

펄초 레이저의 이송속도에 따른 Invar 합금의 어블레이션 특성

Characteristics of the Femto-second Pulsed Laser Ablation according to Feed Velocity on the Invar Alloy

정일영¹, 강경호¹, 김재도^{2,✉}, 손익부³, 노영철³, 이종민³
Il Young Chung¹, Kyung Ho Kang¹, Jae Do Kim^{2,✉}, Ik Bu Sohn³, Young Chul Noh³ and Jong Min Lee³

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

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

3 광주과학기술원 고등광기술연구소 (Advanced Photonics Research Institute, GIST)

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

Manuscript received: 2008.9.5 / Revised: 2008.11.5 / Accepted: 2008.12.10

Femto-second laser ablation with the various feed velocities of the Invar alloy and the micro surface milling for the processing condition were studied. We used a regenerative amplified Ti:sapphire laser with a 1kHz repetition rate, 184fs pulse duration time and 785nm wavelength. Femto-second laser pulse was irradiated on the Invar alloy with the air blowing at the condition of various laser peak powers and feed velocities. An ablation characteristic according to feed velocity of the Invar alloy was appeared as the non-linear type at different zone of energy fluence. The micro surface milling of the Invar alloy using a mapping method was investigated. The optimal condition of micro surface milling was laser peak power of 22.8mW, feed velocity of 1mm/s, beam gap of 1 μm. With the optimal processing condition, the fine rectangular shape without burr and thermal damage was achieved. Using the femto-second laser system, it demonstrates excellent tool for micro surface milling of the Invar alloy without heat effects and poor edge.

Key Words: Femto-second Laser (펄초 레이저), Ablation (어블레이션), Invar Alloy (인바 합금), Feed Velocity (이송 속도), Surface Milling (표면 평면 가공), Mapping Method (바둑판 배열 이송 방식)

1. 서론

펄초 레이저(Femto-second laser)는 산업현장에서 사용되고 있는 가공용 펄스형 레이저보다 극도로 짧은 10^{-15} 초의 펄스로 발전하는 레이저로서 열 확산의 길이가 나노초 펄스(Nano-second pulse)에 비하여 매우 짧고 플라즈마나 유동장의 형성 전에 어블레이션(Ablation)이 일어나므로 열영향부 생성과 유체역학적 효과로 인한 가공정밀도 저하를 크

게 줄일 수 있다. 또한 펄초 단위의 펄스는 집속면의 출력밀도를 10^{15}W/cm^2 수준까지 증가할 수 있기 때문에 알루미늄 박판, 구리 박판, 니티놀(Nitinol)등과 같은 여러 필름 형태의 재료 가공에 대하여 우수한 가공 특성을 나타내고 있다.¹⁻³

Invar 합금(Invariable alloy)은 36%의 Ni 을 함유한 Fe-Ni 계 합금을 말한다. 이 Invar 합금은 $1.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 미만의 낮은 열팽창계수와 극저온($\leq -163^\circ\text{C}$)에서 강도, 충격인성, 가공성이 우수한 특성

을 나타내고 있다.⁴ 일반적으로 Bi-metal, LNG 저장 탱크, OLED(Organic light emitting diode)와 같은 Display 장치의 섀도우 마스크(Shadow mask)에 범용적으로 사용되고 있다.^{5,6} 이러한 Invar 합금의 가공은 박판 재료로 많이 사용되기 때문에 화학적 에칭이나 Nd:YAG 와 같은 펄스 지속 시간(Pulse duration time)이 나노초인 레이저를 이용한 가공이 주로 사용된다. 그러나 이중 나노초 레이저를 이용하여 가공을 수행하면 버(burr)의 발생으로 인하여 EP(Electro polishing)과 같은 후가공 공정을 거쳐야만 하는 문제점이 발생한다.⁷

펨토초 레이저의 어블레이션(Ablation) 가공 방법은 지속적으로 연구되어 오고 있다. 그러나 대부분의 연구가 1 개의 펄스당 재료의 어블레이션 가공 정도를 파악하는 형식으로 되어 있다.⁸⁻¹⁰ 이는 일반적인 범용 가공에서는 재료나 레이저 빔의 이송속도라는 변수가 추가되어야 실제 가공에 적용 가능 하지만 1 개의 펄스에 대한 어블레이션은 적용하기가 어려운 실정이다. 본 연구에서는 Invar 합금의 가공 정도를 향상시키기 위하여 펨토초 레이저의 어블레이션 가공방법에 이송속도의 변수를 추가한 어블레이션의 특성을 파악하고, 이를 이용하여 표면 가공성을 연구하고자 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 자유 전자는 에너지를 보유하게 되고 Fig. 1 에서 보

는 바와 같이 자유전자가 금속의 표면에 접촉을 하게 되면 전자의 열에너지에 의하여 열적 확산 작용이 발생되며 에너지를 전달하게 된다. 열적 확산 작용에 의하여 발생된 전자 형태의 에너지는 재료의 표면에서 격자 형태로 변화되는 과정을 거치게 된다. 이 격자 형태는 재료 표면에서 에너지의 방출과 함께 제거되는 과정으로 이루어진다. 이러한 과정을 펨토초 레이저의 어블레이션이라 한다. 이러한 어블레이션 과정은 매우 빠르게 발생되고, 전자에서 격자 구조 시스템으로 변환되는 과정은 이들이 보유하고 있는 열적 특성으로 인하여 어블레이션이 발생된다고 할 수 있다.¹¹

2.2 펨토초 레이저의 어블레이션 가공 특성

금속 재료에 짧은 파장의 레이저에 의하여 상호 작용을 발생할 때의 현상은 유체역학적 운동으로 판단할 수 있으나 어블레이션이 이루어지는 시간이 피코초(Pico-second)의 단위로 빠른 시간에 발생하기 때문에 이는 무시할 수 있다. 어블레이션 과정이 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 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 T_i 는 격자의 온도, F_a 는 흡수된 레이저 플루언스, C_i 는 격자의 열 충전, x 는 열충전에 대한 재료의 수직방향, l 은 전자의 온도 확산 길이, δ 는 광학 흡수계수를 이용하여 $1/a$ 의 형식으로 계산할 수 있고, l 은 $\sqrt{D\tau_a}$ 에 의하여 계산할 수 있다. D 는 열확산 계수, τ_a 는 어블레이션 가공 시 적용되는 펄스 지속수(Pulse duration)가 된다.¹²⁻¹⁴

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

식 (1)은 δ 와 l 의 크기 정도에 따라서 식 (2)와 식 (3)의 형식으로 나누어 지게 된다.¹²⁻¹⁴

$$T_i \approx \frac{F_a}{C_i \delta} \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right) \quad (\delta > l) \quad (2)$$

$$T_i \approx \frac{F_a}{C_i l} \exp\left(\frac{-x}{l}\right) \quad (\delta < l) \quad (3)$$

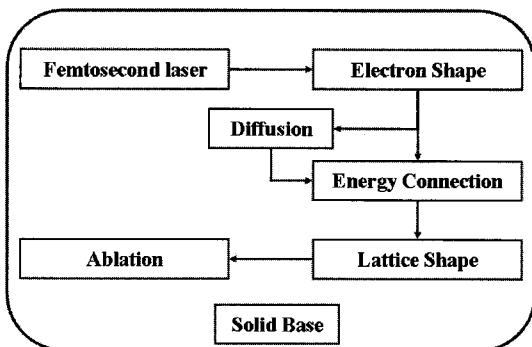


Fig. 1 Schematic drawing of ablation in solid by a femto-second laser pulse

격자의 $C_i T_i$ 의 에너지가 임계치(threshold value)를 초과하였을 때 어블레이션이 발생된다고 볼 수 있다. 이 임계치는 증기열, 즉 $\rho \Omega$ 에 의하여 결정된다. 여기서 ρ 는 재료의 밀도, Ω 는 단위 질량당 증기의 비열로 나타낸다. 결과적으로 어블레이션은 $C_i T_i \geq \rho \Omega$ 의 조건에서 발생하고 식 (4)와 (5)로 표현할 수 있다.¹²⁻¹⁴

$$F_a \geq F_{th}^{\delta} \exp\left(\frac{x}{\delta}\right), F_{th}^{\delta} \approx \rho \Omega \delta \quad (\delta > l) \quad (4)$$

$$F_a \geq F_{th}^l \exp\left(\frac{x}{l}\right), F_{th}^l \approx \rho \Omega l \quad (\delta < l) \quad (5)$$

또한 식 (4)와 (5)를 이용하여 어블레이션 깊이에 대한 식을 식 (6)과 (7)로 정리하였다.¹²⁻¹⁴

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

$$L \approx l \ln\left(\frac{F_a}{F_{th}^l}\right) \quad (\delta < l) \quad (7)$$

어블레이션 깊이는 식 (6)과 (7)을 이용하여 깊이를 예측할 수 있고 각각의 조건에 대하여 나누어지는 특징을 나타낸다.

그러나 미세 정밀 가공 공정에서는 정확한 형상의 구현을 통한 어블레이션 가공을 나타내는 것에 한계가 있기 때문에 어블레이션 깊이의 관계식은 열적 상호 반응 작용에 의한 재료의 제거율과 근사적으로 예측하는 것으로만 사용한다.¹

3. 실험 방법

실험에 사용한 재료는 OLED(Organic light emitting diode)용 웨도우 마스크에 사용되는 Invar 합금을 사용하였다. Invar 합금의 두께는 100 μm 를 사용하였고 그 조성은 Table 1에 나타내었다. 시편의 크기는 50×50mm이며 표면은 세척 후 가공 실험을 하였다.

Table 1 Chemical composition of Invar alloy (%)

C	Si	Mn	Ni	Fe
≤0.04	≤0.25	0.2-0.4	36±0.5	-

실험에 사용한 장비는 785nm 파장의 티타늄 사파이어(Ti:sapphire) 레이저로서 빔 폭은 6mm 이고, 대물렌즈(Objective lens)는 Mitutyo 회사의 20 배율 렌즈를 사용하였다. NA(Numerical Aperture)는 0.4 를 이용하였고, 이상의 실험 장비의 시스템 구성은 Fig. 2에 나타내었다.

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

Invar 합금의 어블레이션 실험은 이송속도와 레이저 빔의 출력을 변환하여 실험을 진행하였다. 이송속도 조건은 0.1, 0.4, 1mm/s로 설정하였고, 레이저 빔의 출력은 플루언스에 따른 비선형적 변화를 파악하기 위하여 5.6, 17.2, 28.8, 51.9, 81.5, 111, 176.6, 296, 471mW의 상용 가능한 한계 출력 범위를 사용하였다. 이상의 변수를 이용하여 Invar 합금에 선형으로 빔을 이송하여 각각의 조건에 대한 어블레이션 특성 값을 측정하였다.

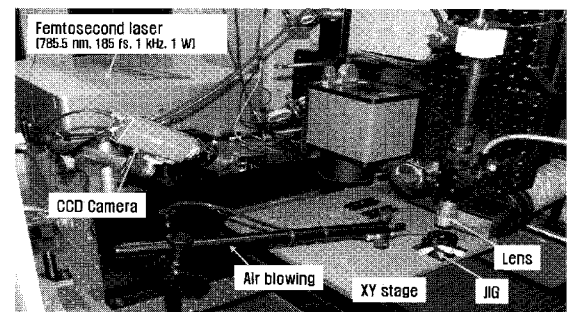


Fig. 2 Femto-second laser processing system

또한 어블레이션 된 결과를 이용하여 Invar 합금의 표면에 형상 가공 실험을 하였다. 형상 가공 실험은 100×100 μm 의 정사각형으로 표면층을 밀링(Milling) 형식으로 가공하였고, 같은 형상을 나노초(Nano-second) 레이저인 DPSS(Diode pumped solid state) 레이저를 이용한 형상 가공과 비교하였다. DPSS 레이저는 532nm의 파장, 1ns의 펄스 지속 시간, 30kHz의 펄스 반복 주파수, 4.38W/cm²의 에너지 플루언스, 10mm의 초점 크기, 3.8W의 레이저 출력과 100mm/s의 이송속도로 설정하여 가

플루언스에서 나타난다. 이는 0.1mm/s 의 느린 이송속도에서는 펄스의 중첩구간이 증가하게 되고 이로 인하여 비선형 변화 구간이 낮은 플루언스에서 형성됨을 볼 수 있다. 또한 이송속도가 증가하게 되면 비선형 변화 구간이 일정하지 않고 변화가 발생한다는 결과를 얻을 수 있다.

레이저 출력과 이송속도를 변화하여 어블레이션 가공을 하였을 때 시편의 어블레이션 폭에 대한 데이터를 Fig. 6 에 나타내었다. 전체적인 경향은 레이저 출력이 증가함에 따라서 폭의 변화가 급격이 증가하는 경향을 나타내다 100mW 이상이 되면 증가량이 일정해지는 경향을 나타내고 있다. 또한 이송속도에 대하여 관찰하면 0.1mm/s 나 1mm/s 에서의 폭이 근사한 값을 나타내고 있다.

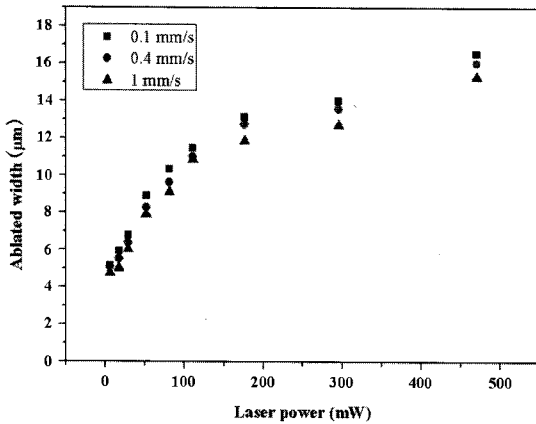


Fig. 6 Energy fluence dependence of the ablated depth for single pulse duration and feed velocity

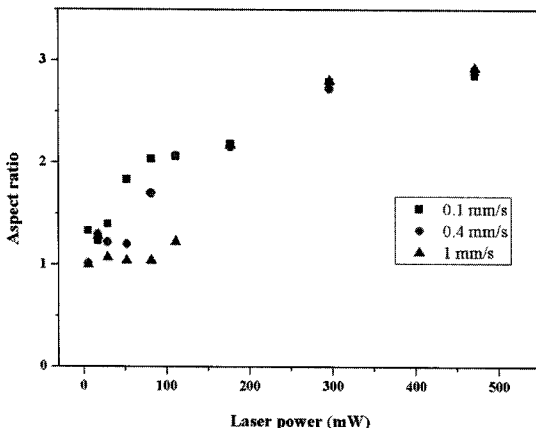


Fig. 7 Energy fluence dependence of the ablated depth for single pulse duration and feed velocity

이송속도에 따른 어블레이션의 깊이와 폭의 변화 값을 이용하여 단면적 형상을 예측하기 위하여 단면 형상비(Aspect ratio) 값을 계산한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 레이저의 출력이 증가할수록 폭의 변화보다는 깊이 방향으로의 변화가 증가하는 결과를 보여주고 있다. 또한 176mW 미만의 출력에서는 이송속도에 따라서 깊이와 폭의 형상변화 차이를 많이 나타내고 있다. 즉, 176mW 미만의 출력 범위에서 1mm/s 의 이송속도로 어블레이션을 하게 되면 깊이 방향 보다는 폭의 변화에 영향을 많이 형성하는 것으로 볼 수 있다. 그리고 고출력 범위에서는 이송속도가 증가하여도 단면 형상비(Aspect ratio)가 비슷한 수치를 나타내고 있다.

4.2 Invar 합금의 표면 가공 특성

이송속도에 따른 Invar 합금의 어블레이션 특성 데이터를 이용하여 표면 가공을 바둑판 배열(Mapping) 방식을 이용한 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 레이저의 출력은 28.8mW 로 고정하였고, 초점의 정확한 크기를 알 수 없기 때문에 변수로 빔의 이송 간격과 이송 속도에 변화를 주었다. Fig. 8(a)는 0.1mm/s 의 이송속도, 5 μm의 빔 이송 간격, 20 번의 이송 횟수를 적용한 그림이고, Fig. 8(b)는 1mm/s 의 이송속도, 1 μm의 빔 이송 간격, 100 번의 이송 횟수를 적용한 그림이다. 두 시편 모두 정사각형의 형상을 유지하고 있으나, Fig. 8(a)의 옆면과 아래면에 흔적을 발견할 수 있었다. 이는 이송속도 대비 에너지의 유입이 과다하게 흡수되어 발생된 결과로 볼 수 있다. 상대적으로 Fig. 8(b)는 깨끗한 가공 표면을 형성할 수 있었다.

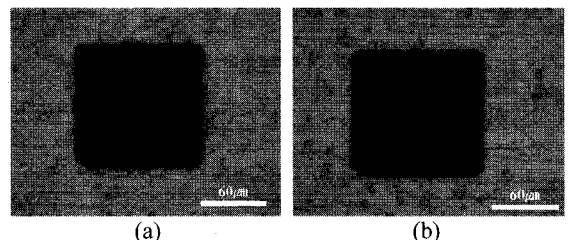


Fig. 8 Microscope image of surface ablation on the Invar alloy using the mapping method

바둑판 배열(Mapping) 방식을 이용한 Invar 합금의 표면 가공 단면을 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 9(a)는 이송속도 대비 에너지의 증가로 인하여 Fig. 9(b)보다 깊이가 증가하였다. 또한 빔 이송 간격이

상대적으로 증가하여 제거된 면에서 파여있는 부분이 많이 보이고 가공상태가 좋지 않은 결과를 나타내었다. 그러나 Fig. 9(b)에서는 평탄한 가공면을 얻을 수 있었고 열에너지에 의한 영향 또한 나타나지 않았다.



Fig. 9 (a) Cross section image of Fig. 8(a), (b) Cross section image of Fig. 8(b)

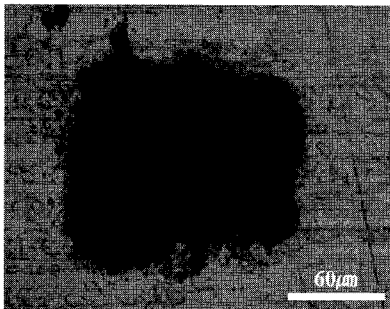


Fig. 10 Microscope image of surface ablation on the Invar alloy using a DPSS laser

Fig. 10 은 DPSS 레이저를 이용하여 Invar 합금의 표면을 어블레이션 가공한 결과이다. 펨토초 레이저의 표면 가공 결과와 비교하면 정사각형의 형상을 구현하기가 어렵고 가공 표면 주변으로 열영향을 받은 부위가 많이 형성되어 있다. 이는 나노초의 장펄스로 가공을 하게 되면 펨토초의 단펄스로 가공하였을 때 보다 재료의 상변화 시간이 길어짐으로 인하여 좋지 않은 가공 상태를 나타내는 것으로 판단된다. 본 결과에서 보듯이 나노초 레이저를 이용한 가공 보다 펨토초 레이저를 이용한 가공이 더욱 깨끗한 가공 품질을 얻을 수 있는 것을 알수 있었다.

5. 결론

펨토초 레이저를 이용한 Invar 합금의 어블레이션 가공에서 이송속도의 변수를 추가하여 어블레이션의 특성 변화를 조사하였고, 이를 바탕으로 재료의 표면 가공 상태의 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 에너지 플루언스가 증가함에 따라 이송속도가 낮을수록 어블레이션 깊이는 증가하는 경향을 나타내었고, 이송속도의 변화에 따른 비선형 변화 구간에도 차이가 발생하였다.

(2) 레이저의 출력이 증가함에 따라 어블레이션 폭의 변화를 알아보았다. 동일 출력에서 이송속도가 증가하여도 폭의 차이는 크게 발생되지는 않았다. 이는 깊이 방향으로의 영향이 더 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

(3) 이송속도와 출력에 따른 단면 형상비 (Aspect ratio)에서 176mW 를 기준으로 하여 저출력은 단면 형상비(Aspect ratio)의 변화가 다양하게 나타나는 반면 고출력에서는 동일한 단면 형상비 (Aspect ratio)가 나타났다.

(4) Invar 합금의 바둑판 배열(Mapping) 방식을 이용한 표면 가공에서 22.8mW 의 레이저 출력, 1mm/s 의 이송속도, 빔간 이송 간격을 1 µm로 하였을 때 가장 좋은 가공 품질을 얻을 수 있었고, 나노초 레이저를 이용한 가공보다 더욱 우수한 가공 상태를 형성하였다.

후 기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(KRF-2005-041-D00083)

참고문헌

1. 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.
2. Huang, H., Zheng, H. Y. and Lim, G. C., "Femtosecond laser machining characteristics of Nitinol," *Applied Surface Science*, Vol. 228, Issues 1-4, pp. 201-206, 2004.
3. 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.
4. Ono, F., Hamarani, Y., Mukumoto, Y., Komatsu, S.,

- Ishikawa, N., Chimi, T., Iwase, A., Kambara, T., Muller, C. and Neumann, R., "Modification of Fe-Ni Invar alloys by high-energy ion beams," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol. 206, pp. 295-298, 2003.
5. Kim, C., "Production of shadow-mask-improved technology," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 127, No. 3, pp. 409-418, 2002.
 6. Richerzhagen, B., "Industrial applications of the water-jet guide laser," *Industrial laser user*, Vol. 28, pp. 28-30, 2002.
 7. Lee, E. S., Lee, J. H., Kim, W. M. and Chun, Y. J., "Removal of micro burr by using Electrolytic-deburring," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 9, pp. 20-26, 2005.
 8. Venkatakrishnan, K., Tan, B. and Ngoi, B. K. A., "Femtosecond pulsed laser ablation of thin gold film," *Optics & Laser Technology*, Vol. 34, No. 3, pp. 199-202, 2002.
 9. Li, X., Jia, T., Feng, D. and Xu, Z., "Ablation induced by femtosecond laser in sapphire," *Applied Surface Science*, Vol. 225, Issues 1-4, pp. 339-346, 2004.
 10. Chung, I. Y., Kang, K. H., Kim, J. D., Sohn, I. B., Noh, Y. C. and Lee, J. M., "Femtosecond Pulsed Laser Ablation of OLED Shadow Mask Invar Alloy," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 12, pp. 50-56, 2007.
 11. 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.
 12. 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, Issue 10, pp. 2716-2722, 1997.
 13. 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.
 14. 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.