

# 극초단 펄스 레이저를 이용한 접합 기술 동향

최지연, 서정 | 한국기계연구원

## [요약문]

최근 극초단 펄스(ultrashort pulse) 레이저의 고출력화와 안정화가 실현되면서 본격적인 산업적 응용을 지향하는 상용 제품들이 쏟아져 나오고 있다. 극초단 펄스 레이저의 특성을 가장 잘 활용할 수 있는 적용 분야 중 하나가 유리 기판을 비롯한 투명 광학재질과 취성재료의 가공이며, 이는 시장 전망이 밝은 디스플레이와 의료 산업과 맞물려 큰 주목을 받고 있다. 본 고에서는 현재 큰 관심을 받는 분야 중 하나인 극초단 펄스 레이저를 이용한 유리 기판의 접합 기술의 원리와 최신 해외 연구 동향에 대해 살펴보고, 앞으로의 발전 방향에 대해 전망 하고자 한다.

## 1. 서론

경박단소(輕薄短小)를 추구하는 휴대기기의 시장 증대와 더불어 고집적화 기판의 수요가 늘어나면서 나노초(nano second) 기반 레이저 가공기술이 담보하는 수 마이크로미터급의 정밀도를 넘어 서브 마이크로미터급 이상을 요구하는 현재의 레이저 가공 기술로는 극복하기 힘든 분야가 늘어나게 되었다. 이로 인해 극초단 펄스 레이저기반 정밀 가공기술 수요가 급격하게 증가하면서 세계적인 메이저급 레이저 회사들은 이런 요구에 응답하여 높은 신뢰도를 보장하는 산업용 고출력 극초단 피코초(pico second)/펨토초(femto second) 레이저들을 앞다투어 상용화하고 있다. 레이저 개발과 레이저 가공기술의 역사를 살펴보면 이러한 흐름을 자연스럽게 예측할 수 있다. 1960년 최초의 레이저가 발명된 이래 약 10여년 동안 지난 세기를 넘어 현재까지도 활발히 이용되는 산업용 레이저기술의 근간이 되는 기초 기술이 발전하였다. 예를 들어 펄스 레이저를 구현하는데 필수가 되는 기술인 Q-스위칭(Q-switching)과 모드잠금(mode locking) 기술이 1960년대 중반에 이미 개발되어 최초의 나노초급 및 피코초급 레이저가 이 시기에 구현되었다. 이러한 바탕 위에서 연속파(CW, continuous wave) 레이저 및 나노초급 레이저를 기반으로 한 레이저 가공기술이 비약적으로 발전하였고, 1980년대와 90년대를 이끈 용접, 접합, 절단, 천공, 미세 가공 등의 레이저 가공 기술은 지난 세기를 넘어 오늘날까지 유용하게 사용되고 있다. 극초단 펄스 레이저의 경우, 1985년 G. Mourou와 D. Strickland가 발표한 처프 펄스 증폭(Chirped Pulse Amplification, CPA)기술을 통해 고출력 증폭이 가능해지면서 극초단 레이저 펄스와 물질의 상호작용에 대한 연구가 폭발적으로 증가하고, 이를 바탕으로 산업 분야에 적용하려는 시도가 끊임없이 연구되었다. 이와 같은 사례를 보면 최근 극초단 펄스 레이저의 산업화 추세는 필연적인 흐름이라고 할 수 있겠다.

본 고에서는 극초단 펄스 레이저의 어떤 가공 특성이 차세대 정밀 레이저 가공기술의 근간으로 부상하게 했는지 그 이유를 살펴보고 극초단 펄스 레이저의 특성이 큰 장점을 가질 수 있는 응용분야 중 하나인 유리 기판 접합에 대해서 살펴보고 최신 연구 동향과 앞으로의 기술 전망에 대해 살펴보도록 한다.



## 2. 극초단 펄스 레이저 기반 접합기술의 원리

나노초급 이상의 긴 펄스 레이저를 이용한 가공에 비해 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공의 장점은 다음과 같다.

첫째, 극히 짧은 펄스폭이 시간적, 공간적 분해능을 높여 광열현상을 이용한 나노초/연속발진 레이저 가공에서 이룰 수 없었던 회절한계에 근접하는 고정밀도와 고품질을 제공한다. 이는 다음과 같은 기작(mechanism)에 의해 가능하다. (i) 전자-격자간의 열전달 시간보다 짧은 펄스폭의 레이저를 이용하므로 광자-전자 사이에 에너지가 흡수되는 과정이 벌크로 열이 전달되는 과정과 분리되어 다루어질 수 있다. (ii) 광자에너지의 흡수영역을 공간적으로 극히 작은 초점에서의 부피로 한정시킴으로써 공간 분해능을 향상시킨다.

따라서 레이저가 조사되는 영역 주변부의 온도가 에너지 전달로 인해 열변형을 일으킬 수 있는 온도 이상으로 급상승하기 전에 에너지가 효과적으로 흡수되고 필요한 가공이 일어나므로 레이저 조사로 야기되는 가공 주변부의 불필요한 열적 변형과 미세 균열을 배제할 수 있다.

둘째, 높은 레이저 강도가 물질 내에서 비선형 광학 흡수를 일으키므로 유리 기판을 비롯하여 기존의 나노초급 레이저가 쉽게 가공할 수 없었던 투명재질과 취성재료 등을 가공할 수 있다는 점이다. 극초단 펄스 레이저는 집속렌즈를 통해  $1\text{TW}/\text{cm}^2$  이상의 높은 강도를 쉽게 생성할 수 있으므로 유리 기판 내부에서 집속된 초점 부근에서만 충분한 비선형 광학 흡수를 유도한다.

이러한 비선형 광학 흡수는 선형 흡수가 없는 투명 광학 재질에서 주요한 광자 흡수 기작이 되며, 흡수가 일어난 부분은 물질의 구조 변화를 일으키게 된다. 여기서 주목할 점은 물질의 흡수율을 조절하는 요소가 물질뿐만 아니라 레이저 강도라는 외부 요인에 의해 조절된다는 점이다. 따라서 레이저의 강도 변화를 통해 물질의 국소적 흡수율을 조절할 수 있으므로 레이저-물질 상호작용을 효과적으로 제어할 수 있게 된다. 따라서 극초단 펄스 레이저는 최근 각광받는 디스플레이, 정보통신, 의/광공학 분야에서 요구하는 유리재질 및 세라믹 유리, 광학 폴리머 정밀 가공에 있어 가장 이상적인 광원이라고 할 수 있다. 나아가 열거된 장점들을 기반으로 한 투명 재질의 효과적인 가공 특성은 새로운 응용분야들을 창출하고 있는데, 본 고에서 살펴보고자 하는 유리 접합 역시 이러한 새로운 응용분야 중의 하나이다.

극초단 펄스 레이저를 이용한 유리 접합이 가지는 장점은 다음과 같다. (i) 접착물질(adhesive agent)이나 중간층(interlayer)을 이용한 방법에 비해 유연한 적용이 가능하며 접착물질로 유발되는 오염을 제거할 수 있다. (ii) 직접 묘화법(direct writing)을 이용하므로 필요한 부분에만 국부적으로 적용할 수 있으며, 복잡한 회로나 구조물을 따라서 패터닝하는 것도 가능하다. (iii) 비접촉(contactless) 방법이며 열이나 전기를 가하지 않아 열 및 전기 충격에 민감하여 anodic bonding 등을 적용할 수 없는 소자들에 적용 가능하며, 많은 경우 공정의 순서에 상관없이 적용 가능하다. (iv) 기존의 나노초급 레이저 접합은 선형 흡수를 이용하므로 투명재질-불투명 재질 간의 접합만 가능했으나 극초단 펄스 접합은 비선형 흡수를 기반으로 하므로 투명-투명재질, 투명-불투명 재질 모두 가능하며 일반적인 나노초급 레이저 접합에 비해 균열(crack)이나 뒤틀림 발생이 없고, 가공부위가 최소화된다.

레이저를 이용한 유리 접합은 사용되는 레이저의 반복률이나 접합재질에 따라 다양하게 분류할 수 있다. 먼저, 약 200kHz 근방을 기준으로 1~200kHz 의 낮은 반복률과 200kHz 의 높은 반복률 범위로 나뉘는데, 이는 펄스간의 시간 간격이 집속된 초점 부피 안의 열방출 시간과 비교하여 길거나 짧은 경우를 고려한 것이다. 낮은 반복률에서는 물질의 변화가 하나의 펄스에 의해 생성되고, 높은 반복률에서는 다수의 펄스에 의한 열누적현상이 영향을 미친다.

## 3. 극초단 펄스 레이저 접합 기술의 연구 개발 동향과 전망

이제 극초단 펄스 레이저를 이용한 유리 접합 기술에 대해 몇몇 대학을 비롯한 주요 연구기관에서 발표된 연구 결과들을 중심으로 살펴보고자 한다. 이 분야의 연구 방향은 크게 (i) 레이저 반복률 등 가공 변수(parameter)에 따른

접합 특성 및 효율에 대한 연구, (ii) 가공 재질에 따른 접합 특성에 대한 연구, (iii) 가공 부위의 열해석 등으로 나누어볼 수 있다.

현재 가장 많이 연구된 사례는 유리-유리 기관 접합이며 유리-반도체, 유리-금속 접합은 접합시 생성되는 seam의 불균일한 분포로 인해 아직은 높은 접합 신뢰도를 보여주지 못하고 있다. 주요 연구 그룹은 일본 오사카 대학의 Itoh 교수팀과 독일 RWTH Aachen의 Horn 박사 팀이며 2005~6년부터 꾸준히 여러 편의 연구 논문을 발표하고 있다.

한편 상용 펄초 광섬유 레이저를 개발하고 현재 이분야 시장을 선도하고 있는 Imra사에서 유리 기관의 절단과 접합 응용 가능성에 대한 특허를 출원하고 시장 선점을 위해 노력하고 있다. 하기에서 자세한 내용에 대해서 논의하도록 하겠다.

### 3.1 해외의 극초단 펄스 레이저 기반 접합기술 연구 동향

가장 먼저 펄초 레이저를 기반으로 하는 유리 접합에 대한 연구결과를 발표한 그룹은 일본 오사카 대학의 Itoh 교수팀으로, 2005년 부터 다양한 연구결과들을 꾸준히 발표해오고 있다<sup>[1-4]</sup>. 발표된 논문을 중심으로 살펴보면 800nm, 130fs, 1kHz 티타늄 사파이어(Ti:Sapphire) 증폭기와 1558nm 광섬유 펄초 레이저를 주로 사용하고 있다. 그림 1은 최초로 발표된 펄초 레이저를 이용한 유리 기관의 접합 결과를 보여주고 있다. 그림 1 (a), (b)를 통해 접합 공정 전후를 보여주고 있는데 접합 후에 유리-유리 계면 간격이 제거되고 성공적으로 접합이 이루어졌음을 알 수 있다.

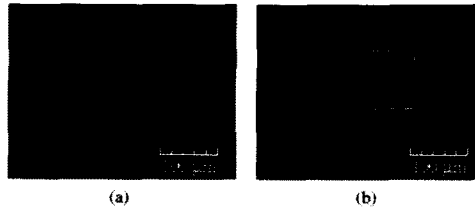


그림 1. 접합 전(a)과 후(b)의 광학사진. 레이저 조사 후 공기층이 사라져 접합부위에만 뉴튼 링이 사라진 것이 보인다.<sup>[1]</sup>

2006년에 역시 같은 그룹에서 borosilicate와 fused silica의 이중 접합을 시도한 논문이 발표 되었다. 역시 1kHz, 800nm, 85fs의 낮은 반복률의 레이저에 의해 접합되었다. 그림 2는 레이저 펄스 에너지와 이송속도의 함수로 표현된 접합 가능 영역을 나타내며 이송속도가 빨라질수록 높은 펄스에너지가 투입되어야 함을 보여주고 있다.

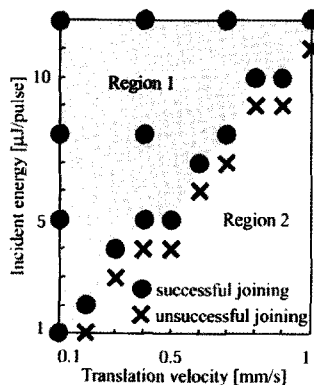


그림 2. 이송속도와 조사 에너지의 함수로 나타낸 접합 가능 영역<sup>[2]</sup>



2006년 역시 같은 그룹에 의해 발표된 결과에는 1558nm 의 500kHz Er 레이저가 사용되었다. non alkali glass와 Si를 사용하였고, glass에서는 9.87MPa, Si와 non alkali glass 간에서는 3.74MPa 의 접합 강도를 얻었다. 그림 3에서는 유리와 구리간의 접합 단면사진을 보여주고 있으며, 2010년 LPM에서 발표된 결과에서는 sparse scanning을 통해 내부 스트레스를 줄임으로써 접합 강도를 높일 수 있었다는 연구 결과를 보고하였다.

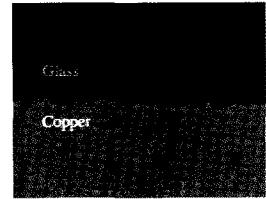


그림 3. 유리-구리간의 접합 단면<sup>[8]</sup>

2006년 독일의 A. Horn 팀<sup>[4-7]</sup>은 1MHz 와 0.1MHz의 반복률에서 borosilicate glass (Schott D263) 을 접합하였다. 이들은 높은 반복률의 fusion welding이 100mm/s이상의 속도에서도 높은 효율을 낸다고 보고하였으며, 펨토초 레이저를 이용한 유리의 fusion welding이 기존의 금속 fusion welding 보다 더 높은 접합 효율을 제공한다고 밝혔다. 다른 논문에서 피코초 펄스를 이용한 fusion welding 에서는 10ps의 펄스가 sub-ps 펄스보다 avalanche 이온화 덕분에 높아진 비선형 흡수율을 효과적으로 이용하여 더 높은 용융 및 접합 효율을 보인다고 보고하였다.

그림 4와 5는 유리-유리 접합과 유리-실리콘 접합의 한 예를 보여주고 있는데 아래 그림에서 보여지듯이, 유리-실리콘 접합의 경우 접합에 이용된 레이저 파장에서 투명재질과 불투명 재질간의 서로 다른 투과도로 인해 용접 seam 생성이 불균형하게 생성되었음을 보여준다.



그림 4. 유리-실리콘 접합 계면<sup>[8]</sup>

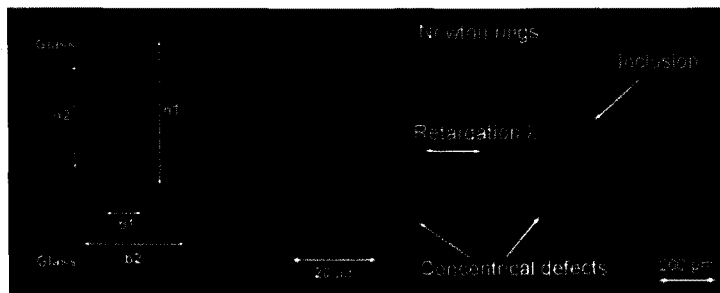


그림 5. 유리-유리 접합 계면<sup>[8]</sup>

Vukelic et al.에 의해 2008년 발표된 논문에서는 라만 분광을 이용해서 fused silica 접합 부위를 관찰한 결과를 통해 접합 부위에 발생하는 결합의 변화에 대한 고찰을 시도하였다<sup>[9]</sup>. 펨토초 레이저에 의해 가공된 영역은 기존의 fused silica network에 구조적인 변화를 가져오게 되는데, 이를 효과적으로 관찰하기 위해 라만 분광학을 사용하였다. 이 외에도 Kongsuwan et al.에 의해 ICALEO 2010에서 발표된 논문에서는 렌즈 등의 광학 부품 제조에 널리 사용되는 BK7의 접합 인터페이스에서의 gap의 영향에 대해 연구하였고, 흡수 부피에 대한 모델링을 통해 접합 현상의 이론적인 고찰을 시도하였다<sup>[9]</sup>.

한편 펨토초 광섬유 레이저를 개발하는 미국의 Imra America는 이러한 응용성에 대한 특허를 출원하고, 독일과 미국, 캐나다 연구팀과의 공동연구를 통해 이 분야의 기초 연구를 지속적으로 수행하고 있다<sup>[10]</sup>.

### 3.2 극초단 펄스 레이저 접합기술의 과제와 향후 응용에 대한 전망

앞서 살펴본 바와 같이 극초단 펄스 레이저 접합 기술은 피코초에서 펨토초에 이르는 짧은 펄스폭을 통해 투명 재질 안에서 비선형 광학 흡수를 일으켜 국소 부위에서 접합을 이루는 기작이 주요 가공 공정이 되므로 레이저-물질의 상호작용과 접합 부위의 열해석에 대한 기초 연구가 매우 중요하다. 주요 연구 그룹들이 발표한 결과들은 아직 펨토초 레이저를 이용한 연구에 치중되어 있으나 Horn 그룹에서 발표한 사례와 같이 피코초급 펄스에서 더 높은 효율을 보이는 경우도 보여지므로 펄스폭에 따른 접합 부위의 강도와 효율에 대한 심도 높은 연구가 더 필요하다. 또한 레이저 반복률에 따른 심화 연구를 통해 열누적 현상과 접합 효율/강도에 대한 관계를 규명할 수 있다. 나아가 재질별로 펄스폭과 반복률의 최적화를 통해 접합 효율을 극대화하는 기술이 더 연구될 필요가 있다. 마지막으로 제조 공정에 이용되기 위해서는 접합 속도 향상, 제조 품목별 공정 기술 개발 등이 이루어져야 한다.

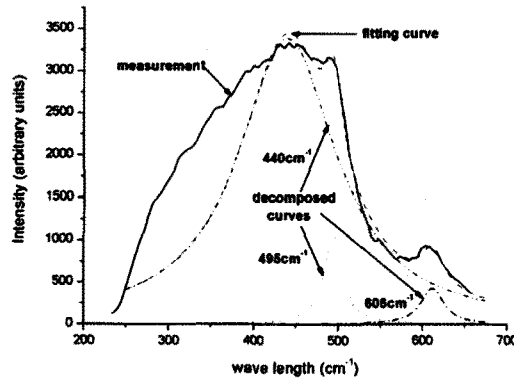


그림 6. fused silica에서의 라만 스펙트럼<sup>[8]</sup>

극초단 펄스 레이저를 이용한 접합기술은 여러 가지 면에서 기존의 접합 기술과 차별화된 기술이며 전통적인 접합 공정들이 해결하기 어려웠던 응용분야들에 새로운 가능성을 열어줄 것으로 전망된다.

우선 paste-free 가공이 가능하므로, 청정 기술이 필요한 분야에서 사용될 수 있다. 또한 전면적이 아닌 국소분야의 내부 접합이 필요한 경우에도 유용하게 사용될 수 있다. 이러한 가능성들은 디스플레이 분야, 바이오 및 의료 소자 분야, 차세대 반도체 및 광소자 제조분야에 응용될 수 있을 것으로 전망된다. 나아가 레이저를 이용한 기술은 시제품(proto-type) 제작과 다품종 소량생산에 특히 유리하므로 랩온어칩(Lab-on-a-chip), 소형 디스플레이 연구 개발 등에 적극적으로 활용될 수 있어 이 분야 기초 연구를 위한 기반기술로써 활용될 수 있다.

한편 열에 취약한 소자, 투명 취성 재료 등의 접합에 이용될 수 있으므로 열에 취약한 생체 친화물질을 다루어야 하는 바이오 기술에 활용될 수 있다.

## 4. 맺음말

극초단 펄스 레이저를 이용한 접합은 기존의 접합기술이 다루기 어려웠던 분야에 대한 새로운 응용 가능성을 제시했다는 점에서 주목할 만한 기술이며, 유망한 기술이다. 특히 접착제를 사용할 수 없는 응용분야나 전면적이 아닌



국소 부위의 접합, 열을 가하기 어려운 응용분야 및 취성 재료와 투명 기관의 접합에 큰 장점을 보일 수 있다. 극초단 펄스 레이저의 안정성이 높아지고 상용 시스템들이 쏟아져 나오에 따라 앞으로 이 분야에 대한 많은 연구가 이루어질 것으로 보인다. 향후 디스플레이, 바이오 및 의료 소자, 반도체 소자등 다양한 분야에서 사용될 수 있을 것으로 전망되며 이를 뒷받침할 수 있는 지속적인 연구와 공정개발이 요구된다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] Tamaki, Takayuki, Watanabe, Wataru, Nishii, Junji, Itoh, Kazuyoshi "Welding of Transparent Materials Using Femtosecond Laser Pulses", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 44 No. 22, pp687-689 (2005)
- [2] Tamaki, Takayuki, Watanabe, Wataru, Itoh, Kazuyoshi, "Laser micro-welding of transparent materials by a localized heat accumulation effect using a femtosecond fiber laser at 1558 nm.", Opt. Express, Vol. 14, No. 22, pp10468 (2006)
- [3] Ozeki, Yasuyuki, Inoue, Tomoyuki, Tamaki, Takayuki, Yamaguchi, Hideaki, Onda, Satoshi, Watanabe, Wataru, Sano, Tomokazu, Nishiuchi, Shumpei, Hirose, Akio, and Itoh, Kazuyoshi "Direct Welding between Copper and Glass Substrates with Femtosecond Laser Pulses", Applied Physics Express, 2008
- [4] Y. Ozeki, H. Yamamoto, H. Yamaguchi, K. Itoh, "Hermetic sealing of ceramic packages with glass by ultrafast laser welding technique" Proc. LAMP 2009
- [5] I. Miyamoto, K. Cvecek, Y. Okamoto, P. Bechtold, M. Schmidt, "laser-matter interaction in fusion welding of fused silica using ultrashort laser pulses" Proc. LAMP 2009
- [6] Horn, Alexander, Mingareev, Ilja, Werth, Alexander, Kachel, Martin, Brenk, Udo, "Investigations on ultrafast welding of glass-glass and glass-silicon", Applied Physics A, 2008
- [7] Horn, Alexander, Mingareev, Ilja, Gottmann, Jens, Werth, Alexander, Brenk, Udo "Dynamical detection of optical phase changes during micro-welding of glass with ultra-short laser radiation", Measurement Science and Technology, 2008
- [8] Vukelic, S. Gao, B. Ryu, S. Yao, YL, "Structural Modification of Amorphous Fused Silica Under Femtosecond Laser Irradiation" MSEC 2008
- [9] P. Kongsuwan and Y. L. Yao, "Transmission welding of glasses by femtosecond laser: structural and mechanical properties", ICALEO 2010
- [10] "Transparent material processing with ultrashort pulse laser" US 2007/0051706 A1



최 지 연

· 한국기계연구원 나노융합·생산시스템 연구본부  
 광응용생산기계연구실, 선임연구원  
 · 관심분야 : 레이저-물질 상호작용과 이를 이용한  
 미세가공  
 · E-mail : jchoi@kimm.re.kr



서 정

· 한국기계연구원 나노융합·생산시스템 연구본부  
 광응용생산기계연구실장, 책임연구원  
 · 관심분야 : 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및  
 시스템  
 · E-mail : jsuh@kimm.re.kr