

레이저 표면처리공정에서 빔 입사각이 에너지 흡수율에 미치는 영향

Influence of the angle of incidence on energy coupling rate
in laser surface treatment

이제훈 · 한유희
한국기계연구원

1. 서론

레이저 가공의 경제성을 향상시키기 위하여 레이저의 효율향상과 저가의 레이저를 공급하는 방법이 있으나 이를 통한 수요의 확대를 기대하기에는 아직 상당한 시간을 필요로 하고 있다. 따라서 현재로서는 가공효율 η_p (process efficiency)을 향상시킴으로서 비용절감을 기대할 수 있다. 여기서 금속용융 가공에서의 가공효율은 일정한 레이저 출력하에서 단위 시간당 용융된 부위의 체적으로 이해될 수 있다. 한편 가공효율 η_p 은 에너지 흡수율 η_A (여기서는 energy coupling rate와 동일시 간주)과 열효율 η_{th} 로 구분되어 진다. 열효율은 재료의 물성에 의해서 결정되므로 가공효율을 향상시키는데는 제한을 받고 있다.

표면가공시에는 레이저 용접 및 절단가공에서 나타나는 레이저 빔의 deep penetration mechanism에 의한 높은 에너지 흡수율을 얻을 수 없으므로 에너지 흡수율을 향상시키기 위해서 레이저빔 파장, 가공물의 표면상태, 빔 입사각등을 변화¹⁾시키는 다양한 방법들이 알려져 있다.

일반적으로 표면처리 공정에서 빔 흡수율과 가공 면적을 동시에 증가시키는 Fresnel 이론에 입각한 빔 조사방법이 가공효율을 향상시키는 효과적인 방법으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 Fresnel 이론과 레이저표면가공실험(remelting과 alloying/cladding)을 통하여 레이저 빔 입사각의 변화와 powder feed rate의 변화에 따른 빔 에너지 흡수율의 변화를 분석하였다.

2. 이론적 고찰

Fig. 1은 Fresnel과 Durde 이론²⁾에 의한 입사각 변화가 10.6 μm 파장에 대한 mild steel의 흡수율의 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 선형적으로 편광된 레이저 빔이 금속표면에 조사되면 입사된 빔의 일부는 금속 표면에 흡수되고 나머지는 표면에서 반사되어 손실되어진다. 입사면에 평행으로 편광된 빔은 입사각이 증가함에 따라 흡수율이 증가함을 알 수 있으며 Mild steel에 대한 빔($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) 흡수율은 입사각이 87° 일때 최대값을 나타낸다.

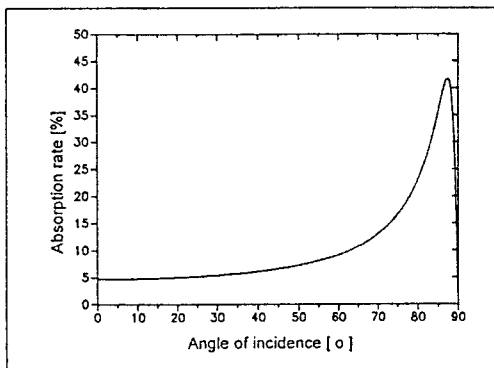


Fig. 1. Absorption of linearly polarized laser light(10.6 μm) for mild steel: Polarization direction parallel to plane of incidence.

한편 빔 입사각이 증가함에 따라 재료표면에서 빔 조사면적이 증가하게 되어 조사되는 빔의 출력밀도(TEM₀₀)는 Fig. 2a에서 보는 바와 같이 현저하게 감소한다. 그러나 빔 입사각이 증가함에 따라 흡수된 에너지의 양은 Fig. 2와 같이 크게 증가함을 나타내고 있으며, 이는 Fig. 1에서 언급한 바와 같이 입사각의 증가에 따른 흡수율의 증가에 기인한 것이다. 이러한 입사각의 증가에 따른 효과는 일반적으로 가공부위가 넓고 얇은 표면처리가공시 가공효율을 증가시킬 수 있는 방법중의 하나로 매우 효과적이라고 할 수 있다.

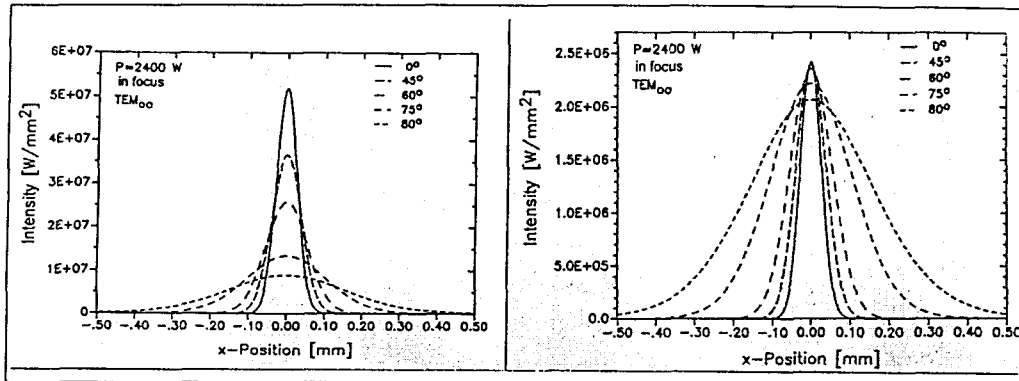


Fig. 2a-b. Intensity profile of a Gaussian laserbeam at different angls of incidence: a) Impinging intensity, b) Absorbed intensity (parallel polarization, mild steel).

3. 실험방법 및 재료

본 실험에서 사용한 레이저는 Rofin-Sinar사의 2.5 kW CO₂-레이저로서 선형적으로 편광된 빔과 TEM₀₁* 출력밀도 분포를 갖고 있다. 레이저 빔은 빔 이송장치를 통하여 x-y 가공 테이블로 이송되며 10" ZnSe 렌즈를 이용하여 시편 표면에 집속된다. 특별히 언급하지 않은 모든 실험은 초점위치를 재료표면에 두고 수행하였다. 빔 입사각은 레이저 빔을 수직으로 고정시킨 상태에서 가공물을 기울어 설정하였다.

용융과 cladding 실험에 사용된 모재는 16MnCrS5이며, cladding 실험의 경우 사용한 금속 분말은 325 mesh 크기의 내마모성 재질인 WC/Co 88/12와 NiCr 80/20이다. 용융실험에서는 레이저 출력을 2.4 kW로 고정시킨 상태에서 빔 조사속도와 입사각을 변화시켰으며, cladding 실험에서는 입사각과 powder feed rate를 변화시켜 이들 실험변수들이 용융면적에 미치는 영향을 검토하였다. 초점위치와 분말공급시스템에 관한 기타 조건들은 일정하게 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 레이저 빔 입사각의 변화에 따른 빔 이송속도가 용융된 단면적의 크기에 미치는 영향을 보여주고 있다. 모든 입사각에서 용융 단면적은 이송속도가 증가함에 따라 감소함을 보여주고 있다. 이러한 현상은 이송속도가 증가함에 따라 단위 면적당 빔 조사시간이 짧아지므로 단위 면적당 흡수 에너지가 감소하여 나타난다고 할 수 있다. 빔 입사각이 용융된 단면적에 미치는 영향은 특히 낮은 이송속도에서 뚜렷이 나타나고 있다. 이송속도가 2 m/min인 경우 입사각의 변화에 따른 용융 단면적의 변화는 입사각이 80° 일때 표면에 수직으로 입사된 경우 보다 약 4배에 이르고 있으며 이송속도가 증가함에 따라 입사각에 따른 단면적의 증가폭도 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 Fig. 2b에서 나타난 바와 같이 입사각이 증가함에 따라 출력 밀도의 분포가 완만하고 최대 출력밀도가 감소하는 현상을 나타내고 있기 때문이다. 따라서 입사

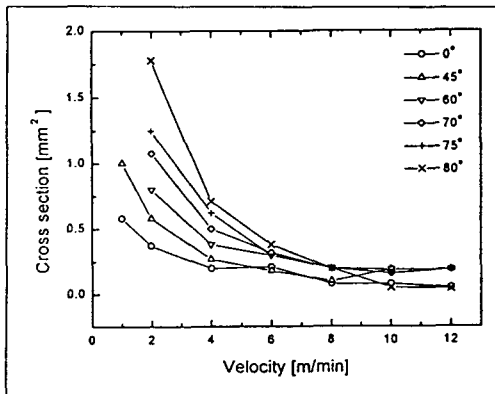


Fig. 3. Effect of angle of incidence on cross section of laser melted track (Laser beam with 2.4 kW, parallel polarization, focus on 16CrMnS5 surface).

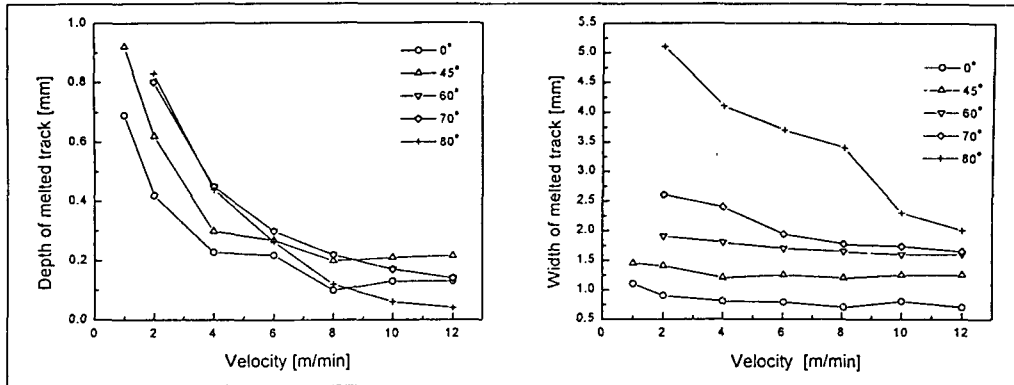


Fig. 4. Effect of angle of incidence on depth and width of laser melted track (Laser beam with 2.4 kW, parallel polarization, focus on 16CrMnS5 surface).

각이 큰 경우 빔 조사면 가장자리 부분의 출력 밀도가 용융 출력밀도(threshold power density for melting)보다 낮은 경우가 있으며 이송속도가 증가함에 따라 빔 조사면의 미용융 부분은 입사각이 클수록 급속히 증가함을 알 수 있다. 이러한 입사각의 변화에 의한 에너지 흡수율과 출력밀도의 상관관계는 용융된 단면의 깊이와 폭의 변화(Fig. 4)에서도 관찰할 수 있다.

분말 동시 주입식 cladding공정에서 레이저 빔 입사각과 powder feed rate가 용융된 단면의 크기에 미치는 영향을 Fig. 5에서 나타내고 있다. 입사각이 증가함에 따라 단면의 크기가 뚜렷이 증가하고 있다. 입사각이 작은 경우, powder feed rate의 증가는 합금부 단면의 크기를 조금씩 증가시키는 반면 큰 입사각에서의 높은 powder feed rate는 단면의 크기를 감소시키는 효과를 나타내고 있다. 이러한 현상은 powder에 의한 레이저 빔의 차단효과에 기인한 것이라고 할 수 있다. 조사면의 출력밀도가 powder의 용융출력밀도보다 높은 경우에는

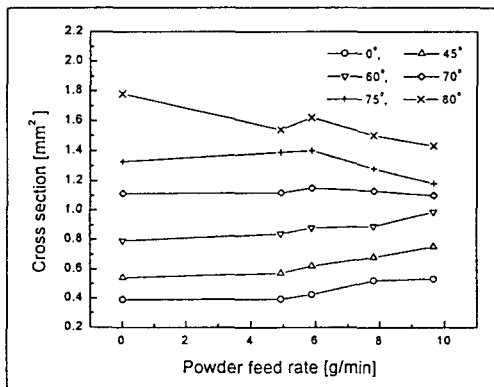


Fig. 5. Influence of powder feed rate and angle of incidence on cross section of particle injected melt track. The powder(WC/Co 88/12) was preheated in the laser beam before reaching the substrate surface (mild steel). Laser power 2.4 kW, focused on substrate surface, 2 m/min substrate velocity.

powder feed rate의 증가에 따른 빔 에너지의 사용효율을 증가시키지만 조사면의 출력밀도가 충분하지 못한 경우, 특히 큰 입사각의 경우 조사면 가장자리 부분의 낮은 출력밀도 영역에서 powder가 완전히 용융되어 용착되지 못하고 빔조사면 외부로 떨어져 결국 에너지의 사용효율을 저하시키는 결과가 된다. 또한 powder의 공급이 증가하면 powder가 빔 에너지를 흡수한 상태에서 빔 조사면상에 떨어지지 않고 빔 조사면 외부로 떨어져서 빔 에너지의 사용효율을 저하시키는 것으로 관찰되었다.

Fig. 6은 빔 입사각과 초점위치를 변화시키면서 Powder feed rate에 따른 용융된 단면 크기의 변화를 나타내고 있다. Curve 1과 Curve 3은 빔 입사각을 75° 와 45° 로 처리한 경우를 나타내고 있으며 curve 2, 4 그리고 5는 수직으로 빔을 조사한 경우인데 curve 2는 입사각 75° 와 동일한 출력밀도 그리고 curve 4는 입사각 45° 인 경우와 동

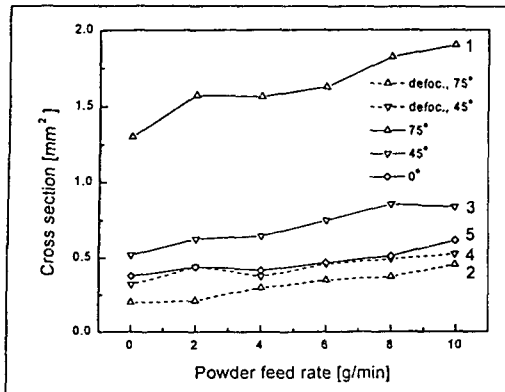


Fig. 6. Comparison of cross section of particle injected melt track achieved at oblique and perpendicular incidence with the same laser power density on the substrate surface: powder: NiCr 80/20, substrate velocity: 2 m/min, laser power: 2.4 kW.

일한 출력밀도를 갖도록 초점 위치를 변화시킨 것이다. 입사각이 45° (curve 3)와 75° (curve 1)인 경우의 단면적은 수직인 경우(0°, curve 5) 보다 각각 약 1.3배와 3배 크게 나타나고 있다. 이 측정치는 Fig. 1에 나타난 입사각 변화에 따른 흡수율의 증가치와 유사하다. 또한, 입사각을 변화시킨 경우와 defocusing시킨 경우의 단면적의 변화도 이와 유사한 경향을 보여주고 있다. powder feed rate의 증가도 에너지 사용효율을 증가시키는 경향으로 나타나고 있으나 powder의 공급량이 계속 증가될 경우 빔 차단효과에 의한 에너지 사용효율을 감소시킬 것으로 예상된다.

5. 결론

레이저 용융 실험에서 재료 표면상의 레이저 출력 밀도가 재료의 용융출력밀도(threshold power density for melting) 보다 큰 경우 용융 단면적은 입사각이 증가함에 따라 지속적인 증가 추세를 나타내었다. 또한 입사각의 변화를 통하여 용융단면적의 크기를 2 내지 4배 증가시킬 수 있었으며 증가율은 Fresnel 이론에 의한 흡수율의 증가율과 유사하게 나타났다.

레이저 cladding의 경우, 에너지 흡수율은 powder feed rate, power density 그리고 빔 입사각에 따라 변화됨을 알 수 있었다. 또한 일정한 출력밀도하에서 powder feed rate의 증가는 흡수율의 증가를 나타내다가 powder공급이 지속적으로 증가되면 powder에 의한 빔 차단효과가 나타나 가공효율을 저하시키는 경향을 나타내었다.

결론적으로 본 연구에서는 입사각 증가에 따른 Fresnel absorption 증가효과를 최대한 활용하여 레이저 표면처리가공시 process efficiency를 증대시켜 레이저 가공의 경제성을 향상시킬 수 있는 하나의 방법을 실험을 통하여 제시하였으며, 빔 입사각의 크기와 이에 따른 선간에너지밀도(line power density) 그리고 powder feed rate의 최적화를 통하여 에너지의 사용효율을 극대화시킬 수 있을 것으로 기대되어진다.

6. 참고문헌

1. F. Dausinger, Laser-Materialbearbeitung: kostengünstiger durch Steigerung des Einkoppelgrads, Laser und Optoelektronik 27(2), p. 54-63, (1995).
2. M. A. Ordal, et al., Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Ag, Ti and W in the infrared and far infrared, Applied Optics, 22, p. 1099-1119, (1983).