

# 식각액에 따른 용융실리카의 레이저 습식 식각가공

이종호\* · 이종길\*\* · 전병희\*\*\*

## Laser Induced Wet Etching of Fused Silica according to Etchant

J. H. Lee, J. K. Lee and B. H. Jeon

### Abstract

Transparent materials such as fused silica are important materials in optical and optoelectronics field because of its outstanding properties, such as transparency in a wide wavelength range, strong damage resistance for laser irradiation, and high thermal and chemical stability. However, these properties make it difficult to micromachine silica in micro-sized quantities. In this study, we fabricated a micro patterns on the surface of fused silica plate using laser induced wet etching. KrF excimer laser was used as a light source. There were no burrs and micro cracks on the etched surface of fused silica and the flatness of the etched surface was fairly good. We investigated the influence of etchant upon the etch rate and quality in laser induced wet etching. Pyrene-acetone, toluene, and pyrene-toluene solution were used as etchant. In the side of etch rate, toluene and pyrene-toluene solution were better than pyrene-acetone solution.

**Key Words** : KrF excimer laser, fused silica, pyrene-acetone solution, toluene, toluene-acetone solution, wet etching

### 1. 서론

용융실리카와 같은 광 투과성 소재들은 광학과 광전자분야에 널리 쓰이고 있고, 인체 친화적 특성 때문에 광 및 바이오 산업에 각광을 받고 있는 소재중의 하나이다. 따라서 최근 이러한 광 투과성 소재들의 마이크로 가공법에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 하지만, 용융실리카는 우수한 광 투과성, 높은 경도와 열화학적 안정성 때문에 기존의 전통적인 방법으로는 가공이 어려운 대표적인 소재이다. 이러한 광 투과성 소재들을 가공하기 위해 선임 연구자들은 전통적인 레이저 어블레이션(ablation) 가공, 진공상태의 자외선 레이저 가공, 펨토초(femtosecond) 레이저를 이용한 가공 등을 시도하였지만, 소재의 균열이 발생하

나 평평한 가공면을 얻기 어려운 단점이 있다.<sup>(1,2)</sup>

레이저 습식 식각가공은 이러한 단점을 극복할 수 있는 신개념의 가공법으로 인정 받고 있다. 이 방법은 J. wang<sup>(3-6)</sup> 등에 의해 발견되었으며, 이들은 피렌-아세톤(pyrene-acetone)용액과 KrF 엑시머 레이저를 이용한 레이저 유도 후면 습식 식각 (Laser-Induced Back side Wet Etching)의 방법으로 용융실리카를 가공하였으며, X. DING<sup>(7)</sup>, Y. Yasui<sup>(8)</sup>, G. Kopitkovas<sup>(9)</sup> 그리고 K. Zimmer<sup>(10)</sup> 등도 KrF 혹은 XeCl 엑시머 레이저를 이용하여 용융실리카와 석영에 마이크로 패턴을 가공한 바 있다.

레이저 습식 식각가공은 가공 중 마이크로 버(burr)의 발생을 줄일 수 있으며, 형상정밀도 또한 우수하다고 알려져 있다.

그리고, 가공방식 보다 공정이 단순하고, 레이

\* 인덕대학 산업기술연구원

\*\* 한국산업기술대학교 기계공학과

\*\*\* 인덕대학 컴퓨터응용기계계열

저 직접 가공법에 비해 낮은 에너지 밀도에서도 가공이 가능하다는 부가적인 장점도 가지고 있다.<sup>(3-6)</sup>

본 연구에서는 파장이 248nm 인 KrF 레이저를 이용한 습식 식각가공으로 판형 용융실리카의 표면에 마이크로 패턴(micro-pattern)을 가공하였다. 또한 식각액에 따른 식각 특성을 알아보기 위해, 피렌-아세톤용액, 순수 톨루엔(toluene), 그리고 피렌-톨루엔 용액을 식각액으로 하여 가공을 수행하고, 각각의 가공특성과 식각률(etch rate) 등을 비교 분석하였다.

## 2. 가공 메커니즘

레이저 직접가공은 일반적으로 고출력 레이저에 의한 고체소재를 열적 현상에 의해 가공되는 레이저 어블레이션(ablation)과 액시머 레이저로 폴리머(polymer)와 같은 소재를 가공 시 광자에 의해 폴리머의 화학적 결합의 파괴를 유도하여 재료를 제거하는 포토어블레이션(photoablation) 등이 있다. 그러나 레이저 식각가공은 레이저 빛을 단지 화학적 또는 물리적 현상을 일으키기 위한 열 에너지 혹은 광 에너지의 공급원으로만 활용하고 가공자체는 식각액의 추가적인 물리, 화학반응을 통해 가공이 이루어 진다.

레이저 습식 식각가공의 메커니즘은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 식각액의 열적 현상과 증기의 충격압(impact pressure)에 의한 복합적인 작용에 의해 가공이 진행된다. 레이저 빔을 식각액에 조사하면 식각액이 레이저 에너지를 흡수하여 과열되고, 과열된 식각액은 용융실리카를 용융시킨다. 식각 가공이 처음 시작되는 임계 레이저 에너지 밀도(threshold fluence)에서 과열된 식각액의 최대 온도는 식 (1)에서 구할 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$T_m = T_0 + \alpha F_{th} / \rho C \quad (1)$$

여기서,  $T_0$ ,  $\alpha$ ,  $F_{th}$ ,  $\rho$ ,  $C$ 는 각각 상온, 식각액의 흡수 효율, 임계 레이저 에너지 밀도, 식각액의 밀도, 식각액의 비열로 나타낸다.

식 (1)에 의해 계산된 식각액의 온도는 약 2000K 이상으로, 용융실리카의 녹는점(1700K)보다 높게 된다. 또한 레이저 빔이 조사되는 부분의 식각액은 증기화 하면서 많은 기포들이 발생하게 되는데, 그 기포들은 수백 $\mu$ s의 짧은 시간동안 생

성, 성장, 소멸을 일으키며 용융된 용융실리카에 높은 충격압을 주게 된다. 식 (2)에서 레이저 빔이 조사된 식각액에서 발생한 기포의 충격력을 구할 수 있고, 가공 중 발생하는 충격압은 수백 MPa 에 이른다.<sup>(6,7)</sup>

$$P = \rho C V_{jet} \quad (2)$$

여기서,  $P$ ,  $\rho$ ,  $C$ ,  $V_{jet}$ 는 각각 충격력, 식각액의 밀도, 식각액에서의 음속, 기포들이 임계반경까지 도달할 때의 속도를 나타낸다.

이러한 가공 메커니즘의 특징으로 인하여 버의 발생이 최소화 되는데, 이것은 가공 도중 용융실리카에 순간적으로 버가 발생하더라도 이것은 다음 순간에 다시 용해되어 제거되기 때문이다. 레이저 조사가 끝나면 식각액과 용융실리카의 온도가 급격히 내려가게 되며 가공물과 식각액은 다시 초기 상태로 되돌아 간다. 이와 같은 과정을 반복하면서 레이저 식각 가공이 진행되는 것이다.

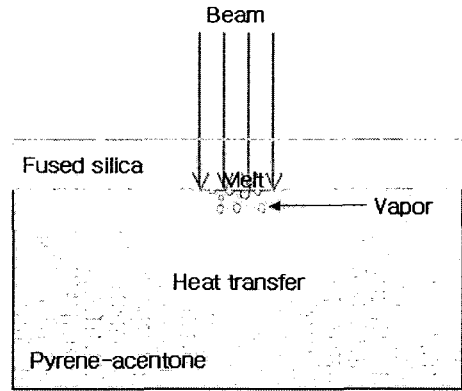


Fig. 1 Concept diagram of mechanism for laser induce wet etching.

## 3. 실험방법

가공시편은 직경이 50mm 이고 두께가 0.5mm 인 판형 용융실리카(fused silica plate)를 사용하였고, 레이저는 파장이 248nm, 최대출력이 65W, 최대반복률(Max. repetition rate)이 100Hz 인 KrF 액시머 레이저(Lambda Physik, LPX 210i)를 사용하였다.

레이저 습식 식각가공은 판형 용융실리카 뒷면에 식각액을 접촉시키고 식각액이 접해 있는 소재의 뒷면에서 가공이 진행되는 방식이며, 레이저

빔 중간에 금속 마스크를 장착하여 여러 가지 형상을 가공한다. 또한 레이저 습식 식각가공은  $500 \text{ mJ/cm}^2$  의 낮은 레이저 에너지 밀도에서 가공이 시작되기 때문에 정확한 에너지 밀도를 측정하기 위해 파워 프로브(power probe)를 사용하였다.

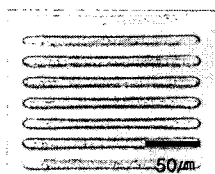
실험은 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를 각각  $400\sim 1400 \text{ mJ/cm}^2$ ,  $500\sim 2000$  pulse 로 변화시키고 주파수 반복률을  $5 \text{ Hz}$  로 고정하여 실험을 수행하였다. 패턴은 폭이  $12 \mu\text{m}$  길이가  $169 \mu\text{m}$  인 채널을 가공하여 가공특성을 알아 보았고,  $0.4 \text{ mol/l}$  의 피렌-아세톤용액, 순수 톨루엔, 그리고  $0.5 \text{ mol/l}$  의 피렌-톨루엔을 식각액으로하여 실험에 사용하였으며, 각각의 가공특성과 식각률(etch rate)을 비교하였다.

가공 후 시편은 아세톤을 이용하여 초음파 세척을 하였고 가공된 마이크로 패턴의 크기와 표면의 형상 및 가공깊이는 광학현미경을 이용하여 관찰·측정하였다.

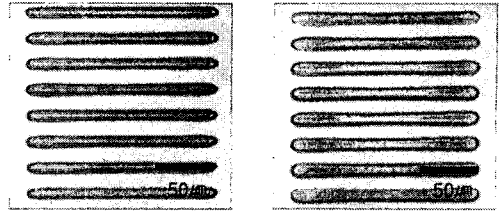
#### 4. 실험결과

레이저 습식 식각법으로 다양한 식각액을 사용하여 용융실리카의 표면에 마이크로 패턴을 가공한 사진을 Fig. 2 에 나타내었다.  $0.4 \text{ mol/l}$  의 피렌-아세톤 용액을 식각액으로 하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를  $1000 \text{ mJ/cm}^2$ ,  $50$  pulse 로 가공한 사진을 Fig. 2(a)에 나타내었으며, 톨루엔을 식각액으로 하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를  $1000 \text{ mJ/cm}^2$ ,  $500$  pulse 로 가공한 사진은 Fig. 2(b)에 보였다. 그리고  $0.5 \text{ mol/l}$  의 피렌-톨루엔 용액을 식각액으로 하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를  $1000 \text{ mJ/cm}^2$ ,  $500$  pulse 로 가공한 사진은 Fig. 2(c)에 나타내었다.

Fig. 2 의 가공된 사진을 보면 패턴의 모서리부가 비교적 깨끗하게 가공되었고 버가 없으며, 가공면도 평탄하게 가공된 것을 알 수 있다. 또한 식각액에 따른 가공 특성도 비슷한 양상을 보이는 것을 알 수 있다.



(a)  $0.4 \text{ mol/l}$ , Pyrene-acetone



(b) Toluene (c)  $0.5 \text{ mol/l}$ , Pyrene-toluene

Fig. 2 Photograph of fused silica irradiated with 500 pulses of KrF excimer laser at  $1.0 \text{ J/cm}^2$

식각액에 따른 식각깊이와 식각률을 알아보기 위해 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를 변화시키며, 가공된 깊이를 측정하였다. 각각의 식각액을 사용하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를  $600\sim 1400 \text{ mJ/cm}^2$ ,  $500\sim 2000$  pulse 로 변화 시키면서 가공하였고, 가공된 깊이를 측정하여 Fig. 3~5 에 나타내었다. 각각의 식각액에서 레이저 에너지 밀도와 가공 펄스 수에 따라 가공 깊이가 선형적으로 증가하는 양상을 보였다.

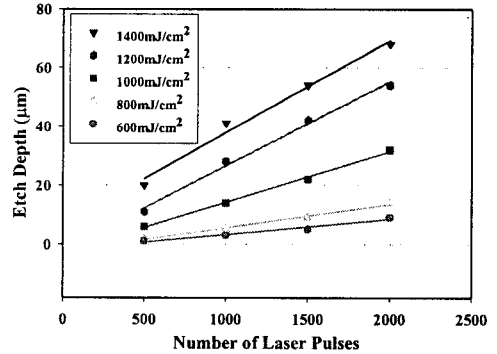


Fig. 3 Etch depth vs. number of irradiated laser pulses (Etchant : pyrene-acetone solution)

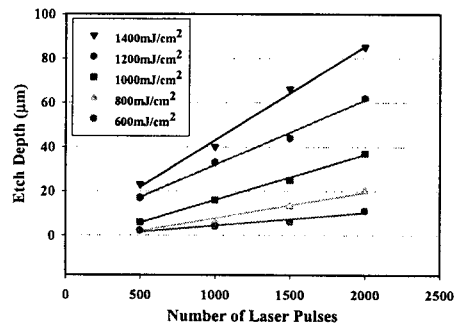


Fig. 4 Etch depth vs. number of irradiated laser pulses (Etchant : toluene)

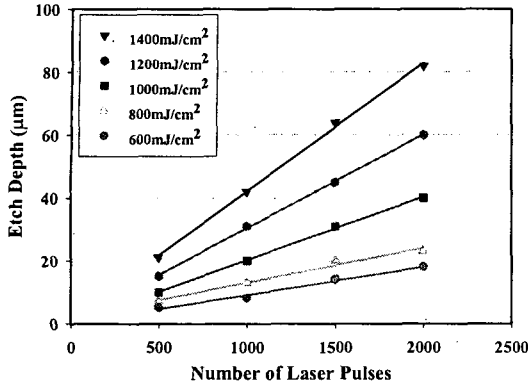


Fig. 5 Etch depth vs. number of irradiated laser pulses (Etchant : pyrene-toluene)

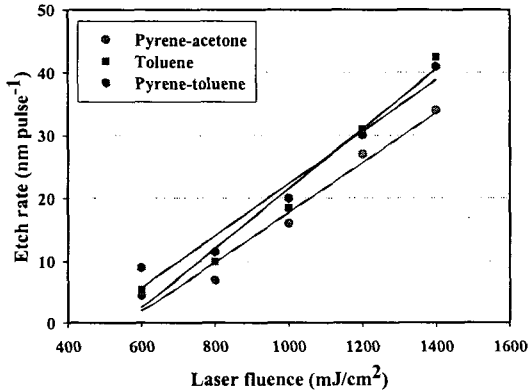


Fig. 6 Etch rate vs. laser fluence of a KrF excimer laser

피렌-아세톤, 톨루엔, 피렌-톨루엔 용액의 식각률은 Fig. 6 에 나타내었으며, 톨루엔과 피렌-톨루엔 용액을 식각액으로 한 경우가 피렌-아세톤용액을 사용하였을 때 보다 20~30%정도 좋은 식각률을 보였다. 그리고 톨루엔은 피렌-톨루엔 용액에 비해 600 mJ/cm<sup>2</sup> 의 낮은 에너지 밀도에서는 식각률이 낮지만, 1400mJ/cm<sup>2</sup> 의 높은 에너지 밀도에서는 식각률이 높게 나타나는 특성을 보였다.

한편 가공이 시작되는 임계 레이저 에너지 밀도를 살펴보면, 피렌-아세톤 용액의 경우에는 500mJ/cm<sup>2</sup>, 톨루엔의 경우는 500mJ/cm<sup>2</sup>, 피렌-톨루엔 용액을 식각액으로 하였을 때는 400mJ/cm<sup>2</sup> 에서 가공이 시작되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 KrF 엑시머 레이저를 이용한 습식 식각가공으로 판형 용융실리카의 표면에 패턴을 가공하였고, 피렌-아세톤용액, 톨루엔, 그리고 피렌-톨루엔 용액을 식각액으로 하였을 때 나타나는 가공성과 식각률을 알아보기 위한 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 레이저 습식 식각가공을 이용하여 용융실리카 표면에 마이크로 버와 크랙이 없는 평평한 가공면을 얻을 수 있다.

(2) 피렌-아세톤용액과 톨루엔, 피렌-톨루엔을 식각액으로 사용하였을 때, 레이저 에너지 밀도와 가공 펄스 수의 증가에 따른 식각량이 모두 선형적으로 증가하였다.

(3) 레이저 습식 식각가공에서 0.4mol/l 의 피렌-아세톤 식각액보다 톨루엔과 0.5mol/l 의 피렌-톨루엔 식각액에서 20~30%의 식각률이 향상되었고, 가공이 시작되는 임계 에너지 밀도는 피렌-아세톤 용액이 500mJ/cm<sup>2</sup>, 톨루엔이 500mJ/cm<sup>2</sup>, 피렌-톨루엔 용액이 400mJ/cm<sup>2</sup> 에서 가공이 시작되었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) P.R. Herman, K.P. Chen, P. Corkun, A. Naumov, S. Ng and J. Zhang, 2000, "Advanced lasers for photonic device microfabrication", LPM2000, pp. 31~35.
- (2) J. F. Ready, 1997, "Industrial Application of Lasers", Academic Press, San Diego, pp.409~420.
- (3) J. Wang, H. Niino and A. Yabe, 1999, "One-step microfabrication of fused silica by laser ablation of an organic solution", Appl. Phys. A 68, pp.111~113.
- (4) J. Wang, H. Niino, A. Yabe, 1999, "Micromachining of quartz crystal with excimer laser by laser-induced backside wet etching", Appl. Phys. A 69, pp.271~273.

- (5) J. Wang, H. Niino and A. Yabe, 2000, "Micro machining of Transparent Materials by Laser Ablation of Organic Solution", Proc. of SPIE, Vol. 4088, pp.64~69.
- (6) Jun Wang, Hiroyuki Niino and Akira Yabe, 2001, "Etching of transparent materials by laser ablation of an organic solution", LPM2000, pp.43~46.
- (7) X. Ding, Y. Kawaguchi, H. Niino, and A. Yabe, 2002, "Laser-induced high- quality etching of fused silica using a novel aqueous medium", Appl. Phys. A 75, pp.641~645.
- (8) Y. Yasui, H. Niino, Y. Kawaguchi, A. Yabe, 2002, "Microetching of fused silica by laser ablation of organic solution with XeCl excimer laser", Appl. Surf. Sci. 186, pp.552~555.
- (9) G. Kopitkovas, T. Lippert, C. David, A. Wokaun, J. Gobrecht, 2003, "Fabrication of micro-optical elements in quartz by laser induced backside wet etching", Microelectron. Eng. 67-68, pp.438~444.
- (10) K. Zimmer, A. Braun, R. Böhme, 2003, "Etching of fused silica and glass with excimer laser at 351nm", Appl. Surf. Sci. 208-209, pp.199~204.
- (11) Jun Wang, Hiroyuki Niino, Akira Yabe, 2000, "Micromaching of transparent materials with super-heated liquid generated by multiphotonic absorption of organic molecule", Appl. Surf. Sci. 154-155, pp.571~576.