

## 펄스 레이저 조사 후 알루미늄 합금의 표면상태에 대한 표면 거칠기의 영향<sup>§</sup>

최성호\* · 김정석\*† · 장경영\*\* · 신완순\*\*\*

\* 한양대학교 자동차공학과, \*\* 한양대학교 기계공학부, \*\*\* 국방과학연구소

### Influence of Surface Roughness on Morphology of Aluminum Alloy After Pulsed-Laser Irradiation

Sungho Choi\*, Chungseok Kim\*†, Kyung-Young Jhang\*\* and Wan-Soon Shin\*\*\*

\* School of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,

\*\* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

\*\*\* Agency for Defense Development

(Received April 18, 2011 ; Revised July 12, 2011 ; Accepted July 13, 2011)

**Key Words** : Pulsed-Laser(펄스 레이저), Average Surface Roughness(평균 표면 거칠기), Diameter of Melted Zone(용융부 지름), Absorptance(흡수율)

**초록**: 본 연구의 목적은 Nd:YAG 펄스레이저 조사 후 알루미늄 합금 6061-T6 시편의 표면상태에 대한 표면 거칠기의 영향을 연구하는 것이다. 초기 표면 거칠기를 다르게 하기 위해 다아이몬드 입자(1 μm)와 연마지(#100, #220, #600, #2400)를 이용하여 표면을 가공하였다. 10 번의 펄스레이저를 조사한 후 주사전자현미경과 광학현미경 그리고 원자현미경을 이용하여 표면상태를 관찰하였다. 그 결과 표면 거칠기가 증가할수록 용융부의 지름이 증가하였는데, 이는 표면 거칠기에 따라 표면부에서 레이저 빔의 다중반사와 다중흡수가 일어나 레이저 빔의 흡수율이 변하기 때문이다. 이를 검증하기 위해 용융부의 지름으로부터 표면 거칠기에 의해 증가하는 상대적인 흡수율을 계산하였으며 평균 표면 거칠기가 증가함에 따라 상대적인 흡수율이 용융부의 지름과 유사한 형태로 증가하는 것을 보였다.

**Abstract**: The objective of this study is to investigate the influence of surface roughness on the morphology of aluminum 6061-T6 alloy after irradiation with a Nd:YAG pulsed laser. The test specimen was prepared by a polishing process using a diamond paste (1 μm) and emery polishing papers (#100, #220, #600, #2400) to obtain different initial surface roughness. After irradiation with ten pulsed-laser shots, the surface morphology was examined by using scanning electron microscopy (SEM), optical microscopy (OM), and atomic force microscopy (AFM). The diameter of the melted zone increased with the surface roughness because the multiple reflections and absorption of the laser beam occurred on the surface because of the surface roughness, so that the absorptance of the laser beam changed. This result was verified using the relative absorptance calculated from the diameter of the melted zone with the surface roughness and the diameter increased with the average surface roughness.

### 1. 서론

다양한 파장을 갖는 간섭성의 레이저 빔이 재료에 입사하면, 재료의 특성과 입사 빔의 파장에 의

존하는 다양한 경로로 에너지의 일부가 재료에 흡수되며 나머지는 표면으로부터 산란되거나 반사된다. 특히 금속과 같이 투과에너지를 무시할 수 있는 경우에는 입사된 레이저 빔 중에서 반사된 부분을 제외하고는 재료 내에 흡수된다고 할 수 있다. 입사된 레이저 빔의 강도가 크면 에너지 흡수를 증진시키는 여러 가지 기구가 동시에 발생함으로써 재료에서 레이저 빔의 흡수율은 더욱 증가하게 된다. 이러한 레이저와 재료간의 상호작용은 첨단기술인 레이저가공 기술로 이

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2011. 4. 21.-22., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, chs2865@gmail.com

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

용되고 있으며 현재 항공산업, 국방산업, 자동차산업, 기계산업, 재료산업 등에 널리 응용되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 특히 펄스 레이저 기술은 레이저와 재료간의 상호작용에 의해 발생하는 열이 주변 분자들로 전달되는 시간에 비해 상대적으로 짧은 레이저 펄스 기간을 가지고 있기 때문에 매우 작은 열영향부를 발생시킬 수 있는 특징을 가지고 있다.<sup>(4,5)</sup>

펄스 레이저와 물질간의 상호작용에 있어 중요한 요소로 레이저 소스 변수인 레이저 파장, 펄스 에너지, 펄스 지속시간, 펄스 반복률과 대상 재료에 의한 변수인 레이저 파장에 대한 흡수율과 흡수계수, 열용량, 열전도도, 밀도 등이 있으며 이러한 변수들에 대한 레이저 가공에 관한 연구가 활발히 되고 있다.<sup>(6,7)</sup>

펄스레이저가 재료의 표면에 조사되었을 때, 레이저 빔의 짧은 펄스 지속시간에 의해 표면부의 온도가 용융점 이상 상승하게 되면 표면부에서 국부적인 용융과 응고가 일어나게 된다. 이러한 특성을 이용한 기존의 연구로 Perry<sup>(8)</sup>는 레이저 강도가  $1.14 \pm 0.07 \text{ J/cm}^2$  인 Nd:YAG 펄스레이저를 평균 표면 거칠기가  $0.206 \mu\text{m}$  인 Ti6Al4V 재료에 조사하였으며 표면부에서 국부적인 용융과 응고로 인해 평균 표면 거칠기가  $0.07 \mu\text{m}$  까지 감소되는 결과를 보고한 바 있다.

레이저와 물질간의 상호작용에 있어 흡수율은 재료의 물성과 관련이 있지만 표면 상태에 따라서도 민감하게 영향을 받는다. 재료의 표면상태가 거칠게 되면 조사된 레이저 빔은 Fig. 1 과 같이 다양한 경로로 다중반사와 다중흡수가 일어나 흡수율이 더욱 증가하게 되어 해석적인 결과와 다른 실험결과를 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup> 그러나 표면이 매끄러운 재료에서의 상태변화는 활발히 연구가 되고 있는 반면에 표면 거칠기가 존재하는 재료에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 레이저 조사 후 재료의 표면 상태에 대한 표면 거칠기의 영향을 분석하기 위해 먼저 다이아몬드 입자( $1 \mu\text{m}$ )와 연마지(#100, #220, #600, #2400)로 표면을 기계 가공하여 표면 거칠기를 다르게 한 후 원자현미경을 이용하여 평균 표면 거칠기를 측정하였다. 표면 거칠기를 다르게 한 시편에 10 번의 펄스레이저를 조사한 후 주사 전자현미경( $\times 20$ ,  $\times 1000$ ), 광학현미경( $\times 150$ )과 원자현미경을 이용하여 평균 표면 거칠기에 따른 재료 표면상태를 관찰하였다. 또한 측정된 용융부의 지름으로부터 표면 거칠기에 따른 상대적인 흡수율 변화를 계산하였다.

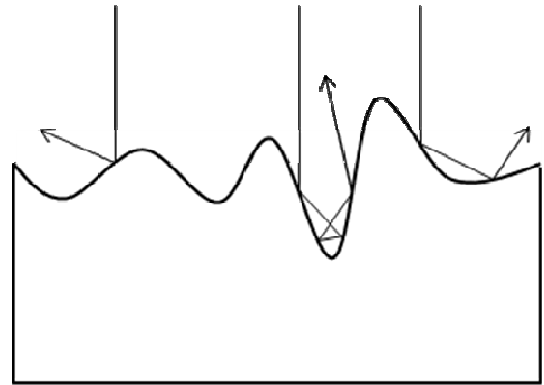


Fig. 1 The mechanism of multiple reflection and absorption

## 2. 이론적 배경

### 2.1 레이저 빔의 다중반사와 다중흡수

레이저 빔을 재료에 조사시키면 입사된 빔은 식 (1)과 같이 세 부분으로 나뉘어서 일부는 재료상에서 반사되고, 일부는 투과되고, 나머지는 흡수된다.

$$E_I = E_R + E_T + E_A \quad (1)$$

여기서  $E_I$ 는 입사 에너지로  $E_R$ ,  $E_T$ ,  $E_A$ 는 각각 반사에너지, 투과에너지, 흡수에너지이다. 재료가 금속인 경우에는 레이저 빔이 투과되지 못하므로 투과에너지는 0이 되고, 대부분의 빔 성분이 반사되고 나머지가 흡수된다.

레이저 빔이 재료에 흡수되는 과정에서 재료의 표면상태는 매우 중요한 영향을 미친다. 재료의 표면상태가 잘 연마되어 평탄함을 유지하면 레이저 빔이 조사될 때 표면에서 한번의 흡수와 반사가 일어난다. 그러나 표면이 거칠어 Fig. 1과 같이 레이저 파장 이상의 폭과 깊이의 요철이 있는 경우에는 다중반사와 다중흡수가 일어나며, 그 흡수되는 에너지는 식 (2)와 같이 증가하게 된다.

$$E_A = E_I(1-R) \sum_n R^{n-1} = E_I A_{R_n} \quad (2)$$

여기서  $R$ 은 재료의 레이저 빔 반사율,  $n$ 은 다중반사의 차수,  $A_{R_n}$ 는 재료의 표면 거칠기를 고려한 흡수율이다.

2.2 재료에 흡수되는 에너지 밀도 분포

레이저 빔의 공간적인 에너지분포는 중심으로부터 원주방향으로 Gaussian 분포를 가지고 있으며 이 때 재료에 흡수되는 에너지밀도는 식 (3)과 같다.<sup>(10)</sup>

$$I(r) = I_0 A \exp\left\{-2\left(\frac{r}{w}\right)^2\right\} \quad (3)$$

여기서  $I_0$  는 레이저 빔의 최대 에너지밀도,  $A$  는 레이저 빔의 흡수율,  $r$  은 빔의 중심으로부터 원주 방향의 거리,  $w$  는 유효 빔 반경(출력강도가  $e^{-2}$  으로 감소하는 거리)이다.

이러한 레이저 빔의 공간적인 분포에 의해 표면 상태가 잘 연마되어 평탄함을 유지하고 있는 재료에 레이저 빔이 조사되면 흡수되는 에너지 밀도분포는 Fig. 2의 실선과 같은 형태를 가지게 된다.

여기서  $I_{melting}$  와  $D_{melting}$  은 각각 용융이 일어나는 에너지 임계밀도와 용융이 일어나는 영역의 지름이다.

흡수되는 에너지 밀도가  $I_{melting}$  보다 큰 영역에서는 용융이 일어나게 되고 표면의 상태가 급격히 변하게 된다. 만일 표면의 거칠기에 의해 레이저 빔의 다중반사와 다중흡수가 일어나 흡수율이 증가하게 되면 더 많은 레이저 빔을 흡수하게 되고 Fig. 2의 점선과 같은 형태를 가지게 된다. 따라서 흡수율이 증가함에 따라 용융부의 지름은  $D'_{melting}$  으로 증가하게 된다.

2.3 표면 거칠기를 고려한 상대적인 흡수율

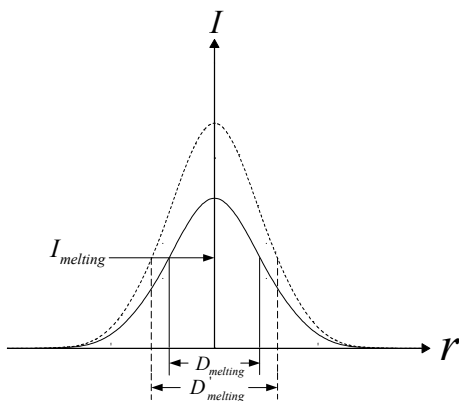
레이저 빔은 표면 상태에 따라 흡수율이 달라지게 된다. 이를 고려하여 식 (3)으로부터 용융부의 반지름을 이용하여 표면 거칠기를 고려한 흡수율 ( $A_{R_a}$ )를 계산해 보면 식 (4)와 같다.<sup>(11)</sup>

$$A_{R_a} = \frac{I_{melting}}{I_0} \exp\left\{2\left(\frac{r_{melting}}{w}\right)^2\right\} \quad (4)$$

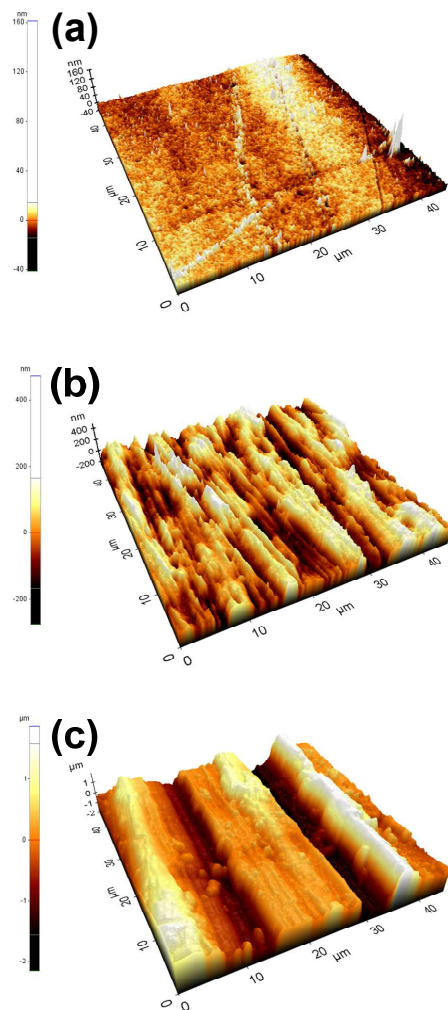
여기서  $r_{melting}$  은 용융이 일어나는 영역의 빔의 중심으로부터 원주방향의 거리이다.

**Table 1** The average surface roughness of specimen processing surface

	Diamond (1 μm)	#2400	#600	#220	#100
평균 표면 거칠기( $R_a$ ) [nm]	7	70	300	350	600



**Fig. 2** The energy distribution on surface by laser irradiation



**Fig. 3** The AFM image of the specimen processing surface: (a)using the diamond paste(1 μm), (b)using the emery polishing paper #2400, (c)using the emery polishing paper #100

$I_{melting}$  와  $I_0$  는 재료의 물성과 레이저 소스에 의한 변수로 일정하게 고정시키면 표면 거칠기를 고려한 상대적인 흡수율( $A'_{Ra}$ )는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$A'_{Ra} = \exp\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{D_{melting}}{w}\right)^2\right\} \quad (5)$$

### 3. 실험 방법

실험에 사용된 레이저는 Nd:YAG 펄스레이저로, 펄스지속시간은 5 ns 이며 펄스에너지는 충분한 순간용융이 발생하도록 133 mJ, 반복률은 반복펄스에 의한 영향을 받지 않도록 1 Hz 로 하였다. 알루미늄 6061-T6 시편은 다이아몬드 입자(1 μm)와 연마지(#100, #220, #600, #2400)을 이용하여 기계 연마하였다. 원자현미경을 이용하여 표면 상태를 측정하였으며 측정 이미지는 Fig. 3 과 같고 평균 표면 거칠기 측정결과는 Table 1 과 같다.

### 4. 실험 결과

Fig. 4(a)는 평균 표면 거칠기가 7 nm 인 시험편에 10 번의 펄스레이저가 조사 되었을 때 표면부의 주사전자현미경(×20) 측정 이미지로, 시편의 가장자리 영역의 기지부(Base zone)는 표면상태 변화가 없고 용융영역의 중심부(Melted zone) 그리고 용융영역의 가장 자리(Heat affected zone) 표면부에서 레이저 조사에 의한 표면 상태 변화가 일어남을 확인 할 수 있다. Fig. 4(b)는 평균 표면 거칠기가 600 nm 인 시험편에 10 번의 펄스레이저가 조사 되었을 때 주사전자현미경(×20) 측정 이미지로, 용융영역과 열영향부 영역이 더 증가함을 확인 할 수 있다. 이는 표면 거칠기가 존재하면 입사한 레이저 빔이 다양한 경로로 다중반사와 다중흡수가 일어나 더 많은 레이저 빔을 흡수하기 때문이다.

용융부의 지름을 측정함에 있어 광학현미경(×25, ×150)을 이용하였으며, Fig. 5 는 평균 표면 거칠기가 7 nm 인 재료에 10 번의 펄스레이저가 조사된 시험편의 측정 이미지로 용융이 일어난 부분과 열영향부의 경계를 명확히 확인할 수 있다. 표면 거칠기에 따른 용융영역의 지름을 정량적으로 비교하기 위해 용융영역의 면적을 이용하여 유효지름으로 측정하였으며 측정결과는 Fig. 6 과 같다.

평균 표면 거칠기가 7 nm 로 표면상태가 잘 연마되어 평탄함을 유지하고 있는 재료에서는 용융영역의

지름이 1.84 mm 였지만 평균 표면 거칠기가 70 nm 로 증가함에 따라 용융영역의 지름은 2.08 mm 로 약 13 %까지 증가하였다. 평균 표면 거칠기가 더욱 증가하여 300 nm 일 때에는 용융부의 지름이 2.25 mm 로 약 22 % 증가하고 평균 표면 거칠기가 600 nm 일 때에는 2.63 mm 로 43 %까지 증가하였다.

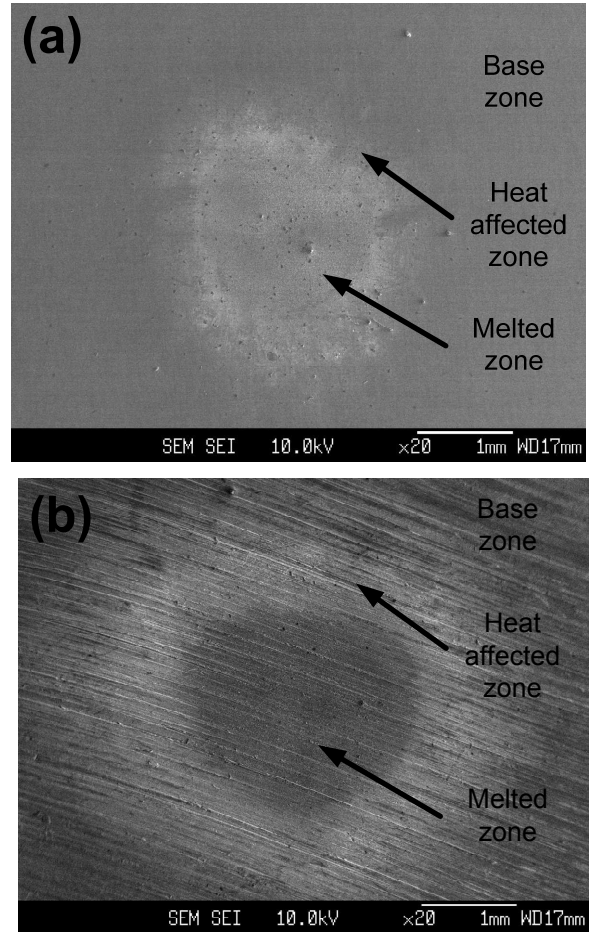


Fig. 4 The SEM(×20) image on surface according to the average surface roughness: (a) 7 nm, (b) 600 nm

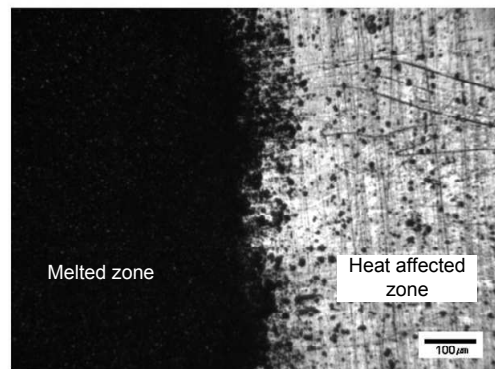


Fig. 5 The OM(×150) image of the boundary of the specimen in which the average surface roughness is 7 nm

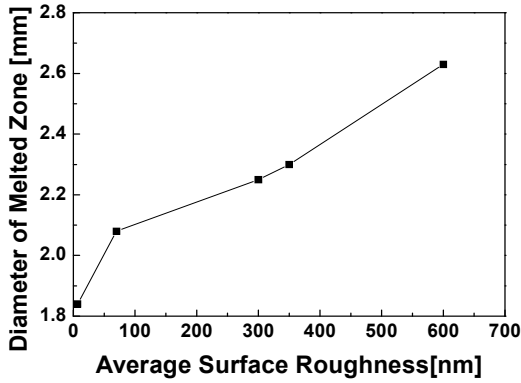


Fig. 6 The diameter of melted zone according to the average surface roughness (pulse energy 133 mJ, pulse duration 5 ns and diameter of laser beam 5 mm)

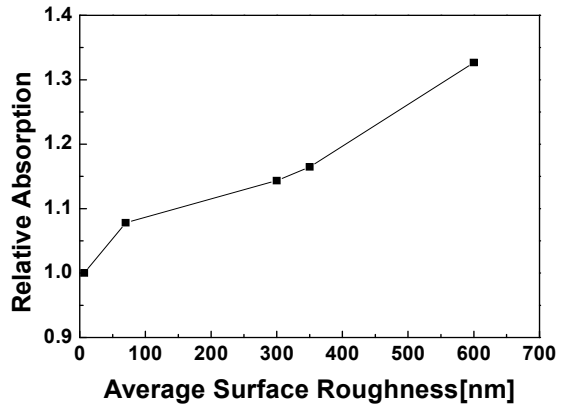


Fig. 9 The relative absorptance according to the average surface roughness

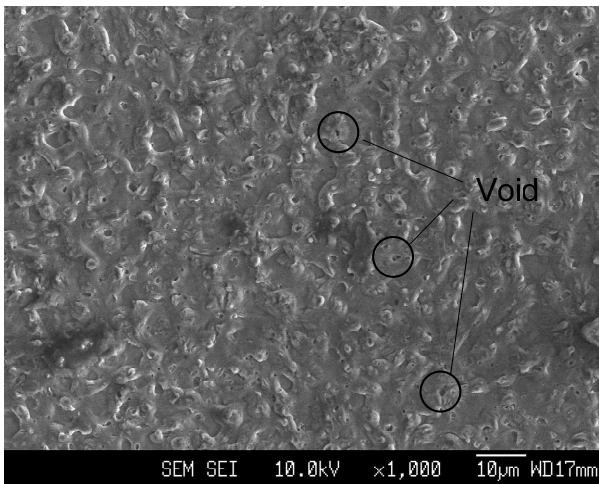


Fig. 7 The SEM( $\times 1000$ ) image on surface in which the average surface roughness is 350 nm

용융 영역의 중심부 표면을 보다 자세하게 관찰하기 위해서 주사전자현미경( $\times 1000$ )을 이용하여 관찰하였으며 그 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 레이저 조사로 인해 표면부에서 급격히 온도가 증가하여 국부적으로 용융과 응고가 진행된 것으로 판단된다. 또한 표면으로 열린 보이드들이 증가하는 것을 명확히 관찰할 수 있는데, 이는 레이저 조사에 의해서 표면이 용융 후 응고되는 과정에서 표면이 평탄화 되며 또한, 용융된 알루미늄 합금이 수축하면서 액상에 녹아있던 기체들이 외부로 분출되는 현상에 기인하는 것으로 판단된다.<sup>(9)</sup>

Fig. 8은 평균 표면 거칠기가 7 nm인 시편의 레이저 조사 후 표면부의 원자현미경 측정 이미지이다. 표면부에서 국부적으로 용융과 응고가 일어나 평균 표면 거칠기는 43 nm로 오히려 증가하였다. 이는 앞서 인용한 Bonelli<sup>(9)</sup>의 연구 결과와 일치한다.

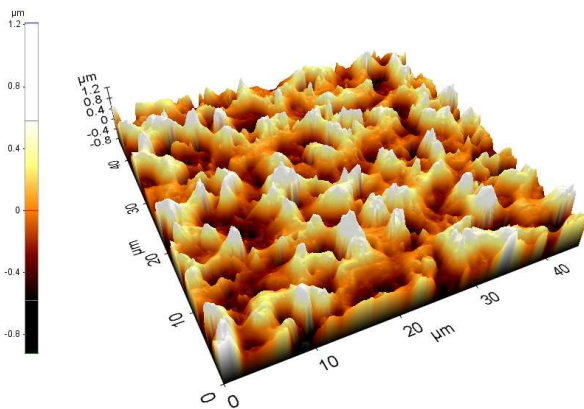


Fig. 8 The AFM image on the surface of the specimen in which the average surface roughness is 7 nm

그러나 평균 표면 거칠기가 70 nm인 시험편은 레이저 조사 후 평균 표면 거칠기가 63 nm로 약간 감소하였고 평균 표면 거칠기가 각각 300 nm, 350 nm인 경우에는 레이저 조사 후 평균 표면 거칠기가 187 nm, 118 nm로 크게 감소하였다. 이는 표면을 평탄화하는 경향이 있는 액상층에 의한 연마효과에 기인한다.<sup>(8)</sup> 한편 평균 표면 거칠기가 600 nm인 시험편의 경우에는 평균 표면 거칠기가 636 nm로 약간 증가하였는데 이는 연마지(#100)를 이용하였을 경우에 연마지의 특성상 요철의 깊이 방향 뿐만 아니라 폭 방향의 길이 또한 길어지게 되고 이러한 요철 폭의 증가로 인해 평탄화하는 경향이 있는 액상층에 의한 연마 효과가 미비한 것으로 판단된다.

다음으로 실험적으로 측정된 용융부의 지름으로

부터 평균 표면 거칠기에 따른 상대적인 흡수율의 변화를 식 (5)를 이용하여 계산하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다. 평균 표면 거칠기가 7 nm인 경우를 기준으로 상대적인 흡수율 변화를 계산하였으며 평균 표면 거칠기가 증가함에 따라 상대적인 흡수율 또한 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 평균 표면 거칠기가 70 nm인 경우에 상대적인 흡수율은 1.078로 약 8% 증가하였고 600 nm인 경우에는 1.326으로 약 33%까지 증가하였다. 이는 평균 표면 거칠기가 증가할수록 다중반사와 다중흡수가 더욱 많이 일어나 상대적으로 흡수율이 증가한다는 것을 검증하는 결과이며, 동시에 표면 거칠기의 증가에 따라 용융지름이 증가하는 것을 흡수율의 증가 때문으로 설명할 수 있는 결과이기도 하다.

## 5. 결론

레이저 조사 시 재료의 표면상태가 거칠면 표면에서 다양한 경로로 다중반사와 다중흡수가 일어나 레이저 빔의 흡수율이 증가한다. 이를 검증하기 위해 평균 표면 거칠기를 다르게 하여 실험한 결과 평균 표면 거칠기가 600 nm인 시험편의 경우에는 평균 표면 거칠기가 7 nm인 시험편에 비해 용융부의 지름이 43% 증가하였으며 평균 표면 거칠기가 증가할수록 용융부의 지름이 증가하였다.

또한 레이저 조사 전·후의 표면부의 평균 표면 거칠기 변화를 원자현미경을 이용하여 측정하였으며 레이저 조사전의 평균 표면 거칠기가 7 nm인 경우에는 표면부에서의 국부적인 용융과 응고로 인해 평균 표면 거칠기가 43 nm로 증가하였지만 300 nm, 350 nm인 시험편은 용융으로 인한 연마효과에 의해 평균 표면 거칠기가 각각 187 nm, 118 nm로 감소하였다.

실험적으로 측정된 용융부의 지름을 이용하여 상대적인 흡수율을 계산하였으며 평균 표면 거칠기가 600 nm인 시험편의 경우에는 7 nm인 시험편에 비해 상대적인 흡수율이 약 33% 증가하였으며 평균 표면 거칠기가 증가할수록 상대적인 흡수율이 증가하였다.

결론적으로 반복적인 펄스 레이저가 알루미늄 합금의 표면에 조사될 때 표면 거칠기에 따른 용융부의 지름과 상대적인 흡수율의 변화를 실험적으로 확인할 수 있었으며 이러한 표면 거칠기의 영향을 고려한 해석적인 연구가 필요할 것으로 판

단된다.

## 후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음 (계약번호 UD090090GD)

## 참고문헌

- (1) Cui, C. Y., Cui, X. G., Zhang, Y. K., Luo, K. Y., Zhao, Q., Hu, J. D., Liu, Z. and Wang, Y. M., 2010, "Microstructure and Microhardness Analysis of the Hexagonal Oxides formed on the Surface of the AISI 304 Stainless Steel after Nd:YAG Pulsed Laser Surface Melting," *Applied Surface Science*, Vol. 256, pp. 6782~6786.
- (2) Chang, C. C., Chou, C. P., Hsu, S. N., Hsiung G. Y., and Chen, J. R., 2010, "Effect of Laser Welding on Properties of Dissimilar Joint of Al-Mg-Si and Al-Mn Aluminum Alloys," *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 26, No. 3, pp.276~282.
- (3) Son, Y. M., Jang, J. H., Joo, B. D., Yim, H. S. and Moon, Y. H., 2009, "Characterization of Direct Laser Metal Forming Technology for the Restoration of Mold Surface," *Trans. of the KSME A*, Vol. 33, No. 7, pp. 681~686.
- (4) Cho, S. H., Park, J. K., Kim, J. G., Chang, W. S., Choi, D. S. and Whang, K. H., 2010, "Ultra-precision Machining using a Femtosecond Laser," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 6, pp. 17~23.
- (5) Kim, K. W., Lee, J. H., Suh, J. and Cho, H. Y., 2007, "Finite Element Analysis for Prediction of Band Shape of Nd:YAG Laser Fillet Welding," *Trans. of the KSME A*, Vol. 31, No. 8, pp. 839~846.
- (6) Lim, H. T., Lee, M. H., Kim, P. K., Park, J. B. and Jeong, S. H., 2009, "Enhancement of Surface Hardness of Stainless Steel by Laser Peening," *Journal of KSLP*, Vol. 12, No. 3, pp. 18~22.
- (7) Nam, G. J., K Kim, W., Hong, J. U., Lee, J. H., Suh, J. and Cho, H. Y., 2006, "Finite Element Analysis of Nd:YAG Pulse Laser Welding for AISI 304 Stainless Steel Plate," *Trans. of the KSME A*, Vol. 30, No. 4, pp. 428~434.
- (8) Perry, T. L., Werschmoeller, D., Li, X., Pfefferkorn, F. E. and Duffie, N. A., 2009, "Pulsed Laser Polishing of Micro-milled Ti6Al4V Samples," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 11, pp. 74~81.
- (9) Bergström, D., Powell, J. and Kaplan, A. F. H., 2007, "The Absorptance of Steels to Nd:YLF and Nd:YAG

- Laser Light at Room Temperature," *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 5017~5028.
- (10) Kruapech, S. and Widjaja, J., 2010, "Laser Range Finder using Gaussian Beam Range Equation," *Optics & Laser Technology*, Vol. 42, pp. 749~754.
- (11) Mannion, P. T., Magee, J., Coyne, E., O'Connor, G. M. and Glynn, T. J., 2004, "The Effect of Damage Accumulation Behaviour on Ablation Thresholds and Damage Morphology in Ultrafast Laser Micro-machining of Common Metals in Air," *Applied Surface Science*, Vol. 233, pp. 275~287.
- (12) Bonelli, M., Miotello, A. and Mosaner, P., 2002, "Morphological Changes Induced on Aluminum Surfaces by Excimer Laser Irradiation," *Applied Surface Science*, Vol. 186, pp. 211~215.