한국공작기계학회논문집 Vol.16 No.6 2007. 12.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

글라스 주형을 이용한 폴리머 미세 형상 핫-엠보싱 공정 연구

김주한*, 신기훈+

(논문접수일 **2007. 6. 20**, 심사완료일 **2007. 9. 11**)

Development of a Hot-Embossing Process using Ceramic Glass Molds for Polymer Micro Structures

Joohan Kim*, Ki Hoon Shin+

Abstract

A ceramic glass mold was developed for micro hot-embossing and replicated polymer parts are fabricated. The glass-ceramic micro mold could be fabricated with a laser process and a wet etching process and the fabrication time could be saved a lot. Various polymer micro structures can be obtained by hot-embossing. The process parameters such as ho-embossing temperatures or pressures were investigated and optimized. This process can be applied for fabrication of micro structures for flip-chips or micro fluidic channels for bio-engineering. The advantages and disadvantages of this process are discussed, too.

Key Words : Hot-embossing(핫-엠보싱), Ceramic Glass(세라믹유리), Polymer(폴리머), Micro Structures(미세형상), Laser(레이저)

1. 서 론

미세 형상 및 장치(micro/nano structure and device)는 일반적으로 반도체 산업에서 파생되어온 photo-lithography 등의 방법에 의해 실리콘 웨이퍼에 가공되어 만들어져 왔다[1]. 하지만 이 공정이 photo- lithography를 위한 마스크의 제작부터 시작하여 많은 공정 단계와 시간을 소요하는 것이 약점으로 지적되어 왔다[2]. 또한 이러한 공정의 주 재료인 실리콘 및 유리의 특성은 플립칩 공정 또는 Chip-On-Glass(COG)의 범프 제작, Lab-On-a-Chip(LOC) 제작에 있어서 장점으로 쓰일 수 있으나 대량생산에 있어서 더욱 저렴한 재료가 필요하게 되고 이에 기존의 재료를 대체하려는 요구가 대두되어 왔다[3,4].

폴리머는 이러한 기존의 재료를 대체하여 큰 부가가치를 이룰 수 있다. 이에 폴리머 재료의 미세 장치의 개발이 미국, 유럽 및 일본에서 2000년 초반부터 본격적으로 연구되기 시작하였다. 폴리머는 그 재료의 특성상 기존의 실리콘 웨이퍼나 유리 등에 비해 다양한 장점을 내재하고 있다. 몇 가지의 고정된 특성만을 가진 기존의 재료에 비해 폴리머는 그 제조방법에 따라 수천가지의 다른 특성을 만들어 낼 수 있고, 가

+ 교신저자, 서울산업대학교 기계공학과 (shinkh@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172
* 서울산업대학교 기계공학과

격이 실리콘 보다 몇 십배 저렴하며, 미세유체 장치에서 요하는 광학 투과성(Optical transparency)이 좋다[2].

이러한 특성은 실제 바이오 공학에 있어서 많은 장치들이 유리계열이나 폴리머 계열로 만들어져 왔는데 현재에 있어서는 병균의 전염성과 생물학적 오염을 낮출 수 있는 일회용 바이오 장치들이 선호되게 되었고 이에 유리 제품보다는 폴리머로 제조된 시린지나 각종 의료 기구들이 시장의 전반을 차지하고 있는 것으로 비추어 보아 폴리머를 이용한 미세 장치의 개발은 IT 및 BT뿐만 아니라 NT에 있어서도 반드시 선행 연구 개발되어야 할 과제로 여겨지고 있다[5,6].

폴리머를 재료로 하는 미세 장치는 기존의 가공이나 제작 방법을 이용할 수 없기에 새로운 공정의 개발이 필요하다. 이에 레이저 미세 가공, 미세 임프린팅, 인젝션 몰딩[7~9] 등의 공정이 폴리머 미세 장치를 개발하기 위해 쓰일 수 있으며 그 중 레이저를 이용한 원형 제작 그리고 원형을 이용해 미세 채널 같은 것을 프린트 해내는 공정이 가장 효율적인 것으로 여겨진다. 레이저는 수십 년간 다른 미세 가공의 장치로써 그 역할을 수행하여 왔고 실제적으로 레이저를 미세 가공에 쓰면 그 프로토타입(prototype)의 제작 속도가 기존의 방법보다 월등히 빠르고 공정 자체가 분진을 발생시키지 않아 깨끗한 공정 환경을 조성할 수 있다. 레이저 가공에 있어서 미세 형상들은 고 에너지밀도의 레이저 빔을 이용한 물질의 어블레이션(ablation)의 방법으로 가공되어질 수 있다. 레이저 에너지를 이용해 재료를 가공하는 방식은 실제에 있어서 그 볼륨 제거의 속도가 일반적으로 재료를 절삭하는 것보다 낮다. 그러므로 레이저를 이용한 미세 장치 제작 방식은 적은 수의 원형 직접 생산에는 아주 유리할 수 있지만 대량 생산에는 그리 적합하다고 볼 수 없다. 그러하므로, 대량 생산의 공정기술을 개발하기 위해서는 소위 "찍어내는" 기술이 필요하며 미세 스템프나 미세 몰드(micor/nano mold)를 제작하여 공정에 도입하는 것이 폴리머 미세 장치 개발에 있어서 가장 유리한 방법으로 알려져 있다. 이러한 공정을 이용하면 실제로 나노 사이즈의 형상까지도 폴리머에 쉽게 프린트 할 수 있다[10]. 미세 형상의 크기에 관해서는 이론적으로 실험적으로나 100nm 미만의 형상도 쉽게 폴리머에 스탬프 기법을 써서 가공할 수 있음이 증명되었다. 실제로 Chou가100nm미만 채널 형상을 가공해 냄으로써 그 공정에 있어서의 무궁한 가능성을 보여주었다[10]. 그 이후 많은 연구를 통해 이러한 미세 형상을 폴리머에 생산하는 기술들이 발전되어 왔고 이러한 공정을 위한 대부분의 미세 몰드는 지금까지 LIGA(litho-graphic galvanoformurg abformung), 레이저를 이용한 금속 스탬프 직접 가공, EDM(Electro Discharge Machining), Photo-litho graphy 등을 이용하여 금속이나 실리콘을 재료로 제작되어 왔다[11,12]. LIGA를 이용한 방법은 가장 좋은 품질의 표면 거칠기와 높은 형상비(aspect ratio)를 제공할 수 있었기에 실제 미세 스탬핑 공정의 스탬프 제작에 이용되어 왔다. 하지만 이 LIGA는 실제 상당히 복잡한 공정으로 스탬프 제작에 있어서 그리 경제적이지 못한 단점이 있고 1-10μm의 형상에만 장점을 가지고 있고 실제적으로 그보다 큰 형상을 만드는 데는 그리 효율적이지 못하다는 단점을 내재하고 있다. 레이저를 이용한 금속 스탬프의 가공에 있어서는 채널 같이 닫힌 형상물에 있어서 그리 좋은 가공품질을 얻을 수 없다는 것이 단점으로 나타나 있고 EDM에 있어서도 그 제작 속도나 가공품질이 미세 스탬프로 이용하기에는 그리 좋지 못하다는 사실들이 밝혀져 있다[12].

본 연구에서는 새로운 재료인 광부식세라믹유리(photo-structurable glass-ceramics)을 레이저로 가공해서 미세 몰드를 제작하는 기법을 새롭게 개발하였다. 광부식세라믹유리는 열에 강하며, 높은 강도를 지니고 있기 때문에 미세 몰드로 제작하는데 있어서 좋은 조건을 가지고 있다[13]. 몰드에 음각되는 패턴은 레이저를 통해 트랜스퍼될 수 있고 실제 3차원 형상은 습식 식각 과정으로 얻을 수 있기 때문에 미세 몰드의 제작 속도를 크게 높일 수 있다는 장점을 가진다. 또한 이렇게 제작된 미세 몰드를 통해 다양한 폴리머 마이크로 형상을 핫-엠보싱을 통해 제작할수 있는데 총 공정 소요 시간은 미세 몰드의 디자인 및 개발에서의 걸리는 시간과 실제로 미세 레이어를 가공하는 시간의 합으로 나누어 질 수 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 다양한 디자인의 도입과 수정에 따르는 시간은 광부식세라믹유리에 레이저를 이용하면 획기적으로 단축시킬 수 있다. 이는 레이저가 다른 공정처럼 여러 단계를 거쳐서 그 원형을 제작하는 것이 아닌 직접 재료를 가공하여 만들기에 쾌속 공정으로 여겨진다. 원형 마스터(미세 몰드)가 생성되어지면 핫-엠보싱의 압축 소성 변형을 통해 폴리머를 쉽게 가공할 수 있으며 이러한 기술을 이용하면 미세 장치의 여러 레이어들을 손쉽게 가공할 수 있다. 본 연구에서는 레이저를 이용한 미세 몰드를 제작하고 핫-엠보싱을 통해 다양한 미세 형상을 제작하였다. 또한 그 공정 특성을 최적화하고 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 재료

광부식글라스세라믹은 나노새트라이트(초미세 위성)을 제

조하거나 직접 3차원(direct 3D structures) 형상을 본 세라믹 안에 직접 가공하는 형태로 발전되어 왔다[14]. 일반 photo-lithography에서 윗부분이 열린 2차원의 형상만을 가공할 수 있는 것에 반해 이 광부식글라스세라믹은 빔을 대물 렌즈로 세라믹 안쪽에 초점을 만들어 외부에서의 가공 없이 직접 내부를 가공할 수 있다[15]. 이와 같이 기본적으로 지금까지 글라스를 이용한 미세 형상 제조에 있어서는 실제 최종 제품으로 글라스를 그 재료로 생각하여 연구가 진행되어 왔다. 그러나 글라스 자체가 가지는 레이저 가공의 용의함과 투명도를 고려하면 미세 핫-엠보싱에서의 미세 몰드로 사용 시 기존의 미세 몰드에서 얻을 수 없는 많은 장점을 획득할 수 있을 것으로 여겨진다. 여기서 레이저 가공의 용의함이란 레이저를 통해서 미세 또는 극미세한 패턴의 형상을 쉽게 가공할 수 있음을 뜻한다. 덧붙여 투명도에 관하여서는 실제로 핫-엠보싱 과정을 투명한 몰드를 통해 모니터링할 수도 있고 다른 제 2의 레이저를 핫-엠보싱 과정 중 몰드에 조사하여 줌으로 그 인터페이스에 다른 형상을 레이저 에너지를 통해 핫-엠보싱과 동시에 가공할 수 있는 다양한 기술들을 생각해 볼 수 있다.

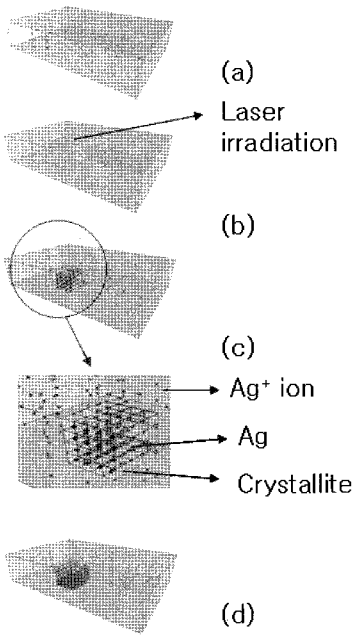


Fig. 1 Principle of photo-structurable ceramic glass. (a) A ceramic glass specimen, (b) photo-sensitization with a UV laser, (c) heat treatment, and (d) wet etching with BHF

2.2 미세 유리 몰드 제조 공정

마이크로 폴리머 구조물의 복제를 위해 쓰인 미세 몰드의 재료는 광부식세라믹유리(Shott glass)이다. 본 광부식 세리믹 유리는 은 이온과 세륨(cerium) 이온이 도핑된 lithium aluminosilicate로 구성되어 있다. 여기서 세륨 이온은 감광요소로써 자외선이 조사되었을 때 Ce^{3+} 이 한 개의 전자를 방출하고 Ce^{4+}이 된다($Ce^{3+} + hv \rightarrow Ce^{4+} + e^{-}$). 방출된 자유전자는 은 이온과 결합하여 은 원자가 된다($Ag^{+} + e^{-} \rightarrow Ag$). 이렇게 형성된 은 원자들은 유리 안에서 레이저 빔에 의해 노출된 잠재된 이미지를 형성하게 된다. 형성된 잠재적 이미지는 열처리과정을 통해 눈에 보이는 갈색 색상으로 만들 수 있다. 열을 통한 현상은 노를 통해 이루어지며 5℃/min 의 증가율로 가열을 해서 500℃ 에서 1시간 동안 1차 열처리를 하게 된다. 이 과정에서 레이저 빔이 조사된 부분의 은 원자들이 확산되어 은 크러스터를 형성하게 된다. 2차 열처리는 3℃/min 의 증가율로 다시 가열을 해서 600℃ 에서 35분을 지속시키는 공정으로 이 때 은 크러스트들은 식각이 가능한 결정화된 상태로 변화하게 된다. 이 결정화된 영역은 5%의 불산(BHF)에서 결정화되지 않은 영역에 20배 빠른 식각 속도를 보인다. 이를 통해 실제 광부식세라믹유리 위에 레이저로 조사된 형상을 얻을 수 있다. Fig. 1에 글라스 세라믹에 대한 공정이 나타나 있다. 본 연구에서는 핫-엠보싱에 사용된 미세 몰드를 제작하기 위해 세라믹 유리가 그 재료로 쓰였으며 세라믹 글라스의 결정화를 위해서 10μm 스폿 크기를 가진 1.5 J/cm^{2}의 엑시머레이저빔(KrF excimer laser, wave length=248 nm)이 사용되었다.

2.3 핫-엠보싱 공정

핫-엠보싱 공정의 프로세스는 다음과 같다. 기본적으로 미세 몰드가 음의 패턴으로 기존의 일반적 공정에 의해 제작되어진다. 폴리머 필름을 제작된 미세 몰드에 열과 압력을 가하여 소성 변형을 일으키게 한다. 보통 해당 폴리머의 glass transition temperature(T_g) 이상으로 가열을 하여 폴리머를 부드럽게 한 다음 미세 스탬프를 이용하여 패턴을 트랜스퍼하게 된다. 디엠보싱을 하기 전에 먼저 T_g 이하의 온도로 폴리머를 냉각시켜 트랜스퍼된 패턴을 정착시킨다. 이 공정의 정밀도를 높이고 폴리머 필름의 변형에 따르는 열응력을 낮추기 위해서는 최적화된 공정 온도들과 압력의 수치들이 필요하다. 본 공정에서는 폴리머 재료로 Polyvinyl chloride (PVC)를 이용하였다. 본 재료의 특징은 열 변형 온도가 낮아서 성형에 유리하며 그 성형된 형상의 정착이 쉽게 이루어

Table 1 Material Properties of PVC

Density [kg/m^3]	1.38
Tensile Modulus [GPa]	2.9 ~ 3.4
Thermal Conductivity [W/m.K]	0.16
Refractive Index	1.54
Glass Transition Temperature [℃]	65
Melting Temperature [℃]	212

질 수 있다. 또한 광학적으로 투명한 PVC를 선택할 경우 투명한 형상을 가진 장치를 제작하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 본 연구에서 사용된 PVC의 재료 특성을 Table 1에 나타내었다.

본 공정은 크게 몇 가지로 나뉘는데 첫 번째로는 핫-엠보싱할 재료를 소성변형이 일어나는 온도이상(T_g)으로 가열하는 것이다. 이렇게 가열된 재료를 적당한 압력을 통해 미세 형상이 새겨져 있는 몰드와 압착을 하게 되고 압착한 후 몰드와 재료의 온도를 T_g아래로 냉각시켜 형상을 정착하게 한 후 디엠보싱 공정을 통해 몰드를 재료로부터 빼내는 과정을 거치게 된다. 핫-엠보싱 공정을 위한 실험 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 세라믹 유리 몰드는 아래판에 장착이 되고 엠보싱을 위한 폴리머는 위의 판에 놓이게 된다. 각각의 압력판에는 가열 열선 및 냉각 장치가 설치되어 있어 핫-엠보싱 공정을 위한 변수를 정확히 조절할 수 있도록 하였다. 또한 압력게이지가 설치되어 있어 실제 핫-엠보싱시의 압력을 정확히 측정할 수 있도록 하였다.

미세 형상을 성공적으로 핫-엠보싱하기 위해서는 핫-엠보싱에서의 정확한 온도 및 압력의 조절이 필수이다. 예비 가열 공정에서 T_g 아래의 온도로는 재료의 성형이 잘 이루어지지 않으며 또한 온도가 T_g의 온도보다 매우 높으면 재료의 정착이 잘 이루어지지 않는다. 또한 몰드의 온도 및 재료의 온도를 다르게 세팅할 수도 있는데 이것은 압착 시 열전달에 의한 온도변화를 임의적으로 조절하여 더욱 정밀한 성형이 가능하게 한다. 하지만 이와 같은 경우 시뮬레이션 등을 통해 몰드의 형상에 따른 압착에 있어서의 온도변화를 앞서 데이터화해야 하고 서로 다른 온도차에 의한 내부응력 잔존의 문제 등을 야기하기 때문에 세밀한 온도 조절이 필요하다. 본 공정에서는 다양한 온도 및 압력을 적용하여 공정 조건을 실험적으로 최적화할 수 있었다. 일반적으로 소성변형의 온도보다 약 25도 이상의 온도에서 좋은 품질의 미세 형상이 성형되었다. 몰드와 폴리머를 장착한 두 개의 판의 온도는 다른 온도의 경우보다 비교적 좋은 성형조건을 보여주

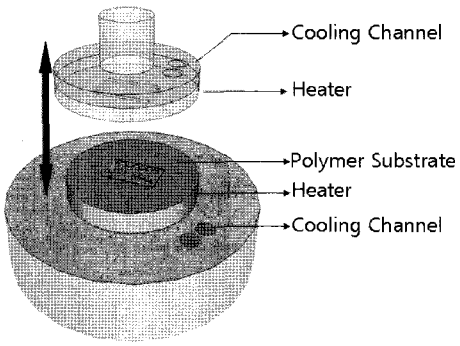


Fig. 2 Hot-embossing device

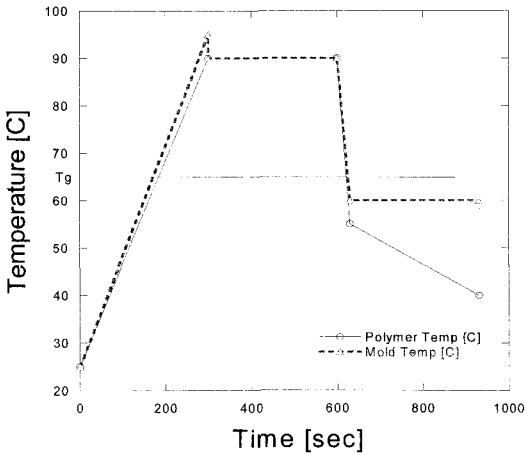


Fig. 3 Temperature history in the hot-embossing process

었으며 일정 압력(3kN/m^2) 이상에서는 미세 형상 한 쪽의 높이가 다른 쪽에 비해 낮게 성형이 되거나 몰드에 크랙이 가는 문제점이 발생되었다. 이러한 실험 데이터를 통해 2 kN/m^{2}의 압력 및 90℃의 핫-엠보싱 온도를 이용한 최적화된 공정조건을 적용하였고 공정 온도 조건이 Fig. 3에 나타나 있다.

3. 결과 및 고찰

세라믹 글라스의 미세 형상 제작에 바탕이 되는 레이저의 스폿 크기는 수 μm 정도이지만 본 핫-엠보싱 공정의 최소 형상 크기는 레이저 스폿의 크기에 관련되지 않고 세라믹 글라스의 결정화 크기에 달려있다. 레이저 빔의 조사로 패턴이 새겨지고 이를 바탕으로 열처리를 통해 결정화가 이루어져 이 결정들을 불산을 통해 식각해낸다. 이 때 그 형상을

만드는 결정의 최소크기가 약 5μm 정도이다. 그러므로 몰드의 최소 형상은 대략 10μm정도가 된다. 핫-엠보싱공정의 최소 형상 크기는 일반적으로 나노 사이즈로 보고되어 왔으나. 본 공정에서는 세라믹 유리의 재료 특성상 그 최소 형상 크기가 10μm로 정의될 수 있다. 표면 정도는 노출된 부분의 경우 표면 가공을 통해 어느 정도 고은 표면을 만들 수 있다. 몰드 안쪽의 경우는 후가열을 통해 그 거칠기를 최소화할 수 있으나 어느 정도 한계가 있으므로 이를 개선하기 위한 연구가 필요하다.

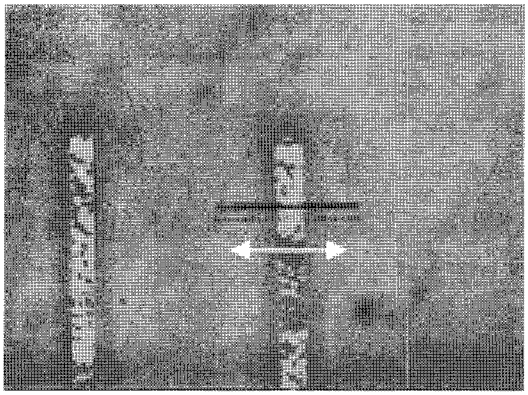
최소 형상 크기를 테스트하기 위하여 마이크로 채널 형상의 미세 형상이 세라믹 유리에 제작되었으며 핫-엠보싱을 통하여 음각 마이크로 형상이 복제되었다. 복제된 채널의 폭은 약 15μm이고 깊이는 대략 32μm정도이다. 이는 1:2정도의 세장비를 가지는 미세 형상들이 본 공정을 통해 쾌속으로 제작될 수 있음을 나타낸다. Fig. 4에서는 15μm의 폭과 32 μm의 깊이를 가지는 세라믹 글라스의 형상(a)과 그것에 의해 핫-엠보싱된 형상(b)을 보여주고 있다.

복제된 미세 형상의 모서리 등이 라운드진 형태를 보여주는데 이것은 실제로 핫-엠보싱 과정에서 점성이 높은 폴리머가 충분이 몰드를 채우지 못하고 있음을 나타낸다. 또한 1:5이상의 높은 세장비에서는 옆면의 마찰력에 의해 디엠보싱이 성공적으로 이루어지기가 힘들다. 이러한 경우 Fig. 5에서 보는 바와 같이 미세 형상이 몰드를 따라 나와서 형상 자체가 폴리머로부터 분리되거나 또는 몰드가 절단된 미세 폴리머 형상이 몰드 안에 박히는 경우(Fig. 5)가 발생된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 표면의 거칠기를 낮추거나 표면의 마찰력을 줄일 수 있는 윤활막을 이용하여야 한다.

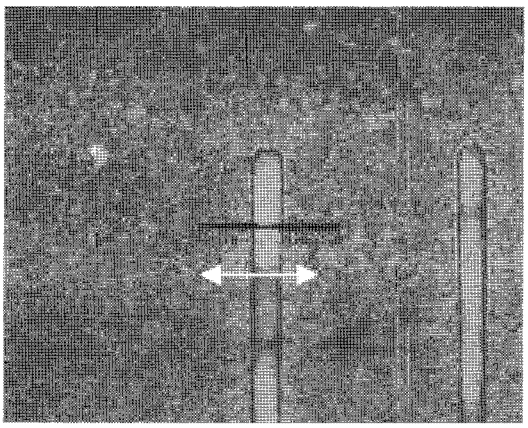
그밖에 다양한 패턴 형상들이 본 레이저를 이용한 핫-엠보싱 공정을 통해 제작되었으며 그것들의 예가 Fig. 6에 보여 지고 있다. 본 공정은 플립칩 접합공정에 쓰일 수 있는 범프의 형상 전사 등에 이용되어 질 수 있을 것으로 생각되며 이에 대한 연구가 현재 수행 중이다.

4. 결 론

폴리머에 미세 형상을 복제하기 위한 핫-엠보싱 공정이 연구되었다. 기존의 핫-엠보싱공정에서는 일반적인 포토리소그래피 공정을 이용하여 몰드를 제작하였지만 본 공정에서는 세라믹 글라스를 레이저로 조사하여 패턴을 결정화 시키고 식각을 통해 형상을 제작함으로써 몰드의 제작시간을 획기적으로 줄일 수 있었다. 이는 미세 몰드의 제작에 있어서 마스크의 제작 및 다수의 포토리소그래피 공정을 생략함



(a)



(b)

Fig. 4 Resolution test for the hot-embossing process with a ceramic glass. The full scale of the photo is 80μm and the structure width and depth are around 15μm and 32μm respectively

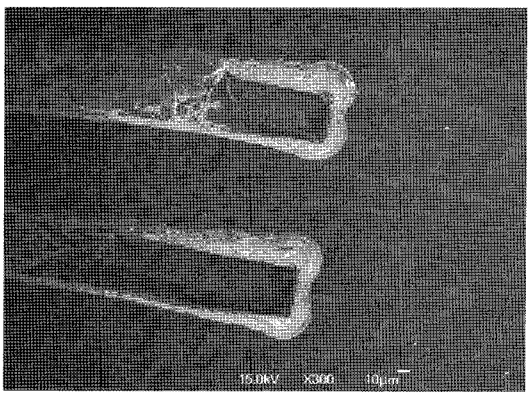
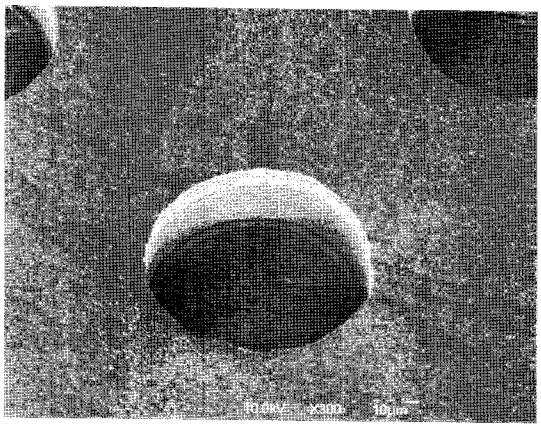
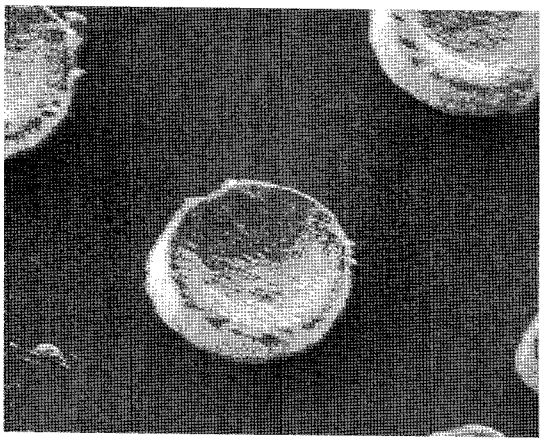


Fig. 5 Failure case of a ceramic glass mold with failed polymer structure



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Various ceramic glass molds and (b) their replicated patterns on polymer

으로써 간편하고 빠르게 몰드를 제작할 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 또한 그 원형을 이용하여 미세 엠보싱을 이용 미세 장치를 제조하는 공정을 개발하였다. 이는 두 가지의 상이한 공정에서 각각의 공정의 장점만을 차용해 와서 실제 공정에 접목하는 방식으로 쾌속 폴리머 미세 형상제작에 유용하게 쓰일 수 있으며 플립칩의 범프 제작, BT의 미세 유체 채널 등의 제작 등에 쉽게 응용될 수 있을 것으로 여겨진다.

후 기

본 논문은 서울특별시가 지원하는 전략산업 혁신클러스터 육성 지원사업(3D Microsystem Packaging을 위한 접합 공정 및 장비개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참 고 문 헌

(1) Pfleging, W., Hanemann, T., Bernauer, W. and Torge, M., 2001, "Laser micromachining of mold inserts for replication techniques- State of the art and applications," *Proc. SPIE*, Vol. 4274, pp. 331~345.

(2) Becker, H. and Locascio, L. E., 2002, "Review Polymer microfluidic devices," *Talanta*, Vol. 56, pp. 267~287.

(3) He, B., Tait, N. and Regnier, F.,1998, "Fabrication of Nanocolums for Liquid Chromatography," *Anal. Chem.*, Vol. 70, pp. 3790~3797.

(4) Talary, M. S., Burt, J. P. H., Rizvi, N. H., Rumsby, P. T. and Pethig, R., 1999, "Microfabrication of Biofactory-on-a-Chip devices using laser ablation technology," *Proc. SPIE*, Vol. 3680, pp. 572~580.

(5) Gravesen, P., Branebjerg, J. and Jensen, O. S., 1993, "Microfluidics-a review," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 3, pp. 168~182.

(6) Kohler, J. M., 1998, "Micro Polymer PCR circuits," *Proc. Sec. Int. Conf.*, pp. 241~247.

(7) Chou, S. Y. and Krauss, P. R., 1997, "Imprint lithography with sub-10nm feature size and high throughput," *Microelectron. Eng.*, Vol. 35, pp. 237~240.

(8) Shen, X. J., Pan, L. and Lin, L., 2002, "Micro-plastic embossing process: experimental and theoretical characterizations," *Sens. Actuat.* A, Vol. 97-98, pp. 428~433.

(9) Becker, H. and Heim, U., 2000, "Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures," *Sensor. Actuat.* A, Vol. 83, pp. 130~135.

(10) Chou, S. Y., Krauss, P. R. and Renstrom, P. J., 1996, "Imprint lithography with 25-nanometer resolution," *Science*, Vol. 272, pp. 85~87.

(11) Shen, X. J., Pan, L. and Lin, L., 2002, "Micro-plastic embossing process: experimental and theoretical characterizations," *Sens. Actuat. A*, Vol. 97~

98, pp. 428-433.

(12) Pfleging, W., Hanemann, T., Bernauer, W. and Torge, M., 2002, "Laser micromaching of polymeric mold inserts for rapid prototyping of PMMA-devices via photomolding," *Proc. SPIE*, Vol. 4637, pp. 318~329.

(13) Fuqua, P. D., Taylor, D. P., Helvajian, H., Hansen, W. W. and Abraham, M. H., 2000, "A UV direct-write approach for formation of embedded structures in photostructurable glass-ceramics," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 624, pp. 79~86.

(14) Livingston, F. E., Hansen, W. W., Huang, A. and Helvajian, H., 2002, "Effect of laser parameters on the exposure and selective etch rate in photostructurable glass," *Proc. of SPIE*, 4637, pp. 404~412.

(15) Cheng, Y., Sugioka, K., Masuda, M., Shihoyama, K., Toyoda, K. and Midorikawa, K., 2003, "Optical gratings embedded in photosensitive glass by photochemical reaction using a femtosecond laser," *Opt. Express.*, Vol. 11, No. 15, pp. 1809~1816.