《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 28, No. 6, December 2017, pp. 356-360 ISSN : 1225-6285(Print)
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2017.28.6.356 ISSN : 2287-321X(Online)

A Comparative Study of ITO Glass Ablation Using Femtosecond and Nanosecond Lasers

Jin-Woo Jeon[1], Young-Gwan Shin[2,3], Hoon-Young Kim[2,3], Wonsuk Choi[2,3], Seok-Young Ji[2,3], Hee-Shin Kang[1], Sanghoon Ahn[1], Won Seok Chang[2,3], and Sung-Hak Cho[1,3†]

[1]*Department of Laser & Electron Beam Application, Korea Institute of Machinery & Material (KIMM), 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34103, Korea*

[2]*Department of Nano-Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery & Material (KIMM), 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34103, Korea*

[3]*Department of Nano-Mechatronics, University of Science & Technology (UST), 217 Gajeong-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34111, Korea*

(Received June 5, 2017; Revised September 29, 2017; Accepted October 6, 2017)

Indium tin oxide (ITO) provides high electrical conductivity and transparency at visible and near-IR wavelengths. ITO is widely used as a transparent electrode for the fabrication of LCDs, OLEDs, and many kinds of optical applications. It is widely employed for electrodes in various electric and display sectors because of its transparency in the visible range and high conductivity. Therefore, one issue is removing a specific area of a layer of material such as ITO or metallic film on a substrate, without affecting the properties of the substrate. ITO-on-glass removal using a laser is friendlier to the environment than traditional methods. In this study, ablation of ITO film on glass using a femtosecond-laser micromachining system (wavelength 1026 nm, pulse duration 150 fs) and a nanosecond-laser micromachining system (wavelength 1027 nm, pulse duration 5 ns) are described, compared, and analyzed.

Keywords: ITO, Glass, Femtosecond laser, Nanosecond laser, Threshold
OCIS codes: (140.7090) Ultrafast lasers; (320.7090) Ultrafast lasers

펨토초 레이저와 나노초 레이저를 이용한 ITO Glass의 어블레이션 비교 연구

전진우[1] · 신영관[2,3] · 김훈영[2,3] · 최원석[2,3] · 지석영[2,3] · 강희신[1] · 안상훈[1] · 장원석[2,3] · 조성학[1,3†]

[1]한국기계연구원 광응용기계연구실
㊞ 34103 대전광역시 유성구 가정북로 156

[2]한국기계연구원 나노공정연구실
㊞ 34103 대전광역시 유성구 가정북로 156

[3]과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과
㊞ 34113 대전시 유성구 가정로 217

(2017년 6월 5일 받음, 2017년 9월 29일 수정본 받음, 2017년 10월 6일 게재 확정)

ITO는 높은 전기 전도도와 가시광선, 근적외선 영역에서 투명성을 가진다. LCD, OLED 등을 포함한 광학에 적용되는 부품들의 제조에 투명전극으로 ITO가 사용되고 있다. 가시광선 영역에서의 투명성과 높은 전도도 때문에 다양한 전기, 디스플레이 센서의 전극으로 이용되었다. 한 가지 사안은 기판의 특성에 충격없이 ITO, 금속 필름같은 특정한 영역의 층을 제거하는 부분이다. 레이저를 사용한 유리 위의 ITO 제거는 기존 방법에 비해 친환경적이다. 본 연구는 펨토초 레이저와 나노초 레이저를 사용하여 ITO를 제거하는 비교분석이다.

Keywords: 투명전극, 유리, 펨토초 레이저, 나노초 레이저, 임계치
OCIS codes: (140.7090) Ultrafast lasers; (320.7090) Ultrafast lasers

†E-mail: shcho@kimm.re.kr, ORCID: 0000-0002-4191-1631

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

Smart Phone과 Tablet PC의 등장과 함께 증가하고 있는 Touch Panel용 광학필름은 Touch Sensor의 핵심소재인 투명도전성필름을 중심으로 성장하고 있다[1,2]. 현재 여러 가지 투명도전성물질 중에서 대표적인 소재는 ITO (Indium Tin Oxide)이다. PET필름과 같은 필름을 기재로 하는 Film 형태의 ITO를 사용하거나 Glass에 ITO를 성막하여서 제조되는 Glass ITO를 사용하여서 Touch Module을 만들 수 있다. ITO 필름은 높은 전도성과 가시광이나 적외선 영역에서 매우 우수한 투명도를 가지고 있기 때문에 LCD, OLED, 광전지 소자 및 다양한 광산업 분야에 투명 전극으로써 폭넓게 활용되고 있다[3-5]. Glass ITO의 경우 표면저항을 낮추기가 쉽고 투과율과 같은 광학특성이 좋은 장점을 갖고 있어 현재 많은 Smart Phone과 Tablet PC 제조업체에서 Glass ITO를 채택하고 있으며, 앞으로 이러한 Display Panel은 더 얇고, 크고, 정밀하게 발전할 것으로 예상된다. 디스플레이와 전자 산업에 유리를 기판으로 하는 ITO 필름 가공을 위하여 엑시머 레이저, UV 나노초 레이저, 나노초 레이저와 펨토초 레이저를 이용한 연구가 진행되어 왔고 현재도 진행되고 있으며, 여러 산업 분야에서 폭 넓게 활용 또한 되고 있다[6-8].

본 연구에서는 유리 기판 위의 ITO 필름을 펨토초 레이저와 나노초 레이저를 이용하여 각각의 조건에서 효율적으로 패터닝을 해보고 나노초 레이저와 펨토초 레이저가 갖는 가장 큰 차이점인 펄스폭의 장단이 ITO 필름의 가공결과에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구에 대하여 소개하고자 한다. 이번 실험에는 파장 1026 nm, 펄스폭 150 fs, 반복률 100 kHz, 최대출력 5 W를 가지는 IR영역대의 펨토초 레이저와 파장 1026 nm, 펄스폭 5ns, 반복률 100 kHz, 최대출력 5 W의 IR 영역의 나노초 레이저의 펄스 에너지를 조절하여 유리 기판 위의 ITO 필름의 가공적 특성을 비교 분석하여 연구하였다.

II. 실 험

나노초 레이저를 이용한 가공의 경우, 나노초 레이저의 긴 펄스폭으로 인하여 조사된 에너지의 대부분이 열전달을 통해 주변으로 전파되어 재질의 열적 변형이 발생하게 된다. 따라서 투명재질을 가공하기 위해서 기존의 레이저나 레이저 가공방법을 달리 적용해야 하는 어려움이 있는 반면에, 펨토초 레이저는 극히 짧은 펄스폭으로 인하여 열적 변형이 거의 없으며, 재료의 열 반응 속도보다 빠른 시간 내에 빔을 조사하므로 비열적 가공이 가능하다는 이점을 가지고 있다[9-11]. 또한 펨토초 레이저의 비선형(non-linear) 광학현상에 의해 이론적으로는 파장에 관계없이 대부분의 재질을 가공할 수 있는 재료 무의존성(independency)의 큰 특징이 있다[12,13].

본 연구에서는 Light Conversion사의 Pharos모델로써, 1026 nm의 중심 파장, 100 kHz의 반복률, 150 fs의 펄스폭(FWHM)과 5 W의 최대 평균 출력 에너지를 가지는 펨토초 레이저와 Pharos 내에서 컴프레서의 위치를 변경하여 5나노초를 갖는 레이저를 조사하여 유리 기판 위의 ITO 필름의 어블레이션을 위하여 사용 되었으며, NA0.28를 갖는 10x의 objective lens가 실험에 사용되었다. 방출된 두 레이저 빔의 profile은 모두 Gaussian 형태를 가지며 출력빔은 선편광을 가진다. 샘플 표면에서의 레이저 강도를 조절하기 위하여 레이저운용 소프트웨어를 사용하였으며 정밀 가공에 적합한 스테이지 가공 시스템을 이용하여 실험을 실시하였다. 그림 1은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 실험에 사용된 레이저 시스템의 실제 이미지이며, 그림 2는 레이저의 상세 스펙이다.

연구에 사용된 ITO 박막은 200 nm의 두께로 일정하고, 2.2 mm 두께의 유리기판 위에 In_2O_3 (90wt%) : SnO_2 (10wt%)을 사용하여 DC magnetron sputtering system에 의해 증착되었으며, 제작 되어진 ITO-Glass의 모식도를 그림 3에 나타내었다.

본 연구에 사용된 펨토초 레이저와 나노초 레이저 가공시스템은 그림 4와 같이 동일하며, 레이저와 빔 전송을 위한

Fig. 1. Image of laser system (Pharos, Light conversion).

Description	Femtosecond laser	Nanosecond laser
Wavelength	1026 nm	1026 nm
Pulse Width	150fs	5ns

Fig. 2. Specifications of femtosecond laser and nanosecond laser.

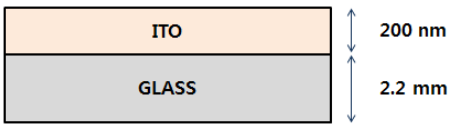

Fig. 3. Schematic image of experimental sample.

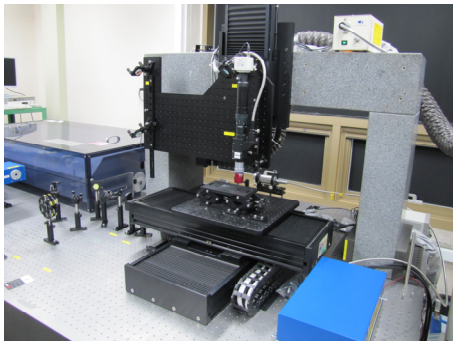

Fig. 4. Image of laser processing system.

광학계, X-Y 스테이지, Z축 슬라이드로 구성된다. X-Y 스테이지는 CAD로 설계된 가공경로를 표현하고 Z-슬라이드를 통해 가공초점을 결정한다. 펨토초 레이저는 펄스 형태로 연속적으로 출력되므로 가공을 위하여 레이저 ON/OFF 셔터가 사용되었고, 가공용 대물렌즈와 동일한 축에 설치된 CCD를 통하여 레이저 초점을 결정하고 가공 상태를 모니터링 할 수 있도록 하였으며, 출력 조절을 위하여 레이저운용 소프트웨어가 사용되었다.

III. 결과 및 고찰

그림 5는 유리 기판 위에 200 nm의 두께로 증착되어진 ITO 박막 샘플을 펨토초 레이저 레이저의 다양한 펄스 에너지로 가공한 광학 현미경 측정 결과이다. 그림 5(a)-(h)는 유리기판 위 ITO 박막의 임계 펄스 에너지를 실험하기 위하여 펨토초 레이저의 펄스에너지를 각각 0.2 μJ, 0.41 μJ, 0.6 μJ, 0.8 μJ, 1.0 μJ, 1.17 μJ, 1.36 μJ, 1.54 μJ로 조절하여 펨토초 레이저 한 펄스를 조사시켜 레이저 가공을 진행 하였다. ITO 박막의 경우 그림 5(a) - 0.2 μJ에서는 ITO에 영향을 주지 못하는 것으로 광학현미경 사진에서 관측 할 수 있다. 그림 5(b) - 0.41 μJ에서는 ITO 표면에 영향을 가할 수 있지만 가공이 되지 않았고, 그림 5(c) - 0.6 μJ에서 내부에 검은 원이 발생하고, 펄스 에너지가 증가 할수록 파란색 큰 원 내부에 검은 원들의 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. 이것을 토대로 0.6 μJ부터 200 nm의 ITO를 바닥면까지 제거할 수 있으며, 펄스 에너지가 증가할수록 제거되는 ITO양이 증가 한다고 판단할 수 있다. 그리고 실험에 사용된 펨토초 레이저의 펄스에너지는 유리에 손상을 주지 않고 ITO만을 제거한 것을 볼 수 있다.

레이저의 펄스 길이에 따른 가공 특성이 ITO 재료에 어떻게 변화하는지 알아보기 위해 동일한 펄스에너지에서 레이저 중첩 횟수를 조절하며 실험을 진행 하였다. 이 때 선택된 펄스에너지는 0.41 μJ이며, 너무 높은 펄스 에너지에서는 ITO가 가공이 쉽게 되므로 펄스 길이에 따른 비교를 하기 어렵기 때문에 표면에 영향을 주기 시작한 펄스 에너지 0.41 μJ을 선택하였다. 그림 6은 펄스 1~6발 까지 한발씩 중첩하여

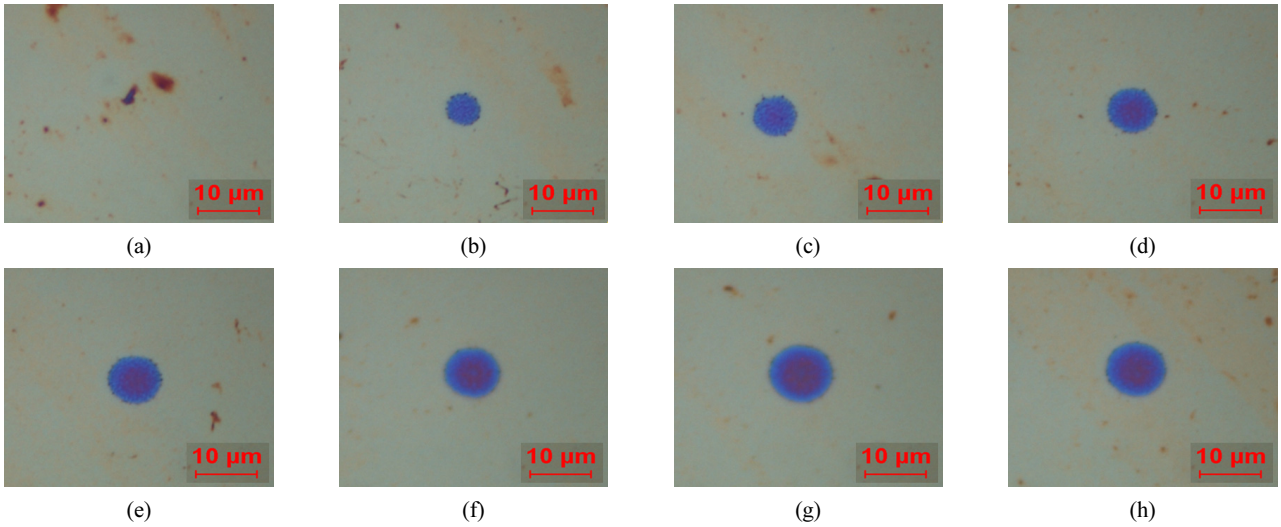

Fig. 5. Optical microscopy image of ITO film on glass ablated by femtosecond laser with different pulse energy. (a) 0.2 μJ, (b) 0.41 μJ, (c) 0.6 μJ, (d) 0.58 μJ, (e) 1.0 μJ, (f) 1.17 μJ, (g) 1.36 μJ, (h) 1.54 μJ.

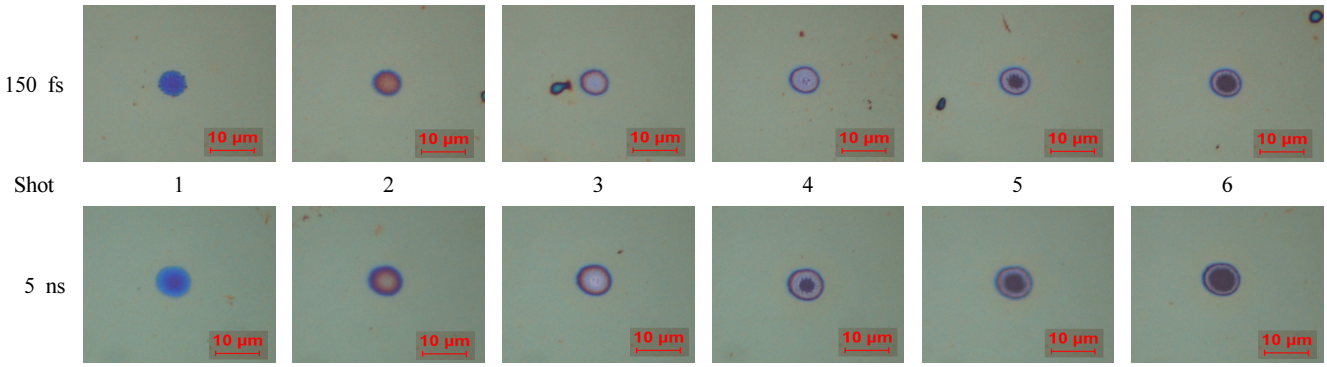

Fig. 6. Optical microscopy image of ITO film on glass ablated by femtosecond laser and nanosecond laser with same pulse energy and different laser pulse.

레이저를 조사한 결과물이다. 현미경 사진에서는 나노초에서 가공된 ITO 직경이 더 크고, 깊게 제거되는 것을 볼 수 있으며 유리면까지 적은 펄스로 가공을 할 수 있다. 펨토초와 나노초의 영향을 좀 더 알아보기 위해 AFM 분석을 진행하였다.

그림 7은 펨토초와 나노초의 중첩 수 별로 비교한 그림이다. 펨토초와 나노초 레이저의 펄스 중첩 횟수가 많아 질수록 펄스에 상관없이 ITO 재료는 유리표면까지 가공이 되며, 가공이 되는 폭이나 깊이는 비슷한 것을 알 수 있다. 하지만 중첩되는 펄스의 수가 적을수록 가공되는 형상이 다른 것을 볼 수 있다. 그 이유는 펄스 레이저는 큰 첨두 출력을 가지는 특성을 가진다. 첨두 출력과 펄스 길이의 관계는 펄스 길이가 짧을수록 첨두 출력이 커지는 비례 관계를 가지고 있다.

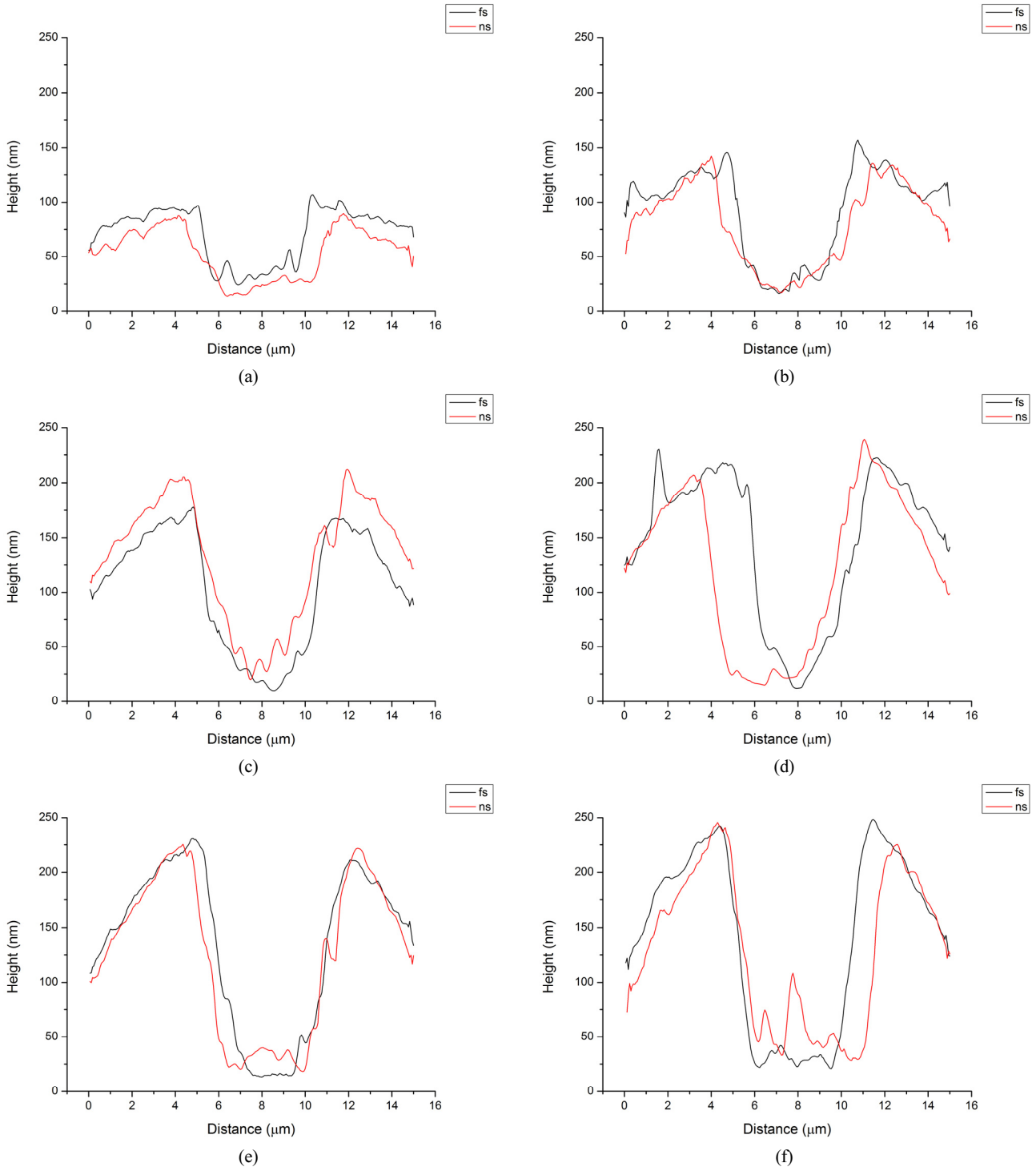

Fig. 7. Graph of different ablated width between femtosecond laser and nanosecond laser with each laser pulse. (a) 1 pulse, (b) 2 pulse, (c) 3 pulse, (d) 4 pulse, (e) 5 pulse, (f) 6 pulse.

펨토초의 펄스 길이는 10^{-15}, 나노초의 펄스 길이는 10^{-9} 이를 토대로 계산을 하면 펨토초 레이저의 첨두 출력은 2.73 GW, 나노초 레이저의 첨두 출력은 82 W를 갖는다. 이런 특성으로 인해 펄스의 중첩 횟수가 적을수록 펨토초와 나노초의 가공 형상이 크게 다르다는 것을 알 수 있다. 그리고 중첩 횟수가 많아 질수록 펨토초와 나노초의 가공 형상이 비슷해지는 것은 열에 의한 영향이라고 생각 할 수 있다. 펨토초의 경우 레이저의 펄스가 재료에 조사되고 재료 내부로 들어가는 열 확산 속도보다 빠르기 때문에 열 확산을 최대한 억제할 수 있다. 하지만 5나노초의 경우에는 재료의 열 확산 속도와 비슷하기 때문에 5나노초의 펄스 중첩 횟수가 더 많아 질수록 열이 더 많이 들어가게 된다. 중첩된 열이 그 다음 들어오는 펄스의 가공에 영향을 주는 것으로 생각된다.

IV. 결　　론

펨토초 레이저의 경우, 펄스폭이 짧으므로 인텐시티가 높아짐에 따라 낮은 펄스 에너지에서도 ITO 박막에 대한 가공이 가능하고 나노초 레이저는 펄스폭이 펨토초 보다 길기 때문에 인텐시티가 낮아지므로 적은 펄스에서 가공 형상이 크게 다르다는 것을 보여 주고 있다. 특정기판 위에 증착되어 있는 투명전도성 물질에 대한 선택적 가공 연구는 산업적으로 큰 이슈이며, 본 연구로 얻어진 결과를 토대로 display에 이용되는 투명재료 및 TCO에 대하여 응용연구를 통하여 핵심요소기술을 확보한다면 산업발전에 큰 보탬이 될 것으로 생각된다.

References

1. M. Henry, P. M. Harrison, and J. Wendland, “United Kingdom, Laser ablation of ITO thin films on glass for flat panel display manufacture,” Photon **6**, 39-44 (2005).
2. S. Venkat and C. Dunsky, “Laser patterning of ITO in flat panel display manufacturing,” Proc. SPIE **6106**, 610602 (2006).
3. S. H. Cho, W. S. Chang, J. G. Kim, K, R. Kim, and J. W. Hong, “Fabrication of internal diffraction gratings in planar fluoride glass using low-desity plasma formation induced by a femtosecond laser,” Appl. Surf. Sci. **255**, 2069-2074 (2008).
4. O. Yavas and M. Takai, “Effect of substrate absorption on the efficiency of laser patterning of indium tin oxide,” J. Appl. Phys. **85**, 4207-4212 (1999).
5. O. Yavas and M. Takai, “High-speed maskless laser patterning of indium tin oxide thin films,” J. Appl. Phys. Lett. **73**, 2558-2560 (1998).
6. B. J. Luff, J. S. Wilkinson, and G. Perrone, “Indium tin oxide overlayered waveguides for sensor applications,” Appl. Opt. **36**, 7066-7072 (1997).
7. C. Molpeceres, S. Lauzurica, J. L. Ocana, J. J. Gandia, L. Urbina, and J. Carabe, “Microprocessing of ITO and a-Si thin films using ns laser sources,” J. Micromech. Microeng. **15**, 1271-1278 (2005).
8. G. Raciukaitis, M. Brikas, M. Gedvilas, and T. Rakickas, “Patterning of indium-tin oxide on glass with picosecond lasers,” Appl. Surf. Sci. **253**, 6570-6574 (2007).
9. H. W. Choi, D. F. Farson, J. Bovats, A. Arai, and D. Ashkenasi, “Direct-write patterning of indium-tin-oxide film by high pulse repetition frequency femtosecond laser ablation,” Appl. Opt. **46**, 5792-5799 (2007).
10. C. Florea, “Fabrication and Characterization of photonic devices directly written in glass using femtosecond laser pulses,” J. Lightwave Technol. **21**, 246-253 (2003).
11. I.-B. Sohn, M.-S. Lee, J.-S. Woo, S.-M. Lee, and J.-Y. Chung, “Periodic patterning using a femtosecond laser,” J. Korean Soc. Laser Process. **8**, 190-196 (2005).
12. S.-H. Cho, J.-K. Park, J.-G. Kim, W.-S. Chang, D.-S. Choi, and K.-H. Whang, “Ultra-precision machining using a femtosecond laser,” J. Korean Soc. Precis. Eng. **27**(6), 17-23 (2010).
13. J.-G. Kim, K.-G. Nam, S.-H. Cho, W.-S. Chang, S.-J. Na, and K.-H. Whang, “Micromachining characteristics inside transparent materials using femtosecond laser pulses,” J. Korean Soc. Precis. Eng. **23**(5), 190-196 (2006).