

펨토초 레이저 기반 AMOLED FMM 제조방법

전진우¹, 김훈영^{1,2}, 신영관^{1,2}, 최원석^{1,2}, 조성학^{1,2}

1 한국기계연구원 광응용기계연구실

(Department of Laser & Electron Beam Application, Korea Institute of Machinery & Materials)

2 한국과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과

(Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science & Technology (UST))

Abstract

인바합금을 사용하여 AMOLED 제조 공정중 RGB 증착공정에 사용되는 FMM의 제조시, 진동자를 사용하여 펨토초 레이저 홀 가공의 테이퍼 각도 조절을 통한 품질향상에 대한 연구를 수행하였다. 진동자를 대물렌즈에 장착하여 초점위치를 연속으로 바꾸어 홀의 테이퍼 각도 조절을 하였다. 초점이 연속으로 변하므로 첫번째 펄스가 집속되는 위치와 초점위치의 이동방향에 대해 가공특성이 어떻게 달라지는지 총 8발의 펄스에 대한 사전실험을 수행하였다. 사전실험을 통해 얻은 결과를 활용하여 연속으로 진동하는 진동자를 이용한 펨토초 레이저 홀 가공시 진동자의 진폭을 변화시킴으로써 홀 가공시 테이퍼 각도 조절이 가능함을 데모하였다. 진동의 조건과 레이저의 조건을 고정하고 진동자의 진폭만을 조절하여 31.8 ~ 43.9도의 범위로 테이퍼 각도 조절을 할 수 있었다. 또한, 인바합금 가공시 스펙트럼 측정을 통해 가공상황을 실시간으로 모니터링하였다.

Keywords: tapered angle control, femtosecond laser, hole drilling, Invar plate, AMOLED

1. Introduction

AMOLED는 얇고 구부릴 수 있고, 접을 수 있고, 투명하고, 높은 색재현성의 장점으로 디스플레이의 세로는 세계를 열었다. 이러한 장점으로 가상현실 디스플레이나 다양한 응용분야에 적용가능한 고해상도 디스플레이가 연구되고 있다. 고해상도 디스플레이 개발을 위해서, RGB 증착공정에 필수적으로 사용되는 FMM의 제조가 중요

하다. 왜냐하면 RGB 증착공정에서 픽셀의 사이즈는 FMM의 패턴 크기와 직결되기 때문이다. 그림1에 AMOLED 제조 공정 중 RGB 픽셀 증착 공정에 대한 개략도를 나타내었다. 이러한 이유로, 고해상도 디스플레이를 위해 FMM의 패턴이 더욱 작아져야 한다. FMM은 인바합금으로 만든다. 인바합금은 열팽창계수가 극도로 낮아 열에 의해 치수가 변하면 안되는 RGB 증착

공정용 FMM를 포함한, 정밀공구, 정밀 시계부품 등에 사용된다. 현재 FMM을 화학적 에칭공정을 통해 패턴 크기가 30um 정도로 제조된다. 재료가 금속이라 등방성에 치가 발생하므로 화학적 에칭공정으로는 재료 두께보다 작은 고종횡비 패턴을 만들기가 어렵고, 패턴의 테이퍼 각도를 조절할 수 없는 문제가 있다. 그리고 증착공정시 휘고, 녹고, 정렬의 어려움 문제때문에

FMM을 얇게 만드는데 어려움이 있다. 게다가 화학적 에칭공정은 환경파괴적이고, 높은 시설비용, 공정이 복잡하고 인체에 해로운 단점이 있다.

이러한 화학적 에칭의 단점을 극복하기 위해 펨토초 레이저 가공이 주목을 받고 있다. 짧은 펄스폭에 의한 작은 열영향부 때문에 펨토초 레이저는 초정밀 가공에 있어 나노초 레이저에 비해 유리하다. 그리고 레이저 가공은 재료 두께보다 작은 크기의 고종횡비 가공이 가능하다. 그러나 FMM 제조공정에서 높은 생산성과 가공 품질 조절이 중요한 부분이기 때문에 이를 고려해야 한다. FMM 제조용 펨토초 레이저 가공에서 생산성과 가공품질 조절이란 같은 가공 변수에서 가공깊이가 깊은 것과 가공된 홀의 테이퍼 각도의 조절을 의미한다. 화학적 에칭공정은 고종횡비 가공이 되지 않으며, FMM 제조 공정시 요구되는 패턴의 테이퍼 각도 조절을 할 수 없다.

선행논문을 살펴보면, 레이저 가공은 고종횡비 가공과 테이퍼 각도 조절이 가능하나 하나의 독립 변수로 10~20 um 내외 패턴에서 테이퍼 각도 조절을 하기 어렵다. 박정규 등이 보고한 논문에는 진동자를 이용하여 25,000 펄스의 펨토초레이저를 이용하여 벌크 구리에 고종횡비 가공을 수행하였다. 그러나 진동자를 이용하여 대물렌즈의 초점위치가 변경되는 여러 조건에서 적은 수의 펄스에 대해 가공깊이가 달라지는 생산성에 대한 연구가 되어있지 않다. 그리고 FMM에 사용되는 인바 합금과 펨토초 레이저의 반응성에 대한 연구도 없다. 만약 펨토초 레이저 홀 드릴링시 진동자를 이용하여 하나의 독립변수를 사용하여 테이퍼 각도의 조절이 가능하다면, FMM제조를 포함하여 많은 응용분야에 적용이 가능할 것이다.

이 논문은 진동자를 이용한 인바 합금에 대해 펨토초 레이저 홀 드릴링에 대한 것이다. 높은 생산성을 위해 적은 수의 펄스를 사용하여 초기초점위치와 초점이동방

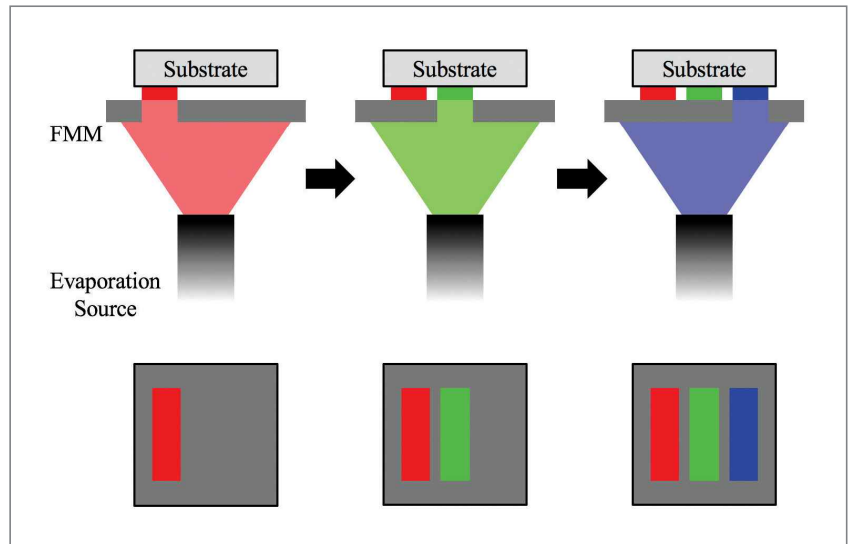


Fig 1. Schematic of RGB evaporation process of AMOLED production (FMM: Fine metal mask)

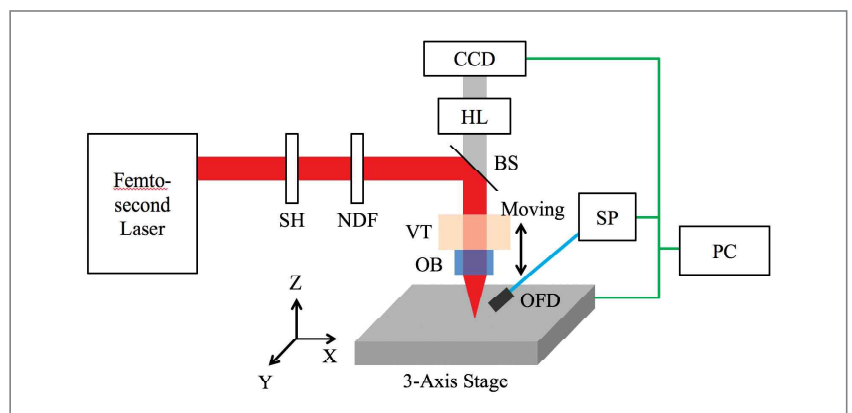
향에 대하여 가공 깊이가 변화를 연구하였다. 또한 가공 품질 조절을 위하여 진동자의 진폭 변화를 통해 가공된 홀의 테이퍼 각도 조절을 연구하였고 그 결과를 데모하였다. 그리고 스펙트럼미터를 이용하여 진동자를 이용한 펨토초 레이저 홀 드릴링시 실시간 스펙트럼 관측을 수행하여 실제 가공시 가공상황 모니터링과 가공되고

는 재료에 대한 실시간 분석이 가능함을 보았다.

2. Experimental setup

진동자를 이용한 펨토초 레이저 인바 합금 홀 드릴링 시스템의 개략도를 그림 2에 나타내었다. Yb:KGW 기반의 중심파장: 1027 nm, 평균출력: 6W, 펄스폭: 190

Fig 2. Schematic of vibration assisted femtosecond laser machining system (SH: Mechanical shutter, NDF: Neutral density filter, BS: Beam splitter, VT: Vibrator, OB: Objective lens, CCD: Camera, HL: Halogen lamp, OFD: Optical fiber detector, SP: Spectrum analyzer)



펄스, 반복률: 싱글샷~200 kHz, 최대 펄스에너지: 1 mJ, M^2 : 1.3 의 재생증폭방식 펄스 레이저를 본 연구에 사용하였다. (Model no. Pharos SP, Light conversion, Lithuania) 진동자를 이용한 펄스 레이저 홀 드릴링 시스템은 펄스 레이저, 빔 전송용 광학미러, 에너지 조절용 광학부품, 3축 스테이지, 동축비전, 동축조명, 대물렌즈, 진동자, 평선제너레이터, 앰플리파이어, 오실로스코프로 이루어져 있다. 빔 전송용 광학미러를 통해 레이저 빔을 대물렌즈로 이송하고, 에너지 조절용 광학부품을 통해 펄스 레이저의 에너지를 정밀하게 조절한다. 3축 스테이지를 사용하여 샘플의 위치를 정밀하게 위치 시키며, 동축비전과 동축조명을 통해 가공부를 실시간으로 관측하며 레이저의 초점을 확인한다. 대물렌즈(Mitutoyo, M Apo Plan NIR 50X, NA: 0.42)는 레이저 빔을 샘플에 집속하여 가공이 일어나도록 한다. 진동자(model no. P-726.1CD, PI)는 대물렌즈에 장착되어 가공시 빠르고 정확하게 초점 위치를 바꾸도록 하였다. 평선제너레이터(model no. WF1973, NF)는 사인함수의 주파수와 진폭을 통해 진동자의 움직임을 제어할 수 있도록 한다. 앰플리파이어(model no. E-625.CR, PI)는 평선제너레이터의 신호를 10배로 증폭시켜 진동자에 인가하여 올바르게 동작하도록 한다. 오실로스코프(Tektronix)는 평선제너레이터의 입력값과 진동자 내부의 캐패시턴스 센서를 통해 측정된 실제 움직인 값을 동시에 표시하여 입력값 대비 실제 움직임을 모니터링하여 주파수나 진폭, 딜레이 등을 확인하고 보정할 수 있도록 하였다.

실험용 샘플은 Fe(64%), Ni(36%)의 합금인 Invar를 사용하였다. 샘플 두께는 13 μm 이며, 샘플의 사진과 개략도를 그림3에 표시 하였다. 샘플의 두께가 얇아 가공시 힘이 의해 초점이 어긋나거나 가공에 안좋은 영향을 줄 수 있어 샘플을 4방향으로 당겨 최대한 샘플이 평평하게 되도록 하였

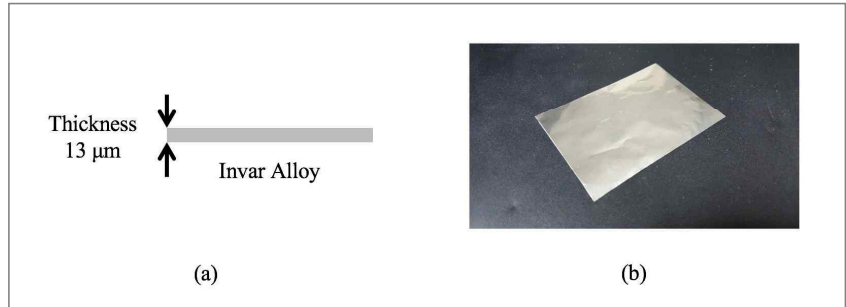


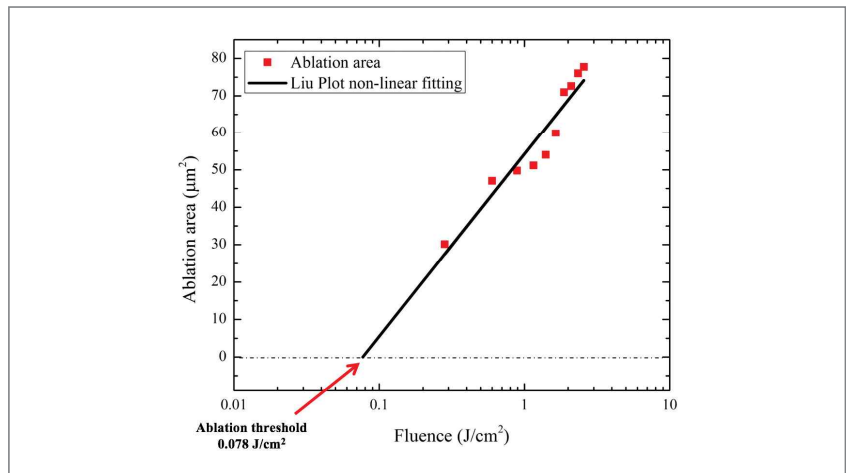
Fig 3. Sample information (a): Schematic of sample dimension (b): Picture of sample

다. 또한 샘플을 고정용 기판에서 띄워 기판과 닿지 않게 하여 펄스 레이저가 샘플을 관통하고 기판이 가공되어 샘플 뒷면이 손상되지 않도록 하였다. 실험 전후에 샘플의 앞뒤 표면을 클리닝해서 실험과 측정을 진행하여 오염물에 의한 오류를 방지 하였다.

본 연구는 진동자에 의해 대물렌즈가 광축으로 움직이기 때문에 초점위치가 연속적으로 변한다. 초점위치가 변하면 스팟사

이즈가 변해 가공깊이가 달라지기 때문에, 첫번째 펄스의 초점면과 초점면의 이동방향에 따라 가공직경과 깊이가 다르게 나올 수 있다. 많은 수의 펄스를 누적시키면 처음 펄스의 초점면과 초점면의 이동방향에 따른 가공결과와 차이가 작아질것으로 예상하지만, 진동 한 사이클과 적은수의 펄스를 사용하기 때문에 첫번째 펄스의 초점면과 초점면의 이동방향에 따른 가공경향을 알아보는 실험이 선행되어야 한다. 따

Fig 4. Schematic diagram of experimental procedure; red dot: first pulse, green dot: the rest 2 ~ 8 pulses, blue arrow: focus moving direction (example; parameter 1: a. → b. → c. → d. → e. → d. → c. → b.)



라서 리우 플랏을 통해 실험에 사용할 펄스 에너지를 정하고, 진동 주파수와 레이저 반복률을 고려하여, 펄스가 집속이 되는 초점면과 진동자에 움직임에 의한 초점면의 이동방향을 결정한다. 처음 펄스의 초점위치와 초점위치의 이동방향을 고려하여 실험파라미터를 구성하고 초점위치를 진동자를 수동으로 위치제어하여 고정시키고 정해진 펄스 수만큼 조사한다. 이때 가공된 홀의 관통여부나 출구쪽 직경을 관찰하여 가공깊이를 예측하고, 가공깊이가 제일 좋은 실험 세트를 선정하여 진동자의 진폭 조절을 통한 테이퍼 각도 제어 실험에 사용한다. 진폭조절을 통한 테이퍼 각도 제어 실험은 진동자에 사인함수를 인가하여 연속으로 진동하게 하고 정해진 수의 펄스를 조사한다. 이때 레이저와 진동자의 변수는 고정하고 오직 진동자의 진폭만 조절하여 가공하고, 가공된 홀의 입구직경과 출구직경을 측정하여 테이퍼 각도를 계산한다.

3. Experimental results and discussion

레이저 가공에서 재료 제거는 레이저의 플런스가 재료의 어블레이션 임계값보다 이상일때 일어나고 이것은 재료와 빛의 상

호작용에 강하게 종속된다. 적은 펄스 수를 사용하여 실험하기 위해 리우 플랏을 통해 가공이 일어나는 임계치를 알아내고 임계치로부터 시작하여 펄스 에너지를 올려가며 샘플이 관통되는 펄스 에너지를 구할 필요가 있다. 가공이 일어나는 최소 플런스는 '리우플랏'이라는 플런스와 가공 직경간의 관계를 통해 외삽하여 계산한다. 이를 위해 대물렌즈 초점을 샘플 표면에 정확히 위치시키고 펄스 에너지를 증감시켜가며 펄스 1발씩 조사한다. 가공된 샘플을 광학현미경으로 관찰하여 가공된 각 부분마다 직경을 구하고, 해당 위치의 플런스를 계산한다. 플런스와 가공 직경간의 관계를 이용하여 비선형 피팅을 계산하였고, 이를 그림5에 나타내었다. 비선형 피팅을 통해 계산된 가공 임계치는 가공 임계치는 0.078 J/cm^2 로 계산되었다. 이를 통해 실험에 사용한 펄스초 레이저와 인바합금의 반응에 의한 가공 임계치를 계산하였고, 이를 기준으로 8발에 관통되는 조건인 펄스 에너지를 13.3 μJ 로 구하였다.

진동자를 이용한 본 실험에서는 진동자에 의해 렌즈의 초점이 광축으로 빠르게 변하므로 진동자와 레이저가 시간적으로 동기화 되지 않으면 같은조건으로 가공을 하여도 결과의 경향성을 찾기 어려울 수

있다. 이를 확인하기 위해 어블레이션 임계값 실험을 통해 결정한 펄스 에너지를 사용하여 사전 실험을 수행하였다. 그림5에 사전실험의 개략도를 나타내었다. 13.3 μJ 을 안정적으로 발진할 수 있는 레이저 반복률은 100 kHz 이고, 후에 기술할 진폭에 따라 테이퍼 각도 조절을 하기 위해 진동의 진폭을 재료 두께인 13 μm 로 정하였다. 진동자의 특성상 13 μm 로 안정적으로 사인 함수로 진동하는 진동 주파수를 100 Hz로 고정하였다. 진동주파수와 레이저 반복률에 따라 진동 1 사이클당 하나의 홀에 누적되는 펄스수는 8발 이다. 8발의 펄스가 진동에 의해 사인 함수로 초점이 바뀌어 집속되는 것을 고려하여 재료의 두께 방향으로 가상으로 4등분 하여 앞면과 뒷면을 포함하여 5개의 초점위치를 정하였다. (그림5 1~V) 그리고 진동에 의해 초점이 변할때 첫발이 집속되는 초점 위치 (그림5 1~V)와 초점면의 이동방향을 경우의 수를 고려하여 사전 실험의 실험파라미터를 정하였다. (그림5 (a)~(h)) 각각 실험 파라미터에서 붉은 점은 처음 펄스가 집속되는 지점이고 진동이 시작되어 초점 위치가 변하기 시작하는 지점이다. 실험 파라미터에 따라 파란색 화살표를 따라 초점 위치가 이동하며, 초록점에 2~8번째의 펄

Fig 5. Invar ablation threshold experiment and calculation (Liu plot non-linear fitting)

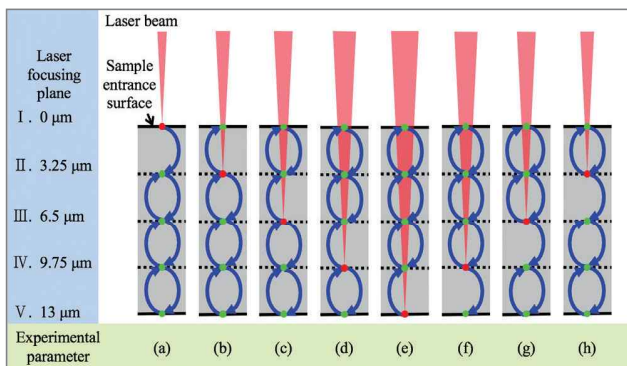
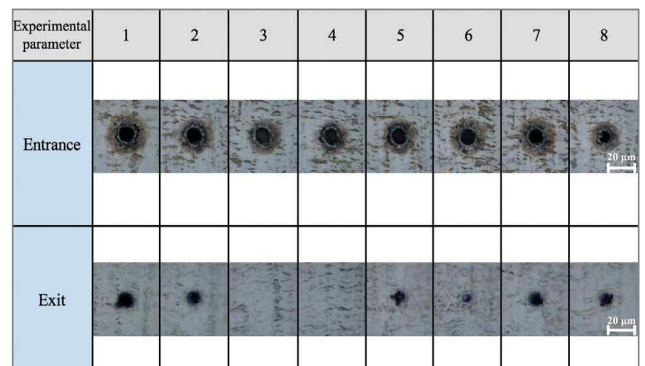


Fig 6. Optical microscope view images of hole drilling at entrance and exit with various experimental parameters



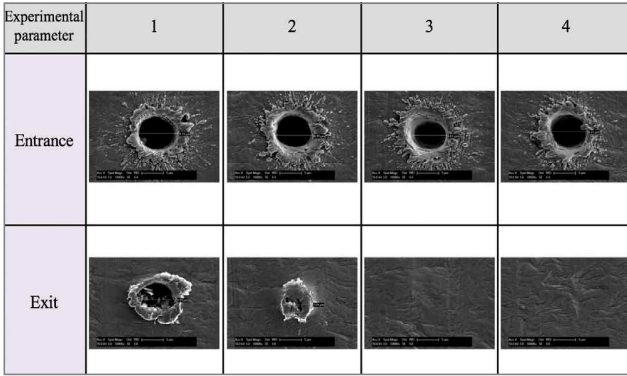


Fig 7(a). Scanning electron microscope images of experimental result with experimental parameters (1027 nm, 180 fs, 13.3 μJ (on target), 8 pulses, various focus)

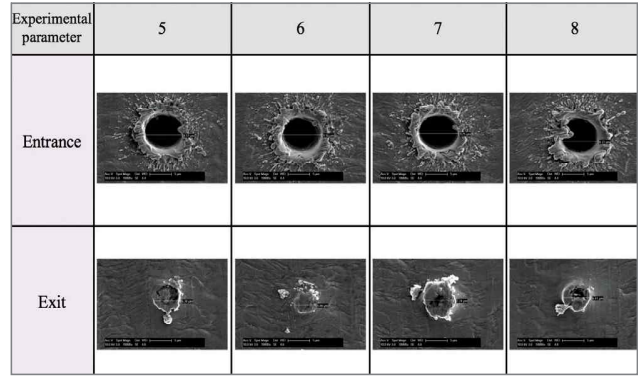


Fig 7(b). Scanning electron microscope images of experimental result with experimental parameters (1027 nm, 180 fs, 13.3 μJ (on target), 8 pulses, various focus)

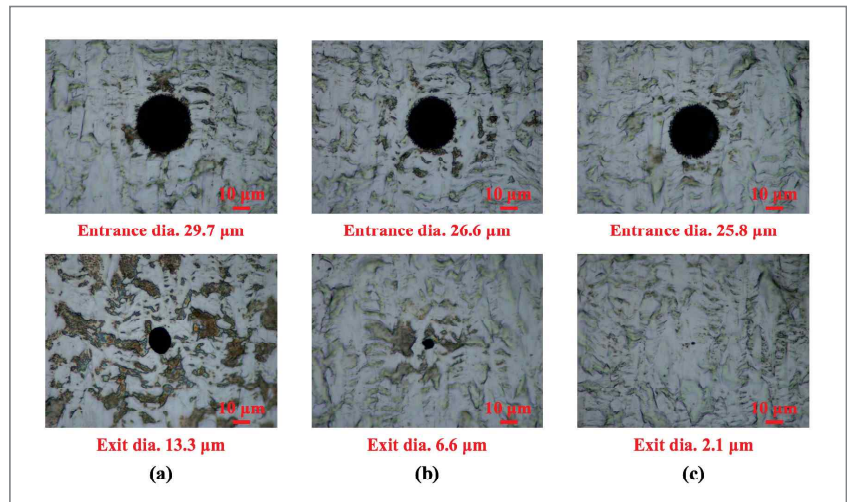
스가 각각 지정된 초점위치에 한발 씩 집속된다. 사전실험에서는 실험의 정확성을 위해 초점위치를 수동으로 제어하고, 레이저도 한 발씩 수동으로 발사 하였다. 사전 실험을 통해 가공된 홀의 광학현미경 사진을 그림6에 나타내었다. 각 실험 파라미터 별로 가공된 홀의 입구 직경은 유사한 것으로 보인다. 그러나 출구 부분은 실험 파라미터에 따라 가공직경이 다르며, 샘플이 관통되지 않아 출구직경이 없는 경우도 있었다. 그림7(a)와 그림(b)에 각 실험 파라미터 별로 가공된 홀의 전자현미경 사진을 나타내었다. 이를 통해 실험파라미터 (a)가 출구 직경이 제일 큰것을 알 수 있었고, 가공깊이가 제일 깊은 가공조건임을 확인할 수 있었다.

사전 실험을 통해 처음 펄스가 샘플 표면에 집속되는 (실험파라미터 (a)) 것이 같은 가공조건에서 가공효율이 제일 좋은것으로 나타났다. 이 결과를 이용하여 진동자의 진폭조절을 통해 홀 가공시 테이퍼 각도 조절에 대한 실험을 진행하였다. 실험은 사전실험과 같이 50X 대물렌즈, 레이저 반복률 100 kHz, 펄스 8발을 사용하였으며, 펄스에너지는 진동자의 진폭이 바뀌면 샘플이 관통안될 수 있어 사전실험의

약 두배 정도인 27.8 μJ을 사용하였다. 사전실험의 결과를 적용하기 위해 레이저와 진동자를 동기화 하여 펄스 첫발이 처음펄스 초점위치에 집속되는 순간 진동자가 진동을 시작하도록 하였다. 동기화는 두 개의 평선제너레이저를 서로 연결하여 시간 동기화 하고 ‘시퀀스 모드’를 사용하여 두

개의 신호출력에 시간차를 두어 레이저와 진동자의 반응시간 차이를 상쇄하게 하였다. 진동 주파수 100 Hz로 진동하게 하고, 진동 진폭 13 μm를 기준으로 진폭만 일정 비율로 바꾸어 가며 홀 가공을 수행하였다. 그림8에 진동자의 진폭조절을 통한 펄스 레이저 홀 드릴링시 테이퍼 각도 변

Fig 8. Real-time spectrum measurements of Invar alloy at femtosecond laser hole drilling (a): No ablation (I = 67.67 GW/cm²)(b): Laserablation(I=733.33GW/cm²)



화 실험의 입구와 출구의 대표 광학사진을 나타내었다. 진폭 변화에 따라 입구직경과 출구직경이 모두 변화하지만 출구직경의 변화가 급격하여 결과적으로 가공된 홀의 테이퍼 각도가 변하는 것을 알 수 있다. 그림9에 진동자의 진폭조절을 통한 펄스 레이저 홀 드릴링시 테이퍼 각도 변화 실험 결과의 측정을 통해 진동자의 진폭에 따른 테이퍼 각도의 변화를 그래프로 표시하였다. 결과에 약간 오차는 있지만 진폭을 조절함에 따라 가공된 홀의 테이퍼 각도가 변하는 것을 알 수 있었다. 전체적으로 진폭이 작아질수록 출구직경이 작아져 테이퍼 각도가 커지는 경향이 있다. 또한, 진폭 13 μm 근처에서 진폭을 감소시켰을 때 테이퍼 각도가 살짝 작아졌다가 커지는 결과를 볼 수 있다.

그림10에 펄스 레이저로 인바함금 홀 드릴링 실험중 발생한 플라즈마의 스펙트럼을 스펙트로미터로 관측한 그래프를 나타내었다. 그림10 (a)는 인바함금의 어블레이션 임계값보다 낮은 조건으로 레이저를

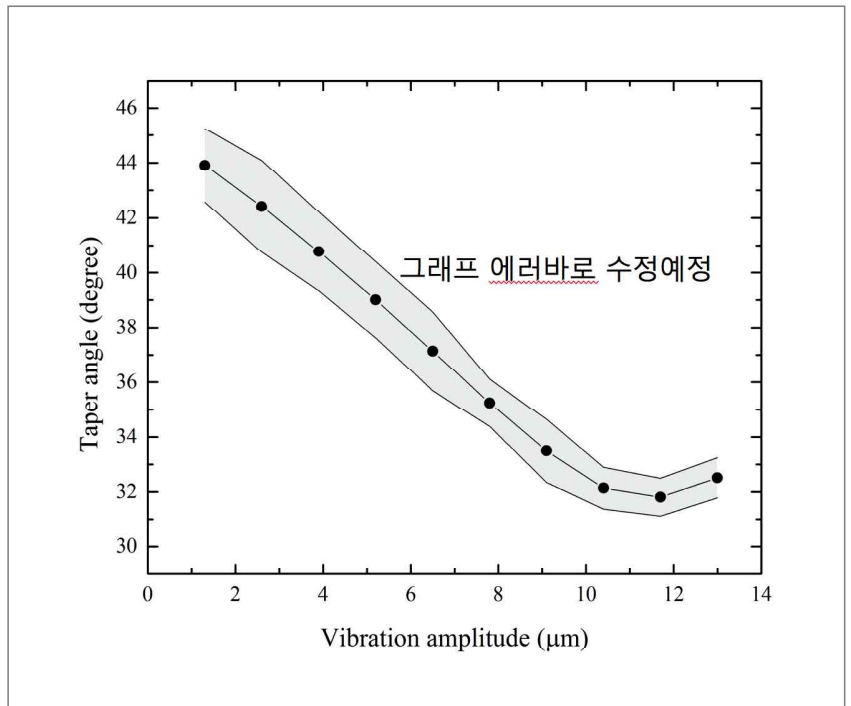
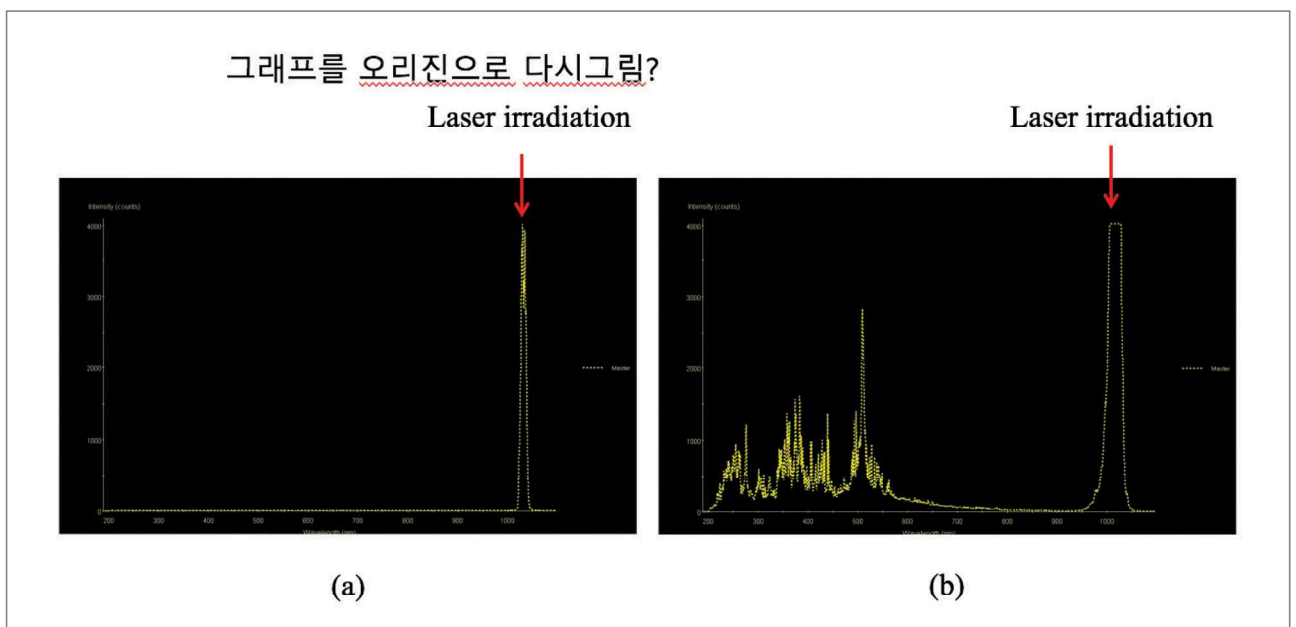


Fig 9. Demonstration of vibration assisted femtosecond laser hole drilling with taper angle control using vibration displacement (a): No vibration (b): 9.6 μm displacement (c): 16 μm displacement

Fig 10.



조사하였기 때문에 가공이 일어나지 않아 플라즈마가 발생하지 않아 레이저 신호만 감지된 것을 알 수 있다. 그러나 그림 10 (b)은 어블레이션 임계값보다 높은 조건으로 레이저를 조사하여 레이저 신호와 플라즈마의 신호가 같이 측정된 것을 알 수 있다. 그리고 플라즈마의 신호가 측정된 곳을 보면 다양한 피크가 있는 것을 알 수 있는데, EDX처럼 재료의 원소마다 피크의 위치가 다르게 측정될 것으로 예상할 수 있다. (a)와 (b)의 레이저 신호가 측정된 세기를 보면, 가공 임계값 전 후로 레이저 조사시 스펙트럼으로 측정된 세기가 다른 것을 알 수 있다. 따라서 가공시 발생하는 플라즈마의 스펙트럼 분석을 통해 현재 가공되고 있는 부분이 어떤 재료인지, 가공이 잘 되고 있는지, 가공을 시작해야 하는지, 끝내야 하는지를 알 수 있어 양산라인에서 유용한 모니터링 기술이 될 것이다. 스펙트럼 측정 기술과 피크의 분석은 연구가 더 필요하다.

진동자를 이용한 인바 합금의 펄스 레이저 홀 드릴링 시 테이퍼 각도 조절에 대한 연구를 수행하였다. 리우플랏을 통한 가공 임계치를 구하였고, 레이저와 진동자의 동작시간 차이에 의한 가공 효율을 사전 실험을 수행하였다. 또한 사전 실험을 통하여 얻은 조건으로 진동자의 진폭 조절을

이용하여 테이퍼 각도 조절이 가능한 홀 가공 실험을 하였다. 진동자가 대물렌즈의 초점 위치를 변경하고 스팟 사이즈가 바뀔 때 따라 가공 깊이가 차이가 나고 진동 1사이클의 8발의 적은 펄스수를 사용하기 때문에 실험 파라미터에 따라 그 차이가 크게 나타난 것으로 생각된다. 만약 여러 진동 사이클의 더 많은 펄스를 누적하여 가공한다면, 초기 초점 위치와 초점 이동 방향에 따른 가공 결과와 차이가 작아질 것이다. 하지만, 더 적은 수의 펄스를 사용하는 것이 가공 시간이 짧아 생산성이 좋아지고, 낮은 에너지의 많은 펄스가 중첩되어 발생하는 열 축적 현상도 현저히 줄일 수 있는 이점이 있다. 초기 초점 위치가 샘플의 위쪽 표면에서 가공을 시작 하는 것이 가공 깊이가 제일 좋은 결과를 얻었다. 이것은 8발의 펄스로 가공되는 동안, 각각 펄스 한 발에 가공되는 깊이가 최대한 깊어야 가공 후 가공 깊이가 깊게 나오는 결과를 얻는 것으로 생각된다. 이전 펄스에 의해 가공된 깊이와 진동자의 움직임에 의한 초점 위치 변화에 따라 집속된 펄스의 스팟 사이즈가 달라지고 결국 각각 펄스별 가공 깊이가 달라지므로, 8발 누적 가공된 깊이가 실험 파라미터에 따라 달라진다. 이러한 현상은 사용하는 렌즈의 DOF에 따라 크게 나타날 수도 있고 적게 나타날 수도 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 진동자를 이용한 펄스 레이저 가공 시스템을 이용하여 가공 효율을 위한 초기 초점 위치와 초점 이동 방향의 영향과 연속으로 움직이는 진동자의 진폭 조절을 통한 홀 가공시 테이퍼 각도 조절을 연구하였다. 사전 실험으로 13.3μ의 8발의 펄스를 이용하여 다양한 초기 초점 위치와 이동 방향에 대해 가공을 하였다. 각각 파라미터마다 가공 깊이가 다른 결과를 얻었고, 처음 펄스가 샘플 위쪽 표면에 집속되어 가공이 시작되는 것이 가장 가공 깊이가 깊어 가공 효율 및 생산성이 높음을 확인하였다. 이것은 진동자를 이용한 홀 가공 시스템에서 레이저와 진동자의 동기화가 생산성에 영향을 줄 수 있는 것을 의미한다. 사전 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로, 연속으로 진동하는 진동자의 진폭 조절을 통하여 테이퍼 각도가 조절 가능한 홀 가공을 성공적으로 데모하였다. 진동자의 진폭이 작아질수록 가공된 홀의 테이퍼 각도가 커지는 경향이 있음을 알 수 있었다. 테이퍼 각도 조절이 가능한 진동자 이용 펄스 레이저 홀 드릴링 공정이 AMOLED 제조 공정에서 사용되는 FMM 제조를 포함한 솔라셀, 펄스 레이저 응용 나노/마이크로 가공에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

References

1. J.-H. Lee, S.-G. Park, S.-M. Han, M.-K. Han, K.-C. Park, New PMOS LTPS-TFT pixel for AMOLED to suppress the hysteresis effect on OLED current by employing a reset voltage driving, *Solid-State Electronics*, 52 (2008) 462-466.
2. D.J. Park, Y.H. Kim, B.O. Park, High performance of ultralow temperature polycrystalline silicon thin film transistor on plastic substrate, *Solid-State Electronics*, 75 (2012) 97-101.
3. R.-H. Yao, L.-R. Zhang, L. Zhou, W.-J. Wu, A new compensation pixel circuit with all-p-type TFTs for AMOLED displays, *Displays*, 34 (2013) 187-191.

4. I.-Y. Chung, J.D. Kim, K.H. Kang, Ablation drilling of invar alloy using ultrashort pulsed laser, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10 (2009) 11-16.
5. T. Nagayama, T. Yamamoto, T. Nakamura, Y. Mizutani, Fabrication of Low CTE Metal Masks by the Invar Fe-Ni Alloy Electroforming Process for Large and Fine Pitch OLED Displays, *ECS Transactions*, 50 (2013) 117-122.
6. S.H. Kim, S.G. Choi, W.K. Choi, B.Y. Yang, E.S. Lee, Pulse electrochemical machining on Invar alloy: Optical microscopic/SEM and non-contact 3D measurement study of surface analyses, *Applied Surface Science*, 314 (2014) 822-831.
7. M. Shiga, Invar alloys, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 1 (1996) 340-348.
8. Y. Zhao, A.P. Wu, W. Yao, Z.M. Wang, Y.S. Sato, H. Kokawa, Microstructure and mechanical properties of Nd:YAG laser welded invar 36 alloy, *Materials Science Forum* 2011, pp. 739-742.
9. J.R. Freeman, S.S. Harilal, P.K. Diwakar, B. Verhoff, A. Hassanein, Comparison of optical emission from nanosecond and femtosecond laser produced plasma in atmosphere and vacuum conditions, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 87 (2013) 43-50.
10. S. Tao, B. Wu, S. Lei, A comparative study of the interaction between microhole sidewall and the plasma generated by nanosecond and femtosecond laser ablation of deep microholes, *Journal of Manufacturing Processes*, 14 (2012) 233-242.
11. J. Bonse, J. Solis, L. Urech, T. Lippert, A. Wokaun, Femtosecond and nanosecond laser damage thresholds of doped and undoped triazene polymer thin films, *Applied Surface Science*, 253 (2007) 7787-7791.
12. O. Uteza, B. Bussi re, F. Canova, J.P. Chambaret, P. Delaporte, T. Itina, M. Sentis, Laser-induced damage threshold of sapphire in nanosecond, picosecond and femtosecond regimes, *Applied Surface Science*, 254 (2007) 799-803.
13. D. Ashkenasi, N. Mueller, T. Kaszemeikat, G. Illing, Advanced laser micro machining using a novel trepanning system, *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 6 (2011) 1-5.
14. R. Biswas, A.S. Kuar, S. Mitra, Multi-objective optimization of hole characteristics during pulsed Nd:YAG laser microdrilling of gamma-titanium aluminide alloy sheet, *Optics and Lasers in Engineering*, 60 (2014) 1-11.
15. C.N. Chen, J.J. Huang, G.M. Wu, H.W. Chien, Taper angle of silicon nitride thin film control by laser direct pattern for transistors fabrication, *Applied Mechanics and Materials* 2013, pp. 225-229.
16. L.S. Jiao, E.Y.K. Ng, L.M. Wee, H.Y. Zheng, The effect of assist liquid on the hole taper improvement in femtosecond laser percussion drilling, *Physics Procedia*, 19 (2011) 426-430.
17. E. Kacar, M. Mutlu, E. Akman, A. Demir, L. Candan, T. Canel, V. Gunay, T. Sinmazcelik, Characterization of the drilling alumina ceramic using Nd:YAG pulsed laser, *Journal of materials processing technology*, 209 (2009) 2008-2014.
18. L. Li, D.K.Y. Low, M. Ghosh, J.R. Crookall, Hole Taper Characterisation and Control in Laser Percussion Drilling, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 51 (2002) 153-156.
19. J.-K. Park, J.-W. Yoon, S.-H. Cho, Vibration assisted femtosecond laser machining on metal, *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (2012) 833-837.
20. J.M. Liu, Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot size, *Optics Letters*, 7 (1982).
21. J.M. Liu, H.K. Yen, N. Bloembergen, Phase transformation on and charged particle emission from a silicon crystal surface, induced by picosecond laser pulses, *Applied Physics Letters*, 39 (1981) 755.