

◆ 특집 ◆ 신개념 레이저 기반 초정밀/초고속 가공시스템

변형률 속도 효과를 고려한 355nm UV 레이저 다중 펄스 미세가공의 전산해석에 관한 연구

A Study on the Computational Analysis of 355nm UV Laser Multiple-Pulsed Micro Machining Considering the Strain Rate Effect

이정한¹, 오재용², 박상후¹, 남기중³, 류광현³, 신석훈³, 신보성^{2,✉}
Jung Han Lee¹, Jae Yong Oh², Sang Hu Park¹, Gi-Jung Nam³, Gwang-Hyun Ryu³, Suk-Hun Shin³
and Bo-Sung Shin^{2,✉}

1 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan Natl. Univ.)

2 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소 (ERC/NSDM, Pusan Natl. Univ.)

3 제트텍 (Jettech, LTD.)

✉ Corresponding author: bosung@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3310

Manuscript received: 2010.8.11 / Accepted: 2010.8.17

UV laser micromachining of metallic materials has been used in microelectronic and other industries. This paper shows on experimental investigation of micromachining of copper using a 355nm UV laser with 50ns pulse duration. A finite element model with high strain rate effect is especially suggested to investigate the phenomena which are only dominated by mechanically pressure impact in disregard of thermally heat transfer. In order to consider the strain rate effect, Cowper-Symonds model was used. To analyze the dynamic deformation during a very short processing time, which is nearly about several tens nanoseconds, a commercial Finite Element Analysis (FEA) code, LS-DYNA 3D, was employed for the computational simulation of the UV laser micro machining behavior for thin copper material. From these computational results, depth of the dent (from one to six pulsed) were observed and compared with previous experimental results. This will help us to understand interaction between UV laser beam and material.

Key Words: UV Laser (UV 레이저), Multiple Pulses (다중 펄스), FEA(유한요소 해석), Strain Rate (변형률 속도), Copper (구리)

1. 서론

레이저 가공은 높은 에너지 밀도를 가지는 고출력 열원을 이용한 가공으로 오늘날 자동차, 선박, 전자제품 등 고정밀 절단 및 용접이 필요한 산업분야에 폭넓게 활용되고 있다. 펄스 레이저 어블레이션(ablation)에 의한 재료의 제거는 광화학적/열적 현상으로 빔의 특성 및 대기조건 등과 같

은 많은 변수들의 함수이다.

지금까지 금속재료에 대한 어블레이션의 가공 깊이 및 홀의 크기를 예측하기 위한 많은 이론적/실험적 접근이 이루어져 왔다. 일반적으로 금속재료의 레이저 어블레이션은 열적 메커니즘이 지배적이며 폴리머 재료의 가공에서는 광화학적 반응이 지배적이라고 알려져 있다. UV 레이저 (파장영역 : 200-400nm) 의 금속재료에 대한 이론적 해

식은 열적 메커니즘을 중심으로 해석이 이루어져 왔으며, 이에 관한 금속재료의 이론적 모델링은 시간에 따른 표면 및 내부의 온도 분포 해석을 기초로 하고 있다. 하지만 용융 금속의 거동 및 온도 분포 해석은 복잡하고 가공 변수가 많기 때문에 모델링 결과와 실험결과와의 오차가 커서 정확한 예측이 어렵다.¹⁻³

근래에 구리와 알루미늄에 대한 마이크로 단위의 LSP(laser shock processing)에 관한 연구가 Zhang 등에 의하여 소개되었다.⁴ LSP 는 레이저 조사 시 재료의 표면에서 발생하는 플라즈마의 순간적인 팽창이 표면에 압력파로 작용하여 재료의 변형을 야기하여 가공이 이루어지는 공정이다. Fig. 1 은 LSP 의 원리를 개략적으로 보여준다. 이들은 LSP 를 이용하여 레이저에 의한 마이크로 가공에서 열적 효과를 배제하고 기계적 충격파의 효과로 가공 형상을 설명하였으며, 전산해석을 통해 예측하고 실험적으로 검증하였다. 즉, 매우 짧은 시간에 강한 에너지의 레이저 펄스가 재료표면에 조사되는 순간 표면 층은 즉각적으로 고온, 고압으로 증발하여 플라즈마가 생성된다. 이 플라즈마가 조사된 표면으로부터 팽창하는 동안 충격파들을 발생시키고 기계적인 충격이 전해지게 된다. 이 때 가공재료는 물에 의해 보호되기 때문에 순간적으로 열적 에너지 없이 순수한 기계적 에너지만이 가공 및 변형에 작용하였다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 LSP 공정을 기반으로 하여 열적 에너지를 배제한 충격 변형 거동해석을 수행하였다.

또한, 유한요소법을 이용한 해석에는 구조물을 구성하고 있는 재료의 구성방정식이 지배적이며, 특히 극히 짧은 시간 내에 가공되는 나노초 펄스 레이저 미세가공의 충격해석을 하기 위해서는 변형률 속도 효과가 고려된 구성방정식이 필요하게 된다. 본 저자 연구팀이 싱글 펄스에 대하여 높은 변형률 속도의 효과를 고려한 UV 레이저 가공의 해석 모델 연구와 실험결과를 비교한 선행 연구를 수행하였으나, 산업적으로 사용되는 실제 가공 현상을 예측하기보다는 기초 전산 해석 연구 결과였다.⁵

본 논문에서는 변형률 속도 효과를 고려한 UV 레이저의 다중 펄스 미세가공에 관한 전산해석을 수행하고, 이들의 해석 결과를 Zhang 등의 실험결과와 비교하여 이의 유용성을 검증하고자 한다. 실험 재질은 구리이며 상용 유한요소 해석 도구로써 LS-DYNA 3D 를 사용하였다.

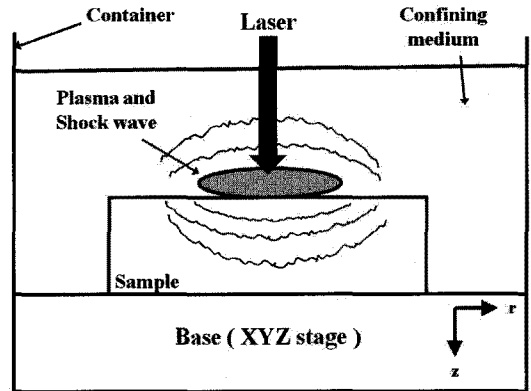


Fig. 1 Schematic of Laser Shock Processing

2. 유한요소 해석모델

2.1 Cowper-Symonds 관계식(relation)

금속의 성형은 소성 유동응력(flow stress)에 크게 영향을 받으며, 때때로 빠른 변형률 속도와 고온 하에서 큰 변형을 수반한다. 회복, 재결정 및 결정성장은 온도상승에 따라 진행되는 과정으로 유동응력을 점점 감소하게 하고, 한편 소성변형률 속도가 증가하면 금속의 유동응력은 증가하게 된다. 즉, 일반적으로 금속의 온도가 증가하면 재료의 인성과 연성이 증가하고 탄성계수, 항복강도 및 인장강도는 감소한다. 또 변형률 속도가 증가하면, 통상적인 영역에서 재료의 연성이 감소하고 항복 및 인장강도는 증가하게 된다. 이렇게 상반되는 변형률 속도와 온도의 두 영향을 동시에 고려하기는 쉽지 않다.

본 연구에서는 변형률 속도 효과를 고려하고자 Cowper-Symonds 모델을 사용하였으며 적용되는 관계식은 식(1)과 같다.

$$\sigma = S_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] \quad (1)$$

$$\sigma = S_0 \left[1 + \left(\frac{0}{C} \right)^{1/p} \right] = S_0 \quad (2)$$

여기서, S_0 는 식(2) 에서 보는 바와 같이 0/sec 에서의 정적 응력이며, C와 p는 변형률 속도 모델에서의 상수 값이다.⁶ Fig. 2 에는 구리의 600K 에서의 변형률 속도와 유효 응력과의 분포를 측정할 연구 결과를 인용하여⁷ Cowper-Symonds 모델에 적

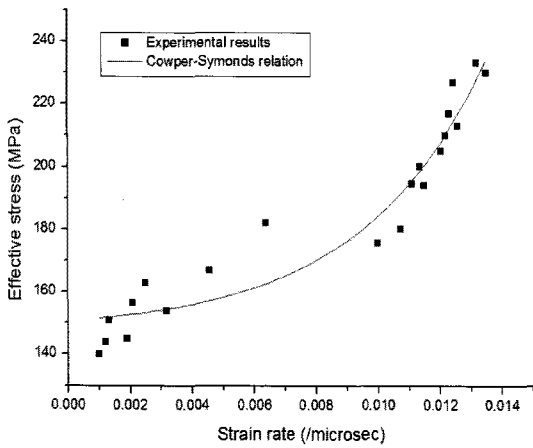


Fig. 2 Curve fitting between experimental results and Cowper-Symonds relation

용하기 위해 곡선 맞추기(curve fitting)를 한 결과를 나타내었다. 그리하여 $C = 0.015784$, $p = 0.286118$ 의 값을 도출하였다. 단, 여기서는 변형 중에 발생하는 금속내부의 온도변화를 고려하지 않았기 때문에, 변형률이 증가하면서 발생하는 열에 의해 유동응력이 감소되는 것을 표현하지 못하여 유동응력을 실제보다 다소 크게 예측하는 한계가 있다.

2.2 충격압력파

플라즈마의 팽창에 의한 충격 압력파의 최대 압력(peak pressure)은 선행 연구의 논문을 인용하여 레이저 강도(laser intensity) $4\text{GW}/\text{cm}^2$ 일 때 최대 압력 0.0335Mbar 값이 해석에 적용되었다.⁴ 그리고 펄스 레이저의 경우, 레이저 빔 에너지는 그 침투 출력 및 펄스 지속 시간 등에 의하여 결정된다. 펄스 빔의 침투 출력은 보정된 광다이오드를 사용하여 측정할 수 있으나, 평균 출력과 펄스 폭의 측정으로부터 간접적으로 계산된다. 가장 일반적인 방법으로 오실로스코프 상에서 측정된 레이저 빔 펄스는 그 침투 출력과 같은 높이의 반치폭(FWHM; Full Width Half Maximum)의 지속 시간을 가진 사각형의 펄스와 같다고 가정하는 것이다. Fig. 3에는 최고 압력 0.0335Mbar 을 가지는 펄스 폭 50ns (nano second), 펄스 반복률 1kHz 일 때 세 번의 펄스를 모델링 하였다.

2.3 재질 및 공정변수

해석 재질의 모델은 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 구리 박막이며, 레이저 가공 시 발생한 충격 압력파

를 지름 $12\mu\text{m}$ 인 원의 형태로 직접 가공 표면에 적용하였다. 구리 박막에 대한 기계적 물성치를 Table 1에 나타내었다.⁸ 모델링에서는 다음과 같은 몇 가지 조건들을 가정하였다.⁹

- 1) 충격 압력파는 평면적이고 단축의 한 방향으로 생성되었다.
- 2) 레이저 펄스에 의해 생성된 압력은 작용 범위에 균일하게 분포한다.
- 3) 재료는 von Mises 항복 기준을 따른다.
- 4) 점성 효과는 무시되었다.

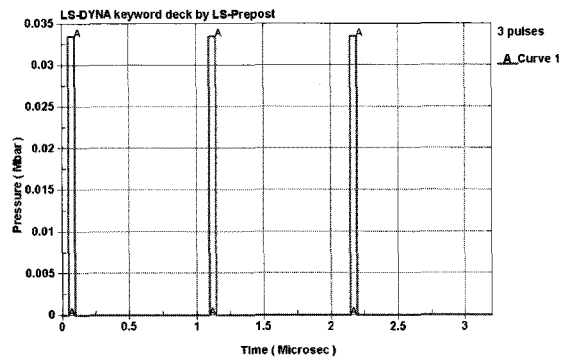


Fig. 3 Relationship curve between time and pressure for multiple pulsing

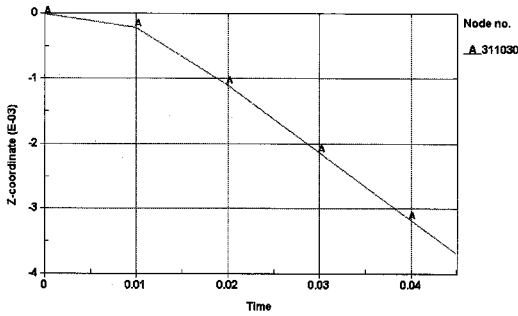
Table 1 Mechanical properties of copper

ρ (g/cm^3)	8.93
E (Mbar)	1.17
ν (Poisson's ratio)	0.35
Yield stress ($10^7 \text{N}/\text{cm}^2$)	0.004

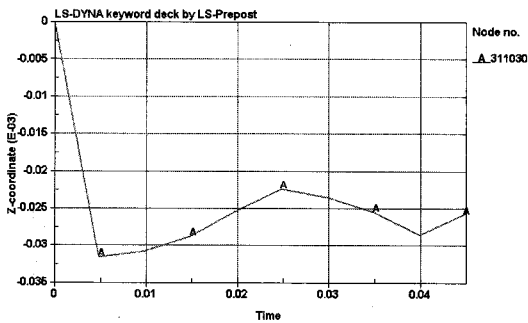
3. 전산해석 결과

3.1 싱글 펄스 해석

최초 싱글 펄스 해석을 진행하여서 50ns 동안 충격 압력파로 인한 변화를 관찰하였다. Fig. 4는 압력이 가해지는 중심부에 있는 노드(node)에서 z 축 방향의 움직임을 변형률 속도가 적용된 것과 적용되지 않은 것을 나누어서 관찰한 그래프이다. 변형률 속도가 적용되지 않은 경우, 가공 깊이가 깊게 나타났으며 이는 실제 실험 결과와 비교해 보았을 때 일치하지 않는다. 반면에 변형률 속도가 적용이 된 것은 싱글 펄스가 완료된 시점에서 깊이 방향으로 약 $0.25\mu\text{m}$ 내려간 것을 알 수 있다. Zhang의 실험결과와 비교하였을 때, Zhang의 경우 2 펄스의 가공으로 $1\mu\text{m}$ 을 넘어서는 것에 비해 어느

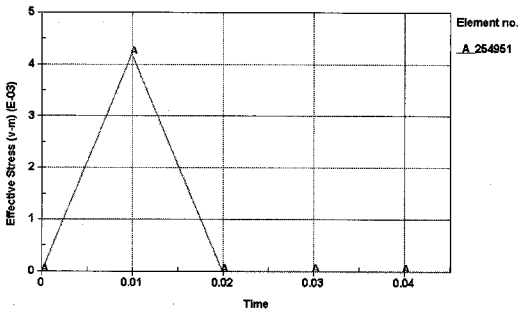


(a) Z-coordinate without the strain rate effect

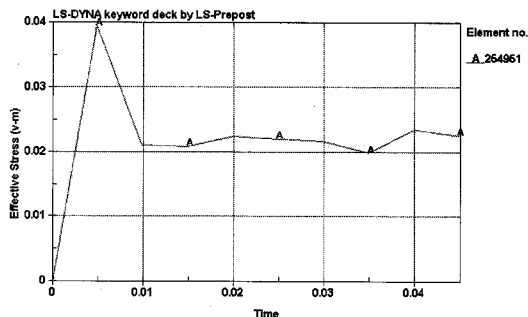


(b) Z-coordinate with the strain rate effect

Fig. 4 Dent depth induced by UV laser for single pulse



(a) Effective stress without the strain rate effect



(b) Effective stress with the strain rate effect

Fig. 5 Effective stress curve during 50 ns pulse duration for single pulse

정도의 차이를 발견할 수가 있다. 여기서의 차이는 전산 해석 모델 설정 시 부여한 기계적 물성치, 초기 경계 조건 등의 오차에 의한 것이라 판단된다. Fig. 5는 가장 크게 유효 응력(effective stress (v-m))이 발생한 요소(element)를 추적하여 유효 응력을 나타낸 것이다. 변형률 속도가 적용되지 않은 경우, 최고 유효응력은 0.004정도이며, 10-20ns 사이에 요소가 연결이 끊어져 삭제되어서 이후 응력이 나타나지 않았다. 변형률 속도를 적용한 경우 최초에 충격 압력파가 작용함과 동시에 0.04에 가까운 최대 응력이 발생하였고 5ns 이후에는 0.02 근처까지 감소하였다. 두 결과를 비교해 본 결과, 변형률 속도가 적용되지 않은 것에 비해 변형률 속도가 적용된 경우 보다 큰 응력이 지속적으로 발생한 것을 알 수 있다.

3.2 다중 펄스 해석

다중 펄스 해석은 앞 절에서 설명한 바와 같이 펄스 반복률에 맞추어 각각의 싱글 펄스 사이에 1000ns 의 시간 간격을 두어 진행하였다. 전산 해석의 타당성을 살펴보기 위하여 Fig. 6 에서와 같이 펄스 횟수에 따른 덴트(dent)의 깊이를 Zhang 의 실험 결과와 비교하였다. 본 해석 모델에서는 변형률 속도 효과가 적용되지 않은 경우, 변형이 한 곳에 집중되어 일어나고 버(burr)가 생성되었다.

그리고 2 펄스의 가공만으로 10 μ m 에 가까운 가공 깊이를 나타내었다. 반면에 변형률 속도 효과를 고려한 경우, 재료의 파단이 일어나기까지의 시간이 길어졌으며 강도가 증가하였다. 또한 가공에 에너지가 재료 전반에 흡수되는 효과에 의하여, 가공 형태가 국부적으로 가공되지 않고 전반적으로 변형됨을 알 수 있었다.

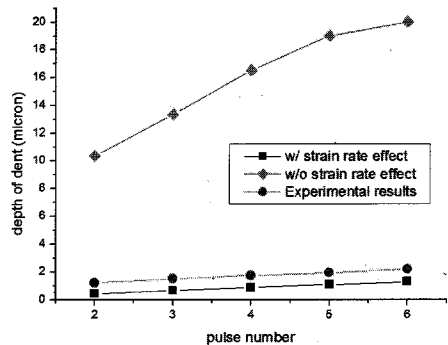
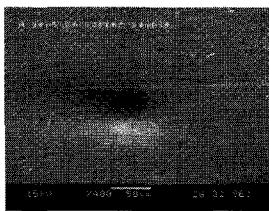


Fig. 6 Comparisons between current models and experimental results

Zhang의 실험 결과와 비교하여 최초 2 펄스까지의 깊이에서 차이가 있는 것을 제외하면 거의 유사한 경향을 가지고 선형적으로 증가하였다. Fig. 7은 변형률 속도 적용 여부에 따른 가공 형상을 실제 LSP 공정으로 진행된 텐트의 형상을 SEM을 통해 측정된 사진과 비교한 것이다.

4. 결론 및 향후 연구

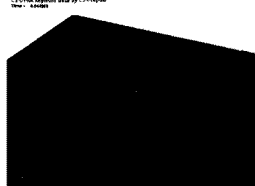
본 연구를 통하여 구리 재질의 355nm UV 싱글 펄스에 대해 특정 노드의 z 축 이동거리를 측정함으로써 가공 깊이를 추정하고 최대 발생 응력의 크기를 측정한 후, 다중 펄스 레이저 가공에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 제한한 해석 모델의 동적, 충격 거동의 다중 펄스 레이저 가공의 유한요소 해석 결과는 변형률 속도를 고려했을 경우 실제 거동과 유사하다고 판단하였으며, 충격 압력 파에 의한 다중 펄스 레이저 가공의 해석 시에는 펄스 수가 증가함에 따라 일정한 깊이만큼 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 향후 보다 산업현장에서 필요로 하는 실질적인 적용을 위하여 상온, 대기 상태에서 아주 짧은 시간에 일어나는 열적 충격해석을 추가할 예정이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Dents formed on copper surface. (a) SEM picture by LSP⁴, (b) with the strain rate effect and (c) without the strain rate effect

후 기

본 연구는 지식경제 기술혁신사업인 “차세대

초정밀/초고속 레이저 복합/유연 가공 기술 개발” 과제(과제번호 : 10033796)의 지원으로 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Oh, J. Y. and Shin, B. S., “Photothermal and Photochemical Investigation on Laser Ablation of the Polyimide by 355nm UV Laser Processing,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 147-152, 2007.
2. Oh, J. Y. and Shin, B. S., “A Study on Laser Ablation of Copper Thin Foil by 355nm UV Laser Processing,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 134-139, 2007.
3. Je, S. K., Jeong, H. Y., Oh, J. Y., Kim, K. R., Kang, M. K., Kim, K. H. and Shin, B. S., “Heat Transfer Analysis of Copper Thin film Processed by 355nm UV Nd:YVO⁴ Laser,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference, pp. 499-500, 2007.
4. Zhang, W. and Yao, Y. L., “Microscale Laser Shock Processing-Modeling, Testing, and Microstructure Characterization,” Journal of Manufacturing Processes, Vol. 3, No. 2, pp. 128-143, 2001.
5. Lee, J. H., Oh, J. Y., Park, S. H. and Shin, B. S., “Computational Analysis of 355 nm UV Laser Single-Pulsed Machining of Copper Material Considering the Strain Rate Effect,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 9, No. 3, pp. 56-61, 2010.
6. LS-DYNA, “User’s Manual Version 971,” 2007.
7. Endoh, H. and Sakino, K., “Rate Controlling Mechanism on Copper at Very High Strain rates and High Temperatures,” Bulletin of the College of Engineering, Hosei University, No. 40, pp. 17-20, 2004.
8. Online Material Information Resources - Matweb, <http://www.matweb.com>
9. Ding, K. and Ye, L., “Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening process,” Surface Engineering, Vol. 19, No. 5, pp. 351-358, 2003.