

펄토초 레이저를 이용한 OLED 용 Shadow Mask Invar 합금의 어블레이션

정일영[#], 강경호^{*}, 김재도^{**}, 손익부^{***}, 노영철^{***}, 이종민^{***}

Femtosecond Pulsed Laser Ablation of OLED Shadow Mask Invar Alloy

Il Young Chung[#], Kyung Ho Kang^{*}, Jae Do Kim^{**}, Ik Bu Sohn^{***}, Young Chul Noh^{***} and Jong Min Lee^{***}

ABSTRACT

Femtosecond laser ablation of the Invar alloy and hole drilling for a shadow mask are studied. We used a regenerative amplified Ti-sapphire laser with a 1kHz repetition rate, 184fs pulse duration and 785nm wavelength. Femtosecond laser pulse was irradiated on the Invar alloy with air blowing at the condition of various laser peak power. An ablation characteristic of the Invar alloy was appeared non-linear at 125J/cm² of energy fluence. For the application to a shadow mask, the hole drilling of the Invar alloy with the cross section of a trapezoidal shape was investigated. The ablated micro-holes were characterized using an atomic force microscopy(AFM). The optimal condition of hole pattern for a shadow mask was 4 μm z-axis feed rate, 0.2mm/s circular velocity, 26.4μJ laser peak power. With the optimal processing condition, the fine circular hole shape without burr and thermal damage was achieved. Using the femtosecond laser system, it demonstrates excellent tool for the Invar alloy micro-hole drilling without heat effects and poor edge.

Key Words : Shadow mask (쉐도우 마스크), Invar alloy (인바 합금), Femtosecond laser (펄토초 레이저), Laser ablation (레이저 가공), Energy fluence (에너지 플루언스).

1. 서론

Invar (Invariable Alloy) 합금은 36%의 Ni 을 함유한 Fe-Ni 계 합금을 말한다. 이 Invar 합금은 1.3×10⁻⁶ /℃ 미만의 낮은 열팽창계수와 극저온(≤-163℃)에서 강도, 충격인성, 가공성이 우수한 특성을 나타내고 있다.¹ 일반적으로 Bi-Metal, LNG 저장 탱크, OLED

(Organic light emitting diode)와 같은 Display 장치의 Shadow mask 에 많이 사용되고 있다. 이중 쉐도우 마스크(shadow mask)에 사용되는 Invar 합금의 홀 가공은 에칭이나 Nd:YAG 레이저를 이용한 가공 방법이 사용되고 있다.^{2,3} 에칭 공정을 이용한 쉐도우 마스크 가공은 정면공정, 노광공정, 현상공정 등과 같은 여러단계의 공정을 거쳐야 하는 문제와

¹ 접수일: 2007년 2월 12일; 게재승인일: 2007년 10월 16일

[#] 교신저자: 인하대학교 기계공학과 대학원

E-mail: laserjung@empal.com Tel. (032) 860-7316

^{*} 인하대학교 기계공학과 대학원

^{**} 인하대학교 기계공학과

^{***} 광주과학기술원 고등광기술연구소

환경 문제를 야기하게 된다. 또한 Nd:YAG 레이저를 이용한 공정은 단시간의 가공시간으로 에칭에 의한 가공보다 유리한 점이 있지만, 가공 후 버(burr)의 발생으로 인하여 EP(Electro polishing)와 같은 후가공 공정을 거쳐야만 하는 문제점이 있다.⁴

펨토초 레이저(Femtosecond laser)는 기존의 가공용 레이저보다 극도로 짧은 10^{-15} 초의 펄스로 발진하는 레이저로서 열확산의 길이가 나노초에 비하여 매우 짧고 플라즈마나 유동장의 형성 전에 어블레이션(ablation)이 일어나므로 열영향부 생성과 유체역학적 효과로 인한 가공정밀도 저하를 크게 줄일 수 있다. 또한 펨토초 단위의 펄스는 집속면의 출력밀도를 10^{15}W/cm^2 수준까지 올릴 수 있기 때문에 알루미늄 박판, 구리 박판, 니티놀(Nitinol) 등과 같은 여러 펄름 형태의 재료 가공에 대하여 우수한 가공 특성을 가지고 있다.

펨토초 레이저의 재료 가공 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.⁵⁻⁷

- (1) 열에너지에 의하여 주위 재질에 따른 손상이 없다.
- (2) 재질에 따른 파장 의존성이 없다.
- (3) 가공 주위의 분진에 의한 오염이 없다.
- (4) 정밀하고 재연성이 뛰어나다.

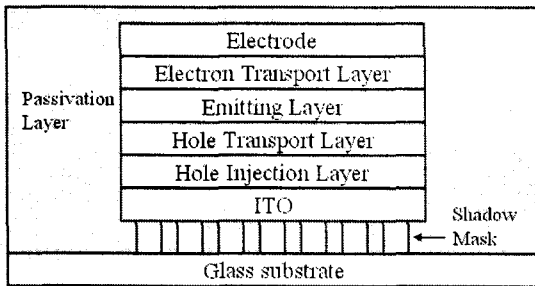


Fig. 1 Schematic drawing of OLED structure

OLED 에 사용되는 웨도우 마스크는 단면이 사다리꼴 형상으로 구성된 홀 패턴(hole pattern)으로 이루어져 있다. 크기는 상부 지름 $\varnothing 0.25\text{mm} \sim \varnothing 0.3\text{mm}$ 이고 하부 지름은 $\varnothing 0.2\text{mm} \sim \varnothing 0.22\text{mm}$ 정도의 크기로 형성되어 있다. 이 웨도우 마스크의 역할은 유기발광물체에서 발생된 빛의 픽셀(pixel) 역할을 담당하고 있으며 홀의 크기와 간격 그리고 홀의 질에 대한 반사 정도에 따라서 OLED 의 질을 평가하는 중요한 요소 중의 하나가 된다.⁸

본 연구에서는 펨토초 레이저를 이용하여 OLED 용 웨도우 마스크에 사용되는 Invar 합금의 어블레이션 특성을 분석하고 OLED 에 적용되는 웨도우 마스크의 홀 패턴 가공에 대하여 연구하고자 한다.

2. 펨토초 레이저 어블레이션

2.1 펨토초 레이저의 어블레이션 과정

펨토초 레이저를 금속 표면에 조사하게 되면 낮은 강도의 짧은 펄스 형태로 레이저 빔을 조사하게 된다. 이때 발생하는 펨토초 레이저빔의 자유 전자는 에너지를 보유하게 되고 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 자유 전자가 금속의 표면에 접촉을 하게 되면 전자의 열에너지에 의하여 열적 확산 작용이 발생되며 에너지를 전달하게 된다. 열적 확산 작용에 의하여 발생된 전자 형태의 에너지는 재료의 표면에서 격자 형태로 변화되는 과정을 거치게 된다. 이 격자 형태는 재료 표면에서 에너지의 방출과 함께 제거 되는 과정으로 이루어진다. 이러한 과정을 펨토초 레이저의 어블레이션이라 한다. 이러한 어블레이션 과정은 매우 빠르게 발생되고, 전자에서 격자 구조 시스템으로 변환되는 과정은 이들이 보유하고 있는 열적 특성으로 인하여 어블레이션이 발생된다고 할 수 있다.⁹

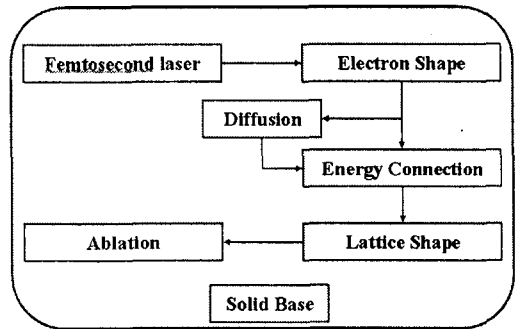


Fig. 2 Schematic drawing of ablation in solid by a femtosecond laser pulse

2.2 펨토초 레이저의 어블레이션 가공 특성

금속 재료에 짧은 파장에 의하여 상호 작용을 발생할 때의 현상은 유체역학적 운동으로 판단할 수 있으나 어블레이션이 이루어지는 시간이 피코초(picosecond)의 단위로 빠른 시간에 발생하기 때

문에 이는 무시할 수 있다. 어블레이션 과정이 발생하는 동안 전자에서 보유한 에너지는 열적 충전과 열전도가 발생하면서 격자 구조로 변환되기 때문에 전자의 열적 확산은 상수로 취급할 수 있다. 따라서 격자에서 발생된 평형 온도 분포는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 T_i 는 격자의 온도, F_a 는 흡수된 레이저 플루언스, C_i 는 격자의 열충전, x 는 열충전에 대한 재료의 수직방향, l 은 전자의 온도 확산 길이, δ 는 광학침투 깊이로 나타낸다. δ 는 광학 흡수계수를 이용하여 $1/\alpha$ 의 형식으로 계산할 수 있고, l 은 $\sqrt{D\tau_e}$ 에 의하여 계산할 수 있다. D 는 열확산계수, τ_e 는 어블레이션 가공시 적용되는 duration 이 된다.¹⁰

$$T_i \approx \frac{F_a}{C_i} \left(\frac{1}{l^2 - \delta^2} \right) \left[l \exp\left(\frac{-x}{l}\right) - \delta \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right) \right] \quad (1)$$

식 (1)은 δ 와 l 의 크기 정도에 따라서 식 (2)와 식 (3)의 형식으로 나누어 지게 된다.¹⁰

$$T_i \approx \frac{F_a}{C_i \delta} \exp\left(\frac{-x}{\delta}\right) \quad (\delta > l) \quad (2)$$

$$T_i \approx \frac{F_a}{C_i l} \exp\left(\frac{-x}{l}\right) \quad (\delta < l) \quad (3)$$

격자의 $C_i T_i$ 의 에너지가 threshold value 를 초과하였을 때 어블레이션이 발생된다고 볼 수 있다. 이 threshold value 는 증기열, 즉 $\rho\Omega$ 에 의하여 결정된다. 여기서 ρ 는 재료의 밀도, Ω 는 단위 질량당 증기의 비열로 나타낸다. 결과적으로 어블레이션은 $C_i T_i \geq \rho\Omega$ 의 조건에서 발생하고 식 (4)와 (5)로 표현할 수 있다.¹⁰

$$F_a \geq F_{th}^\delta \exp\left(\frac{x}{\delta}\right), \quad F_{th}^\delta \approx \rho\Omega\delta \quad (\delta > l) \quad (4)$$

$$F_a \geq F_{th}^l \exp\left(\frac{x}{l}\right), \quad F_{th}^l \approx \rho\Omega l \quad (\delta < l) \quad (5)$$

또한 식 (4)와 (5)를 이용하여 어블레이션 깊이에 대한 식을 식 (6)과 (7)로 정리하였다.¹⁰

$$L \approx \delta \ln\left(\frac{F_a}{F_{th}^\delta}\right) \quad (\delta > l) \quad (6)$$

$$L \approx l \ln\left(\frac{F_a}{F_{th}^l}\right) \quad (\delta < l) \quad (7)$$

어블레이션 깊이는 식 (6)과 (7)을 이용하여 깊

이를 예측할 수 있고 각각의 조건에 대하여 나누어지는 특징을 나타낸다.

그러나 미세 정밀 가공 공정에서는 정확한 형상의 구현을 통한 어블레이션 가공을 나타내는 것에 한계가 있기 때문에 어블레이션 깊이의 관계식은 열적 상호 반응 작용에 의한 재료의 제거율과 근사적으로 예측하는데 사용한다.⁵

3. 실험방법

실험에서 사용한 재료는 OLED 용 웨도우 마스크에 사용되는 Invar 합금을 사용하였다. Invar 합금의 두께는 50 μm 를 사용하였고 그 조성은 Table 1에 나타내었다. 시편의 크기는 50×50mm 이며 표면은 세척하였다.

Table 1 Chemical composition of Invar alloy (%)

C	Si	Mn	Ni	Fe
≤0.04	≤0.25	0.2-0.4	36±0.5	-

실험에 사용한 장비는 펄스폭 184fs, 반복률 1kHz, 파장 785nm 의 티타늄 사파이어(Ti:sapphire) 레이저를 사용하였다. 이 펄스 레이저의 빔 폭은 6mm 이고, 실험에 사용한 대물렌즈는 Mitutoyo社의 20 배율 렌즈를 사용하였고, NA(Numerical Aperture)는 0.4 를 사용하였다. 실험 장비의 시스템 구성은 Fig. 3에 나타내었다.

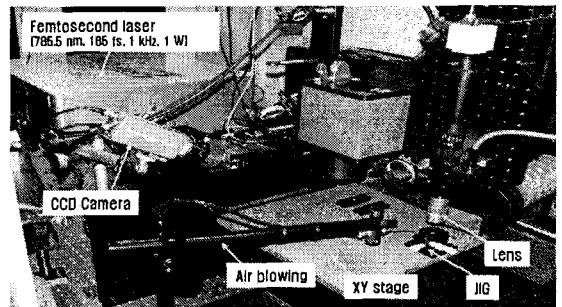


Fig. 3 Femtosecond laser processing system

Invar 합금의 어블레이션 실험은 한계 플루언스의 데이터를 위하여 레이저의 출력을 변환하여 측정하였다. 또한 이때 발생하는 시편의 표면에

발생된 가공 면적과 가공된 깊이를 측정하였다. 이러한 펄초 레이저의 가공 데이터를 배경으로 Invar 합금의 어블레이션 특성을 분석하였다.

위의 어블레이션 특성 데이터를 바탕으로 하여 실제 Invar 합금의 섀도우 마스크 가공 실험을 하였다. 실제 적용 가공에서는 이송속도의 변수를 보완하여야 하기 때문에 이송속도에 대한 데이터 실험을 추가적으로 실시하였다. 패턴 가공의 홀 형상은 원형으로 가공하였으며, 단면은 사다리꼴 모양으로 가공하였다. 사다리꼴 단면 형상 구현을 위하여 Fig. 4 과 같은 방법으로 레이저 빔의 이송을 외부 원에서부터 내부 원으로 이송하는 방식으로 하나의 line 씩 어블레이션하여 제거하는 방식을 사용하고 어블레이션시 발생하는 미세 칩(chip) 제거를 위하여 공기를 이용한 블로잉(blowing)을 하였다. 외부 원의 크기(R)는 반지름 120 μm 로 설정하였고, 내부 원의 크기(r)는 반지름 100 μm 의 크기로 가공하였다.

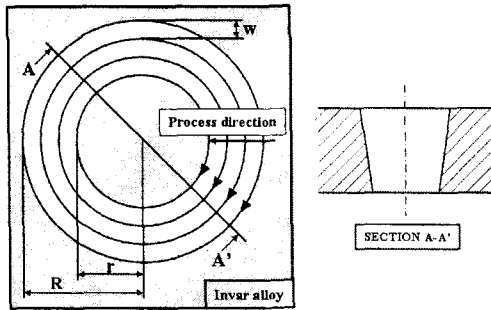


Fig. 4 Schematic diagram of an ablation method on the Invar alloy (w : ablation width, R : radius)

Table 2 Data of cylindrical pocket process

W	4 μm
R	120 μm
Number of concentric circle	10 times

Table 2 는 원통형 포켓가공 형상 데이터로서 이 수치를 이용하여 형상을 구현하게 된다. 동심원의 수는 10 개로 설정하여 레이저 빔을 조사하였다. 조사되는 빔의 간격은 4 μm 로 설정하여 가공하였다. 동심원의 설정은 홀의 단면 형상이 마름모꼴의 형상으로 가공하기 위하여 정밀도 향상을 위하여 설

정한 값이 된다.

4. 결과 및 토론

4.1 Invar 합금의 어블레이션 특성

Invar 합금의 어블레이션 특성을 알아 보기 위하여 각각의 출력을 변환하며, 동시에 펄스의 수를 변환하여 레이저를 조사하였다. Fig. 5 는 펄스 에너지 2.98 μJ 에 펄스 하나를 조사 하였을 때의 현상을 AFM(Atomic Force Microscope)으로 3 차원 촬영한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 어블레이션이 되어 있는 주변 부위가 볼록한 부분을 볼 수 있다. 이는 펄스 에너지를 Invar 합금이 흡수하면서 어블레이션 과정이 이루어지는 동안 소성변형의 거동을 발생하는 것으로 볼 수 있다. 즉, 어블레이션 과정 중에 에너지는 깊이 방향으로 크게 작용하여 깊이 방향에서부터 hole 주변으로 전자 에너지가 분산되고 Invar 합금의 격자에너지가 밀려나가 이와 같은 현상이 생성되는 것으로 판단할 수 있다.

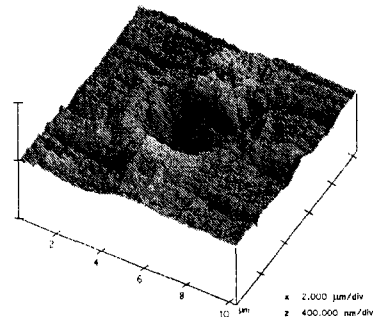


Fig. 5 The AFM image of an ablated crater in the Invar alloy by femtosecond laser at single pulse with pulse energy 2.98 μJ

펄초 레이저 펄스에 대한 에너지 플루언스의 증가에 따른 Invar 합금의 제거 깊이에 대한 그림을 Fig. 6 에 나타내었다. 에너지 플루언스가 증가함에 따라 제거 깊이는 서서히 증가하는 경향을 나타내다가 125J/cm² 에서부터는 급격하게 증가하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 6 에서 보는 바와 같이 비선형성을 나타내고 있는 것은 식 (6)과 식 (7)의 어블레이션 깊이가 조건에 따라 두 부분으로 나뉘어서 나타나는 것을 보여준다. 즉, 125J/cm²

이하의 $\delta > l$ 의 조건에서 발생한 것이고 $125\text{J}/\text{cm}^2$ 이상은 $\delta < l$ 의 조건에서 발생하는 어블레이션의 특징으로 볼 수 있다.

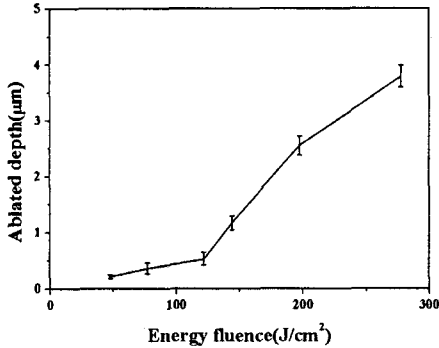


Fig. 6 Energy fluence dependence of the ablated depth for the 785nm femtosecond laser

4.2 Invar 합금의 섀도우 마스크 가공 특성

섀도우 마스크 가공에서 필요한 가공 변수는 가공 테이블의 이송 속도이다. 또한 이송속도의 변화에 따른 가공 형상의 중요성도 크게 작용할 수 있다. 따라서 이송속도에 따른 Invar 합금의 반응에 대하여 Fig. 7의 실험 결과를 얻을 수 있었다. 이송 속도 0.2mm/s 와 0.3mm/s 의 설정은 가공 형상의 정밀도를 향상하기 위하여 설정한 이송 속도이다. 초기에 제거된 폭은 같은 양을 나타내었지만 에너지가 증가함에 따라 폭의 차이가 점점 커지는 형태를 나타내고 있었다. 또한 속도가 증가하면 제거된 폭의 크기는 작아지는 형태로 나타났다. 이는 속도의 증가에 따라 시편의 에너지 흡수가 작아지기 때문이다.

Invar 합금의 원형 가공에서 z 축의 이송변화 즉, 가공 깊이의 변화는 정확하게 측정이 어려웠다. 왜냐하면 원형 형상으로 레이저 빔을 이송하게 되면 가속도의 영향을 받게 되고 이에 따라서 정확한 초점 위치의 파악이 어렵기 때문이다. 이로 인하여 z 축의 이송변화 변수를 첨가하여 실제 가공에 적용하게 되었다. 이송속도는 0.2mm/s 의 속도로 설정하고 펄스 에너지는 $26.4\mu\text{J}$ 로 고정하여 Table 3 과 같은 조건으로 실험하였다. 여기서 Repetition number 는 깊이 방향으로 한번 가공한 후 이송하는 횟수를 말한다. 즉, $8\mu\text{m}$ 의 가공 깊이 조건은 한번 원형으로 가공하였을 때의 깊이가 되고 반복 횟수

를 10을 주게 되면 깊이 방향으로 10번 반복하여 $80\mu\text{m}$ 의 가공조건을 가지게 된다.

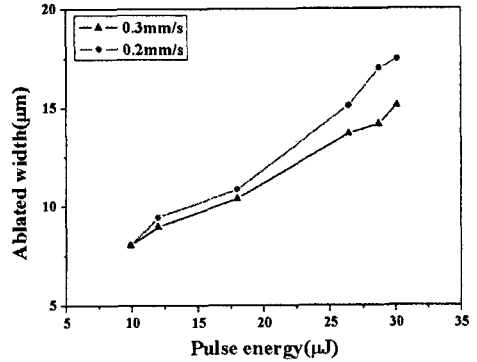


Fig. 7 Pulse energy dependence of the ablated width for the scan speed of 0.2mm/s and 0.3mm/s

Table 3의 조건으로 가공한 시편을 Figs. 8-9에 나타내었다. Fig. 8는 가공 깊이를 $8\mu\text{m}$ 로 하였을 때의 시편 사진으로 가공된 상부는 버의 발생 없이 가공이 되어있다. 그러나 하부는 비원형 모양을 형성하게 되었다. 이는 $26.4\mu\text{J}$ 의 출력에서 가공 깊이를 $8\mu\text{m}$ 로 설정하게 되면 한번 어블레이션이 되는 깊이 보다 깊은 형태로 깊게 이송되어 발생된 현상으로 파악된다. 그리고 가공 면 주위의 흔적이 발생하였는데 이는 가공시 발생된 그을림이며, 이 그을림 현상은 가공시 발생하는 잔여물의 온도와 blowing에서 발생하는 공기와 산화반응으로 발생된 것으로 판단된다. 이 그을림면은 세척과정을 거치면 깨끗한 가공면을 생성하게 된다.

Table 3 Experimental results with different depth

Depth (μm)	Velocity (mm/s)	Power (μJ)	Energy fluence (J/cm²)	Repetition number (EA)
8	0.2	26.4	8.16	10
6	0.2	26.4	8.16	12
4	0.2	26.4	8.16	14
2	0.2	26.4	8.16	25

Fig. 9는 가공 깊이를 $4\mu\text{m}$ 로 설정 하였을 때 시편 사진으로 상·하부 원형 형상이 유지되어 있었고, 버의 발생 또한 없었다. 이 가공 조건이 레

이저의 출력과 이송속도와 가공 깊이의 변수가 알맞게 맞는 것으로 판단할 수 있다.

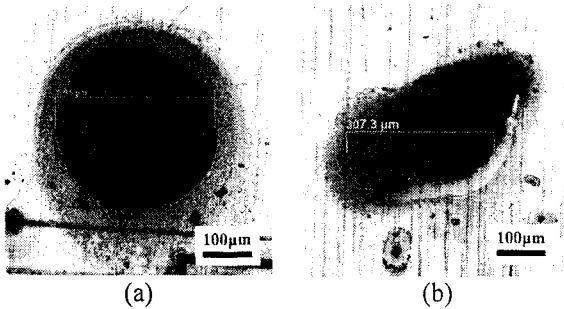


Fig. 8 Microscope image of Invar alloy drilled with femtosecond laser pulses (depth : $8 \mu\text{m}$, velocity : 0.2mm/s , peak power : $26.4\mu\text{J}$) (a) entrance and (b) exit of hole

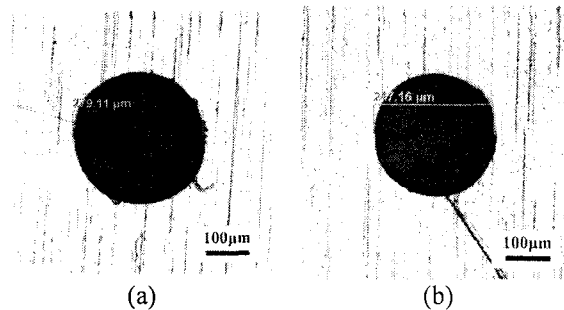


Fig. 9 Microscope image of Invar alloy drilled with femtosecond laser pulses (depth : $4 \mu\text{m}$, velocity : 0.2mm/s , peak power : $26.4\mu\text{J}$) (a) entrance and (b) exit of the hole

5. 결론

현재 Invar 합금의 hole 가공은 Nd:YAG 레이저를 이용한 가공을 많이 사용하고 있으나 이때 발생하는 버로 인하여 후가공 공정을 거쳐야 하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 펨토초 레이저를 이용하여 이의 문제점을 보완하기 위하여 실험을 수행 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 펨토초 레이저를 이용하여 Invar 합금의 어블레이션 특성에서 에너지 플루언스가 증가함에 따라 가공 깊이의 변화도 서서히 증가하지만, $125\text{J}/\text{cm}^2$ 에서 기울기의 차이점이 발생하였고, 이를 토대로 정밀도를 위한 가공

영역의 구분이 이루어지게 되는 부분을 찾을 수 있었다.

- (2) 웨도우 마스크의 홀가공에서 레이저 출력, 테이블 이송 속도와 깊이 방향 이송변화와 같은 변수를 사용하여 가공을 하였고, 깊이 방향 이송량 $4 \mu\text{m}$, 이송속도 0.2mm/s , 레이저 침투 출력 $26.4\mu\text{J}$ 에서 버의 생성없이 깨끗한 가공 면을 형성한 원형 모양을 구현할 수 있었다.
- (3) 펨토초 레이저를 이용하여 웨도우 마스크의 가공 적용성을 확인하였고, 이를 토대로 OLED 뿐만 아니라 다른 디스플레이 장치의 웨도우 마스크를 가공할 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(KRF-2005-041-D00083)

참고문헌

1. Ono, F., Hamatani, Y., Mukumoto, Y., Komatsu, S., Ishikawa, N., Chimi, Y., Iwase, A., Kambara, T., Muller, C. and Neumann, R., "Modification of Fe-Ni Invar alloys by high-energy ion beams," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 206, pp. 295-298, 2003.
2. Kim, C., "Production of shadow-mask-improved technology," Journal of Material Processing Technology, Vol. 127, No. 3, pp. 409-418, 2002.
3. Richerzhagen, B., "Industrial applications of the water-jet guide laser," Industrial laser user, Vol. 28, pp. 28-30, 2002.
4. Lee, E. S., Lee, J. H., Kim, W. M. and Chun, Y. J., "Removal of micro burr by using Electrolytic-deburring," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 20-26, 2005.
5. Venkatakrishnan, K., Tan, B. and Sivakumar, N. R., "Sub-micron ablation of metallic thin film by femtosecond pulse laser," Optics & Laser Technology, Vol. 34, No. 7, pp. 575-578, 2002.

6. Huang, H., Zheng, H. Y. and Lim, G. C., "Femtosecond laser machining characteristics of Nitinol," *Applied Surface Science*, Vol. 228, Issues 1-4, pp. 201-206, 2004.
7. Semerok, A., Chaleard, C., Detalle, V., Lacour, J. L., Mauchien, P., Meynadier, P., Nouvellon, C., Salle, B., Palianov, P., Perdrix, M. and Petite, G., "Experimental investigations of laser ablation efficiency of pure metals with femto, pico and nanosecond pulses," *Applied Surface Science*, Vol. 138, No. 1, pp. 311-314, 1999.
8. Shin, C. H., "A development trend of the OLED and hereafter forecast," *Weekly Electronics Information*, Vol. 3, No. 18, pp. 2-16, 2000.
9. Momma, C., Nolte, S., Chichkov, B. N., von Alvensleben, F. and Tunnermann, A., "Precise laser ablation with ultrashort pulses," *Applied Surface Science*, Vol. 109, pp. 15-19, 1997.
10. Nolte, S., Momma, C., Jacobs, H., Tunnermann, A., Chichkov, B. N., Wellegehausen, B. and Welling, H., "Ablation of metals by ultrashort laser pulses," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 14, Issue 10, pp. 2716-2722, 1997.