

解 説

大韓熔接學會誌
第8卷第3號 1990年 9月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 8, No. 3, Sep., 1990

레이저 가공기술(Laser Beam Processing Technique)⁺

한 유 회*(Y.H. Han*)

< 차	레 >
1. 레이저 절단	2. 레이저 용접 I
3. 레이저 용접 II	4. 레이저 열처리

1. 레이저 절단(Laser Beam Cutting)

1. 서 론

레이저 절단의 원리는 다음과 같다.

- 1) 레이저 빔이 물체표면에 수렴되어 작용한다.
- 2) 작용부위가 용융점 또는 그 이상으로 가열되어
- 3) 절단가스의 작용으로 용융된 부위가 아래로 축출된다.

절단 과정에서 공구와 가공물 간에 접촉이 없으며, 따라서 기계적인 힘이 가공물에 작용하지 않는다. 공구의 마모현상이 없다.

레이저 빔은 초점의 크기가 마이크로 미터 범위까지 수렴될 수 있으며 이러한 훌륭한 초점 형성 능력으로 인해 에너지 밀도를 높힐 수 있다. 따라서 레이저 절단은 타 절단 방법에 비해 절단속도가 빠르다. 동시에 가공물이 받는 열량이 적어 열변형 또는 조직변화 등이 극히 적다. 레이저 절단 원리가 그림1에 나타나 있다. 그림2에 절단방법에 따른 절단폭 및 열 영향부가 비교되었다.

레이저 절단면의 특징은 가공물표면에 거의 수직으로 절단면이 형성된다는 점과, 낮은 표면 거칠기 그리고 열영향부(HAZ)가 작다는 점을 들 수 있다. 따라서 대부분의 경우 절단후 마감가공이 필요없다. 절단면의 최적조건은 다음의 공정변수들을 적정화 함으로써 얻을 수 있다.

$$Q = f(G, F, L, P) \quad (1)$$

Q = Quality

G = Cutting Gas -Nozzle 형상

-Nozzle과 가공표면간의 거리

-가스압력 및 종류(예, 혼합가스)

F = Focussing -Intensity

-Spot Size

-Focal Length(초점거리)

L : Laser -Power

-Beam Mode

-Polarization

-Divergence

P : Process -Speed

-재료두께

-재료(화학적 조성)

+ 본 해설기사는 4회에 걸쳐서 연재할 계획임.

* 정회원, 한국해사기술연구소

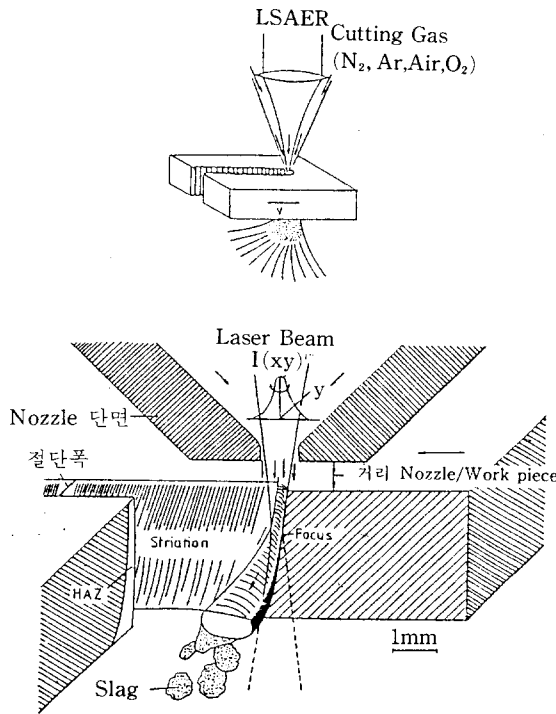


그림 1 레이저 절단 원리

2. 절단용 레이저 시스템

절단용으로 현재 주로 CO₂-Laser와 Nd : YAG-Laser가 사용된다. 이들 레이저는 CW(Continuous Wave)와 pulse기능을 갖는다.

CO₂-Laser와 Nd : YAG-Laser는 beam의 파장에서 차이가 난다(CO₂ : 10.6μm, Nd : YAG : 1.06μm). 따라서 수렴성에서 차이가 난다. 같은 mode의 beam일 경우 Nd : YAG-Laser는 초점 깊이 (focal depth : rayleigh length)와 초점크기

(Spot Size)에서 CO₂-Laser에서 보다 10배나 우수하다. 이같은 장점으로 인해 Nd : YAG-Laser는 주로 정밀가공에 사용된다. CO₂-Laser사용영역은 수백 watt에서 수 kW의 출력을 요하는 가공에 사용된다.

Nd : YAG-Laser는 현재 kW의 출력을 내기도 하나 통상 수백 watt급 까지의 Laser가 사용되고 있고, CO₂-Laser에서는 수 kW의 출력과 함께 beam quality도 좋은 Laser가 생산되고 있다.

Beam의 파장이 다른으로 해서 흡수율이 다르게 된다. 과정에 따른 beam이 같은 특성(초점심도, spot size 그리고 흡수율)을 고려할 때 자외선(ultra violet)을 내는 Excimer Laser가 재료가공에 가장 적합할 것이라는 추측이 든다. 자외선을 발생시키는 Excimer Laser는 현재 λ=351nm(XeF*)와 λ=193nm(ArF*)사이의 파장의 빛을 내며 평균출력(average power)이 수백 watt급까지 있으며, pulse길이는 10-100ns, pulse frequency는 100-1000Hz정도이다. 수μm범위의 정밀제거 또는 절단이외에는 Excimer Laser를 금속가공에 응용하기에는 아직도 비경제적이므로 사용되는 경우가 거의 없다. 이는 pulse길이가 너무 짧은데 기인한다고 하겠다. 그러므로 현재 절단용으로는 CO₂-Laser와 Nd : YAG-Laser가 사용되고 있다.

3. 절단공정(Cutting Process)

Laser 절단은 다음의 3가지 공정방법으로 나눌 수 있다.

- I. 승화절단(Sublimation Cutting)
- II. 용융절단(Fusion Cutting)
- III. 연소절단(Oxygen Assisted Cutting)

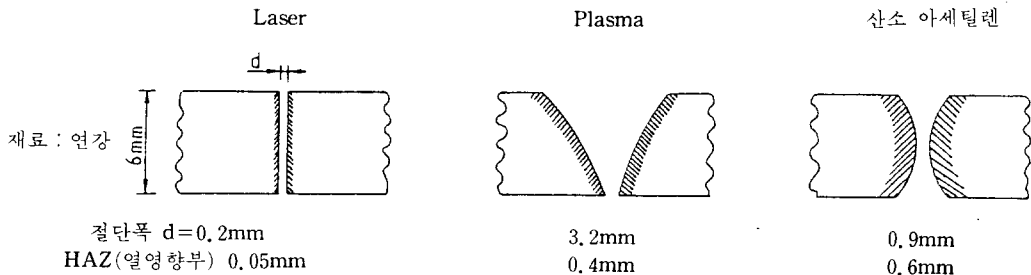


그림 2 절단방법에 따른 절단폭 및 열영향부 비교

각 절단 공정의 특징과 장단점에 대해서는 아래와 같다.

I. Laser-승화절단

승화절단에 있어서 절단부(cutting front)가 Laser beam에 의해 승화된다. 목재, 종이, ceramic 그리고 plastic등 용융상태를 거의 거치지 않고 승화되는 재료들의 경우에 적용된다. 첫째로 연소현상을 방지하기 위해 보호가스(shielding gas)를 사용하여야 한다. 둘째로 beam의 intensity를 최대로 높혀 열전도에 의한 손실을 최소화하는 것이 승화절단에서는 요구된다.

장점 :

- 용융현상이 일어나지 않게 함으로써 striation이 형성되지 않아 절단면이 매끈하다.
- 열영향부(HAZ)가 거의 없으며 따라서 열 변형 또한 없다.
- 연소현상이 없으므로 해서 산화막이 없게되어 후가공이 필요없다.

단점 :

- 높은 beam intensity를 필요로 하므로, CO₂-Laser의 경우는 통상 pulse를 사용해야 한다. intensity가 높은 관계로 plasma가 형성되기 쉽고 따라서 plasma 제어(control)필요성이 있게 된다.
- 금속의 경우는 승화열이 큰 관계로 절단속도가 매우 느리다.

금속의 승화 절단에는 주로 Nd : YAG-Laser를 사용한다.

II. Laser-용융절단

Laser-용융절단을 글자그대로 Laser beam으로 절단부를 용융상태로 가열해서 절단가스(cutting gas: N₂, Ar, He, 공기)로 제거하는 방법이다. 이 방법을 이용해서 유리, plastic 그리고 금속등을 절단한다.

장점 :

- 승화온도까지 가열하지 않음으로 해서 승화절단보다 절단속도가 빠르다.
- 금속의 경우에는 연소현상을 유발하지 않아 산화물/산화막의 형성을 방지한다.

단점 :

- 용융된 것을 제거하는데에 일어나는 동적현상

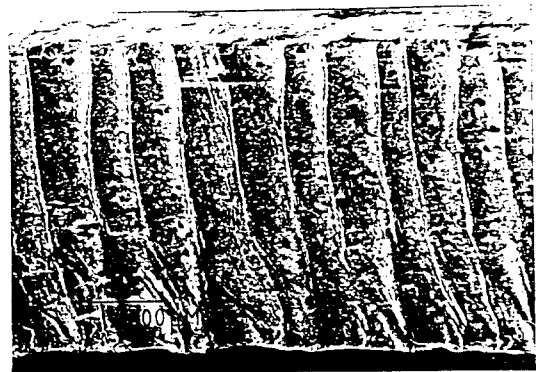


그림 3 Laser 연소절단면

(dynamic behavior of melt)으로 인해 빗금(striation)이 형성되어 표면조도가 승화절단보다 커진다(그림 3.).

- 열영향부(HAZ)가 타 절단방법보다 커진다.
- 절단속도가 연소절단에 비해 느리다.

용융절단에는 CO₂-Laser와 Nd : YAG-Laser가 주로 사용되며 이때 CW 또는 pluse를 사용한다.

III. Laser-연소절단

연소절단방법은 거의 전적으로 금속절단에 사용된다.

절단부는 Laser beam에 의해 가열되어 연소점(ignition temperature)이상이 되면 절단가스로 사용되는 산소와 산화/연소 반응을 하며 반응열이 생성되면서 slag이 형성되고, 형성된 slag는 산소 jet에 의해 제거된다. 산소 jet는 산화/연소에 일부 소모되고 slag제거에 사용된다. 연소절단방법에서는 연소반응에서 생성되는 반응열이 절단작용에 도움을 줌으로써 용융절단에 비해 약 6-8배 정도 절단속도가 빠르다.

장점 :

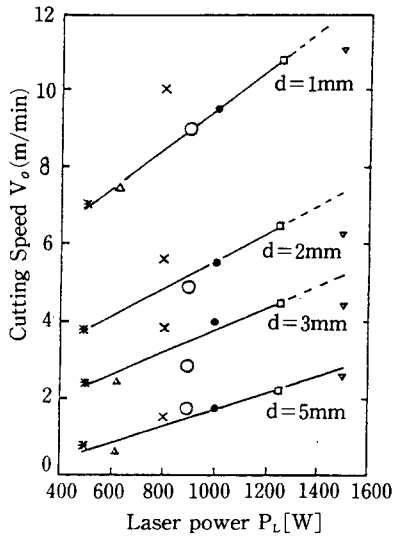
- 절단할 수 있는 두께가 타 절단방법보다 크다.
- 경제적이다.

단점 :

- 산화막의 형성으로 간혹 문제점이 있다.
예) 절단후 용접 또는 도색할 경우
- HAZ부분이 승화절단보다 크다.
- 연소현상과 slag/melt의 동적현상으로 인해 striation이 용융절단의 경우보다 크게 나타난다.

연소절단에는 주로 CO₂-Laser가 사용되며 이때

CW와 pulse를 사용한다. 그림4에 현재 사용되고 있는 CO₂-Laser의 절단속도가 출력에 따라 각 재료두께마다 표시되어 있다. 이 data는 Laser회사에서 발표한 자료라는 것을 밝혀둔다.



*ROFIN SINAR RS500 □COHERENT EFA 51
 △COHERENT EFA ×COHERENT SUPER 48
 ○MESSER GRIESHEIM EUROLASI1000 ∇SPECTRA PHYSICS 820
 ●ROFIN SINAR RS1000

그림 4 출력에 따른 절단속도

4. 흡수 (Absorption)

종이, 목재, 세라믹, plastic등 비금속을 CO₂-Laser로 절단할 경우 높은 흡수율을 보이는 반면 금속의 경우 낮은 흡수율로 인해 가공효율이 저하된다(그림 5). Laser beam이 가공물 표면에 수직으로 작용할때 통상 90%이상 resonator로 반사되어 들어간다. 이 같은 반작용은 resonator 내부를 교란시켜 급격한 출력의 요동을 야기시킨다. 절단시에는 이러한 반작용이 절단부의 기하학적 현상으로 인해 별 문제가 없고 단지 절단 초기 drilling하는 단계에서 문제가 된다(그림 6).

전자파의 파동방정식과 전자의 운동방정식으로 부터 다음과 같은 금속 표면에서의 흡수율과 굴절율을 나타내는 공식이 유도된다.

$$\alpha = \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\left(1 - \frac{W_p^2}{\nu_c^2 + W^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu_c}{W} \frac{W_p^2}{\nu_c^2 + W^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \left(1 - \frac{W_p^2}{\nu_c^2 + W^2} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

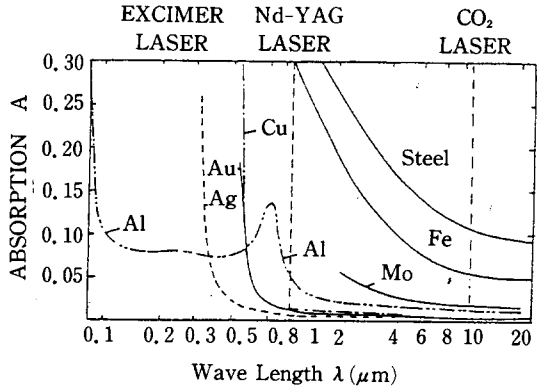


그림 5 빛의 파장에 따른 각 물질의 흡수율

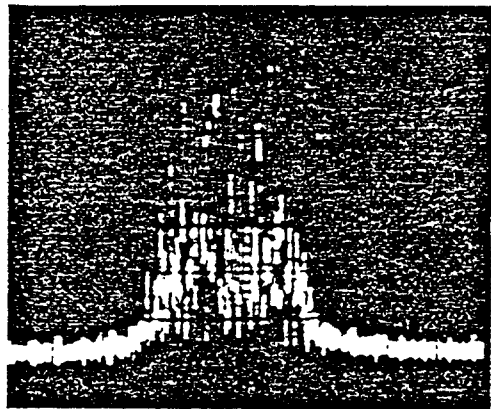
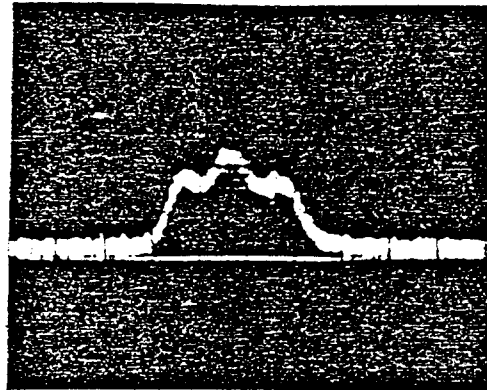


그림 6 반사로 인한 resonator내부 교란

$$n = \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\left(1 - \frac{W_p^2}{\nu_c^2 + W^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu_c}{W} \frac{W_p^2}{\nu_c^2 + W^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(1 - \frac{W_p^2}{\nu_c^2 + W^2} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

여기서 α : 흡수상수
 n : 굴절율 (Refractive Index)
 W_p : Plasma Frequency $W_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}}$
 W_c : Laser Frequency
 $W_{CO_2} = 1.78 \cdot 10^{14} (S^{-1})$
 $W_{YAG} = 1.78 \cdot 10^{15} (S^{-1})$
 ν_c : Electron의 충돌 Frequency

흡수율 $A = 1 - R$ 로 표기되며, 이때 R 은 Laser beam이 물체표면에 수직으로 작용했을때의 반사율을 나타내며 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$R = \frac{(1-n)^2 + \alpha^2}{(1+n)^2 + \alpha^2} \quad (4)$$

전자의 충돌 frequency ν_c 은 온도에 영향을 받음으로 반사율 $R(T)$ 또한 온도에 따라 변하게 된다. 그림 7은 CO_2 -Laser와 Nd:YAG-Laser beam이 진공에서 매끄러운 stainless steel표면에서 온도가 변함에 따라 반사되는 율을 나타내고 있다.

Stainless steel의 경우 용융상태로 될때 반사율이 약간 상승하나, 대부분의 금속의 경우에는 약간 감소하는 추세를 나타낸다. 금속표면의 산화정도와 거칠기에 따라 반사율은 위의 경우보다 감소하게 된다. 대부분의 금속은 온도가 상승함에 따

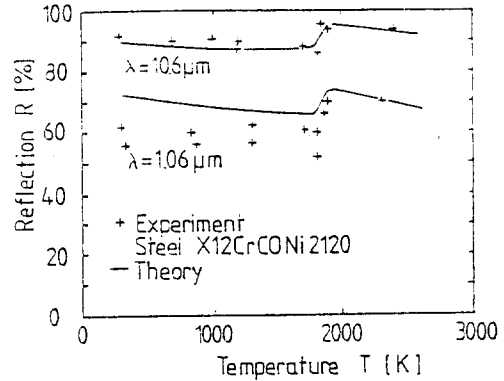


그림 7 온도에 따른 반사율

라 산화되므로 반사율은 저하된다. 산소원자가 금속표면에 확산침투함으로써 격자 구조에 변화가 오고 따라서 전자의 운동성이 저하됨과 동시에 충돌 frequency가 커지게 된다. Laser절단시 절단부는 고온으로 가열되므로 산화막 성장속도는 다음과 같은식으로 표시된다.

$$D(t, T) = \sqrt{2K} \exp\left(-\frac{0.5E_A}{kT}\right) \sqrt{t} \quad (5)$$

윗식은 금속에서 500°C 이상에서 산화막 두께가 이미 nanometer범위로 형성되어 있을 경우에 유효하다. D 는 산화막 두께, K 재료에 따른 상수, E_A Activation Energy, T 온도 그리고 t 는 irradiation time을 각각 나타낸다.

연소절단에 있어서 언급되어야 할 것중 점화온도를 빼놓을수 없다.

점화온도 이상에서 연소반응이 격렬하게 진행되고 그때의 반응열은 절단에 재사용되어 연소절단의 효율이 타 절단방법(승화, 용융절단)보다 높다. 그림 8a)는 절단에서 나타나는 중요 온도에

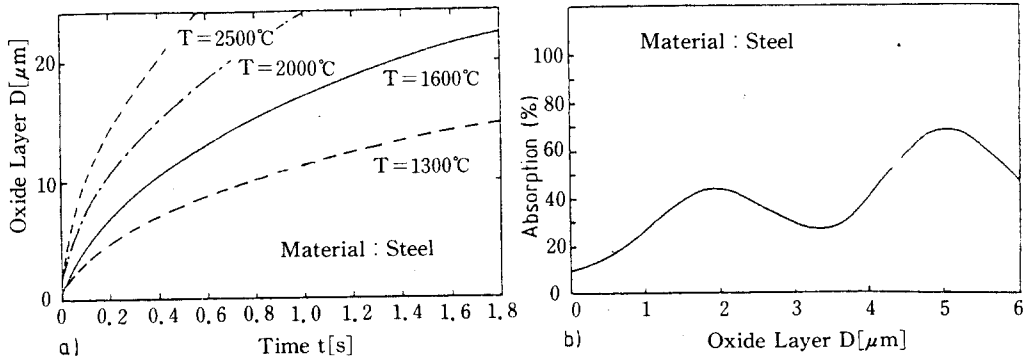


그림 8 a) 온도와 시간에 따른 산화막 성장
 b) 산화막 두께에 따른 흡수율 변화

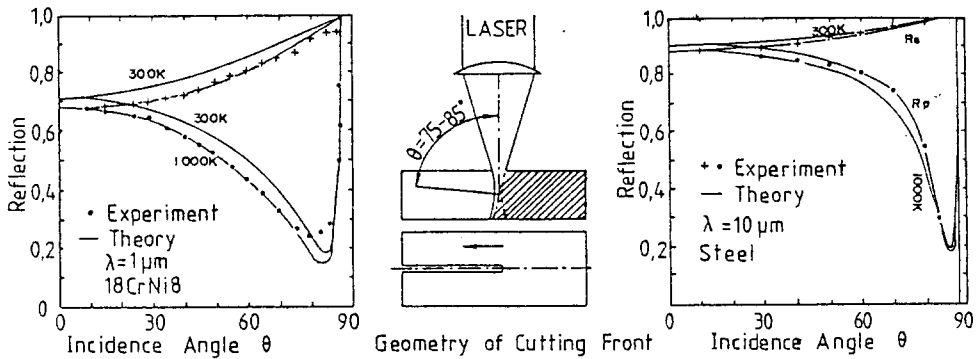


그림 9 a) 입사각에 따른 반사율($\lambda=1\mu\text{m}$)
 b) Cutting front에서의 입사각
 c) 입사각에 따른 반사율($\lambda=10\mu\text{m}$)

서 시간에 따른 산화막의 성장을 나타낸다. 작용 시간(irradiation time)은 다음과 같이 산출된다.

$$t = 2r_f / V \quad (6)$$

Laser절단에 있어서 작용시간은 보통 수 ms이므로 산화막의 두께는 μm 범위에 해당된다. 그림 8b)는 C85강재의 경우 산화현상으로 인한 반사율의 감소효과를 나타내고 있다.

이상은 Laser Beam이 재료표면에 수직으로 작용할 때, 즉 입사각이 0인 경우에 해당된다. Laser Beam이 재료표면에 경사지게 작용할 경우에는 polarization의 방향에 따라 흡수율이 다르게 나타난다. 그림 9의 a), c)는 입사각에 따른 반사율의 변화를 보여주고 있다. Brewster angle은 고온에서 약간 이동한 것을 그림 10의 A, C에서 알 수 있으나 전체적인 변화는 극히 작음을 알

수 있다. 절단시 그림에서 보듯이 약 75-85°의 입사각이 형성되므로 그림 10에서 보듯이 Polarization방향이 절단에서 매우 중요함을 알 수 있다.

5. Laser Cutting의 변수

서론에서 이미 언급한 바와 같이 절단성에 영향을 주는 변수는 많다. 이들 변수를 종합해서 다음 그림 11에 나타냈다. 세부 변수들을 한류음씩 대표변수로 나타냈고, 이 대표변수들은 레이저 출력(Laser power), 절단속도(cutting speed), 절단가스(cutting gas), nozzle형상, 재료, 재료상태 등을 꼽을 수 있다.

적정한 절단 결과를 얻기 위해서는 적정변수들을 도출해야 한다. 그러나 현재 각 변수들이 절단에 미치는 영향을 분리해서 규명 할 수 있는 단계에 이르지 않고 있다. 이는 변수가 많고 또 변수들 상호간에 서로 영향을 끼침으로써 실험상 어려운 점이 많기 때문이라고 하겠다.

상호 영향력을 단지 정성적으로 나타낼 수 있을 뿐이며, 정확한 함수적인 연관은 단지 큰 오차를 허용하는 범위에서 가능하다.

다음에는 변수들이 미치는 영향을 대표변수 별로 분류해 기술해본다.

5.1. 레이저 빔 변수(Laser Beam Parameter)

위의 변수군에는 레이저 종류, 작동방법, 출력

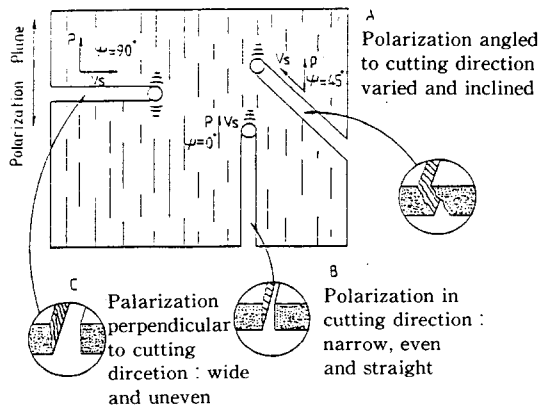


그림 10 Polarization방향에 따른 절단성

Beam Quality, 초점크기 그리고 초점위치 등이 포함된다.

5.1.1. 레이저 종류

절단용으로 CO₂-Laser와 Nd:YAG-Laser를 사용할 수 있으며, 두 Laser의 차이와 특성은 생략한다.

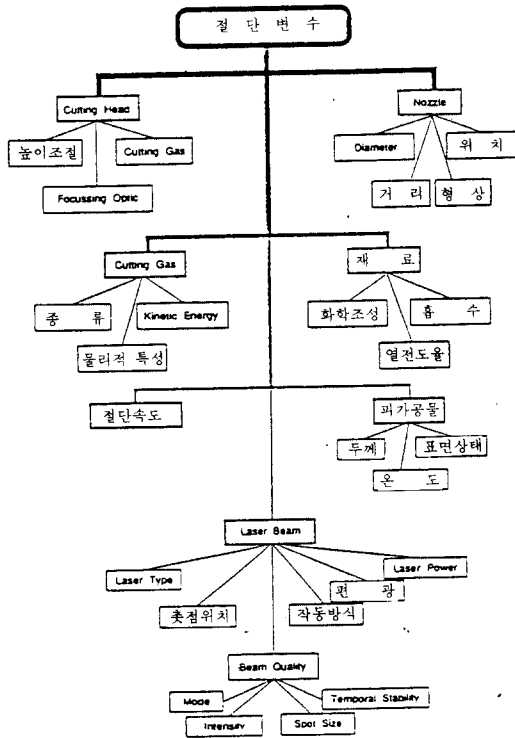


그림 11 Laser 절단변수

5.1.2. 작동방법

Laser작동방법, 즉 여기서는 시간에 따른 beam의 출력조절 방법을 의미한다.

우선 연속적으로 일정출력을 내는 CW(Continuous Wave)방식과 출력을 변화시키는 pulse 방식으로 나눌수 있다. Pulse방식은 normal pulse와 super pulse로 크게 나눌수 있다.

이외에 CW와 super pulse조합, normal pulse와 super pulse의 조합을 들수 있다. 각 작동방법은 그림 12에 나타나 있다.

Pulse방식은 에너지 유입량과 절단속도를 조화시키는데 긴요하게 사용된다. 즉 절단방향이 바뀔 때, 예를들어 모서리 가공을 할 경우 끝부분에서

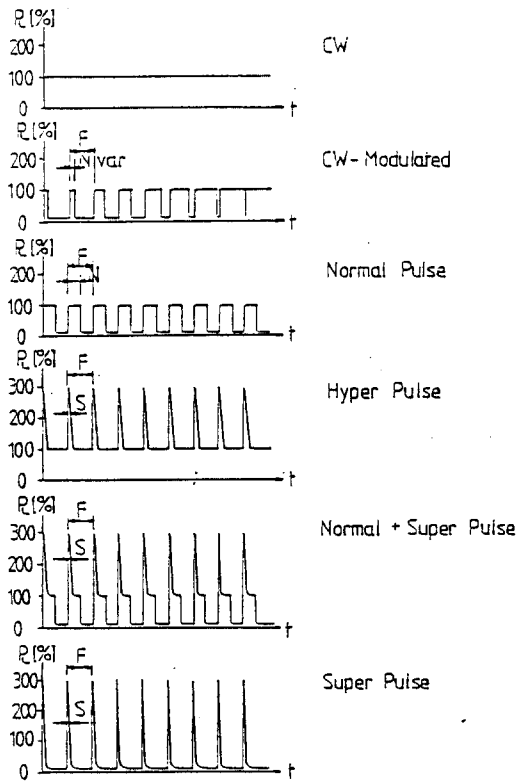


그림 12 Laser 작동방식(Power modulation)

진행속도를 낮추어야 한다. 이는 관성에 의해 빔이 예정된 곳을 지나치지 않도록 하기위해 속도를 감속한다. 이 같은 속도변화에 상응해서 레이저출력이 맞춰져야 한다. Pulse방식에서는 첨두출력(peak power)를 변화시키지 않고 평균출력을 감속에 따라 낮출수 있다. Pulse기능이 없는 Laser system에서는 평균출력을 낮추기 위해서는 peak power를 낮추어야 하므로 절단면 quality가 저하되는 결과를 낳게 된다. Super pulse는 평균출력이 낮지만 높은 첨두출력을 요구하는 가공재료(예, 유리, stainless steel)에 긴요하게 사용된다. 유리의 경우 thermal shock로 인해 전단면에 미세균열이 형성되는 것을 방지하기 위해서 super pulse를 사용하며, 두꺼운 stainless steel절단의 경우 용융온도가 높은 Cr-산화물을 제거시키는데 super pulse기능을 활용하면 효과적이다.

CW와 super pulse가 조합된 방식은 두꺼운 알루미늄(8mm)절단에 효과적으로 사용되는데, 알

루미늄은 열전도가 크고 산화물의 조적이 치밀하고 용융점이 높으므로 CW로 충분한 에너지를 공급하고, super pulse로 산화막을 파괴시켜 타 작동방식에서 얻을 수 없는 좋은 절단효과를 얻을 수 있다.

5.1.3. 레이저 출력

최고 절단속도와 절단두께는 레이저 출력으로 결정된다. 출력에 따른 절단속도가 재질두께에 따라 그림 4에 표시되어 있다.

5.1.4. Beam Quality

Beam quality는 mode, 출력의 밀도(intensity) 그리고 시간에 따른 안정성(temporal stability)으로써 표시될 수 있다.

TEM mode는 beam의 intensity분포를 나타낸다. Mode를 간단하게 설명하기 위해 박판의 진동을 예로 들어 보면 아래 나타난 여러 형태의 mode를 이해하기 쉬울것이다. 우선 박판이 표면 에수직 방향으로 진동할 경우 여러형태가 있을것이다. 우선 TEM₀₀에서와 같이 중앙부분이 가장 큰 진폭을 갖고 진동할 경우 생각할 수 있고 TEM₁₀에서와 같이 ring모양으로 정지된 부분이 있어 중심과 가장자리 부분만 진동할 경우, TEM₂₀에서는 2개의 ring부분이 있는 경우 등을 생각할 수 있다. Mode number가 커질수록 수렴성(Focusing)은 저하되며, 따라서 초점에서 얻을 수 있는 beam의 intensity가 저하된다. 또한 같은 크기의 초점 크기 일지라도 mode number가 크면 초점심도(focal depth)가 작아 두꺼운 판재의 경우 절단면이 재료표면에 수직으로 형성되기가 어렵다(그림 13, 14).

5.1.5. 출력 밀도(Intensity)

Intensity는 재료가공에서 중요한 변수중에 하나다. Intensity는 절단속도와 가공 효율에 영향을 준다. 레이저 절단시 출력밀도($I > 10^6 \text{W/cm}^2$)를 가공표면에 얻기위해서는 거울 또는 렌즈를 사용하여 초점을 맞춘다. 렌즈 초점거리, mode number, 파장등과 초점 형성과의 관계는 이미 앞에서 설명했으므로 여기서는 반복을 피한다.

Beam quality에서 시간에 따른 출력변화 또한 가공에 영향을 미친다. 따라서 가공결과에 따른 원인분석을 위해서는 beam진단장치(diagnostic system)가 필요하다. 레이저 절단의 실제에 있어

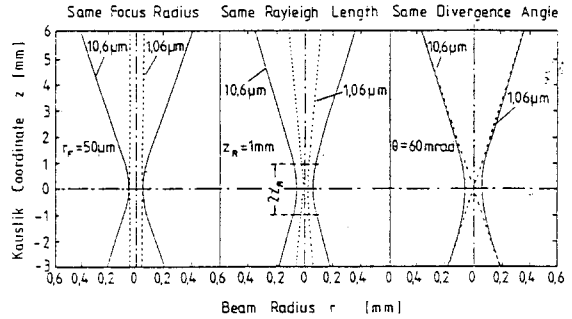


그림 13 CO₂-Laser beam과 Nd : YAG-Laser beam의 수렴성 비교

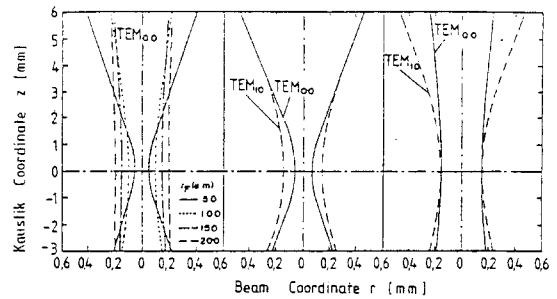


그림 14 TEM₀₀와 TEM₁₀의 수렴성 비교

출력변동폭이 ±5%이내인 경우는 그 영향을 직접 가공결과에서 인지할 수 없음이 밝혀져 있다.

5.1.6. 초점위치

초점의 위치는 재료표면에서 내부로 두께의 1/3 위치에 둘때 평행한 절단면을 얻을 수 있다고 밝혀져 있다. 그러나 이것은 충분한 intensity가 재료표면에 형성되었다는 것을 전제로 한다. 적절한 초점위치는 다른 변수(parameter)에 의해 변할 수도 있음을 언급하고 싶다. 초점이 재료표면에 있을때 또는 상부에 위치했을때 좋은 절단결과를 얻는수도 있다. 초점의 위치는 lens가 열 또는 절단가스(cutting gas)의 압력으로 때에 따라서는 수 mm까지 변하는 수도 있다. 따라서 정밀한 금속거울을 절단에 사용하는 것이 바람직하다. 현재 lens에 못지않는 정밀한 금속거울이 시판되고 있다(Zeiss).

5.1.7. 편광과 입사각(Polarization & Incidence Angle)

편광방향에 따라 절단효과가 차이가 난다고 하

는 것은 이미 알려져 있다(그림 10). 편광에는 선형(linear), 원형(circular)편광이 있다. 선형편광은 공진기(resonator)구조에 의해 생겨나며, 따라서 편광성이 없는 (statistical unpolarized) beam을 발생시키는 resonator도 있다.

상용으로 사용되는 CO₂-Laser에서 선형편광은 편광방향에 따른 resonator내부 금속거울에서의 반사율 차이(그림 9c)로 인해 생겨나며 절단시 위에서 언급한 차이때문에 phase retarder를 사용하여 circular polarization으로 바꾼다.

편광방향에 따라 절단속도뿐 아니라 절단면의 기하학적 형상도 영향을 받는다. 이같은 영향들은 beam의 입사각, 즉 절단선부와 beam이 이루는 각이 75-85°이며 이때 Rs와 Rp의 차이가 대단히 큰 관계로 생긴다.

Phase retarder를 거쳐 circular polarization된 beam이 beam guiding system에서 몇개의 거울을 통해 유도되는 동안 elliptical polarization으로 일부 바뀌는 경우도 있다.

따라서 이런경우 polarization방향을 측정해 보는 것이 필요하다.

5.2. 절단속도

절단면 quality와 절단속도간의 정성적인 관계에서 언제나 일정한 규칙이 있다. 즉 적정절단 속

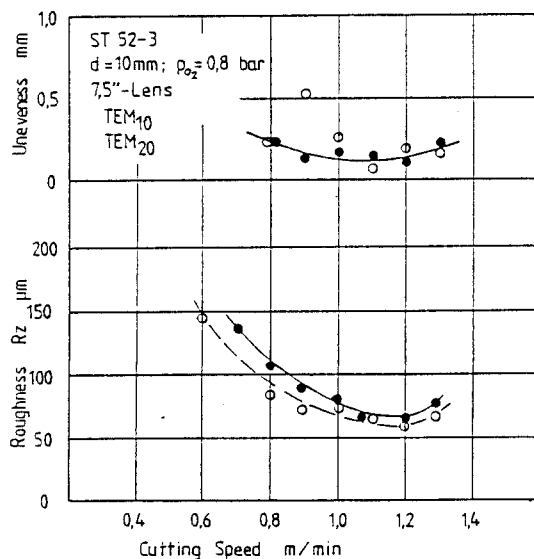


그림 15 절단속도에 따른 절단면 거칠기와 평행도

도는 최고속도 보다 낮은곳에 위치한다는 사실이 다.

이와같은 현상은 절단방향, 즉 절단선부에 형성되는 온도구배의 차이로 인한 것으로 설명이 된다. 절단속도가 느릴경우 온도구배가 완만하여, 절단선부용융 slag/금속-모재(고체)에 이르는 범위가 커지게 된다. 따라서 절단가스의 운동량(momentum)에 의해 제거되는 범위 또한 크게 된다. 이상적인 절단면을 얻기 위해서는 slag의 점도가 낮고, 즉 온도구배가 높아서, slag의 제거가 용이해야 한다. 온도구배가 낮은 경우에는 slag의 점도보다 용융금속의 점도가 낮아 용융금속 부위가 절단가스에 의해 제거되므로, 동시에 절단폭도 넓어지므로, 절단면 quality가 저하되고, 절단폭도 커지게 된다. 절단속도가 과도하게 빠르면 slag/용융금속이 절단하부에서 제거된 흔적이 남게되어 결국 표면조도가 저하되는 결과를 낳는다. 즉 이때는 온도구배가 너무 급격하게 형성되 응고가 그만큼 빠르게 되어, 표면장력으로인한 보상이 이루어지지 않게 된다. 또 과도속도 범위에서는 slag/용융금속이 균일하게 제거되지 못하고, 불안정(unstable)하게 되어 품질의 저하를 초래하기도 한다.

5.3. 절단가스의 영향

절단가스(cutting gas)의 영향은 물리적, 화학적 그리고 유체역학적인 것으로 분류될 수 있다. 절단가스 성분에 의해 화학적 반응이 결정되고, 절단가스의 열전도와 비중, 그리고 가스와 slag사이의 표면장력 등이 slag의 유동성에 영향을 주며, gas jet의 압력과 분출현상은 slag의 제거에 영향을 준다.

5.3.1. 화학적인 특성

연소절단에 있어서 발열반응(exothermic reaction)은 절단가스의 화학적 조성에 영향을 받는다. 연소점(ignition temperature)이상에서 금속은 산소와 격렬하게 반응하며, 이때 생성되는 열은 절단효과를 향상시킨다. 이러한 발열반응에서 생성되는 열량은 절단에 소요되는 총열량중 거의 70%를 차지한다.

5.3.2. 물리적특성과 동적에너지(Physical Properties & Kinetic Energy)

절단가스의 물리적 특성과 동적에너지는 slag의

제거와 관련이 있다. 가스의 비중이 클수록 gas jet의 impulse 전달이 효과적으로 되며, impulse 전달은 가스의 속도가 클수록 또한 크게 된다. gas jet의 속도는 nozzle의 형상과 압력에 의해 결정된다. 가스의 열전도성은 얇은 박판의 경우 고려되지 않으나, 두꺼운 재료에 있어서는 절단효과에 영향을 준다.

5.4. Cutting Head의 영향

Cutting head의 구조는 작업의 수행과 반복성에 많은 영향을 준다.

Cutting head가 갖춰야 할 사항들은

- 기계적인 안정성
- 광축 (beam axis)에 맞게 조절하는 기능 및 거리조절 기능
- Gas의 밀폐성

특히 중요한 것은 거리조절 기능으로, 이는 절단이 용이하지 않는 금속을 절단할 때 정확한 거리조절이 필요하기 때문이다.

Cutting head는 통상 높이(거리)조절장치, 초점 lens 또는 거울, 절단 gas공급로 그리고 nozzle의 조합이다.

5.4.1. 높이조절

높이조절은 두가지 방법으로 할 수 있다(그림 16). 이 두가지 방법을 조합해서 사용하는 수도 있다. 이 경우 기계적 안정성이 감소된다.

왼쪽의 경우 lens가 안정되어있고, 오른쪽의 경우 nozzle이 큰 안정성을 갖는다.

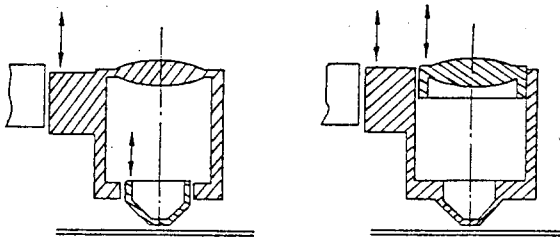


그림 16 Cutting head의 높이조절 기능

5.4.2. 수렴장치(Focussing Optics)

Beam을 수렴하기 위해 lens 또는 거울을 사용한다. 이때 lens 또는 거울이 쉽게 교환이 가능하고, 장기간에 걸쳐 위치의 변화가 없도록 주변장치가 설계되어야 한다. lens를 사용하는 경우 광

이 nozzle의 중심부를 통과하도록 쉽게 조절이 가능하나, 거울을 사용할 경우 lens와 같이 쉽지는 않다. 절단 gas의 압력은 lens 또는 window(거울 사용의 경우)에 직접 전달되어, 최고압력은 이들 재료의 강도에 따라 결정된다.

5.4.3. 절단 Gas 공급

3가지 종류가 있다. 그림 17a)의 경우 최고압력이 lens의 강도에 따라 결정되고, b)의 경우는 초점의 위치와 gas jet의 작용위치가 정확하게 조정되어야 하며, c)의 경우 절단 gas의 압력이 직접 lens에 작용하지 않고 ZnSe window에 작용한다. window의 지름이 작음으로인해 큰 압력을 견딜수 있으나 높은 밀도의 출력이 작용함으로 바람직하지 않다.

b)의 경우도 곡선을 절단하는데에는 적합하지 않다. 최근에는 절단 gas를 경사지게, nozzle방향으로 공급함으로써 lens에 걸리는 부하를 낮추는 방법도 있으며, 또는 두꺼운 lens를 사용해 a)에 경우에서 1.5MPa까지 절단 gas의 압력을 높이기도 한다.

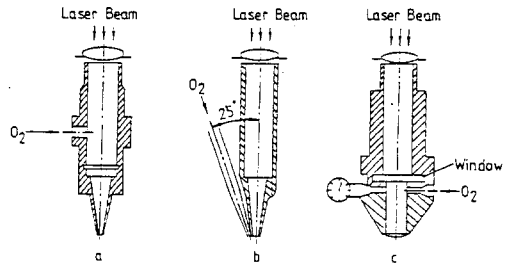


그림 17 절단 gas공급방법

5.5. Cutting Nozzle의 영향

Cutting nozzle는 연속적으로 균일하고 효과적으로 gas jet의 kinetic energy를 절단부에 작용시켜 slag이 효과적으로 제거되도록 하는 역할을 한다. 이 때 nozzle의 직경, 재료와의 거리, nozzle 형상등이 변수로 고려된다.

5.5.1. Nozzle직경

Laser beam과 gas가 동축인 경우 nozzle의 직경은 beam이 접촉하지 않고 통과되도록 충분히 커야 한다. nozzle의 직경에 관해서는 여러가지 상반되는 연구결과가 나와 있으나, 결과적으로 다

른변수와 상호연관을 갖음으로 해서 일반적으로 직경의 크기를 결정할 수 없고 경우에 따라 결정될 성질이라고 본다. 단지 gas의 소모측면에서 볼때 과도하게 큰 nozzle은 바람직하지 않으므로 통상 $\Phi 1\text{mm}$ 이하가 사용된다.

5.5.2. Nozzle과 재료와의 거리

거리는 가능한 가까울수록 좋다. 거리가 가까우면 gas jet의 kinetic energy의 손실이 그만큼 작아진다. 피가공물의 평면도를 고려하여 통상 1mm 이내로 한다.

5.6. 재료의 영향

절단성은 재료의 특성에 상당히 큰 영향을 받는다. 중요한 특서으로는 산소와의 친화력, 열전도율 그리고 흡수율을 든다.

5.6.1. 산소와의 친화력-연소절단의 경우

합금을 절단할 경우 합금원소들이 갖는 산소와의 친화력의 차이에 의해 선택적으로 산화/연소가 일어난다. 즉 각 합금원소가 동시에 산화/연소되지 않고 친화력이 높은 순으로 반응이 일어난다. Stainless강을 절단할 때 합금원소인 Cr은 Fe 또는 Ni보다 산소와의 친화력이 높아 다른 원소보다 선택적으로 Cr산화물을 생성한다. 따라서 slag의 조성에서 Cr산화물의 백분율은 모재에서 Cr이 차지하는 비율보다 훨씬 상회한다. 반면에 Ni은 친화력 낮음으로 인해 산화/연소 반응에서 Cr이나 Fe보다 낮은 비율로 산화/연소물을 생성시키므로 slag에서 Ni의 비중은 모재에서 보다 매우 낮다. 즉 반응속도가 느려 절단면 부근에 많은 부분이 잔류하게 된다. 이와같은 현상은 절단성에 직접적인 영향을 미치는데 이유는 Cr의 산화물인 Cr_2O_3 의 용융점이 모재의 용융점보다 높고, Fe, Cr, Ni의 산화물로된 slag의 점도 및 표면장력을 크게하여 slag이 원활하게 gas jet에 의해 제거되지 않기 때문이다. slag이 원활하게 제거되지 않음으로인해, 즉 산소와 모재(cutting front에서)사

이의 거리(slag의 두께)가 커지게 되어 연소반응속도가 느려지게 되고 따라서 절단속도가 저하되는 결과를 낳는다. 이뿐만아니라 slag의 용융점이 결과적으로 모재의 용융점보다 높게 되어 slag과 slag사이에서 erosion이 일어나지않고 melt내에서 erosion이 일어나 절단면은 매끄럽지 못한 결과를 낳는다. 이러한 난점을 어느정도 극복하기 위해서는 pulse를 사용하여 heat input을 조절하는 것도 한 해결방안이다.

Aluminium절단의 경우 산화물인 Al_2O_3 의 용융점(660°C)보다 훨씬 높은 2030°C 에 달하고 Al_2O_3 는 매우 치밀한 산화막을 형성하므로 절단이 순조롭게 진행되지 않는다.

5.6.2. 열전도율

실제 절단작용에 사용된 energy는 총 가해진 energy에서 손실(주로 열전도에 의한)을 뺀 량이다. 열전도율이 높은 금속일수록 절단효율은 저하된다. 따라서 그만큼 많은 energy를 가해야 한다. 열전도율이 높은 금속으로 cu와 Al은 또한 laser beam의 흡수율이 낮아 효율이 낮다.

5.7. 피가공물

피가공물의 두께에 따른 절단속도의 변화는 그림 4에서 보듯이 상당히 크다.

<다음호 계속>

참고문헌

- Y.H. Han : Werkstoffveränderungen beim Laserstrahlschneiden von Stählen, Ni-Basis und Cu-Ni-Legierungen und deren Einfluß auf die Schwingfestigkeit, VDI-Verlag, 1988 Düsseldorf.
- K. Wissenbach : Umwandlungshärten mit CO_2 -Laserstrahlung, Ph-D Thesis Darmstadt, 1985