폴리머 소재 마이크로 성형기술의 소개

이 글에서는 다양한 마이크로 성형기술 중 폴리머(polymer)를 소재로 하는 마이크로 · 나노 단위의 성형기술의 동향과 이에 관련된 다양한 응용분야에 대하여 소개하고자 한다.

마이크로 성형기술은 수 μm에서 수 mm의 크기를 가진 구조물의 형상으로 구성된 부품을 대량 생산하기 위한 공정 및 이에 관련된 모든 장비기술을 의미한다. 반도체, 디스플레이, 광정보저장기기의 주요 광학부품의 제작뿐만 아니라 의료나 통신분야까지 그 활용도가 증가하고 있다. 폴리머 재료를 이용한 미소광 · 열유체 부품의 대표적인 마이크로 성형기술은 마이크로 사출성형, 핫 엠보싱 및 UV 성형으로 분류할 수 있다. 또한 관련된 기술로는 최근 각광받고 있는 나노임프린트 리소그래피(NIL : Nanoimprint Lithography), 롤투롤 방식(roll-to-roll) 등이 있으나, 이 글에서는 앞의 세 가지 공정을 중심으로 마이크로 성형기술 현황을 정리하였다. 표 1은 뒤에서 다룰 마이크로 성형기술들의 특징을 요약하고 있다.

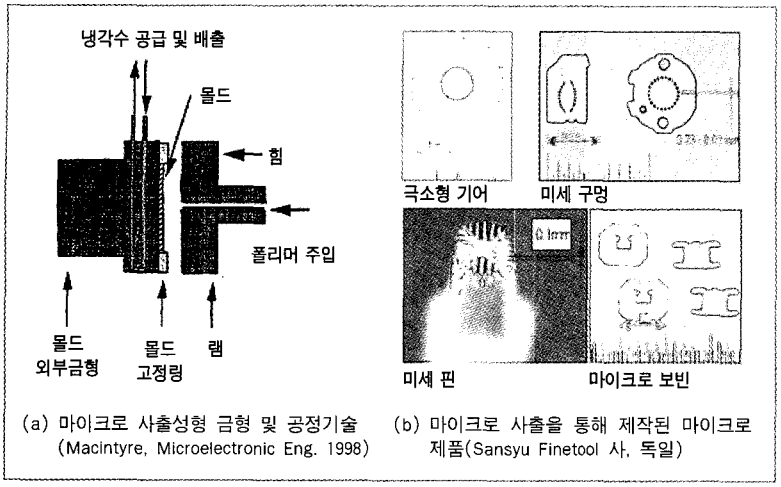
마이크로 사출성형

마이크로 사출성형(micro injection molding)은 폴리머 등의 열가소성 고분자 수지를 유리전이 온도 이상에서 용융시켜 마이크로 구조물을 지닌 금형에 고압으로 주입하고 냉각 · 고화시켜 마이크로 제품을 생산하는 기술을 의미한다(그림 1(a)). 마이크로 사출성형은 마이크로 성형기술 가운데 cycle time이 가장 짧고, 저가의 공정으로 마이크로

표 1 마이크로 성형기술 공정의 비교

	경화법	성형온도	성형시간	성형비용
사출성형	열경화	고온	빠름	고
핫 엠보싱	열가소성	유리전이온도 근방	느림	중
UV 엠보싱	UV경화	상온	중간	고

김 병 희 | 강원대학교 기계, 메카트로닉스공학부, 교수 _e-mail : kbh@kangwon.ac.kr
강 신 일 | 연세대학교 기계공학부, 교수 _e-mail : snlkang@yonsei.ac.kr



(a) 마이크로 사출성형 금형 및 공정기술 (Macintyre, Microelectronic Eng. 1998)

(b) 마이크로 사출을 통해 제작된 마이크로 제품(Sansyu Finetool 사, 독일)

그림 1 마이크로 사출성형 공정 및 제작된 마이크로 제품

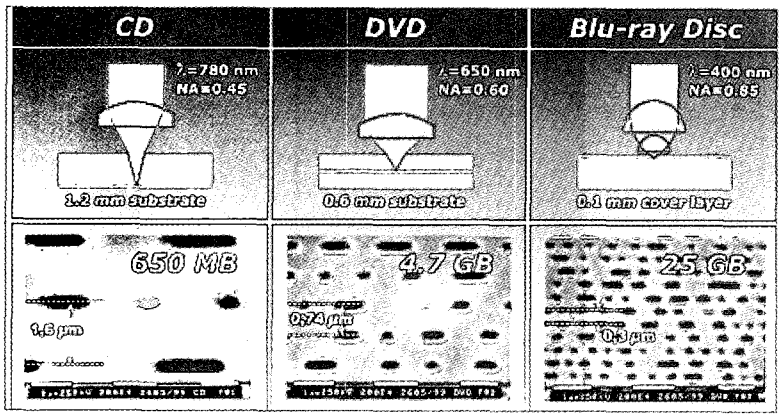


그림 2 광정보저장기기의 발전 흐름과 광디스크의 최소 패턴 크기

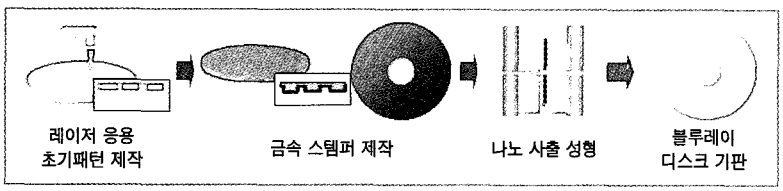


그림 3 나노 사출성형을 통한 BD 제작 공정의 개략도(JMI 사)

제품의 대량 생산에 가장 유리한 방법으로 알려져 있다. 마이크로 사출성형 방식은 미세패턴을 가진 광학식 고용량 정보저장매체, 광학렌즈 등의 초정밀 광학 부품, 도광판(light guide panel) 등의 디스플레이 기기, 각종 기능성 판상류 제품 등의 성형에 널리 사용된다. 그림 1(b)는 마이크로 사출성형기술을 통해 PBT, PMMA, ABS, PC, TPE 등 다양한 폴리머 재료로 성형된 7~100μm 사이즈의 마이크로 제품을 보여준다. Miniature Tool & Die 사는 의료장비, 전자, 센서 등에 사용되는 마이크로 성형부품 및 선폭 500nm, 두께 400μm의 마이크로 채널을 제작하고 있으며, Medical Murray 사는 마이크로/나노 사출성형 장비인 SESAME를 개발하여 상용화하였다.

본 연구팀에서는 제이엠아이 사와 공동으로 나노 사출성형공정 기술을 통해 150nm 급 블루레이 디스크(BD : Blu-ray Disc) 제작에 국내 최초로 성공하였으며, 향후 200GB 급(75nm 급) 제작 연구개발에 착수할 예정이며, 테라급 저장매체에 대한 연구개발도 순차적으로 진행할 예정이다. 그림 2는 CD, DVD 및 차세대 저장매체인 BD 등 광정보저장기기의 발전에 따른 광디스크의 사출성형된 최소 패턴의 크기 및 광시스템의 사양을 보여주고 있다. 그림 3은 BD 제작을 위한 나노 스탬퍼 및 나노 사출성형 공정을 보여준다.

나노 패턴을 지닌 BD를 사출성형하기 위해서는, 기존의 CD나 DVD 제품을 만들기 위해 사용되었던 마이크로 사출성형 기술을 더욱 발전시킨 나노 사출성형 공정기술이 요구된다. 특히, 충전과정에서 발생한 고화층(solidified layer)은 높은 점성

과 낮은 유동성을 가지기 때문에, 용융 수지가 미세 패턴에 충전되는 것을 방해하여 피트와 랜드-그루부의 전사를 크게 악화시키며, 고밀도 저장 매체성형의 경우 신호 특성에 크게 영향을 미칠 수 있다. 일본 Matsushita 사는 몰드의 절연기술을 통해 급속한 열방출을 막고 저속으로 금형을 개방하는 기술을 통해 광디스크 피트의 변형이 없는 사출성형기술을 개발하였으며, 독일의 ZEMI 사는 Variotherm heating기법을 이용하여 디몰딩 성능을 크게 향상시켰으며 현재 고세장비의 마이크로 사출성형에 관한 연구를 진행 중에 있다.

연세대에서는 능동 가열 금형 온도 제어 시스템을 적용한 나노 사출성형 시스템에 관한 연구를 수행 중에 있다. 그림 4는 능동 가열 금형 온도 제어 시스템을 적용한 나노 사출성형 시스템의 개략도를 보여준다. 이와 같은 능동 가열 금형 온도 제어 시스템을 통해 충전과정 동안 스탬퍼와 경면의 표면온도를 유리전이온도 이상으로 유지시킴으로써 고화층의 발생을 지연시키고 전사 특성을 향상시킬 수 있었다. 그림 5는 최적화된 나노 사출성형 공정 조건에서 제작된 폴리머 나노 패턴의 SEM 사진을 보여 주고 있다. 성형 재료로는 폴리카보네이트(Polycarbonate) 수지를 사용하였고, 금형 온도 100℃, 충진 압력 80~400N의 최적의 공정 조건을 선정하여 공정을 수행하였다. 나노 사출성형 결과 패턴 상부면의 평탄도가 우수하고, 세장비 1 이상의 고세장비 나노 패턴이 균일하게 성형되었음을 확인할 수 있다.

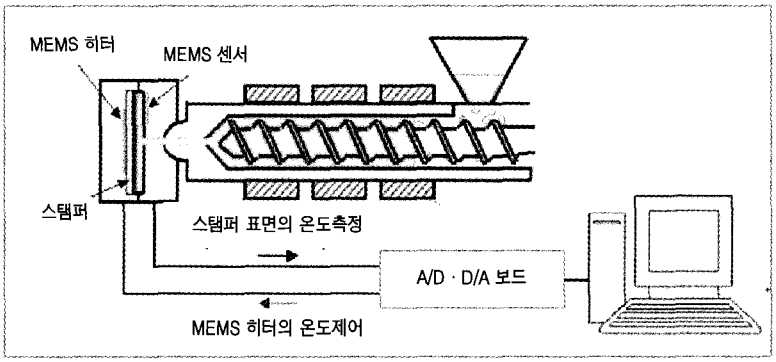
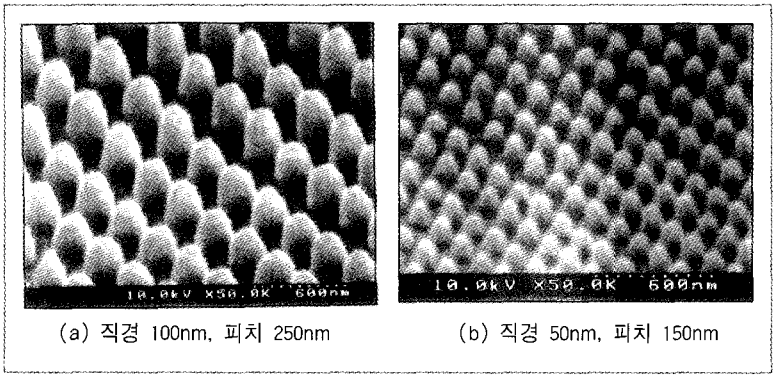


그림 4 능동 가열 금형 온도 제어 시스템을 적용한 나노 사출성형 시스템(S. Kang. Japanese Journal of Applied Physics/Microsystem Technologies, 2005)



(a) 직경 100nm, 피치 250nm　　(b) 직경 50nm, 피치 150nm

그림 5 나노 사출성형 공정을 통한 나노 필라 패턴 성형 결과 ; (S. Kang. Applied Physics Letters. 2006)

마이크로 핫 엠보싱

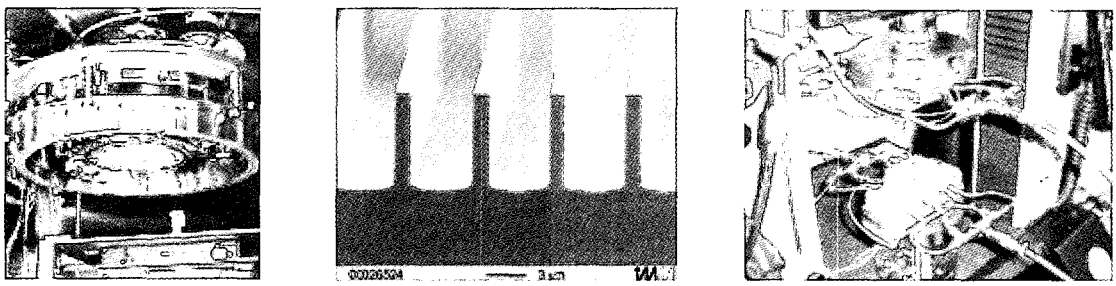
핫 엠보싱 공정(micro hot embossing)은 미소 부품 성형에 매우 적합한 공정으로 유리전이 온도 이상으로 가열된 폴리머에 미세 패턴을 지닌 금형을 가압하여 미세 패턴을 폴리머에 전사시키는 공정이다. 핫 엠보싱의 경우, 마이크로 사출성형에 비해 낮은 온도와 압력 하에서 광학용 폴리머를 포함한 대부분의 열가소성 폴리머를 사용하여 미세 패턴을 구현할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 바이오-MEMS 분야, 마이크로 유동, 마이크로 광학 및 나노기술 등 다양한 응용분야에 적용이 가능하다.

마이크로 핫 엠보싱 공정은 스탬프와 열가소성 폴리머와의 열적 · 기계적 물성 차이를 이용한

다. 그림 6(a)는 독일의 Jenoptik Mikrotechnik 사가 개발한 핫 엠보싱 시스템으로 높은 세장비는 물론 다양한 재료의 마이크로 복제가 가능하다. 그림 6(b)는 MIT에서 개발한 소형 핫 엠보싱 장치를 보여주고 있다. 금형의 수랭을 통해 기존의 핫 엠보싱이 가지고 있던 공정시간이 긴 단점을 어느 정도 극복하였다.

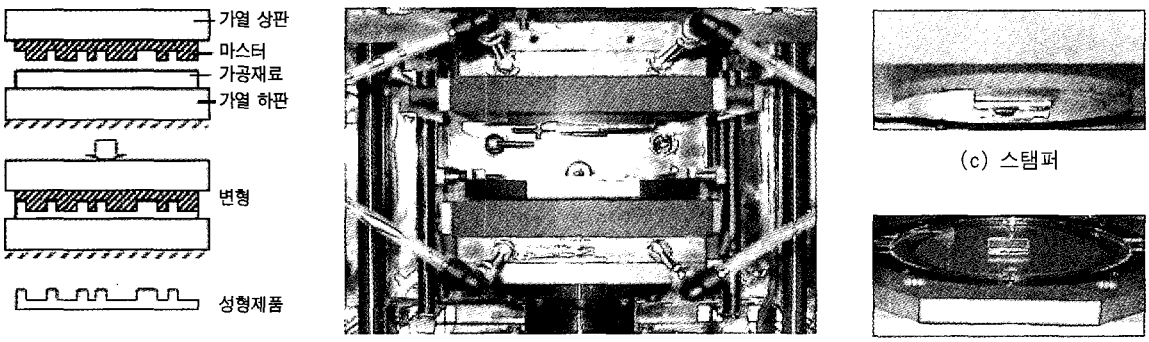
그림 7은 마이크로 핫 엠보싱의 간단한 원리와 마이크로 핫 엠보싱 시험장치를 보여준다. 이 장비는 냉각수의 강제순환을 통한 직접 냉각방식을 채택하였으며, 질소가스를 이용한 이형 및 동시 냉각을 시도하였다. IR 카메라를 이용하여 금형표면 온도를 정밀하게 측정함으로써 실제 성형 시의 온도조건을 정밀하게 제어할 수 있었다. 또한 유리전이 온도에 근접한 온도에서 성형하는 저온 핫 엠보싱 기법과 최적의 공정조건 제어를 통해 기존 방법에 비해 80% 이상의 공정시간을 단축하였다. 또한, 상하금형의 차별적인 가열과 냉각을 통하여 하이브리드형 엠보싱 공정을 가능케 하였다. 핫 엠보싱 시험에 사용한 스탬프는 DVD와 블루레이 니켈 스탬프를 사용하였으며, 기판 재료로는 PMMA를 사용하였고, 성형 변수인 성형온도, 성형압력, 성형시간, 이형온도 등의 변화에 따른 성형결과를 고찰하였다.

그림 8은 마이크로 핫 엠보싱 공정에서 성형 파라미터의 시간에 사용된 스탬프를 나타낸다. 엠보싱 공정시간을 단축하기 위해 PMMA의 유리전이 온도 근처인 110, 120℃의 저온성형을 위주로



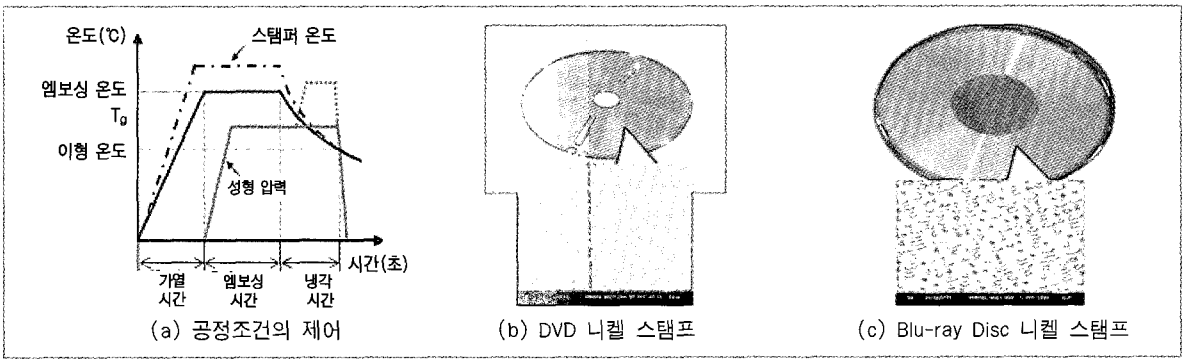
(a) HEX 01(Jenoptik Mikrotechnik 사)　　(b) MIT의 핫 엠보싱 장치

그림 6 외국의 핫 엠보싱 시스템



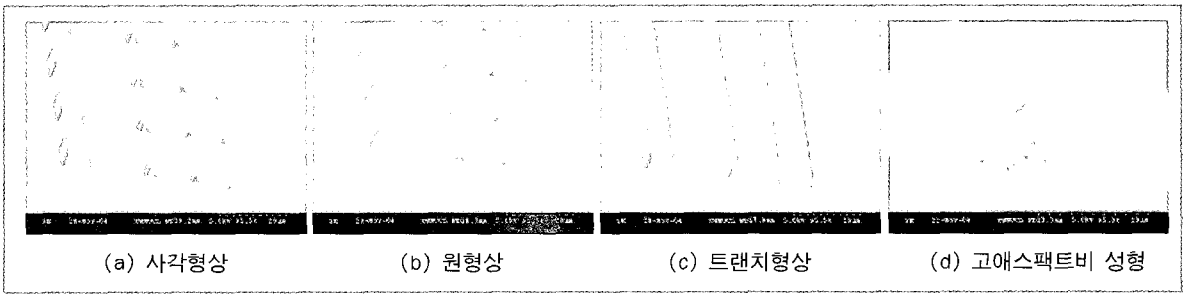
(a) 핫 엠보싱 공정　　(b) 하이브리드형 핫 엠보싱 장치　　(c) 스탬퍼　　(d) 재료의 설치(PMMA)

그림 7 핫 엠보싱의 원리 및 시험장치(강원대)



(a) 공정조건의 제어 (b) DVD 니켈 스탬프 (c) Blu-ray Disc 니켈 스탬프

그림 8 시간에 따른 공정조건 변화와 사용된 니켈 스탬프(강원대)



(a) 사각형상 (b) 원형상 (c) 트랜치형상 (d) 고애스팩트비 성형

그림 9 다양한 형상에 따른 성형시험 결과

실험하였으며, 성형압력은 40, 80, 120bar를 사용하였고, 성형시간은 10, 30, 60, 120sec로 주었으며, 이형온도는 90℃로 고정하여 실험하였다. 성형압력의 증가는 일반적으로 폴리머의 충진율을 향상시키지만, PMMA의 유리전이 온도 이상의 고온성형에서는 스탬프 외곽에서 발생하는 압력이 패턴 내부의 스퀴즈(squeeze) 압력을 감소시켜 충진율을 저감시키는 조건이 되며, 과다한 성형시간은 전체적인 공정시간을 증가시킬 뿐 패턴의 전사특성을 향상시키지는 못하였다. 그림 9는 마이크로 핫 엠보싱 공정에 의해 수행된 다양한 결과들을 나타내고 있다.

마이크로 UV 성형

마이크로 UV 성형(micro UV-molding) 공정은 자외선에 경화되는 액상의 포토 폴리머(photo polymer)를 사용하는 공정으로 그림 10과 같이, 금형 위에 재료를 코팅하고, 유리 등의 투명한 기판으로 덮은 후, 자외선을 조사하여 재료를 경화시키고, 성형품을 이형하는 과정으로 진행된다. UV 성형 공정은 상온·저압 공정으로 공정시간이 매우 짧고, 낮은 복굴절 및 높은 열적 안정성을 갖는 제품의 제작이 가능하다. 또한 상온에서 액상인 포토폴리머를 사용함으로써 재료의 유동에 대한 문제가 적어, 두께가 얇은 제품, 크기가 작은 미소 렌즈, 높은 세장비(aspect ratio)를 가진 미소 구조체 등 대부분의 미소부품 성형에 유리하다. 특히 마이크로 광전자 소자 등에서 전자 소자 기판 상에 수동 광소자 및 미세 구조체를 성형함에 있어 UV 성형은 소자에 손상을 주지 않고 고품위의 광소자를 저가 집적할 수 있어 이러한 광전자 모듈용 광소자 제작에 가장 적합하다 하겠다.

마이크로 UV 성형 공정은 공정이 갖는 다양한 장점으로 인해 국내외적으로 다양한 연구가 수행되고 있다. Heptagon 사는 기존 4인치 크기의 UV 복제는 물론 6~8인치의 대면적 유리나

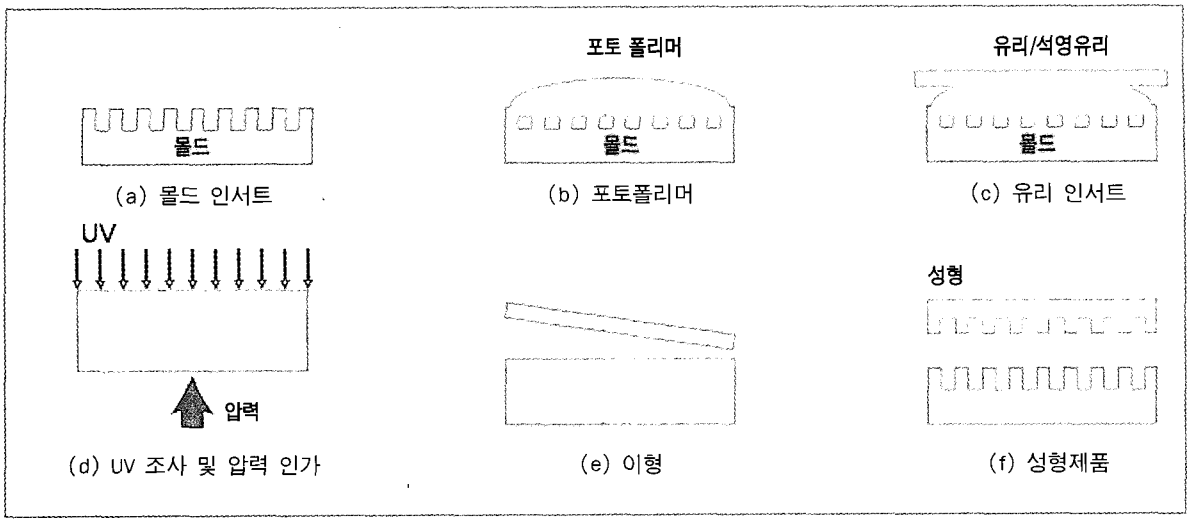


그림 10 마이크로 UV 성형 공정순서

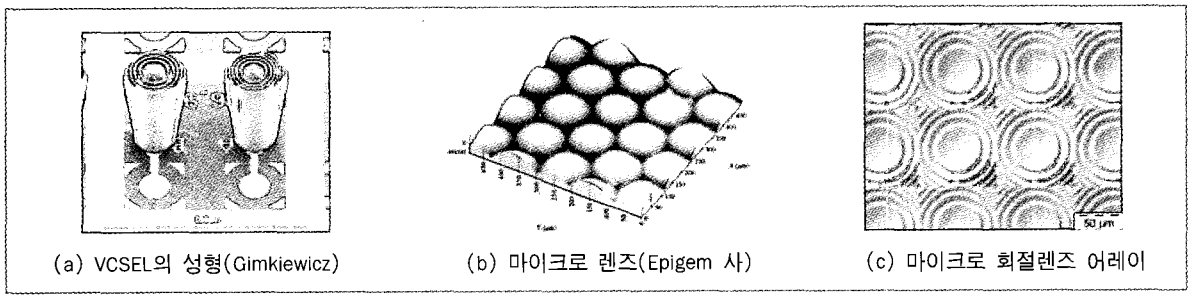
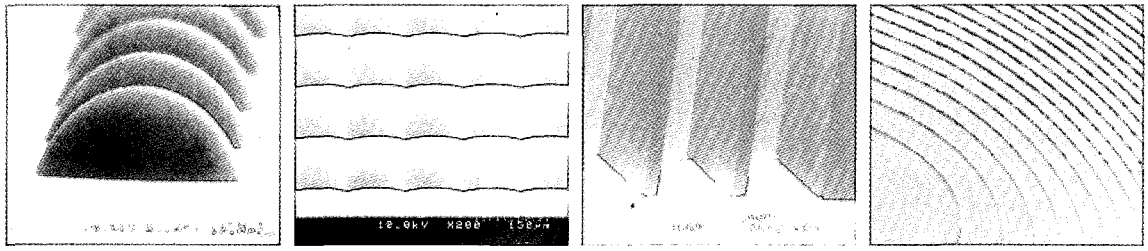


그림 11 마이크로 UV 성형공정을 이용한 응용

광전자 모듈용 웨이퍼 상에서의 성형시험을 수행하였으며, Gimkiewicz 등은 수직발광레이저(VCSEL) 어레이 상에 웨이퍼 단위의 마이크로 렌즈를 집적 성형을 수행하였고(그림 11(a)). 영국의 Epigem 사는 일반 마이크로 렌즈의 복제뿐만 아니라, 플렉서블 마이크로 렌즈에 제작에도 응용하였다.(그림 11(b))

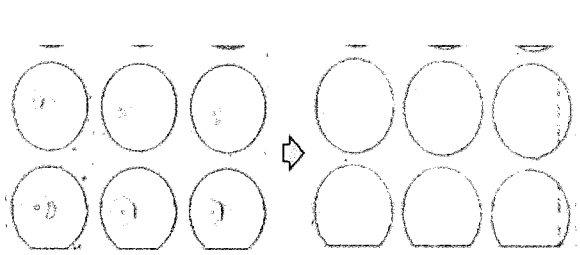
국내의 경우에도 다양한 기업 및 연구소에서 마이크로 UV 성형 시스템 및 성형 공정에 대한 연구가 수행되었으며 관련 기술의 상업화가 일부 진행되고 있는 상태이다. 한국기계연구원, NND, 연세대 등에서 다양한 크기 및 공정의 마이크로 UV 몰딩 시스템이 개발되었으며 관련 공정 연구 및 응용 제품이 개발되고 있다. 특히 연세대 강신일 교수팀에서는 광전소자상에 마이크로 광부품의 집적이 가능한 UV 몰딩 시스템인 최대 성형 크기 8inch의 Monolithic Lithography Integration System이 개발되었고 이를 응용한 다양한 응용 제품이 개발되었다. 마이크로 UV 성형 공정은 매우 다양한 형상의 마이크로 부품 제작에 적용될 수 있으며 그림 12와 같이 다양한 크기 및 형상의 마이크로 렌즈 어레이, V 홈 어레이, 회절 광학소자 등을 실리콘 기판, 유리 기판, 폴리머 필름 상에 제작 할 수 있다.

UV 성형 공정에 있어 액상의 재료를 사용함으로써 발생하는 미세 기포 결함 및 재료의 중합(polymerization) 공정에서 발생하는 수축은 초정밀 마이크로 광부품의 제작에 있어 성형품의

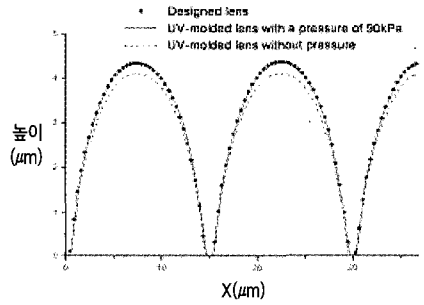


(a) 마이크로렌즈 어레이 (b) 100% 충진율 마이크로 렌즈 어레이 (c) V-홈 충진율 (d) 8-step 회절 광학소자

그림 12 다양한 마이크로 UV 성형 응용 예(연세대)



(a) Pre heating 공정을 통한 미세 기포의 제거(S. Kang, Jounal of Microlith. Microfab. Microsyst., 2003)

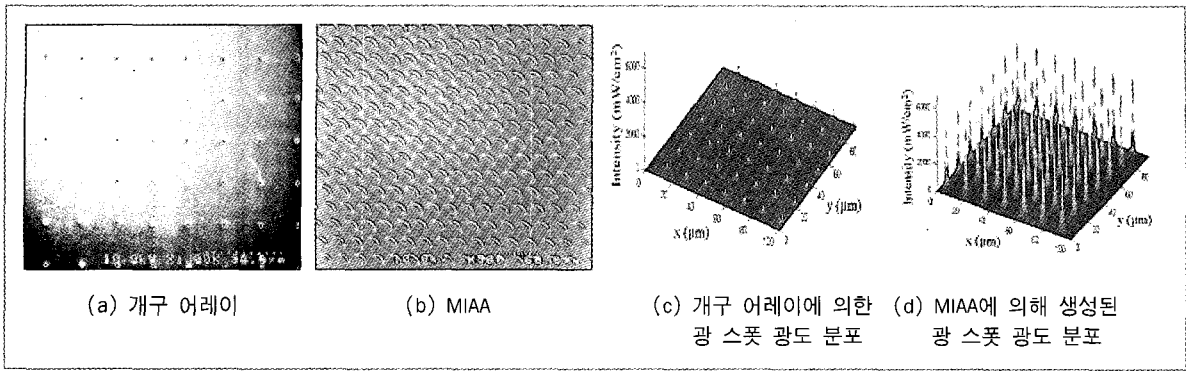


(b) 가압력에 의한 UV 성형 렌즈의 새그 높이 변화(S. Kang, J. Phys. D Appl.Phys.,2003)

그림 13 마이크로 UV 성형공정 공정 결함 제어 결과

특성을 저하시키는 가장 큰 이슈이다. 미세 기포 결함의 제어를 위해 진공 분위기에서 성형 공정을 진행함으로써 미세 기포를 효과적으로 제거할 수 있으나 이는 공정시간 증가 및 제조단가의 상승을 야기하는 요인이 된다. 공정시간의 증가 없이 미세기포의 제거를 위해 재료 및 몰드의 예비가열(pre-heating)을 수행하는 방법이 제안되었다. 예비가열을 통해 포토폴리머의 점성이 감소되며, 미세 기포의 열역학적 운동성이 증가하여 미세 기포가 스스로 몰드 캐비티 내에서 빠져 나오게 된다. 그림 13(a)는 마이크로 렌즈 어레이의 UV 성형 공정에서 발생한 미세 기포 결함과 예비가열 방법을 통해 이를 제거한 결과를 보여준다. UV 성형 공정에서 주로 발생하는 또 다른 문제인 재료의 수축에 의한 전사성 저하를 해결하기 위해 다양한 방법이 적용될 수 있으나, 마이크로 UV 성형 공정의 가압력을 제어함으로써 이를 보정하는 방법이 가장 경쟁력을 갖는 것으로 판단된다. 그림 13(b)는 가압력에 따른 UV 성형 마이크로 렌즈의 새그(sag height) 영향을 보여주며 실제 비가압 공정에서 제작된 성형품의 수축률 5.9%가 90kPa의 가압력에서 0.3% 이하로 보정될 수 있음을 알 수 있다.

연세대에서는 monolithic lithography integration 기술의 적용으로 수직발광레이저(VCSEL) 어레이와 광파이버의 커플링을 위한 마이크로 렌즈를 설계 VCSEL 기판상에 집적하여 그 특성을 평가하였으며, 네덜란드 Philips Research 사와 공



(a) 개구 어레이 (b) MIAA (c) 개구 어레이에 의한 광 스폿 광도 분포 (d) MIAA에 의해 생성된 광 스폿 광도 분포

그림 14 MLI 공정을 이용한 광학 카드 시스템 용 광학헤드 제작 결과(S. Kang, Appl. Phys. Lett., 2006)

동으로 차세대 휴대형 광 정보저장기기인 광학카드시스템(optical card system)에 적용되는 광학 헤드의 제작에 있어 마이크로 UV 성형 공정을 이용한 Microlens Illuminated Aperture Array(MIAA)를 제작함으로써 기존의 개구 어레이에 비해 작은 빔 스폿(beam spot) 구현 및 12배 이상의 효율향상을 실현하였다. 그림 14(a)(b)는 제작된 개구 어레이 및 MIAA를 보여주며 그림 14(c)(d)는 기존의 개구 어레이에 의해 발생한 광 프로브와 UV 성형 공정을 통해 마이크로 렌즈가 집적된 MIAA에 의해 생성된 광 프로브의 광도 분포를 보여준다.

마이크로 성형기술의 전망

제품이 경량화 · 소형화되면서 마이크로 부품에 대한 요구는 급속히 증가하고 있으나 대부분의 마이크로 부품 제조공정은 기계적이나 화학적인 방법을 기반으로 하는 제거가공기술에 의존하고 있는 상황이다. 기존의 제거가공기술은 2차원부품의 배치공정의 경우에는 양산이 가능하지만, 2.5/3차원 부품의 제조 시에는 생산속도에 한계가 있다. 따라서 급속히 증가하는 마이크로 부품에 대한 수요를 만족시키기 위해서는 마이크로 성형 공정을 통한 고정밀 마이크로 부품의 양산기술의 확보가 시급하다고 할 수 있다. Strathclyde 대학의 Yi Qin 교수는 마이크로 성형공정을 통해 전자, 자동차, 우주항공 및 자동화에 사용되는 마이크로 부품의 제조비용과 장비의 크기를 크게 줄일 수 있으며, 마이크로 부품의 양산을 가능하게 하여 현재의 제조비용을 약 40~80%까지 감소시킬 수 있을 것이라고 주장하고 있다. EU는 2004년부터 13개국 36개의 기관(18개의 기업 포함)이 참여하는 MASMICRO(Integration of Manufacturing Systems for Mass-manufacture of Miniature/Micro-products) 프로젝트에 2,100만 유로를 지원 중이다. 이 프로젝트의 목적은 마이크로 부품의 소성가공을 통한 생산기술 확보하고 생산비용을 40~80%까지 절감하는 데 있다. 국내의 경우에도 세계적으로 상위 경쟁력을 확보하고 있는 반도체기술 및 MEMS 기술을 기존의 초정밀 성형 기술과 접목함으로써 마이크로 성형 공정에 대한 연구가 상당 수준 확보된 상태이며 나노 성형 분야에서도 기술선진국과 대등한 수준에서 국가와 기업이 많은 투자를 진행하고 있다. 현재 마이크로 성형 기술에 있어 대면적 몰드 제작, 대면적 성형 기술 개발, 초미세 패턴의 성형 및 전사특성 확보, 이형기술 확보 등이 향후 풀어야 될 숙제로 대두되고 있으며 이를 해결하기 위한 다양한 연구가 국내외적으로 진행되고 있다.