



공학전문석사 학위 연구보고서

알루미늄 박막의 레이저 가공 경향성 예측에 관한 연구

Numerical analysis to evaluate the performance of laser ablation of Al thin film layer

2020 년 2 월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

김 지 훈

알루미늄 박막의 레이저 가공 경향성 예측에 관한 연구

Numerical analysis to evaluate the performance of laser ablation of Al thin film layer

지도 교수 고 승 환

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함 2020년 2월

> 서울대학교 공학전문대학원 응용공학과 응용공학전공 김 지 훈

김지훈의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함 2020년 2월



국문초록

레이저는 디스플레이 산업의 다양한 분야에서 사용된다. 패널 커팅, 필 름 커팅과 같은 절삭 공정과 셀 실링, 마킹 등 여러 공정에 폭 넓게 사 용되고 있다. 디스플레이 패널에 발생한 불량을 수리하는 리페어 공정에 서는, 앞서 열거한 공정들보다 더 정밀하게 가공 폭과 깊이를 제어해야 한다. 결함만 제거하고 정상 회로에 영향을 끼치지 않아야 하기 때문에, 가공 대상 물질을 완전하게 제거하면서 동시에 주변부 혹은 하부막을 손 상시키지 않아야 한다. 이 때 수 십 나노미터 단위의 깊이 제어와 마이 크로 미터 단위의 가공 폭 제어가 필요하다. 이처럼 미세한 차이로 가공 의 성공과 실패가 갈리게 되므로 초기 조건 설정, 가공 품질 관리가 필 수적이다. 일반적으로 리페어 공정의 가공 품질 확인은 육안 검사 및 단 면 검사를 통해 이뤄지지만, 정확성과 분석 시간의 문제가 있다. 이 보 고서에서는 디스플레이 회로에 해당되는 티타늄, 알루미늄 복합 박막의 극 초단 레이저 가공 메커니즘에 대해 알아본다. 그리고 수치 해석을 통 해 조건에 따른 가공 결과의 변화를 예측해보고, 이를 통한 가공 성능 향상 가능성에 대해 논의해본다.

시뮬레이션에서의 주요 결과는 가공 대상막의 제거 여부와 비대 상막의 손상 마진에 따라 가공 범위를 가져갈 수 있다는 것이다. 가공 파워를 조절하여 가공성을 관리하는 것이 유리한 것으로 보이며 빔의 크 기와 스캔 속도는 고정 값으로 사용하는 것이 유리할 것으로 파악된다. 또한 시뮬레이션을 통한 가공 조건의 설정, 유지 관리, 신제품에의 적용 가능성을 엿볼 수 있었다.

주요어 : Laser machining, FEM, Ablation 학 번 : 2019-23016

목 차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 목적	4
제 3 절 연구의 구성 및 개요	6
제 2 장 레이저 박막 가공의 연구 현황	7
제 1 절 OLED 디스플레이 리페어 가공 현황	7
제 2 절 극초단 레이저를 이용한 가공 시뮬레이션 연구	9
제 3 장 조건별 시뮬레이션	11
제 1 절 시뮬레이션 조건	11
제 2 절 Case별 시뮬레이션 결과	19
제 3 절 시뮬레이션 결과 분석	34
제 4 장 결론	45
제 1 절 요약	45
제 2 절 시사점	46
제 3 절 한계 및 후속 연구	47
참고문헌	48
Abstract	50

표 목차

[표 3-1]	기하구조 내 물질들의 물성표	
[표 3-2]	레이저 파라미터	
[표 3-3]	레이저 파워 변경 조건표	
[표 3-4]	스캔 속도 변경 조건표	
[표 3-5]	빔 크기 변경 조건표	
[표 3-6]	조건별 가공 결과	

그림 목차

[그림	1-1] 패널 크기별 결함의 수율 영향	2
[그림	1-2] OLED TFT 제조 공정 흐름도. 검사, 리페어	공정3
[그림	1-3] 레이저 종류에 따른 Heat Affected Zone	4
[그림	2-1] 레이저 리페어 설비 구성	7
[그림	2-2] 가공 방법	8
[그림	3-1] 시뮬레이션 화면	11
[그림	3-2] 가공 대상물의 기하구조	12
[그림	3-3] 메시 구성	14
[그림	3-4]레이저 파워별 질량 감소율	20
[그림	3-5]레이저 파워별 Ti1 질량 감소율	21
[그림	3-6]레이저 파워별 Al 질량 감소율	21
[그림	3-7]레이저 파워별 Ti2 질량 감소율	22
[그림	3-8]레이저 파워별 SiN 질량 감소율	23
[그림	3-9]스캔 속도별 전체 질량 감소율	25
[그림	3-10]스캔 속도별 Al 질량 감소율	26
[그림	3-11]스캔 속도별 Ti2 질량 감소율	27
[그림	3-12]스캔 속도별 SiN 질량 감소율	
[그림	3-13] 레이저 빔 지름에 따른 전체 질량 감소율	30
[그림	3-14] 레이저 빔 지름에 따른 Ti1 질량 감소율	31
[그림	3-15] 레이저 빔 지름에 따른 Al 질량 감소율	31
[그림	3-16] 레이저 빔 지름에 따른 Ti2 질량 감소율	32
[그림	3-17] 레이저 빔 지름에 따른 SiN 질량 감소율	33
[그림	3-18] 레이저 파워별 가공 깊이 변화	37
[그림	3-19] 스캔 속도별 가공 깊이 변화	40
[그림	3-20] 레이저 빔 지름에 따른 가공 깊이 변화	43

제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경

레이저를 이용한 가공은 다양한 산업 분야에 걸쳐서 적용되어 있다. 그중 디스플레이 산업에서는 특히 여러 공정에 걸쳐 광범위하게 레이저를 사용하고 있는데, 주로 수 밀리미터부터 마이크로 단위의 미세한 공차 범위 안에서의 가공이 필요한 공정에서 사용되고 있다. 그 중 하나인 레이저를 사용한 TFT(Thin Film Transistor) 회로의 리페어 공정에서는 가공 깊이 방향에 대해서 수백 나노미터 단위의 조절이 필요하다.

디스플레이 패널의 크기가 커지고 다양한 용도로 사용됨에 따라 리페어 공정의 역할이 커지고 있다. 휴대폰용 모바일 디스플레이 크기는 초창기 3인치대에서 6인치대까지 커졌으며, 자동자용 디스플레이, 노트북, TV에도 OLED(Organic Light Emitting Diode) 패널이 도입되고 있다. 패널의 크기와 리페어 공정의 수율 기여에는 밀접한 관련이 있는데, 패널 크기가 커짐에 따라 결함을 수리했을 때의 수율 효과가 달라지기 때문이다. [그림 1-1]을 참조하면 서로 다른 크기의 패널에서의 리페어 효과를 볼 수 있다. 원장 기판 내에 25개의 패널이 있을 경우 1개의 결함을 수리하면 4%의 수율 효과를 얻을 수 있지만, 패널 크기가 커져서 원장 기판 내에 4개의 패널만 있을 경우에는 25%의 수율 효과를 얻을 수 있다. 따라서 제품의 화면 크기가 커질수록 각각의 결함에 대한 가공 성공률이 큰 이슈가 된다.

1



[그림 1-1] 패널 크기별 결함의 수율 영향

리페어 공정은 TFT 회로의 단계별 막 생성 과정중의 하나로, 포토 공정에서 패터닝 된 폴리실리콘, 게이트 전극, 소스-드레인 전극에 발생한 결함을 제거하는 공정이다. [그림 1-2]의 공정 개략도를 참고하면, 유리 기판 위에 전극 및 절연체가 형성되는 과정을 볼 수 있다. 이 과정에서 금속 전극막이 형성된 시점에서 광학 또는 전기 검사를 통해 결함을 검출해낸다. 결함 검출의 목적은 직전 공정인 전극 형성 과정에서 발생한 이상을 감지하는 것과, 리페어 가공을 통해 수리할 수 있는 결함을 걸러내는 것이다. 검출된 결함은 불량의 원인계별로 분류되고 그 중 가공할 수 있는 불량은 리페어 설비로 보내진다.

. 생산 과정

회로 생성 - 결함 검사 - 분류 - 양품화 - 後 공정 진행 - 양/불 검사

· 양품/불량 구분 양품: 정상품, 리페어양품 불량: 미검출, 리페어 비대상, 리페어 불가, 리페어 실패 [그림 1-2]에서 볼 수 있는 각각의 절연막과 금속막의 두께는 수백 나노미터 수준이고 형성된 배선과 배선 사이의 간격은 수 마이크로미터 수준이다. 따라서 가공 대상 막 외의 물질에 영향을 끼치지 않기 위해서는 막 두께 및 선 폭과 동등하거나 더 작은 범위에서의 가공범위 조절이 필요하다.

이처럼 레이저 리페어 공정은 패널 크기의 증가에 따라 수율 영향도가 증가하고 있고, 주변부 영향도를 최소화해야 하는 가공 제약조건의 제약이 있다. 이러한 배경 하에서 가공 성공률을 향상하기 위해서는 가공 메커니즘의 이해와 현상의 해석이 필요하여 본 연구를 시작하게 됐다.



[그림 1-2] OLED TFT 제조 공정 흐름도. 검사, 리페어 공정

제 2 절 연구 목적

레이저를 사용한 어블레이션 가공 과정에서는 레이저 소스에 따라 열 영향을 받는 영역이 발생한다. 리페어 공정에서는 가공 대상 막 외에 열 손상으로 인한 영역을 최소화해야 가공 성공률을 높일 수 있다. 가공 대상 외에 열 영향을 받은 영역을 HAZ(Heat Affected Zone) 라 하며 [그림 1-3] 를 참조하면 레이저 어블레이션 가공에 따른 HAZ 발생 양상을 볼 수 있다.



[그림 1-3] 레이저 종류에 따른 Heat Affected Zone

레이저 소스는 한 펄스의 지속 시간에 따라 나노초, 피코초, 펨토초 레이저로 분류한다. 금속면에 레이저 빔이 인가되면 임계 값을 넘은 플루언스를 가질 경우 어블레이션 가공이 발생한다. 나노초 레이저의 경우 여러 개의 펄스가 금속 표면에서 열 축적을 일으켜 용융 반응으로 가공이 이루어지는 반면, 펨토초 레이저의 경우 이온의 안정화 시간 안에 한 개의 펄스에서의 가공이 끝나기 때문에 주변부로의 열 영향이 줄어든다. 즉, 펄스의 지속 시간이 짧을수록 HAZ의 발생이 적어지며 열 적 가공이 아닌 기계적 가공으로 물질을 제거할 수 있게 된다.

레이저 리페어 가공에서 주요 실패 원인으로는 하부 막 손상, 가공 막 잔류 등이 있다. 가공 깊이와 HAZ에 따른 손상의 확인은 리페어 설비의 상부 현미경 이미지로 파악하기 어렵고 정확성의 문제가 있어, 단면 분석의 방법으로 시료를 잘라 봐야 한다. 그 과정에서 시간과 재료의 소모가 발생하게 되며, 실시간으로 생산을 하고 있는 라인에서 수율 손실이 나타나게 된다. 본 연구에서는 가공 대상 영역 외에 손상을 최소화하는 공정 조건을 찾아보고, 그 과정에서 수치 해석 시뮬레이션을 사용하여 순간적이고 미세한 영역에서 발생하는 가공 양상을 해석해보고자 한다.

제 3 절 연구의 구성 및 개요

연구 현황에서는 우선 시뮬레이션 대상 조건의 파악을 위해 OLED 리페어 가공에 대해 설명하고 레이저 구성 및 가공 대상물에 대해 서술했다.

극 초단 레이저를 이용한 가공 시뮬레이션 연구에서는 기존의 관련
연구 결과를 살펴봤다. 어블레이션 가공 원리에 대해 서술하고 그것을
시뮬레이션으로 구현하기 위한 모델링 방법을 알아봤다.

3장에서는 레이저를 사용한 금속 박막 가공의 시뮬레이션을 위해 가공 대상물의 기하구조, 물성 설정, 가우시안 빔 적용, 메시 구성을 했다. 그리고 주요 인자인 레이저 파워, 스캔 속도, 빔 크기에 대해 각각 7가지 조건에 대해 시뮬레이션을 수행했다. 시간에 따른 물질별 질량의 변화를 표현하여 각 층이 제거된 정도를 나타냈다. 또한 시간에 따른 가공 깊이 그래프를 통해 적층막 중 어느 부분까지 가공이 되었는지를 조건별로 나타내었다. 후에 질량, 가공 깊이 결과에 따라 최적 조건을 찾아보았다.

결론에서는 앞선 시뮬레이션 결과를 요약하고 본 연구의 성과를 서술하였다. 시뮬레이션과 실제 거동과의 차이에 따른 한계를 기술하고 향후 연구 방향을 제시하였다.

제 2 장 레이저 박막 가공의 연구 현황

제 1 절 OLED 디스플레이 리페어 가공 현황

레이저 리페어 가공에서는 펨토 초 레이저 사용한 설비 구성을 한다. 1장 2절의 레이저별 열 영향도를 참고하면 나노 초 펄스를 갖는 레이저에서는 하부로의 열적 손상이 발생하게 된다. 이는 OLED TFT 회로 구조에서 하부의 금속 및 폴리실리콘 막에 영향을 끼치는 것을 의미하는데, 이런 경우 가공 후에도 해당 소자가 정상적으로 발광할 수 없게 된다.

[그림 2-1]을 참조하면 레이저 리페어 설비는 펨토 초 레이저를 갠트리 상부에 올리고 중간에 벤딩 미러 및 렌즈와 같은 광학계를 구성하여 광 경로를 형성하게 된다. 레이저의 발진은 PC를 통해 레이저 컨트롤러를 통해 조정하며, 광 경로상의 셔터와 연동하여 가공 시작 및 끝을 제어하게 된다. 레이저 빔은 벤딩 미러를 통해 상부에서 스테이지로 수직으로 떨어지게 되며, 슬릿 유닛과 빔 익스펜더를 통해 레이저 빔의 크기를 제어한다. 최종적으로 대물렌즈를 지나면서 기판으로 초점이 형성되어 가공이 일어나게 된다.



[그림 2-1] 레이저 리페어 설비 구성

이렇게 광학계를 거치는 과정에서 파장 변환을 위한 하모닉을 포함한 상부 판에서의 손실, 슬릿과 빔 익스펜더, 대물렌즈에서의 손실이 발생하게 되어 총 80% 수준의 에너지 손실이 발생하게 된다. 광학계의 각 유닛을 거치는 과정에서의 에너지 손실이 있지만 가공 방향의 형성과 설비 구동의 안정성 확보를 위해 이와 같이 구성하여 사용한다.

레이저는 일반적으로 NdYAG 다이오드 레이저를 사용하는데 파장은 IR 1030 nm, Green 515 nm, UV 343 nm 로 나누어 대상 물질에 따라 선택하여 사용한다. 본 연구의 대상 물질인 티타늄-알루미늄-티타늄 다층막에서는 흡수율을 고려하여 1030 nm 파장을 사용한다.



[그림 2-2] 가공 방법

불량의 가공은 [그림 2-2]와 같이 일반적으로 스캔 가공을 한다. 주변부의 금속 배선이 최대한 닿지 않는 범위에서 2 또는 3회 가공을 통해 가공 대상 물질을 제거한다. 일반적으로 하부막의 손상을 막기 위해 불량의 끝에서 끝 부분 까지만 가공을 하고 불량이 없는 위치는 가공하지 않는다.

제 2 절 극초단 레이저를 이용한 가공 시뮬레이션 연구

레이저를 사용한 금속 박막의 가공은 수 마이크로 초 이내에 가공이 끝나고 가공 대상 영역의 두께도 수 백 나노미터 내외로 미세하다. 그러므로 가공 현상의 이해에 있어서 소프트웨어를 사용한 수치 시뮬레이션을 통해 가공 중 혹은 가공후의 결과물에 영향을 끼치는 메커니즘을 이해하는 것이 하나의 방법이 될 수 있다. 시뮬레이션 과정에서 레이저 가공중의 광자와 가공 대상 물질간의 상호작용에 대해 어떤 메커니즘이 적용되는지 알아볼 수 있다. 그리고 레이저의 특성(파워, 펄스 에너지, 반복률, 파장, 펄스 지속시간 등)과 공정 조건(빔 크기, 스캔 속도, 스캔 횟수 등)과 같이 가공성에 영향을 끼치는 요인들의 영향도를 알아볼 수 있다.

고체에 대한 레이저 어블레이션 가공에서 가장 주요한 인자는 재료에 대한 광자의 흡수다. 레이저가 대상 물질에 조사되면 광자 에너지가 대상 물질의 전자에 전달되고, 전자 구름의 진동에 의해 운동 에너지로 변환된다. 이 에너지는 포논-전자 결합에 의해 격자로 전달된다. 따라서 레이저를 사용한 어블레이션 가공은 고전적인 열 전달 방정식 식을 사용하여 대상 물질 온도의 공간 및 시간 분포를 결정할 수 있다. [1][2]

그런데 전자와 이온 사이의 에너지 전달 시간은 0.1에서 수 ps 사이이다. 따라서 펨토초 단위의 펄스 지속시간을 갖는 레이저와 물질간의 상호작용에서는, 펄스의 지속시간이 열이 평형상태에 도달하는 시간 보다 짧기 때문에 고전 열 전달 방정식 만으로는 현상을 설명할 수 없다. 이 경우에는 열 전달 과정에 대해 크게 두 과정으로 나누어 설명할 수 있는데, 첫 번째는 전자가 여기되는 것이고 두 번째는 전자에서 이온 격자로 에너지가 전달되는 것이다. 전자가 여기되는 데에는 수십 펨토초가 소요되고 이온 격자로 에너지가 전달되는 과정은 수 십 피코초가 소요된다. 이 두 과정에는 10⁻³ 초 만큼의 시간 차이가 있기 때문에 각각을 분리하여 모델링 하는데 이 과정은 일반적으로 "Two Temperature Model" 이라 불린다. [3] [4]

$$\rho_e C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla [\mathbf{k}_e \nabla (\mathbf{T}_e)] - \kappa (T_e - T_l) + Laser(x, t) \quad (2.1)$$
$$\rho_l C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \nabla [\mathbf{k}_l \nabla (\mathbf{T}_l)] + \kappa (T_e - T_l) \quad (2.2)$$

 γm

식 (2.1), (2.2) 에서 T는 물질의 온도, 아래첨자 e와 l은 각각 전자와 이온 격자를 나타낸다. C는 비열용량, ρ는 밀도, k는 열 전도도, κ는 전자-광자 커플링 상수를 나타낸다. Laser(x,t)는 위치와 시간에 따라 인가되는 레이저를 나타낸다. 첫 번째 식을 살펴보면 전자의 주어진 밀도와 비열용량에 대한 시간에 따른 온도 변화는 전자의 온도 변화, 이온 격자와 전자의 온도 차이, 인가되는 레이저 빔에 따라 달라지는 것을 볼 수 있다. 두 번째 식에서는 이온 격자의 시간에 따른 온도변화가 전자와 이온격자의 온도 차이에 따라 달라짐을 볼 수 있다.

인가되는 레이저는 가우시안 형태를 띄는 외부로부터의 열 유속으로 표현할 수 있다. 식 (2.3)을 보면

$$-n * (\mathbf{k}_{\mathrm{l}} \nabla \mathrm{T}) = P_{\mathrm{laser}} * \frac{A_{0}}{\pi \left(\frac{r_{\mathrm{spot}}}{2}\right)^{2}} * e^{-\frac{r_{\mathrm{focus}}^{2}}{\left(\frac{r_{\mathrm{spot}}}{2}\right)^{2}}}$$
(2.3)

P_{laser} 는 레이저의 피크 파워, AO는 표면 흡수 계수, r_{spot}은 레이저 빔의 지름, r_{focus}는 초점 위치의 레이저 빔의 지름을 나타낸다. 외부에서 인가되는 열 유속을 레이저 입사빔으로 보면, 열 유속은 레이저의 파워와 흡수계수에 비례하고 입사빔의 면적에 반비례하며 포커싱이 되는 위치의 면적에 지수 함수적으로 감쇠한다. [5]

이후에 서술할 시뮬레이션 모델링에서는 인가되는 레이저를 열원으로 가정하고, 포커싱 위치에서 움직이는 열원을 형성하여 스캔에 따른 각 금속막 및 절연막의 어블레이션 가공에 대해 알아보았다. 레이저 빔은 가우스 분포를 가지는 것으로 설정하였고, 온도에 따른 표면 흡수 계수는 고정하여 계산했다

10

제 3 장 조건별 시뮬레이션

제 1 절 시뮬레이션 조건

1. 환경

레이저 어블레이션 가공을 모델링 하기 위해 레이저 소스에 의해 인가되는 에너지를 외부로부터의 열 유동으로 가정했다. 열 전달 및 어블레이션 온도 도달에 따른 상 변화를 모델링 했다. Time Dependent Study로 구성하여 시간의 흐름에 따른 각각의 물질의 온도 변화 및 가공 양상을 볼 수 있도록 했다. 가공 시간은 2회 스캔을 1 사이클로 설정하여, 레이저 빔이 왕복하는 시간을 1000 단계로 나누어서 관찰했다.



[그림 3-1]은 시뮬레이션 과정을 보여준다. 가공 대상물의 왼편부터 열원이 인가되기 시작하여 0.04초 흐른 상태이며, 물질 내에서의 열 전달이 됨에 따라 온도가 변하는 것을 볼 수 있다. 2. 기하 구조

[그림 3-1]을 참조하면, OLED 패널의 TFT 막 중 소스-드레인 및 하부 막 구조의 단면과 동일하게 2D 구조로 형상화 했다. 소스-드레인 막은 티타늄-알루미늄-티타늄의 삼중 막 구조이며 그 하부에 질화규소 화합물 층이 있다. 최상부와 알루미늄 하부의 티타늄 막은 구분을 위해 Ti1, Ti2로 설정하였다. 최 하부에는 게이트 막을 나타내는 몰리브덴을 배치했다. X축 방향으로의 길이는 8 um로 평균적으로 가공되는 불량의 크기를 따랐다.



[그림 3-2] 가공 대상물의 기하구조

[그림 3-2]에서 가공 대상 층은 Ti1, Ti2, Al으로, 해당 층이 완전히 가공됨과 동시에 하부의 SiN, Mo 층의 열 손상이 적을수록 성공적인 가공이라 할 수 있다. Ti1, Ti2 층은 35 nm로 Al 층에 비해 상대적으로 매우 얇으므로 빠르게 반응하여 가공될 것을 예측할 수 있다.

3. 물성

어블레이션 가공의 예측에 필요한 수치인 밀도, 열 전도도, 비열용량을 각각의 물질에 대해 입력했다.

명칭	기호	값	단위
밀도_알루미늄	rho_Al	2700	[kg/m ³]
열 전도도_알루미늄	k_Al	205	[W/m/K]
비열용량_알루미늄	Cp_Al	900	[J/kg/K]
밀도_티타늄	rho_Ti	4500	[kg/m ³]
열 전도도_티타늄	k_Ti	17	[W/m/K]
비열용량_티타늄	Cp_Ti	523	[J/kg/K]
밀도_몰리브덴	rho_Mo	10200	[kg/m ³]
열 전도도_몰리브덴	k_Mo	138	[W/m/K]
비열용량_몰리브덴	Cp_Mo	250	[J/kg/K]
밀도_질화규소	rho_SiN	3170	[kg/m ³]
열 전도도_질화규소	k_ SiN	20	[W/m/K]
비열용량_질화규소	Cp_ SiN	700	[J/kg/K]
어블레이션 온도	T_ablation	1000	[K]
흡수 계수	Ac	0.5	—

[표 3-1] 기하구조 내 물질들의 물성 표

각 물질의 밀도, 열 전도도, 비열용량은 열 전달 및 온도 변화의 시뮬레이션에 사용되었다. 각 물질이 어블레이션 온도 1000 K 이상이 되었을 때 가공된다고 가정하였다.

13

4. 메시

가공 대상 물질이 여러 층으로 구성되어 있고 가우시안 분포의 레이저 가공을 시뮬레이션 하기에 적합하도록 Free Triangular 형태를 사용했다. 주로 가공되는 위치인 Ti1~Ti2 까지는 40 nm 수준으로 메시를 형성했고, SiN 하부 부터는 실행 속도를 빠르게 하기 위해 60 nm 수준으로 형성했다.



[그림 3-3]을 보면 위에 서술한 메시가 구현된 모습을 볼 수 있다. 주 가공 층인 Ti1, Al, Ti2는 가장 조밀하게 구성했으며, SiN 층의 절반은 조밀하게, 그 하부로는 각 메시의 크기를 크게 만든 것을 볼 수 있다. 5. 레이저 파라미터

100 펨토초의 펄스 지속시간과 40 kHz의 반복률을 갖는 레이저를 이용한 가공을 가정하였다. 6.5 W의 피크 파워를 갖는다고 가정했을 때 2.6*10⁻² uW의 열원으로 근사하여 모델링 했다. 식 (2.4)를 활용하여 외부에서 유입되는 열 유동을 입력하였고, Triangle 함수를 통해 가공 대상 물질의 끝에서 끝으로 2회 스캔 가공을 표현했다.

명칭	기호	값	단위
레이저 빔 지름	r_spot	2	[um]
스캔 속도	scan_speed	15	[um/sec]
레이저 파워	LaserPower	$2.6*10^{-2}$	[uW]
반복률	Laserfreq	40	[kHz]
펄스 지속 시간	PulseDuration	$1*10^{-13}$	[sec]

[표 3-2] 시뮬레이션에 사용된 레이저 파라미터

[표 3-2]를 참고하면 레이저 빔의 지름은 2 um 이며 OLED 패널의 배선 간격을 고려하여 설정하였다. 그 외 스캔 속도, 레이저 파워, 반복률은 극초단 레이저를 이용한 가공에 사용되는 상용 값으로 설정했다. 6. 실험계획표

본 시뮬레이션은 레이저를 사용한 미세 가공에서 주요한 영향을 끼치는 레이저 파워, 스캔 속도, 빔 크기 총 3가지 변인을 설정하여 진행했다. 그 외의 기하구조, 메시, 물성 등의 조건은 앞서 설정한대로 시뮬레이션 간 일정하게 유지했다. 나머지 변인은 통제하였으므로 변화시킨 파라미터의 영향에 따라 어블레이션 가공의 정도가 다르게 나타날 것으로 예상하였다. 어블레이션 가공 정도에 따라 Til, Al, Ti2, SiN 층의 가공 정도가 달라지게 된다. 본 시뮬레이션 에서는 가공 대상층인 Til, Al, Ti2 층이 완전히 가공되면서 SiN층의 손상을 최소화 할 수 있는 가공 조건을 찾는 것을 목표로 했다.

명칭	기호	값	단위
레이저 빔 지름	r_spot	2	[um]
스캔 속도	scan_speed	15	[um/sec]
레이저 파워 1		$2.3*10^{-14}$	
레이저 파워 2		$2.6*10^{-14}$	
레이저 파워 3		$3.0*10^{-14}$	
레이저 파워 4	LaserPower	$3.3*10^{-14}$	[W]
레이저 파워 5		$3.7*10^{-14}$	
레이저 파워 6		$4.0*10^{-14}$	
레이저 파워 7		$4.3*10^{-14}$	

[표 3-3] 레이저 파워 변경 조건표

[표 3-3]은 레이저 파워에 따른 가공 영향을 파악하기 위한 레이저 파라미터 조건표이다. 레이저 빔 지름, 스캔 속도는 일반적으로 쓰이는 2 um, 15 um/sec 으로 고정하였다. 레이저 파워는 총 7가지로 변경하면서 가공 추이를 살펴봤는데, Ti1, Al, Ti2 층이 완전히 제거되지 않는 조건에서 시작하여 SiN 층에 손상을 주는 조건까지로 범위를 설정했다.

명칭	기호	값	단위
레이저 빔 지름	r_spot	2	[um]
레이저 파워	LaserPower	$2.6*10^{-14}$	[W]
스캔 속도 1		5	
스캔 속도 2		7	
스캔 속도 3		9	
스캔 속도 4	scan_speed	11	[um/sec]
스캔 속도 5		13	
스캔 속도 6		15	
스캔 속도 7		17	

[표 3-4] 스캔 속도 변경 조건표

[표 3-4]는 스캔 속도에 따른 가공 영향을 파악하기 위한 레이저 파라미터 조건표이다. 마찬가지로 통제되는 파라미터는 레이저 빔 지름, 레이저 파워이고 각각 2 um, 2.6*10⁻¹⁴ W 로 고정하였다. 스캔 속도는 총 7가지로 변경하면서 가공 추이를 살펴봤는데, 낮은 레이저 파워에서 가공하도록 설정했기 때문에 기존 15 um/s 의 가공 속도에서 점점 느리게 가공하는 조건으로 범위를 설정했다.

명칭	기호	값	단위
레이저 파워	LaserPower	$2.6*10^{-14}$	[W]
스캔 속도	scan_speed	15	[um/sec]
레이저 빔 지름		1.2	
레이저 빔 지름		1.4	
레이저 빔 지름		1.6	
레이저 빔 지름	r_spot	1.8	[um]
레이저 빔 지름		2.0	
레이저 빔 지름		2.2	
레이저 빔 지름		2.4	

[표 3-5] 빔 크기 변경 조건표

[표 3-5]는 레이저 빔의 크기에 따른 가공 영향을 파악하기 위한 레이저 파라미터 조건표이다. 마찬가지로 통제되는 파라미터는 레이저 파워, 스캔 속도이고 각각 2.6*10⁻¹⁴ W, 15 um/sec 로 고정하였다. 빔의 크기도 총 7가지로 변경하면서 가공 추이를 살펴봤다. OLED 패널의 해상도에 따라 대응이 가능하도록 해상도별 최소 배선 폭을 감안하여 1.2 um에서 2.4 um까지 파라미터를 변경하였다.

제 2 절 조건별 시뮬레이션 결과

1. 레이저 파워에 따른 가공 양상

어블레이션 가공이 발생되면 물질 제거에 따른 질량 감소량을 확인할 수 있다. [그림 3-4]는 레이저 파워에 따른 질량 감소율을 나타내는데, 예상할 수 있는 바와 같이 파워가 증가함에 따라 더 빠르게 가공 대상 물질의 질량이 감소함을 확인할 수 있다. 가공이 시작되고 0.3 초 까지의 구간에서 질량이 줄어들고, 0.6 초 까지의 구간에서는 유지되다가 이후 다시 줄어드는 것을 확인할 수 있는데, 이는 라인 스캔 가공의 영향이다. 2번의 스캔 중 첫 번째 스캔에서 일정 부분 가공이 되고 막의 끝부분에서 대상 물질을 벗어났다가 두 번째 스캔에서 다시 가공되는 것으로 이해할 수 있다.

이제 최상부에 위치한 Ti1 층부터 Al, Ti2 및 하부의 SiN 층까지의 막별 가공 양상을 살펴보자. [그림 3-5]를 참조하면 최상부에 위치해 있고 두께가 35 nm로 가장 얇은 Ti1층은 가공 시작 0.1 초 이후부터 급격한 질량 감소를 보인다. 그 과정에서 가공 파워에 따른 뚜렷한 차이는 보이지 않는데, 얇은 막 두께로 인해 짧은 시간안에 가공이 완료되기 때문이다. [그림 3-6]의 Al층은 레이저 파워에 따라 질량이 감소하는 시간이 뚜렷하게 차이가 나게 보이며, [그림 3-7]의 Ti2층도 Al층에 의한 영향으로 레이저 파워별 가공률 차이가 뚜렷하게 보인다.

가공 대상이 아닌 SiN막의 가공 양상은 [그림 3-8]에서 볼 수 있는데, 2.6*10⁻¹⁴ W 에서 4.3*10⁻¹⁴ W 의 범위에서는 가공되는 것이 보이지만 2.3*10⁻¹⁴ W의 파워에서는 가공되지 않음을 확인할 수 있다.

19





[그림 3-5]의 Til 질량 감소율은 파워에 따라 미세한 차이가 있으나 Til 층이 35 nm로 매우 얇으므로 유의미한 차이를 보이지 않는다.



[그림 3-6]의 Al 층에서는 레이저 파워에 따라 어블레이션 가공 정도의 차이가 확연하게 나타난다. 2.3*10⁻¹⁴ W, 2.6*10⁻¹⁴ W 를 제외한 나머지 조건에서는 Al 질량비가 0 까지 줄어들었고 이는 Al 층이 완전히 가공되었음을 나타낸다.



[그림 3-7] 에서는 Ti2 층의 가공 양상을 확인할 수 있다. Al 층의 하부에 35 nm 두께로 얇게 존재하므로 [그림 3-6]의 Al 층의 가공이 완료되는 시점에 따라 Ti2 층의 가공 시작점이 다르게 나타난다. Ti1 층과 같은 두께를 가졌지만 레이저 파워에 따라 가공 정도에 뚜렷한 차이를 보이는 이유이다. [그림 3-6]의 Al 가공 양상과 마찬가지로 2.3*10⁻¹⁴ W, 2.6*10⁻¹⁴ W 조건에서 질량비가 이이 되지 않았고 나머지 조건에서는 완전 제거되었음을 확인할 수 있다.



[그림 3-8] 에서는 SiN 층의 질량 감소율을 확인할 수 있다. 2.3*10⁻¹⁴ W의 가공 조건에서는 SiN 층의 질량 감소가 없고 그 이상의 가공 파워에서는 질량 감소가 확인되고 있다. 최대 가공 파워인 4.3*10⁻¹⁴ W 에서 20%의 SiN 층 손상을 보이는데, 이는 허용할 수 있는 수준으로 Ti2 층이 완전 가공되는 3.0*10⁻¹⁴ W 이상의 가공 조건을 채택했을 때 잔류 불량 없이 가공이 완료될 수 있음을 확인했다. 2. 스캔 속도에 따른 가공 양상

[그림 3-9]는 스캔 속도에 따른 가공 대상 물질 전체의 질량 감소율이다. 레이저 파워 및 전체 파라미터를 일정하게 유지하고 13 um/s, 15 um/s, 17 um/s 각각의 가공 속도에서 질량 감소율의 변화를 알아봤다. 예상할 수 있는 바와 같이 속도가 느릴수록 더 빠르게 가공됨을 확인했다. 속도가 느릴수록 단위 시간동안 유입되는 열 유동이 커지기 때문이다. [그림 3-10], [그림 3-11], [그림 3-12]에서는 물질별로 시간에 따른 질량 감소를 확인할 수 있었다. 앞서 살펴본 레이저 파워 변경의 경우와 마찬가지로 Ti1 이후 Al이 가공되며 스캔 속도가 느린 순서대로 순차적으로 가공이 되는 것을 확인할 수 있다. 이 때 가공 속도가 가장 느린 5 um/s의 속도에서 Ti2 전체가 가공되지만 하부의 SiN 막도 열 손상에 의해 어블레이션 되는 것을 확인할 수 있다.





[그림 3-10]을 참조하면 스캔 속도가 5 um/s 인 경우 Al 층의 가공이 완료되는 것을 확인할 수 있다. 7 um/s 의 가공조건 에서는 Al의 질량이 0에 수렴하지 않아서 미세한 잔류가 남아있음을 알 수 있다.



Ti2 층의 질량 감소율을 보면 앞서 Al 층의 시뮬레이션 결과와 부합하는 것을 확인할 수 있다. [그림 3-11]을 참조하면 Al 층의 가공이 완료된 5 um/s 조건에서만 Ti2 층이 완전히 제거 되고 7 um/s 이상의 조건에서는 잔류가 남아있음을 볼 수 있다.



SiN 층의 질량 변화 그래프 역시 위의 결과와 부합한다. [그림 3-12]에서 5 um/s 의 가공 속도에서만 약 13%의 손상을 확인할 수 있고 나머지 층에서는 4% 미만의 손상을 확인 할 수 있다. 3. 레이저 빔 크기에 따른 가공 양상

[그림 3-13]은 레이저 빔의 크기에 따른 시간대별 가공 양상을 보여준다. 동일한 레이저 파워를 가질 때 지름이 클수록 단위 면적당 열 유동이 작아지기 때문에 가공 속도가 느려지는 것을 확인할 수 있다. 앞서 두 가공 양상과 마찬가지로 가공 시작부터 0.3 초 영역까지 질량이 줄어들다가 정체되는 스캔 가공의 형태를 볼 수 있다.

[그림 3-14], [그림 3-15], [그림 3-16], [그림 3-17] 에서는 대상 물질별 가공에 따른 질량 변화를 볼 수 있다. Til 층은 조건에 상관없이 빠르게 가공되고 이후 Al 층부터 가공 속도에 차이가 남을 확인할 수 있다.





Ti1 층은 가공 시작 후 0.1 초에 제거가 완료됨을 확인할 수 있다. Ti1 층이 35 nm의 얇은 두께를 갖기 때문에 빔 크기에 따른 유의차 없이 비슷한 양상으로 가공이 완료되었다.



Al 층의 질량 감소 양상을 살펴보면 빔 크기에 따른 가공 양상 차이를 확인할 수 있다. [그림 3-15] 에서 빔 크기가 작아질수록 좁은 영역에 열 유속이 집속 되어 가공이 빠르게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 빔 크기가 1.2 um ~ 2 um 까지는 Al 층이 완전히 제거 되고 2.2 um, 2.4 um 에서는 잔류가 남아있다.



Ti2 층에서도 Al 층 과 마찬가지로 빔 크기가 작을수록 가공이 빠르게 진행됨을 확인했다. 조건별로는 빔 크기가 1.2 um ~ 1.8 um 인 조건에서 Ti2 층이 완전히 제거되고 그 이상의 빔 크기에서는 잔류가 남음을 알 수 있었다.

32



SiN 층의 질량 변화 역시 빔 크기가 1.2 um인 경우 20% 손실로 가장 크게 나타난다. Ti2 층이 완전히 가공되는 가장 큰 빔 크기인 1.8 um 에서는 5.8%의 손실로 상대적으로 적게 제거됨을 확인할 수 있었다.

제 3 절 시뮬레이션 결과 분석

앞서 살펴본 시뮬레이션 결과는 가공 대상 물질의 가공 완료 여부, 하부 SiN 층의 손상 여부에 따라 성공, 실패를 나눌 수 있다. Ti1, Al, Ti2 층이 완전 가공되지 않을 경우 TFT 회로의 쇼트 불량을 유발하므로 가공 실패로 판별한다. SiN 층은 일부 손상되는 것은 가공 마진으로써 감안할 수 있으나, 완전하게 제거될 경우 하부의 Mo 층의 손상을 가져오므로 불량을 유발하게 된다. 따라서 Ti1, Al, Ti2가 완전하게 가공됨과 동시에 SiN 층이 최소한으로 손상되는 조건을 최적 조건으로 채택할 수 있다.

변수	조건	Ti1~Ti2 가공 여부	SiN 손상 여부
	$2.3*10^{-14}\mathrm{W}$	Х	Х
	$2.6*10^{-14}\mathrm{W}$	Х	Х
키고	$3.0*10^{-14}\mathrm{W}$	0	Х
가동 파의	$3.3*10^{-14}\mathrm{W}$	0	Х
-1 19	$3.7*10^{-14}\mathrm{W}$	0	\bigtriangleup
	$4.0*10^{-14}\mathrm{W}$	0	0
	$4.3*10^{-14}\mathrm{W}$	0	0
	5 um/s	0	\bigtriangleup
	7 um/s	Х	Х
الحال	9 um/s	Х	Х
스캔 소드	11 um/s	Х	Х
7-1-	13 um/s	Х	Х
	15 um/s	Х	Х
	17 um/s	Х	Х
빔 크기	1.2 um	0	О
	1.4 um	0	0
	1.6 um	0	\bigtriangleup
	1.8 um	\bigtriangleup	Х
	2.0 um	Х	X
	2.2 um	Х	X
	2.4 um	X	X

[표 3-6] 조건별 가공 결과

[표 3-6]은 가공 파워, 스캔 속도, 빔 크기의 각 조건별 가공 성공 여부를 나타낸다. 우선 7개의 가공 파워에 대해 Ti1, Al, Ti2 층이 완전히 가공되면서 SiN의 손상이 적은 조건은 3.0*10⁻¹⁴ W, 3.3*10⁻¹⁴ W, 3.7*10⁻¹⁴ W 3개다. 2.7*10⁻¹⁴ W 이하의 가공 파워에서는 Ti2를 완전히 제거하지 못하며, 4.0*10⁻¹⁴ W 이상의 가공 파워에서는 SiN의 손상이 커진다. 즉 레이저 가공 파워 관리에서 3.0*10⁻¹⁴ W ~ 3.7*10⁻¹⁴ W 까지는 가공 조건으로 채택할 수 있고, 레이저의 안정성 및 관리적인 측면에서 3.3*10⁻¹⁴ W 를 채택하여 가공 마진을 가져갈 수 있겠다.

스캔 속도에 따른 최적 조건을 찾으면 5 um/s 의 조건을 채택할 수 있다. 그 이상의 스캔 속도를 갖는 조건에서는 Ti2의 가공이 완료되지 않기 때문에 채택할 수 없다.

빔 크기에 따른 최적 조건은 1.6 um 이다. 1.8 um 이상의 조건에서는 에너지의 분산으로 가공이 완료되지 않고 1.4 um 이하의 조건에서는 SiN 층의 손상이 커진다.

이어서 살펴볼 [그림 3-18], [그림 3-19], [그림 3-20] 은 시간에 따른 가공 깊이의 변화를 나타낸 그래프다. 가공 대상물의 하나의 X좌표를 기준으로 Y축 방향으로의 적분으로 가공 깊이를 나타냈다.





[그림 3-2]의 기하 구조에서 참고할 수 있듯이 Til 층은 35 nm의 두께를 갖는다. [그림 3-18]의 첫 번째 2.3*10⁻¹⁴ W 그래프를 보면 파란색 실선으로 표시된 Ti1의 가공 깊이가 35 nm 까지 증가하다가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 0 nm 부터 35 nm 까지 Til 층이 가공 되었고 가지고 있는 두께 이상으로 제거될 수 없기 때문에 가공 완료된 것을 의미한다. 즉 Y축 방향으로 가공 깊이의 변동이 없을 때 해당 층이 가공 완료된 것을 알 수 있다. 첫 번째 그래프의 Til은 분리되어서 35 nm에서 가공이 멈췄지만 그 외의 3개 층은 한꺼번에 표시된 것을 볼 수 있다. Til층의 아래에 있는 Al층의 가공이 완료되지 않았기 때문에 Al, Ti2, SiN 층이 겹쳐져서 표시된 것이다. 두 번째 2.6*10⁻¹⁴ W 그래프에서는 Al 층이 더 많이 가공된 것을 볼 수 있다. Y축 방향으로의 가공 깊이가 320 nm 에서 530 nm 까지 확장되었고 Al층의 두께를 넘어서지 않았기 때문에 Al 층의 중간에서 가공이 끝났다는 것을 알 수 있다. 세 번째 3.0*10⁻¹⁴ W 그래프에서는 Al 층이 초록색 실선으로 분리되어 나온 것을 확인할 수 있다. Ti1 층의 35 nm와 Al 층의 600 nm를 모두 제거하고 총 670 nm 수준까지 가공이 되었다. 네 번째 3.3*10⁻¹⁴ W 조건 까지는 Ti2 층의 완전 가공이 보이지 않고 3.6*10⁻¹⁴ W 조건에서 Ti2 층이 빨간색 실선으로 분리된 것을 확인할 수 있다. 이후로 4.0*10⁻¹⁴ W, 4.3*10⁻¹⁴ W 조건으로 가공 파워가 강해질수록 SiN 층의 가공 깊이가 깊어짐을 확인할 수 있다. 따라서 SiN의 손상이 최소화 되면서 Ti2층까지 완전히 가공 된 3.6*10⁻¹⁴ W 조건을 채택할 수 있다. 3.3*10⁻¹⁴ W 조건에서도 Ti2 층의 가공이 완료된 것으로 보이지만, Ti2

층의 막 잔류 발생의 위험이 있기 때문에 채택할 수 없다. Ti2 잔류시의 불량 발생이 SiN 층의 일부 손상 보다 불량을 일으킬 확률이 높기 때문이다.

38











[그림 3-19]는 스캔 속도를 5 um/s 에서 17 um/s 까지 변경했 을 때 시간에 따른 가공 깊이를 나타낸다. 첫 번째 스캔 속도 5 um/s 그래프를 보면 Ti1, Al, Ti2 층이 모두 가공되고 SiN 일부까지 가공된 것을 볼 수 있다. 느린 스캔 속도로 인해 에너지를 전달받을 시간이 길 어져 Ti2 층 까지 완전히 가공된 것을 알 수 있다. 7 um/s 이상의 스캔 속도에서는 Al 및 Ti2 층이 완전히 가공되지 않은 것을 볼 수 있다. 특 히 가공 속도 5 um/s 에서 7 um/s 로 2 um/s 만 변경했음에도 전체 가 공 깊이가 130 nm 차이 남을 확인할 수 있었다. 스캔 속도의 변동에 따 른 가공성 차이의 민감도가 가공 파워 조건에 비해 큰 것을 알 수 있었 다. 5 um/s 의 스캔 속도에서 Ti2 층까지 완전히 가공되고, SiN은 30 nm 수준으로 미세하게 손상되었으므로 최적 조건으로 채택할 수 있 다. 7 um/s 이상의 가공 속도에서는 Ti2 및 Al 층의 미가공으로 인한 잔류 불량이 발생할 수 있으므로 채택할 수 없다.





$$x10^{-5}$$

Beam Radius = 1.6 um

Beam Radius = 1.8 um





[그림 3-20] 레이저 빔 지름에 따른 가공 깊이 변화

[그림 3-20]은 레이저 빔의 지름을 1.2 um 에서 2.4 um 까지 변경했을 때 시간에 따른 가공 깊이를 나타낸 그래프 이다. 앞서 살펴봤 듯이 레이저 빔의 지름이 작을수록 적은 면적에 에너지가 집중되어 어블 레이션 가공이 더 잘 일어나게 된다. 1.2 um의 지름을 갖는 조건에서는 Ti1, Al, Ti2 층이 모두 제거되고 SiN 층이 110 nm 까지 손상됨을 확 인할 수 있었다. 레이저 빔 지름 1.4 um 조건에서는 SiN 층이 70 nm 수준으로 손상된 것을 확인할 수 있었고, 지름 1.6 um 조건에서 SiN 손 상 30 nm 로 최소화되면서 가공 대상 층을 모두 제거함을 확인할 수 있었다. 지름 1.8 um 조건에서는 Ti2 층이 완전히 가공되지 않아 최적 조건으로 채택할 수 없었다. 지름 2.0 um 및 그 이상 에서는 Al 층까지 미가공이 발생함을 확인할 수 있었다.

제 4 장 결론

제 1 절 요약

본 연구에서는 레이저에 의한 금속막의 가공을 시뮬레이션 하기 위해, 가우시안 형태를 띠는 열원을 생성하여 어블레이션 가공을 모델링 하였다. 이후 3 가지 관점에서 가공 양상의 변화를 관찰하였는데 그것은 각각 레이저 파워, 스캔 속도, 레이저 빔 지름이다.

예상할 수 있듯이 어블레이션 가공의 정도는 레이저 파워에 비례하여 커졌다. 스캔 속도는 느려질 수록 가공이 더 강하게 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 열원의 속도가 느려 질수록 노출 시간이 증가하고, 그에 따라 열 유속의 유입이 증가했기 때문이다.

동일한 파워를 갖는 경우 레이저 빔의 지름이 작을수록 가공이 강하게 되는 것을 확인했다. 레이저 입사 면적이 작아 짐에 따라 좁은 영역에 강한 열 유동이 유입되었음을 확인할 수 있다.

질량 감소분과 가공 깊이를 비교하면 유효한 가공 마진을 확인할 수 있었다. 레이저 파워의 경우 3.0*10⁻¹⁴ W ~ 4.3*10⁻¹⁴ W 의 범위에서 가공 대상 층인 Ti1, Al, Ti2가 완전히 가공됨을 확인할 수 있었다. 가공 깊이의 측면에서는 3.0*10⁻¹⁴ W, 3.3*10⁻¹⁴ W 에서 SiN 층의 손실이 확인되지 않았지만 해당 조건에서도 Ti2의 질량까지 0으로 감소하였기 때문에 가공 조건으로 채택할 수 있었다. 3.0*10⁻¹⁴ W ~ 4.3*10⁻¹⁴ W 의 범위 중에서 SiN 층의 손상이 20% 수준으로 큰 4.0*10⁻¹⁴ W 이상의 조건을 제외하고 3.0*10⁻¹⁴ W ~ 3.7*10⁻¹⁴ W 조건을 사용할 수 있겠다. 스캔 속도의 경우 5 um/s 이하의 조건에서 정상 가공됨을 확인할 수 있었다. 레이저 파워의 변경에 따라 더 빠른 속도로 가공할 수 있으나, 나머지 두 파라미터에 비해 가공성 변화의 민감도가 크기 때문에 일정한 값으로 고정하여 사용함으로써 안정성을 확보하는 것이 실 사용에 유리하겠다. 빔 크기의 경우 본 시뮬레이션에서는 1.2 um, 1.4 um 의 조건에서 가장 좋은 가공성을 보였다. 실제 가공시에는 대상물의 배선 배치, 간격에 따라 값을 조정할 수 있겠다.

제 2 절 시사점

펄스 레이저를 이용한 가공을 동등한 에너지를 갖는 열원으로 근사하여 시뮬레이션 했기 때문에 실제 금속막의 거동과는 차이가 있을 것으로 보인다. 하지만 두 가지 관점에서 결론을 내려볼 수 있다.

첫째, 가공의 경향성에서 파악할 수 있는 부분은, 가공 파워와 스캔 속도를 제어할 경우 유의미한 가공성 차이가 발생하게 되는데, 스캔 속도를 과도하게 느리게 할 경우 열에 의한 하부 막 손상이 발생된다는 것이다. 일반적으로 레이저 파워의 조절은 1000 단계로 나누어 가능하므로 일정 수준 이상의 가공 속도에서 레이저 파워를 이용하여 가공성을 조절하는 것이 유리하다.

둘째, 소프트웨어를 사용한 가공 시뮬레이션이 실제의 거동과 같은 경향성을 보임을 확인했다. 추가적인 연구로 온도에 따른 물질의 특성 변화, 플라즈마의 영향 등을 모델링하면 실제 값에 가까운 시뮬레이션이 가능할 것으로 보인다.

위의 두 가지 결론을 본 연구의 성과로 하여 실제 가공에 적용해 볼 수 있겠다. 또한 제품의 변경, 막 또는 구조의 변경에 대비해 시뮬레이션을 해보고 근사적으로 가공조건의 범위를 정할 수 있다. 실제 거동과 차이를 보이는 부분이 있지만 주요 파라미터의 변경에 따른 결과값의 경향성을 확인했기 때문이다.

빅 데이터를 활용하여 시뮬레이션 결과를 보완하고 실물에 적용해 볼 수 있다. 실제 생산 현장에서는 하루에도 수천, 수만 개의 가공 결과가 나오게 된다. 즉 적용된 가공 조건에 대해 설비의 데이터를 누적하고 그 결과값에 따른 가공 성공 여부를 매칭하여 최적의 조건을 찾아갈 수 있다. 그 과정에서 가공 변수를 보완하여 정확한 결과를 예측할 수 있게 시뮬레이션을 하는 것이 필요하다. TFT 회로의 가공부터 후공정을 진행하고 점등하는데 까지는 1주 이상의 시간이 걸리고 있는데, 빅데이터를 활용한 시뮬레이션으로 결과를 미리 예측해볼 수 있겠다.

46

제 3 절 한계 및 후속 연구

2절에서 서술한 바와 같이, 실제 물리현상의 수치와 동일한 값을 갖도록 모델링 하기 위해서는 여러 가지 인자의 반영이 필요하다. 온도에 따른 물질 특성 변화, 플라즈마 영향뿐만 아니라 본 연구와 같은 다층 막 가공의 경우 계면 품질에 대한 모델링도 필요하다. 실제로 다층 막 가공을 하는 경우 계면에서의 반사, 굴절로 인해 투과율이 낮아지거나, 열이 가둬져 국지적인 온도 상승을 초래할 수 있다. 그 외에 상 변화에 따른 특성 변화도 계산치와 실제 값 사이에 차이를 만들 수 있다. 실제로 가공에 사용되는 레이저 파워는 수 십 마이크로 줄 수준으로, 본 시뮬레이션에서의 결과값과는 차이를 보인다. 하지만 파라미터의 변경에 따른 가공 경향성이 동일하게 변화하는 것을 확인했고, 레이저 파워에 따른 가공 마진 또한 5~10% 수준으로 유사성을 찾을 수 있었다.

후속 연구에서는 앞서 서술한 변수들을 추가적으로 모델링 하여 시뮬레이션의 정확도를 향상하는 것이 필요하겠다. 하지만 극 초단 레이저를 사용한 가공이 매우 짧은 순간에 이뤄지고 비선형 거동을 보이기 때문에 실제 거동과 같은 값을 보이기는 어려운 부분이 있다. 따라서 가공 성공, 실패의 결과 데이터를 토대로 가공시의 파라미터의 적합성 여부를 파악하는 것 또한 연구의 한 방법이 될 수 있겠다.

참 고 문 헌

- [1] E.G. Gamaly, A.V. Rode, B. Luther-Davies & V.T. Tikhonchuk, "Ablation of solids by femtosecond lasers: ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics", Physics of Plasmas 9, pp. 949-952, 2002
- B.C. Stuart, M.D. Feit, S. Herman, A.M. Rubenchik, B.W. Shore & M.D. Perry, "Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics", Physical Review B. 53, pp. 1749-1761, 1996
- [3] G. Savriama & N. Semmar, "Numerical Simulation of Laser Processing Materials: An Engineering Approach", Modeling and Simulation in Engineering Sciences Chapter 8, pp. 161-172, 2016
- [4] J. Roth, A. Krauß, J. Lotze & H.R. Trebin, "Simulation of laser ablation in aluminum: the effectivity of double pulses", Springer-Verlag Berlin Heidelberg Applied Physics A, pp. 2207-2216, 2014
- [5] E.C. Chevallier, V. Bruyère, G. Bernard & P. Namy, "Femtosecond laser texturing prediction using COMSOL Multiphysics", SIMTEC Grenoble France, pp. 2-4, 2019
- [6] H.Y. Kim, W.S. Choi, S.Y. Ji, Y.G. Shin, J.W. Jeon, S.H. Ahn & S.H. Cho, "Morphologies of femtosecond laser ablation of ITO thin films using gaussian or quasi-flat top beams for OLED repair", Applied Physics A 124, pp. 2-6, 2018
- [7] 이준영, 윤지욱, 강명창, 조성학, "순수 알루미나와 탄소나노튜브 강화 알루미나 복합체의 극초단 펄스레이저 가공특성 비교",

한국기계가공학회지, 제12권, 제6호, pp. 23-29, 2013

[8] A.D. Rakić, "Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminum", Applied optics. Optical technology and biomedical optics 34, pp. 4755-4767, 1995

Abstract

Numerical analysis to evaluate the performance of laser ablation of Al thin film layer

Jihoon Kim Department of Engineering Practice Graduate School of Engineering Practice Seoul National University

Lasers are used in several processes in the display industry. Cutting of panels and films, cell sealing, marking etc. One of them is to repair circuit defects through selective cutting. To repair circuits, we need to control ablation depth and width more precisely. It is easy to process a thin metal film using a laser, but thermal damage is easily generated around it. So, we need to control ablation depth by nanometer scale and width by micrometer scale. Since the success and failure of machining are divided by such a little difference, initial condition setting and quality control of machining are essential. In general, the quality of processing in the repair process is checked through visual inspection and cross-section inspection, but there are problems with accuracy and analysis time. In this report, we investigate the ultra-short laser processing mechanism of titanium and aluminum composite thin films that are applicable to display circuits. In addition, through numerical analysis, we predict the change in machining results according to conditions, and discuss the possibility of improving machining performance

through this.

The main result in the simulation is that the processing range can be taken depending on whether the target film is removed and the damage margin of the non-target film. It seems advantageous to manage machinability by controlling the laser power, and it is considered advantageous to use fixed values for the size and scan speed of the beam. In addition, it was possible to see the possibility of setting and maintaining processing conditions through simulation and applying them to new products.

Keywords : Laser machining, FEM, Ablation Student Number : 2019-23016