

355nm 파장의 DPSSL을 이용한 폴리머의 3차원 미세 형상 광가공기술

장원석[†] · 신보성 · 김재구 · 황경현

한국기계연구원 나노공정그룹

Ⓣ 305-343 대전시 유성구 장동 171

(2003년 4월 25일 받음, 2003년 5월 21일 수정본 받음)

본 연구에서는 355 nm의 파장을 갖는 Nd:YVO₄ 3고주파 DPSSL 레이저를 이용하여 폴리머의 3차원 미세형상 가공기술을 개발하였다. UV레이저와 폴리머의 어블레이션에 관한 메커니즘을 설명하였으며 비교적 UV영역에서 파장이 긴 355 nm파장의 영역에서는 광열분해 반응으로 가공되고 이에 따른 폴리머의 광학적 특성을 살펴보았다. 광 흡수율 특성이 우수한 폴리머가 광가공 특성이 좋은 것으로 나타났으나 벤젠구조가 많이 포함되어 있는 폴리이미드의 경우는 광분해후 다시 새로운 화학적 결합이 이루어져 가공부 면이 좋지 않은 면을 보였다. 레이저의 다중 주사방식으로 가공하기 위하여 표면의 오염이 적은 폴리카보네이트를 시편으로 사용하여 3차원 적으로 모델링한 직경 1 mm와 500 μm의 마이크로 팬을 가공하였다. 레이저 발전 효율이 높고 유지비가 적은 355 nm의 DPSSL을 이용한 3차원 가공기술의 개발로 향후 저비용으로 빠른 시간에 미세부품을 개발하는 기술에 기여할 것으로 예상된다.

주제어 : laser ablation, polymer, photomachining, DPSSL(Diode Pumped Solid State Laser), 3D micro fabrication.

I. 서 론

레이저를 이용한 폴리머의 어블레이션에 관한 연구는 1980년대 Srinivasan과 IBM의 공동 연구자들^[1,2]에 의하여 193 nm ArF laser를 이용한 PET(polyethylene terephthalate) 어블레이션에 관한 논문이 발표되면서 물리 및 화학분야에서 많은 흥미를 갖게 되었고 다양한 연구가 진행되어 왔다. 초기의 연구들은 레이저 발달의 수준이 장파장의 레이저에 머물러 있던 관계로 주로 장파장의 레이저와 폴리머의 작용에 관한 것이었으나, 이러한 연구결과들은 매우 짧은 파장의 레이저를 사용할 경우 기존의 방법에서 얻을 수 없었던 고정밀도의 새로운 가공기술 가능성을 제시하였다. 이때 레이저와 폴리머의 반응 현상을 어블레이션 광분해(ablative photo-decomposition)라는 말이 Srinivasan에 의하여 처음 명명되었으며^[2] 그 뒤로 수많은 연구자들에 의하여 레이저 어블레이션 기술에 관한 고찰논문이 발표되었고,^[3-5] 이것은 순수 과학적 연구단계에서 실제로 응용하기 위한 노력으로 이어졌다.

최근에는 기능성 재료인 폴리머의 사용이 증가하고 광학적 반응특성을 향상시킨 폴리머의 개발이 고분자 및 광화학관련 연구그룹을 통하여 발표되면서 다양한 레이저 응용 미세 가공 및 응용방법이 발표되고 있다. 이러한 응용의 분야는 전자, 광, 반도체 등 각종 첨단산업으로 넓혀져 가고 있으며 요구되는 부품의 정밀도도 마이크로 단위에서 수백 나노단위의 고도의 정밀도를 요하는 기술들로 발전해 가고 있다. 이러한 기술의 수요에 대응하여 미국, 유럽 등 관련 선진연구자들은 새로운 광 가공기법을 연구하고 있으며, 현재까지 발표된 연구결과들은 낮은 임계 에너지밀도 값을 갖는 폴리머의 개발,^[6] 별

터 포톤현상을 증가시키는 짧은 파장의 빔 소스 개발과 수십 펨토초(femtosecond, 10⁻¹⁵sec)의 펄스폭을 갖는 초단펄스 레이저를 이용한 재료가공^[7,8]을 포함한 다양한 시도가 이루어지고 있음을 반영하고 있다.

이러한 소형화 추세와 함께 기존의 1차원 및 2차원의 패턴 가공에서 3차원 입체형상을 갖는 기능성 미소형상을 제작하기 위한 노력이 MEMS 기술의 발달과 함께 꾸준히 이루어져 왔으며 그 수요도 계속적인 증가를 보이고 있다. 마이크로 부품을 제작하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있다. 1) X-ray 및 E-beam를 이용하여 형상가공을 행한 후 무전해나 전주를 이용하여 제작하는 LIGA 공정기술, 2) 건·습식에 의한 식각방법, 3) 레이저와 LIGA방법을 연결한 laser-LIGA 공정기술을 그 예로 들 수 있다. 앞선 X-ray 및 E-beam LIGA, 건·습식 에칭의 방법에 의한 형상제조는 초기 시설비용과 엄격한 환경을 요하므로 소량의 다양한 형태를 값싸고 빠르게 가공하는데 있어 단점을 가지고 있으며 완전한 3차원 입체형상으로 그 제조공정을 확장하는데 있어 한계를 가지고 있다. 이러한 이유로 레이저를 이용한 3차원 미세형상 제조방법이 꾸준히 연구되고 있으며 그 접근방법으로는 크게 폴리머의 부가적 응용 방법을 이용하는 SLA(Stereolithography)와 어블레이션(ablation)을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. SLA와 어블레이션의 방식은 적층식과 식각식이라는 반대적인 개념을 가지고 접근한 가공방법이다. SLA의 기본원리는 레이저 빔을 광경화성 폴리머 수지(resin)에 집광시키면 수지의 화학적 특성에 의하여 임계 에너지 이상의 레이저빔이 조사된 부분은 국부적인 응고를 일으켜 이것을 정밀한 스테이지 이송으로 적층하여 3차원 형상을 제작하는 기술이다. 반대로 어블레이션을 이용한 방법은 전술한 바와 같이 UV 레이저와 폴리머의 열적 광화학적 반응에 의하여 레이저 빔이 가해진 부분에 국부

[†]E-mail: paul@kimm.re.kr

적인 식각을 일으켜 일정 깊이가공이 가능하므로 폴리머에 가해지는 레이저 펄스의 수와 빔 조사량을 조절하여 3차원 형상을 가공하는 방법이다.

현재 폴리머를 이용한 3차원 형상을 제작하는 기술로 가장 작은 형상을 가공한 예는 일본의 오사카대학의 연구팀이 SLA 방식으로 초단펄스 레이저의 멀티포톤 현상을 이용하여 전체 크기가 10 μm 를 갖는 황소의 모양을 발표한 바가 있다.^[9] 그러나 SLA의 방법은 액체수지 내에서 이루어지므로 수지의 흐름에 매우 민감하고 폴리머가 안정하게 경화되기 위한 시간이 필요하므로 가공 속도가 매우 늦고, 가공된 형상의 재연성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 반면에 레이저 어블레이션에 이용한 방법은 레이저와 마스크 또는 시편의 이송방법을 이용하여 가공한 것으로, 일정한 펄스 반복률로 레이저 빔이 가해지고 특정한 모양을 가진 마스크가 이송할 때 시편에 가해지는 레이저빔의 펄스수가 달라지므로 가공 깊이가 달라져 입체형상을 제작할 수 있다.^[10,11] 이 방법에서는 특정한 마스크를 설계 제작해야 하며 원하는 형상을 얻기 위한 마스크의 이송과 제작이 매우 복잡하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 선행한 두 가지 방식의 단점을 극복하기 위하여 빠르고, 마스크 없이 입체형상을 제작할 수 있는 방법을 제안하였다. 기본 방식은 레이저 빔의 다중 주사법(multiscanning)을 통한 어블레이션 방법으로 가스레이저에 비해 효율성과 유지비가 저렴한 DPSS(Diode Pumped Solid State) 레이저를 이용한 폴리머의 3차원 광가공 방법을 제안하였다. 또한 가공 품질의 향상을 위하여 폴리머의 광학적, 화학적 특성을 고찰하였다.

II. 레이저 어블레이션

2.1. 이론적 모델

기존의 선행연구자들이 수행한 레이저 어블레이션의 연구는 초기 TEA CO₂ laser(9.17 μm)와 같이 적외선 영역의 파장대와 수십 나노초의 레이저 펄스를 PMMA(polymethylmethacrylate), 폴리이미드(polyimide)와 같은 폴리머 필름에 조사할 때 발생하는 현상을 연구하는 것으로 시작되었으며 점차 레이저와 폴리머의 발달과 함께 여러 파장대의 UV영역 레이저를 다양한 재료의 폴리머에 적용하여 가공 메커니즘을 연구하는 것으로 확대되었다.^[12,13]

레이저 어블레이션에 대한 메커니즘은 열적 어블레이션(thermal ablation) 모델과 광화학적 분해 어블레이션(ablative photochemical decomposition) 모델로 크게 나누어 질 수 있다. 열적 어블레이션의 모델은 주로 파장이 긴 레이저를 이용한 어블레이션에서 효과적인 이론적 설명을 주는 반면에 광화학적 분해를 이용한 모델은 200 nm이하의 짧은 파장을 갖는 레이저를 이용한 어블레이션에서 효과적인 설명이 가능하였다.

열적 어블레이션 모델은 폴리머의 분해(decomposition)를 일으키는 온도와 관계가 있어서 레이저의 펄스폭, 냉각 속도도 관계되어 있으며, 열분해를 일으키는 반응시간은 폴리머가 분해를 일으키는 온도를 유지하고 있는 시간 내에서 이루어진다는 설명이 성립된다. 이때 어블레이션이 일어나기 위한 임

계 에너지 밀도(threshold fluence)는 다음의 식 (1)과 같이 표현되어 진다.^[14]

$$F_T = \rho C(T_D - T_R) / \alpha(1 - R) \quad (1)$$

여기서 F_T 는 임계 에너지밀도, ρ 는 폴리머 밀도, C 는 비열, T_D 는 열분해 온도, T_R 는 초기온도, α 는 흡수계수, R 은 표면에서의 빔 반사도를 나타낸다. 이 모델만을 사용하여도 폴리머의 열영향부가 매우 작게 나타나며 레이저에 대한 가공특성이 좋은 것을 설명할 수 있는데, 이것은 일반적인 폴리머의 성질이 열확산계수가 매우 작고 가해지는 레이저 빔의 펄스폭이 수십 나노초 정도로 작기 때문에 열전달로 인한 현상은 무시할 만한 수준이기 때문이다. 열적 모델로 설명할 경우는 폴리머의 어블레이션이 일어나는 임계 에너지 값은 폴리머의 임계온도에 도달하는 에너지 값으로 계산되어 질 수 있으며 가해지는 레이저 빔의 에너지 변화에 대한 폴리머의 가공 깊이는 일직선상의 비례구조를 나타내게 된다. 이러한 모델은 전술한 바와 같이 파장이 긴 범위(248, 308, 351 nm)에 레이저 소스를 이용했을 때 잘 설명된다. 그러나 그 경향은 유사하나 예측된 임계 에너지 밀도는 항상 실제 실험값보다 큰 값을 갖는다. 또한 파장이 짧은 193 nm의 ArF 레이저를 사용할 경우 에너지 밀도와 가공깊이의 관계에서 임계 에너지 값에서 급격한 가공깊이의 증가가 생겨나고 가공깊이와 에너지밀도의 관계가 비선형성을 갖는 부분의 설명에는 한계가 있는 것으로 알려졌다.

광화학적 어블레이션 모델은 고분자 구조를 갖는 폴리머에 레이저의 포톤에너지가 가해지면 바닥상태(ground state)에 있던 분자에너지가 여기상태(excited state)가되어 분자간의 사슬이 끊어지고, 분자간의 반발력이 증가하여 분해된 분자가 폭발되어 나오면서 어블레이션이 된다는 이론을 갖는다. 여기서 폴리머의 임계 에너지 밀도는 분해되는 분자사슬의 개수와 가해지는 포톤의 에너지와의 관계로 설명되며 다음의 식 (2)와 같이 표현되어 진다.^[15]

$$F_n = nh\nu / \eta\alpha \quad (2)$$

여기서 F_n 는 임계 에너지밀도, n 은 어블레이션을 위하여 끊어져야 하는 단위부피당 폴리머 결합개수, $h\nu$ 는 포톤에너지, η 는 결합분해에 대한 양자계수(quantum yield)를 나타낸다. 폴리머는 일반적으로 10⁻³정도의 낮은 값을 갖으나 어블레이션이 일어나는 조건에서는 η 값이 급격히 상승하여 1에 가까운 η 값을 갖게 되어 폴리머에 가해진 포톤에너지가 일정 임계 에너지 값 이상을 가지면 가해진 에너지가 모두 폴리머의 분자사슬을 끊는데 사용되어 진다는 것으로 설명된다. 이것은 어블레이션이 일어나면 포톤에너지가 열에너지로 방출되는 것이 없어지는 이른바 비열성 광화학가공(cold photochemical process)이 이루어진다는 것을 의미한다. 그러나 실제 실험에서는 가공부 주위에 열영향부를 볼 수 있으며 어블레이션이 일어나는 임계 에너지밀도의 예측에 있어서도 이론적인 값과 상당한 차이가 있어 광화학적 모델로만 어블레이션을 설명하는 데에도 제한점이 있다는 것이 밝혀졌다. 현재는 두 가지의 이론이 결합된 것으로 설명하는 것이 일반적인 이론적 모델로

생각되고 있으며 전술한 바와 같이 사용되는 레이저의 파장에 따라 열적 어블레이션과 광화학적 어블레이션 모델의 임계 에너지 밀도의 예측에 관계된 부분의 기여도가 결정된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 IR 영역에 가까운 355nm의 레이저를 광원으로 사용하여 열적 어블레이션의 특성을 이용하였다. 그러나 파장이 긴 UV레이저를 사용할 경우 폴리머의 흡수율(absorption coefficient)이 떨어지므로 가공에 적합한 폴리머의 광학적 특성을 고려하여 재료를 선정하였으며 가공품질과 형상 정밀도를 얻기 위하여 레이저의 공정변수를 조절하였다.

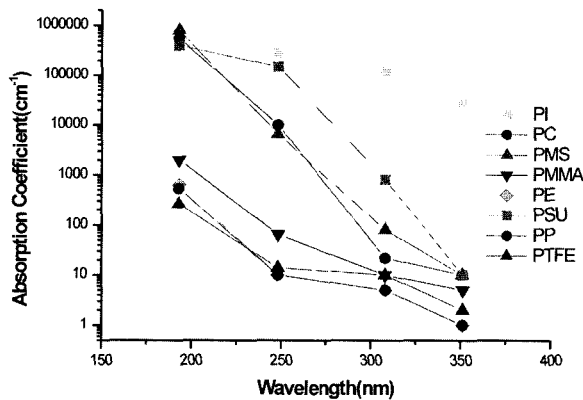
2.2. 폴리머의 광학적 특성

앞 절에서 설명한 두 모델의 임계 에너지 밀도를 나타내는 식 (1)과 (2)에서 공통적으로 나타나는 부분은 흡수계수가 모두 분모 항에 들어가 있어 흡수계수가 클수록 임계 에너지 밀도가 작아진다는 것을 나타내고 있다. 임계 에너지 밀도가 작으면 가공을 위해 가해주는 레이저의 파워가 작아도 되므로 열영향부가 적게 나타나 보다 좋은 가공품을 얻을 수 있다는 것을 의미하게 된다. 이를 위하여 폴리머의 흡수계수와 분자구조의 관계를 그림 1에서와 같이 도시하였다.

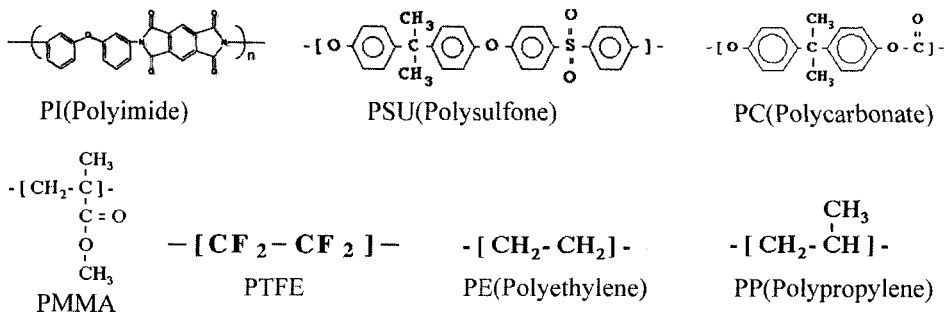
그림 1(a)에서 보는 바와 같이 파장에 증가함에 따라 폴리머의 광흡수계수가 현저히 작아지는 것을 볼 수 있다.^[16] 이것은 파장이 긴 레이저를 사용할 때 폴리머의 에너지 임계밀도도 증가한다는 것을 의미하며 광가공시에 큰 레이저 파워가 입사되어야 하므로 열영향부의 생성이 더 넓어질 것이라는 것을

알 수 있다. 그림 1(b)에서 도시된 폴리머의 분자구조에서 광흡수율과 분자구조의 관계를 살펴보면, 광흡수율이 높은 폴리이미드, 폴리카보네이트 등의 폴리머 화학구조는 벤젠구조가 탄소 혹은 산소와 결합된 구조를 보이고 있으며 PMMA, 폴리에틸렌(Polyethylene)과 같은 폴리머의 경우 벤젠구조 없이 탄소화합물의 결합으로 이루어져 있는 것을 볼 수 있다. 폴리머와 같은 유기구조물에서 포톤의 흡수는 불포화 공유결합구조(chromophore or covalently unsaturated molecular group)에서 일어난다고 알려져 있다. 이것은 벤젠구조를 많이 포함하고 있는 폴리머에서 광흡수율이 더 높다는 것을 설명하며 그림 1은 이러한 설명을 뒷받침 해주고 있다. 이런 폴리머의 화학적 구조로 유추해 볼 때 분자량이 큰 벤젠구조를 가진 폴리머 일수록 낮은 임계 에너지 밀도를 가지며, PMMA, 폴리에틸렌 등과 같은 분자량이 작은 폴리머는 광 투과특성이 커져 광가공을 위해서는 큰 포톤 에너지를 갖는 레이저 소스를 사용해야 된다는 것을 알 수 있다. 또한 이런 폴리머의 화학적 구조와 광흡수율의 관계를 이용하면 광 흡수계수가 알려져 있지 않는 폴리머들의 화학적 구조로 광 가공성을 예측할 수 있다.

또한 레이저의 파장에 따른 폴리머의 가공특성을 살펴보면 광 흡수특성에 있어 큰 차이를 보이고 있는 PMMA와 폴리이미드의 경우 그림 2의 그래프에서 보는 바와 같이 파장이 짧은 레이저를 사용할 경우 광화학 반응이 주를 이루어서 가해지는 레이저 에너지를 증가하여도 열에너지로 전환되지 않아 어블레이션이 일어날 수 있는 낮은 임계 에너지 값 갖으나 파



(a) 폴리머의 광흡수계수



(b) 폴리머 화학식

그림 1. 레이저 파장에 따른 폴리머 흡수계수와 화학식.

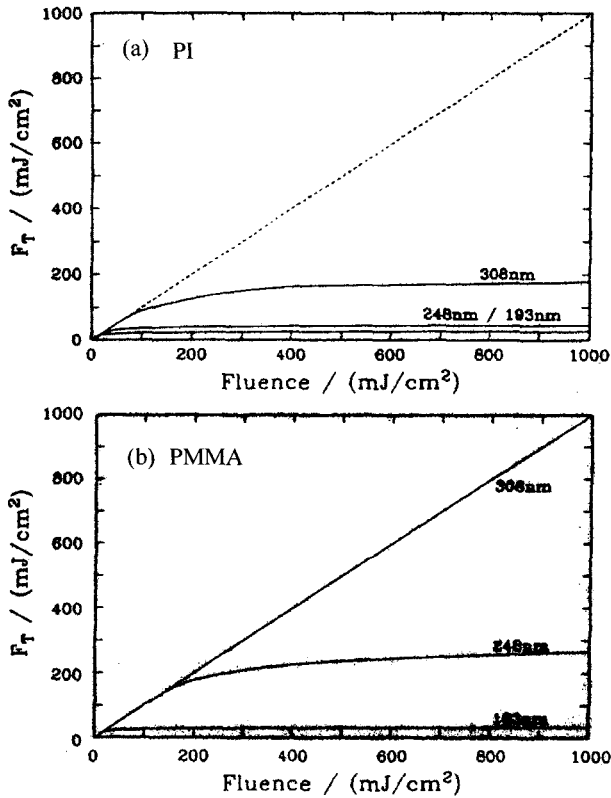


그림 2. 폴리이미드와 PMMA의 193, 248, 308 nm 레이저 파장에서
의 광열분해율(F_T)^[12]

장이 긴 300 nm 이상의 레이저를 사용할 경우 PMMA는 가해지는 에너지가 대부분 열로 전환하여 어블레이션이 일어나기 위한 임계에너지를 얻기 위해서는 매우 큰 에너지가 가해져야 한다는 것을 알 수 있다. 반면에 PI의 경우는 300 nm 이상에서도 열로 전환되는 부분이 적어 어블레이션이 쉽게 일어날 수 있다는 것을 알 수 있다.

III. 직접식 3차원 광가공 기술

3.1. 레이저 3차원 가공기

UV레이저를 이용한 반도체 리소그래피 기술은 광학적 회절 한계 때문에 고집적 미세 선평달성을 위하여 KrF(248 nm), ArF(193 nm), F2(157 nm), VUV(157 nm), EUV(13.5 nm)와 같이 점점 더 파장이 짧은 레이저를 사용하는 것으로 발전해 왔다. 이런 레이저 시스템은 발진 매질이 가스를 사용하므로 부피가 크고, 유지 보수에 고비용을 요구하며, 마스크를 이용하므로 반도체 공정을 사용하지 않는 미세 가공과 마이크로 부품의 시작품을 제작하는데 있어서는 가공의 우수성에도 불구하고 적용하는데 어려움이 있다. 이러한 점 때문에 solid state 레이저의 사용에 산업계의 관심이 모아지고 있다. 기존의 Nd:YAG 레이저(1.06 μm)를 발진 효율을 높이기 위한 DPSS (Diode Pumped Solid State) 방식의 레이저가 개발 되었으며, 비선형 광학계를 이용하여 UV 영역의 파장을 갖는 레이저 빔으로 변환하여 사용된 시스템^[17]이 미세 가공용 레이저로 각

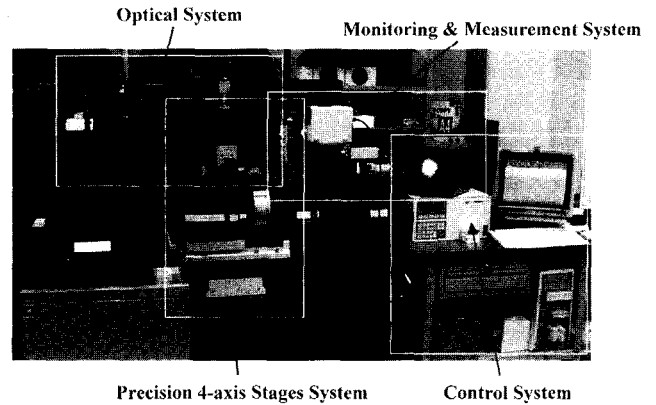


그림 3. DPSSL 3차원 광가공 기술 장치.

광을 받고 있다. 본 연구에서 사용한 레이저는 1.5W 3고주파 Nd:YVO₄ 레이저로 파장은 355 nm를 가지며 Q-switch되어 펄스폭은 40 nm, 2 kHz의 펄스 반복률을 갖는다. 미세 가공을 위하여 0.1 μm 의 위치정밀도를 갖는 3축 스테이지를 장착하였으며 레이저 펄스의 초기에 강한 파외집중에 의한 가공깊이 불균열을 막기 위하여 빔의 on/off는 외부에 셔터를 설치하여 가공 프로그램에서 제어하도록 하였다. 가공부의 실시간 모니터링을 위하여 CCD 카메라와 보조광을 설치하였다. 본 연구에 사용된 레이저 시스템을 그림 3에 도시하였다.

3.2. 직접식 광가공

전술한 바와 같이 레이저를 이용하여 3차원 형상가공을 위한 기본 메커니즘은 레이저 어블레이션을 이용한다. 이때 폴리머의 가공시 입사되는 레이저 빔의 파워에 의하여 가공 깊이가 변화가 일정한 관계를 가지고 변화된다. 이러한 특성을 이용하여 기존의 기계가공에서 이용되는 layer-by-layer 가공 방법을 이용하여 3차원 형상가공에 응용하였다.^[18,19] 그림 4에 도시된 바와 같이 가공하고자 하는 형상을 3차원 CAD 데이터로 작성한 후 이것을 레이저 어블레이션에 의한 가공 깊이만큼 형상을 층층이 나누어 가공을 위한 CAM 데이터를 작성한다. 이때 형성되는 빔의 가공경로는 기존의 기계가공의 경로와 달리 공구의 이송시 멈춤구간이 없도록 하였으며 CAM 데이터에 외부셔터의 on/off 명령어를 추가하여 항상 일정한 세기의 레이저빔이 조사되도록 프로그램을 작성하였다.

폴리머에 레이저 빔이 조사될 때 광분해에 의하여 탄소 화합물 및 고분자 조각이 분해되어 나오면서 레이저에 의한 열 화학반응을 일으켜 시편의 표면에 오염물질로 다시 증착하거나 집광렌즈를 오염시키게 된다. 이것은 가공품질에 결정적인 영향을 미치게 되므로 이것을 방지하기 위하여 미세 노즐로부터 헬륨가스가 직각으로 분사되도록 하였다.

3.3. 실험결과 및 분석

전술한 실험 장치를 이용하여 여러 가지 폴리머들의 가공특성을 파악하기 위하여 기초 가공실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시편은 기존에 상용화된 두께 1 mm의 폴리머 판을 이용하였으며 PMMA, 폴리카보네이트, 폴리이미드(Polyamide), 폴

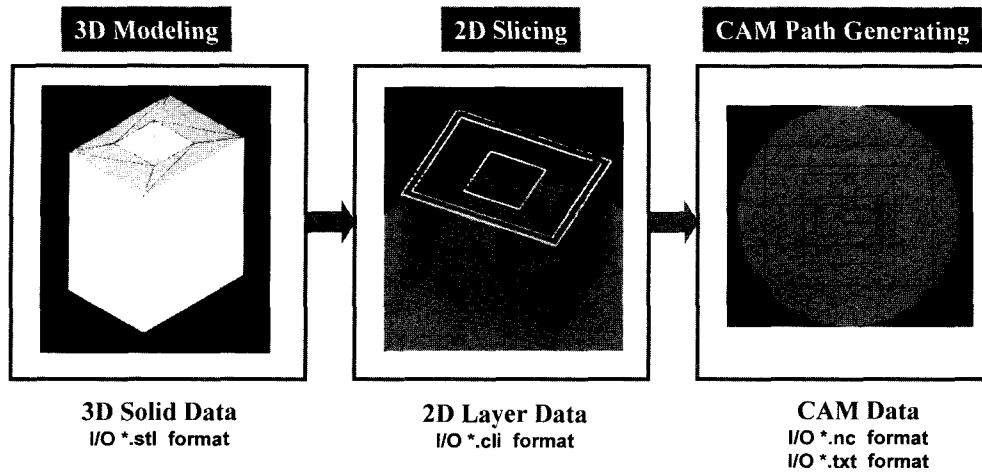


그림 4. 3차원 형상 가공을 위한 형상 모델링과 빔경로 생성.

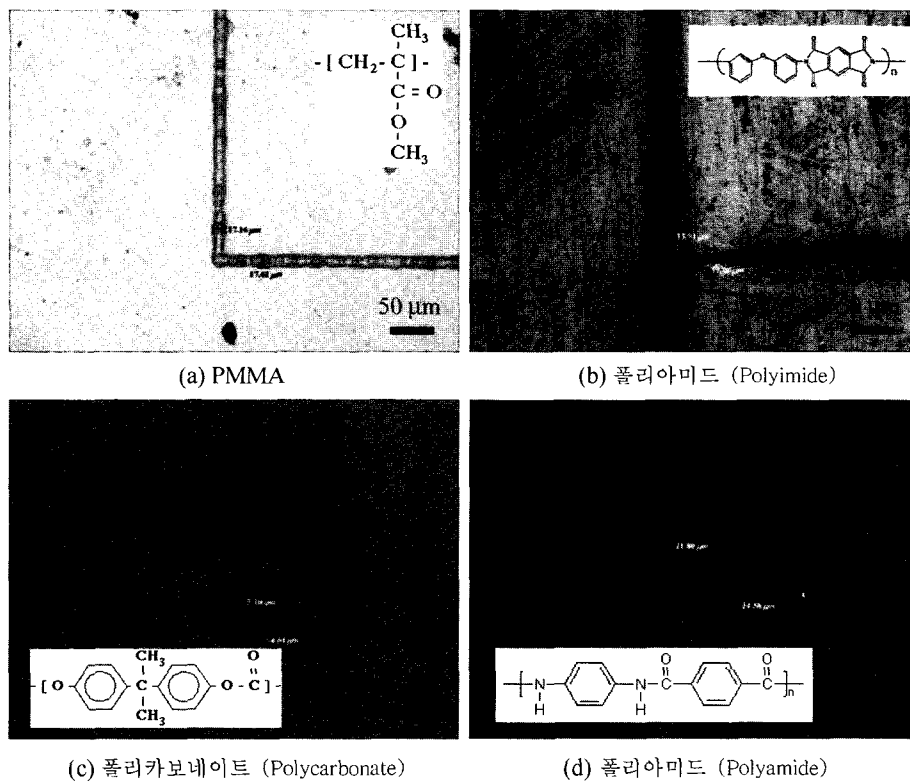


그림 5. 폴리머들의 레이저 주사 어블레이션 기초실험 결과.

리이미드의 시편이 사용되었다. 그림 5는 각각의 재료에 직선 가공을 한 결과이다. PMMA의 경우 355 nm의 파장영역에서 광흡수율이 거의 없어 낮은 파워의 레이저 빔을 조사할 경우 가공이 되지 않고 대부분의 빔이 투과가 되었으며 그림 5(a)에서와 같이 가공이 일어나는 시점까지 레이저 빔의 파워를 증가시켜 가공한 결과 가공면의 불균일성을 보이고 있다. 이것은 레이저 빔이 조사된 부분에 열의 축적에 의하여 국부적인 가공이 일어나며 가공이 되지 못한 부분은 용융된 폴리머가 다시 결합하여 응고됨으로써 전체적으로 불균일한 가공특성을 보이는 것으로 생각된다. 이에 반해 분자구조상에 이중

공유결합을 많이 보유하고 있는 폴리이미드와 폴리카보네이트의 경우 비교적 좋은 흡수 특성을 보여 좋은 가공특성을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 폴리이미드의 경우, 좋은 빔 흡수율을 가진 반면 벤젠구조가 많은 분자량이 큰 화학적 구조특성에 의하여 어블레이션이 일어날 때 표면에서 많은 양의 탄소 화합물이 배출되며 이것이 표면에 다시 증착하여 오염을 시켜 다중 빔이 조사될 때 가공에 영향을 미친다. 또한 벤젠구조를 많이 포함하고 있어 화학결합이 끊어진 벤젠결합은 레이저에 의하여 다시 결합하여 새로운 구조를 형성하기가 쉬어 그림 6에서 보는 바와 같이 가

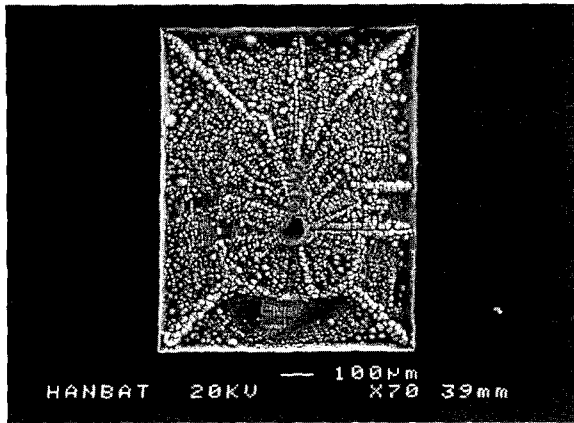


그림 6. 폴리이미드의 다중 어블레이션 후 표면의 SEM 사진.

공표면에 재응고 현상을 일으킨다.

폴리이미드의 경우는 분자구조상으로는 좋은 흡수율을 보일 것으로 예상되었으나, 그림 5(d)에서 보는 바와 같이 빔의 흡수율이 떨어지고 어블레이션이 잘 일어나지 않는 것으로 나타났는데, 본 실험에 사용된 시편은 일반 강화 플라스틱 재료로 폴리머의 제조과정 중에 특정 기능성의 향상을 위하여 첨가제 등이 사용되어 매우 불균일한 광투과 특성을 가지게 된 것으로 생각된다. 이것은 폴리머의 분자구조식에 따른 열적 광학적 특성이 제조공정과 첨가제등의 변화에 따라 크게 변할 수 있음을 보여주고 있다.

이상의 기본적인 실험으로부터 3차원 형상 가공을 위하여 상

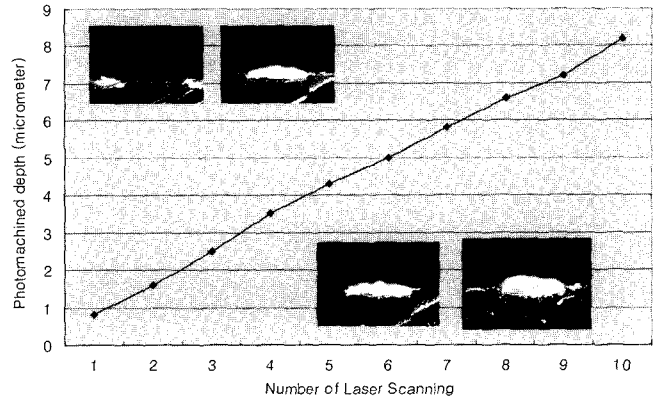
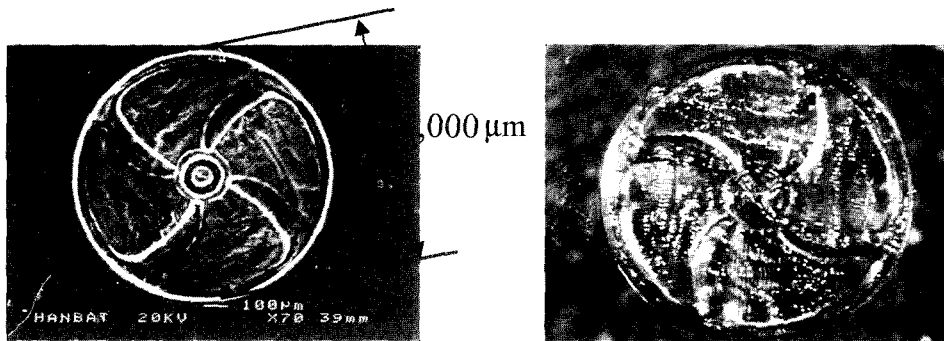


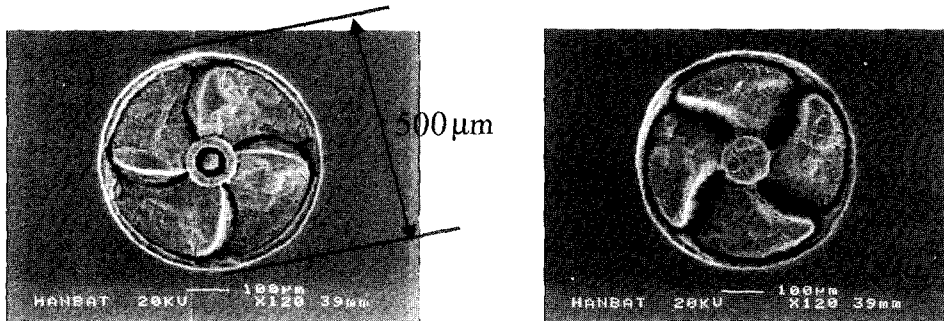
그림 7. 폴리카보네이트의 레이저 빔 주사 횟수당 가공깊이.

용화된 폴리머 재료로는 폴리카보네이트를 선정하였다. 본 연구에서는 3차원 형상으로 팬(fan)을 CAD 모델링하고 형상 제작을 위한 레이저 빔의 가공경로를 설정하였다. 이때 사용된 빔의 스폿 사이즈는 15 µm였으며 빔의 중첩을 30%로 설정하였다. 레이저 빔이 한번 조사될 때 폴리카보네이트의 어블레이션이 되는 깊이 변화가 선형성을 유지하는지 알아보기 위하여 레이저 빔의 주사 횟수당 변화되는 가공깊이 변화를 실험하여 그림 7에 도시하였다. 주사횟수와 가공깊이가 선형적인 관계를 가지므로 이런 특성을 이용하여 3차원 형상 가공의 빔 경로와 빔 주사횟수가 설정되도록 프로그램에 입력하였다.

앞선 폴리카보네이트의 기초 광가공 특성 결과를 이용하여 각각 1 mm, 500 µm의 직경을 갖는 마이크로 팬을 제작하였



(a) 1mm 마이크로 팬의 가공결과



(b) 직경 500µm 마이크로 팬의 양면 가공결과

그림 8. 레이저 다중주사 방식을 이용한 3차원 마이크로 팬 가공 결과.

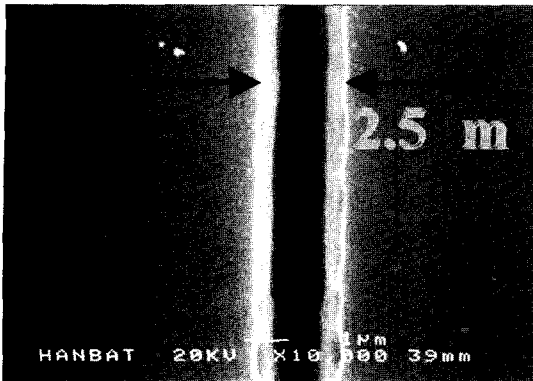
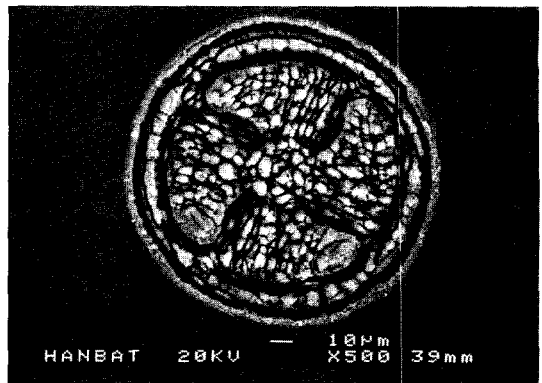


그림 9. 고배율 광학렌즈를 이용한 폴리머 미선 선풍 가공결과.



(a) 폴리아미드

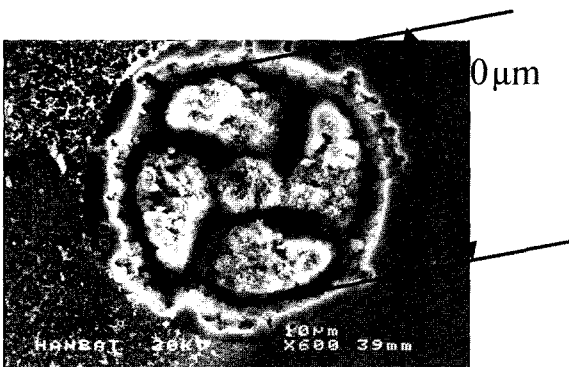
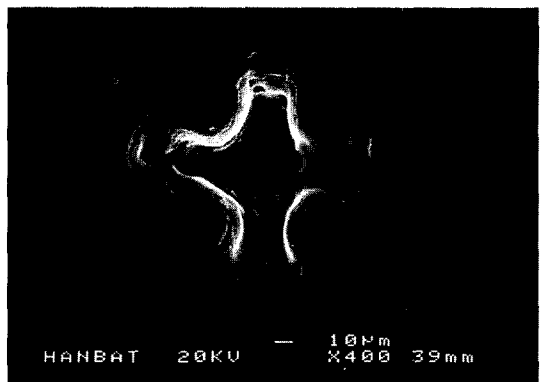
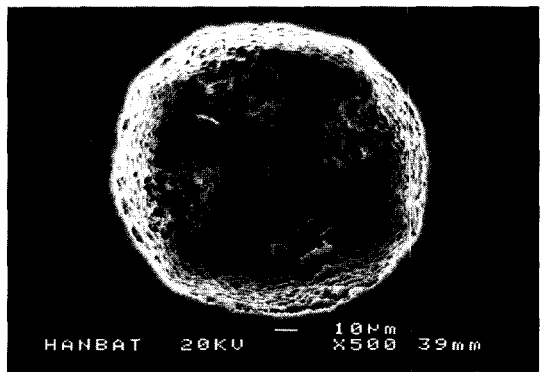


그림 10. 2.5 μm 레이저 빔 직경을 이용한 100 μm 마이크로 팬 가공 결과.



(b) PMMA



(c) 폴리아미드

그림 11. 2.5 μm 레이저 빔 직경을 이용한 여러 폴리머들의 100 μm 마이크로 팬 가공 결과.

으며 그 형상을 그림 8에 도시하였다. 이때 가공부에서 발생하는 탄소화합물이 렌즈에 증착되거나 다시 가공부 표면에 집착하는 것을 억제하기 위하여 레이저의 파워와 주사속도 그리고 헬륨가스의 분사량을 정밀하게 조정하였다. 레이저 빔의 최종 주사가 끝난 후 가공면 위에 미소하게 재증착된 탄소화합물은 에탄올과 초음파 세척을 통하여 후처리하면 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 폴리카보네이트의 투명한 가공면을 그대로 유지할 수 있었으며 CAD로 모델링된 3차원 형상을 그대로 구현할 수 있었다. 그림 8(b)에서는 500 μm 팬의 양면을 가공한 결과를 도시하였다. 이러한 방법을 이용하여 완전한 3차원의 형상을 레이저로 직접 제작할 수 있으며 또한 레이저로 가공된 3차원 형상품을 이용하여 금형을 제작하고 LIGA 혹은 미세 사출의 방법을 이용하면 정밀한 3차원 형상의 마이크로 부품을 대량생산 할 수 있는 기술로 응용할 수 있다.

위의 방법으로 더 미세한 3차원 형상을 가공하기 위하여 NA 0.13의 집광렌즈를 사용하여 그림 9에서와 같이 2.5 μm의 선풍을 얻었다. 이것을 위와 같은 방법으로 직경 100 μm의 마이크로 팬 가공에 적용하였다. 이때 그림 10에서 보는 바와 같이 경우 앞의 두 결과와 달리 좋지 않은 가공 상태를 보이고 있는데 이것은 고집적 광이 조사됨에 따라 열적 어블레이션이 더 강하게 일어나며 그에 따라 폴리머의 재료표면에서 폭발되어 나오는 탄소화합물이 미소한 가공부의 표면을 손상시키고 증착되는 양도 늘어나 레이저를 다중 스캔할 때 어블

레이션이 원활하게 이루어지지 못함을 보이고 있다. 폴리카보네이트의 표면에서 발생하는 미세 입자들의 렌즈 증착을 막기 위하여 헬륨가스를 가공부의 측면에서 불어 주었을 때 그림 10에서 보는 바와 같이 많은 양의 미세 입자가 쌓이는 것을 볼 수 있다. 이것은 어블레이션에 의하여 분해될 때 발생하는 CO 및 CO₂ 기체가 폭발되어 나오면서 폴리머 표면의 완전히 분해되지 못한 입자 및 탄소화합물을 떨어져 나가게 함으로써 생기는 것으로 보이며, 이 입자들에 의하여 가공부의 표면에 미세한 기공을 형성하는 것으로 생각된다. 같은 방법으로 폴리머의 광가공 특성을 파악하기 위하여 직경 100 μm의 마이크로 팬 가공을 그림 11에서와 같이 폴리아미드, PMMA, 폴

리아미드 시료에 적용하였다. 기초실험 결과에서 예측할 수 있는 바와 같이 PMMA는 빔의 흡수가 거의 이루어지지 않아 레이저의 파워를 높게 하여 가공할 때 빔이 집적된 곳에 큰 용융부를 형성하며 가공이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 폴리리아미드의 경우는 빔의 흡수가 PMMA에 비하여 높지만 가공부 주위가 넓게 가공되어 미세한 3차원 형상을 만들어 내지 못하고 있다. 폴리리아미드는 앞선 실험결과 그림 6에서 나타난 결과와 마찬가지로 3차원 형상은 만들어지나 폴리머의 분해와 재결합 반응이 함께 일어나 가공부 표면에 큰 요철을 형성하는 것을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 상용의 폴리머와 355 nm 파장의 레이저를 이용하여 3차원 광가공 하는데 있어서는 500 μm 이하의 형상가공에는 한계가 있어 보인다. 자외선 영역에서는 비교적 긴 파장의 350 nm이상의 DPSS 레이저를 이용한 폴리머 가공은 레이저의 효율과 가격 등에서 장점이 있기 때문에 이 파장영역에서의 광학특성과 가공특성이 우수한 폴리머를 제조하고자 하는 연구가 이루어지고 있다.^{16,20} 향후 새로운 폴리머의 개발과 함께 본 연구에서 개발한 기술을 이용한 폴리머의 3차원 가공기술은 미소 시작품 개발 등에 보다 활발히 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 355 nm의 Nd:YVO₄ 3고주파 DPSS 레이저를 이용하여 폴리머의 3차원 광가공 기술을 개발하였다. 가시광선 영역에 가까운 파장의 레이저를 이용한 폴리머의 광가공을 위하여 다양한 구조의 상용 폴리머에 적용한 결과 빔 흡수율이 가공성에 가장 큰 영향을 미쳤으나 다중 빔 주사방식으로 어블레이션할 때 폴리리아미드와 같이 벤젠구조를 많이 가지고 있는 재료의 경우 분해와 재결합이 일어나 가공부의 표면이 좋지 않게 나타났다. 이러한 점 때문에 다중 공유결합 구조와 작은 분자단위의 화학구조를 가지고 있는 폴리카보네이트가 355 nm 파장의 레이저를 이용한 광가공에 가장 적합함을 알 수 있었다. 본 결과를 바탕으로 마이크로 펜을 제작하여 마이크로 스케일의 3차원 미세 형상 가공기술을 구현하였다. 이 기술은 기존의 KrF나 ArF 레이저와 같은 가스 레이저에 비해 발전 효율과 유지비 등이 저렴한 고체 레이저를 사용한 것으로 산업계 적용이 용이한 장점이 있으며 마스크를 사용하지 않고 CAD/CAM기술을 이용하여 실현할 수 있어 소량의 복잡한 3차원 형상의 가공을 값싸고 빠르고 실현할 수 있는 기술의 대안으로 생각되어 질 수 있다. 또한 향후 350 nm이상의 파장에서 가공특성이 우수한 폴리머 기술이 발전함에 따라 더욱 미세하고 정밀한 마이크로 3차원 부품을 제조하는 기술로 발전할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 지능형마이크로시스템사업의 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] R. Srinivasan and V. Mayne-Banton, "Self-developing photoetching of poly(ethylene terephthalate) films by far-ultraviolet excimer laser radiation," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 41, No. 6, pp. 576-578, 1982.
- [2] R. Srinivasan and W. J. Leigh, "Ablative photodecomposition: action of far-ultraviolet (193 nm) laser radiation on poly (ethylene terephthalate) films," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 104, pp. 6784, 1982.
- [3] J. H. Brannon, J. L. Lankard, A. I. Baise, F. Burns, and J. Kaufman, "Excimer laser etching of polyimide," *J. Appl. Phys.* Vol. 58, No. 5, pp. 2036-2048, 1985.
- [4] J. T. C. Yeh, "Laser ablation of polymers," *J. Vac. Sci. Technol. A* Vol. 4, No. 3 pp. 653-658, 1986.
- [5] S. Lazare and V. Grainier, "Ultraviolet laser photoablation of polymers: a review and recent results," *Laser Chem*, Vol. 10, pp. 25-40, 1989.
- [6] T. Lippert, M. Hauer, C. R. Phipps, and A. J. Wilkaun, "Polymers designed for laser applications: fundamentals and applications," *Proc. SPIE HPLA IV*, Vol. 4760, pp. 63-71, 2002.
- [7] B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. von-Alvensleben, and A. Tuennermann, "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," *Appl. Phys. A*, Vol. 63, No. 2, pp.109-116, 1996.
- [8] D. von der Linde, D. Sokolowski-Tinten, K. Bialkowski, "Laser-solid interaction in the femtosecond time regime," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 109-110, pp. 1-10, 1997.
- [9] S. Kawata, H. Sun, T. Tanaka, and K. Takada, "Finer features for functional microdevices," *Nature* Vol. 412, pp. 697-698, 2001.
- [10] N. H. Rizvi, P. T. Rumsby and M. C. Gower, "New developments and applications in the production of 3D microstructures by laser micro machining," *Proc. SPIE* Vol. 3898, pp. 240-245, 1999.
- [11] C. Abbott, R. Allott, B. Bann, K. Boehlen, M. Gower, P. Rumsby, I. S. Boehlen, and N. Sykes, "New techniques for laser micromachining MEMS devices," *Proc. SPIE*, Vol. 4760, pp. 281-288, 2002.
- [12] E. Sutcliffe and R. Srinivasan, "Dynamics of UV laser ablation of organic polymer surface," *J. Appl. Phys.*, Vol. 60, pp. 3315-3322, 1986.
- [13] R. Srinivasan, "Ablation of polymethyl methacrylate films by pulsed (ns) ultraviolet and infrared (9.17 μm) lasers: A comparative study by ultrafast imaging," *J. Appl. Phys.* Vol. 73, pp. 2743-2749, 1993.
- [14] S. Kuper, J. Brannon, and K. Brannon, "Threshold behavior in polyimide photoablation: single-shot rate measurements and surface-temperature modeling," *Appl. Phys. A* Vol. 56, pp. 43-50, 1993.
- [15] P. E. Dyer, Laser ablation of polymers, in photochemical processing of electronic materials (Ed I. W. Boyd and R. B. Jackman) Academic, London, 1992.
- [16] Y. S. Liu, H. S. Cole, H. R. Philipp and R. Guida, "Photoetching of polymers with Excimer laser," *Proc. SPIE*, Vol.

- 774, pp. 133-137, 1987.
- [17] J. Lee, H. J. Moon, and J. Yi, "Intracavity frequency doubling of a slab Nd:YAG laser pumped by high power diode laser array," *J. Opt. Soc. Korea*, Vol. 2, pp. 5-8, 1998.
- [18] 장원석, 신보성, 김재구, 황경현, "폴리머와 UV레이저의 열적, 광화학적 반응특성을 고려한 직접식 마이크로 3차원 광 가공기술, 한국광학회 동계학술대회논문집, pp. 278-279, 2003.
- [19] 장원석, 신보성, 김재구, 황경현, "DPSSL을 이용한 3차원 마이크로 형상 조각기술," 한국레이저기공학회 추계학술대회논문집, pp. 99-103, 2002.
- [20] T. Lippert, L. S. Bennett, T. Nakamura, H. Niino, A. Ouchi, and A. Yabe, "Comparison of the transmission behavior of a triazeno-polymer with a theoretical model," *Appl. Phys. A*, Vol. 63, pp. 257-265, 1996.

Three-dimensional micro photomachining of polymer using DPSSL (Diode Pumped Solid State Laser) with 355 nm wavelength

Won Seok Chang[†], Bo Sung Shin, Jaegu Kim, and Kyung Hyun Whang

Nano Process Group, Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong Yusong-gu, Daejeon 305-343, KOREA

[†]E-mail: Paul@kimm.re.kr

(Received January 10, Revised manuscript May 7, 2003)

The basic mechanistic aspects of the interaction and practical considerations related to polymer ablation were briefly reviewed. Photochemical and photothermal effects, which highly depend on laser wavelength have close correlation with each other. In this study, multi-scanning laser ablation processing of polymer with a DPSS (Diode Pumped Solid State) 3rd harmonic Nd:YVO₄ laser (355 nm) was developed to fabricate a three-dimensional micro shape. Polymer fabrication using DPSSL has some advantages compared with the conventional polymer ablation process using KrF and ArF laser with 248 nm and 193 nm wavelength. These advantages include pumping efficiency and low maintenance cost. And this method also makes it possible to fabricate 2D patterns or 3D shapes rapidly and cheaply because CAD/CAM software and precision stages are used without complex projection mask techniques. Photomachinability of polymer is highly influenced by laser wavelength and by the polymer's own chemical structure. So the optical characteristics of polymers for a 355 nm laser source is investigated experimentally and theoretically. The photophysical and photochemical parameters such as laser fluence, focusing position, and ambient gas were considered to reduce the plume effect which re-deposits debris on the surface of substrate. These phenomena affect the surface roughness and even induce delamination around the ablation site. Thus, the process parameters were tuned to optimize for gaining precision surface shape and quality. This maskless direct photomachining technology using DPSSL could be expected to manufacture the prototype of micro devices and molds for the laser-LIGA process.

OCIS code : 220.4000.