

# 레이저 빔 품질과 가공효율

## Laser beam quality and process efficiency

아이피지 포토닉스 코리아(주), 한 유희

### 1. 서론

레이저 가공의 성능과 품질을 결정하는 요소들 중에서, 가장 일반적인 파라미터인 **BPP (Beam Parameter Product)**와  $M^2$ 에 대하여 소개하고, 그에 따른 가공 효율과 특성을 절단과 용접의 사례를 통해 검토한다. **BPP**와  $M^2$ 는 기하광학적인 측면에서 빔의 품질을 나타내는 척도이며, 초점 크기와 발산각을 곱한 값이다.  $BPP = w_0\theta$  [mm\*mrad] 이고,  $w_0\theta = (\lambda/\pi) \cdot M^2$ 의 관계를 만족한다. 1064nm 레이저 빔의 경우,  $BPP \approx 0.34 M^2$ 이다. 실제 레이저 가공에서 **BPP**는 빔의 초점 크기와 작업 공간에 직접 영향을 미치며, 가공 효율을 결정하는 중요한 인자가 된다. 따라서, 빔의 품질을 나타내는 **BPP**값과 가공 효율 관계를 레이저 절단과 용접의 사례를 통하여 비교 분석한다.

### 2. 레이저 빔 품질

#### 2.1 공간적 분포 (Spatial distribution)

레이저 빔의 강도 분포는 Fig. 1과 같이 가우시안 커브로 표현된다.

$$I(r, z) = \frac{P}{\pi w(z)^2 / 2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{w(z)^2}\right) \quad (1)$$

빔의 반경  $w(z)$ 은 다음과 같이 주어지고,

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + (z/z_R)^2} \quad (2)$$

$w_0$ 는 빔의 크기가 최소인 곳의 반경이고,  $z_R$ 은 Rayleigh range라고 하는 빔 전반의 특성 파라미터로 최소 빔 반경의  $\sqrt{2}$  배가 되는 지점을 말한다.

$$z_R = \pi w_0^2 / \lambda \quad (3)$$

일반적으로 빔의 반경은 최대 강도의  $1/e^2$ (13.5%)이 되는 지점까지의 거리이다. 실제 레이저 빔과 이상적인 가우시안 빔의 관계는 다음과 같다.

$$Z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot M^2}, \quad \theta \cdot w_0 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2 \quad (4)$$

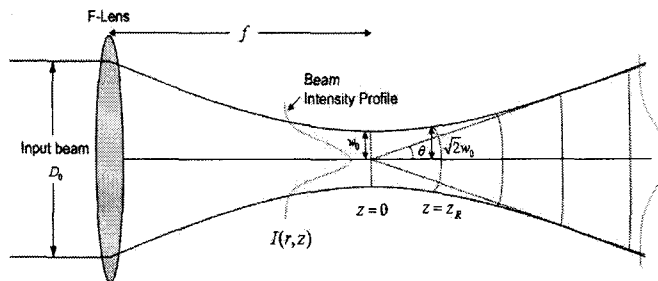


Fig. 1 Characteristics of Gaussian Beam

#### 2.2 빔 집속(Beam Focusing)

집속된 레이저 빔의 초점 크기는 다음과 같이 근사 계산된다. 초점 크기는  $M^2$ 에 비례한다.

$$2w_0 = \frac{4 \cdot f \cdot \lambda}{\pi \cdot D_0} \cdot M^2 \quad (5)$$

그리고, 초점 심도(Depth of Focus),  $L$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$L = 2 \cdot z_R = \frac{8 \cdot f^2 \cdot \lambda}{\pi \cdot D_0^2} \cdot M^2 \quad (6)$$

임의의 파장에서 초점 크기를 줄이기 위해서는 렌즈의 초점 길이  $f$ 를 줄이거나, 입사빔  $D_0$ 를 크게 하면 된다. 입사빔의 크기는 빔 익스팬더를 사용하여 조절할 수 있다.

### 3. 가공효율

#### 3.1 레이저 절단(Laser Cutting)

레이저 빔 품질이 레이저 절단에 미치는 관계를 조사하기 위해, 빔 품질이 서로 다른 파이버 레이저와 CO<sub>2</sub> 레이저, Nd:YAG 레이저를 각각 사용하여 실험하고 결과를 분석하였다. Table 1은 레이저 절단에 사용된 레이저 파라미터를 나타낸다. Fig. 2는 각각의 레이저에 대해, 가공 물질의 두께와 절단 속도를 비교한 결과이다. 스틸의 경우, 4kW의 파이버 레이저가 2배 이상 월등한 가공 속도를 보인다. 1kW의 파이버 레이저는 출력 파워가 1/3 임에도 불구하고, CO<sub>2</sub> 레이저 3kW와 동일한 속도이고, 1.8kW의 Nd:YAG 레이저 보다는 2~3배의 가공 속도를 얻었다. 알루미늄의 경우도 스틸과 같은 경향의 가공 결과를 보이고 있다. 빔 품질이 가공 속도를 지배하고, 가공 대상물의 두께가 얇을수록 그 차이가 현저하게 나타낸다. 이상의 결과로부터 빔의 품질을 나타내는 BPP값이 절단 속도를 결정하는 중요한 파라미터임을 나타낸다.

Table 1 Laser parameters for cutting applications

Type	Fiber, MM	Fiber, SM	CO <sub>2</sub>	Nd:YAG
Power[kW]	4.0	1.0	3.0	1.8
BPP[mm·mrad]	1.8	0.6	3.5	25
M <sup>2</sup>	5.3	1.8	1.1	73.5
Fiber core diameter[μm]	50	15	-	-

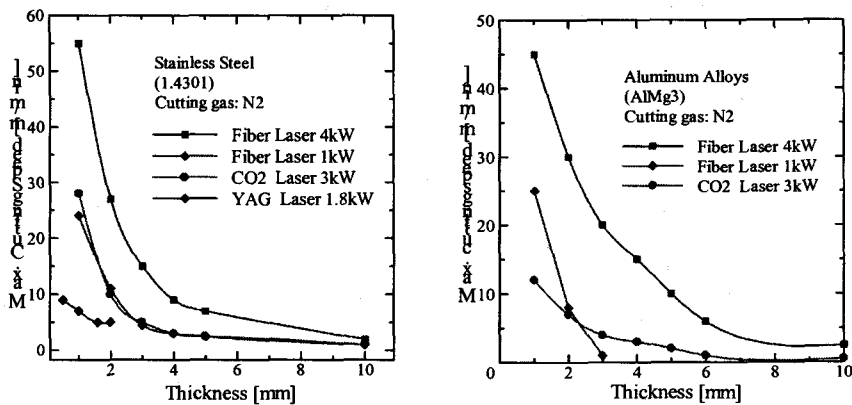


Fig. 2 Comparison of the maximum cutting speeds [1]

위의 실험에서는 서로 다른 파워의 레이저를 사용하였기 때문에, 절대적인 평가라고는 보기 어렵다. 따라서, 동일한 조건에서 빔 품질이 레이저 절단 가공에 미치는 영향을 분석하기 위해 같은 파워에서 가공한 결과를 정리 분석 하였다. Fig. 3은 각 레이저에 대해 동일 파워에서 최대 가공 속도와의 관계를 나타낸다. 빔 품질이 좋은 파이버 레이저가 2배 이상의 가공 속도를 내며, 파워가

높아질수록 그 정도가 높아진다. 이것은 빔 품질이 높은 파워에서 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 1kW의 파이버 레이저와 2.5kW의 CO<sub>2</sub> 레이저의 절단 폭과 단면을 나타낸 것이다. 파이버 레이저의 경우, 속도는 2-3배 증가했지만, 절단 선폭은 20 $\mu$ m 밖에 줄어들지 않았다.

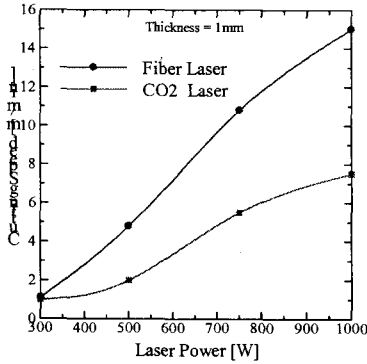


Fig. 3 Comparison of the cutting speeds [1]

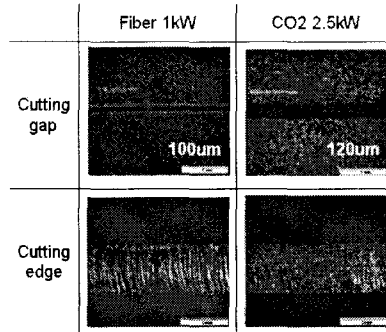


Fig. 4 Cutting results with different lasers [1]

레이저 절단에서 빔 품질과 가공 효율과의 관계를 알아보기 위해, 빔 품질이 다른 레이저를 스틸과 알루미늄에 적용하여 실험하였다. 빔 품질이 좋은 파이버 레이저가 월등한 가공 속도를 내며, 가공 결과에서도 우수한 특성을 나타내었다. 이것은 빔 품질이 가공 효율에 결정하는 중요한 파라미터임을 입증하고 있다.

### 3.2 레이저 용접 (Laser Welding)

레이저 빔 품질이 용접 가공에 미치는 관계를 조사하기 위해, 모든 동일한 조건하에서 빔 품질만 다른 디스크 레이저를 사용하여 얻은 실험 결과를 분석하였다. 그리고, 빔 품질이 서로 다른 레이저를 실제 용접에 적용하여 그 결과를 비교 분석하였다. Fig. 5는 스틸과 알루미늄에 대해, 초점 크기와 용접 깊이에 대한 관계를 속도에 따라 나타낸 결과이다. 초점 크기가 작으면 용접의 깊이와 속도가 증가하는 것이 당연한 결과이지만, 200 $\mu$ m 이하일 경우는 오히려 반대의 결과를 가져왔다. 어떤 원인이 이러한 결과를 가져왔는지를 알아내기 위해 초점 크기와 가공 단면적과의 관계, 주입 가스와의 관계를 조사하였다. 그리고, 가공 단면적은 초점 크기와 무관하게 항상 동일하며, 플라즈마에 의한 영향도 없다는 것을 확인하였다.

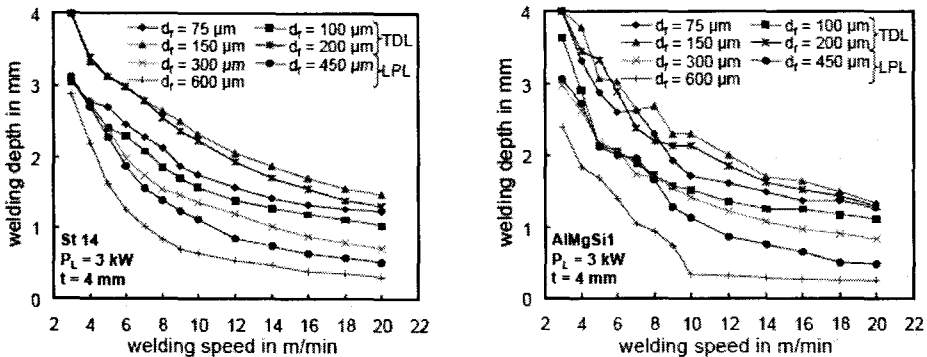


Fig. 5 Influence of focus diameter on welding depth [2]

위의 원인을 조사하기 위해, 레이저 빔의 발산각과의 관계를 검토하였다. Fig. 6은 레이저 빔의 발산각이 다른 경우, 속도에 따른 용접 깊이를 나타낸다. 결과로부터 작은 발산각이 용접 깊이를 크게 한다는 것을 알 수 있다. 즉, 이것은 발산각과 BPP가 비례하기 때문에, 레이저 빔의 품질이

가공 효율을 결정한다는 것을 알 수 있다.

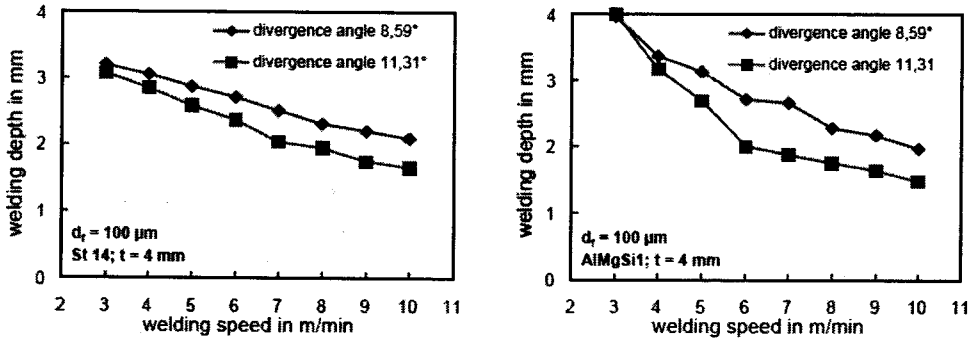


Fig. 6 Influence of divergence angle at focus diameter [2]

Fig. 7은 초점 크기가 작으면 용접 깊이가 커 지지만, 초점 크기가  $200\mu\text{m}$  이하에서 오히려 용접 깊이가 작아짐을 나타낸다. 동일한 레이저로 발산각을 작게하면 그 정도 만큼 용접 속도가 증가함을 알 수는 있지만, 특정 초점크기 이상에서 용접 깊이가 줄어드는 원인을 예측하기는 어렵다. 그 원인을 조사하기 위해 각각의 초점 크기에 대해 초점 심도를 계산하여 Table 2에 정리하였다. 발산각이 작은 레이저가 큰 초점 심도를 가지며, 초점 심도가 어느 정도 이하이면 아무리 레이저의 파워 강도가 높아 지더라도 용접 깊이가 나오지 않는다고 볼 수 있다. 가공 대상물에 따라 그 값이 달라지지만, 이 실험에서는 초점 심도 1mm 정도가 경계 값 이라는 추정할 수 있다. 따라서, 파이버 레이저는 발산각이 작기 때문에  $150\mu\text{m}$ 의 초점 크기 까지는 용접의 깊이가 증가한다고 예측 가능하다. 파이버 레이저의 결과는 이전의 실험을 토대로 계산된 값이다. 결론적으로 빔 품질은 용접 효율에 직접적인 영향을 미치며, 빔 품질이 좋을수록 작은 초점 사이즈로 깊은 용접을 할 수 있고, 가공 효율을 향상시킨다.

Table 2 Influence of divergence angle on the DOF for the given focus diameter

divergence angle [°]	BPP [mm·mrad]	DOF [mm] @ the given focus diameter						
		600	450	300	200	150	100	75
11.31	9.85	9.13	5.07	2.23	1.01	0.568	0.253	0.153
8.59	7.5	12.0	6.67	2.93	1.33	0.746	0.333	0.186
2.75	4.2	21.42	11.9	5.23	2.38	1.33	0.595	0.333

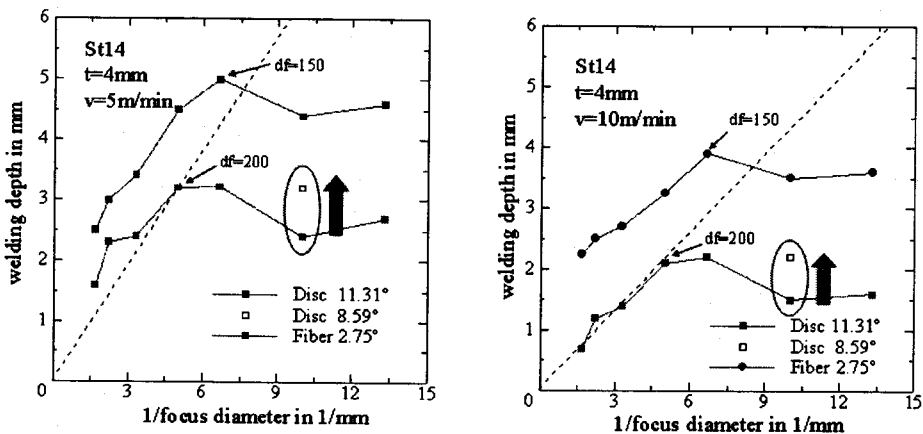


Fig. 7 Dependence of welding depth on focus diameter [2]

Table 3는 빔 품질이 서로 다른 레이저의 광학계에 따른 초점 크기를 정리한 것으로, 빔 품질이 광학계에 직접적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 레이저 리모트 웰딩에 유리한 긴 초점 거리와 작은 초점 크기를 확보하기 위해서는 BPP 값이 작아야 한다. Fig. 8은 이들 레이저를 용접에 적용하여 그 결과를 속도와 용접 깊이의 관계로 정리한 것이다. 빔 품질이 좋은 파이버 레이저는 3m/min 이상에서 급격히 용접 깊이가 증가하고 있고, 다른 레이저들 보다 월등한 가공 효율을 갖는다. 그리고, 100 $\mu\text{m}$  이하의 초점 크기에서도 파워에 비례하는 용접 깊이를 얻을 수 있었다. 앞의 실험에서, 빔 품질이 7.5인 디스크 레이저의 경우 초점 크기가 200 $\mu\text{m}$  이하에서는 오히려 용접 깊이가 줄어드는 결과를 보였으나, 빔 품질이 0.6과 1.8인 파이버 레이저의 경우는 그런 현상은 나타나지 않는다. 이는 빔 품질이 가공 효율 중에서 초점 크기와 깊이에 대한 관계, 다시 말해서 가공 속도를 결정하는 파라미터임을 보여준다. Fig. 9는 빔 품질이 다른 레이저를 실제 용접에 적용한 결과를 나타낸다. 빔 품질이 좋은 파이버 레이저는 초점 크기가 작고, 용접의 깊이가 크다. 따라서, 초점을 작고 깊게 하기 위해서는 빔 품질이 좋은 레이저를 선택해야 한다.

Table 3 Process parameters of different lasers for welding [3]

	Power [W]	BPP [mm·mrad]	Collimation [mm]	Focal length[mm]	Spot diameter[ $\mu\text{m}$ ]
Fiber, MM	4000	1.8	120	500	208
				300	125
				160	67
Fiber, SM	1000	0.6	120	500	58
				300	35
				160	19
CO2-Slab	3500	3.5	-	150	150
Nd:YAG	4400	12	200	160	320
				300	600
Disc	4000	8.8	200	200	200

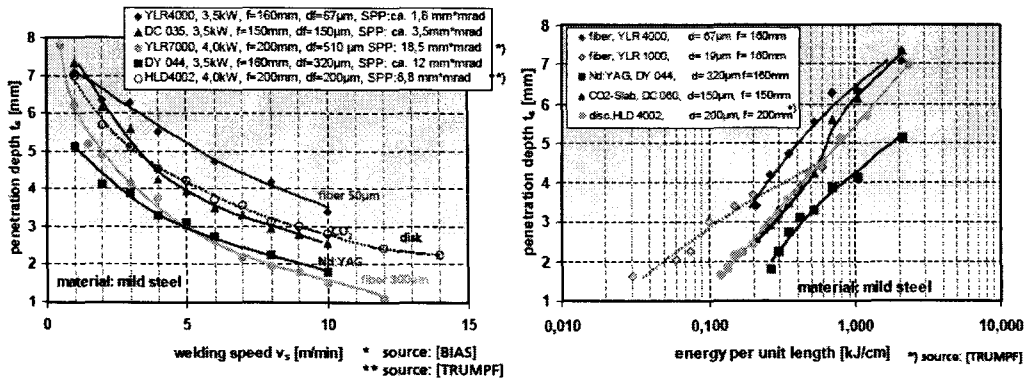


Fig. 8 Penetration depth diagram of different lasers [3]

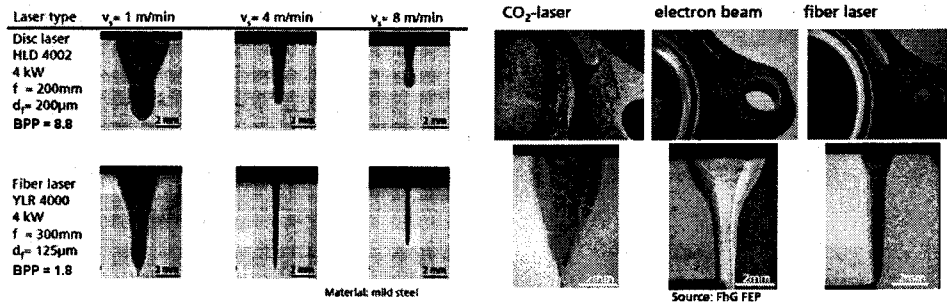


Fig. 9 Welding results with different lasers

#### 4. 결론

빔 품질과 가공 효율의 관계를 알아보기 위해, 빔 품질이 서로 다른 레이저를 절단과 용접에 적용하여 얻은 결과를 비교 분석하였다. 빔 품질은 가공에서 초점 크기와 깊이에 직접적인 영향을 보이며 모든 면에서 가공 효율을 향상시킨다. Fig. 10은 BPP와 가공 효율과의 관계를 나타낸 것으로, 빔 품질이 모든 가공 효율을 결정하는 파라미터임을 알 수 있다. Fig. 11은 빔 품질이 다른 레이저에 대해, 같은 초점 크기를 얻기 위한 입사빔의 크기를 정리한 것이다. 빔 품질이 나쁠수록 같은 초점 크기를 얻기 위해서 입사빔을 크게 하여야 하므로, 광학계 구성에 불리한 요소가 된다. 결론적으로 빔 품질이 레이저 가공 효율을 결정하며, 빔 품질이 뛰어난 파이버 레이저가 차세대 레이저 가공에서 많은 부분을 점유할 것으로 기대된다.

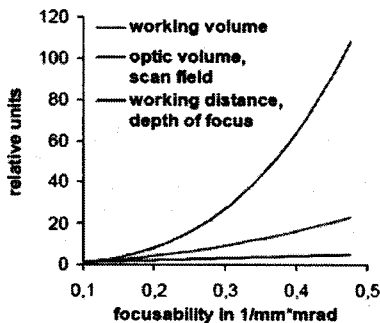


Fig. 10 Beam quality and process efficiency

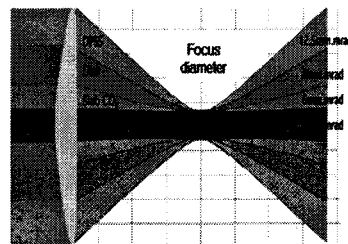


Fig. 11 Comparisons of different laser

#### 참 고 문 헌

1. Morgenthal: Cutting with Fiber Laser, Fiber Laser Workshop, IWS Dresden, November 2005, Germany
2. F. Dausinger: Latest Developments and Applications of the Disk Laser, Conference of Automotive Circle International, January 2006, Germany
3. B. Brenner, G. Gobel, D. Dittrich, R. Schedewy and J. Standfub: New effects in welding of light weight alloys and steel with fiber lasers, Fiber Laser Workshop, IWS Dresden, November 2005, Germany