

레이저 빔 품질과 가공효율

Laser beam quality and process efficiency

한 유희

IPG Photonics Korea Limited

1. 서 론

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, $BPP = 0.34 M^2$ 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. 장 레이저빔 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.

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

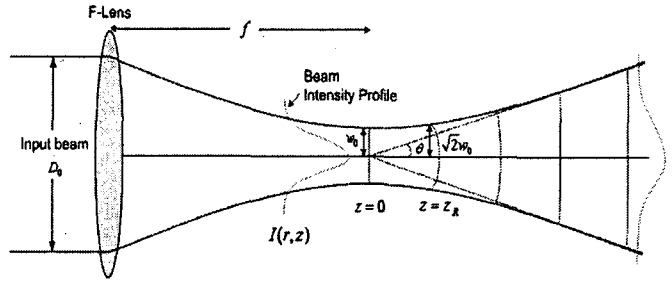


Fig. 1 Characteristics of Gaussian Beam

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

레이저 빔 품질과 절단 가공의 효율을 조사하기 위해, 파이버 레이저와 CO₂ 레이저를 사용한 결과를 분석하였다. Table 1은 절단 가공에 사용된 레이저 파라미터를 나타낸다. Fig. 2는 각 레이저에 대해 가공 물질의 두께와 절단 속도를 나타내었다. 가공 물질은 Stainless steel 이고, 질소 가스를 주입하였다. 결과로부터 파이버 레이저 1kW는 출력 파워가 1/3 임에도 불구하고, CO₂ 레이저 3kW와 동일한 속도를 얻고 있다. 이것은 BPP 값이 가공 속도를 결정하는 중요한 파라미터임을 입증하고 있다.

Table 1 Laser parameters for cutting applications

Type	Fiber, MM	Fiber, SM	CO ₂
Power[kW]	4.0	1.0	2.5-3.0
BPP[mm·mrad]	1.8	0.6	3.5
M ²	5.3	1.8	1.1
Fiber diameter[μm]	50	15	-

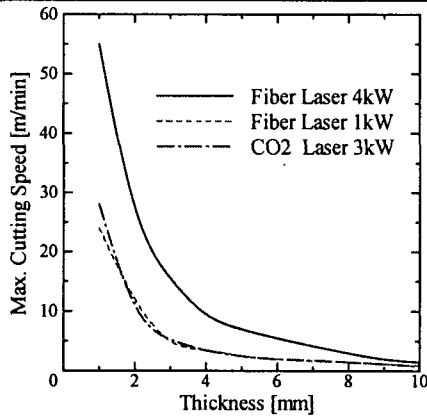


Fig. 2 Comparison of the maximum cutting speeds/[1]

동일한 조건에서 빔 품질이 미치는 영향을 분석하기 위해 같은 파워에서 가공한 결과를 정리하였다. Table 2는 가공 파라미터를, Fig. 3은 파워에 대한 가공 속도를 각각 나타낸다. 파워가 높아질수록 빔 품질이 가공에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 파이버 레이저와 CO₂ 레이저의 절단 폭과 단면을 나타낸 것이다.

Table 2 Process parameters for laser cutting

Laser Type	Fiber 1kW	CO ₂ 2.5kW
Focal length	120 mm	127 mm
Collimation	120 mm	-
Focus diameter	15 μm	140 μm
Cutting gas	N ₂ , 10 bar	N ₂ , 10 bar

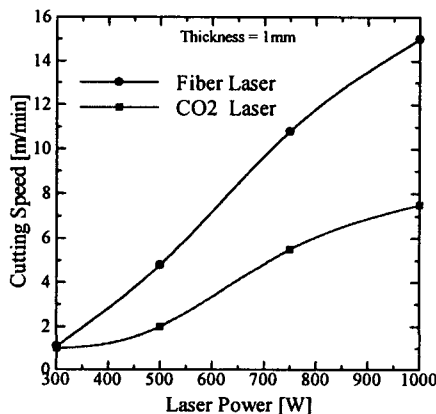


Fig. 3 Comparison of the cutting speeds/[1]

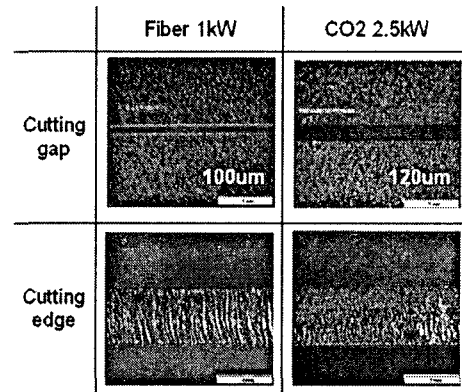


Fig. 4 Cutting results with different lasers/[1]

3.2 레이저 용접

레이저 빔 품질과 용접 가공의 효율을 조사하기 위해, 디스크 레이저를 사용하여 얻은 실험 결과를 분석하였다. Fig. 5는 초점 크기와 용접 깊이에 대한 관계를 속도에 따라 나타내었다. 용접의 깊이는 초점 크기에 비례하지만, 150μm 이하 일 경우는 오히려 감소하였다. 어떤 원인이 이러한 결과를 가져왔는지를 분석하기 위해 초점 크기와 가공 단면적과의 관계를 조사하였다. Fig. 6은 단면적과 초점 크기의 관계를 나타낸 것이다. 가공 단면적은 초점 크기와 무관하고, 가공 효율도 항상 동일하다는 것을 알 수 있다.

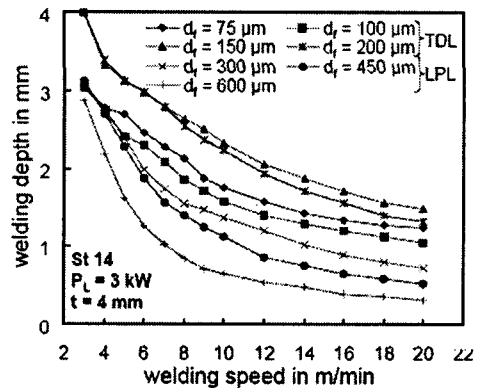


Fig. 5 Influence of focus diameter on welding depth/[2]

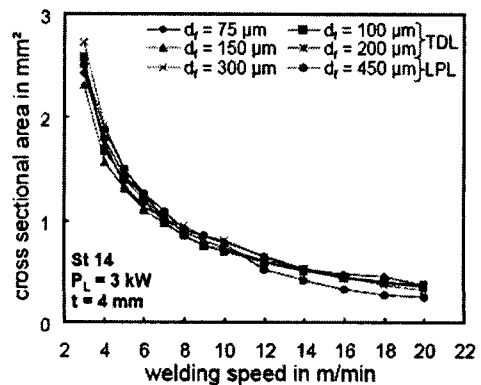


Fig. 6 Influence of focus diameter on cross sectional area/[2]

위의 원인을 조사하기 위해, 레이저 빔의 발산각과의 관계를 검토하였다. Fig. 7은 레이저 빔의 발산각이 다른 경우, 속도에 따른 용접 깊이를, Fig. 8은 초점 크기가 200 μm 이하에서 발산각과 용접 깊이의 관계를 각각 나타낸 것이다. 결과로부터 작은 발산각이 용접 깊이를 크게 한다는 것을 알 수 있다. 이것은 발산각과 BPP가 비례하기 때문에, 레이저 빔의 품질이 가공효율을 결정한다는 것을 알 수 있다.

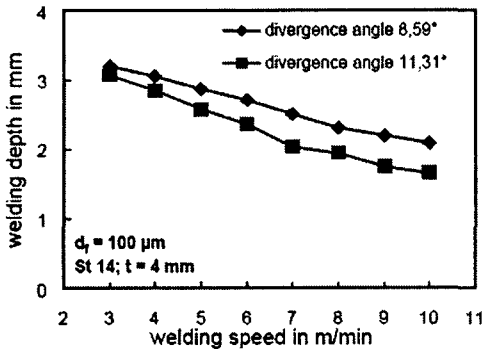


Fig. 7 Influence of divergence angle at focus diameter/[2]

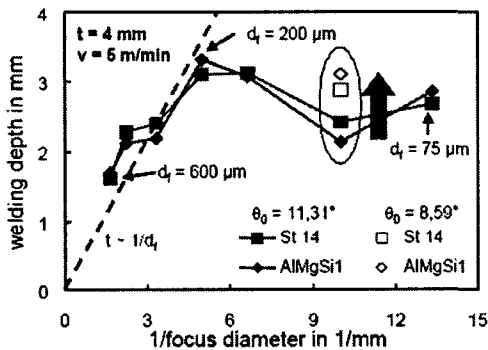


Fig. 8 Dependence of welding depth on focus diameter/[2]

Table 3과 같이, 서로 다른 빔 품질을 갖는 레이저를 비교 하였다. Fig. 8은 가공 속도와 용접 깊이를 나타낸 것으로, 빔 품질이 좋은 파이버 레이저는 3m/min 이상에서 급격히 깊이가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 파이버 레이저와 디스크 레이저의 용접 결과를 비교한 것이다.

Table 3 Process parameters for welding

	Power [W]	BPP [mm·mrad]	Collimation [mm]	Focal length[mm]	Spot diameter[μm]
Fiber, MM	4000	1.8	120	500	208
Fiber, SM	1000	0.6	120	500	58
CO2-Slab	3500	3.5	-	150	150
Nd:YAG	4400	12	200	160	320
Disc	4000	8.8	200	200	200

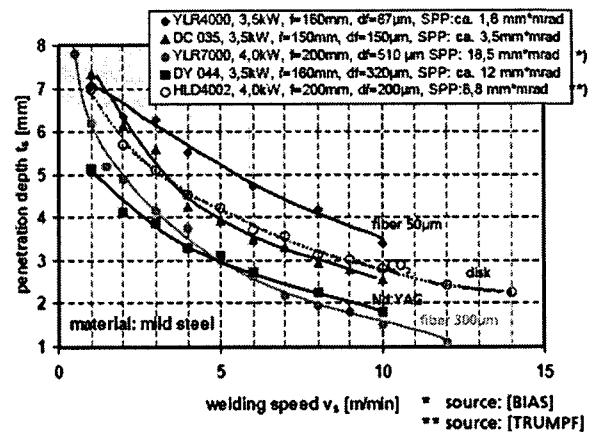


Fig. 9 Penetration depth diagram of different lasers/[3]

4. 결 론

빔 품질과 가공 효율의 관계를 알아보기 위해, 빔 품질이 서로 다른 레이저를 절단과 용접에 적용하여 얻은 결과를 비교 분석하였다. 빔 품질은 가공에서 초점 크기와 직접적인 관계를 가지고 있다. 작은 BPP를 갖는 레이저가 작은 초점 크기를 갖을 수 있고, 이는 에너지 집중도가 높음을 의미한다. 또한 초점이 작기 때문에 넓은 작업 영역과 초점 심도를 확보할 수 있어 가공에 유리하다. Fig. 10은 BPP와 초점 크기의 관계와 가공에서 효율을 레이저 별로 요약 정리한 것이다. 빔 품질이 좋은 레이저가 가공 효율이 좋으며, 파이버 레이저가 차세대 레이저 가공에서 많은 부분을 점유할 것으로 기대된다.

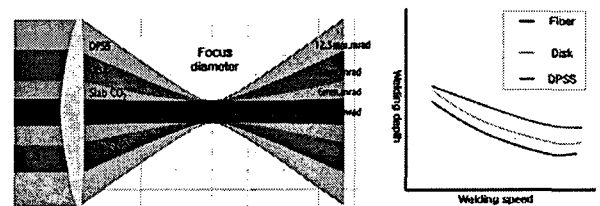


Fig. 10 Comparison of different lasers/[3]

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