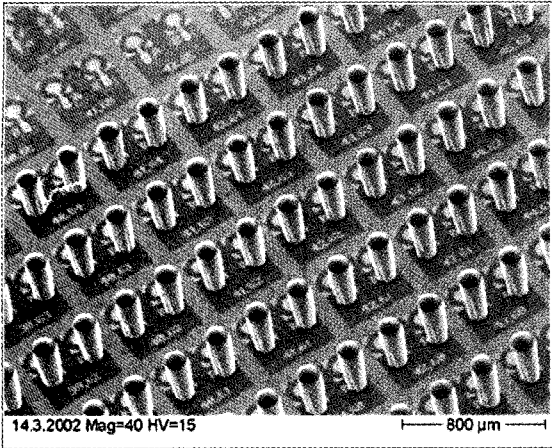


그림 7 VCSEL 상에 UV 성형 공정으로 복제된 광부품[M. T. Gale et al. Opt. Laser. Eng. 43 (2005)]

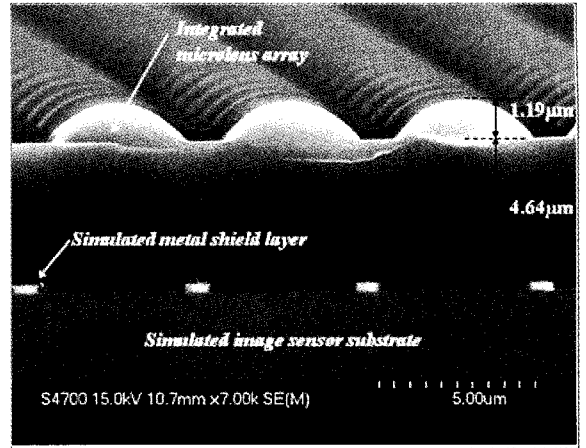


그림 8 가상 이미지 센서 기판상에 복제된 마이크로 렌즈 어레이[S. Kang et al. Opt. Lett. 31 (2006)]

의 부착 시 균일도 확보 문제 및 이음새 문제 해결이 요구된다. 연속 성형공정에 있어 성형품의 전사성 향상 및 균일도 확보, 결합 제어가 매우 중요하며 이를 위해 연속 성형 공정 시 기판의 인장력 제어, 균일 재료 도포, 기판과 패턴 간의 정렬 기술 개발 등이 현재 활발히 연구되고 있다.(그림 5)

UV 성형 공정을 통한 마이크로/나노 패턴 응용 부품 개발

UV 성형 공정은 공정이 갖는 다양한 장점으로 인해 다양한 분야의 마이크로/나노 패턴 응용 제품에 적용될 수 있다. UV 성형 공정을 통해 실리콘, 유리, 폴리머 필름 등 다양한 기판상에 마이크로/나노 패턴의 제작이 가능하며 수십 나노의 패턴에서 수백 마이크로 크기의 패턴까지 응용 제

품의 목적에 맞는 다양한 패턴 제작이 가능하다. 또한 세장비 2 이상의 고 세장비 패턴에 대해서도 안정적인 복제 공정이 가능한 특징을 갖는다. 연속 UV 성형 공정을 적용하는 경우 마이크로/나노 패턴 기능성 광학 필름 및 대면적 패턴의 제작이 가능하다.(그림 6)

특히 UV 성형 공정은 전자 기판상에 마이크로/나노 광부품의 집적공정에 매우 유용하여 다양한 광전자 소자의 제작에 적용될 수 있다. UV 성형 공정을 통해 마이크로/나노 광부품을 전자 회로구조로 구성된 레이저 어레이 및 센서 어레이 상에 집적하는 공정은 기판이 불투명한 재질로 되어 있으므로 UV 투과형 몰드 제작 기술, 웨이퍼 스케일로 제작되는 기판과의 호환성을 위한 웨이퍼 스케일 성형 기술 및 초정밀 정렬 기술 등이 요구된다. 전자기판상에 집적된 광학 부품의

UV 성형 공정은 타 집적 공정에 비해 공정단계가 단순하여 단가 절감효과가 매우 크며 복제 공정의 특성상 매우 높은 균일도 및 생산성 구현이 가능하게 된다. 특히 UV 성형 공정의 경우 다양한 몰드 제작기법을 적용함으로써 다양한 형상의 마이크로 패턴 및 나노 스케일 패턴의 구현이 가능하여 광전소자의 기능성 향상 구현이 용이한 특징을 갖는다. 실제로 UV 성형 공정을 통해 VCSEL상에 마이크로 렌즈 어레이를 집속하여 광 커플링 효율을 향상시키는 연구 및 이미지 센서 상에 마이크로 렌즈를 집속하여 이미지 센서의 감도를 향상시키는 연구, LED 소자상에 마이크로 패턴을 복제하여 발광 효율을 향상시키는 연구 등이 진행되었다.(그림 7, 8)