

식각액에 따른 용융실리카의 레이저 습식 식각 특성 비교 연구

이종호* · 이종길** · 전병희***

(2004년 2월 10일 접수)

A Comparative Study on the Influence of Etchant upon the Etching Rate and Quality in Laser Induced Wet Etching of Fused Silica

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

Abstract

Transparent materials such as fused silica are widely utilized 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. In this study, we made a few 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 solution and toluene were used as etchant. In the side of etch rate, toluene solution was better than pyrene-acetone solution. But we made in wider range of energy density using pyrene-acetone solution. But pyrene-acetone solution gave us wider window of energy density for successful micro patterning.

Key Words : KrF Excimer Laser, Fused Silica, Pyrene-Acetone Solution, Toluene, Etching

1. 서 론

최근 세계 각국의 국가경쟁력을 좌우할 새로운 전략분야로 정보통신, 신약 및 바이오, 차세대 에너지 기술 등이 차세대 산업으로 주목을 받고 있다. 초미세 가공 기술은 이들 차세대 산업의 핵심 요소 기술로 인정 받고 있다. 특히 다양한 기능성 소재에 대한 초미세·초정밀 가공 기술은 광·정보통신과 바이오 산업 등의 분야에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다.

용융실리카는 우수한 광투과성, 높은 경도와 열

화학적 안정성, 인체 친화적인 특성 때문에 광 및 바이오 산업에 효과적으로 사용될 수 있는 반면 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 발생하거나 평평한 가공면을 얻기 어려운 단점이 있다.⁽¹⁻²⁾

레이저 습식 식각가공은 이러한 단점을 극복할 수 있는 신개념의 가공법으로 인정 받고 있다. 이

* 인덕대학 산업기술연구원

** 한국산업기술대학교 기계공학과

*** 인덕대학 컴퓨터응용기계계열

방법은 J. wang⁽³⁻⁶⁾ 등에 의해 발견되었으며, 이들은 피렌-아세톤(pyrene-acetone)용액과 KrF 레이저를 이용한 레이저 유도 후면 습식 식각(Laser-Induced Back side Wet Etching)의 방법으로 용융실리카를 가공하였으며, X. DING⁽⁷⁾, Y. Yasui⁽⁸⁾, G. Kopitkovas⁽⁹⁾ 그리고 K. Zimmer⁽¹⁰⁾ 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. 또한 기존 가공방식 보다 공정이 단순하고, 레이저 직접 가공법에 비해 낮은 에너지 밀도에서도 가공이 가능하다는 부가적인 장점도 가지고 있다.⁽³⁻⁶⁾

본 연구에서는 파장이 248nm인 KrF 레이저를 이용한 습식 식각가공으로 판형 용융실리카에 여러 가지 형상의 마이크로 패턴(micro-pattern)을 가공하였다. 또한 식각액에 따른 식각 특성을 알아보기 위해, 피렌-아세톤용액과 순수 톨루엔(toluene)을 식각액으로 하여 가공을 수행하고, 각각의 가공특성과 식각률(etch rate) 등을 비교·분석하였다.

2. 가공 메커니즘

레이저 습식 식각의 가공 메커니즘은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 열과 증기의 충격압(impact pressure)에 의한 복합적인 작용에 의한 것이다. 레이저 빔을 조사하면 식각액이 레이저 에너지를 흡수하여 과열되고 과열된 식각액은 용융실리카를 용융시킨다. 그리고 과열된 식각액이 증기화하면서 발생한 기포들이 짧은 시간동안 생성, 성장, 소멸하면서 발생하는 충격압으로 용융된 용융실리카 입자를 제거 하면서 가공이 이루어진다. 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.

식각가공이 처음 시작되는 임계 레이저 에너지 밀도(threshold fluence)에서 식각액의 최대 온도는 식 (1)에서 구할 수 있다.⁽¹¹⁾

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

- T_0 : 상온
- α : 식각액의 흡수 효율
- F_{th} : 임계 레이저 에너지 밀도
- ρ : 식각액의 밀도
- C : 식각액의 비열

식 (1)에 의해 계산된 식각액의 온도는 약 2000K 이상으로, 용융실리카의 녹는점(1700K) 보다 높게 된다. 따라서 가열된 식각액이 레이저가 조사되는 부분의 용융실리카를 용해시켜 가공이 일어나는 것을 알 수 있다. 또한, 레이저 빔이 조사되는 부분에서 식각액은 많은 기포들이 발생하는데, 그 기포들은 수백 μ s의 짧은 시간동안 생성, 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 MPa에 이른다.⁽⁶⁻⁷⁾

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

- P : 충격력
- ρ : 식각액의 밀도
- C : 식각액에서의 음속
- V_{jet} : 기포들이 임계반경까지 도달할 때의 속도

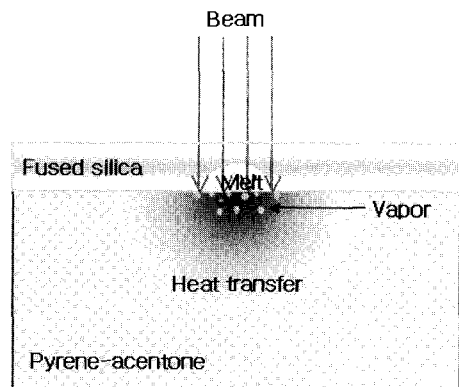


Fig. 1 Concept diagram of mechanism for laser induce wet etching

3. 실험방법

가공시편은 직경이 50mm, 두께가 0.5mm인 판형 용융실리카(fused silica plate)를 사용하였고, 레이저는 파장이 248nm, 최대출력이 65W, 최대 반복률(Max. repetition rate)이 100Hz인 KrF 엑시머 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 500mJ/cm²의 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 500~1400mJ/cm², 500~2000pulse로 변화시키고 주파수 반복률을 5Hz로 고정하여 실험을 수행하였다. 패턴은 폭이 12 μ m 길이가 169 μ m인 채널을 가공하여 가공특성을 알아 보았고, 0.4mol/l의 피렌-아세톤용액과 톨루엔 두 종류의 식각액을 실험에 사용하였으며, 각각의 식각률(etch rate)을 비교하였다.

가공 후 시편은 아세톤을 이용하여 초음파 세척을 하였고 가공된 마이크로 패턴의 크기와 표면의 형상 및 가공깊이, 표면 조도는 광학현미경과 광 간섭계를 이용하여 관찰· 측정하였다.

4. 실험결과

용융실리카를 레이저 습식 식각으로 가공한 사진을 Fig. 2와 3에 나타내었다. 피렌-아세톤 용액을 식각액으로 하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를 800mJ/cm², 1500pulse로 가공한 사진을 Fig. 2에 나타내었으며, 톨루엔을 식각액으로 하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를 700mJ/cm², 1000pulse로 가공한 사진은 Fig. 3에 보였다.

Fig. 2, 3의 가공된 사진을 보면 패턴의 모서리부가 비교적 깨끗하게 가공되었으며, 가공면도 평탄하게 가공된 것을 알 수 있다.

식각액에 따른 식각률을 알아보기 위해 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를 변화시키며, 가공된 깊이를 측정하였다.

농도가 0.4mol/l인 피렌-아세톤용액을 식각액으로 하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를 각각

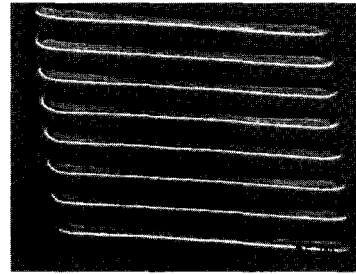


Fig. 2 SEM micrograph of fused silica etched in acetone solution containing pyrene

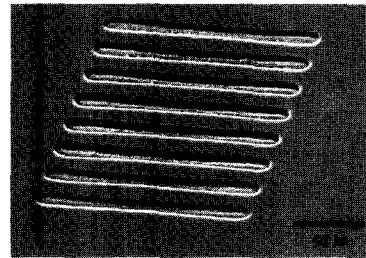


Fig. 3 SEM micrograph of fused silica etched in toluene

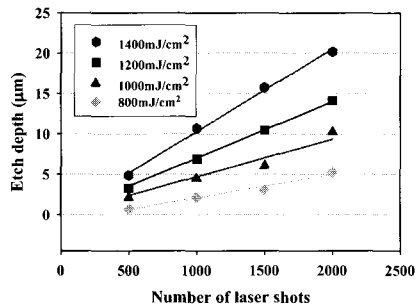


Fig. 4 Etch depth vs. number of irradiated laser pulses(Etchant : pyrene-acetone solution)

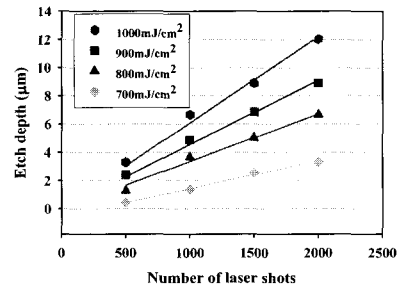


Fig. 5 Etch depth vs. number of irradiated of laser pulses(Etchant : toluene)

800~1400mJ/cm², 500~2000 pulse로 변화 시키면서 가공한 경우와 톨루엔을 식각액으로 하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를 700~1000 mJ/cm², 500~2000pulse로 변화시키면서 가공한 경우에 측정된 가공 깊이를 각각 Fig. 4와 5에 나타내었다. 각각의 식각액에서 레이저 에너지 밀도와 가공 펄스 수에 따라 가공 깊이가 선형적으로 증가하는 양상을 보였다.

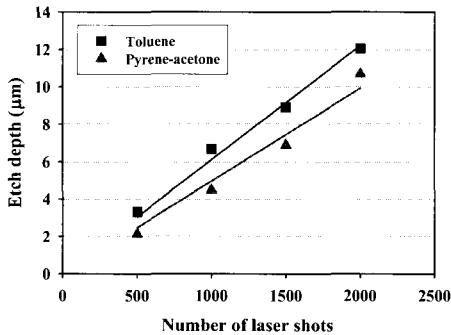
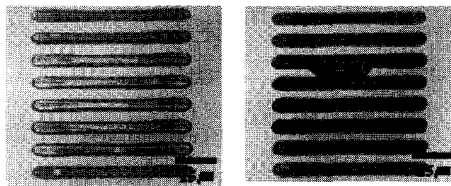


Fig. 6 Comparison of etch rate (toluene vs. pyrene-acetone solution)



(a) pyrene-acetone (b) toluene

Fig. 7 Photograph of fused silica irradiated with 1000 pulses of KrF laser at 1000mJ/cm²

동일한 조건에서 식각액의 차이에 따른 영향을 살펴보기 위하여, 피렌-아세톤용액과 톨루엔 식각액에 대하여 레이저 에너지 밀도를 1000mJ/cm²로 고정하고 레이저 조사수에 따른 식각량을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 톨루엔을 사용한 경우가 피렌-아세톤용액을 사용하였을 때 보다 20~30% 정도 좋은 식각률을 보였다.

한편 가공이 시작되는 임계 레이저 에너지 밀도를 살펴보면, 피렌-아세톤 용액의 경우에는 600mJ/cm², 톨루엔의 경우는 500mJ/cm²였다. 톨루엔의 경우 더 낮은 에너지 밀도에서 가공이 시작되는 장점이 있었다. 그러나 Fig. 7에서처럼 가공물에 균열 등과 같은 문제를 유발시키는 레이저 에너지 밀도는 톨루엔의 경우 약 1000mJ/cm², 피렌-아세톤 용액의 경우에는 약 1200 mJ/cm²였다.

피렌-아세톤용액을 식각액으로 하여 레이저 에너지 밀도와 펄스 수를 각각 1000mJ/cm², 2000pulse로 가공한 패턴의 A, B 구간을 광 간섭계를 이용하여 깊이와 표면을 측정된 그림을 Fig. 8에 나타내었다. 가공면의 표면조도를 알아보기 위해 Fig. 8에 표시된 1~5 지점을 선정하여 측정된 결과 평균거칠기(Ra)는 약 124nm로 측정되었고 가공 깊이는 평균 약 10.2μm의 깊이로 가공이 되었다.

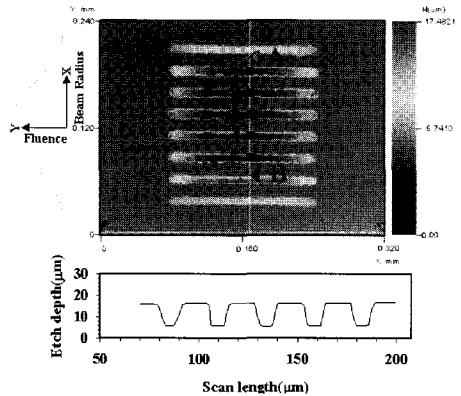


Fig. 8 Confocal scanning laser microscopic picture of pattern on fused silica

같은 조건으로 아세톤을 식각액으로 하여 가공한 시편을 측정된 결과 평균거칠기(Ra)는 약 254 nm로 측정되었고 가공 깊이는 평균 약 12μm의 깊이로 가공이 되었다. 따라서 톨루엔은 피렌-아세톤용액에 비해 식각률은 좋지만, 가공 중 높은 레이저 에너지 밀도에서는 용융실리카에 균열이 쉽게 발생하였고, 가공면의 표면조도도 다소 안좋은 양상을 보였다.

또한 광 간섭계로 A,B 구간을 측정된 프로파일(profile)에서 알 수 있듯이 평탄한 가공면을 얻을 수 있었다. 그러나 Fig. 8에서 가공된 패턴의 중간 부분은 가공된 깊이가 깊은 반면, 가장자리 부분은 가공된 깊이가 낮아 다소 차이를 보인다. 이것은 일반적으로 레이저 빔은 가우스 분포를 가지고 입사되기 때문에 레이저 빔의 중심에서 멀어질수록 레이저 에너지 강도가 낮아지기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다.

Fig. 9는 피렌-아세톤을 식각액으로 하여 여러 가지 형상의 마이크로 채널을 가공한 사진이다. Fig. 9(a)는 레이저 에너지 밀도를 900mJ/cm², 펄스 수를 2000pulses로 가공한 사진이고 가공깊이는 약 16μm이다. 그리고 Fig. 9(b)는 레이저 에너지

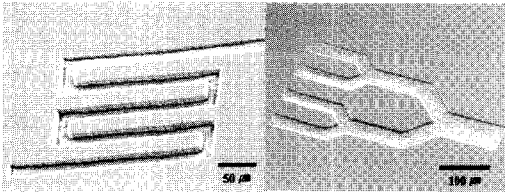


Fig. 9 SEM micrograph of micro channel patterns etched on fused silica by laser induced wet etching

밀도를 $800\text{mJ}/\text{cm}^2$, 펄스 수를 2000pulses로 가공한 사진이고 가공깊이는 약 $9\mu\text{m}$ 이다.

5. 결론

본 연구에서는 KrF 엑시머 레이저를 이용한 습식 식각 가공으로 판형 용융실리카에 다양한 형상의 패턴을 가공하였고, 피렌-아세톤용액과 톨루엔의 식각액에 따른 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 톨루엔을 식각액으로 사용하였을 때, 레이저 에너지 밀도와 가공 펄스 수의 증가에 따른 식각량이 모두 선형적으로 증가하였다.

(3) 레이저 습식 식각가공에서 $0.4\text{mol}/\text{l}$ 의 피렌-아세톤 식각액보다 톨루엔 식각액에서 20~30%의 식각률이 향상 되었고, 가공이 시작되는 임계 에너지 밀도는 피렌-아세톤 용액은 $500\text{mJ}/\text{cm}^2$, 톨루엔은 $600\text{mJ}/\text{cm}^2$ 에서 가공이 시작되었다.

(4) 피렌-아세톤 식각액은 레이저 에너지 밀도가 $1200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 부터 균열이 발생하는 반면, 톨루엔 식각액은 $1000\text{mJ}/\text{cm}^2$ 부터 용융실리카에 균열이 발생하기 시작하였고 가공면의 표면조도 또한 안 좋은 양상을 나타냈다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로부품 기

술개발 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 arganic 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 quarts 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 superheated liquid generated by multiphotonic absorption of organic molecule", Appl. Surf. Sci. 154-155, pp. 571~576.