

## 극초단 레이저의 물질작용 및 바이오메디컬 미세가공과 접합공학의 응용

최 해 운

## Ultrashort Laser Material Interaction and Its Biomedical and Joining Applications

Hae Woon Choi

## 1. 서 론

최근 세계적으로 생명공학분야 (BT, Biotechnology)에 대한 관심이 많아지면서 미세가공에 대한 연구도 활발해졌다. 정밀부품 제조 또는 가공을 위해서 대부분 기존 반도체공정으로, 예를 들면 노광기술(Photolithography), 한정되었던 생산기술이 최근에는 노광기술로 1차 가공을 마친 후 비클린룸(non-cleanroom) 가공기술을 병행하여 제품을 생산하는 방법도 많이 사용되고 있다<sup>1,2)</sup>. 비클린룸의 대표적인 가공기술로는 고밀도 에너지원인 레이저빔을 사용하는 형태가 많이 이용되며, 사용되는 파장영역의 범위도 파장이 짧은 자외선(Ultraviolet)에서부터 긴 영역인 적외선 (Infrared)으로 분포되어 있는가 하면, 시간영역이 짧은 펨토초 (femtosecond)에서부터 긴 영역인 나노초(nanosecond)영역에 골고루 분포되어 있다<sup>3)</sup>. 이러한 레이저 중 산업계에서 가장 많은 사용되고 보편화 되어 있는 레이저로는 CO<sub>2</sub>레이저와 Nd:YAG 레이저가 있으며, 특히 최근에는 1064nm 파장을 가지는 Nd:YAG laser를 2차고조파 (second harmonic)형태인 532nm 파장으로 변환하여 단위광자(photon)의 에너지를 높이고 물질에 대한 흡수도 좋게 만든 그린(Green) 레이저가 많이 사용되고 있다. 뿐만 아니라 유리나 투명고분자화합물(Transparent polymers)의 가공 등에는 자외선영역의 레이저도 많이 사용이 되고 있으며, 그 품질 또한 우수함이 실험적으로 많이 입증되어 있다<sup>4-7)</sup>.

최근 광학기술의 눈부신 발달로 레이저펄스의 시간대역(temporal width)을 획기적으로 줄일 수 있게 되어서 극초단영역(Ultrashort)인 피코초( $10^{-12}$ 초) 및 펨토초( $10^{-15}$ 초)까지 압축할 수가 있게 되었고 미세가공 분야에 많이 이용되고 있는 추세이다<sup>8-13)</sup>. 고가의 장비 가격과 가공용 고풍력 레이저의 경우에는 아직 수 kHz에서 수백 kHz의 비교적 저펄스반복률(low pulse

repetition rate)의 한계와 높은 작업자의 숙련도를 요구한다는 것이 단점임에도 불구하고, 극초단 레이저는 미세가공에 기계/전기/화학적 많은 장점을 가지고 있어서 그 활용범위가 확대되고 있고 최근에는 접합공학에의 응용도 많이 보고되고 있다<sup>12,13)</sup>.

본 논문은 극초단레이저(특히 펨토초 레이저를 중심으로)와 금속물질/유전물질과의 상호작용을 전세계적으로 기 발표된 이론 및 실험적 자료에 근거하여서 정리하여 보고, 극초단 레이저의 생명공학용 미세가공의 실제 예와 접합공학의 연구사례를 살펴보고자 한다.

## 2. 본 론

## 2.1 극초단 레이저의 장단점

극초단 레이저의 장점으로서의 첫째, 유전물질(dielectric material)에서는 가공부 주위의 "부수적인 손상(collateral damage)"를 획기적으로 줄일 수 있고, 금속물질(metallic material)에서는 열영향부(heat affect zone)를 최소화하여서 초정밀 가공을 이룰 수 있게 되었다는 것이다<sup>10,14)</sup>. 특히, 금속물질 내부에서의 전자기체(electron gas) 분포함수의 천이전개(transient evolution) 영역의 이론적 연구에 따르면, 피코초이하(picosecond)의 가공에서 열영향부의 영향이 극소화되는 많은 효과가 보고 되었다<sup>14-17)</sup>. 둘째, 극초단 레이저는 순간정점파워밀도가 아주 높고 ( $P_{peak}$ )  $10^{16}W/cm^2$ , 특히 펨토초레이저의 경우 고밀도 레이저에너지의 물질내의 투입속도가 전자(electron)와 격자이온(lattice-ion) 시스템의 평형화시간(통상적으로 1~10피코초)보다 빨라서 이웃격자(neighboring lattice)와의 열전도 현상이 거의 무시될 수 있게 에너지를 전달 할 수 있다<sup>14)</sup>. 셋째로, 극히 짧은 레이저빔의 상호작용은 나노초( $10^{-9}$ 초) 레이저에서 흔히 발생하는 유체유동학적 현상(hydrodynamics)들이 현저히

저하 됨에 따라서 정밀가공에 많은 장점을 가질 수 있으며<sup>8)</sup>, 마지막으로 극초단 레이저는 고반복률 (high frequency)과 긴펄스(long pulse)에서 흔히 발생하는 이전 펄스에 의한 플라즈마 레이저빔 산란현상(plasma shielding or light scattering by plasma)을 현저히 줄일 수 있는 장점이 있다<sup>8)</sup>. 이러한 장점에 힘입어 극초단 레이저는 정밀미세가공을 가능하게 해주었고, 생명공학(BT)과 나노공학(NT)에 광범위하게 이용되고 있다(그림 1).

하지만, 레이저빔을 펨토초영역으로 압축하기 위해서는 평면적으로 파장영역의 폭이 커져야 하는데, Gaussian 형태의 빔의 경우에는 식 (1)에서 나타난 것과 같이 이론적으로 TBWP(Time Bandwidth product)가 0.44가 되어야 하며, 이를 150펨토초와 775nm 파장의 레이저의 경우에 적용하였을 때 이론적으로 6nm (실제로 50nm)의 파장폭을 가져서 단색광 (mono-chromatic)으로서의 장점을 상실하게 된다. 또한 레이저빔의 파장이 적외선 영역인 경우에는 파장의 폭이 더 커져야 하며, 이를 회피하기 위해서는 그림 2에서 예시된 것 처럼, 1피코초 이하로 펄스를 압축하지 말아야하는 딜레마에 빠지게도 된다. 또한, 높은 장비가격 또한 아직 극복해야할 과제이며, 극초단 레이저와 물질사이의 상호관계에 대한 체계적인 연구도 계속 되어야 할 것으로 판단된다.

$$\Delta \nu \Delta t = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda \Delta t \geq 0.44 \quad (1)$$

여기서, c=빛의 속도, v=레이저 빔의 진동수, λ=레이저빔의 파장, t=압축시간

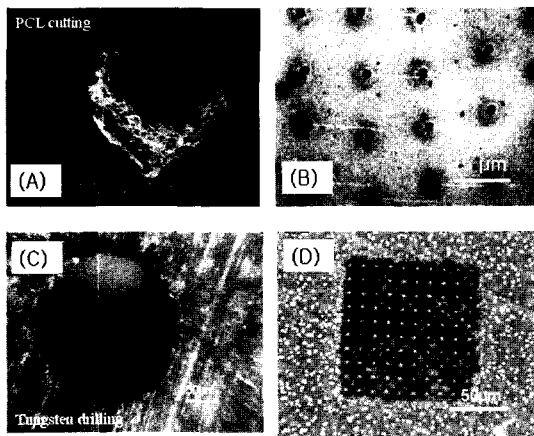


그림 1 펨토초레이저를 이용한 BT적용 예 (A) PCL(Polycaprolactone)가공 (B) DNA stretching용 미세구멍가공 (C) 텅스텐 미세구멍가공 (D) Cell trapping용 미세구멍가공

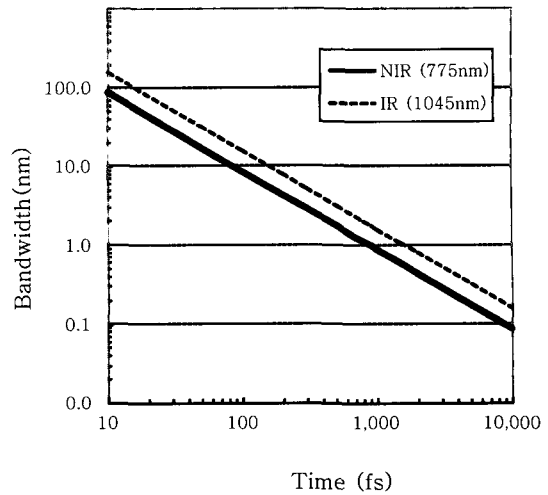


그림 2 극초단 레이저의 대역폭 한계

## 2.2 극초단 레이저 빔과 금속물질 (metallic material) 의 상호작용

그림 3에서 보여진 것과 같이, 극초단 레이저가 금속물질표면에 조사(irradiation) 되었을 때 레이저빔은 1차적으로 역제동복사(Inverse Bremsstrahlung)에 의해서 금속내부와 표면에 존재하는 자유전자 (free electrons)에 의해서 흡수되고, 흡수된 에너지는 음향양자(phonon)에 의해서 격자(lattice)로 전해지는 것이 일반적으로 받아들여지는 정설이다<sup>11,18,19)</sup>. 특히, 피코초이하로 조사된 레이저 에너지는 나노초 레이저에 비해서 잔류열영향 (residual thermal effect)이 현저히 적으며, 연구에 의하면 나노초 레이저에 비해서 펨토초레이저의 열영향부(heat affect zone)는 수백배 정도까지 작아지는 것으로 밝혀졌다<sup>20,21)</sup>. 조사된 레이

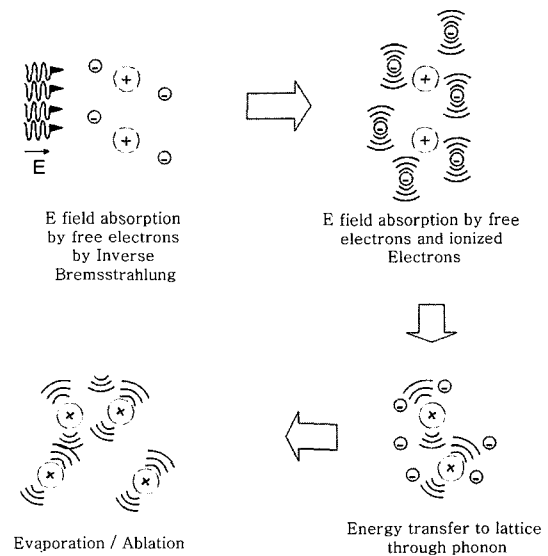


그림 3 펨토초레이저의 금속물질흡수 모식도

저는 물질표면 또는 내부를 가공(ablation)하거나 손상(damage)시키는데, 이때 레이저빔의 반사는 입사각, 레이저빔의 파장, 물질의 굴절률(index of refraction), 전도도 및 표면의 구조에 따라서 큰 차이를 보이게 된다. 일반적으로 물질의 굴절률(complex refractive index)은 물질의 조성과 크리스탈의 구조, 전자밴드갭과 분자의 진동-회전 공진 등에 따라서 영향을 받게 된다. 하지만 펨토초 레이저의 경우에는 재료의 물성치나 표면의 구조는 크게 중요치 않으며<sup>18)</sup> 오히려 펨토초 레이저의 높은 순간정점에너지와 다광자흡수(multiphoton absorption) 현상에 영향을 많이 받게 된다. 특히 같은 금속 물질이나 유전물질의 경우 재질에 따른 흡수도가 거의 차이가 나지 않는 반면, 표면의 조도(roughness)나 재료표면의 산화에 더 민감히 반응을 하는 것으로 알려져 있다.<sup>19,20)</sup>

바이오칩 등의 몰드로서 사용되기에 적합한 금속이나 탄화물의 경우, 화학에칭공정이나 반도체공정 또는 기계가공으로 제작하는데 어려움이 많았다. 예를 들면, Ti-Ni합금은 기계가공 중 변형으로 인한 경화(strain hardening)를 통해서 원소재의 기계적 성질을 잃어버림과 동시에 공구의 수명을 단축시키게 되며, 절삭공정 시에 응력으로 인해 조성된 마르텐사이트 조직으로의 변화는 공구와 물질사이의 불필요한 마모를 일으키게 된다<sup>25)</sup>. 이와같은 특수 응용분야에 펨토초레이저가 사용됨으로서 그 효과가 클 것으로 판단된다.

### 2.3 극초단 레이저 빔과 유전물질 (dielectric material) 상호작용

금속물질에 비해서 유전물질은 극초단 레이저 가공시 약간의 다른 물리적 광학적 특성을 가지고 가공이 진행된다. 일반적으로 금속성 물질은 자유전자(free electrons)의 밀도가 상당히 높은 반면, 유전물질에 있어서는 레이저빔을 흡수할 수 있는 자유전자의 밀도가 극히 낮다. 따라서 유전물질 가공 시에는 물질 내에서 레이저빔을 흡수 할 수 있는 자유전자의 생성이 선행되어야 한다. 극초단레이저가 물질에 조사되면, 입사된 에너지의 일부가 유전물질을 이루는 원자를 이온화 시키고; 원자가 전자형태 (valence band)에서 전도전자형태 (conductivity band)로 천이되고; 이때 발생하는 자유전자를 통해서 에너지가 흡수가 되는 메커니즘을 가지며, 이로 인해 일반적으로 유전물질 가공 시에 금속물질 가공시보다 높은 에너지원을 요구하고 있다.<sup>17,26,27)</sup>

금속물질은 조사된 레이저빔을 대부분 반사하는 반면, 유전물질은 레이저빔을 통과시킨다. 이때 조사된

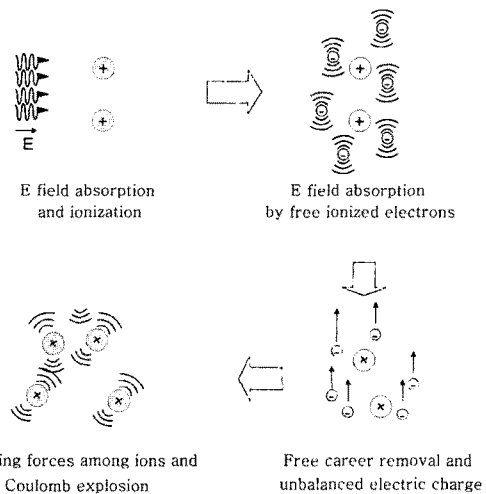


그림 4 펨토초레이저의 유전물질내에 흡수과정

레이저 빔은 그림 4에서 나타난 바와 같이 유전물질내부의 원자와 상호작용하여 새로운 자유전자를 발생시키거나 표면에 전기적 중립으로 있는 물질을 이온화 시켜서 화학적결합(chemical bonding)을 끊거나 양전하로 대전된 이온의 상호반발력으로 인해서 가공을 하게 되는데, 이러한 현상은 충격쿨롬폭발 (Impulsive Coulomb Explosion, ICE)라고 알려져 있다<sup>28)</sup>. 특히, 가시광선(VIS) 및 근적외선(NIR) 영역의 레이저 빔이 투명한 유전물질에 조사된 경우에는 광자가 비선형 흡수가 이루어지게 되는데, 이때 레이저 에너지가 원자가 전자형태에서 전도전자형태로 에너지가 여기(excite) 되게 된다. 이때에 광-전리(photoionization) 및 애벌란시-전리avalanche ionization)가 발생하게 되고, 이러한 비선형 이온화과정이 발생하여 자유전자 밀도가 높은 고밀도레이저 플라즈마가 상태가 된다. 또한, 뒤이은 전자-이온간의 에너지 안정화가 일어나는 시간은 레이저와 물질의 상호 관계시간보다 훨씬 더 긴 시간이 소요되게 된다<sup>8)</sup>.

극초단 레이저와 유전물질의 상호작용의 특징 중의 또다른 하나는 다중광자효과 (multiphoton effect)라 할 수가 있다 (그림 5). 유전물질 가공시 레이저의 높은 순간정점파워밀도 때문에 다량의 광자 (multiple photons)가 한 개의 원자를 자극할 수가 있다. 레이저빔이 가지는 에너지는 파장에 따라서 달라지며 일반적으로,  $E = 1.245/\lambda$ 로 표현된다. 775nm의 레이저의

표 1 고분자화합물 원자간 결합에너지<sup>31)</sup>

Polymer bonds	C-N	C-H	C=C	O-O	C-C	N-N	H-H
Bond energy (eV)	3.04	4.30	8.44	5.12	3.62	9.76	4.48

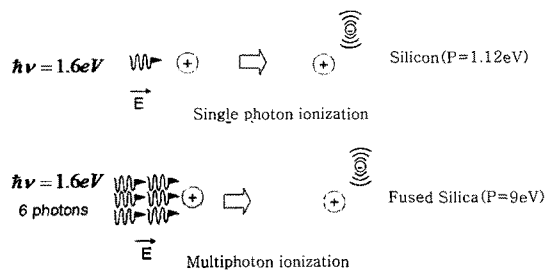


그림 5 다중광자 흡수 (Multiphoton effects)

경우 1.6eV의 에너지를 가져서 비교적 대역간격 (bandgap)이 낮은 실리콘의 경우 (1.12 eV)에는 쉽게 초기 이온화가 가능하지만, 대역간격이 비교적 높은 (> 3eV) 퓨즈실리카 같은 (~9eV) 물질의 경우는 다량의 광자의 소입을 필요로 한다<sup>29,30</sup>. 또한 바이오메디컬 용도로 많이 사용하고 있는 PMMA(poly-methyl methacrylate)나 PDMS(poly-dimethylsiloxane) 등의 고분자화합물의 경우 탄소(Carbon), 수소 (Hydrogen), 질소 (Nitrogen), 산소(Oxygen)등의 복잡한 분자결합으로 이루어져 있는 경우가 많은데, 이때의 화학적결합 에너지(bond energy)를 끊어내기 위해서는 표1에서 예시된 바와 같은 높은 다중광자의 에너지가 요구가 된다.

2.4 다중펄스의 효과 및 가공임계치

다중펄스(multiple pulses)의 경우의 레이저빔 흡수도는 단펄스(single pulse)에 비해 좀 더 복잡한 메커니즘을 가지는데, 이는 선행펄스가 표면의 조도를 변화시킴으로 인해서 따르는 펄스의 흡수를 좀 더 좋게 하는 효과를 볼 수 있는데 (그림 6), 이를 잉큐베이션효과 (incubation effect)라고 하며, 일반적으로 유전물질에서 그 효과가 큰 것으로 알려져 있지만, 금속물질에서도 그 효과가 있음이 규명되었다<sup>2,23,32</sup>. 이러한 표면조도의 변화가 레이저가공 및 표면손상의 임계값 (ablation threshold or damage threshold)변화의 원인임이 이론적/실험적으로 연구되었는데<sup>32,33</sup>, 낮아진

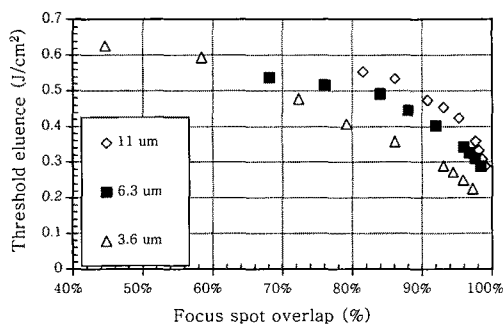


그림 6 금속박막 (ITO)의 다중펄스 효과<sup>2)</sup>

임계값의 원인은 흔히 표면의 축적된 손상 또는 컬러센터형성 (color center formation)이 그 원인으로 볼 수 있다. 일례로, LCD(Liquid Cristal Display) 나 OLED(Organic Light Emitting Diode)에서 흔히 사용되는 박막인 ITO (Indium Tin Oxide)의 경우 200펄트초로 조사된 단펄스의 임계값에 비해서 1000개의 펄스가 조사되었을 때, 임계값이 23%나 감소함이 실험적으로 입증되었다<sup>2)</sup>.

미세정밀가공을 위해서는 물질의 광학적 특성을 아는 것이 중요하다. 이러한 광학적 특성을 통해서 알려진 가공임계에너지는 물질에 조사되어야 할 에너지양에 대한 기준을 마련해 주고, 가공물질의 품질과 다층레이어 가공시 선택가공(selective ablation)을 마련해줄 수 있는 계기가 된다. 유전물질의 가공임계에너지밀도에 대해서 많은 연구가 되어 왔고, 일반적으로 그 범위가 5.6J/cm<sup>2</sup> 까지 분포되어 있으며<sup>34,35</sup>, 특히 바이오메디컬 분야에 많이 쓰이는 고분자물질인 PMMA의 경우는 0.355J/cm<sup>2</sup> <sup>36</sup>, 자외선레이저(Ultra Violet laser)의 광학용렌즈로 사용되는 CaF<sub>2</sub>의 손상임계에너지는 1.5J/cm<sup>2</sup> <sup>37</sup> 인 것으로 실험적으로 조사되었다. 이러한 물질들의 손상 및 가공임계에너지의 상대적 분포가 그림 7에 도시되어 있다.

2.5 극초단레이저의 미세접합의 응용가능성

펨토초레이저를 이용하여서 미세접합에 응용하려는 많은 노력이 있었다<sup>12,38,39</sup>. 극초단 레이저의 장점 중의 하나인 높은 순간정점에너지는 가공에서의 효과는 크지만, 물질을 기화시켜 재료의 소모를 가져오므로 통상적인 전도열에 의한 용접 (Conduction welding)이나 키홀(key hole) 용접원리를 이용하여 응용되기에는 많은 어려움을 수반한다. 이러한 한계성 때문에 금속 분야의 접합에는 보조시스템 등으로만 이용되는 등 제한된 분야에만 시도되었다. 일례로서 단분자화합물(monomer)

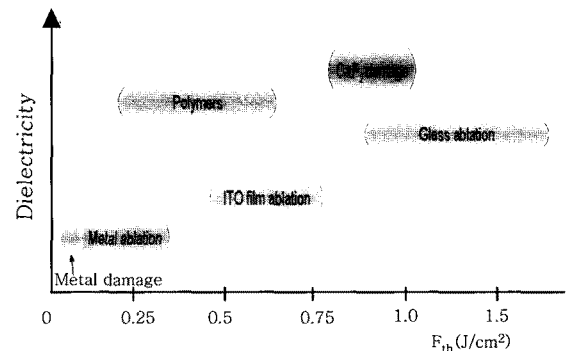


그림 7 레이저조사 물질의 가공 및 손상 임계값 분포 <sup>34,35,36,37</sup>

의 특성을 다광자(multiple photons)를 이용하여 고분자화합물 (polymerization)으로 바꾸는 다광자고분자화 (multiphoton polymerization)이라 할 수 있으며 이는 광크리스탈(photonic crystal) 제작에 많이 응용되었다<sup>40,41)</sup>. 또한 텅스텐가스 분위기에서 레이저를 특정부분 조사하여서 텅스텐분자를 금속표면에 적층하는 방법도 시도가 되었다<sup>42)</sup>.

하지만, 펄초레이저를 사용한 가장 획기적인 결과는, 기존용접방식에서는 불가능하였던 특수용접분야에 펄초레이저가 사용된 경우, 특히 유전물질이나 반도체물질 접합이 가능하게 되었다는 것이다<sup>12)</sup>. 일반적인 Nd:YAG 레이저나 CO<sub>2</sub> 레이저의 경우는 레이저빔의 물질흡수도에 대한 선택도(Selectivity)가 좋지 못하여서 물질 전체가 용융이 되거나 아예 접합이 되지 않는 경우가 많았지만, 펄초레이저를 사용함으로써 용접의 선택도가 많이 좋아지게 되었다. 이러한 접합이 가능하게 된 기본 원리는 순간정점에너지밀도가 높은 펄초레이저가 투명한 유전물질 내부의 좁은 영역에 초점화시킨 후 비선형흡수로 인한 다광자흡수 또는 전도흡수 (multi-photon and/or tunneling absorption)가 일어나서 유전물질을 이온화시키기에 충분한 에너지가 공급이 되기 때문이다. 이온화과정에서 생성된 자유전자들이 뒤 따르는 레이저빔을 흡수하기 좋은 상태로 물질의 상태를 바꾸어 주고, 뒤따른 레이저빔이 흡수되어서 용융풀 (liquid pool)을 생성하게 된다<sup>12,13)</sup>. 비슷한 원리를 이용한 미세접합의 응용이 보고 되고 있으며 앞으로 많은 연구가 이루어질 것으로 본다.

### 3. 결론 및 토의

펄초를 비롯한 극초단레이저는 상용화 이래로 미세가공분야에 많이 사용되어 왔다. 가공시의 최소 열영향부 발생, 높은 순간정점파워밀도 및 유체유동학적 현상의 최소화의 장점으로 인해서 생명공학, 정보통신, 나

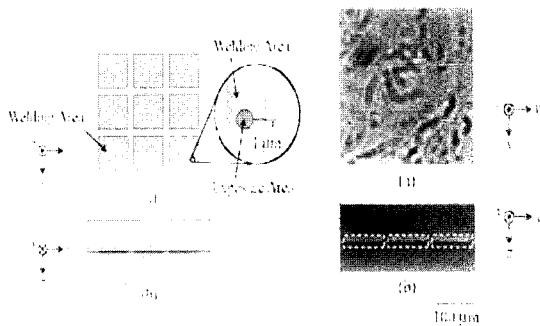


그림 8 펄초레이저를 이용한 투명유전물질 접합의 예<sup>13)</sup>

노공학 등에 광범위 하게 응용이 되어왔다. 특히, 기존의 레이저로 가공이 어려웠던 유전물질에 대한 정밀가공이 가능해지면서 그 응용의 범위가 넓어지게 되었고, 아울러 가공제품의 정밀화가 이루어지게 되었다. 최근 펄초레이저를 이용한 가공기술은 단독 또는 기존 반도체공정기술과 합쳐진 하이브리드 형태로도 많이 응용이 되고 있다. 펄초레이저는 금속물질 가공에는 열전도에 의한 제품의 손상을 최소화 할 수 있는 반면, 유전물질에서는 특유의 높은 순간정점에너지밀도로 인해서 이온화와 다중광자흡수에 의한 물질의 상호작용으로 가공물질의 한계를 받지 않게 되었다. 최근의 기술은 펄초레이저의 응용이 접합공학의 영역으로까지 확대되었으며 앞으로의 적용에 많은 기대효과가 예상된다.

### 후 기

본 연구는 계명대학교 신진교수 지원 연구비에 의하여 연구되고 정리되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. C. Molpeceres, S. Lauzurica, J. L. Ocana, J. J. Gandia, L. Urbina, and J. Carabe, "Microprocessing of ITO and a-Si thin films using ns laser sources," *J. Micromech. Microeng.*, **15**: 1271-1278, 2005
2. H. Choi, D. Farson, J. Bovatsek, A. Arai, and D. Ashkenasi Direct-write patterning of indium-tin-oxide film by high pulse repetition frequency femtosecond laser ablation, *Applied Optics*, **46(23)**: 5792-5799, 2007
3. B. Stuart, M.F., A. Rubenchik, B. Shore, and M. Perry, Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses. *Physical Review Letters*, **74(12)**: 2248-2252, 1995
4. J. Ihlemann, a.B.W.-R., Excimer laser micro machining of inorganic dielectrics. *Applied surface science*, **106**: 282-286, 1996
5. G. Kopitkovas, T.L., C. David, A. Wokaun, and J. Gobrecht, Surface micromachining of UV transparent materials. *Thin solid films*, **453**: 31-35, 2004
6. A. Glover, E.I., and J. Piper, High speed UV micro machining of polymers with frequency doubled copper vaport lasers. *IEEE journal of quantum electronic*, **1(3)**: 830-836, 1995
7. K. Naessens, H.O., P. Daele, and R. Baets, Flexible fabrication of microlenses in polymer layers with excimer laser ablation. *Applied surface science*, **208-209**: 159-164, 2003
8. X. Liu, D.D., and G. Mourou, Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses. *IEEE journal of quantum electronics*, **33(10)**: 1706-1716, 1997
9. B. Stuart, M.F., A. Rubenchik, B. Shore, and M.

- Perry, Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses. *Physical Review Letters*, **74**(12): 2248-2252, 1995
10. S. Nolte, C.M., H. Jacobs, A. Tunnermann, B. Chichkov, B. Wellegehausen, and H. Welling, Ablation of metals by ultrashort laser pulses. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14**(10): 2716-2722, 1997
  11. C. Momma, S.N., B. Chichkov, F. Alvensleben, and A. Tunnermann, Precise laser ablation with ultrashort pulses. *Applied surface science*, **109**(110): 15-19, 1997
  12. T. Tamaki, W. Watanabe, J. Nishi and K. Itoh, Welding of Transparent Materials Using Femtosecond Laser Pulses, *Japanese Journal of Applied Physics*, **44**(22): 687-689, 2005
  13. T. Tamki, W. Watanabe, K. Ioh, Laser micro-welding of transparent materials by a localized heat accumulation effect using a femtosecond fiber laser at 1558nm, *Optics Express*, **14**(22): 10468-10476, 2006
  14. T. Itina, J.H., Ph. Delaporte, and M. Sentis, Modeling of metal ablation induced by ultrashort laser pulses. *Proceedings of symposium H on photonic processing of surfaces - Thin films and devices*, E-MRS: 453-454, 2004
  15. F. Vidal, T.J., S. Laville, O. Barthelemy, M. Chaker, B. LeDegoff, J. Margot, and M. Sabsabi, Critical-point phase separation in laser ablation of conductors. *Physical Review Letters*, **86**(12): 2573-2576, 2001
  16. N. Bulgakova, Possibility of rarefaction shock wave under short pulse laser ablation of solids. *Physical Review E*, **60**(4): R3498 - R3500, 1999
  17. E. Gamaly, A.R., B. Luther-Davies, and V. Tikhonchuk, Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics. *Physics of plasma*, **9**(3): 949-957, 2002
  18. L. Schlessinger, J. W. Inverse-bremsstrahlung absorption rate in an intense laser field. *Physical Review A*, **20**(1934-1945), 1979
  19. S. Rand, Inverse Bremsstrahlung with High-Intensity Radiation Fields. *Physical Review Letters*, **136**(1B): B231-B237, 1964
  20. S. Valette, R.H., N. Huot, E. Audouard, and R. Fortunier, 2D Calculations of the thermal effects due to femtosecond laser-metal interaction. *Applied surface science*, **247**: 238-242, 2005
  21. I. Burakov, N.B., R. Stoian, A. Rosenfeld, and I. Hertel, Theoretical investigation of material modification using temporally shaped femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. A*, **81**: 1639-1645, 2005
  22. N. Singh, D.A., J. Schiffrin, and D. Doerr, Femtosecond laser production of metal surfaces having unique surface structures that are broadband absorbers. *Journal of Laser Applications*, **18**(3): 242-244, 2006
  23. S. Kirkwood, A.V.P., Y. Tsui, and R. Fedosejevs, Single and multiple shot near-infrared femtosecond laser pulse ablation thresholds of copper. *Appl. Phys. A*, **81**(729-735), 2005
  24. Y. Jee, M.B., and R. Walser, *Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces*. *Optical physics*, **5**(3): 648-659, 1988
  25. H. Huang, H.Z., and Y. Liu, Experimental investigations machinability of Ni50.6Ti49.4. *Smart Materials and Structures*, **14**: S297-S301, 2005
  26. P. Mannion, J.M., E. Coyne, G. O'Connor, and T. Glynn, The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air. *Applied surface science*, **223**: 275-287, 2004
  27. H. Choi, J. Johnson, J. Nam, D. Farson, J. Lannutti, Structuring electrospun polycaprolactone nanofiber tissue scaffolds by femtosecond laser ablation. *Journal of Laser Applications*, 2007
  28. C. Schaffer, A.B.a.E.M., Laser induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses. *Meas. Sci. Technol.*, **12**: 1784-1794, 2001
  29. M. Lenzner, J.K., S. Sartania, Z. Cheng, C. Spielmann, G. Mourou, W. Kautek, and F. Krausz, Femtosecond Optical Breakdown in Dielectrics. *Physical Review Letters*, **80**(18): 4076-4079, 1998
  30. A. Zoubir, C.R., R. Grodsky, K. Richardson, M. Richardson, T. Cardinal, and M. Couzi, *Laser-induced defects in fused silica by femtosecond IR irradiation*. *Physical Review B*, **73**: 224117(5), 2006
  31. C. Aguilar, Y.L., S. Mao, and S. Chen, Direct micro-patterning of biodegradable polymers using ultraviolet and femtosecond lasers. *Biomaterials*, **26**: 7642-7649, 2005
  32. A. Rosenfeld, M.L., R. Stoian, and D. Ashkenasi, Ultrashort laser pulse damage threshold of transparent materials and the role of incubation. *Appl. Phys. A*, **69**(Suppl.): S373-S376, 1999
  33. D. Ashkenasi, M.L., R. Stoian, and A. Rosenfeld, Surface damage threshold and structuring of dielectrics using femtosecond laser pulses: the role of incubation. *Appl. Surface Sci.*, **150**: 101-106, 1999
  34. S. Campbell, F.D., D. Hand, and D. Reid, Single-pulse femtosecond laser machining of glass. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **7**: 162 - 168, 2005
  35. A. Ben-Yakar, A.H., J. Ashmore, R. Byer, and H. Stone, Thermal and fluid processes of a thin melt zone during femtosecond laser ablation of glass : the formation of rims by single laser pulses. *J. Appl. Phys. D*, **40**: 1447-1459, 2007
  36. D. Gomez, I.G., I. Lizuain, and M. Ozaita, Femtosecond laser ablation for microfluidics. *Optical engineering*, **44**(5): 051105:1-8, 2005
  37. F. Costache, a.J.R., Femtosecond laser induced Coulomb explosion from calcium fluoride. *Thin solid films*, **453**: 334-339, 2004

38. Chen J, Farson DF, Rokhlin SI, Femtosecond laser stimulation of electrical discharges in submicron and nanoscale gaps, APPLIED PHYSICS LETTERS, **90(20)**, 201505, 2007
39. D. Farson, H. Choi, S. Rokhlin, Electrical discharges between platinum nanoprobe tips and gold films at nanometre gap lengths, Nano-technology, **17**, 132-139, 2006
40. Cumpston et al, Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication, Nature **Vol. 398**, 51-53, 1999
41. <http://www.laser-zentrum-hannover.de>
42. H. Zhang, M. Tang, J. McCoy, and T. Her, Deposition of tungsten nanogratings induced by a single femtosecond laser beam, Optical Express **15(10)**, 5937-5947, 2007



- 최해운(崔海雲)
  - 1972년생
  - 계명대학교 기계자동차공학부
  - 레이저용접, 레이저미세가공
  - e-mail : hwchoi@kmu.ac.kr
-