

解 說

大韓熔接學會誌  
第8卷第4號 1990年 12月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 8, No. 4, Dec., 1990

## 레이저 가공기술(II)

한 유 희\*

### Laser Beam Processing Technique(II)\*

Y. H. Han\*

<차

례>

1. 레이저 용접

1.1 레이저 용접의 원리

1.2 타 용접법과의 비교

1.3 용접부 현상

1.3.1 용접깊이

1.3.2 용접단면

1.4 레이저 용접의 특성

1.5 레이저 용접의 한계

### I. 레이저 용접(Laser Welding)

레이저 용접은 용융 접합 범주에 속한다. 고밀도 레이저빔이 집속되어 용접물에 흡수되어 열로 변환되어 용융이 일어난다. 레이저빔은 전자파로써 레이저 광원과 물체사이에 기계적 또는 전기적인 접촉이 없다.

kW급의 레이저가 출현하면서부터 레이저 용접의 중요성이 부각되기 시작했다.

레이저 용접의 장점은

- 용접속도가 크다.
- 용입깊이가 깊다.
- 열에 의한 변형이 작다.
- 어느 분위기에서도 용접이 가능하다.
- 유연성
- 같은 장비로 절단 및 표면처리

등을 들 수 있다.

#### I. 1. 레이저 용접의 원리

레이저는 다른 어떤 광원보다 발산(divergence)이 적은 빛을 방출하며, 따라서 이 빛은 먼 거리까지 이송할 수 있다. 레이저 용접은 광원(Laser)에서 멀리 떨어진 곳에서도 가능한데, 이때 거울을 사용하여 원하는 곳까지 빛을 유도하게 된다. 그림 1은 전형적인 레이저 용접기의 계략을 나타낸다.

레이저 용접의 원리는 그림 2에 표시되어 있다. 레이저 빔은 거울 또는 렌즈로 가공물에 수렴되며, 물체 표면에서 일부 흡수된다. 흡수된 빔은 열에너지로 변환되어 국부적인 가열이 일어나 용융에 이른다. 이때 물체 내부로 열이 전달되어 용융된 부위가 확장된다. 용융부위 즉 용접단면 형상은 열전도도에 영향을 받게 된다. 출력의 밀도(Intensity)가 상대적으로 클 경우에는 물질의 기화/승화로 인한 key hole이 형성되며,

\* 정회원, 한국해사기술연구소

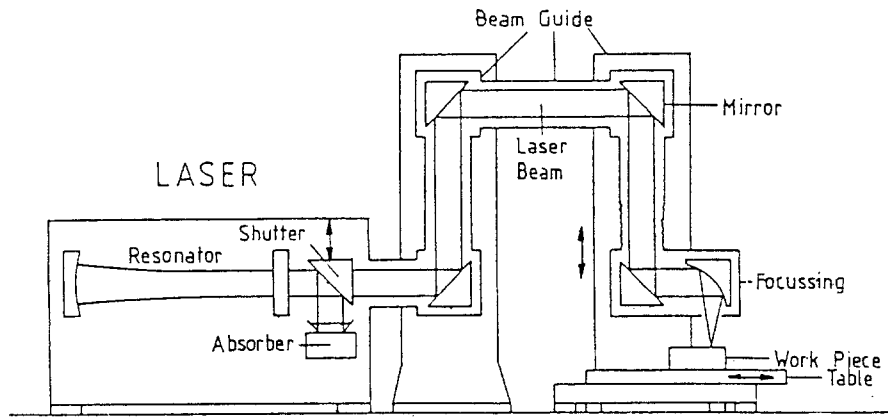


그림 1 레이저 가공기의 개략도

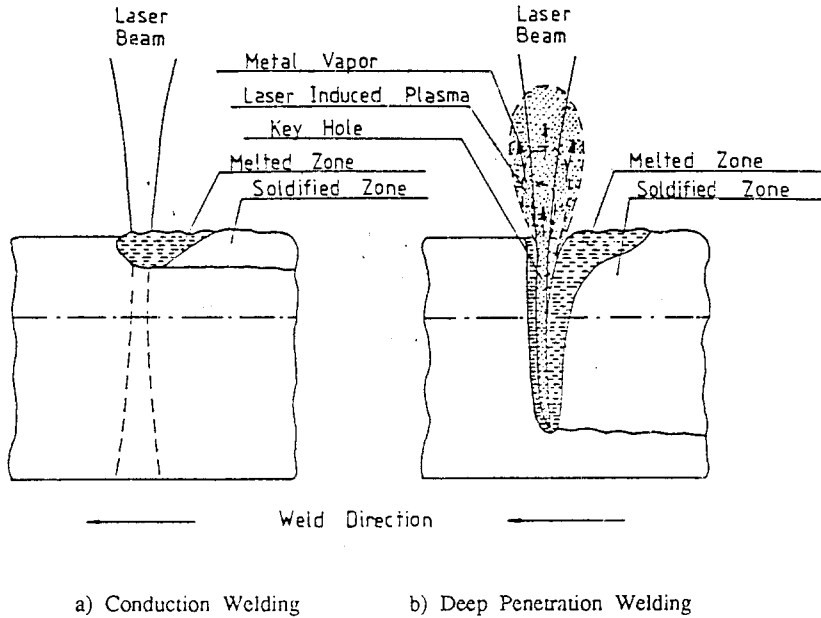


그림 2 레이저 용접의 원리

key hole의 형상은 레이저 빔과 기타 공정 parameter 용접(용접속도, 초점의 위치, 등등)에 의해 결정된다.

key hole의 직경은 CO<sub>2</sub>-Laser의 경우 대략 0.2-1 mm에 달한다. 이러한 key hole이 형성됨에 따라 용입깊이가 폭에 비해 커지며 이때 key hole의 주위는 용융상태의 금속으로 둘러 싸여 있게 된다. 기화/승화시의 압력으로 key hole은 열린 상태에서 용접 방향으

로 마치 하나의 관(vapor capillary)처럼 이동한다.

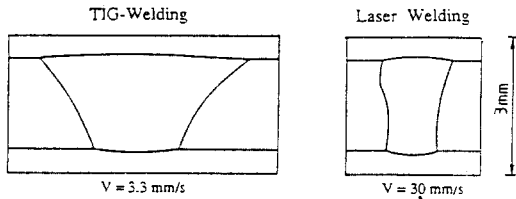
1.2. 타 용접법과 비교

그림 3은 2kW Laser로 용접한 것과 TIG(Tungsten Inert Gas)로 용접한 단면을 각각 나타내고 있다. 높은 에너지 밀도로 레이저의 경우 용접속도가 약 5배 빠르고 TIG에 비해 단위길이당 에너지는 1/5 정도이다. 따라서 용접부 단면적이 적다.

6mm 강판 용접의 경우 3kW 이상의 Laser출력이 필요하다.

다음의 그림 4는 Laser와 MAG(Metal Active Gas; 예 : CO<sub>2</sub> Welding) 용접을 비교한 것을 나타낸다.

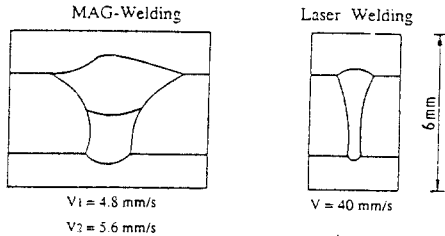
세번째 예로 10mm 강판 용접을 할 경우 대략 10 kW의 Laser 출력이 필요하고, 이 범위의 강판은 통상 Surmerged Arc 용접(잠호용접)이 사용된다(그림 5).



용접단면 비교 (TIG/Laser)

Laser의 경우 약 10배 빠르다

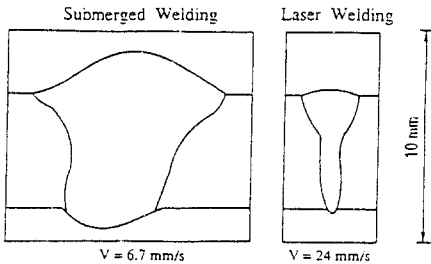
그림 3 용접단면 비교(TIG : Laser)



용접단면 비교 (MAG/Laser)

Laser의 경우 MAG에 비해 1/15 정도 소요

그림 4 용접단면 비교(MAG : Laser)



용접단면 비교 (Submerged Arc/Laser)

Laser의 경우 약 3.5배 빠르다

그림 5 용접단면 비교(Submerged Arc : Laser : EB)

다음의 그림은 3가지 용접을 나타낸 것으로 MAG 용접에서 용접단면이 가장 크고 전자빔(Electron beam)용접의 경우가 가장 적다.

레이저 용접에서 출력의 밀도(Intensity)가 크고, 용접속도가 빠른 관계로 온도구배는 약 10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup>°C/mm에 달한다. 이로 인해 용접부의 경화현상이 나타나고 경화치는 MAG에 비해 2배 이상에 달한다(그림 6).

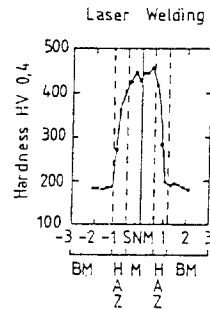
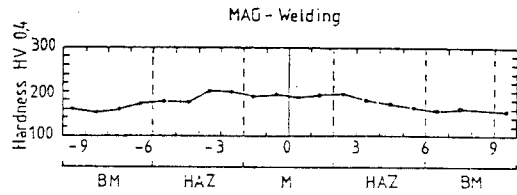


그림 6 MAG 용접과 Laser 용접에서의 용접부의 경도상승 비교

### 1.3. 용접부의 형상

레이저 용접부를 판단하는 근거로써는 용접결합과 조직상태 그리고 용접부형상(용접깊이, 용접단면형상)을 들 수 있다. 이들은 많은 parameter의 영향을 받는다.

Parameter는 Laser Parameter, Process Parameter (공정) 그리고 용접재료로 크게 구분할 수 있다.

#### 1.3.1. 용접깊이

용접깊이는 다음의 parameter에 영향을 받는다.

##### 1) Laser parameter

- 레이저 출력
- 초점반경
- 레이저 빔 모드(TEM)

· 초점 부위에서의 발산 (divergency)

2) 공정 parameter

- 용접속도
- 플라즈마 제어용 가스
- 초점위치

3) 용접재료

- 재료특성 (열전도율, 흡수율, 증발열)
- 용접이음부 준비상태 (이음부 단면상태, 표면상태)
- 용접이음부 형상

우선 용접속도와 용접깊이와의 관계를 살펴본다.

그림 7에서 레이저와 전자빔 용접에 있어서 용접속도에 따른 용접깊이가 나타나 있다.

용접속도가 낮은 경우 외에는 용접깊이의 차이가 별로 크지 않고, 이때 용접깊이는 대략

$$d = C \cdot \frac{1}{V} \quad (1)$$

로 표시할 수 있다. 용접속도가 적을때 레이저 용접시 용입깊이가 전자빔보다 월등히 적은 것은 plasma와

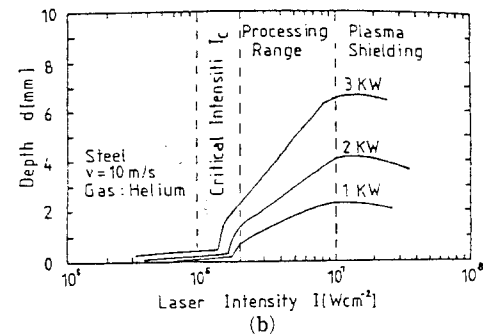
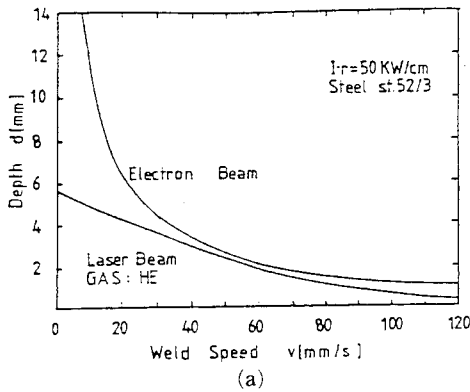


그림 7 a) Laser와 EB 용접에서 용접속도에 따른 용접깊이 변화  
b) 각 출력에서 Intensity에 따른 용접깊이 변화

beam의 발산에 기인한다.

식 (1)의 비례상수 C는 예를 들어 그림 7b에서 보듯이 여러변수의 영향을 받는다.

용접깊이는 용접속도가 일정할때 레이저 출력과 밀도 (Intensity)의 영향을 받으며, 어느 임계출력밀도 (Critical Intensity)를 경계로 용접깊이가 급격하게 커진다. 이같은 용접깊이의 급격한 성장은 plasma 발생 및 key hole (Vapor Capillary) 형성에 기인하며, 이때 레이저 빔은 key hole내벽에서 다중 반사되고 따라서 용접효율이 높아진다. Intensity가 과도한 경우 ( $> 10^7 \text{ Wcm}^{-2}$ )에는 용접깊이가 오히려 감소하는데, 이때는 plasma가 과도하게 발생해 레이저 빔을 일부 차단하기 때문이다. Plasma가 과도히 발생하지 않는 범위에서는 plasma는 레이저빔의 흡수율을 높히는 역할을 한다.

Key hole (Vapor Capillary)의 체적이 커질수록 이를 유지하기 위한 빔에서도 커지게 된다.

Key hole (Vapor Capillary)의 형태를 Cylinder (그림 8)로 가정하면 (이는 재료두께가 초점심도 보다 작을때 유효) 용접에 필요한 레이저 출력은

- 용접깊이 d
- 용접속도 V 및
- 초점반경  $r_F$

즉 Key hole 체적 (시간당)에 비례한다.

$$P_L \sim d \cdot V \cdot r_F$$

$$d \sim \frac{P_L}{V \cdot r_F} \quad (2)$$

이 관계식은 cylinder형의 분포를 갖는빔, 즉 고차의 Mode를 갖는빔 (TEM<sub>x,y</sub> x, y > 0)일때 유효하다. TEM<sub>00</sub> Mode 및 Unstable Resonator의 빔의 경우에는 빔의 중심부의 Intensity가 평균치보다 약 2배 높으므로 용접깊이와 Beam Parameter의 관계설정시 이점을 고려해야 한다. 따라서 용접깊이는  $P_L/r_F$  대신

$$d \approx \text{Im ax} \cdot r_F / V \quad (3)$$

로 표시된다. 이는 Unstable Resonator 또는 TEM<sub>00</sub>에 유효하며 Imax에 실험적으로 얻어진 최대 Intensity를 의미한다. Multimode에서 Imax는

$$\text{Imax} = \frac{P_L}{\pi r_F^2} \quad (4)$$

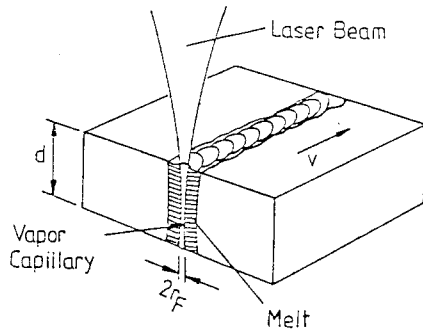


그림 8 Key hlole (Vapor Capillary) 및 Engrgy Balance

$$E_1 = \text{Heating Energy}$$

$$E_2 = \text{Latent Heat of Melting}$$

$$E_3 = \text{Latent Heat of Vaporization}$$

$$E_4 = \text{Heat Loss by Conduction}$$

$$P_L = (E_1 + E_2 + E_3)/t + E_4/t + V \times (E_1 + E_2 + E_3)/t \sim dr_F v$$

$$\text{Loss } V \approx 0$$

$$E_4 < E_3$$

$$P \sim d r_F v$$

$$v \neq 0$$

로 표시된다.

그림 9에서 용접깊이  $d$ 와  $I_{max} \cdot r_F$ 의 선형적인 관계가 나타나 있다. 기술기는 용접속도 및 재료의 물성(열전도, 비등점, 잠열, 밀도등)에 영향을 받는다.

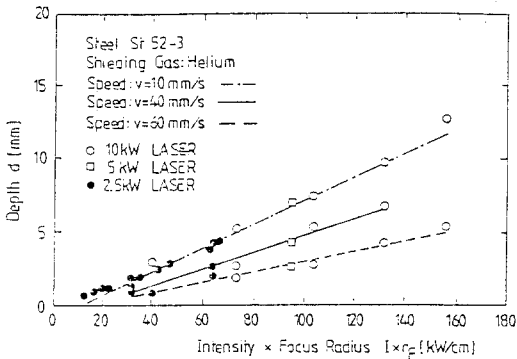


그림 9  $I \cdot r_F$  값에 따른 용접깊이

$d \sim \frac{P_L}{v \cdot r}$  및  $d \approx I_{max} \cdot \frac{r_F}{V}$ 의 관계식은 레이저 빔이 효율적으로 물체에 흡수될 경우에 유효하다. 여기에서 Beam Kaustik의 영향은 고려되지 않았다.

그림 10에는 용접속도에 따른 용입깊이를 나타내고 있다. F-Number에 따라 용입깊이가 다른것을 알 수 있다. F-Number는 초점거리를 빔의 직경으로 나눈 값이다(그림 11에 F=3 및 F=5일때의 Beam Kaustik이 나타나 있다.)

F-Number에 관계없이 용접깊이는  $d$ 는  $P_L/r_F$ 에 비례함이 일부영역을 제외하고 유효함을 알 수 있다. 낮은 용접속도( $v < 30\text{mm/s}$ )에서 용입깊이의 급격한 변화는 빔의 발산 및 플라즈마에 의한 영향 때문이다. 그림 11에서는 다음과 같은 사실을 유추할 수 있다. :

F=5일 경우  $I_c$ (Critical Intensity)의 범위가 F=3 경우보다 크다. 따라서 최대 용입깊이 (용접속도가 최저 일때)는 Focus Radius 보다는 Beam Divergence에 직접 영향을 받는다고 볼 수 있다. 이러한 사실은 저속에서 최대의 용입깊이를 얻기 위해서는 F-Number가 큰 Optic을 사용하는 것이 바람직하다는 것을 시사한다.

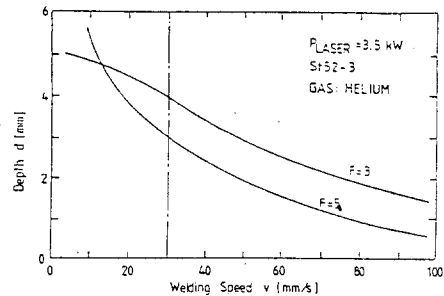


그림 10 상이한 F-Number에서 용접속도에 따른 용접깊이

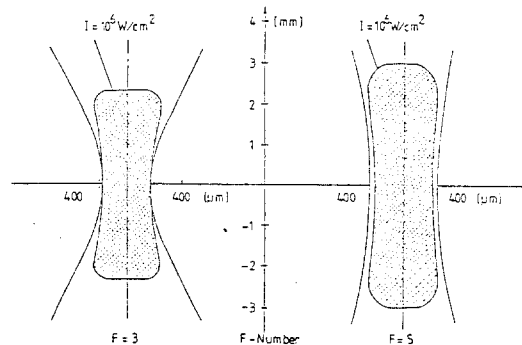


그림 11 그림 10에 속한 F=3와 F=5에서의 Beam Kaustik

Table 1 Parameter들이 용접결과에 미치는 영향

Parameters		용접결과에 미치는 영향
Beam parameter	출력밀도 I (Intensity)	가공범위의 한계 (플라즈마 생성, 플라즈마 차단)
	출력밀도×초점반경 (Intensity×Focus radius) $I \times r_f$	최고 용접깊이 결정 ( $V = \text{const}$ 일때)
Process parameter	출력/속도 $P/V$	용접단면적, Hardness, Porosity
	Process gas	효율(용접깊이, 용접단면적), 용접결합
	초점위치	용접깊이, 용접단면형상, 용접결합
Workpiece parameter	재료	효율(용접깊이, 용접단면적), 용접결합
	표면상태 (예, 청결상태)	용접결합(Crack, 이물질)
	이음부 가공	비드의 함몰

레이저 용접기를 운용하는데 있어 이와같은 저속용접은 특별한 경우를 제외하고는 사용하지 않도록 한다.

### 1.3.2. 용접부단면

용접깊이와 함께 용접부 폭 또한 레이저 용접부 평가의 중요 인자라고 할 수 있다.

그러나 용접부 폭 자체 하나만으로는 별로 의미가 없다. 용접부 폭을 어느 위치에서 측정하느냐에 따라 변동이 크므로 용접부 단면적도 고려해야 한다.

용접부 단면적  $A$ 는 단위길이당 유입된 열량 (Energy Per Unit Length)에 비례하므로 다음과 같이 표기된다.

$$A \sim P/V \quad (5)$$

비례상수는 재료의 특성 (열전도율, 비열...)에 따라 결정된다.

레이저 용접시 각 parameter가 용접결과에 미치는 영향을 정리하면 다음과 같다.

### 1.4. 레이저 용접의 특성

레이저 용접부의 형상은 깊고 폭이 좁은 관계로, 용접 중심부에서 모재에 이르는 온도구배가 크고, 따라서 냉각속도가 크다. 냉각속도가 크므로 해서 용접부의 경도가 높게 나타난다.

단일 길이당 유입된 열량이 용접단면 및 경도치에 미치는 영향을 다음 그림 12에 나타나 있다. 용접속도가 커짐에 따라 냉각속도는 빨라지면 따라서 용접부의 경도는 상승한다. 경도의 상승은 용접부의 crack 생

성 및 인성의 저하를 가져올 수 있으므로 탄소당량이 높은 재질의 경우에는 예열 등의 조치가 필요하다.

용용범위가 타 용접에서 보다 적은 관계로 수축 또한 적게 일어난다.

### 1.5. 레이저 용접의 한계

재료의 용접가능성은 재료물성과 직접적인 관계가 있다. Arc 또는 gas 용접시, crack 또는 porosity 등을 형성하는 금속은 레이저 용접에서도 그와 같은 결함이 적게 혹은 확대되어 나타날 수 있다. 따라서 얼마만큼의 좋은 용접성을 갖고 있는가는 매 금속마다 연구가 행해져야 한다.

레이저 용접의 특이사항에서 금속과 beam의 상호작용을 빼놓을 수 없다.  $\text{CO}_2$ -Laser beam은 거의 모든 금속에서 90% 이상이 반사된다. 그럼에도 불구하고 용접시 거의 전체 beam energy가 흡수되는 것은 Plasma 및 Key hole의 형성 덕분이다.

Key hole이 형성되기 위해서는 물체의 표면 부위의 온도가 순식간에 증발온도 이상으로 가열되어야 하므로, 반사율이 높고 열전도가 큰 금속을 용접하기 위해서는 beam의 intensity가 커야 한다. 이같이 용접효율이 작은 금속으로는 알루미늄과 구리, 금 등이 있으며, 따라서 이들은 거울로서 사용된다. 레이저 용접의 한계는 parameter가 많은 관계로 아직 연구가 진행중이므로 뚜렷이 규정할 수는 없으나, 참고삼아 다음의 두 그림(그림 13, 14)을 이용해 대략 용접속도에 따른 용접깊이를 예측할 수 있다.

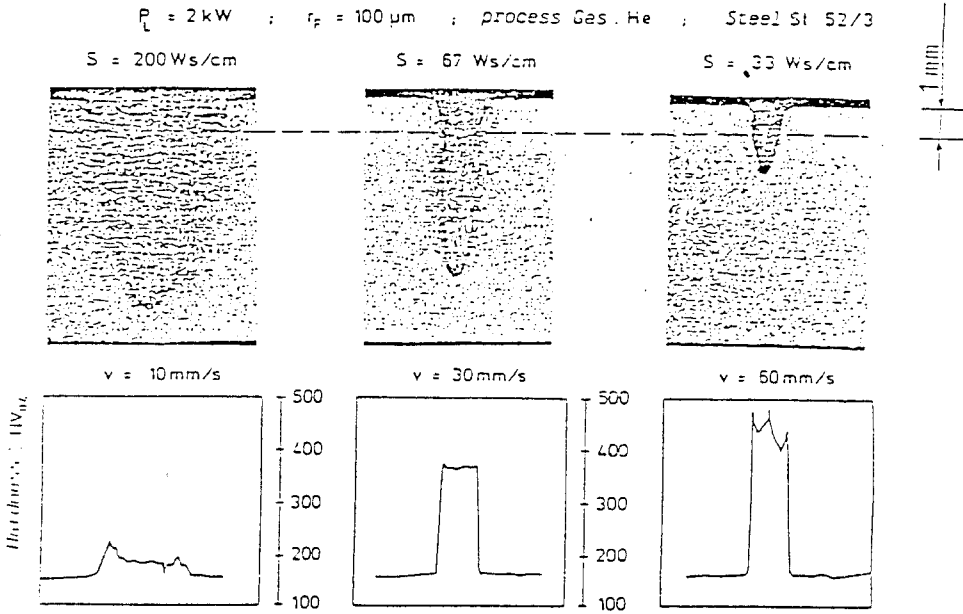


그림 12 단위 길이당 에너지에 따른 경도상승 효과

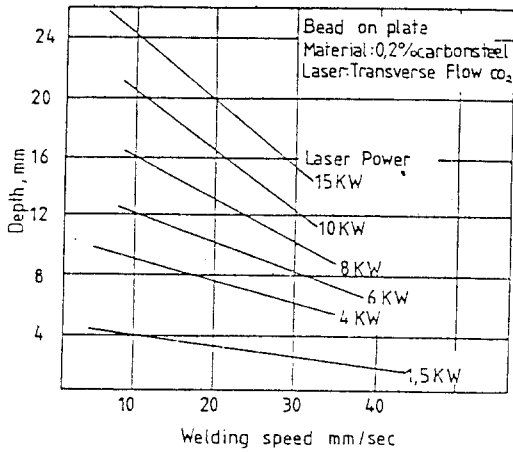


그림 13 각 출력에서 용접속도에 따른 용접깊이 변화

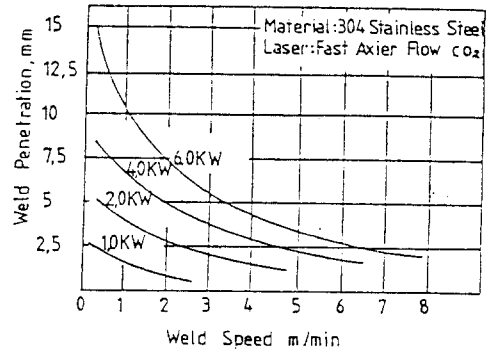


그림 14 각 출력에서 용접속도에 따른 용접깊이 변화