

355 nm UV 레이저 다중 펄스 구리재질 미세가공의 전산해석에 관한 연구

A Study on the Computational Analysis of 355 nm UV Laser Multiple-Pulsed Micro Machining for Copper Material

*이정한¹, 오재용², 박상후¹, #신보성²

*J. H. Lee¹, J. Y. OH², S. H. Park¹, #B. S. Shin(bosung@pusan.ac.kr)²

¹ 부산대학교 기계공학부, ² 부산대학교 ERC/NSDM

Key words : UV laser, FEA, Multiple pulse, Strain rate

1. 서론

지금까지의 UV 레이저(파장영역: 200~400nm)의 금속재료에 대한 어블레이션의 이론적 해석은 시간에 따른 표면 및 내부의 온도 분포 해석을 기초로 하고 있으며, 가공 깊이(ablation depth) 및 홀의 크기 (hole diameter)를 예측하기 위한 많은 이론적/실험적 접근이 이루어지고 있다.⁽¹⁻²⁾ 근래에 구리와 알루미늄에 대한 마이크로 단위의 LSP(Laser Shock Processing)에 관한 연구가 Zhang 등에 의하여 소개되었으며, Fig. 1 은 LSP 의 원리를 개략적으로 나타낸 것이다. LSP 는 레이저 조사 시 재료의 표면에서 발생하는 플라즈마의 순간적인 팽창이 표면에 압력파로 작용하여 재료의 변형을 야기하여 가공이 이루어지는 공정이다. 이들은 LSP 를 이용하여 레이저에 의한 마이크로 가공에서 열적 효과를 배제하고 기계적 충격파의 효과로 가공 형상을 설명하였으며, 전산 해석을 통해 예측하고 실험적으로 검증하였다.⁽³⁻⁴⁾ 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. 또한 열적 에너지로부터 가공 재료가 보호되기 때문에 순수한 기계적 에너지만이 가공 및 변형에 작용 하였다고 볼 수 있다.⁽⁵⁾

그러나, 극히 짧은 시간 내에 가공 되어지는 나노초 펄스 레이저 미세가공의 경우, 평균 변형률 속도(strain rate)는 대략 10,000 ~ 100,000 (1/sec)에 해당하기 때문에 이러한 변형률 속도에 대한 효과를 고려하지 않은 해석 결과는 실제 실험 결과와 많은 차이점을 내포할 수 밖에 없다.⁽⁶⁾

따라서, 본 논문에서는 높은 변형률 속도의 효과를 고려한 UV 레이저 다중펄스의 유한요소 해석 모델을 제안하고 이들의 전산 해석 결과를 Zhang 의 연구 결과와 비교함으로써 이에 대한 유용성을 제시하고자 한다. 실험 재질은 구리(copper)이며 상용 유한요소 해석 도구로써 LS-DYNA 3D 를 사용하였다.

2. 유한요소 해석모델

본 연구의 해석모델 (finite element model)에서는 사면체 유한요소가 충격거동해석에 사용되었으며, 많은 유한요소 수 처리에 적합하고, 고속 동적/충격 해석이 가능한 외삽적 유한요소법(explicit finite element method)이 채택되었다. 모델링에서는 다음과 같은 몇 가지 기초조건들을 근거로 두었다.⁽⁷⁾

- (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.

해석모델은 60 × 60 × 20 μm³ 의 사이즈의 구리 박막이며, 0.5 μm³ 정육면체 형태의 총 576,000 개의 요소(element)

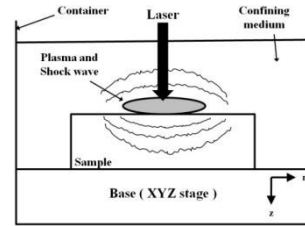


Fig.1 Schematics of Laser Shock Processing⁽⁵⁾

로 구성되어 있으며, 레이저 가공 시 발생한 충격 압력파를 지름 12 μm 인 원의 형태로 적용하였다. 해석에 사용된 구리박막 모델의 기계적 물성치를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of copper material⁽⁸⁾

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

가공 재료의 유효응력과 유효변형률 속도의 관계는 선행 연구된 논문의 실험데이터를 인용하였다.⁽⁹⁾ 또한 펄스 레이저 가공에서의 변형률 속도 영향을 고려 하고자 아래와 같은 Cowper - Symond 관계식을 사용하였다.⁽¹⁰⁾

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

S₀는 0/sec 에서의 정적 응력이며 C 와 p 의 값은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이, 기존의 실험 데이터와 곡선 맞추기(curve fitting)를 하여서 변수 C = 16,260.59 와 p = 0.349,083 의 값을 구하였다.

해석 모델에 적용되는 레이저 빔 펄스는 그 칩두 출력과 같은 높이의 반치폭(FWHM)과 같은 지속시간을 가진 사각형의 펄스와 근사적으로 같다고 가정하였다. Zhang 의 실험 데이터를 인용하여 최고 압력 값은 레이저 강도 (laser intensity) 4 GW/cm² 일 때의 0.035 Mbar, 펄스

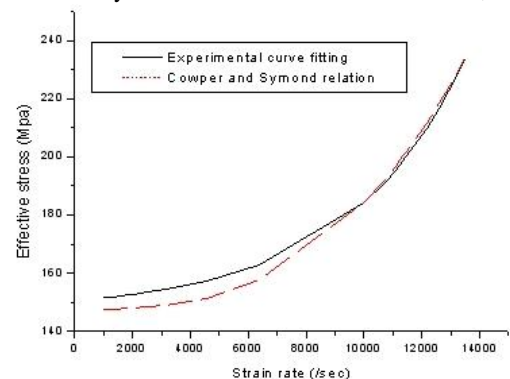


Fig.2 Curve fitting of relationship between stress and strain rate

폭 50 nsec, 펄스 반복률 1KHz 일 때의 다중 펄스(multiple pulse)를 입력 값으로 사용하였다.⁽⁵⁾

3. 전산해석 결과

전산 해석의 타당성을 살펴보기 위하여 Fig. 3 에서와 같이 펄스 횟수에 따른 덴트(dent)의 깊이를 Zhang 의 실험 결과와 비교하였다. 그 결과, 본 해석 모델에서는 변형률 속도 효과가 적용되지 않은 경우, 변형이 한 부위에 집중되어 일어나고 버(burr)가 생성되었다. 그리고 6 펄스 이후에 해석 모델의 두께인 20 μm 에 도달할 정도로 가공 깊이가 깊게 나타났다. 반면에 변형률 속도 효과를 적용한 경우, 재료의 파단이 일어나기까지의 시간이 길어졌으며 강도가 증가하였다. 또한 가공 에너지가 전체적으로 재료 전반에 흡수되는 효과에 의하여, 가공 형태가 국부적으로 가공되지 않고 전반적으로 변형됨을 알 수 있었다. Zhang 의 실험결과와 비교하여 최초 2 펄스까지의 깊이에서 차이는 나는 것을 제외하면 거의 유사한 기술품을 가지고 선형적으로 증가하였다. 여기서 나타난 가공 깊이의 차이는 전산 해석 모델 설정 시 부여한 기계적 물성치 초기 경계 조건 등의 오차에 의한 것이라 사료된다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 Zhang 의 SEM 측정 사진과 본 모델의 덴트의 형상을 비교해보면, 실제 LSP 공정으로 인한 구리의 가공 형상과 본 연구의 변형률 속도 효과가 적용된 해석 결과가 매우 유사한 가공 형상을 나타냄을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 구리재질의 355nm UV 다중 펄스 레이저가공에 대한 유한요소 해석을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 약 나노초 펄스 레이저 미세 가공 해석을 위한 약 10³ ~ 10⁴ (1/sec)범위의 높은 변형률 속도 효과를 고려한 유한요소 해석 모델을 제안 하였다. 둘째, 제안한 해석모델의 동적, 충격 거동의 다중 펄스 레이저 가공의 유한요소 해석결과는 변형률 속도를 고려했을 경우 실제 거동과 유사하다고 판단된다. 셋째, 충격 압력파에 의한 다중 펄스 레이저 가공의 해석 시, 펄스 수가 증가함에 따라 일정한 깊이만큼 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 또한 가공 되어지는 구리 재질의 온도를 일정하다고 가정하였으나, 이는 많은 오차를 내포하고 있다. 향후 국부적이고 짧은 시간 동안의 구리 재질 내부의 온도 분포를 측정하거나 추정하는 연구도 병행해서 해석 모델에 반영된다면 보다 실제 해석과 유사한 전산 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

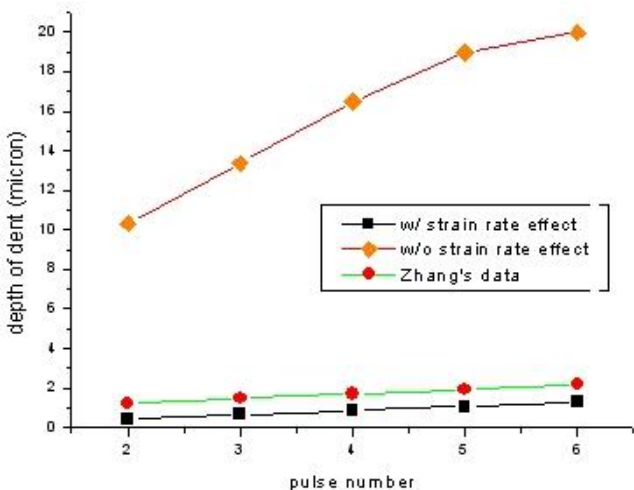


Fig. 3 Comparisons between current models and Zhang's experimental results

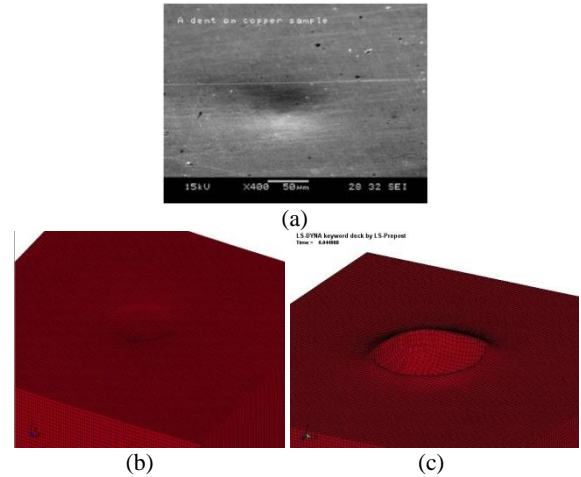


Fig. 4 Dented shapes formed on copper surface, at the laser fluence of 3.89 GW/cm² after pulsing. (a) SEM picture by LSP⁽⁶⁾, FEA results (b) with the strain rate effect, and (c) without the strain rate effect

후기

본 연구는 지식경제 기술혁신사업인 “차세대 초정밀/초고속 레이저 복합/유연 가공기술 개발” 과제의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 오재용, 신보성, “355nm UV 레이저 가공에 의한 폴리이미드의 광화학적 및 광열적 어블레이션에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제 24 권 제 4 호, pp.147-152, 2007
- 오재용, 신보성, “355nm UV 레이저를 이용한 구리 박판 가공 시 어블레이션에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 제 24 권 제 2 호, 2007
- Tongxiang Hu, Zhenqiang Yao, Jun Hu, "3-D FEM simulation of laser shock processing", Surface & Coatings Technology, 201, pp.1426-1435, 2006
- Yongxiang Hu and Zhenqiang Yao, "Numerical simulation and experimentation of overlapping laser shock processing with symmetry cell", International Journal of Machine Tools & Manufacture, No.48, pp.152-162, 2008
- Wenwu Zhang and Y. Lawrence Yao, "Microscale Laser Shock Processing-Modeling, Testing and microstructure Characterization", Journal of Manufacturing Processes, Vol.3/No.2, pp.128-143, 2001
- 신보성, 제태진, “초정밀 고속가공 공정에서의 변형률 속도를 고려한 전산 시뮬레이션 해석에 관한 연구”, 한국기계공학회지, 제 5 권 제 2 호, 2006
- K. Ding and L. Ye, "Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes", Surface Engineering, Vol.19, No.5, pp.351-358, 2003
- Online Materials Information Resource - Matweb. <http://www.matweb.com/>
- Hajime ENDOH and Kiyotaka SAKINO, "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
- LS-DYNA user's manual version 971, 2007