레이저기술의 산업적 응용

-(前)한국표준연구소 레이저실장 원종욱 박사-

3. 레이저 가공의 특징

(1) 레이저 가공의 개요

1) 제어성이 풍부
높은 에너지밀도를 얻을 수 있고, 가공형태의 변환이 자유로우며, 출력의 분할이용이 가능함.

2) 비접촉가공
재료의 강성이나 경도에 관계없이 가공할 수 있으며 비접촉으로 기기의 마모나, 관성에 의한 가공오차, 소음, 분진 등이 발생하지 않음.

3) 국부 미세 정밀가공
집광 면적이 작기때문에 수십 ㎛의 국부가공이 가능하며 응력이나 뒤틀림 기타 열변형이 거의 없음.

4) 대기중가공
대기중에서 전장이나 자장의 영향 또는 오염없이 가공이 가능하며 가공속도가 빨라 다품종 생산형태에 탄력성있게 대응할 수 있음.

5) 복잡한 형태의 가공
가공모양이 세밀하고 복잡해도 Computer와 interface에 의해 복잡한 형태를 빠르고 다양하게 진행할 수 있고 재현성이 뛰어나 자동 반복가공에 우수한 능력을 지니고 있음.

6) 안전성
가공중 X-선 발생이나 기타 인체에 유해한 물질 등이 발생하지 않으며 대기 환경 오염을 일으키지 않음.

7) 고에너지 밀도

CO_2레이저와 Nd : YAG레이저의 산업적 응용비교

분	CO_2 레이저	Nd : YAG 레이저
파장	10.6 ㎛	1.06 ㎛
종류	• Slow Axial Flow • Fast Axial Flow (gas dynamic laser) • TEA laser	• Nomal pulse Nd : YAG • Q-Switched Nd : YAG • CW Nd : YAG
발산각	1.8 mrad	0.5 mrad
출력	30Kw	700w
집광스폿지름	50~500㎛	20~200㎛
가공종류	금속, 비금속의 절단, 용접, 천공, 열처리, 마킹, 트리밍, 스크라이빙 등	금속, 비금속의 절단, 용접, 천공, 마킹, 트리밍, 스크라이빙 등
가공분야	• 자동차, 선박, 항공기산업 • 비금속재료산업(플라스틱, 종이, 옷감, 유리, 석영, 고무, 세라믹)	• 자동차, 항공기 산업 • 전자, 반도체 산업
가공상특징	• 높은 에너지 효율 • 높은 출력 및 에너지 밀도 • 세라믹 가공에 유리 • 중공업의 부품가공 및 열처리 등에 적합	• 소형 • 광 fiber 이용가능 • Q-Switching으로 고속 가공 가능 • 정밀 미세가공에 적합

다른 열원에 비하여 높은 에너지 밀도를 지니고 고융점 재료, 세라믹 등 복합재료의 가공성 한계에 제한을 받지 않음.

8) 자동화 용이

가공 프로그램 개발에서부터 가공에 의한 완제품 가공까지 자동조절 기능에 의한 자동화가 용이하며 가공중에도 레이저 자체의 성질(출력, 펄스폭, 펄스형태, 가공속도, 가공폭 및 깊이)을 자동으로 제어할 수 있다.

9) 경제성

시작품이나 견본을 금형작업없이 제작할 수 있고 품종의 다변화, 개선들을 쉽게 할 수 있고 정밀부품을 빠른 시간에 처리할 수 있음.

레이저광속(Beam)의 집광특성

[TEM_{00} 모드의 회절한계]

1) 자유공간에서의 발산각

- $\tan\theta = 2\lambda/\pi D$

2) 집광면적

- $d = 4f\lambda/\pi D = 1.27\ f\lambda/D$ (TEM_{00}mode)
- $d_{mn} = 1.27 C_{mn}^2\ \lambda \cdot f / D_{mn}$

3) 모드당 각 계수

모 드 형 태	Cmn
TEM_{00}	1.0
TEM_{01}	1.5
TEM_{10}	1.9
TEM_{11}	2.2

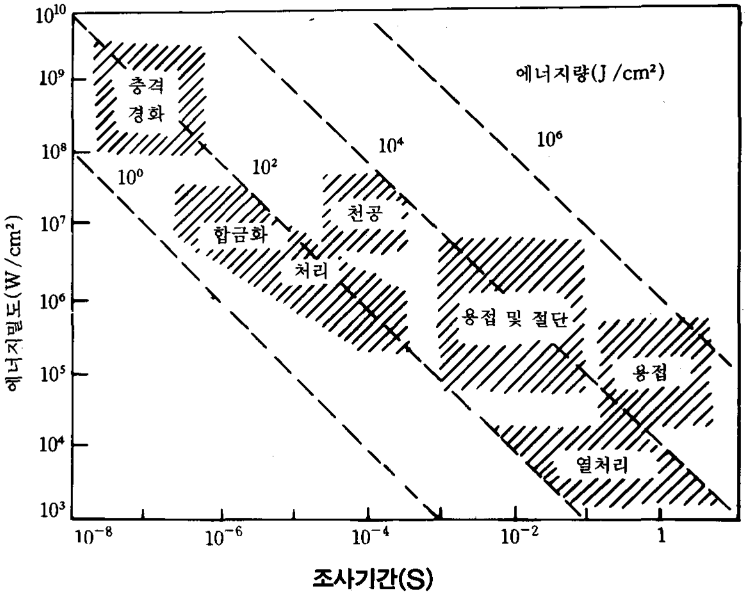
열원의 에너지 밀도 비교

열 원	에너지밀도(W/cm²)
흑색복사(3000℃)	6.45×10^2
산소아세틸렌불꽃	10^3
아크프라즈마토치	10^5
전자 Beam(CW)	$10^6\sim10^9$
전자 Beam(Pulse)	$10^7\sim10^9$
레이저 Beam(Pulse)	$10^7\sim10^{13}$
레이저 Beam(CW)	$10^3\sim10^9$

레이저의 집광적인 비교

	CO_2 레이저		Nd : YAG 레이저
파 장	10.6 ㎛		1.06㎛
광속직경	10 mm		5mm
발 산 각 TEM_{00}	1.8 mrad		0.4mrad
집광면적 TEM_{00}	f : 38.1	51㎛	10.25㎛
	f : 63.5	85㎛	22.8㎛
	f : 127	171㎛	34㎛

* 다중모드일 경우 집광면적은 3~4배 커짐(광학적 수차에 따라 다소 차이가 있음)



* 다중모드일 경우 집광면적은 3~4배 커짐(광학적 수차에 따라 다소 차이가 있음).

- Joining
  - Welding
  - Soldering
  - Brazing
- Material Removal
  - Cutting
  - Drilling
  - Scribing
- Surface Modification
  - Hardening
  - Annealing
  - Solution Treatment
  - Surface Fusion Treatment
  - Glazing(Amorphous)
  - Alloying & Cladding
  - LPVD & LCVD
  - Thermal Spraying
  - Consolidation
- New Matrial Synthesis
  - Ultra Fine Particle Formation
  - LPVD & LCVD
  - Laser Chemical Reaction

* LPVD : Laser Physical Vapor Deposition
* LCVD : Laser Chemical Vapor Deposition

(2)레이저 절단(Laser Cutting)

1) 레이저절단의 분류

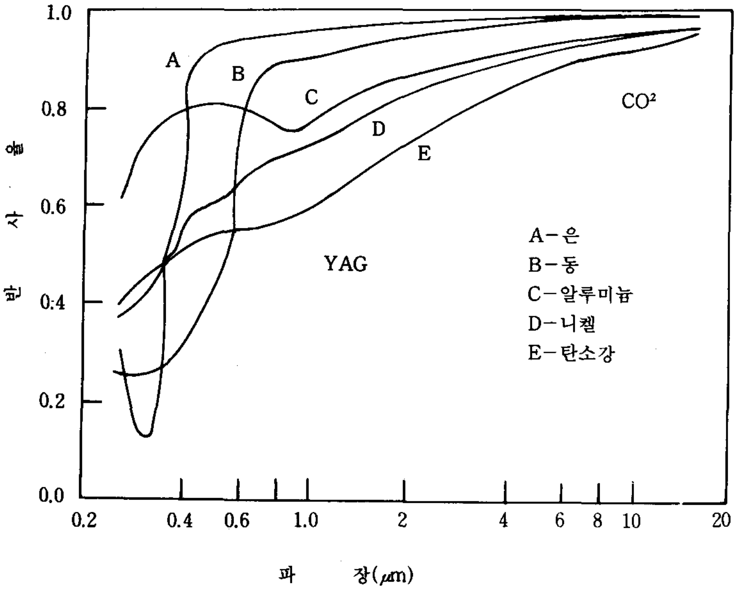
레이저절단
- 증발절단(CO_2, YAG) : 세라믹, 유기재료 금속의 pulse절단
- 용융절단(CO_2, YAG)
  - 반응절단(CO_2) : 금속절단
  - 비반응절단(Ar) : 금속절단
- 결합・해리절단(엑시머, FEL) : 유기재료

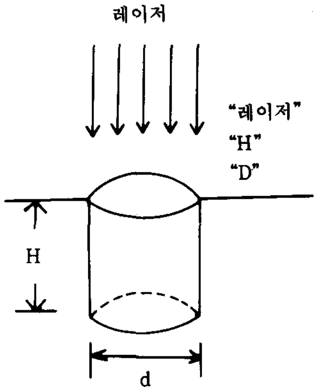
각종재료의 절단특성(CO_2 레이저)

				절 단 성
금속	레이저광흡수(小)		Au, Ag, Cu, Al, Brass	일반적 이용으로 곤란하며 특별한 처리가 필요, CU, Al, Brass의 박판가능
	레 이 저 광흡수(大)	고 융 점	W, Mo, CR, Ta, Zi, Ti	저속가공으로 가능 Ti, Zi는 assist gas Ar이용
		저 융 점	Fe계 Ni, Pb, Sn 등	가공용이

비금속	유 기 재	가 연 성	아크릴, 테프론, 폴리에스틸렌	절단양호, 저출력으로 가능, asist gas N_2상용.
		난 연 성	목재, 종이, 섬유, 고무 등	절단면의 변질 및 변색최소, 박판의 양질 절단가능
	무 기 재	열팽창(大)	일반유리, glass fiber	마모가 없이 절단 용이
		열팽창(小)	세라믹, 석영, 유리, 마이카, 도자기	절단용이

금속재료의 레이저 광속반사율





금속재료 가공시 반사율을 낮게하는 방법

- Black paint나 colloidal graphite와 같은 흡수 매질을 표면에 coating한다.
- 최대흡수가 되도록 면평광된 TEM mode의 빔을 사용한다.
- 전 가공표면의 온도를 일정수준 올리고 전달한다.
- 보조가스를 산소로 사용하여 표면을 산화 또는 활성화시킨다.

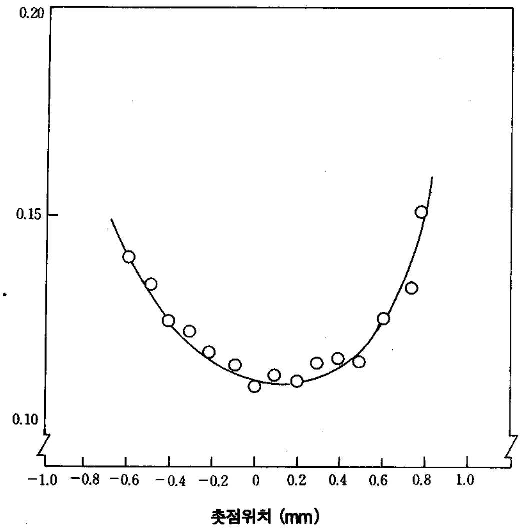
표면온도와 가공

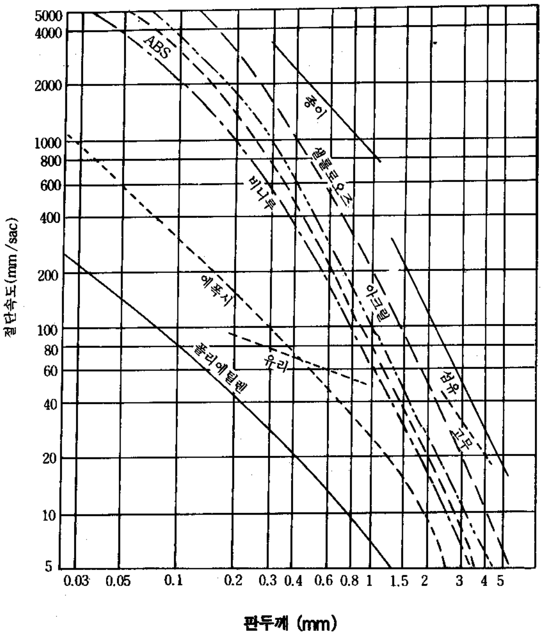
- 레이저광 펄스당 에너지량 $E=Pav/n(J)=Pav/4.2n(cal)$
- 레이저광에 의한 가공부위 온도상승 $\triangle T$
  $\triangle T=E/MC$
  C : 비열
  M : 가공부분의 질량
- 가공시 열손실 η를 고려한 실제온도 상승
  $T=(1-\eta)\cdot Pav/4.2n \times\pi(d/2)^2H\rho C$
  ρ : 단위체적당 질량 g/cm²
  C : 비열 cal/g℃
- 절단속도(cm/min) ∝ P/L.A.T
  P : 재료에 입사되는 레이저 출력(W)
  L : 재료의 단위체적당 증발에너지(J/cm²)
  A : 레이저 집광면적(cm²)
  T : 재료의 두께

각종 물질의 열정수

물 질 명	T_M[K]	T_V[K]	25℃→T_M [J/cm^3]	25℃→용융 [J/cm^3]	25℃→기화 [J/cm^3]
Au	1366	2933	2580	3820	38220
Ag	1234	2485	2330	3490	31300
Cu	1356	2818	3650	5480	53600
Al	932	2600	1540	2610	35060
Fe	4808	3008	5310	8040	62030
Co	1766	3370	5950	8350	73570
Ni	1728	3110	5640	8370	71150
W	3650	6225	8570	12270	114511
Al_2O_3	2300		6970	11196	
SiO_2	1880	(2250)	2613	2966	(3572)
아 크 릴	(503)				(2200)
목 재					(1800)

렌즈촛점 위치와 절단폭
SPC : 2mm
평균출력 : 200W CO_2 레이저
가공속도 : 0.3 m/분
렌즈촛점거리 : 93mm





석영의 가공조건(CO_2 레이저 이용)

석영두께 (mm)	출 력 (W)	발진주파수 (Hz)	가공속도 (mm/min)	보조가스:산소 (kg/cm²)
2	200	100	160	2
3	200	100	120	2.5
4	200	100	80	2.5
5	240	100	60	2.5
6	240	100	50	3
7	300	80	30	3
10	320	75	20	3

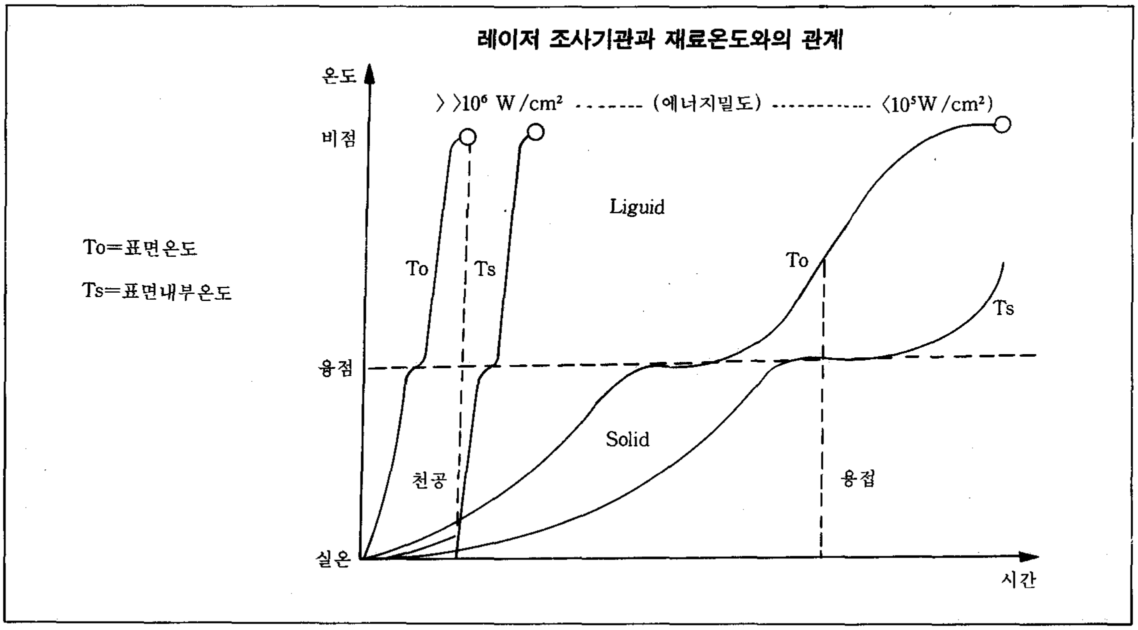
레이저와 전자빔 이용의 비교

	레 이 저	전 자 Beam
장점	• 진공을 유지시킬 필요없음 • 먼거리까지 빔을 전송할 수 있음 • 미러에 의하여 접근이 어려운 곳이나 오염된곳까지 가능 • X-ray 발생하지 않음 • Beam을 여러곳에서 분할 이용할 수 있음 • 이중금속 용접 가능함 • 전자장의 영향을 받지 않음	• 높은 에너지 효율 • 높은 출력을 쉽게 이용가능 • 100KW까지의 출력얻음
단점	• 낮은 에너지효율(30%) • Beam이 보이지 않기 때문에 주의요함	• Vacuum 상태 필요 • 전자장 차단 필요 • 분할 이용 불가능 • X-ray발생

(3) 레이저 용접 (Laser Welding)

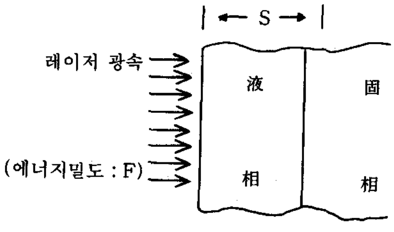
[특 징]

- 대기중에서 비접촉으로 용접이 가능하다.
- 미소 spot 용접으로 열영향을 최소화할 수 있다.
- 밀폐용기의 용접시 window를 이용하여 내부 용접이 가능하다.
- 용융점이 서로 다른 이중금속 용접이 용이하다.
- 전기장이나 자기장의 영향을 받지 않는다.
- 전자빔 용접에서와 같은 X-선이 발생하지 않는다.
- 용접시 인체 유해물질이 발생하지 않는다.
- 접근이 어려운 곳이나 오염된 곳(방사능오염)의 용접이 가능하다.
- 광속을 여러곳으로 분할 이용할 수 있으며 서로다른 가공(절단, 용접, 천공)을 병행 또는 순차적으로 이용할 수 있다.



재료의 온도변화 시간

- 고상의 표면온도가 융점도달시간
  $tm = \pi / \kappa_t (Tmk_2 / 2F)^2$
- 액상의 표면온도가 비점도달시간
  $te = \pi / \kappa_t (Tek_2 / 2F)^2$
  k : 열확산율
  Tm : 융점
  K : 열전도율
  F : 레이저 에너지밀도
  Te : 비점



이중금속의 용접현황

	W	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Be	Fe	Pt	Ni	Pd	Cu	Au	Ag	Mg	Al	Zn	Cd	Pb	Sn
W																				
Ta	E																			
Mo	E	E																		
Cr	E	P	E																	
Ti	F	P	F	G																
Ti	F	E	E	G	F															
Be	P	P	P	P	F	P														
Fe	F	F	G	E	E	F	F													
Pt	G	F	G	G	E	F	P	G												
Ni	F	G	F	G	E	F	F	G	E											
Pd	F	G	G	G	E	F	F	G	E	E										
Cu	P	P	P	P	F	F	F	F	E	E	E									
Au	–	–	P	F	P	F	F	F	E	E	E	E								
Ag	P	P	P	P	P	F	P	P	F	P	E	F	E							
Mg	P	–	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F	F	F						
Al	P	P	P	P	F	F	P	F	P	F	P	F	F	F	F					
Zn	P	–	P	P	F	P	P	F	P	F	F	G	F	G	P	E				
Cd	–	–	–	P	P	P	–	P	F	F	F	P	F	G	E	P	P			
Pb	P	–	P	P	P	P	–	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P		
Sn	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	F	P	F	F	P	P	P	P	F	

E=우수
G=양호
F=보통
P=불량
–=불가