

유한요소법을 이용한 레이저 미세 패터닝 공정 해석

이진호¹ · 이종길[#] · 김병희²

Simulation of Laser Micro Patterning Process Using FEM

J. H. Lee, J. K. Lee, B. H. Kim

Abstract

Femtosecond laser is the latest generation pulsed laser delivering shortest pulses. Any solid materials can be machined by it. Femtosecond laser micromachining allows highest precision and minimal heat influence within the workpiece. But due to the complex physical phenomena between the laser beam and the workpiece materials, it is very difficult to determine the optimal process conditions in the femtosecond laser micromachining.

In this study, a method to simulate the femtosecond laser micromachining process was proposed. And femtosecond laser micro patterning processes of chromium thin film are simulated by the proposed method using a commercial FE code, LS-Dyna. Simulation results were compared with those of experiments.

Key Words: Finite Element Method, Femtosecond laser, Micro patterning, Thin film, Chromium

1. 서 론

최근 세계 각국은 정보통신, 신약 및 바이오 등과 같은 차세대 산업분야에서의 경쟁력을 확보하기 위해 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 이에 따라 이들 산업을 뒷받침할 핵심 생산 기술인 미세 가공 기술의 개발을 위한 노력도 활발하게 진행되고 있다. 이 가운데 레이저 빔을 이용한 가공기술은 레이저 빔의 파장, 펄스길이, 출력 등을 조절하여 금속, 반도체, 유리나 세라믹 등과 같은 절연체, 생체조직 등 거의 모든 재료에 대한 미세 정밀 가공이 가능한 획기적인 기술로 인정 받고 있다.

펨토초 레이저를 이용한 박막가공은 효율적이며, 레이저 가공 문턱 에너지가 낮을 뿐만 아니라 기판에 대한 열적, 기계적 손상을 최소화 할 수 있는 장점이 있어 다양한 미세 패턴의 제작에 효과적으로 활용될 수 있어 최근 관련 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 특히 ITO 박막, 크롬 박막

등의 가공 등에 적용 가능성이 높은 것으로 판단된다.

펨토초 레이저를 ITO, 크롬 등의 나노박막에 조사할 경우, 레이저 파장의 1/10 ~ 1/5 크기의 주기적 미세 구조를 박막 표면에 형성해, 레이저 파장과 편광을 변화시켜 미세 구조의 형상과 크기를 제어할 수 있으며 안정된 경계면을 얻을 수 있다. 기존의 레이저 가공에서는 파장 오더의 가공이 하한으로 여겨져 나노미터 레벨의 미세 가공에는 X선 레이저의 개발이 필요한 것으로 인식되고 있었음을 감안하면, 이는 매우 획기적인 기술이다.

펨토초 레이저를 이용한 박막 가공 시 가공의 성공 여부는 조사되는 빔의 에너지 강도, 조사 반복률 등의 공정조건에 따라 달라지게 되는데, 실제로 최적의 공정 조건을 결정하는 것은 상당히 복잡하고 시간과 비용의 측면에서 비효율적인 측면이 강하다.

따라서 수치해석과 같은 체계적 방법을 이용하여 공정 조건을 최적화하는 기술의 개발이 필요하다. 이러한 맥락에서 최근 유한요소법 등과 같은 수치적 방법을 이용하여 레이저 가공 공정

1. 한국산업기술대학교 기계공학과
2. 강원대학교 기계-메카트로닉스 공학과
교신저자: 한국산업기술대학교 기계공학과
E-mail: ljk@kpu.ac.kr

을 해석하고 최적화 하려는 다양한 연구들이 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. S. Kolossov 등 [1]은 3 차원 유한요소법을 이용하여 레이저 선택 소결 공정을 해석하였고, J. L. Ocana 등[2]은 레이저 파에 의한 표면 변형 및 잔류 응력장 형성을 유한요소법을 이용하여 분석하였다. J. C. Conde 등 [3]은 레이저 용발(ablation) 공정의 초기 상태를 유한요소법을 이용하여 해석한 바 있다.

본 연구에서는 펨토초 레이저를 이용한 Cr 박막의 미세 가공 공정에 대한 유한요소해석 방안을 제시하고, 박막의 미세 드릴링 공정을 해석한 후 실험 결과와의 비교·분석을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 해석 모델

2.1 해석 방법

펨토초 레이저를 이용한 박막의 미세 패터닝 공정의 해석을 위해서는 일종의 가상적인 물성치 설정이 필요하다. 펨토초 레이저 가공 공정은 열에 의한 가공이 아닌 비열가공(non-thermal machining) 이므로 펄스의 길이가 상대적으로 길어 열현상이 주된 가공 메커니즘이 되는 다른 레이저 가공 공정과는 특성이 다른 것으로 알려져 있다.[4] 그러나 유한요소법은 기본적으로 연속체 역학에 기초한 평형방정식의 근사 해를 구하는 수치적 방법의 하나이다. 따라서 그 특성상 연속체 역학적 거동을 보이지 않는 펨토초 레이저 가공 공정을 유한요소법으로 그대로 모사하는 것은 매우 어려운 것으로 판단된다.

본 연구에서는 펨토초 레이저를 이용한 박막의 미세 패터닝 공정의 유한요소해석에서 전도(conduction)에 의한 열전달이 일어나기 전에 이미 가공이 진행된다는 점에 착안하여, 박막의 열전달 계수를 인위적으로 조절한 상태에서 열전달 해석을 수행하고, 그 결과 얻어진 온도가 특정값을 넘어가면 가공이 이루어진 것으로 판정하는 방법을 사용하였다. 가공 중 일어나는 상변화에 의한 에너지 변화를 고려하기 위해 상변화에 따른 잠열 효과를 해석에서 고려하도록 하였다.

한편, 레이저 가공 시 발생하는 폭압에 의한 가공부 들기 발생 현상을 예측하기 위해서 레이저

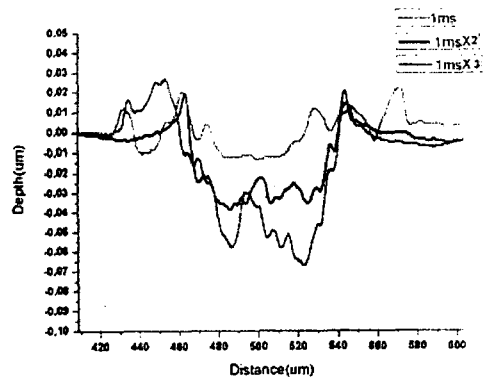


Fig. 1 Depth profiles of micro holes ablated by femtosecond laser

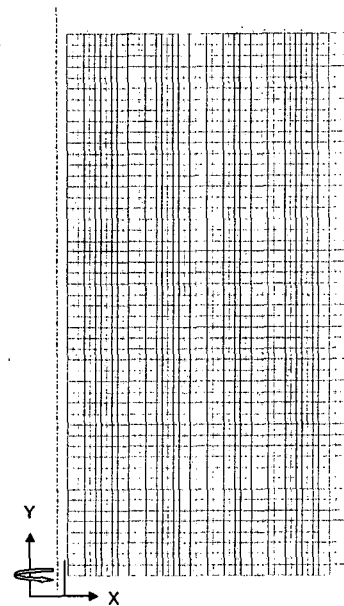


Fig. 2 FE mesh

조사에 따른 가공부 온도 상승 경향을 이용하여 판정할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 레이저 조사 초기에 박막의 온도가 용융점 이상으로 상승하면 폭압에 의한 들기 발생의 가능성이 높을 것으로 판정하도록 하였다.

2.2 해석 모델의 구성

본 연구에서는 Fig. 1 에 주어진 실험 모델에 대한 해석을 수행하였다. 가공된 구멍의 직경은 약 100 μm 이며, 크롬박막의 두께는 약 300nm 이다. 이 실험에서는 펨토초 레이저를 이용하여 크롬 박막의 표면 거동 및 가공 문턱 값을 찾기 위한

것으로 1~50mW 범위의 레이저 에너지 영역에서 실험을 수행한 것이다. 실험 결과 35mW의 레이저 에너지에서 펄스의 증가에 따라 크롬 박막이 점진적으로 가공되는 것이 관찰되었으며, 폭발현상에 의한 돌기의 높이가 약 20mW 정도 관찰되었다.

상기와 같은 실험에서 나타난 현상을 구현하기 위하여 Fig. 2와 같은 축대칭 2차원 해석 모델을 구성하였다. 크롬 박막 부분의 요소 크기는 두께 방향으로 약 100nm이며, 실리콘 부분은 1 μm로 하였다. 레이저 조사부 이외의 곳은 대류 경계조건을 부여하였다.

3. 해석 결과 및 토의

유한요소법을 이용하여 펄토초 레이저 및 나노 레이저 가공 공정 해석을 수행하였다. 해석에서는 상변화를 고려하였으며, 열전달 현상의 개입 정도를 조절하기 위한 열전달 계수의 조절을 비롯한 일부 물성치의 조절과 공정 변수의 조절을 통하여 실험결과와 일치하도록 해석 변수를 조절하였다. 이렇게 조절된 해석 변수를 이용하여 다양한 경우에 대한 해석을 시도하였다. 해석은 상용 유한요소 코드인 LS-Dyna[5]의 임플리시트 모듈을 사용하였다.

크롬 박막에 대한 레이저 조사에 의한 온도 분포 해석을 수행하고, 온도가 특정 값 이상이면 가공일 일어난 것으로 가정하였다. 해석 결과 예측된 크롬 박막과 실리콘 기판의 온도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 실험결과 얻어진 구멍의 깊이 프로파일과 해석 결과 소재 제거 부분으로 예측되는 부분의 확대 모습을 Fig. 5에 나타내었다.

박막이 제거되는 것으로 판정하는 온도를 약 2500K로 가정하였을 때, 20mW의 에너지를 가지는 레이저 조사에 대해서는 가공이 일어나지 않은 것을 볼 수 있으며, 35mW의 에너지를 가지는 레이저 빔이 두 펄스 조사된 경우는 약 40nm 가량의 가공이 진행된 것으로 판정할 수 있음을 볼 수 있다.

이상과 같은 해석 방법에 의한 크롬 박막 제거 두께 예측의 가능성에 대한 추가적인 검증을 위하여 레이저 에너지 180mW에서 단일 펄스 조

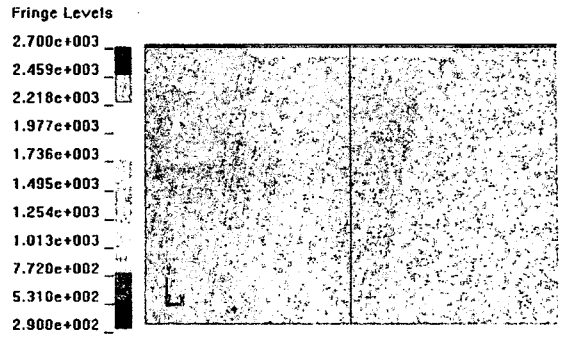


Fig. 3 Predicted temperature distribution (laser energy 20mW, 2 pulses)

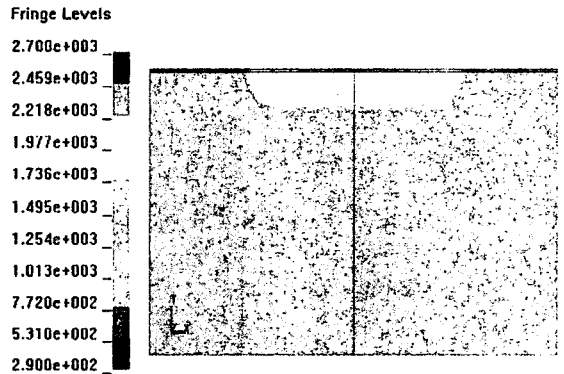


Fig. 4 Predicted temperature distribution (laser energy 35mW, 2 pulses)

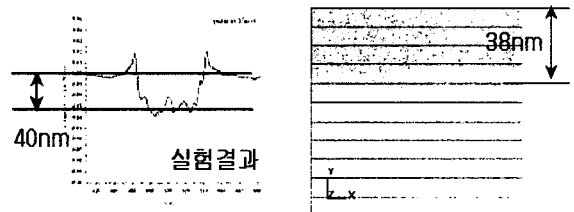


Fig. 5 Measured and predicted depths of ablated micro hole

사에 따른 박막제거 해석을 실시하고, 이를 실험결과와 비교 분석하였다. 해석 및 실험 결과를 각각 Fig. 6과 7에 나타내었다.

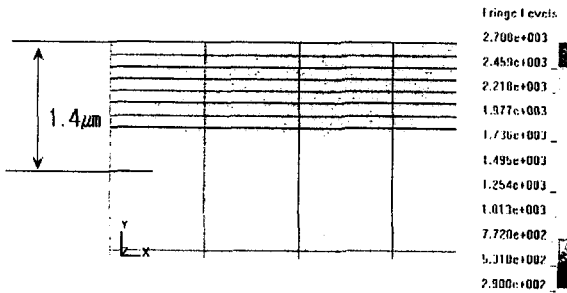


Fig. 6 Predicted distribution of temperature and depth of micro hole (180mW, 1 pulse)

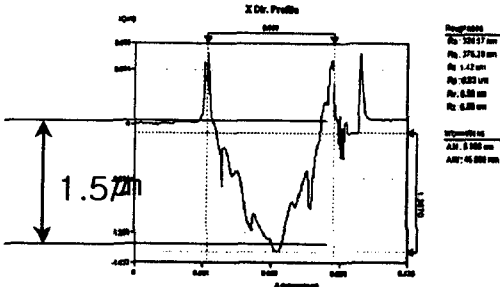


Fig. 7 Measured depth of ablated micro hole (180mW, 1 pulse)

한편, 전술한 바와 같이, 레이저 조사에 의한 온도장 해석 결과에서 빔 조사 초기에 소재의 용융이 발생하면 폭압에 의한 가공부 둔덕 형성 정도의 정도가 심해지는 것으로 판정하는 것으로 하여 둔덕 형성의 경향성에 대한 예측을 시도하였다.

해석 결과 35mW 의 레이저 빔을 조사한 경우, 전체 조사 시간의 약 80%영역에서 용점 이상의 온도 영역이 발생하였으며, 180mW 레이저 빔을 조사한 경우 전체 빔 조사 시간의 약 10% 영역에서 용점 이상의 온도 영역이 발생하였다. 따라서 레이저 에너지 180mW 인 경우가 35mW 인 경우보다 폭압에 의한 둔덕 형성이 많을 것으로 예측할 수 있다. 실제로 실험에서도 레이저 에너지 35mW 인 경우 둔덕의 높이는 20nm, 180mW 인 경우는 약 36nm 의 둔덕이 발생하는 것이 확인되었다. 그러나 이러한 방법의 의한 둔덕 높이의 정량적 예

측은 어려운 것으로 생각되며, 단지 상대적 비교로서의 의미만 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 펄스 레이저 미세 패터닝 공정 해석 방안을 제시하고, 해석과 실험 결과의 비교 분석을 통한 검증은 수행하였다.

(1) 상용 유한요소 프로그램을 이용한 열전달 해석과 그 결과 얻어진 온도장 분석을 통하여 펄스 레이저 가공에 의한 크롬 박막의 제거량을 예측하였다.

(2) 상변화를 고려한 과도 열전달 해석을 수행하였으며, 특정값 이상의 온도 영역은 소재가 제거된 것으로 가정하여 가공량을 예측하는 방법을 제안하였다.

(4) 펄스 레이저와 소재 사이의 물리적 상호작용을 유한요소법으로 모사하기 위하여, 일부 열전달 관련 물성치를 조절하는 방법을 제시하였다.

(5) 해석 결과와 실험 결과가 양호한 일치를 보이고 있었으며, 제안된 가공량 예측 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

(3) 과도 열전달 해석 결과 얻어진 레이저 펄스 조사에 따른 용점 이상 온도 영역의 발생 시점을 이용하여 폭압에 의한 둔덕 발생 경향을 예측할 수 있는 가능성을 보여 주었다.

후기

본 연구는 과학기술부 핵심연구 개발사업인 “첨단레이저 응용 미세가공 기술 개발”의 일환으로 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] S. Kolossov, E. Boillat, R. Glardon, P. Fisher, M. Locher, 2004, 3D FE Simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process, Int. J. machine Tools & Manufacture, Vol 44.

pp.117~123

- [2] J. L. Ocana, M. Morales, C. Molpeceres, J. Torres, 2004, Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments, Appl. Surface Science
- [3] J. C. Conde, F. Lusquinos, P. Gonzalez, J. Serra, B. Leon, A Dima, L. Cultrera, D. Guido, 2004, Finite element analysis of the initial stages of laser ablation process, Thin Solid Films, Vol. 453-454, pp.323~327
- [4] Ji Yeon Choi, Jae Gu Kim, Bo Sung Shin and Kyung Hyun Whang, 2003, Micromachining of Cr Thin Film and Glass Using an Ultrafast Pulsed Laser, J. Optical Society of Korea, Vol. 7, pp . 160~165
- [5] LS-Dyna user's manual, LSTC