

첨단레이저 응용 미세 가공기술 현황

이 글에서는 환경친화적이며, 유연성과 접근성이 좋아 IT, BT, NT 등 제품주기가 빠른 분야에서 광범위하게 활용될 수 있는 첨단 레이저 응용 미세가공기술의 국내외 현황과 응용분야에 대해 소개한다.

이제훈 / 한국기계연구원 레이저응용시스템그룹, 책임연구원 e-mail : jaholee@kimmr.re.kr
 손현기 / 한국기계연구원 레이저응용시스템그룹, 선임연구원

레이저 미세 가공기술은 가공 도구인 레이저빔의 고집속 및 시·공간적(temporal and spatial) 정밀제어가 가능하여 반도체, 전자, 자동차, 메커트로닉스 등의 첨단산업 분야에서 고품질의 부품을 가공하는데 필수적인 기술로 널리 활용되어 왔다. 또한, 환경친화적이며, 비접촉 공정으로서, 수십 미크론의 형상을 갖는 부품 가공영역에서 기존의 공정을 대체하는 신 공정 개발에 기여하여 왔었다.

이러한 레이저 미세 가공기술 분야의 세계 시장규모는 2004년에 44억 달러, 2010년에 86억 달러로 예상되어 레이저 미세 가공분야의 전 세계적 수요는 계속적으로 폭발적 성장세를 보일 것으로 예측되고(그림 1 참조) 이에 병행하여 레이저 가공기술의 적용분야는 확대되어가고 있다. 그러나 최근 레이저 가공 공정은 열적 가공현상 및 분해능의 한계로 인하여 경량, 박판, 고밀도, 및 고집적화 되어가고 있는 산업의 추세를 따르기 힘들어졌다. 이에 따라 기존의 레이저 가공방식보다 더욱 정밀한 새로운 개념의 첨단 레이저 가공기술의 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다.

첨단 레이저는 수 미크론 급의 형상가공뿐만 아니라 열적영향이 없는 가공을 목표로 하고 있으며 극초단 펄스를 조사하는 펨토초 레이저 및 피코초 레이저와 고출력의 UV파장을 조사할 수 있는 엑시머 레이저 등이 있으며 국내 주력산업의 신기술 개발과 IT, BT, NT 관련 분야의 기술개발에도 활발하게 응용되기 시작했다.

이러한 첨단레이저는 응용되는 공정에 따라 크게 미세 패터닝 기술과 미세 접합기술로 나뉜다. 미세

패터닝 기술은 제거 및 개질 공정을 통하여 미소 구조물을 제작하는 공정이며 미세 접합기술은 이미 제작된 미소 구조물들을 기능에 맞게 결합시키는 공정으로서 정의될 수 있다.

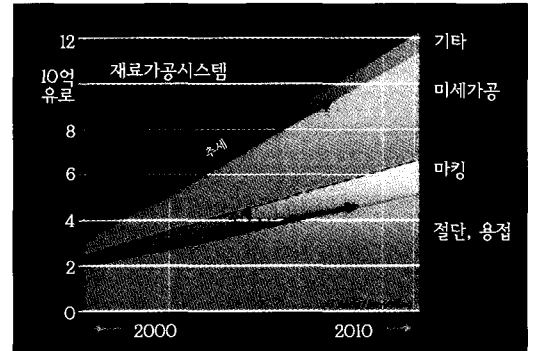


그림 1 레이저 미세 가공기술 분야의 세계시장 규모의 변화 추세(출처: ICALEO 2003)

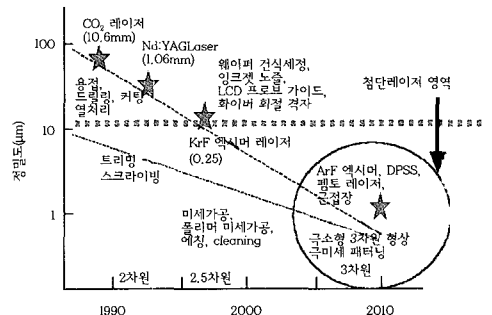


그림 2 미세 가공레이저의 개발 추세

레이저 응용 미세 패터닝기술

현재 첨단레이저 응용 미세 패터닝기술은 미세 제거기술과 미세 재료개질로서 분류된다. 미세 제거기술은 전자부품의 비아 홀(Via-hole), 디스플레이 장치, 마이크로 노즐, 마이크로 광부품 및 LOC(Lab-On-a-Chip) 등 다양한 분야의 가공에 적용되고 있으며 앞으로 그 응용분야가 더욱 더 세분화될 전망이다. 최근 전자기기는 갈수록 소형화, 경량화, 및 고기능화 되고 있으며, 무선 통신 단말기, 디지털 캠코더, 휴대용 컴퓨터 등 경박 단소형 기기를 중심으로 더욱 더 정밀한 가공을 요구하게 되었다. 이와 같은 추세는 디스플레이 장치 마이크로 부품, 및 바이오 칩 등의 분야에서도 동일하게 나타나고 있으며 이에 대응하기 위해 첨단 레이저를 응용한 미세 제거기술의 연구가 세계적으로 진행되고 있다.

이러한 미세 제거기술과는 달리 미세 재료 개질 기술은 주로 광 메모리, 광도파로 및 광 결정격자(photonic crystal lattice)의 제작에서 주로 이루어지고 있으며 투명재질 내부의 3차원 가공이 용이한 펨토초 레이저가 많이 사용되고 있으며 서브 마이크론의 가공도 가능한 장점이 있다.

외국 기술 및 연구 현황

첨단레이저의 일종인 극초단 펄스 레이저(pico- & femto-second lasers)는 비열적, 비선형 가공이 가능하므로 기존 레이저의 열적(thermal) 가공보다 정밀한 가공이 가능하다. 또한, 극초단 펄스 레이저는 레이저-재료 간의 상호 작용시간이 극히 짧고, 재료 무의존성의 특징을 갖기 때문에 어떠한 재료라도 가공할 수 있는 장점이 있다.

펨토초 레이저(femto-second laser)-재료 간의 상호 작용에 대한 연구는 1990년대 중반부터 미국의 국립연구소인 LLNL을 중심으로 진행되었으며, CPA(Chirped Pulse Amplification)기술의 개발로 고강도 펨토초 레이저 펄스의 발생이 가능해졌다. 1990년대 후반부터는 펨토초 레이저를 이용한 재료가공에 대한 연구가 시작되었으며, 선진국의 일부 국립연구소에서 기초적인 실험이 진행되었다.

미국에서는 Purdue 대학, MIT, Harvard 대학, LLNL 등을 중심으로 레이저 미세 가공기술에 대한 연구가 진행되어 왔다. 광메모리 소자 개발을 목표로 Harvard 대학의 E. Mazur 그룹은 파장이 800nm, 펄스폭이 100fs(femto-second)인 펨토초 레이저 펄스를 유리 내부에 집광시킴으로써 비선형(non-linear) 현상인 자기집속현상(self-focusing)을 이용하여 직경이 200nm인 구조개질을 얻었다. 이는 차세대 광메모리로 제작에 응용이 기대되나 보다 집적도를 높일 수 있는 기술이 요구되고 있다.

Michigan 대학의 Ultrafast optical science 센터의 Dr. Mourou 교수진을 비롯하여 Los Alamos Laboratory, UC Berkeley, UCLA, UC Santa Barbara, UC San Diego, Stanford, CREOL, Illinois 대학 등지에서 NSF 과제로 펨토초 레이저와 관련한 다양한 분야에 대해 많은 연구를 수행하고 있으며, 국가차원에서 이 분야의 중요성을 일찍부터 인식하여 많은 투자가 이루어지고 있어 상당한 기술 진척이 이루어진 것으로 알려져 있다. 그 가운데 펨토초 레이저를 시각교정 및 생체치료에 응용하는 연구도 진행되고 있다.

한편, MIT의 Nanostructures Laboratory에서는 Zone-Plate-Array Lithography를 개발하였는데 이는 Zone plate를 사용하여 마스크(mask)를 사용할 필요 없이 수백만 달러에 달하는 고가의 마스크를 대체할 수 있다. 현재 파장이 400nm인 GaN 레이저 다이오드를 이용하여 가공한 최소 선폭은 350nm이며 컴퓨터 제어시스템과 다수의 Fresnel 렌즈를 사용하면 가공 시간도 단축시킬 수 있다. 또한 레이저의 파장을 줄이면(157nm 파장의 엑시머(excimer) 레이저(F₂) 사용) 90nm의 선폭도 형성시킬 수 있다고 보고되었고 이는 펨토초 레이저와 함께 나노 크기의 레이저 가공에 유리한 기법으로 각광받고 있다.

일본에서는 Kyoto 대학, RIKEN 연구소, Osaka 대학 등지에서 레이저 미세 가공공정에 대한 연구가 진행되어 왔다. Osaka 대학의 Kawata 그룹에서는 이광자 흡수 현상(two-photon

absorption process)을 이용하여 폴리머 내부에 특징 형상이 나노 크기인 3차원 황소 형상을 제작하였다(그림 3 참조). 극초단 펄스 레이저는 종래에 레이저와 달리 다양한 비선형 현상을 유지하므로 기존의 레이저 가공이 불가능했던 다양한 형태의 3차원 가공이 가능하다는 것을 보여준 사례이다.

Tokushima 대학의 Misawa 그룹에서는 레이저 미세 가공공정을 화학 에칭공정과 결합함으로써 투명재료인 사파이어에 10~50 μm 의 미세 채널을 형성하였다. 이러한 투명재료 내부에 3차원 마이크로 채널을 형성하는 기술은 향후 바이오칩 및 $\mu\text{-TAS}$ (Total Analysis System) 등에 응용이 가능하다.

Tokushima 대학의 Misawa 그룹에서는 광경화성 폴리머 내부에 이광자 흡수 현상을 이용하여 3차원 광결정 격자(photonic crystal lattice)를 제작하였으며 그 광학특성을 조사했다. 반사율이 20% 정도로 향후 반사율을 높일 수 있는 기술적 보완이 요구되고 있다. 이와 같은 광결정 격자의 광단흡효과를 이용하면 미소 공진기 제작이 가능하며 이를 집적화하여 광도파로나 광집적회로 분야에 적용이 가능하다.

한편 독일에서는 Max-Born 연구소, Siemens 사, IFSW, LZH 등에서 연구가 진행되고 있다. Max-Born 연구소에서는 레이저 펄스에 의해 유기된 내부 개질이 펄스 수가 증가함에 따라 표면 쪽으로 성장하는 메커니즘을 규명하였다. 또한 최근 Lumera 사는 Diode-pumped Nd:YVO₄ pico-second 레이저를 개발하였다. 100kHz의 펄스 반복률(repetition rate), 400 μJ 의 펄스 에너지로서 펄스폭이 10ps인 STACCATO를 출시하였다. 이는 재료가공 시 짧은 펄스폭을 이용하는 장점 외에도 높은 광에너지를 가지는 자외선 영역의 빔을 방출하므로 금속재료의 미세 가공뿐만 아니라 어떤 재료의 미세 가공도 가능한 것으로 판단된다.

엑시머 레이저는 가장 손쉽게 고출력의 UV 파장을 얻을 수 있는 레이저 중 하나로서 레이저 발진을 위해 사용된 가스에 따라 각기 다른 파장을 방출한다. 즉 157nm(F₂), 193nm(ArF), 248nm(KrF) 그리고 308nm(XeCl)와 같이 다양한 자



그림 3 펄초 레이저의 이광자 흡수법을 이용한 10미크론 크기의 황소(Osaka 대학)

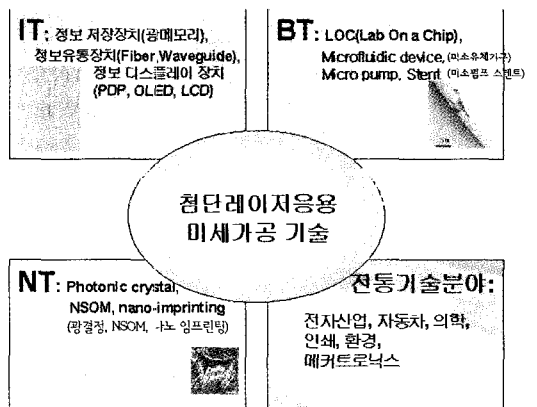


그림 4 첨단 레이저 응용 미세 가공기술의 적용 예

외선을 조사 할 수 있으므로 높은 광자 에너지로 인하여 열적 반응이 아닌 광화학적(photochemical) 반응을 유도하는 공정에 이용되고 있으며 가장 널리 사용되고 있는 분야는 폴리머 가공이다. 영국의 Exitech 사는 엑시머 레이저를 이용한 가공분야에서 대표적인 회사로서 마스크 프로젝션(projection)기법으로 폴리머, 금속, 세라믹, 반도체 등의 재료상에 특징형상이 20~500 μm 영역에서 양질의 미세 구조물을 제작하였다.(그림 6 참조)

국내 기술 및 연구 현황

국외의 연구 활동에 비교하여 국내의 극초단 펄스 레이저 기술에 관련된 연구는 한국기계연구원(KIMM)과 한국과학표준연구원(KRIS)과 같은 연구소 및 업체로서는 (주)포코 에서의 펄초 레이저 가공기술 개발 외에 매우 미약한 실정이며 기술을 보유하고 있는 기관이나 업체도 거의 없는 실정이다. 현재 산업계에서 요구되고 있는 기술은 최근 들어 더

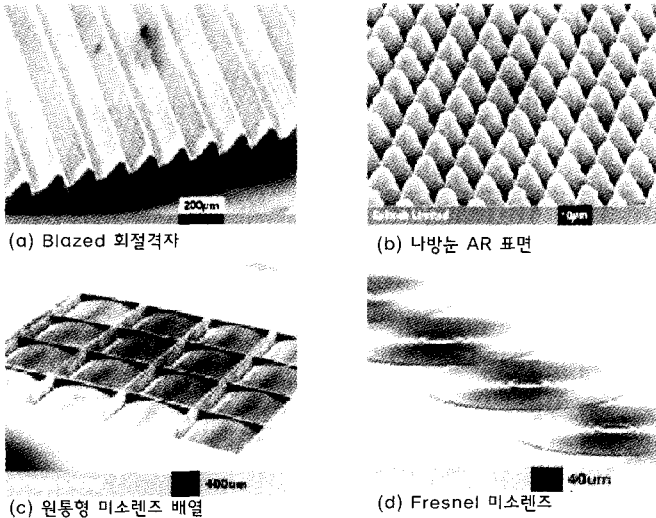


그림 5 마이크로 렌즈(Exitech 사)

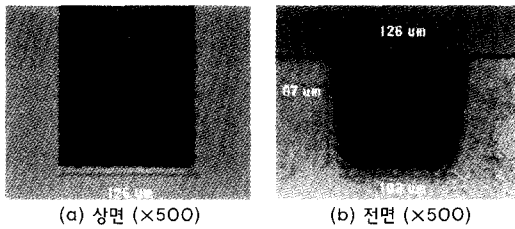


그림 6 펄스 레이저로 가공된 광도파로용 U-그루브

욱 다양해지고 있는 소재의 가공에 대한 부분과 미크론 단위의 초정밀 가공으로 그 추세를 말할 수 있다. 특히 박막형 소재, 즉 폴리머, 금속, 세라믹, 플라스틱, 및 유리의 가공기술에 대한 수요가 증가하고 있으며 이러한 재료를 이용하여 각종 형상에 유연하게 적용할 수 있는 초미세 가공기술이 요구되고 있다.

국내에는 2002년에 한국표준연구원에서 130 fs, 1kHz 펄스 레이저의 이광자 흡수에 의한 미세 가공이 처음 발표되었다. 또한 한국기계연구원에서는 고반복률(100kHz) 펄스 레이저를 이용하여 절연체 및 금속재료를 초고속 극미세 가공에 대한 연구를 진행하고 있으며, NSOM을 이용한 100 nm 이하의 미세 패터닝 연구를 진행 중이다. 그림 6은 국내 펄스 레이저 가공업체인 (주)포코에서 가공한 광도파로용 U-그루브로서 크기는 126×87×700µm이다. 또한 KAIST에서는 펄스 레이저의 이광자 흡수에 의한 폴리머 내부에 나노급 패

터닝을 실험적으로 보고된 바 있다. 즉, 나노 복화공정을 이용하여 복잡한 그림형상을 나노급 정밀도를 가지는 형상으로 복제 가능함을 보였다. 현재의 극초단 펄스 레이저를 이용한 미세 가공은 세계적 우수 연구 기관과 업체와 비교하면 아직 초보 단계이며 국내의 연구기관, 대학, 기업에서는 상기의 연구 기관을 제외하고 전무한 실정이다.

첨단레이저 응용 미세 접합기술

레이저 미세 접합기술은 여타 공정 기술에 비해 그 집적도가 높고, 비접촉 기술이라는 장점을 가지고 있으나 새로운 공정기술인 까닭에 레이저와 재료의 상호작용 메커니즘 규명에서부터 공정변수 제어에 이르기까지 알려지지 않은 사실들이 많다. 지금까지의 레이저 미세 접합기술은 수백 마이크로 이상의 접합 폭이 허용되는 분야에 주로 응용되었으며, 수십 마이크로 단위의 미세 접합기술은 세계적으로도 태동 단계에 머물러 있다. 또한, 디스플레이 및 반도체 산업의 연구 인력들이 레이저에 대한 이해도가 낮음으로 첨단레이저 응용 미세 접합기술에 대한 관심은 높으나 적용이 어려운 형편에 있다.

외국 기술 및 연구 현황

U.C. Berkely의 Lin 그룹은 1999년 마이크로 부품 내부에 마이크로 히터를 제작하고 이를 이용하여 플라스틱, 실리콘, 유리 등의 MEMS 패키징을 시도하였다. 히터를 가열하여 접합부 온도를 140°C로 유지하면서 그 외의 부분을 상온 상태로 유지하여 패키징을 수행하였으며, 열 및 변형 해석을 수행하였다. 일종의 패터닝 공정이므로 접합부 형성이 자유롭지만, MEMS 디바이스 내에 신호전달을 위한 요소가 필요한 경우에는 절연층과 그 외의 추가 배선 층이 필요해 공정과 디바이스의 구조가 복잡해지는 단점이 있다.

미국 Micron Technology 사의 경우에는 반도체 칩을 base plate에 부착시키기 위해 레이저를 이용하였으며, 일본의 Yazaki 사의 경우에는 와이어(wire)를 기판에 접합시키기 위해서 부가적으로 와이어에 꺾인 판형의 금속을 붙여서, 그 금속판을 base plate에 다시 붙이는 방법을 사용하였으나, 수십 미크론 정도의 마이크로 와이어의 접합에 대한 연구는 미흡하다고 할 수 있다. 최근 들어 독일 BLZ 사에서 개발한 laser droplet weld기술은 간격(gap)이 큰 조인트 부를 접합 하거나 thin foil의 접합에 적용할 수 있다. 또한, Pac Tech 사는 레이저 솔더볼 범퍼(solder ball bumper)를 개발하여 판매하고 있으며, 이를 플립칩(flip chip) 솔더 범핑(bumping)에 사용하고 있다. 영국의 GSI Lumonics 사 등에서는 반도체 소자 등에 적용할 laser fuse processing에 대한 연구 개발이 이루어지고 있으나 상용화 단계에는 이르지 못한 것으로 보인다.

국내 기술 및 연구 현황

레이저 미세 접합기술은 초기 장비의 투자비용이 높아질 수 있으나, 가공 속도가 기존의 방법에 비해서 매우 빠르므로, 생산단가를 낮출 수 있으며, 미세 접합뿐만 아니라 천공, 어블레이션(ablation) 등의 다른 공정에도 응용 하는 것이 가능하므로 산업계 전반에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 또한 이에 대한 이론이 확립되고 해석기법이 개발될 경우, 제품생산 시 최적의 조건을 보다 빠르고 정확하게 설정할 수 있어 생산성 향상과 함께 가공단가의 저렴화에 더욱 크게 기여할 수 있을 것이다.

국내에서는 한국기계연구원 등의 연구소와 이오테크닉스 등의 회사에서 어블레이션 및 마킹(marking)에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 레이저를 이용한 미세 접합기술과 이의 해석, 이론적 모델의 정립 또한 국내의 대학들에서 많은 부분이 연구되어 왔으나, 미세 접합 및 미세 금속용융 입체화에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 레이저빔의 고품질화를 위한 연구는 초기단계로서 향후 선진국과의 기술 격차를 줄이기 위해 많은 연구가 필요하다.

다양한 연구기관에서 소형의 광모듈 패키징을 위

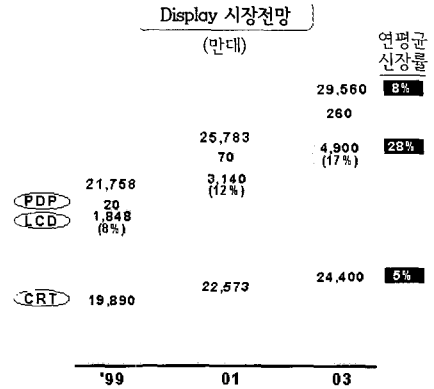


그림 7 디스플레이 시장 전망

한 방법으로 레이저 미세 접합방법을 사용하였으며, 대우전자(주)에서 레이저 솔더링을 이용한 리드프레임 연결방법과 레이저 접합을 이용한 니켈 스트림 연결방법에 대한 특허를 보유하고 있다.

MEMS 패키징 기술은 1999년경부터 연구가 활발히 진행되어 왔으나 레이저를 이용한 MEMS 패키징 기술은 선진국에서도 개념정립단계에 있는 수준이다. 레이저를 이용한 와이어의 접합방법에 대한 연구는 이미 선행연구자들에 의해서 많은 부분이 행하여 졌으나 기존의 방법으로는 접합 가능한 와이어의 크기에 한계가 있다. 따라서 공정의 분석 및 해석을 통해서 이러한 한계를 극복할 수 있는 조건을 제시하기 위한 이론적인 연구가 필요하다. 또한 미국, 일본, 독일 등의 경우 레이저빔의 고품질화를 위한 focusing ability의 향상에 대한 연구는 활발히 진행되고 있는 반면 국내에서는 초정밀 가공을 위한 레이저에 대한 연구는 미진하다. MEMS 패키징에 관한 연구는 수행하고 있는 연구기관들이 있으나 레이저를 이용한 MEMS 패키징 연구는 한국과학기술원을 제외하고는 거의 전무한 상황이다.

반도체의 경박 단소화 추세에 힘입어 특수시장으로 간주되는 플립칩의 수요가 증대하고 있으며, 중요한 범용공정은 진공증착법, 전기도금 방식, 프린팅 방식으로 이루어지고 있다. 선진국에서는 레이저 솔더볼 범핑 기술 채택하고 있다.

한국과학기술원에서는 차세대 신기술 개발사업인

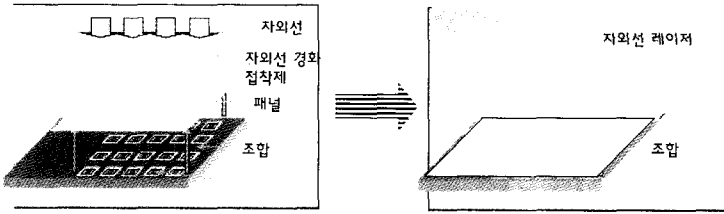


그림 8 디스플레이 장치의 레이저 접합기술 적용 예

발이 필요하다.

극초단 펄스 레이저를 포함하는 첨단레이저를 이용한 미세 가공은 기존의 가공법과 달리 마이크로 크기보다 작은 나노미터 크기의 공간 분해능을 갖고 있으며, 이를 세라믹,

“고기능 초미세 광·열유체 마이크로 부품 기술 개발” 사업의 위탁연구로 레이저 솔더링 공정을 연구하였으며, 한국기계연구원에서는 ‘레이저를 이용한 마이크로 솔더링 기술 개발’ 과제를 수행한 바 있다. 하나기술(주)에서는 중기거점 사업인 ‘광전소자의 첨단 패키징 기술개발’ 사업을 수행하여 광통신 부품 패키징을 위한 레이저 미세 용접시스템을 개발하였다.

유리, 스테인리스, 스틸 및 유기고분자까지 기계적 강도 및 전자 구조 변형으로 인한 손상에 매우 약한 첨단 소재까지 그 적용성이 매우 뛰어나다.

미래 디스플레이 기술은 정보화, 지능화, 친환경적인 기술방향으로 진화되어 가면서, 디스플레이 디바이스나 메모리 반도체 디바이스 등의 가공 조립 공정에서 현재 이미 레이저 미세 부가가공이 적용되고 있다. 그러나 매크로 부품과 마이크로 연결선 간의 접합, 비용을 줄이고 성능을 향상시키기 위해 연결재료를 다양화한 접합, MEMS 등 마이크로 패키징 등을 위한 미세 부가가공은 공정 기술의 한계가 병목되고 있다. 따라서 레이저빔의 초점 크기를 줄여 실리콘 기판의 열영향을 최소화하면서 정확한 접합위치를 제어할 수 있는 레이저 미세 부가가공공정 개발이 이루어지면 금속 접착제 사용으로 많은 부분 해결이 가능할 것이다.

맺 음 말

전 세계 첨단 제조산업 분야 전반에 걸쳐 제품的高품위화(고밀도/고집적/고속화/고정밀화)를 추구하는 경향이 뚜렷해지면서 마이크로 영역에서의 가공기술을 요구하는 분야가 급격히 증가할 것으로 예상된다. 환경친화적인 첨단 레이저 응용 미세 가공기술은 유연성과 접근성이 좋아 IT, BT, NT 등 제품주기가 빠른 분야에서 매우 광범위하게 활용될 것이다.

현재 레이저 응용 미세 가공분야의 주요 관심영역은 수십 마이크로이지만, 향후 미세 가공기술 시장의 요구에 의해 그 크기가 더욱 미세해질 것이 확실시되고 있다. 레이저 미세 가공기술은 특정형상의 치수가 10 μm 이상의 영역에서는 성공적으로 수행되고 있으며, 서브 마이크로 영역은 리소그래피 공정으로 수행되고 있다. 두 공정의 특징치수 공백영역인 10~1 μm 가공영역을 위한 공정 개발에 대한 연구는 국외에서도 몇몇 연구소에서의 신공정 개발 외에 상용화는 미진한 실정이다. 이러한 가공 영역에서 리소그래피 공정의 적용 시 고가의 마스크를 사용하여야 하며 리소그래피공법으로 가공할 수 있는 재료는 한정되어 있으므로 다양한 재료에 대한 가공 공정개

첨단레이저 응용 미세 가공기술 분야의 수준은 아직 초기 단계로서 미국, 일본, 유럽 등지의 여러 선진국에서도 국가적인 지원을 하고 있다. 국내에서도 2004년 올해 과학기술부 지원 특정연구개발사업으로 ‘첨단레이저 응용 미세 가공기술 개발’ 과제가 선정되었다(한국기계연구원 총괄). 이와 같은 국가차원의 집중적인 지원과 체계적인 연구 개발 노력이 원천 기술의 확보를 통한 국내 기업의 국제 경쟁력을 향상시키고 경쟁의 유리한 고지를 선점하는 데 일익을 담당할 것으로 기대된다.