

UV 펄스 레이저 가공의 구리 박막 두께에 따른 열-구조 연성 해석

신민재, 신보성[✉]

부산대학교 ERC/NSDM

Coupled Thermal-Structure Analysis of UV Laser Pulsing according to the Thickness of Copper Film on the Surface of Polyimide

Minjae Shin, Bosung Shin

ERC/NSDM, Department of Mechanical Engineering, Pusan National University

Abstract

Recently advanced laser processing is widely introduced to improve the efficiency of micro part production and to reduce the rate of inferior goods. In this paper the trend of delamination of single layer with both thin copper and polyimide according to the variation of copper thickness was investigated using the coupled thermal-structural analysis of ANSYS. From these analyses results, some conclusions were obtained. Firstly, the maximum temperature was increasing with respect to decrease of copper thickness. Secondly the maximum strain which was in general estimation the main effect of the delamination was observed in case of the copper thickness of 5 μm . Finally the trend of the delamination was decreasing with increasing the thickness of copper layer.

Keywords: UV laser(UV 레이저), FEA(유한요소해석), Coupled thermal-structure analysis(열-구조 연성 해석), Copper film (구리 박막), Single layer(단층)

1. 서론

최근의 산업 시스템의 발전은 시간이 지날수록 고효율, 고정밀화 및 고속화 되고 있는 추세이다. 특히 레이저 가공 분야에서는 첨단 부품 및 장비들의 효율을 높이고 불량률을 줄이기 위하여 더욱 정밀하고 신속한 가공을 요구하고 있으며 이에 따른 연구가 진행되고 있다.

송선아 등은 폴리이미드 필름 위에 두께가 다른 구리(copper, Cu) 박막을 증착하여, 변형률 속도에 따른 인장 시험을 수행하였다. 또한 변형이 진행되는 과정 중에, 박막의 전기 저항 변화를 측정하였으며 박막 두께에 따른 거동 변화를 관찰하였다.¹ 신보성은 구리 박막 두께에 따라 시편의 미세 홀 가공 결과를 통하여 기존에 소개된 공정과는 달리 노광 마스크나 고온 고압의 분위기가 필요 없이 상온에서의 마이크로-나노 복합 구조체를 신속하게 제작하기 위한 새로운 355nm

UV 레이저의 공정을 제안하고, 동시에 액적(water droplet) 분리용 마이크로-나노 박막 필터 시제품을 제작하였다.² 또한 조해용 등은 폴리이미드(polyimide, PI) 재료에 대하여 UV 레이저를 이용하여 표면 개질을 수행하였으며, 특히 레이저 빔의 에너지 프로파일의 변화에 의한 표면 개질 특성을 분석하였다.³ 안성환 등은 이동하는 열원을 고려하여 레이저 가공의 유한요소해석을 통하여 대면적의 레이저 가공 후 최종 온도 분포를 예상하기 위한 방안을 제시하고 그에 따른 효율성을 검증하였다.⁴ 또한 이정환 등은 높은 변형률 속도(strain rate) 효과를 고려한 UV 레이저 싱글 펄스의 유한요소 해석 모델을 제안하고 전산해석 결과를 Zhang 등의 연구 결과와 비교함으로써 이에 대한 유효성을 제시하였다.⁵ 조해용 등은 상용 유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 금형 강의 레이저 폴리싱 해석을 수행하였으며 빔 흡수율을 변화시켜 시뮬레이션 한 결과와 동일 조건의 실험 결과와 비교, 분석하여 적정 폴리싱 조건을 설정하였다.⁶

투고일 : 2013년 6월 19일 심사완료일 : 2013년 6월 24일

계재승인일 : 2013년 6월 25일

교신저자 : 신보성 ✉ bosung@pusan.ac.kr

이와 같이 레이저 가공에 관련된 연구는 실제 레이저 가공 결과 측정하는 기법을 통한 표면에 관한 연구가 주를 이루고 있으나 이를 분석하고 경향을 예측하기 위하여 많은 시간과 비용이 발생하는 비효율적인 측면이 있다. 이를 해결하기 위하여 실제 실험을 통한 연구가 아닌 전산 해석을 통한 레이저 가공 표면의 경향성을 파악하고 예측하여 실제 레이저 가공에 적용하여 비효율적인 부분을 개선하고 더욱 정밀한 가공을 할 수 있는 여러 가지 선행 연구들이 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 단층의 구리 두께에 따른 모델의 레이저 가공 결과를 토대로 상용 해석 프로그램인 ANSYS workbench를 이용하여 열-구조 연성해석(Coupled Thermal Structural analysis)을 실시 후 폴리이미드 위에 증착된 구리두께가 두께 위질수록 구리박막 표면의 온도, 응력 그리고 변형률의 변화에 대한 경향성을 판단하고 이에 따른 적절한 해석 조건을 제시하고자 한다.

2. 유한요소 해석

2.1 해석 모델

본 연구에서의 해석 모델은 Fig. 1과 같은 형태로 유한요소 모델(finite element model)로 구성하였으며 윗면은 구리(copper) 재질로 각각 4 μ m, 5 μ m, 6 μ m 두께로 구성되어 있으며 아랫면은 폴리이미드(polyimide) 재질로 25 μ m의 두께로 구성되었다.

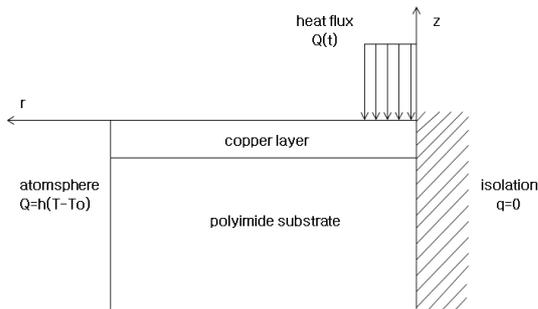


Fig. 1 Boundary conditions of solution domain.

또한 Fig. 2와 같이 외부에서 가해지는 레이저 빔의 조사는 구리 코팅 층의 표면에 유입되는 레이저 가공 부분에 열 유속을 적용하여 해석을 실시하였으며 레이저 펄스 적용시간에 따른 열 유속량은 Table 1과 같이 입열 플럭스(flux)를 시간

의 함수로 입력하였다. 그리고 모든 면에서 대기에 노출된 면과 상온의 대기 사이에 대류 열전달 현상을 고려하였으며 입열로 인한 열 변형은 없는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

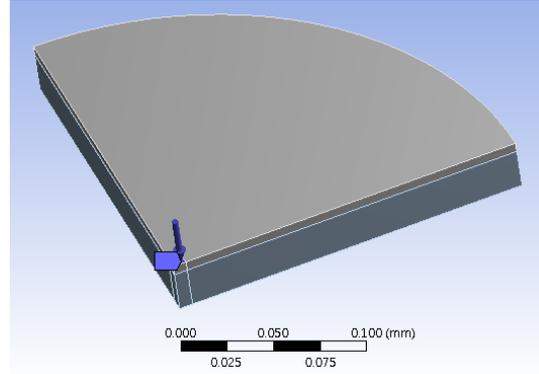


Fig. 2 Analysis model with the thickness of 0.2 μ m.

모델 표면층에서의 레이저 에너지 흡수와 열전달 및 내부 열전달을 다음과 같은 식을 적용하였다.

$$Film: (\rho C)_{film} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k_{film} \frac{\partial T}{\partial x}] + (1-R)Q(t) \quad (1)$$

$$Substrate: (\rho C)_{substrate} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k_{substrate} \frac{\partial T}{\partial x}] \quad (2)$$

Table 1 Tabular data of heat flux

Steps	Time [s]	Heat Flux [W/mm ²]
1	0	0
2	5e-9	1.6e5
3	2e-8	1.6e5
4	2.5e-8	0

여기서 흡수율 재료의 표면 조도 조건과 조사되는 레이저 파장과 재료의 표면온도에 영향을 받으며 이중 재질 간의 연전도도를 고려할 때 모재와 코팅 층의 결합은 완전한 결합으로 가정하고 접촉저항은 없는 것으로 가정하였으며 코팅 층의 유동은 고려하지 않았다. 또한 금속 표면에서 레이저 빔의 반사율은 표면에 입사되는 레이저 빔에 대하여 반사되는 부분의 비율로서 0~1 사이의 값을 갖는다.⁷ 본 연구에서 사용된 UV 레이저의 파장은 355nm이므로 구리의 반사율은 Fig. 3와 같이 약 0.3의 반사율을 가지는 것을 고려하여 해석을 수행하였다.

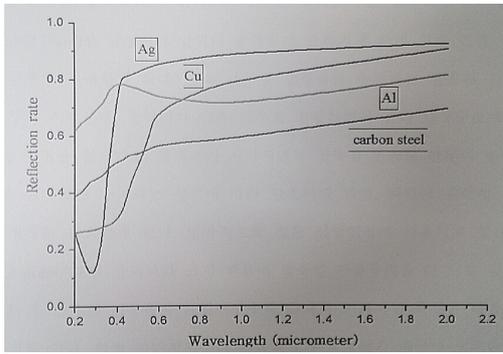
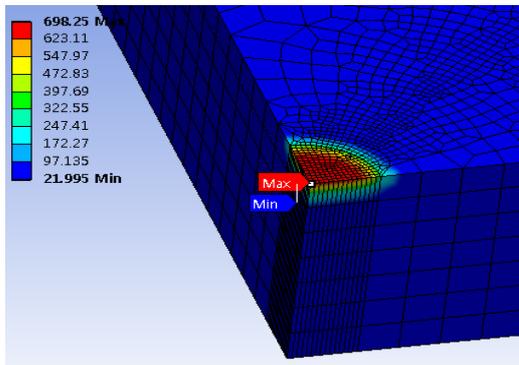


Fig. 3 Reflectance of some metals according to wavelength.⁷

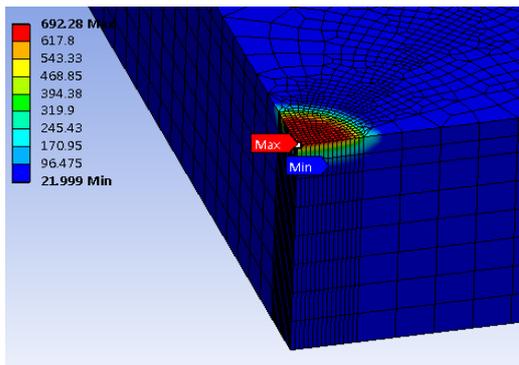
3. 해석 결과

3.1 구리 두께에 따른 온도 분포 결과

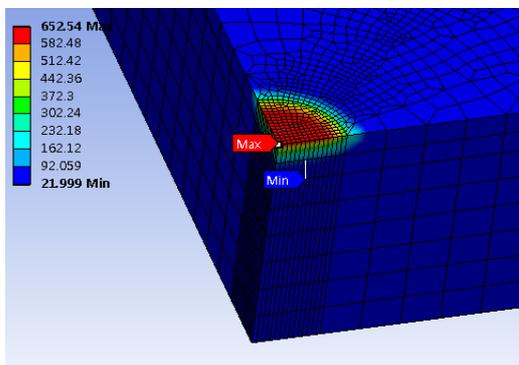
Fig. 3은 구리 두께에 따른 온도 분포 결과를 나타낸 것이다. 구리 두께가 증가할수록 구리 표면의 최고 온도 값은 구리 두께가 4 μm 에서 가장 높은 값을 갖는 결과가 나타났으며 열원의 중심 부에서 가장 높은 온도 값이 나타남을 확인하였다. 이 때 4 μm 의 구리 두께에서 나타난 최대 온도(698.25 $^{\circ}\text{C}$)가 구리의 용융점인 1,084 $^{\circ}\text{C}$ 를 넘지 않으므로 구리층의 용융은 일어나지 않을 것이라 판단된다. 또한 레이저가 조사된 구리 박막 부분에서 집중적으로 온도 변화가 나타나는 경향성을 확인하였다. 이는 구리가 PI 보다 상대적으로 열전도도가 훨씬 높기 때문으로 추측된다.



(a)



(b)



(c)

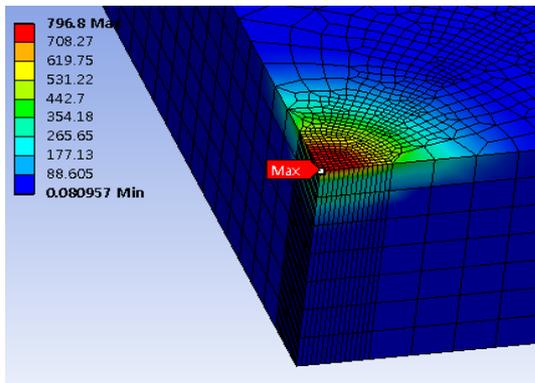
Fig. 3 Temperature result with the thickness of (a) 4 μm , (b) 5 μm , and (c) 6 μm , respectively.

3.2 구리 두께에 따른 응력 분포 결과

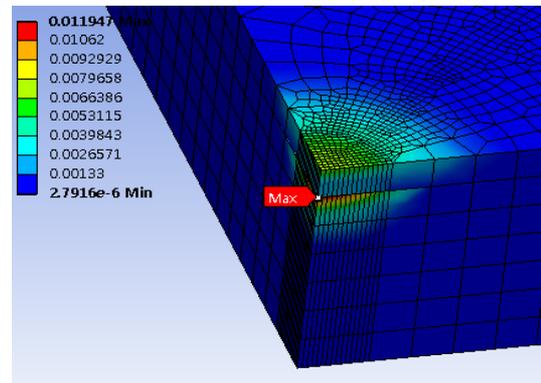
Fig. 4는 구리 두께에 따른 응력 분포를 나타내었다. 온도 분포 결과와 달리 구리 두께가 증가할수록 최대 응력 값도 증가하다가 다시 6 μm 에서 응력 값이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 구리 두께가 5 μm 에서 가장 높은 값을 가진다는 것을 확인하였다. 또한 구리의 항복 강도는 280MPa 이므로 구조적으로 해석에 사용된 모든 두께에서의 최대 응력 값은 구리의 항복 강도보다 높은 값을 가지므로 레이저가 조사되는 지점에서 예상한 바와 같이 어느 정도의 영구변형인 소성 변형이 발생될 것이라 판단된다.

3.3 구리 두께에 따른 변형률 분포 결과

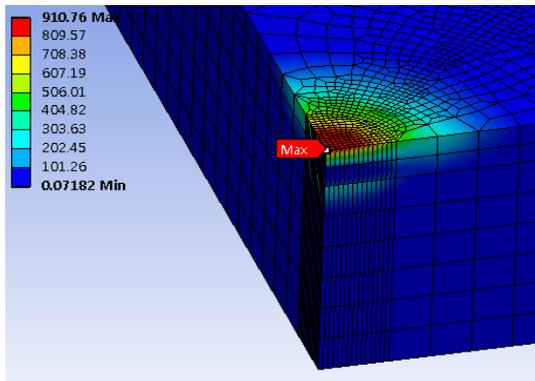
Fig. 5는 구리 두께에 따른 변형률 분포 결과를 나타내었다. 구리 두께가 6 μm 에서 가장 낮은 변형률 값을 가지며 레이저가 조사되는 구리 상단부에서 최대 변형률 값이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 4 μm 및 5 μm 에서는 최대 변형률 값이 구리층의 하부인 폴리이미드와이 경계면에서 발생하는 것을 확인하였다. 그러므로 상대적으로 4 μm 및 5 μm 에서는 구리와 폴리이미드에서 박리 현상이 발생할 것이라 판단되며 두께가 두꺼운 6 μm 에서는 입력되는 열 유속이 두께방향으로 열전달은 일어나지만 구리층과 폴리이미드 경계면에서의 박리 현상이 발생하지 않을 것이라 예상된다.



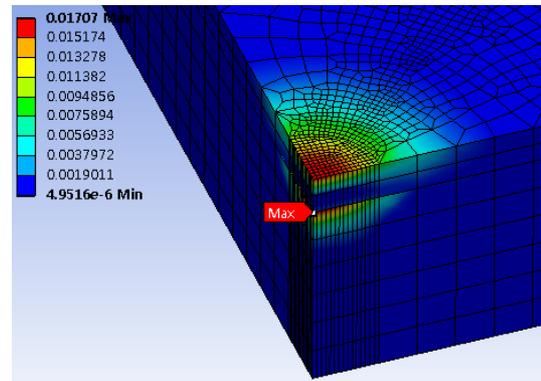
(a)



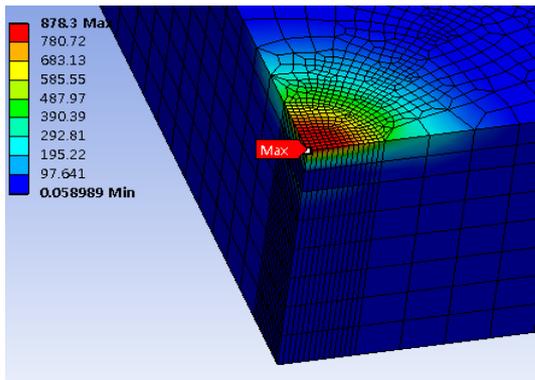
(a)



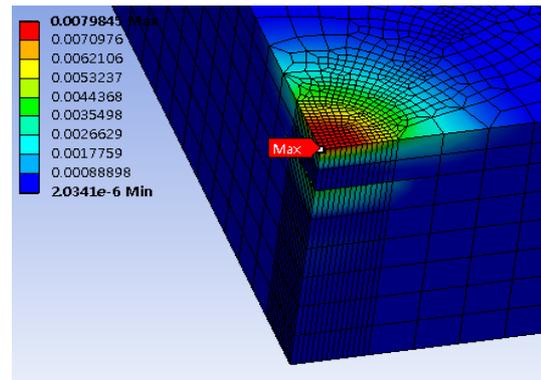
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 4 Heat flux result with the thickness of (a) 4 μ m, (b) 5 μ m, and (c) 6 μ m, respectively.

Fig. 5 Equivalent(von-Mises) strain result with the thickness of (a) 4 μ m, (b) 5 μ m, and (c) 6 μ m, respectively.

본 연구를 통해 확인한 해석 결과를 바탕으로 Table 2와 같이 정리하였다. 구리두께 4 μ m 및 5 μ m에서는 온도, 응력 및 변형률 분포에서 최대값만 다르며 같은 경향성을 나타낸 반면, 6 μ m에서는 다른 경향성을 나타내는 것을 확인하였다. 특히 구리 두께가 5 μ m에서 최대 응력 및 폴리이미드에서의 최대 변형률이 발생하는 것으로 나타나므로 실제 가공시 박리 현상이 가장 잘 나타날 것이라 예상된다.

Table 2 Results of analysis

Thickness [μ m]	Temperature [$^{\circ}$ C]	von-Mises stress[MPa]	von-Mises strain
4	698.25	796.8	0.011947
5	692.28	910.76	0.01707
6	652.54	878.3	0.007985

4. 결론

본 논문에서는 폴리이미드 기반으로 표면에 코팅한 구리의 두께를 변화하면서 유한요소기법으로 열-구조 연성 해석을 수행하였다. 또한 해석 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 구리 두께가 증가할수록 구리표면의 최대온도의 해석 결과가 감소하는 경향을 확인하였으며 상대적으로 4 μm 에서 가장 높은 수치가 나타났다.
- 2) 구리 두께가 4 μm , 5 μm 에서는 최대응력 및 최대 변형률값이 증가하는 경향이 나타났으며, 그 부위는 모재 기관인 폴리이드 경계면에서 발생하였다. 그러나 두께가 상대적으로 두꺼운 6 μm 에서는 오히려 최대 응력 및 최대 변형률 값이 감소하는 결과가 나타났으며, 그 부위도 구리 표면에서 발생함을 확인하였다.
- 3) 이러한 해석 결과를 통하여 입력되는 용융이 일어나지 않는 레이저 열 유속량에 대하여 4 μm , 5 μm 의 두께에서는 구리와 폴리이미드 경계층에서 충분히 박리 현상이 발생할 것이라 예상되며, 상대적으로 두꺼운 6 μm 의 구리 코팅 경계면에서는 박리 현상이 거의 발생하지 않을 것이라 판단된다.

다음과 같은 결론을 통하여 구리 두께에 따른 레이저 가공의 박리현상의 발생 경향 및 최적 조건을 예상할 수 있었으며, 이러한 컴퓨터 시뮬레이션 해석 결과를 바탕으로 추후 실제 레이저 가공 실험을 수행하여 이러한 결과를 비교 분석함으로써 첨단 박막 소재의 이종 박막 기관의 초정밀 가공분야에 응용할 수 있으리라 사료된다.

References

- 1) Sun-Ah Song, Jae-Hyun KIM, Seung-Woo Han, Sang-Joo Lee and Hak-Joo LEE, "A study on deformability of copper thin film on polyimide substrate," Proceedings of the 2007 Spring Conference of the Korean Society for Mechanical Engineers, pp. 6-11, 2007.
- 2) Bo Sung Shin, "Rapid Fabrication of Micro-nano

Structured Thin Film for Water Droplet Separation using 355nm UV Laser Ablation," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 7, pp. 1-2, 2012.

- 3) J. Y. Oh, B. S. Shin, D. S. Park, "A Study on Polyimide Surface Modification according to Energy Profile of UV Laser," Proceedings of the 2011 Autumn Conference of the Korean Society for Precision Engineering, pp. 613-614, 2011.
- 4) S. H. Ahn, C. M. Lee, "A Foundation Study on the Laser Process with FEM Analysis by Moving Heat Source," Proceedings of the 2008 Autumn Conference of the Korean Society for Precision Engineering, pp. 709-710, 2008.
- 5) Jung-Han Lee, Jae Yong Oh, Sang Hu Park, Bo Sung Shin, "Computational Analysis of 355nm UV Laser Single-Pulsed Machining of Copper Material Considering the Strain Rate Effect," Journal of Koeran Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 9, No. 3, pp. 56-61, 2010.
- 6) H. Y. Cho, K. W. Kim, D. B. KIM, J. G. Park, J. H. Lee, D. S. Shin, J. K. Park, "Study of Finite Element Analysis for Laser Polishing," KSMTE Spring Conference 2013, pp. 297, 2013.
- 7) Jung-Han Lee, "A Study on Photothermal and Photomechanical Ablation Characteristics and Analysis of 355nm UV Laser Micromachining," School of Mechanical Engineering, Graduate School, Pusan National University, pp. 5-6, 2012.
- 8) "레이저빔 응용 가공기술," 한국기계연구원, 1998.