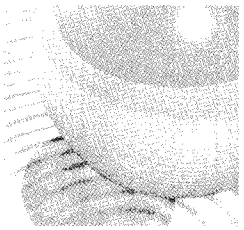

초정밀 가공분야에서의 펨토초 레이저의 산업응용

이상만*, 이만섭**

1. 서 론

반도체, 전자, 자동차, 의공학, 메카트로닉스 등의 첨단 산업분야에서 레이저 미세가공기술은 고품질의 부품을 가공하는데 필수적인 기술로 널리 활용되어 왔다. 그러나 가공 소재의 경량, 박판, 고밀도 및 고집적화 되어감에 따라 열적 손상 및 분해능의 한계로 펨토초 레이저에서 그 해법을 찾아 연구가 활발히 진행되고 있다.

펨토초 레이저 가공은 레이저 가공기술에서 최상의 정밀도를 필요로 하는 분야에서 궁극적인 정밀도를 만족하게 하는 극한의 기술이다. 펨토초 펄스는 펄스당 에너지가 매우 낮지만 극도로 짧은(수~수백 펨토초) 펄스 지속시간으로 인하여 재료를 충분히 제거할 수 있는 10^{12}-10^{14}W/cm^{2}의 높은 첨두 출력을 얻을 수 있다. 이러한 레이저 펄스를 이용한 가공에서의 가장 큰 특징은 재료의 열확산 시간보다 빔 조사되는 시간보다 짧아 레이저 펄스와 재료의 상호 반응 시 발생하는 열이 전파되는 시간을 갖지 못하여 열 확산 현상이 발생하지 않게 된다. 따라서 입사된 펄스의 에너지의 대부분이 열전달 없이 가공하는데 사용되게 된다. 또 다른 특징으로 가공하는데 나노급 레이저보다 상대적으로 적은 에너지가 소모되기 때문에 이로 인하여 생성되는 충격파가 적어 가공시료에 충격을 적게 주는 특성을 갖는다. 이러한 열 개재 없는 특성을 갖고 상대적으로 충격파에 의한 기계적 가공의 영향이 적기 때문에 정밀 미세 가공을 할 수 있다. 그리고 또 다른 특징으로 모든 재료을 가공 처리할 수 있는 능력을 갖는다. 펨토초 펄스를 투명물질 내부에 집광하면 굴절률 변화를 유기나 가공이 가능하다. 이와 같이 가공양상은 기존에 산업에 이용하는 나노초 레이저와 확연히 구분 지을 수 있다.

본고에서는, 이러한 장점을 지닌 펨토초 레이저 가공의 산업적 적용을 살펴보고자한다. (주) 포코에서는 다년간 펨토초 레이저를 이용하여 초정밀 가공을 수행에 왔으므로 그동안의 경험을 포함한 가공 기술에 따른 응용사례를 소개하고자 한다.

2. 펨토초 레이저 가공 응용사례

2.1 기판 절단

먼저 기판 절단에 관한 것부터 살펴보면 전자 분야의 대표적인 것으로 전자부품 패키징(packaging) 분야에서 유리 기판, 실리콘 및 사파이어기판의 절단공정이 있다. 이 공정에서 stealth cutting방식으로 펨토초 레이저를 사용할 수 있다. stealth cutting방식이란 보통 레이저의 파장의 빛을 흡수하지 못하고 그냥 통과되어 아무런 빛과 상호작용을 하지 않는 물질에 사용되는 방법으로 보통 이런 물질의 경우에는 가시광선이나 적외선레이저 광자의 에너지가 그 물질의 밴드갭(band-gap) 에너지보다 작기 때문에 투과된다. 현재 (주) 포코에서 보유중인 장비는 처프펄스 증폭 (chirped pulse

* (주)포코 레이저공정 개발팀, ** KAIST 전기 및 전자공학과

초정밀 가공분야에서의 펨토초 레이저의 산업응용

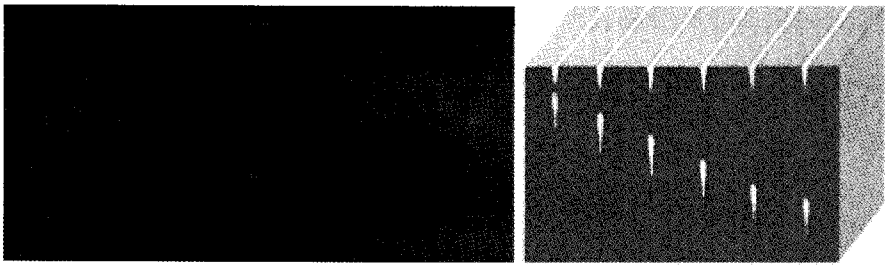

그림 1. 유리 기판 컷팅용 필라멘트

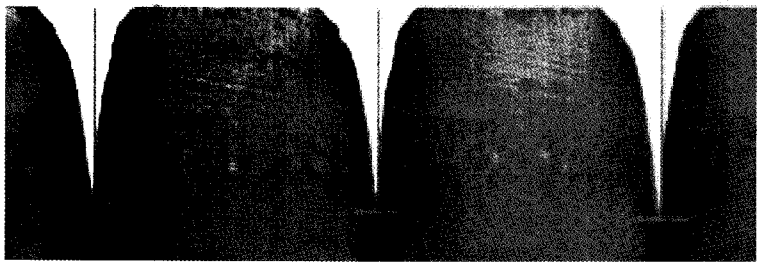

그림 2. 유리기판 컷팅용 미세홈

amplification: CPA) 기술을 채용한 티타늄사파이어(Ti: sapphire) 레이저로 중심파장이 780nm로 근적외선(NIR) 이다. 따라서 이 파장은 유리, 실리콘, 사파이어 기판에서는 투과된다. 그러나 레이저의 첨두출력이 충분히 높을 때에는 다광자 흡수 메커니즘이 일어난다[1]. 따라서 이런 펄스를 기판 내부에 집광을 하면 내부에 기공이 형성된다. 파워를 높이거나 펄스폭을 줄여 임계파워 이상이 되었을 경우, 생성된 매질과 빛의 상호작용에 의한 자체집속 효과(self-focusing)와 생성된 플라즈마에 의한 defocusing이 번갈아가며 빔 집속방향으로 진행하며 이런 상태가 일정하게 유지되면서 폭이 1um 이하의 미세채널을 형성된다[2]. 이 현상을 filamentation이라 하며 이런 미세채널은 작은 하중에도 채널 방향으로 크랙(crack)이 전파하는 역할을 하게 된다. 현재 실리콘 다이싱(dicing) 경우에 있어서도 이런 stealth cutting을 이용한 다이싱 공정개발이 가능하다. 이러한 것이 가능한 이유는 780nm의 파장의 빛은 실리콘에서도 투과가 일어나기 때문이다. 실리콘에 stealth cutting을 적용했을 때 장점은 가공 폭을 줄일 수 있어 기판의 손실 량이 적으며 또한 물과 같은 냉각제가 필요 없어 포토레지스트 층이 있는 상태에서도 절단이 가능하며, 또한 반도체 공정 단계의 수도 줄일 수 있고 공정 중간에서도 응용이 가능할 것으로 예상되기 때문이다. 그림 1은 유리 기판에 형성된 필라멘트(filament)이다.

다음으로는 직접묘화방식(direct writing method)을 이용한 다이싱 분야의 응용 예를 설명하고자 한다[3]. 그림 2의 예는 유리 기판에 다이싱용 V홈을 제작한 것으로 아주 적은 범위 내에서 크랙의 전파 없이 기계적으로 안정한 홈을 제작할 수 있었다. 디스플레이의 셀이 점점 가까워지고 패널화된 복층유리를 자를 수 있어 앞으로 디스플레이 패널 컷팅에 사용될 것으로 예상된다.

그림 3의 예는 인쇄회로기판(PCB)을 직접묘화방식을 이용하여 절단한 예이다. 시료는 유리섬유로 강화된 플라스틱과 구리박막이 적층된 구조로 기계적인 변형이 쉬워 레이저를 이용한 절단이 적합한 기술로 적용되고 있다. 그러나 355nm 파장의 DPSS 레이저를 이용하여 인쇄회로기판을 절단하는 연구가 있었다[4]. 펄스 반복 율을 높여 탄화오염(charring)을 최소화하였지만 가공면의 탄화오염에 의한 단락이 발생하는 문제를 완전히 제거했다는 결과는 없었다. 그러나 펨토초 레이저로 절단했을 때 단락이 일어나지 않았다. 그림 4의 예는 연자성 물질로 교류자기특성이 우수하여 멀티 코어 fluxgate 센서용 재료로 사용되는 Vitovac 6025X 필름

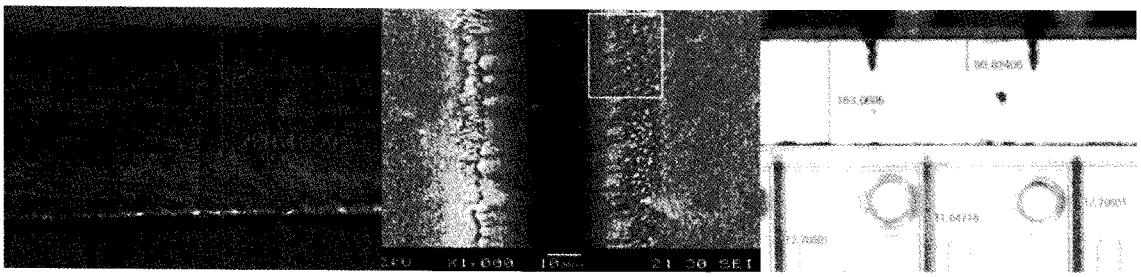

그림 3. FPCB의 절단 그림 4. Vitovac 6025X 필름의 절단 그림 5.GaAs의 하프 에칭

을 다이싱한 것으로 가공 처리 전과 후의 자기적 특성을 살펴보면 이들의 특성이 변하지 않았음을 볼 수 있다. 이는 펨토초 레이저로 가공했을 때 가공부분의 시료의 이방성이 변하지 않았기 때문이다. 일반적으로 Vitovac 6025X는 비정질물질로 보통 원하는 모양으로 가공할 시 열이 발생하는 가공방법으로 가공하면 비정질이 재결정화가 일어나 국지화된 자구(magnetic domain)가 발생하여 소자특성의 저하가 일어난다[5]. 그림 5는 GaAs 소재로 재작된 소자에 다이싱용 V-홈을 제작 것이다. 반도체 재료의 절단 시 펨토초 레이저의 장점은 데브리(debris)나 버(burr)가 산화물형태가 아닌 모제와 같은 성분과 결정구조인 장점을 갖고 있어 기계적으로 안정하다. 따라서 이와 같이 펨토초 레이저를 이용하여 반도체 재료를 절단할 시 품질이 우수하다.

2.2. 선택적 박막제거

이곳에서 선택적 박막제거에 관해 설명하고자 한다. 우선 전자 분야의 대표적인 것으로 디스플레이와 솔라셀의 경우를 살펴보면 패널 및 모듈은 수 μm에 이르는 박막 다층으로 구성되어 있다. 실제 생산현장에서 원하는 막의 선택적 제거를 위해 레이저 어블레이션(ablation)을 이용한 직접 패터닝(direct pattening)을 적용하여 가공하고 있다. 이런 선택적 박막제거에 펨토초 레이저를 이용하여 수행할 수 있다[6]. 즉 펨토초 레이저의 다광자 흡수 메커니즘은 모든 물질의 가공이 가능하게 하고, 또 각 물질마다 어블레이션이 되는 임계에너지가 다르기 때문에 펨토초 레이저의 다광자 흡수(multi-photon absorption) 메커니즘을 이용하면 선택적 박막제거가 가능하게 된다. 회로 기판에 많이 사용하는 알루미나(alumina)와 석영(quarts)과 같은 산화물은 금속과 폴리머와 같은 물질에 비해 상대적으로 밴드갭 에너지가 큰 물질로 금속에 비해 어블레이션이 일어나는 임계에너지가 높다. 따라서 대부분의 금속 및 폴리머와 접합을 이룬 경우에 있어 금속 및 폴리머 물질의 선택적 제거가 가능하다. 이때 발생할 수 있는 문제는 금속이나 폴리머를 선택적으로 제거 시에 증발된 나노급 미세입자들이 기판에 재 부착될 수 있는데 기판과 젖음성의 정도와 제거되는 물질의 휘발성정도에 따라 재부착이 일어날 수 있으며 보통 이런 경우 단락이 일어날 수 있다. 물론 부착여부는 사용되는 기판 및 금속에 따라 다르다.

이러한 선택적 박막 제거의 예들이 다음 그림과 같이 볼 수 있다. 그림 6의 예는 금으로 회로가 만들어진 알루미나 기판에 반도체 칩을 올리기 위해 칩이 올라 갈 부분을 트리밍(trimming)한 것이다. 이 때 알루미나 기판의 손상 없이 금 박막을 제거할 수 있었으며 단락도 없었다. 또한 칩과 회로가 임피던스 매칭(impendence matching)에 적용할 수 있다. 그림 7의 예는 유리기판(BK7) 위의 금으로 회로를 패터닝한 것이다. 그림 8의 예는 사파이어 기판위에 금 박막을 가공하여 그레이팅(grating)을 제작한 것이다. 그림 9의 예는 유리기판 위의 몰리브덴을 선택적 제거한 것이다. 그림 10은 유리기판위에 투명 전극에 사용되는 ITO(Indium-Tin Oxide) 박막을 선택적으로 제거한 것이다. 그림 11은 X-ray를 가시광선으로 변환시키는 신틸레이터(scintillator)로 사용되는 세슘아이오다이드(CsI)을 격자무늬로 선택적으로 제거한 것이다. 그림 11의 선택적 박막 제거의 목적은 변환된 신호가 CCD(Charge Coupled Device)로 전달 될 시 원하지 않는 신호의 누화(crosstalk)를 막아 신호처리의 분해능을 향상하기위해 작업을 수행하였다[7]. 그림 12는 펨토초 레이저를 이용한 유리기판에

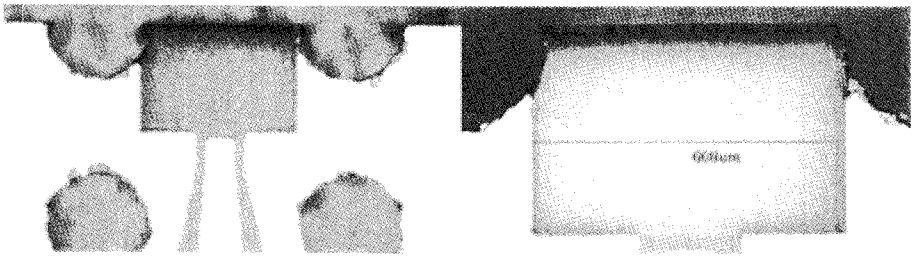

그림 5. 핫엠보싱 (a)몰드연마 (b)몰드가공 (c)핫엠보싱 (d)커버부착

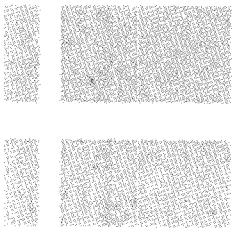

그림 7. Au/glass

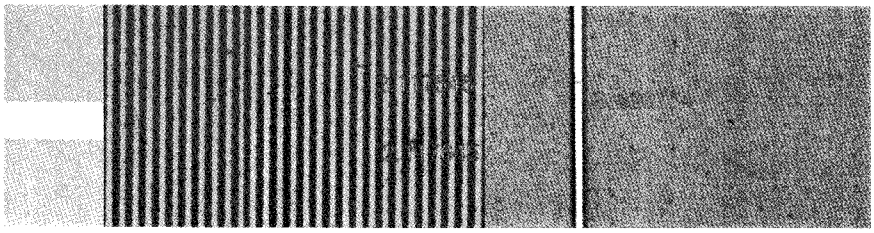

그림 8. Au/Sapphire

그림 9. Mo/glass

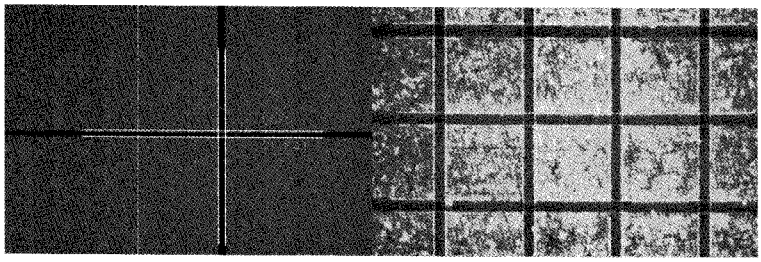

그림 10. ITO/glass

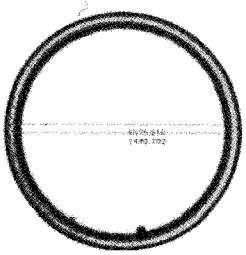

그림 11. CsI/silicon

그림 12. polymer/Glass

부착된 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 광 필터용 폴리머를 선택적 제거한 것이다.

2.3. 레이저 마킹

펨토초 레이저 마킹에 대해 살펴보면 펨토초 레이저로 가공 시 장점 중에 하나는 열의 개재가 없어 버와 데브리가 거의 없기 때문에 가공 모서리 부분의 윤곽이 명확하다는 장점이 있다. 따라서 얼라인 마킹(align marking)이나 자의 눈금 역할이 필요한 데에 응용 할 수 있다.

그림 13은 예는 CCD용 카메라 마스터 몰드에 적용한 것으로 마스터 몰드의 재료는 실리콘을 사용한 것이다. 실리콘은 적외선 영역에서 투명하기 때문에 실리콘 위에 새겨진 원형 마킹은 적외선에서 작동될 때 투명한 재질위에 있는 눈금과 같은 역할을 하게 된다. 그림 14의 예는 OLED를 제작 시 사용되는 석영이나 유리재질의

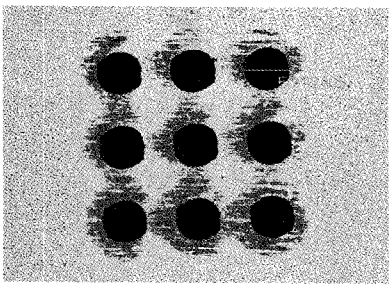

그림 13. 원형 마킹-silicon

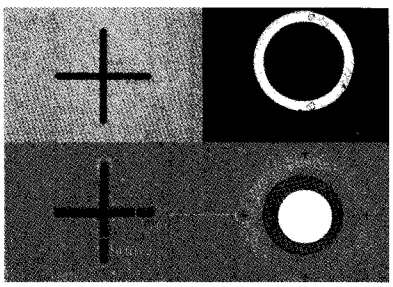

그림 14. 십자 및 환형 마킹-Quartz,Cr,Resin

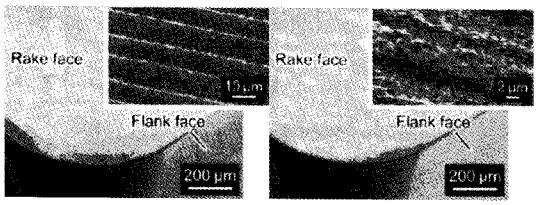

그림 15. 마이크로 및 나노 리플-WC-Co

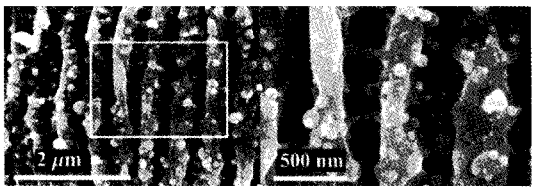

그림 16. 그레이팅- Titanium

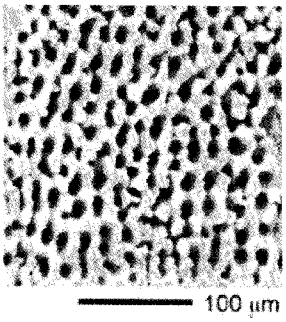

그림 17. 초합금(C263)에 형성된 마이크로 기공

마스크에 새긴 십자와 원형 정렬 마크이다. 그리고 칩이나 렌즈를 원하는 정밀도로 위치시키기 위해 광 트렌시버에 십자 마크를 한 것으로 비아홀(Viahole) 제작 후 위치오차 보정하기 위해 PCB(printed circuit board) 기판위에 정렬 마크를 가공한 것이다.

2.4. 레이저 텍스쳐링

레이저 텍스쳐링(texturing)에 관해 살펴보면 기계 분야의 대표적인 것으로 자동차 실린더와 압연공정의 롤을 들 수 있다. 두 기계적 요소의 접촉부위에 생성되는 마찰을 줄이기 위해 윤활유 저장역할을 하는 수십 마이크로 크기의 딤플(dimple)을 제작하기 위해 펨토초 레이저를 이용하여 테스쳐링을 연구가 발표되었다[8]. 그 이외에 펨토초 레이저를 이용하여 테스쳐링을 연구한 예를 살펴보면 그림 15의 예는 절삭용으로 사용되는 텅스텐 카바이드(WC-Co) 공구 팁 날(rake)에 딤플을 형성한 것이다[9]. 이 논문에 의하면 딤플이 형성된 날을 사용하면 절삭할 시 접촉면을 줄여 마찰을 적게 할 수 있으며, 또한 마이크로 크기의 딤플보다 나노 크기의 리플 형성 시 더 적은 힘이 들어가는 것으로 나타나 있다. 따라서 펨토초

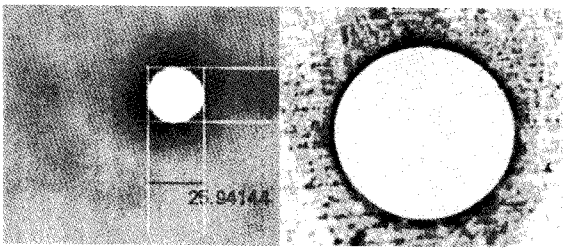

그림 18. Titanium

그림 19. Invar

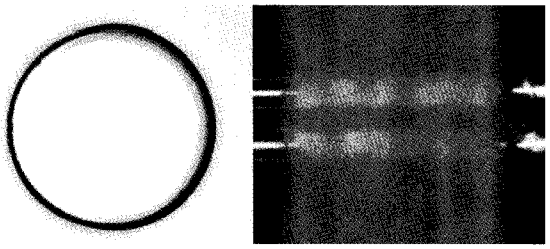

그림 20. 유리 (수직 홀가공)

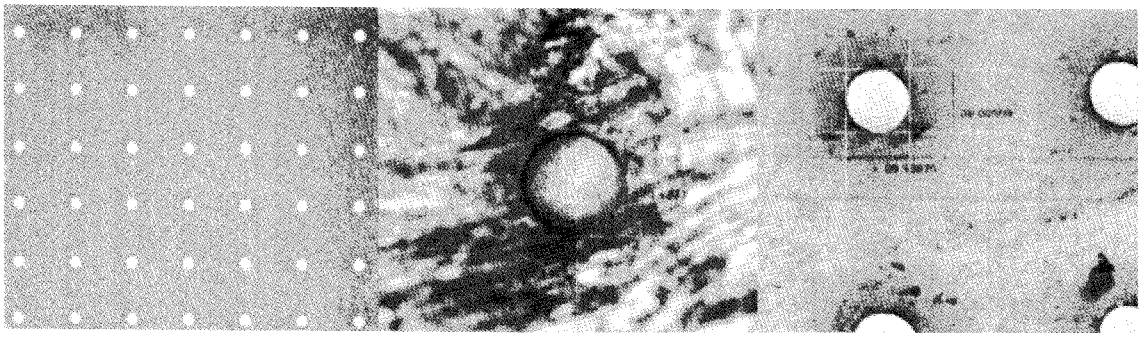

그림 21. Alumina

그림 22. SM45C

그림 23. polyamide

레이저를 시료 표면처리하면 나노리플의 구조를 얻을 수 있다는 것이다. 이러한 나노 주기적인 구조의 형성은 입사된 레이저빔과 그것에 의하여 표면에 공간적으로 주기적인 에너지 분포로 나타나는 여기된 표면 플라즈몬과의 간섭에 의해 생성된다. 일반적으로 샘플에 레이저 빔이 조사되어 발생한 공간적 주기는 조사빔의 파장의 스케일을 갖으며 그 주기의 배향은 레이저의 편광 방향과 수직 방향으로 배열된다. 초기의 몇 펄스가 무작위로 분산된 나노구조를 형성하면 이런 구조에 레이저의 에너지가 잦아들을 수 있어 표면을 따라 진행하는 원통형(cylindrical) 표면 플라즈몬(surface plasmon)을 여기시킬 수 있다. 이런 표면 플라즈몬은 입사되는 빔과 간섭하여 주기적인 구조를 형성하게 된다. 입사되는 펄스의 수가 증가하면 이런 주기적이 구조가 빔이 입사되는 부분의 전체로 퍼지고 자라나게 된다. 이런 구조는 표면을 따라 진행하는 평면 표면 플라즈몬을 여기시키고 이것이 빔의 입사 레이저 빔의 평면파와 간섭하게 된다. 그 결과 영구적인 확장된 그레이팅을 형성하게 된다. 여기에서 리플 구조의 특이한 점은 나노 리플에서 나노크기의 구조물은 나노조도를 갖는 구조가 나타난다. 또한 에너지를 높이고 반복 스캐닝을 수행하면 표면에 수직한 수 마이크로 크기의 기공이 생성시킬 수도 있다. 이런 효과를 이용하여 펨토초 레이저를 이용한 텍스쳐링 예들이 다음의 그림들에 나타나 있다. 그림 16의 예는 티타늄에 텍스쳐링한 것으로 주기가 0.53㎛이고 그 표면 조도가 20nm이하의 그레이팅을 제작하였다[10]. 티타늄은 친 인체 소재로 의료용 임플란트에 주로 사용된다. 인체에 사용 시 부착성이 중요한데 티탄늄의 표면에 15nm이하의 나노구조물이 있으면 단백질이 움푹패인 곳에 들어가거나 혹은 주기가 15nm~100㎛인 그레이팅이 임프란트 표면에 있으면 세포가 그 주기적인 틈으로 들어 가 상호 맞물림 할 수 있어 부착성이 좋아진다.

그림 17의 예는 니켈 기반 초합금(C263)에 마이크로 크기로 텍스쳐링한 것으로 마이크로 리플과 기공이 수직방향으로 형성된 구조를 제작하였다[11]. 니켈 기반으로한 초합금(C263)은 가스 터빈, 로켓 엔진, 우주선 등 고온 재료에 사용되는 물질이다. 이런 물질에 수 마이크로 크기의 기공이 존재하면 부품의 가장자리의 층의 두께를 증가 시킬 수 있으며 표면에 흐르는 층류(lamina flow)를 난류(turbulent flow)로 바꿀 수 있어 냉방효과를 얻을 수 있다.

2.5. 레이저 홀가공

펨토초 레이저 홀가공(hole)을 살펴보면 홀 가공할 시 펨토초 레이저 가공의 장점은 정확한 치수제어가 가능함에 있다. 재질에 따라 버나 데브리와 같은 것이 없거나 적기 때문이다. 실제 피코초 레이저로 드릴링 한 것과 비교해도 그 품질이 확연히 구분된다[12]. 그림 18의 예는 티타늄(Titanium)에 홀을 가공하여 압출성형

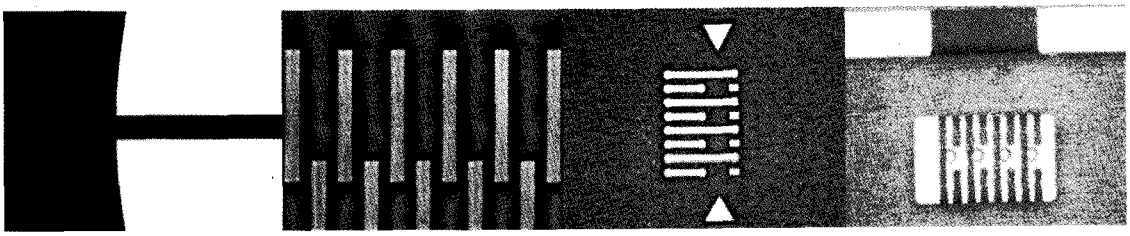

그림 24. Alumina

그림 25. polyamide

그림 26. sus 304/polyamide

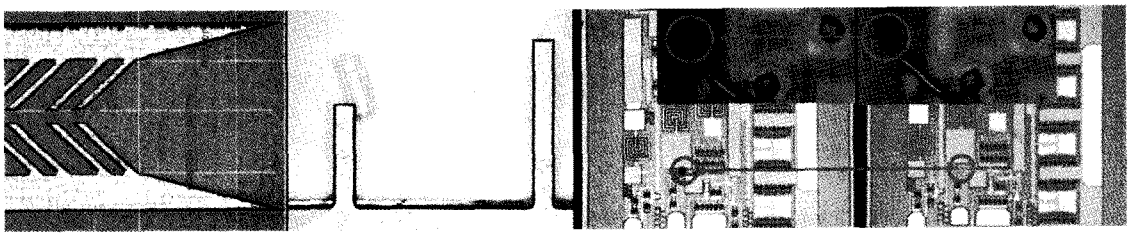

그림 27. SUS 304

그림 28. 압전체

그림 29. 회로 수정

(hydrostatic extrusion)용 다이(die)를 제작한 것이다. 그림 19의 예는 invar에 홀을 가공하여 분광계에 사용되는 플라즈마 가이딩용 노즐(plasma-guiding nozzle)을 제작한 것이다. 그림 20의 예는 유리기판에 수직으로 광섬유 페룰(ferrule)을 제작한 것이다. 그림 21의 예는 내 플라즈마 재료인 알루미나(Alumina) 지그에 홀 가공을 한 것으로 스퍼터 장비에 장착될 진공 지그이다. 그림 22의 예는 유압노즐을 가공한 예이다. 그림 23의 예는 LCD 프루브(probe) 유닛의 탐침 가이딩 필름을 제작한 예이다.

2.6. 레이저 스트럭쳐링

펨토초 레이저 스트럭쳐링(laser structuring)에 대해 살펴보면 스트럭쳐링 시 펨토초 레이저 가공은 투명한 물질인 유리뿐만 아니라 열에 취약하고 난삭성이며 취성이 큰 재료인 세라믹을 원하는 모양으로 절단이 가능하다는 것이 다른 레이저에 비해 가지는 크나 큰 장점이다. 그림 24의 예는 내 플라즈마용 알루미나에 마스크 패턴을 패터닝한 것이다. 가공 후에도 크랙과 같은 열적 손상이 없고 재증착층은 모재와 같은 상이기에 기계적으로 안정하며 또한 그래인(grain)들이 모재보다 더 작아 더 가공면의 조도(roughness)가 향상된다. 그림 25의 예는 LCD 프루브(probe) 유닛의 탐침 가이딩 필름을 패터닝한 것이다. 그림 26의 예는 스테인리스 스틸(SUS)에 마스크 패턴을 패터닝한 것이다. 그림 27의 예는 스테인리스 스틸에 패터닝한 것으로 인체 조직 채취용 나이프를 패터닝한 것이다. 이러한 툴은 기계적 강도를 확보하기 위해 200um정도의 두께가 요구된다. 조밀한 패턴 제작 시(구조물 넓이:〈50um 주기:〈100um) 직접묘화방식을 이용한 나노급 레이저에서는 플라즈마나 혹은 고속유체(waterjet)로 인하여 앞서 제작된 패턴이 무너지는 현상이 발생한다[13]. 그림 28의 예는 MEMS (Microelectromechanical Systems)에 적용한 사례로 압전 물질로 제작된 캔틸레버(cantilever)로서 그것의 소자 특성에 맞게 길이 제어 및 공정 중 제거되지 않은 부분을 절단한 것이다. 그림 29의 예는 PCB 보드를 연결하는 와이어를 컷팅한 것과 실리콘 칩의 칩 수정(repair) 한 것이다. 펨토초 레이저 가공은 좋은 품질의 칩의 수정이 가능하다.

3. 결 론

본고에서는 (주) 포코에서 수행한 연구결과와 타 연구기관의 연구 결과의 대표적인 사례를 기반으로 펨토초 레이저의 초정밀 가공기술을 이용한 반도체, 전자, 자동차, 의공학, 원자력, 메카트로닉스 등의 산업전반의 응용사례를 살펴보았다. 펨토초 레이저의 이용한 초정밀 가공기술은 텅스텐, 티타늄, 초합금 등 고온에서 사용되는 재료, 알루미나, 질화규소, 유리 등과 같은 열에 취약하며 난삭성인 세라믹 재료, 형상기억합금과 자성재료 등과 같이 재료의 성능이 온도에 민감한 기능성 물질 등의 가공에 적합한 것으로 생각된다. 또한 펨토초 레이저를 이용한 텍스쳐링과 같은 표면처리는 기공형성 및 나노구조를 형성할 수 있어 많은 잠재적인 응용분야가 있을 것으로 판단한다. 다만 고속의 생산성을 요구하는 응용에서는 아직 펨토초 레이저를 적용하는 것은 약점으로 남아 있지만, 펨토초 레이저 기술의 발전과 함께 이도 어느 정도 해소가 될 것을 기대한다. 또한 앞으로 펨토초 레이저 가공분야의 응용부분을 확대해 나가기 위해서는 화학, 생물, 기계, 전자 등 다양한 분야의 기술과 융합과 협력이 이 필요하다.

참고문헌

[1] B.C. Stuart, M.D. Feit, S.Herman, A.M. Rubenchik, B.W. Shore, and M.D. Perry, "nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectics", Phys. Rev. B, 53(4), 1996, pp.1749-1761.

[2] A. Couairona, A. Mysyrowicz,"Femtosecond filamentation in transparent media", Physics Reports 441, 2007,pp. 47-189.

[3] Frid Ahmed, and Man Seop Lee,"Micromachining of Grooves for Cutting Fused Silica Plates with Femtosecond Laser Pulses", CLEO, 2007,pp,1-2.

[4] X.C. Wang, Z.L. Li, T. Chen, B.K. Lok, D.K.Y. Low,"355nm DPSS UV laser cutting of FR4 and BT/epoxy-based PCB substrates",Optics and Lasers in Engineering 46, 2008, pp. 404-409.

[5] L.S. Tana, H.L. Seet, M.H. Honga, X.P. Li,"Effects of femtosecond laser ablation on Vitrovac 6025X",Journal of Materials Processing Technology 209, 2009, pp.4449-4452.

[6] Sandra Zoppel, Stefan Partel, Pavlina Choleva, Max Lederer, Georg A. Reider," Selective laser micro-structuring of photoresists and TCO", ICALEO LMC, 2007, pp. 26-30.

[7] Byoung-Jik Kim, Gyuseong Choa,Bo Kyung Cha, Bosun Kangb,"An X-ray imaging detector based on pixel structured scintillator", Radiation Measurements 42, 2007, pp.1415-1418.

[8] E. Gualtieri, A. Borghi, L. Calabri, N. Pugno, S. Valeri, "Increasing nanohardness and reducing friction of nitride steel by laser surface texturing",

초정밀 가공분야에서의 펨토초 레이저의 산업응용

Tribology International, Volume 42, Issue 5, May 2009, Pages 699-705.
[9] Noritaka Kawasegia, Hiroshi Sugimori, Hideki Morimoto, Noboru Morita, Isao Hori, "Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior." Precision Engineering 33, 2009, pp.248-254.
[10] A.Y. Vorobyev, Chunlei Guo, "Femtosecond laser structuring of titanium implants",Applied Surface Science 253, 2007, pp. 7272-7280.
[11] N.G. Semaltianos, W. Perrie, P. French, M. Sharp, G. Dearden, K.G. Watkins, "Femtosecond laser surface texturing of a nickel-based superalloy", Applied Surface Science 255, 2008, pp, 2796-2802.
[12] B.R. Campbell, T.M. Lehecka, V.V. Semak, J.G. Thomas, "Effect of the double pulse format for picosecond pulse laser drilling in metals", ICALEO LMC, 2007, pp. 45-51.
[13] Wenwu Zhang, Jeffrey Shaw, Andrew Trimmer, Z. Jay Cao1, and Magdi Azer, "Laser micromaching and enenergy field manufacturing", ICALEO LMC, 2007, pp. 182-190.

약 력

이상만

• 약 력 :
- 충남대학교 재료공학과, 공학사
- 2002~ (주)포코 레이저공정 개발팀 팀장

• email : systematic11@phoco.com

약 력

이만섭

• 약 력 :
1998~ KAIST 전기및전자공학과 교수
2001~ (주)포코 대표이사
2008~2009 ICU 기획처장
1998~2005 ICU 산학연공동연구센터 및 ICU 창업보육센터 소장
1979~1997 한국전자통신연구원, 책임연구원 (광대역전송기술부장)
1993~1997 전북대학교 겸임교수
- 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (Ph. D.)
- 부산대학교 대학원 전자공학과 (M.S.)
- 부산대학교 전자공학과 (B.S.)

• email : leems1502@kaist.ac.kr