

빔 중첩율에 따른 티타늄 합금의 펨토초 레이저 어블레이션

The Femto Second Laser Induced Ablation on the Titanium Alloy for Various Beam Overlap Ratio

정일영¹, 강경호¹, 김재도^{2,✉}

Il Young Chung¹, Kyung Ho Kang¹ and Jae Do Kim^{2,✉}

¹ 인하대학교 기계공학과 대학원 (Department of Mechanical Engineering, Inha Univ.)

² 인하대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Inha Univ.)

✉ Corresponding author: kimjaedo@inha.ac.kr, Tel: 032-860-7316

Manuscript received: 2010.3.25 / Revised: 2010.8.5 / Accepted: 2010.8.30

Titanium alloy is one of the hard processing materials made by the traditional manufacturing method because of the excellent mechanical strength. Ablation of titanium alloy is investigated by using a femtosecond laser which is a regenerative amplified Ti:sapphire laser with 1kHz repetition rate, 184fs pulse duration time and 785nm wavelength. Experiments are carried out under various ablation conditions with different pulse overlap ratios for the rectangular shape and micro hole. Test results show that the ablation characteristic according to pulse overlap ratio of titanium alloy seems to be as non-linear type at the different zone of energy fluence. The optimal condition of rectangular shape processing is obtained at the laser peak power 1.3mW, pulse overlap ratio of 90%, beam gap of 1 μ m. The micro hole has a good quality from the pulse overlap ratio of 99% at the same laser peak power. With the optimal processing condition, the fine rectangular shape and micro hole without burr and thermal damage are achieved.

Key Words: Femtosecond Laser (펨토초 레이저), Ablation (어블레이션), Titanium Alloy (티타늄 합금), Pulse Overlap Ratio (펄스 중첩율), Energy Fluence (에너지 플루언스)

1. 서론

티타늄 합금은 동이나 니켈, 스테인레스 보다 가볍고 다른 금속재료 중 높은 비강도를 가지고 있다. 고온, 고압, 부식성 환경에서 많이 사용되고 있고 임플란트나 인공관절 등에 사용되고 있는 재료이다.¹ 티타늄 합금의 기계적인 기능성의 활용을 위하여 가공 방법의 접목이 필요하나 일반적인 기계 가공 방법으로는 기계적 강도가 우수한 특성으로 인하여 가공하기가 어렵다.² 최근 가공하기 어려운 재료들의 효과적인 가공 방법에 대한 가공시스템 연구가 활발히 진행되고 있다.^{3,4} 이런 가공

방법 중 펨토초 레이저(Femtosecond laser)는 산업현장에서 사용되고 있는 가공용 펄스형 레이저보다 극도로 짧은 10^{-15} 초의 펄스로 발진하는 레이저로써 열확산 길이가 나노초 펄스(Nano-second pulse)에 비하여 매우 짧고 플라즈마나 유동장의 형성 전에 어블레이션(Ablation)이 일어나므로 열영향부 생성으로 인한 가공정밀도 저하를 크게 줄일 수 있다. 펨토초 단위의 펄스는 집속면의 출력밀도를 10^{15} W/cm² 수준까지 증가할 수 있기 때문에 알루미늄 박판, 구리 박판, 니티놀(Nitinol) 등과 같은 여러 펄름 형태의 재료 가공에 대하여 우수한 가공 특성을 나타내고 있다.⁵⁻⁸ 생체재료로 쓰이는 티타

늄 합금(Ti-6Al-4V)에 대한 연구는 주로 한 점에서 서로 다른 플루언스를 조사하였을 때 형성된 표면 특성에 대한 연구와 가공 후 생성된 티타늄 합금의 표면과 그 생체적 합성에 대한 연구가 진행되었다.^{9,11} 그러나 빔의 이동 및 선형 또는 원형 반복 가공과 같은 특정 형상에서의 가공특성에 대한 연구가 부족한 편이었다.

본 연구에서는 생체의료용 합금재료인 티타늄 합금의 표면 가공을 위한 어블레이션 특성을 펄스 중첩율의 변화에 따라 분석하고 특정 형상 가공에 따른 가공 방법의 제시 및 가공 변수를 변화시켰을 때 재료의 가공 특성을 얻고자 한다.

2. 펨토초 레이저의 어블레이션 이론

2.1 펨토초 레이저의 어블레이션 과정

펨토초 레이저를 금속 표면에 조사하게 되면 낮은 강도의 짧은 펄스 형태로 레이저 빔을 조사하게 된다. 이때 발생하는 펨토초 레이저 빔의 포톤은 에너지를 보유하게 되고 Fig. 1 과 같이 금속 표면에 접촉을 하게 되면 열에너지에 의하여 열적 확산 작용이 발생되며 에너지를 전달하게 된다. 열적 확산 작용에 의하여 발생된 에너지는 재료 표면에서 격자 형태로 변화되는 과정을 거치게 된다. 이 격자 형태는 재료 표면에서 에너지의 방출과 함께 제거되는 과정으로 이루어진다.

어블레이션 과정은 매우 빠르게 발생되고 격자 구조 시스템으로 변환되는 과정은 이들이 보유하고 있는 열적 특성으로 인하여 어블레이션이 발생된다.⁸

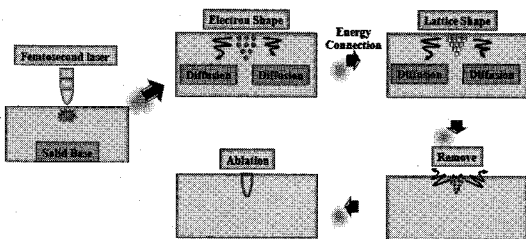


Fig. 1 Schematic drawing of the ablation process in solid materials by a femtosecond laser

2.2 펨토초 레이저의 어블레이션 가공 특성

일반적으로 전자의 온도와 격자의 온도를 각각 T_e 와 T_l 이라 할 때 전자와 격자의 two temperature model 은 식(1)과 같이 표현한다.

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial Q(z)}{\partial z} - g(T_e - T_l) + S(z,t) \quad (1)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = g(T_e - T_l)$$

$$Q(z) = -\kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial z}, \quad S(z,t) = I(t)A\alpha \exp(-\alpha \cdot z)$$

여기서 C_e 는 전자의 열충전, C_l 는 격자의 열충전, g 는 constant of electron-phonon, Q 는 열에너지, S 는 레이저 열원, κ 는 전자열전도도, A 는 면적, α 는 흡수계수이다. 금속 재료에 짧은 파장의 레이저에 의하여 상호 작용을 발생할 때의 현상은 유체역학적 운동으로 설명할 수 있으나 어블레이션이 이루어지는 시간이 피코초(Pico-second) 단위로 빠른 시간에 발생하기 때문에 이를 무시할 수 있다. 어블레이션이 발생하는 동안 전자에서 보유한 에너지는 열적 충전과 열전도가 발생하면서 격자 구조로 변환되기 때문에 전자의 열적 확산은 상수로 취급할 수 있다. 따라서 격자에서 발생된 평형 온도 분포는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 F_a 는 흡수된 레이저 플루언스, x 는 열충전에 대한 재료의 수직방향, l 은 전자의 온도 확산 길이, δ 는 광학 흡수계수를 이용하여 l/α 의 형식으로 계산할 수 있고, l 은 $\sqrt{D\tau_a}$ 에 의하여 계산할 수 있다. D 는 열확산 계수, τ_a 는 어블레이션 가공시 적용되는 펄스 지속수(Pulse duration)가 된다.¹²⁻¹⁴

$$T_l \approx \frac{F_a}{C_l} \left(\frac{1}{l^2 - \delta^2} \right) \left[l \exp\left(\frac{-x}{l}\right) - \delta \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right) \right] \quad (2)$$

식 (1)은 금속 재료에서 흡수되는 δ 와 l 의 상호 크기에 따라서 식 (2)와 식(3)으로 구분되어 어블레이션의 깊이를 계산할 수 있다.

$$T_l \approx \left(\frac{F_a}{C_l} \frac{1}{\delta} \right) \left[\exp\left(\frac{-x}{\delta}\right) \right] \quad (\delta \gg l) \quad (3)$$

$$T_l \approx \left(\frac{F_a}{C_l} \frac{1}{l} \right) \left[\exp\left(\frac{-x}{l}\right) \right] \quad (\delta \ll l) \quad (4)$$

$$L \approx \delta \ln \left(\frac{F_a}{F_{th}^\delta} \right) \quad (\delta \gg l) \quad (5)$$

$$L \approx l \ln \left(\frac{F_a}{F_{th}^l} \right) \quad (\delta \ll l) \quad (6)$$

어블레이션 깊이는 위 식과 같이 예측할 수 있고 상기 조건에 대하여 나누어지는 특징이 있다.

미세 정밀 가공 공정에서는 정확한 형상의 구현을 통한 어블레이션 가공을 나타내는 것에 한계가 있기 때문에 어블레이션 깊이의 관계 식은 열적 상호 반응 작용에 의한 재료의 제거율과 근사적으로 예측하는 것으로 사용한다.⁵

3. 펨토초 레이저의 어블레이션 실험

3.1 티타늄 합금

실험에 사용한 재료는 생체 의료분야에 널리 쓰이고 있는 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 사용하였다.

티타늄 합금은 쉽게 부러지지 않고 파괴인성과 같은 기계적 강도가 우수하여 뼈와 치아와 같은 경조직 대체용 재료로 많이 이용되고 있으며 생체친화성 및 내부식성이 우수하여 골절 부위의 고정장치 및 인공관절로 사용되고 있다.² Table 1 은 티타늄 합금의 대표적인 물리적 특성을 나타낸다.

Table 1 Physical properties of titanium

Property	Value
Thermal expansion coefficient (x10 ⁻⁶ °C)	8.7 ~ 9.8
Hardness (HRC)	36
Fracture toughness (MPa)	40 ~ 70
Modulus of elasticity (MPa)	110
Yield strength (MPa)	693
Ultimate strength (MPa)	780 ~ 1050

3.2 펨토초 레이저 시스템과 실험 조건

실험에 사용한 장비는 고등광기술연구소 미세 광학연구실에서 보유하고 있는 785nm 파장의 Ti:sapphire 레이저로써 빔 폭은 6 mm 이고, 대물렌즈(Objective lens)는 20 배율 렌즈를 사용하였다. NA(Numerical Aperture)는 0.4 를 이용하였고, 이상의 실험 장비의 시스템 구성은 Fig. 2 에 나타내었다.

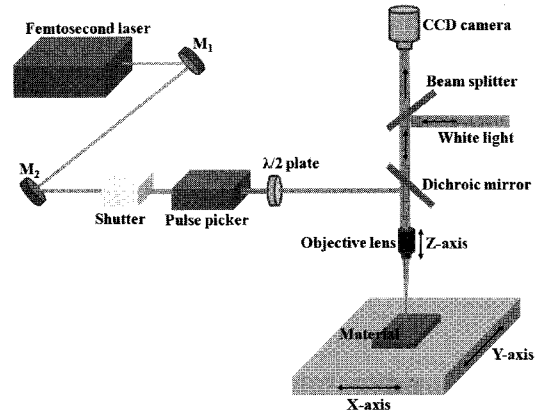


Fig. 2 Femto-second laser processing system

가공 실험에 대한 고정 조건으로 펄스 지속시간(Pulse duration time)은 184fs, 펄스 반복 주파수(Repetition rate)는 1kHz 로 고정하였다.

티타늄 합금의 어블레이션 실험은 펄스 중첩율과 레이저 빔의 출력을 변환하여 실험을 하였다. 펄스 중첩율은 99%, 96%, 90%로 설정하였고 레이저 빔의 출력은 플루언스에 따른 비선형적 변화를 파악하기 위하여 5.6, 17.2, 28.8, 51.9, 81.5, 111, 176.6, 296, 471mW 의 상용 가능한 한계 출력 범위를 사용하였다. 펄스 중첩율은 재료와 접하는 레이저 빔의 크기 대비 중첩 정도를 나타내는 것으로 레이저 빔의 크기, 펄스 반복 주파수와 이송 속도의 3 가지 조건을 계산하여 구할 수 있다. Fig. 3 은 중첩률에 따른 펄스 빔의 이동 경로를 나타내고 있다. 이송 속도가 매우 빠른 경우는 중첩율이 0%의 경우와 같이 하나의 점만 형성하게 되고 이송 속도가 느려질수록 중첩율은 증가하게 된다.

이상의 변수를 이용하여 티타늄 합금에 선형으로 빔을 이송하여 각각의 조건에 대한 어블레이션 특성값을 측정하였다.

3.3 표면 형상 가공 실험 조건

50 μm 두께의 티타늄 합금(Ti010250)에 형상 가공 실험을 하였다. 형상 가공 실험은 100 μm×100 μm의 정사각형으로 표면층을 밀링 형식으로 가공하였고, 원형 형상을 조사하기 위하여 직경 100 μm 크기의 마이크로 홀 가공을 하였다.

정사각형의 가공 방법은 바둑판 배열(Mapping) 방식을 이용하여 가공하였다. 바둑판 배열 방식의 가공 방법은 Fig. 4 에 나타내었고, Y 축 방향으로 이동 작업을 먼저 수행 후 X 축 방향으로 교차 이동

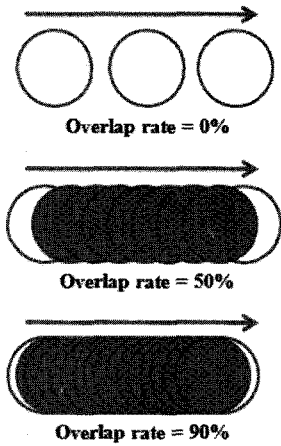


Fig. 3 Image of overlap ratio

하는 방식을 사용하였다. 레이저 빔의 진행 경로를 변경할 때는 레이저를 OFF 상태에서 이동하고 다시 진행경로에 이동할 때는 레이저를 ON 상태에서 이동하였다. 이때의 가공 변수로는 레이저 빔의 펄스 중첩율, 이동간격, 가공에 용이한 출력으로 변환하여 가공을 하였다.

마이크로 홀 가공은 어블레이션 실험 결과와 기타 가공 변수를 추가하여 실험을 하였다. 마이크로 홀 가공은 레이저 빔 출력과 펄스 중첩율, 어블레이션된 layer 의 깊이, 레이저 빔간 이송간격을 변수로 설정하여 가공 실험을 하였다. Fig. 5 는 마이크로 홀 가공의 가공 방법을 보여주는 그림이다. Fig. 5 와 같이 바깥원에서 부터 어블레이션 작업을 하여 안쪽방향으로 레이저 빔을 이송시키면서 1 layer 가공을 하였다. 여기서 layer 란 한번 어블레이션 과정이 이루어졌을 때의 가공 깊이로써 재료 두께에 따라 설정할 수 있다. 재료의 두께가 50 μm 일 때 중첩율에 따른 어블레이션 깊이가 10 μm 라 하면 홀 가공을 위해서는 5 번 이상의 층 가공이 필요하다. 이렇게 한번의 층 가공을 layer 라 한다. 또한 레이저 빔의 이송 간격에 따른 동심원의 수는 10 번으로 고정하였다. 여러 동심원을 만들어 가공하는 이유는 하나의 원 가공으로 레이저 빔을 깊이 방향으로 이송하여 홀 가공을 수행하게 된다면 어블레이션 폭이 작은 경우는 깊이 방향으로 레이저 빔의 침투가 어려워지고 또한 어블레이션에 의한 재료의 열적 반응이 짧은 시간에 동일 지점으로 집중되는 현상을 피하여 재료 손상 없이 가공하기 위함이다.¹⁶

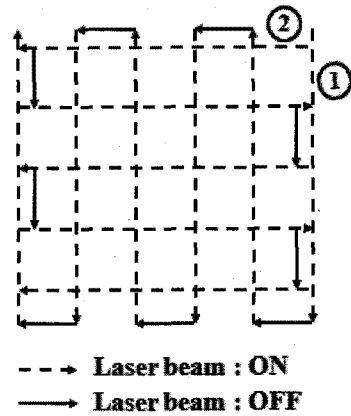


Fig. 4 Schematic diagram of mapping method for surface milling processing

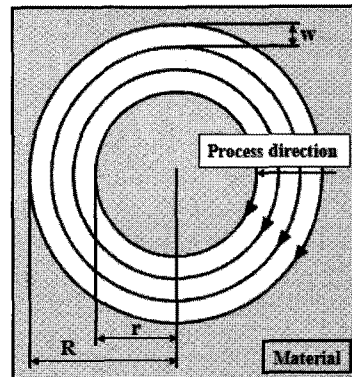


Fig. 5 Schematic diagram of an ablation method for micro hole processing

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 중첩율 변화에 따른 어블레이션 특성

중첩율을 변화하여 레이저 빔을 선형 이송한 결과, 티타늄 합금의 어블레이션 깊이의 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. 깊이의 측정은 광학 Vision 카메라의 초점간 거리를 이용하여 측정하였다. 플루언스는 실험 방법에서 설정한 레이저 출력에 대하여 계산한 값으로 변경하였고 티타늄의 F_{th} 는 2.3mJ 으로 하였다. 중첩율 변화에 대하여 어블레이션 깊이의 성향은 비선형으로 나타나고 있다. 또한 중첩율이 감소함에 따라 어블레이션 깊이는 미소하게 작아지는 경향을 나타내고 있으며 이 현상은 중첩율이 높을 경우 일정 부분에서 펄스 에너지의 중첩으로 인하여 어블레이션 깊이가 증가

됨을 알 수 있다.

중첩율이 감소함에 따라서 비선형적으로 변화가 발생하는 구간도 차이가 난다. 중첩율이 90%의 경우는 비선형 발생 구간이 확연히 발생하기만 99%의 중첩율의 경우는 비선형 발생 구간이 더욱 낮은 구간에서 형성됨을 알 수 있다. 이는 전자의 온도 확산 길이 l 과 광학침투 깊이 δ 의 차이 변화로 볼 수 있다. 99%의 중첩율에서는 전자의 온도 확산 길이가 광학침투 깊이에 비하여 상대적으로 짧게 나타나고, 90%의 중첩율에서는 전자의 온도 확산 길이가 광학침투 깊이에 비하여 증가하는 현상이 나타나는 것으로 판단할 수 있다.

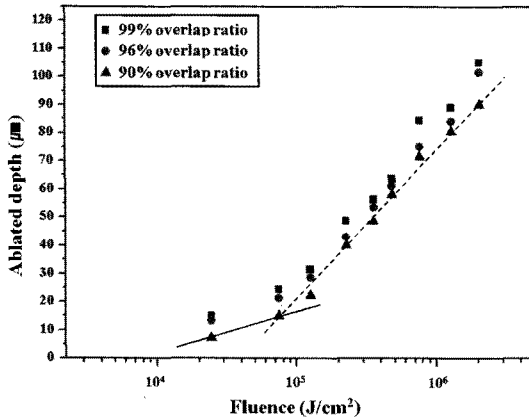


Fig. 6 Energy fluence dependence of the ablated depth of Ti-alloy for various overlap ratio

4.2 티타늄 합금의 표면 가공 특성

바둑판 배열 방식을 이용한 티타늄 합금의 표면 어블레이션 결과는 Figs. 7-8 에 나타내었다. Fig. 7 에서 1.3mW 의 레이저 빔 출력, 1 μm의 빔간 이송간격, 100 회의 이송 횟수를 적용한 결과 낮은 레이저 빔 출력에서 버(Burr)와 열영향이 없는 좋은 가공 형상을 나타내고 있으나 중첩율이 높은 경우 외각 형상에 약간의 변화를 형성하는 경향을 나타내었다.

Fig. 8 은 24.6mW 의 레이저 빔 출력, 5 μm의 빔간 이송 간격, 20 회의 이송 횟수를 적용한 결과이다. 전체적으로 열적 영향 및 사각 외형의 굴곡 형상과 버(Burr)를 발생하는 결과를 나타내고 있다. 이런 결과는 티타늄 합금의 집적된 열적 에너지에 대한 영향이 심하게 발생한 결과로 볼 수 있다.

티타늄 합금의 표면 어블레이션 가공 후 표면 형상을 알아보기 위하여 SEM 을 이용하여 측정된 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 9(a)의 경우 레이

저 빔의 이송 흔적을 발견할 수 없지만 작은 입자들이 뭉쳐있는 현상을 발견할 수 있다. 이는 열적 에너지에 의하여 작은 입자들이 서로 뭉쳐 하나의 소결 형태를 취하는 것으로 보인다. Fig. 9(b)의 경우는 고출력에 의하여 레이저 빔의 이송 흔적을 발견할 수 있고 또한 Fig. 9(a)의 입자보다 더욱 큰 입자가 뭉쳐있는 현상을 볼 수 있다.

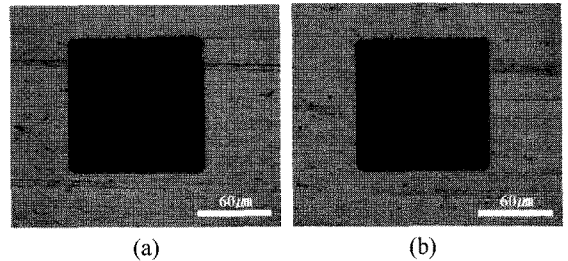


Fig. 7 Microscope image of surface ablation of 1.3mW laser peak power on the Ti-alloy (a) overlap ratio : 99% (b) overlap ratio : 90%

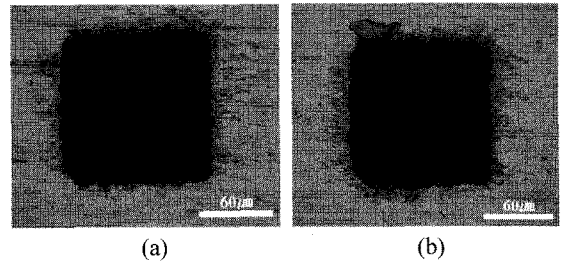


Fig. 8 Microscope image of surface ablation of 24.6mW laser peak power on the Ti-alloy (a) overlap ratio : 99% (b) overlap ratio : 90%

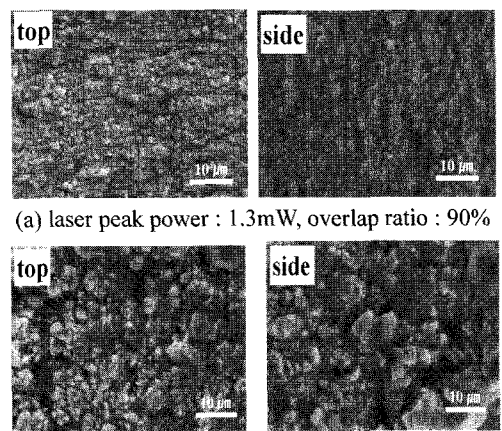


Fig. 9 SEM image of ablated surface on Ti-alloy (a) laser peak power : 1.3mW, overlap ratio : 90% (b) laser peak power : 86.5mW, overlap ratio : 90%

위 결과를 정리하면 티타늄 합금의 펄초 레이저를 이용한 표면 어블레이션 가공은 낮은 출력 범위, 즉 광학 침투 영역에서 가공을 하여야 하며 그 이상의 출력 범위에서 가공을 하게 되면 티타늄 합금의 집적 에너지 반응 특성으로 인한 열 영향이 발생하고 우수한 가공 품질을 얻기 어렵다.

티타늄 합금의 마이크로 홀 가공은 1.3mW의 레이저 빔 출력, 4 μm의 빔간 간격, 15 layer로 고정하고 중첩율을 변화하여 실험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)는 중첩율 90%일 때의 가공 현상으로 티타늄 합금의 표면 손상은 없지만 타원형의 형상을 나타내었다. 그러나 Fig. 10(b)는 중첩율 99%로 원형의 형상을 유지할 수 있었다.

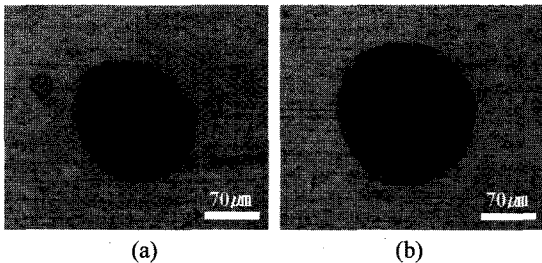


Fig. 10 Microscope image of micro hole ablation of 1.3mW laser peak power in Ti-alloy (a) overlap ratio : 90% (b) overlap ratio : 99%

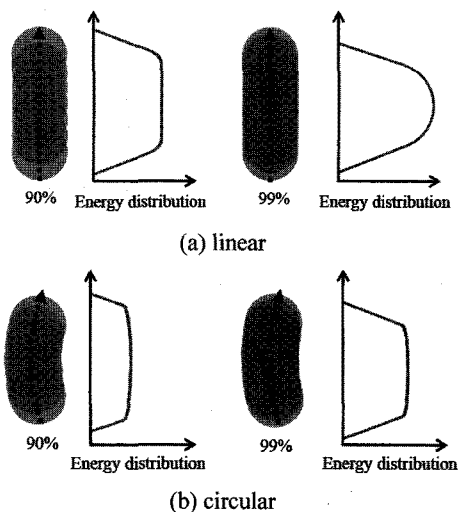


Fig. 11 Energy distribution image according to the processing type (a) linear (b) circular

결과적으로 표면 손상은 레이저 빔의 출력에 따른 재료의 흡수 능력에 따라 결정되며, 가공 형

상은 중첩율과 관련이 있는 것으로 판단된다. 선형 가공의 경우, 중첩율이 높게 되면 레이저 빔에 의한 집적 에너지가 과다 중첩되어 어블레이션이 증가하는 경향을 나타내기 때문에 선형 가공은 중첩율을 낮추어 가공을 하여야 하고 원형 가공의 경우는 원형 형상으로 인하여 집적 에너지가 원형의 바깥부분으로 분산되어 낮은 중첩율의 경우 원형 가공 형상의 유지가 어렵게 되는 것이다. 따라서 선형 가공은 중첩율을 낮게 설정하여야 하고 원형 가공은 높은 중첩율을 사용하여야 한다(Fig. 11).

5. 결론

펄초 레이저의 펄스 중첩율을 변화하여 티타늄 합금의 표면에 선형 어블레이션을 수행하여 어블레이션의 깊이 변화를 파악하였다. 어블레이션의 깊이 변화는 펄스 중첩율을 적용하여도 기존의 연구와 같이 비선형 변화 구간이 형성되지만 펄스 중첩율이 증가할수록 선형 형상을 나타내는 경향이 발생하였다. 중첩율 변화에 대한 어블레이션 특성을 이용하여 형상 가공을 정사각형과 원형 가공을 하였고 1.3mW의 레이저 출력에서 시편의 가공 표면에 손상이 발생하지 않는 결과를 얻었다. 정사각형의 가공에서는 펄스 중첩율을 90%, 마이크로 홀 가공에서는 펄스 중첩율을 99%로 설정하였을 때 최적의 가공 형상을 얻을 수 있었고, 가공 형상에 따라 적용하여야 할 펄스 중첩율을 파악할 수 있었다. 이상의 결과로 펄초 레이저를 이용하여 단순한 하나의 형상 가공뿐 아니라 복합 형상 가공에도 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 인하대학교의 지원에 의해서 이루어졌으며, 이 연구를 위해 도움을 주신 광주과학기술원 고등광기술연구소 손익부 박사님, 노영철 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Brunette, D. M., Tengvall, P., Textor, M. and Thomsen, P., "Titanium in medicine: material science, surface science, engineering, Biological Responses and Medical Applications," Springer, 2001.

2. Liu, X., Chu, P. K. and Ding, C., "Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications," *Materials Science and Engineering*, Vol. 47, No. 3-4, pp. 49-121, 2004.
3. Shin, Y. J., Kim, D. W., Lee, E. S. and Kim, K. W., "The Development of Polishing System a Magnetorheological Fluids," *Journal of the Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 21, No. 7, pp. 46-52, 2004.
4. Singh, R. and Khamba, J. S., "Comparison of slurry effect on machining characteristics of titanium in ultrasonic drilling," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 197, No. 1-3, pp. 200-205, 2008.
5. Venkatakrishnan, K., Tan, B. and Sivakumar, N. R., "Sub-micron ablation of metallic thin film by femtosecond pulse laser," *Optics & Laser Technology*, Vol. 34, No. 7, pp. 575-578, 2002.
6. Huang, H., Zheng, H. Y. and Lim, G. C., "Femtosecond laser machining characteristics of Nitinol," *Applied Surface Science*, Vol. 228, No. 1-4, pp. 201-206, 2004.
7. Semerok, A., Chaleard, C., Detalle, V., Lacour, J. L., Mauchien, P., Meynadier, P., Nouvellon, C., Salle, B., Palianov, P., Perdrix, M. and Petite, G., "Experimental investigations of laser ablation efficiency of pure metals with femto, pico and nanosecond pulses," *Applied Surface Science*, Vol. 138, No. 1, pp. 311-314, 1999.
8. Chung, I. Y., Kang, K. H., Kim, J. D., Sohn, I. B., Noh, Y. C. and Lee, J. M., "Characteristics of the Femto-second Pulsed Laser Ablation according to Feed Velocity on the Invar Alloy," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 3, pp. 25-31, 2009.
9. Oliveira, V., Ausset, S. and Vilar, R., "Surface micro/nanostructuring of titanium under stationary and non-stationary femtosecond laser irradiation," *Applied Surface Science*, Vol. 255, No. 17, pp. 7556-7560, 2009.
10. Vorobyev, A. Y. and Guo, C., "Femtosecond laser structuring of titanium implants," *Applied Surface Science*, Vol. 253, No. 17, pp. 7272-7280, 2007.
11. Masahiro, T., Keita, A., Hitoshi, N., Masaki, H., Masahito, K., Nobuyuki, A. and Masayuki, F., "Periodic microstructures produced by femtosecond laser irradiation on titanium plate," *Vacuum*, Vol. 80, No. 11-12, pp. 1346-1350, 2006.
12. Momma, C., Nolte, S., Chichkov, B. N., Alvensleben, F. V. and Tunnermann, A., "Precise laser ablation with ultrashort pulses," *Applied Surface Science*, Vol. 109-110, pp. 15-19, 1997.
13. Nolte, S., Momma, C., Jacobs, H., Tunnermann, A., Chichkov, B. N., Wellegehausen, B. and Welling, H., "Ablation of metals by ultrashort laser pulses," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 14, No. 10, pp. 2716-2722, 1997.
14. Preuss, S., Demchuk, A. and Stuke, M., "Sub-picosecond UV laser ablation of metals," *Appl. Phys. A*, Vol. 61, No. 1, pp. 33-37, 1995.
15. Chichkov, B. N., Momma, C., Nolte, S., von Alvensleben, F. and Tunnermann, A., "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids," *Appl. Phys. A*, Vol. 63, No. 2, pp. 109-115, 1996.
16. Chung, I. Y., Kang, K. H. and Kim, J. D., "Ablation Drilling of Invar Alloy Using Ultrashort Pulsed Laser," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 2, pp. 11-16, 2009.