고출력 연속발진 레이저에 의한 금속 관통율 모델링

Modeling of Metal Penetration Rate by a High Power Continuous Wave Laser

신 완 순* 고 해 석* 박 병 서* 강 응 철*
Wan-Soon Shin Hae-Seog Koh Byung-Suh Park Eung-Cheol Kang

Abstract

The purpose of this study is to develop the model to estimate the penetration rate of metal under a high power continuous wave laser irradiation. To estimate it, an empirical modeling is more practical when the penetration phenomena of metal by laser irradiation is too complex to be analyzed by the numerical simulation. When several methods published earlier were applied to our results, we found out that their methods were not appropriate as the model. Therefore, we suggested the new empirical method considering effective intensity as a key variable. As a result, we confirmed that the new method was effective to model the penetration rate of SUS304 metal and expected that it could be available to other metals.

Keywords : High Power CW Laser(고출력 연속발진 레이저), Laser-material Interaction(레이저 물질 상호 작용), Penetration Rate(관통율)

1. 서론

레이저 물질 상호작용에 대한 연구는 1970년대 초부터 레이저의 개발과 더불어 시작되었다. 그동안 많은 분야에서 레이저가 사용되어 왔으며 가장 많이 사용되고 있는 분야는 금속 가공이다. 레이저에 의한 관통(drilling), 용접(welding), 표면열처리(peening) 등 많은 가공에서 사용되고 있으며, 레이저를 이용한 용접의 경우 레이저에 의한 국부적인 가열이 가능하기 때

문에 기존에 사용하고 있는 전기 및 가스용접에 비해 열변형 영역을 최소화 시킬 수 있어 정밀 가공분야에서 많이 사용되고 있다. 레이저 출력 증가의 급격한 성장으로 레이저 가공에서 주로 사용되었던 레이저가 레이저 무기로써 활용하려는 움직임이 미국을 중심으로 활발하게 진행되고 있다.

이러한 레이저 무기를 운용하기 위해서는 레이저와 물질 간에 발생하는 상호작용을 이해하는 것이 중요하다. 대상 물질의 특성에 따라 레이저 조사에 의한 물질의 반응 효과가 달라지므로, 이러한 특성 파악을 통하여 레이저무기의 대신평적에 대한 효과를 도출하는 경우 효과적인 레이저 무기의 운용도 가능하다. 레이저는 지향성 에너지로써 빛을 표적에 집속하여 조

† 2012년 5월 9일 접수~2012년 7월 27일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 신완순(luminous@add.re.kr)

사할 수 있으며, 에너지가 큰 경우 표적손상을 유발시킬 수 있다. Table 1은 레이저에 의한 표적 별 손상효과를 나타낸다. 무장차량이나 미사일, 작은 보트의 경우 외피를 관통시킴으로써 시스템의 손상효과를 얻을 수 있으며, 센서의 경우 광학창이나 안테나 등을 손상시킴으로써 표적을 무력화시킬 수 있다. 적외선 파장의 레이저 빛은 물질에 흡수되어 열로 전환되므로 적외선 파장의 레이저에 의한 물질의 효과는 가열 및 이에 따른 관통, 열 변형 등에 의한 손상이 주 관심 대상이다. 물질의 가열특성은 물질의 광학적, 기계적 물성을 알고 있는 경우 열전달해석을 통하여 파악할 수 있다. 그러나 관통의 경우 물질의 열전달 및 상변화 현상과 가열에 의한 열응력 발생 등 복잡한 현상들을 수반하여 발생하게 된다. 수치해석을 통하여 이러한 특성을 모두 고려하기에는 어려우며 가능하더라도 많은 시간과 노력뿐만 아니라 검증에 많은 어려움이 있으므로, 실험적인 모델링 방법이 실용적이며 효과적인 대안이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 고출력 연속발진 레이저에 의한 금속 관통을 실험결과로부터 모델링하기 위한 방법을 제시하였다. 레이저 조사에 의한 금속의 관통에 영향을 미치는 인자들을 식별하고 각각의 영향을 고찰하였으며, 기존에 논문에서 제시된 모델링 방법을 본 연구에서 수행된 실험결과에 적용하여 타당성을 확인하였다. 그 결과 기존에 제시된 방법에서의 문제점을 확인하였으며, 이를 해결하기 위한 새로운 모델링 방법을 제시하고 실험결과에 적용하여 레이저에 의한 금속 관통을 모델로써 활용 가능성을 판단하였다.

Table 1. Damage effect according to target

대상 표적	재질	손상 효과
무장차량	금속	관통
미사일	세라믹	관통
	금속	관통
탄두	금속-화약	가열-폭발
RF 센서	안테나	가열-파괴
IR 센서	유리	광학창 및 센서 파괴
압력 용기	금속	열응력 발생에 의한 파괴

2. 본 론

가. 이론적 배경

레이저에 의한 금속 관통에 영향을 미치는 인자들은 레이저 특성과 금속의 형상, 재질 등이 있다. 레이저의 경우 출력, 빔 직경, 그리고 공간분포(spatial distribution)가 중요한 영향을 미치며 금속의 경우 크기나 두께, 재질 등이 중요한 영향을 미친다. 레이저의 출력과 빔 직경에 의해 빔강도(beam intensity)가 결정되며 빔강도에 따라 레이저와 표적간의 상호작용이 크게 달라진다. 레이저 가공분야에서 주로 펄스형의 레이저를 사용한 것과는 달리 본 연구에서 관심분야는 연속발진형 레이저이다. Fig. 1은 레이저의 빔강도와 조사시간에 따른 금속과의 상호작용 특성을 나타낸다.^[1] 레이저 조사시간이 10^{-4} 초 이하이며 빔강도를 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 로 증가시켜 금속에 조사하는 경우 금속을 순간적으로 기화시킬 수 있으며, 홀 가공이나 절단을 위해서는 레이저 조사시간을 10^{-4} 초 이상으로 증가시키고, 빔강도를 $10^5 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 로 다소 감소시키는 경우에 가능하다. 이와 같이 레이저와 금속의 상호작용은 빔강도와 조사시간에 따라 크게 달라지며 조사시간의 증가에 따라 가공에 소요되는 빔강도를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 군사용으로 언급되고 있는 연속 발진형 레이저의 경우, 수 초의 레이저 조사시간을 갖으며 수십 kW 이상의 출력을 요구하는 것으로 알려져 있다. 표적에 전송되는 빔의 출력과 빔의 크기에 따라 달라지지만 표적손상을 위한 빔강도 수준이 수백 $\text{W/cm}^2 \sim$ 수 kW/cm^2 임을 감안하면, 이 영역에서는 주로 가열에 의한 레이저와 금속의 상호작용이 발생된다고 볼 수 있다.

Fig. 2는 빔강도 I_0 와 빔직경 w 의 균일빔을 갖는 레이저가 시간 t 동안 조사되는 경우 발생되는 열전달 과정을 개념적으로 나타낸 것이다. 금속이 표면에 흡수된 레이저빔에 의해 가열되면 에너지는 시간에 따라 $\sqrt{\alpha t}$ 정도의 거리까지 전달된다. 금속이 관통되기 위해서는 바람, 중력과 같은 외부영향이 없다고 가정할 때 레이저 빔에 의해 금속을 기화(vaporization)시켜야 하며, 이에 필요한 에너지 E 는 다음 식으로부터 계산될 수 있다^[2].

$$E = \rho \pi w^2 \sqrt{\alpha t} (C(T_v - T_o) + L_m + L_v) \quad (1)$$

Fig. 1. Laser-matter interaction with laser intensity and irradiance time

여기서, ρ 는 밀도, C 는 비열, α 는 금속의 열확산도, L_m 과 L_v 는 용융과 기화 잠열이며 T_v 과 T_o 는 기화온도와 금속 초기 온도를 각각 나타낸다.

금속이 기화되기 위해서는 조사시간동안 누적에너지가 기화에 필요한 에너지보다 커야 하므로 식 (1)과 누적에너지 $a\pi w^2 I_o t$ 를 이용하여 기화를 위한 최소 빔강도 I_v 를 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서 a 는 흡수율을 나타낸다.

$$I_v = \frac{\rho}{a} (C(T_v - T_o) + L_m + L_v) \left(\frac{\alpha}{t} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Fig. 2. Target heating by a laser

Fig. 3은 금속의 흡수율과 레이저 조사시간에 따른 기화에 의한 관통에 필요한 최소 빔강도 변화를 나타낸다. 해석에 사용된 열 물성은 Table 2에 제시하였다.

흡수율에 따라 빔강도가 크게 변화되며 조사시간 증가에 따라 관통에 필요한 빔강도가 감소됨을 알 수 있다. 흡수율이 0.3이고, 레이저 조사를 10 초 조사할 때 관통에 요구되는 레이저 빔강도는 $1.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 로 나타났다. 이동하는 표적에 10 초 이상 레이저를 조사할 수 있는 경우는 없으므로 그 이상의 조사시간은 무의미하다. 따라서 일반적인 경우 이동표적을 관통에 의해 손상시키기 위해서는 kW급 이상의 레이저 출력이 요구됨을 알 수 있다.

Fig. 3. Minimum intensity to evaporate with absorptance and laser irradiance time

Table 2. Thermal properties of SUS304

변 수	값	비 고
밀도(kg/m³)	7,900	
용융 잠열(J/kg)	247,291	
기화 잠열(J/kg)	7,300,000	
비열(J/kg-K)	477	상온 기준
용융온도(K)	1,670	
기화온도(K)	2,407	

레이저에 의한 금속 관통율 모델링과 관련된 기존 연구를 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 4, Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는 문헌 [3]에서 제시된 결과로써 레이저 빔강도에 따른 페놀릭 실리카 재질의 관통율 변화를 나타낸다. 페놀릭 실리카 재질의 관통율을 측정하

기 위해 레이저 빔강도를 수백 kW/cm^2 까지 변화시켜 관통 실험을 수행한 결과이다. 일부 데이터는 풍동실험을 통하여 얻은 고속 유동 중에 노출된 표적에 대한 실험결과도 포함되어 있다. 이 결과는 레이저의 빔강도에 따라 페놀릭실리카의 관통을 변화를 선형적으로 가정하여 모델링할 수 있음을 보여준다. Fig. 5는 문헌 [4]에 제시된 자료로써 레이저 출력과 금속의 두께를 인자로 수치해석을 수행하여 금속의 관통에 필요한 용융시간이 레이저 출력과 금속의 두께에 관련이 있으며, 재질이 다르더라도 출력과 두께로 제시된 무차원수를 도입하는 경우 같은 무차원화된 관통시간 분포를 가짐을 나타낸다.

Fig. 4. Penetration rate variation with laser intensity (Phenolic silica)

Fig. 5. Melting time variation with laser power and target thickness

나. 레이저 조사 실험

1) 실험장치 및 방법

기존 문헌조사를 통하여 레이저 조사에 의한 금속의 관통율에 영향을 미치는 인자를 파악하여 주요인자로 레이저 출력과 빔직경, 그리고 표적의 두께가 있으며 그 외에도 레이저의 파장 및 공간분포(spatial distribution)가 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 본 연구에서 모든 인자에 대한 영향을 파악하는 것은 어려우므로, 레이저의 경우 $1.07 \mu\text{m}$ 파장을 갖는 광섬유 레이저를, 금속은 일반적으로 많이 사용되는 SUS304를 이용하여 레이저 조사에 의한 금속 관통율 변화를 조사하였다. 레이저 빔 직경은 광학렌즈를 사용하여 가변 가능하나, 여러 두께의 표적을 사용하므로 이로부터 빔직경 대비 두께효과를 확인할 수 있으므로 빔직경은 5.85 mm 로 고정하였으며 레이저 출력은 283 W , 650 W , 1 kW 로 설정하여 표적에 조사되는 레이저 빔강도를 변화시켰다. Table 3과 Table 4는 본 연구에서 사용된 레이저 사양과 표적 형상을 나타낸다. 세팅된 실험장치 사진은 Fig. 6에 나타내었다. 관통 시간 측정을 위해 0.5 mm 두께의 납선을 레이저 표적 전후에 각각 설치하고, 레이저 조사시 납선이 끊어질 때 발생하는 각각의 전압신호 변화를 계측하여 관통 시간을 측정하였다. 실험의 재현성을 확인하기 위해 한 조건에서 3회 실험을 반복 수행하였다.

Table 3. Laser specification

항 목	사 양	비 고
이득매질	Yb-doped fiber	
발진 방식	CW, QCW	가우시안 빔
파장	$1.07 \mu\text{m}$	
출력	최대 1 kW	
빔지름	5.85 mm	collimator 출구

Table 4. Target specification

항 목	사 양	비 고
재질	SUS304	
단면적(m^2)	100×100	정사각형
두께(mm)	0.1, 0.2, 0.5, 1, 2

Fig. 6. Photograph of the experimental setup

2) 실험결과

레이저 조사에 의한 SUS304 재질에 대한 관통시험 결과를 Fig. 7에 정리하여 나타내었다. 금속에 흡수된 레이저에 의한 영향만을 고려하기 위해 상온에서의 흡수율 0.31을 적용하였으며, 빔강도는 레이저 출력과 빔 단면적으로 계산한 평균값을 사용하였다.

레이저 빔강도에 따른 SUS304 재질의 관통율은 시편의 두께가 1 mm 이하 인 경우 빔강도에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 시편의 두께가 0.1 mm와 0.2 mm로 얇은 경우 두께가 2 배 증가하였음에도 불구하고 빔강도에 따른 관통율은 유사하게 나타났다. 반면에 두께가 0.5 mm 이상으로 증가하는 경우 관통율은 급격히 감소하였으며, 두께가 0.1 mm와 1 mm의 경우 두께가 10 배 증가하였으나 관통율은 1/10로 감소하는 것으로 나타났다. 시편의 두께가 2 mm인 경우, 빔강도의 증가에도 불구하고 관통율의 증가는 미미하게 나타났으며, 시험간의 관통율 편차가 크게 나타나고 관통율도 가장 낮았다. 또한 빔강도가 500 W/cm² 일 때 레이저를 1 분 이상 조사했음에도 불구하고 시편은 관통되지 않았다.

표적의 두께가 증가함에 따라 관통율이 감소되는 이유는 흡수된 레이저 빔이 국부적으로 시편을 가열하지 못하고, 측면으로 손실되는 레이저 파워가 두께 증가에 따라 증가하기 때문으로 판단된다. 측면으로 손실되는 열에 의한 효과를 확인하기 위해 시편의 크기를 1/10 수준으로 감소시켜 추가 제작하였으며, 이에 대한 실험한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 두께 1 mm에 대하여 크기를 9 mm × 9 mm, 10 mm × 10 mm 두 가지로 시편을 제작하였다. 시편의 면적은 레이저 빔 면적의 각각 3.04, 3.76 배이며 앞서 사용된

100 mm × 100 mm 대비 1/100 수준이다. 레이저 조사 실험결과 시편이 큰 경우대비 관통율은 2.5 ~ 3 배로 증가하였으며, 빔강도에 따라 관통율도 선형적으로 증가하였다. 이 결과로부터 측면으로 손실되는 열의 크기는 레이저 빔직경과 시편크기에 따라 달라지며, 열 손실에 의한 효과가 관통율에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 7. Penetration rate variation with laser intensity and target thickness

Fig. 8. Penetration rate variation with laser intensity and target area

관통에 필요한 에너지를 도출하기 위해 실험결과로부터 레이저 빔강도에 따른 관통에 필요한 단위체적당 필요에너지 Q^* 를 실험결과로부터 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 관통되는 표적의 체적은 시편에 조사되는 레이저 빔면적과 두께의 곱으로 가정하여 계산

하였다. 시편의 두께가 동일한 경우 관통에 소요되는 에너지 밀도는 빔강도에 변화에 상관없이 상대적으로 유사하게 나타났으나, 두께가 증가하는 경우 에너지 밀도 또한 증가하였다. 두께가 얇은 0.1, 0.2 mm 경우 관통에 필요한 체적당 에너지는 10 kJ/cm^3 이하이고, 두께가 10 배 이상 증가되는 2 mm의 경우 소요되는 에너지 밀도는 100 kJ/cm^3 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이는 관통에 소요되는 에너지밀도가 빔직경과 시편 크기 등의 조건이 일정할 때, 빔강도 보다는 표적 두께의 영향을 더 받음을 의미한다.

Fig. 9. Unit volume energy to penetrate

시편의 두께와 레이저 출력의 영향을 고려하기 위해 참고문헌 [4]에서 제시된 방법에 따라 실험결과를 정리하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 t 는 실험으로부터 얻은 관통시간이며, t_1 은 Table 3의 물성으로부터 계산된, 레이저가 조사된 체적이 용융에 필요한 시간을 나타낸다. 무차원화된 변수 P_{la} 는 레이저 출력과 금속두께, 용융에 필요한 열량의 관계로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$P_{la} \equiv \frac{P_o}{\alpha \rho l [L_m + C(T_m - T_o)]} \quad (3)$$

여기서, l 은 시편 두께이며, P_o 는 레이저 출력을 나타낸다.

그림에서 P_{la} 이 10 이하 인 경우 P_{la} 의 감소에 따라 관통에 필요한 시간이 증가되나, P_{la} 이 10 이상인 경우 관통시간은 계산된 t_1 값과 거의 일치하는 것으

로 나타났다. P_{la} 이 10 이하 인 경우 P_{la} 값의 감소에 따라 관통시간이 t_1 에 비해 급격히 증가한 것은, P_{la} 값이 레이저 출력의 감소 및 시편의 두께가 증가하는 경우 감소하기 때문이다. 그러나 이러한 특성은 시편의 두께가 0.2 mm 이하로 얇은 경우 다르게 나타났다. 0.2 mm 두께의 시편을 이용한 실험결과 P_{la} 의 값에 관계 없이 관통시간은 일정하였다. 이것은 P_{la} 가 작더라도 표적 두께에 따라 결과가 달라질 수 있음을 나타내는 것으로, 문헌 [4]에서 제시된 방법이 일정한 두께를 갖는 표적에 대한 연구결과임을 고려할 때, 본 실험에서 얻은 데이터를 모두 고려하기에는 어려움이 있음을 의미한다.

한편, Fig. 3과 Fig. 10의 결과에서 용융과 관통의 변곡점이 되는 P_{la} 값이 차이가 나타나는 것은 전자의 경우 금속 용융에 소요되는 시간을 해석으로부터 계산한 결과이고, 후자는 관통에 소요된 시간을 측정 한 결과이기 때문으로 판단된다. 계산의 경우 관통기준으로 판단에 이용되는 용융영역의 크기에 따라 관통시간이 달라질 수 있다.

Fig. 10. Penetration time variation with P_{la}

다. 관통율 모델

연속발전 고출력 레이저 조사에 의한 금속 관통을 모델 제시하기 위해 시편의 두께와 크기, 그리고 레이저 빔강도를 변화시켜 레이저 조사실험을 수행하였다. 기존 문헌에서 제시된 방법들을 이용하여 관통율 모델링 타당성을 검토하였으나 만족할만한 결과를 얻지 못하였다. 제시된 모델들의 문제점을 해결하기 위해, 모델링 인자로서 레이저 출력과 표적 두께, 크기와 레

이제 빔 직경을 선정하고, 각각의 효과를 조사하였다. Fig. 7 ~ Fig. 10의 결과로부터 레이저 조사에 의한 금속 관통율은 레이저 출력 및 빔강도에 비례하고, 시편 두께와 시편 크기에 반비례함을 알 수 있었다. 이러한 효과를 고려하기 위해 유효 빔강도(effective beam intensity), I_{eff} 를 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$I_{eff} = I_o \frac{w^2}{lH} \quad (4)$$

여기서, H 는 시편 높이를 나타낸다.

Fig. 11은 본 연구에서 제시한 유효 빔강도에 따른 관통율 변화를 나타낸다. 표적의 두께에 관계없이 유효 빔강도에 따른 관통율은 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 모델링 결과는 빔 직경이 일정한 경우에 대한 결과이므로, 레이저 빔 직경을 증가시킨 경우에도 이 방법이 타당하게 적용할 수 있는지 확인해 보았다. 레이저 출력을 2 ~ 10 kW 범위에서, 빔 직경을 15 mm로 변화시켜 실험을 추가로 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 빔 직경 15 mm를 갖는 10 kW 레이저를 이용하여 출력을 10 배, 빔 직경을 약 3 배 증가시켰음에도 불구하고, 유효 빔강도에 따른 관통율은 기존 모델링한 결과와 매우 유사하게 나타났다. 이 결과로부터 본 연구에서 제시한 방법이 타당하다고 판단하였으며, SUS304 재질에 대한 유효 빔강도와 관통율 PR 에 대한 실험식을 식 (5)에 제시하였다.

$$PR(mm/s) = 10^{1.1 \times \log(I_{eff}) - 3.49} \quad (5)$$

3. 결론

연속발진 레이저에 의한 금속 관통율을 예측할 수 있는 모델링 방법을 제시하기 위해, 1 kW 연속발진 광섬유 레이저를 이용한 금속 관통시험을 수행하였다. 기존문헌에 제시된 방법들을 이용하여 관통율 모델링 가능성을 검토하였으나, 만족할만한 결과를 얻지 못하는 것으로 확인되었다. 기존문헌에서 나타난 문제들을 해결하기 위해 수행된 실험결과로부터 관통율에 관련된 인자들을 도출하고, 각 인자들이 관통율에 미치는 영향을 확인하였다. 그 결과를 근거로 유효 빔강도를 제시하였으며, 유효 빔강도를 적용하여 SUS304에 관

통율을 모델링할 수 있음을 확인하였다. 본 연구결과 는 고출력 연속발진 레이저에 의한 다른 금속의 관통 율 모델링에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 11. Penetration rate variation with effective intensity

Fig. 12. Penetration rate with laser power

References

- [1] J. F. Ready, LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001.
- [2] Nielsen, Philip E., Effects of Directed Energy Weapons, DEPS, 2009.
- [3] Hartmut H. Legner, William T. Laughlin, Role of Laser Effects M&S in DE T&E, AIAA 2007-1627.
- [4] Peter J. Torvik, Predictions of Melt-through Times for Laser Heating, AIAA paper 75~114.