

Nd:YAG 레이저를 이용한 비결정질 재료의 용접 시 레이저의 흡수거동

Absorption Characteristics of Amorphous Metal during Processing with Nd:YAG laser

이 건상*

LEE Kun-Sang*

*국민대학교 기계자동차공학부 설계 및 생산공정 실험실

('98.7.3심사시작-'98.8.28심사완료)

ABSTRACT

For the conventional welding method, the high heat transfer makes the crystallized zone of the work material unavoidable. Whereas the laser is able to weld the amorphous metal without a crystallized zone, because heat transfer is limited within a very small restricted volume. In this paper, the possibilities and the limits of the laser welding were studied to utilize the advantageous properties of amorphous metal foils.

Key words : Nd:YAG laser(Nd:YAG 레이저), Welding of amorphous metal(비결정질 금속의 용접), Absorption(레이저 빔 흡수), Beam parameters(레이저 빔 변수)

1. 서론

비결정질 금속은 1960년대 초에 처음으로 제작되고 연구가 시작되었으며, 그 후 1970년대 초에 상용화된 제품이 처음으로 시장에 선을 보였다. 오늘날 비결정질 재료의 생산과 가공은 아직까지 개발이 계속되고 있으나, 이미 기술발전이 명백한 영향을 주고있는 선도적인 기술이다. 이 재료의 사용이 점점 증가추세를 보이면서 재료가공을 위한 접합기술 또한 그 중요성이 증대되고 있다¹⁾.

비결정질 금속은 그 구조나 구성요소에 따라 사용자에게 유리한 특성의 새로운 조합을 갖고 있다. 예를 들면 구조나 구성성분에 따라 다르지만 매우 높은 강도, 연성, 내부식성 또는 특이한 자기적 성질을 나타낸다. 비결정질 금속은 매우 유연

하고 경도가 높고, 특히 인장응력에 강하다. 그러므로 처음에는 무엇보다도 기계적인 응용에 대하여 연구를 하였다. 그러나 생산기술에 기인한 기하학적인 특성으로 인하여 비결정질 금속은 기계적인 응용분야에서는 아직까지 돌파구를 찾지 못하고 있는 실정이다^{2,7)}. 여기서 기하학적 특성이란 재료의 두께가 매우 얇고, 재료 표면 중 한 면이 공기 중에서 자유 냉각되므로 두께의 공차가 비교적 크다는 점 등이다. 그러나 다른 한 편으로는 얇은 금속박판을 용융체로부터 직접 생산할 수 있으므로, 압연기술로는 가공이 불가능한 경납접 또는 연납접에 사용되는 박판을 생산해 낼 수 있다.

또한 매우 우수한 연자성 거동이 필요하면서도

기계적인 요구조건, 예를 들면 내마모성이 요구되는 다른 응용분야 들에서는 시장진출에 성공하였다⁷⁾. 이러한 요구를 만족시키는 합금들은 대략 Fe-Ni-Co 성분이 70~85%, 그리고 Si-B-P 성분이 15~30%로 구성되어 있다. 여기서 Fe, Ni, Co는 자기적 성질을 유지하는 성분으로 작용하며, Si, B, P는 비결정질 구조를 안정시키는 역할을 담당하고 있다⁷⁻⁹⁾.

오늘날 비결정질 금속은 자기적인 분야에 가장 흔히 사용되고 있는데, 이는 일반 금속재료 들이 자기적으로는 연성이지만 기계적으로는 취성인데 반하여 “자기적으로는 연성이고 기계적으로는 강하며 또한 소성변형이 가능한” 독특한 특성 때문인 것이다¹⁰⁾.

기계산업 분야로 새로운 적용분야가 확대되는 것은 내마모성과 내부식성을 갖추고 경도가 높고 양호하게 결합되어 있는 비결정질 입자를 포함한 비결정질 금속박판을 생산해 낼 수 있다는 데에 기인한다^{11,12)}. 즉,

- 표면은 매끈하면서도 경도가 높은 입자를 함유한 내마모성의 비결정질 금속 박판, 예를 들면 섬유 기계의 부품
- 다양한 연삭작업이나 연마작업에 사용되는 공구로서, 한쪽 면이 거칠고 매우 강한 돌기 입자 들을 포함하며, 매우 높은 경도와 유연성을 지닌 비결정질 금속 박판 등을 예로 들 수 있다.

또한 고품질의 용접을 가능하게 하는 기술을 개발할 수 있으면 매우 강한 구조물을 최소한의 무게로 생산할 수 있게 된다. Fig. 1은 이러한 비결정질 금속 박판을 이용한 관(管)의 단면과 벌집모

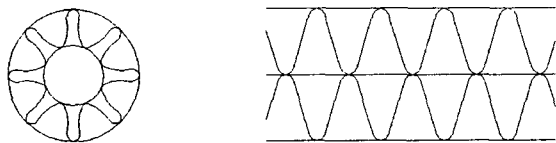


Fig. 1 Pipe cross section and honeycomb structure using amorphous metal foils

양의 단면을 보여 주고 있다¹³⁾.

2. 레이저를 이용한 재료가공 시 재료에 의한 레이저 빔의 흡수 거동

금속재료 표면에서의 레이저 빔의 흡수현상은 적외선 범위에서는 실험적인 결과와 잘 일치하는 Maxwell-Drude-Mode¹³⁾로 기술할 수 있다. 이 model은 전자기장과 역 방사광에 의한 금속 자유 전자와의 상호작용을 표현한다. 가시광선 영역과 근적외선(near infrared) 영역에서는 레이저 빔과 금속전자와의 상호작용으로 인하여 model로부터 오차가 발생한다. 특히 이러한 오차는 천이금속(Fe, Cr, Ni등)인 경우에는 10 μ m의 spectrum 범위 까지 확장된다. 레이저 빔을 사용하여 금속을 가공할 때에 출력밀도가 충분할 경우 재료의 일부 분은 증발한다. 발생한 증기에 의한 금속증기압력은 바늘 모양의 좁고 깊은 구멍을 형성시킬 수 있는데, 이러한 키 홀(key hole) 내부에서는 레이저 빔이 더욱 효과적으로 흡수될 수 있다. 금속증기 환경하에서 레이저 빔의 흡수는 주로 레이저 출력밀도와 레이저 빔의 파장에 따라 결정된다. 재료표면에서 레이저 빔에 의해 유도된 plasma는 레이저 출력밀도가 충분할 경우, 재료내부로의 에너지 흡수증가에 기여할 수 있다. 그러나 레이저 출력밀도가 과도히 클 경우에는 plasma에 의해 레이저 빔의 차단효과에 기인하여 흡수를 감소시킬 수 있다¹⁴⁾.

Table 1. Influence parameters of laser material processing

흡수거동에 영향을 주는 영향인자	
레이저 빔 변수	레이저 빔 출력밀도(또는 초점위치) 펄스 에너지 펄스길이 파장 편광상태
재료 변수	물리적 성질 표면거칠기 기하학적 형태
기타	레이저 빔과 재료표면 사이의 기울기

Table 1은 레이저를 이용한 재료가공 시 흡수거동에 영향을 미치는 주요한 인자들을 보여주고 있다. 레이저 빔을 이용한 재료가공 시 물리적인 과정을 이해하기 위해서는 레이저 빔과 재료사이의 상호작용에 대한 정확한 지식이 필수적이다. 동시에 중요한 문제 중의 하나는 용접가공 시 레이저 빔의 재료내부로의 흡수매커니즘이다. 본 연구에서는 레이저 빔을 이용한 용접가공 시 비결정질 금속의 시간변화에 따른 순간적인 흡수거동에 대한 레이저 빔 parameter의 영향에 대하여 분석하였다. 더 나아가 이러한 레이저 빔의 흡수거동이 용접공정과 용접 결과에 미치는 영향을 조사하였다.

2.1 실험장치와 실험재료

용접가공 시 반사되는 레이저 빔 시그널을 측정하기 위하여 Ulbricht sphere와 두 개의 photodiode, 그리고 전자증폭장치를 사용하였다¹⁵⁾(Fig. 2). 실험에 사용된 레이저 장비는 Nd:YAG laser system(Type LAY 50K, HAAS-LASER GmbH)과 3축 CNC table(Type unipos-s 800f, Manfred

Foehrenbach GmbH)이며, CNC table의 위치 및 반복정밀도는 1 μ m 이하이다.

사용된 레이저의 특성 중 중요한 것으로는 파장 1.064 μ m, 작업렌즈의 초점거리 100mm, 초점위치에서의 빔의 직경 약 50 μ m, 펄스길이 0.1ms~10ms, 펄스주기 최대 300Hz, 평균출력 최대 50W 등을 들 수 있다. 레이저 빔 에너지의 절대적 양을 측정하기 위하여 Ulbricht sphere 대신 레이저 빔 에너지 측정기를 설치하여, 레이저 공진기의 rear mirror 뒤의 photodiode를 사용하여 측정된 빛 에너지의 크기와 빔 에너지 측정기를 사용하여 측정된 에너지의 크기를 비교하였다. 재료는 Ulbricht sphere의 하단부에 고정시키고, 레이저 빔은 재료 표면으로 향할 수 있도록 하였다. 반사된 레이저 빔은 sphere의 내부표면으로 산란하도록 하여, photodiode의 센싱부위에 도달한 양을 측정하였다. 용접실험에는 상용으로 생산된 Cobalt base의 비결정질 금속박판(Vitrovac 6025F, Vacuumschmelze GmbH)을 사용하였다¹⁶⁾. 이 재료는 Co69.3 / Si7.9 / Mo6.3 / Fe3.5 / Nb2.6 / B10.4(질량비)로 구성되어 있다. 이 박판은 폭 25mm, 두께 25 μ m이고,

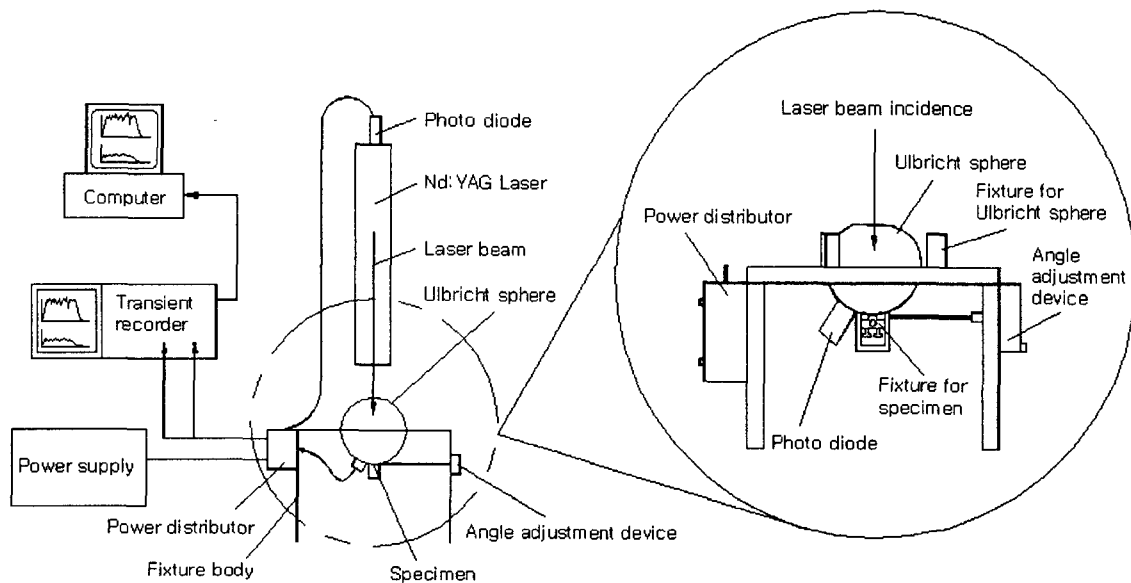


Fig. 2 Schematic of absorptivity measuring apparatus

길이는 수 백 μm 에 달하는 데 임의의 길이로 절단하여 사용하였다.

2.2 초점위치의 변화에 의하여 발생한 레이저 빔 출력밀도의 변화에 따른 흡수거동

출력밀도는 레이저 빔 출력을 변화시키거나, 초점위치를 변화시킴으로써 영향을 줄 수 있다. 여기서 초점위치라 함은 재료표면으로부터 작업렌즈의 초점거리까지의 거리를 의미한다. 빔의 입사축 위의 임의의 위치에서의 출력밀도는 다음과 같이 구해진다⁴⁾:

$$I = \frac{P}{\pi \cdot r(z)^2}$$

$$r(z) = r(0) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$$

여기서, I =출력밀도 [W/cm^2], P =출력[W], $r(z)$ =빔 입사축 위의 임의의 장소 z 에서의 빔의 반지름 [cm], $r(0)$ =작업렌즈 초점위치에서의 빔의 반지름 [cm], z_R =Rayleigh length[cm] 이다.

본 절에서는 초점위치를 조절함으로써 출력밀도를 변화시켰다^{16, 17)}. 또한 0.3kW와 1.1kW의 두 가지 서로 다른 레이저 빔 출력을 선택하여 실험하였다. 서로 다른 출력밀도를 얻기 위하여 초점위치를 각각 -1~+1mm(0.3kW인 경우), -4~+4mm(1.1kW의 경우)로 변화시켰다. 초점위치는 레이저 빔 diagnostic system을 사용하여 각각의 레이저 빔 출력에 대하여 검증하였다. 용접실험 시 재료를 관통하는 구멍이 발생하지 않도록 하기 위하여 박판의 숫자를 펄스 출력에 맞추어 적절히 조절하였다. 재료를 관통하는 구멍이 생성될 경우 레이저 빔의 일부는 재료에 도달하지 못하고 재료를 통과하여 지나가게 된다. 그러므로 레이저 빔 출력이 0.3kW인 경우에는 10장의 박판(두께 0.25mm)을, 레이저 빔 출력이 1.1kW인 경우에는 30장의 박판(두께 0.75mm)을 사용하였다.

흡수거동을 관찰하기 위하여 입사된, 그리고 반사된 레이저 빔 출력 시그널을 각각 측정하였는데, 이 두 가지의 시그널의 차이가 흡수시그널에 해당한다. 레이저 에너지를 결정하기 위하여 이 시그널을 시간에 대하여 적분하였다. 흡수율이란 흡수된, 즉 반사되지 않은 레이저 에너지의 입사된 레이저 에너지에 대한 백분율로 정의된다.

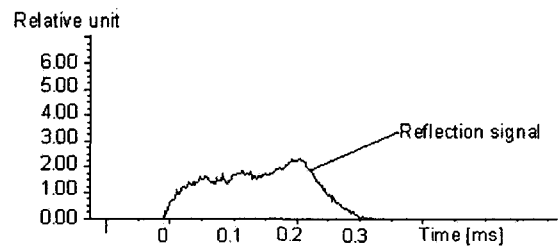
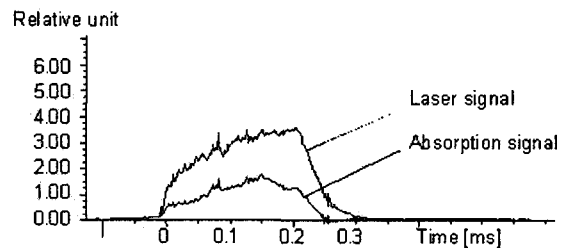


Fig. 3 Incidence, absorption and reflection signals of laser beam at focal position -2.0mm

Fig. 3은 초점위치 -2.0mm에서의 입사된, 반사된 그리고 흡수된 레이저 시그널을 나타낸다. 흡수율은 각각의 레이저 빔 펄스에 대하여 측정하고 평균값을 취하였다. 레이저 빔 출력밀도가 $2.2 \times 10^6 \text{W}/\text{cm}^2$ 인 경우에는 레이저 빔 에너지의 절반 이상이 반사하였고, 2장의 박판이 용접되었다. 반사된 레이저 빔 출력은 시간변화에 대하여 비교적 균일하게 분포하고 있다. 레이저 빔 출력밀도가 비교적 낮으므로 레이저 빔이 금속증기에 의한 바늘모양의 깊은 구멍을 생성시키지는 못하고, 첫번째 박판은 열전도에 의하여 용융되고, 용융된 재료는 중력에 의해 아래쪽에 위치한 두 번째 박판과 접하게 되므로, 두 번째 박판까지 열이 전달되어 두 장의 박판이 접합되게 된다. 여러 장의 절단된 박판을 겹쳐서 용접할 때 발생하는 문제

중의 하나는 박판 사이에 발생하는 틈새인데, 용접 후 용접부의 단면사진을 통하여 박판두께의 약 1/10 정도의 틈새가 발생하였음을 확인할 수 있었다¹¹⁾.

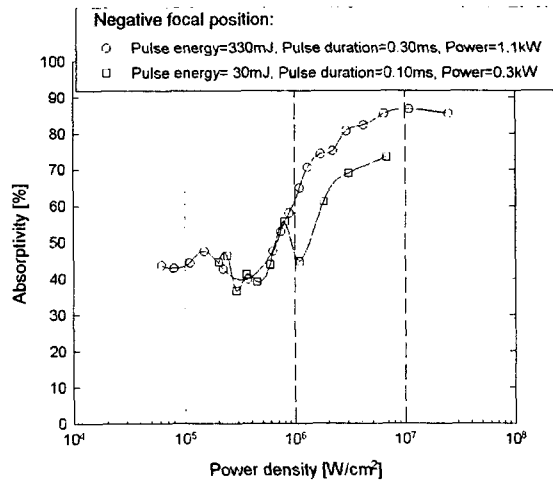


Fig. 4 Absorptivity versus power density

Fig. 4에서는 초점위치가 음(negative)인 영역에서의 레이저 빔 출력밀도에 따른 흡수율을 보여주고 있다. 레이저 출력이 0.3kW인 경우에는 출력밀도가 $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 이하에서 흡수율이 35%에서 55% 사이에 있음을 알 수 있다. 이때 흡수율은 레이저 출력이 큰 경우(1.1kW)와 비교하여 매우 큰 편차 폭을 보여주고 있다. 출력밀도가 $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 이상에서는 흡수율이 73% 이상까지 급격히 증가하고 있다.

레이저 출력이 1.1kW인 경우에는 출력밀도가 $6.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 이하에서 흡수율이 40%에서 50% 사이에 존재하고 있다. 출력밀도가 $6.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 이상에서는 흡수율이 87%까지 매우 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 레이저 출력이 크고 출력밀도가 $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 이상인 경우에는 더 많은 레이저 에너지가 재료내부로 흡수되고 있음을 알 수 있다. 흡수율이 급격히 증가하기 시작하는 출력밀도를 임계 출력밀도라 정의한다. 이러한 임계 출력밀도는 레이저 출력이 증가할수

록 더욱 낮은 출력밀도에서 관찰할 수 있는데, 그 이유는 펄스길이가 더 길 경우에는 금속증기에 의해 발생하는 깊은 구멍의 생성에 필요한 출력밀도가 더 낮아지기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 출력밀도가 $1.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 이상이 되면 오히려 흡수율이 감소하게 되는데, 그 이유는 금속이 증발하면서 그 증기와 함께 에너지 손실이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 현상은 용접 후에 용접부의 단면사진을 관찰한 결과, 위쪽에 존재하는 박판들 중 레이저 빔이 입사된 영역의 많은 부분이 증발하여 제거된 것을 확인함으로써 증명된다¹¹⁾.

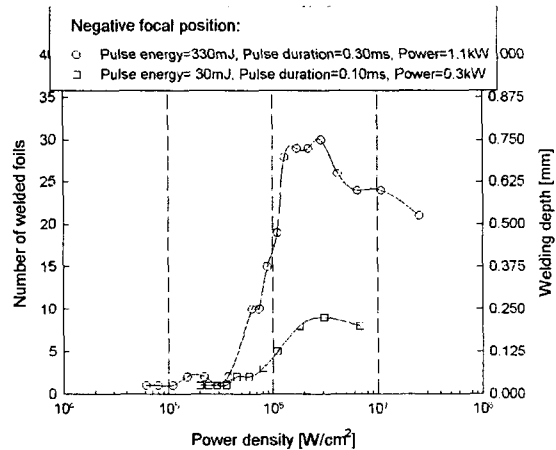


Fig. 5 Number of welded foils and welding depth versus power density

Fig. 5는 Fig. 4와 동일한 조건하에서 도달한 용접깊이를 보여준다. 도달 가능한 용접깊이는 출력밀도가 $4.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 까지는 대략 50 μm 이다. 출력밀도가 $4.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 이상이 되면 용접 깊이는 급격히 증가하여 750 μm 까지 이르게 되는데, 이 영역에서는 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 흡수율도 급격히 증가하고 있다. 출력밀도가 $3.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 이상에서는 두 경우 모두 흡수율이 증가하고 있음에도 불구하고 용접 깊이는 감소하고 있다. 그 이유는 용접 시 재료의 튀김(spatter)으로 인하여 입사된 레이저 에너지의 일부가 손실되어

도달 가능한 용접깊이가 감소하게 되기 때문이다.

2.3 펄스 에너지의 변화에 의하여 발생한 레이저 출력밀도의 변화에 따른 흡수거동

펄스 에너지는 펄스 생성에 필요한 전압을 바꾸거나, 펄스길이를 바꿔줌으로써 변화시킬 수 있다. 용접실험 시 펄스길이와 Load voltage가 흡수거동에 미치는 영향을 조사하기 위해, 이 값들을 각각 분리하여 변화시켰다^{11, 17)}. 펄스길이는 0.3ms, 초점 위치는 -0.87mm로 일정하게 유지시키고, Load voltage를 변화시킴으로써 펄스 에너지는 86mJ부터 822mJ까지 변화시켰다. 또한 펄스길이를 변화시키는 경우에는, 이를 0.1ms부터 0.6ms까지 바꿈으로써 레이저 에너지를 33mJ부터 806mJ까지 변화시켰다.

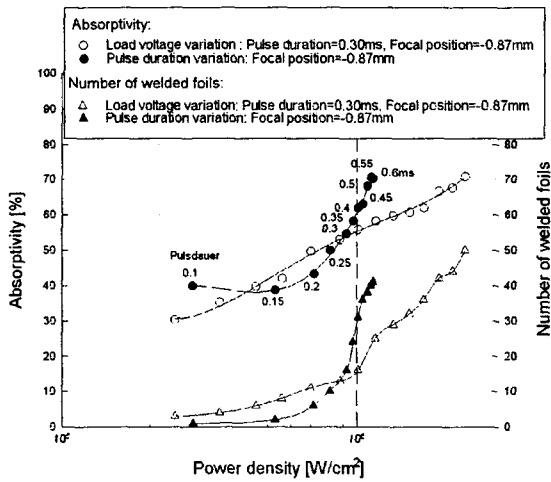


Fig. 6 Absorptivity and number of welded foils versus power density

Fig. 6에서는 흡수율을 출력밀도의 함수로 보여주고 있다. 이러한 흡수거동은 다음의 3가지 상이한 구간으로 구분할 수 있다.

- (I) 출력밀도 < $4.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$
- (II) $4.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2 < \text{출력밀도} < 9.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$
- (III) 출력밀도 > $9.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$

Load voltage를 변화시킬 경우에는 흡수율은 출력밀도가 증가함에 따라 전 구간에 걸쳐 균일하게 증가하고 있다. 또한 출력밀도가 $4.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 부터 $9.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 까지의 구간에서는, 펄스길이를 변화시킬 때보다도 더 많은 레이저 빔이 흡수되고 있음을 알 수 있다. 펄스길이를 변화시킬 때에는 출력밀도가 $6.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 보다 큰 구간에서는 흡수율은 매우 급격히 증가하고 있다. 출력밀도가 $9.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 보다 큰 구간에서는 레이저 에너지는 Load voltage를 변화시킬 경우보다 펄스길이를 변화시킬 때에 더욱 양호하게 흡수됨을 알 수 있다. 펄스길이를 변화시킬 때의 흡수율은 $1.1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 에서 이미 그의 최대값(약 70%)에 도달하는 데 반해서, Load voltage를 변화시킬 경우에는 $2.1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 에서 동일한 최대흡수율에 도달하게 된다.

구간(I)에서는 흡수율의 변화에 펄스 출력 변화가 펄스길이 변화보다 더욱 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 용접깊이는 펄스 출력 변화보다 펄스길이 변화에 더 큰 영향을 받고 있다.

구간(II)에서는 펄스길이 변화가 흡수율 증가에 더 중요한 역할을 하고 있다. 이 구간에서는 출력밀도가 어느 정도 충분하기 때문에 용접깊이가 또한 주로 펄스길이 변화에 의해 영향을 받고 있다. 출력밀도가 $9.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 인 위치에서는 이 두 흡수율 곡선이 일치하고 있는데, 그 이유는 펄스길이 동등한 값을 가지기 때문이다.

출력밀도가 $9.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 보다 크고 펄스길이가 0.3ms보다 긴 경우인 구간(III)에서는, 펄스길이를 변화시킬 경우의 흡수율이 펄스 voltage를 변화시킬 때보다 훨씬 급격히 증가하고 있다. 이 구간에서는 바늘모양의 깊은 구멍을 생성시켜 흡수율의 증가에 도움을 줄 출력밀도가 충분하기 때문에, 흡수율이나 도달 가능한 용접깊이 모두 펄스길이 변화에 결정적으로 영향을 받고 있다.

2.4 펄스길이의 변화에 의하여 발생한 레이저 출력밀도의 변화에 따른 흡수거동

여기서는 펄스 에너지는 동일한 경우 펄스길이만을 변화시켜, 그것이 흡수율에 끼치는 영향을 조사하였다. 펄스 에너지는 330mJ, 초점위치는 -0.87mm로 일정하게 유지한 반면, 펄스길이는 0.2ms부터 0.4ms까지 변화시켰다^{11, 20)}. 펄스 에너지를 일정하게 유지시키기 위하여 Load voltage를 변화시켰기 때문에 각각의 레이저 펄스는 서로 상이한 레이저 출력과 출력밀도를 갖고 있다.

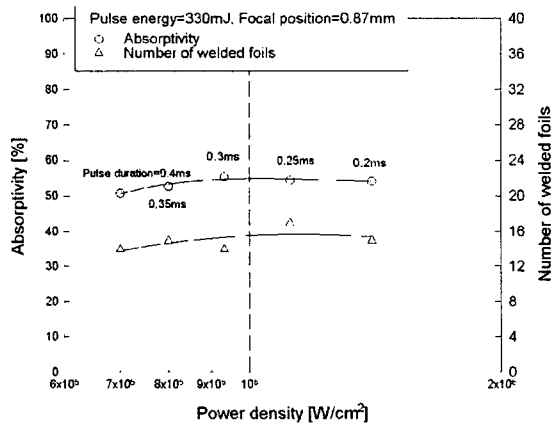


Fig. 7 Absorptivity versus power density at the same pulse energy

Fig. 7은 펄스 에너지가 동일한 경우 흡수율과 용접깊이를 출력밀도의 함수로 나타내 보여 준다. 펄스길이가 변화하는 전 구간에 걸쳐 흡수율은 50%부터 55%까지의 값을 보여준다. 즉 흡수율은 거의 일정한 값(약 53%)을 보여 주는데, 펄스길이가 0.4ms인 경우에 약간 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 레이저 빔을 재료속으로 흡수시켜 주는 데에 중요한 역할을 담당하는 펄스 출력이 매우 작기 때문이다. 다시 말하면 출력밀도가 증가할 수록 흡수율과 용접깊이는 증가하게 된다. 그러므로 이 재료의 용접 가공 시에는 동일한 펄스 에너지를 사용할 경우 펄스길이는 작게 유지하는 것이 유리하다.

3. 결론

레이저 빔을 이용한 재료가공 시 흡수율의 초점 위치, 펄스 에너지 그리고 펄스길이의 변화에 따른 영향을 알아보았다.

초점위치를 변화시킬 때 출력밀도가 증가함에 따라 임계 출력밀도에 일찍 도달하게 된다. 그 이유는 금속증기에 의한. 바늘모양의 깊은 구멍을 생성시킬 수 있는 충분한 출력밀도에 일찍 도달할 수 있기 때문이다. 최대 흡수율은 펄스 출력에 따라 다르지만 70%부터 90%사이에 존재한다. 펄스 출력이 1.1kW일 경우 출력밀도가 $2.0 \times 10^7 \text{W/cm}^2$ 보다 큰 영역에서는 흡수율이 약간 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 재료의 증발로 인하여 에너지의 소모가 발생하기 때문이다. 그러므로 이 재료를 펄스 출력 1.1kW에서 용접가공 할 때에는 출력밀도는 $3.0 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ 보다 작은 영역에서 가공하는 것이 용접깊이의 감소를 가져오지 않으므로 효과적이다.

펄스길이를 변화시킬 때에는 흡수율이 Load voltage를 변화시킬 때보다 일찍 그의 최대값에 도달함을 알 수 있다. 또한 이 경우에 출력밀도가 $9.0 \times 10^5 \text{W/cm}^2$ 보다 큰 영역에서는 흡수율이나 용접깊이가 펄스 출력이 충분히 크므로 주로 펄스 길이에 의해서 영향을 받는다.

동일한 펄스 에너지 하에서 펄스길이를 변화시킬 경우에는 출력밀도가 증가함에 따라 흡수율이나 용접깊이가 다소 증가함을 알 수 있다. 또한 펄스길이가 증가할 경우 용접깊이는 감소하게 된다. 그러므로 이 경우에는 동일한 펄스 에너지일 경우에는 짧은 펄스길이를 가공하는 것이 유리하다.

참고문헌

[1] Dorn, L.; Lee, K.-S.; Jafari, S.; Hüner, T., "Laser-schweißen amorpher Metalle", 6. Internationales Kolloquium "Verbindungstechnik in der Elektronik", Fellbach, 18. bis 20. Feb. 1992,

DVS-Berichte 141, pp.103-106.

[2] C. H. Smith, "Magnetic shielding to multi-gigawatt magnetic switches; Ten years of amorphous magnetic applications", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-18, No. 6, Nov. 1982, pp.1376-1381.

[3] F. E. Luborsky; "Real and potential applications of amorphous metal ribbons", in Buch: Glass...Current Issues (Eds.: A.F. Wright, J. Dupuy), Martinus Nijhoff Publishers, Netherlands, 1985, pp.139-152.

[4] H. Harada. "Electronic application of amorphous metals and their reliability", Proceedings of the Fifth International Conference on Rapidly Quenched Metals (1984), Würzburg, Germany, pp.1691-1694.

[5] R. Hasegawa, "Metallic glasses in devices for energy conversion and conservation", Journal of Non-Crystalline Solids 61 (1984), pp.725-736.

[6] R. Boll; H. Warlimont, "Applications of amorphous magnetic materials in electronics", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG.-17, No. 6, Nov. 1981, pp.3053-3058.

[7] R. Wengerter, "Glasartige Metalle: Eigenschaften, Struktur und Anwendungen (Eds.: S. Steeb, u.a.)", Kontakt und Studium Band 290, 1990, Expert Verlag, pp.126-150.

[8] H.-R. Hilzinger, "Amorphe magnetwerkstoffe", NTG-Fachberichte Bd. 76 (1980).

[9] H. Warlimont, "Amorphous metals: Materials and applications", Helvetica Physica Acta 56 (1983), pp.281-291.

[10] H. Neuhäuser, "Glasartige Metalle: Eigenschaften, Struktur und Anwendungen", Kontakt und Studium Band 290, (Editor: S. Steeb, u.a.), 1990, Expert Verlag, pp.66-103.

[11] Lee, K.-S., "Untersuchung des

Absorptionsvorganges und der Schweißqualität beim Laserschweißen von amorpher Co-Si-Mo-Fe-B-Legierung", Diss. 1993, TU Berlin.

[12] H.W. Schläpfer; R. Goetz; E. Bölle; W. Straub, "Verschleißbeständige und abrasive Glasmetail-Folien", Technische Rundschau Sulzer, 1/1990, pp.7-12.

[13] Hummel, R.E., "Optische Eigenschaften von Metallen und Legierungen", Springer Verlag, Berlin 1971.

[14] E. Beyer, "Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern", (Herausgeber: L. Cleemann), VDI Verlag, Düsseldorf, 1985.

[15] Rüttnick, C., "Messung des Laserstrahlabsorptionsgrades von amorphem Metall", Diplomarbeit, Institut für Maschinenkonstruktion, Fachgebiet Fügetechnik/Schweißtechnik, TU Berlin, 1993.

[16] N.N., "Amorphe Metalle VITROVAC", Firmenschrift, Vacuumschmelze GmbH, Hanau.

[17] Lee, K.-S.; Dom, L., "Zeitliches Absorptionsverhalten vom amorphen Metalle bei der Materialbearbeitung mittels Nd:YAG-Laser", LASER 93, 11. Internationaler Kongreß, 21.-25. Juni 1993.