

KrF 엑시머 레이저를 이용한 용융실리카의 미세 습식 식각가공

백병선* · 이종길** · 전병희*** · 김현영****

Micromachining of Fused Silica by KrF Excimer Laser Induced Wet Etching

B. S. Baek, J. K. Lee, B. H. Jeon and H. Y. Kim

Abstract

Optically transparent materials such as fused silica, quartz and crystal have become important in the field of optics and optoelectronics. Laser ablation continues to grow as an important technique for micromachining and surface modification of various materials, because many problems caused by direct contact between tools and workpiece can be avoided. Especially, laser ablation with excimer lasers enables fine micromachining of transparent materials such as fused silica, quartz and crystal, etc.

In this study, laser-induced wet etching of fused silica in organic solution was conducted. KrF excimer laser was used as a light source and acetone solution of pyrene was used as etchant. Changing the number of laser pulses, micro holes of various depths are fabricated.

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

1. 서론

용융실리카(Fused silica)와 같은 광투과성 소재들은 가시광선과 자외선, 적외선 등의 일반적인 자연광 파장 영역에서 매우 높은 광투과성과 열화학적 안정성, 강한 내손상성 등을 나타내기 때문에 광학과 광전자공학 분야에서 그 효용성을 인정받고 있는 매우 중요한 소재로 파악되고 있다.⁽¹⁾ 그리고 이러한 유리계통의 기능성 소재는

인체 친화적 소재로 잘 알려져 있으므로 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 소재들의 가공을 위하여 여러 가지 가공방법이 시도되고 있으며, 대표적인 예로는 초음파가공법과 레이저가공법 등이 있다.

기존의 레이저 가공방법은 대상물의 표면에 레이저를 직접 조사하는 방법으로 소재의 광양자 흡수성만을 전제로 한 전통적인 레이저 가공법이다. 과거의 실험연구자들^(2~4)이 이러한 방법으로 광투과성 소재에 관한 실험을

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 대학원
** 한국산업기술대학교 기계공학과
*** 인덕대학교 컴퓨터응용 기계계열
**** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

시도하였으나 적절한 가공조건과 결과를 찾기는 매우 어려웠다. 이와 같은 광투과성 소재의 가공 시에 나타나는 문제점들을 극복하기 위하여 레이저 유도 플라즈마 방법(laser induced plasma method), 진공 자외선 레이저 프로세싱(vacuum ultraviolet laser processing), 광학전자빔 리소그래피(optical and electron beam lithography), 초단펄스 레이저 마이크로가공(ultra-short-pulse laser micromachining) 등이 시도되었으나, 이들 방법은 장비가 너무 복잡하고 고가이거나 높은 정도의 진공을 필요로 하는 등의 문제가 있다.

화학적으로 안정한 비금속 계열의 광투과성 소재를 가공하기 위해서 Wang 등⁽⁵⁻⁶⁾ Laser-Induced Back-side Wet Etching (LIBWE) 방법을 제안하였으며, Herman 등⁽²⁾은 F₂ 레이저의 직접조사방법으로 광투과성 유리를 가공한 바 있으며, ONO 등⁽³⁾은 KrF 엑시머 레이저를 이용하여 엘라스토머 복합체에 미세 구조물을 생성하였다.

레이저 식각(laser etching)이란 식각액(etchant) 속에 담긴 가공물의 표면에 레이저를 조사하여 표면의 미세한 영역을 제거하는 레이저응용 가공방법으로, 마이크로일렉트로닉스(microelectronics)분야에 대한 레이저 응용에 있어서 중요한 기술의 하나로 인정받고 있다.

레이저 식각 기술은 국부적인 미세가공이 가능하며, 형상정밀도가 우수하고, 식각 속도가 빠르며, 열 영향부가 국부적이어서 열변형에 의한 가공오차가 작다는 주요 장점을 갖고 있다. 또한, 기존의 리소그래피 기술에 비해 공정이 단순하고 유연하며, 전통적인 레이저가공에 비해 비교적 적은 에너지로 가공이 용이하다.

본 연구에서는 파장이 248nm인 KrF 엑시머 레이저 유도 습식 식각을 이용하여 미세 구멍 가공을 수행하였다. 식각액은 피렌 아세톤(pyrene·acetone)을 이용하였고, 가공대상물로는 대표적인 광투과성 물질로서 내손상성이 강하며, 높은 열화학적 안정성을 갖고있는 용융 실리콘을 선택하였다.⁽¹⁾ 레이저 조사량에 따른 가공 양상을 파악하고 가공인자를 추출하였다.

2. 실험

2.1 실험장치의 구성 및 실험방법

실험에 사용된 실험장치의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다. 레이저는 펄스형으로 파장 248nm를 갖는 KrF 엑시머 레이저이다. 피가공체에 조사되는 레이저의 에너지 준위는 레이저 광원 자체의 출력을 조절하여 결정하였

다. 실험에 사용된 에너지는 레이저광원의 출력부에서 50~400mJ이며, 집광되어 조사되는 부분에서의 에너지밀도를 환산하여 Table 1에 나타내었다.

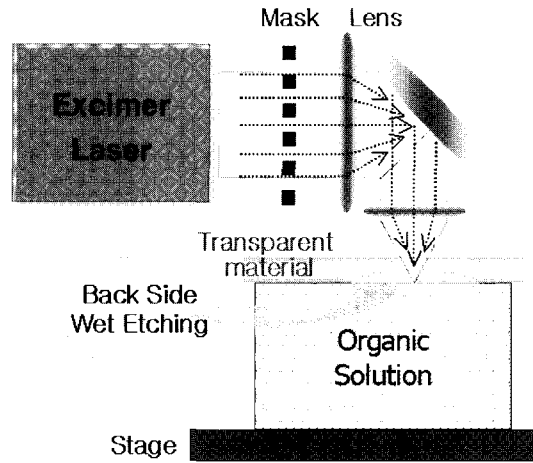


Fig. 1 Concept diagram of laser etching system

Table 1 Used laser energy and energy density

Laser energy (mJ)	Energy density (J/cm ²)
50	0.936
75	1.404
100	1.872
200	3.745
400	7.490

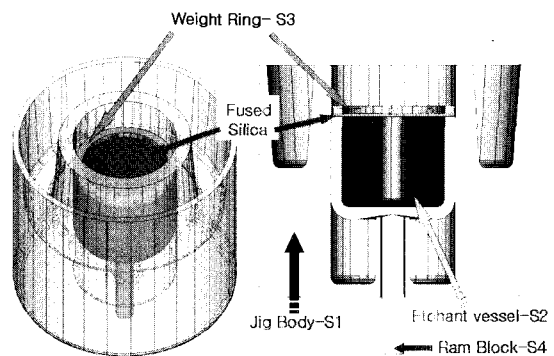


Fig. 2 Concept diagram of etchant system

식각수조시스템은 식각액과의 화학적 반응이 없는 안정한 재질을 선정하여 설계·제작하였고, 시편의 장착성 문제와 시편과 식각액사이의 기밀성 등을 고려하였다. 실제 설계한 식각수조시스템의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 식각액은 피렌($C_{16}H_{10}$)을 아세톤(CH_3COCH_3)에 용해시켜 사용하였으며, 일반적으로 식각액의 몰농도는 식각가공에 있어서 중요한 인자가 된다.

레이저의 광원에서 나오는 광을 직경 3mm의 원형구멍이 있는 마스크와 광학계에 통과시키면서 직경 170 μ m의 원형으로 집광하였으며, 집광된 레이저빔을 식각수조 위에 있는 판형 용융 실리카 위에 조사시켜 미세 구멍 가공을 수행하였다. 레이저의 에너지밀도(J/cm²)와 펄스의 수(pulses), 가공주파수(Hz), 식각액의 몰농도(M, mol/l)를 1차적인 가공인자로 보고, 이들의 영향을 파악하기 위하여 여러 조건 하에서 실험을 수행하였다.

2.2 가공 메커니즘

레이저 조사부에서 레이저가 피가공재 위에 조사되는 모습을 Fig. 3에 나타내었다.



Fig. 3 Focused laser beam during the etching process

레이저 조사부에서는 Fig. 4와 같이 식각액이 과열(super heated)되어 증기가 발생하고 있는 모습을 확인할 수 있다. 이러한 증기의 발생은 가공메커니즘과 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 가공의 기본원리는 과열된 식각액 부분의 피렌이 활성화가 되고, 이때 발생한 증기가 활성화된 피렌 입자를 운동시키는데, 이러한 현

상은 결과적으로 판형 용융 실리카에 대해서 침식작용을 하게 되는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 이러한 가공메커니즘의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다.

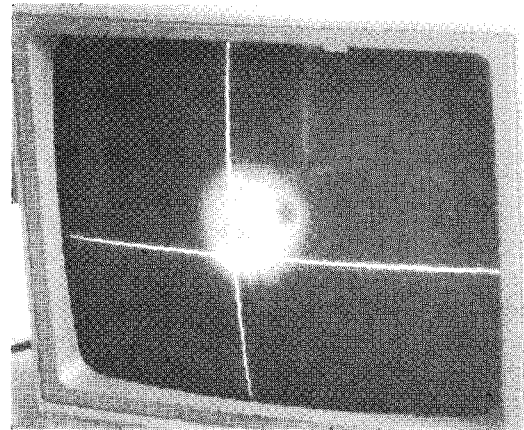


Fig. 4 Created pressure vapor during the etching process

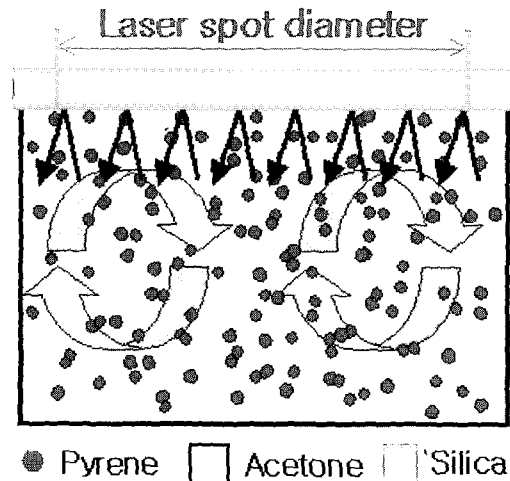


Fig. 5 Concept diagram of mechanism of Laser Induced Wet Etching

이러한 가설의 검증을 위해 실험이 끝난 후 식각액의 성분분석을 실시한 결과, 새롭게 생성된 제3의 물질은 없었으며, 피렌의 단일물질만 존재하는 것으로 나타났다. 성분분석한 결과를 Fig. 6에 스펙트럼 그래프로 나타내었고, 단일 피크만 검출된 것을 볼 수 있다. 따라서 피렌은 화학적인 반응을 하지 않고 용융 실리카를 가공한 것으로 판단된다.

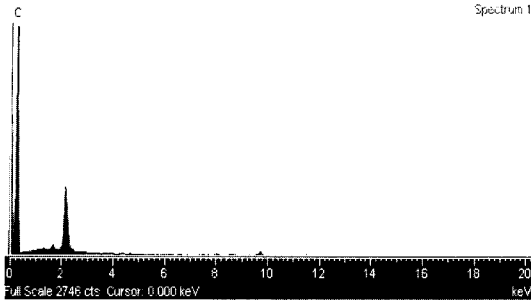


Fig. 6 Result of spectrum analysis of etchant

3. 실험결과 및 토의

3.1 가공인자 파악

본 절에서는 기본적인 가공인자를 알아보기 위한 목적으로 식각액의 몰농도와 레이저의 에너지 밀도, 가공주파수, 펄스의 수 등을 각각 변화시켜가면서 실험을 수행하였다.

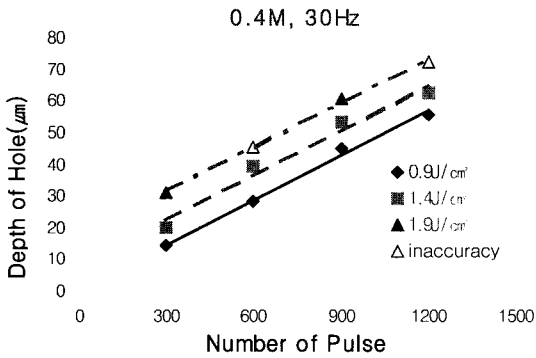
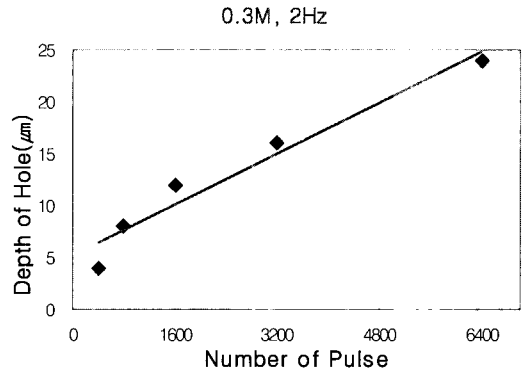


Fig. 7 Plot of etched depth as a function of the number of irradiated laser pulses, using various laser fluencies

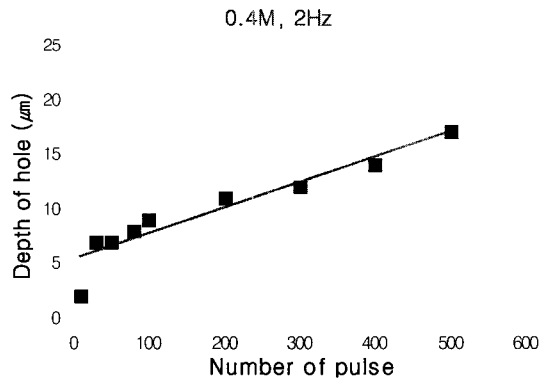
식각액의 몰농도를 0.4M (mol/l)로 하고, 레이저 주파수를 30Hz로 고정하였으며, 레이저 에너지 밀도를 펄스당 0.9~1.9 $J/cm^2 \pm 10\%$ 로 변화시키고, 조사되는 펄스수도 300~1,200펄스로 조절하면서 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었으며 측정자료값에 최소자승법을 적용하여 그림에 추세선을 표시하였다.

가공된 깊이의 결과추이를 보면 에너지 밀도와 펄스수의 변화에 따른 식각량의 관계가 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

에너지 밀도와 주파수를 고정하고, 식각액의 몰농도를 바꾸어서 가공한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 각각의 경우에 조사시킨 레이저 펄스의 절대적인 수에는 차이가 있으나, 작성된 그래프의 경향을 분석해 보면, 식각액의 몰농도와 식각량이 비례관계에 있음을 알 수 있다.



(a) Plot of etched depth as a function of the number of irradiated laser pulses, using an acetone solution containing pyrene at a concentration of 0.3M



(b) Plot of etched depth as a function of the number of irradiated laser pulses, using an acetone solution containing pyrene at a concentration of 0.4M

Fig. 8 Effect of the concentration of etchant

3.2 가공부 모서리 부분의 형상

에너지 밀도에 따른 구멍의 가공선단부 형상을 알아보기 위해 몰농도와 가공주파수, 펄스수 등이 같은 실험군에서 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 가공부의 모서리 부분이 손상된 영역을 측정한 결과 그림 (a)와 (b)에서 각각 3.8 μm 와 14.2 μm 이었다. 레이저 에너지 밀도가 (a)보다 2배 높은 (b)에서의 가공선단부가 3.7배정도 더 손상이

된 것을 볼 수 있다. 이는 에너지 밀도가 높을수록 피렌 입자의 활동이 더욱 증가하여 펄스 당 가공량의 증가와 함께 가공선단부의 주위에 영향을 준 것으로 보여진다. 또한, Fig. 10을 보면 2Hz로 가공한 (a)와 (b)에서는 가공선단부가 손상되지 않았으나, 30Hz로 가공한 (c)와 (d)에서는 손상되었다.

이러한 결과로 볼 때, 에너지 밀도와 펄스수 및 주파수는 깨끗한 가공선단부를 얻기 위한 가공인자임을 알 수 있다.

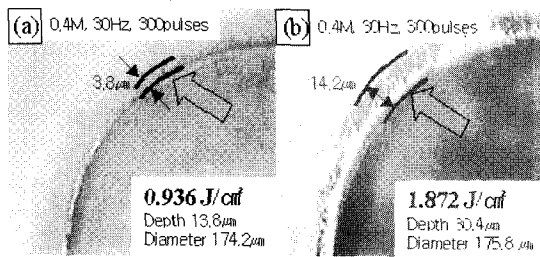


Fig. 9 Comparison of edge shapes

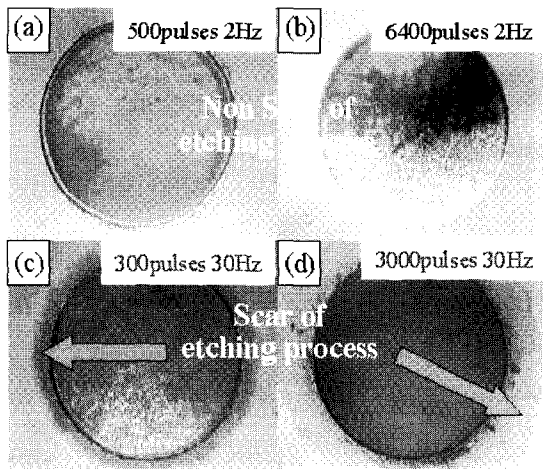
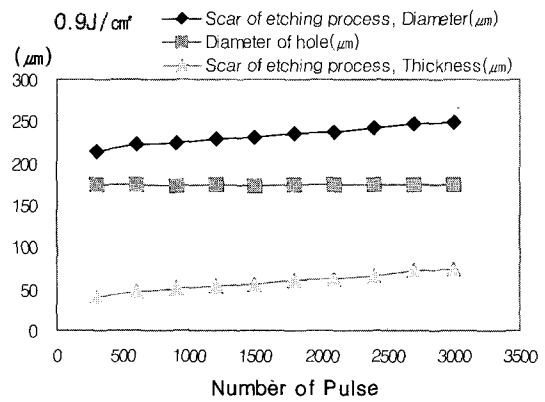


Fig. 10 Effect of laser irradiation frequency on the area of machining affected zone

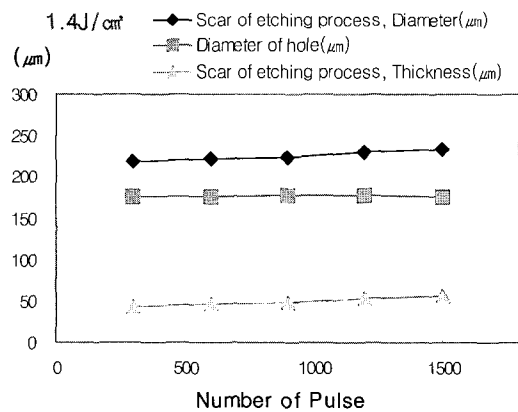
3.3 가공 영향부의 변화

여러 조건의 실험을 한 결과 가공부 주위에서 환형의 가공영향부를 발견하였다. 이 부분은 2.2절에서 설명한 가공메커니즘을 고려해볼 때, 식각액이 과열 후 높은 가공주파수 때문에 식지 못하고 가공부로 열을 전달하여 나타난 열 영향부로 추정된다. 레이저 조사 주파수에 따른 가공 영향부의 형태를 Fig. 10에 나타내었다. 레이저

조사 주파수를 2Hz로 가공한 경우에는 Fig 10의 (a)와 (b)에서 볼 수 있는 것처럼 가공 영향부가 거의 없고, 30Hz로 가공한 경우에는 Fig. 10의 (c)와 (d)에 나타낸 바와 같이 가공영향부가 비교적 넓게 형성되었다. 레이저 조사 주파수의 영향은 Fig. 10의 (c)와 (d)를 좀 더 자세히 비교하면 알 수 있는데, 주파수가 10배 높은 (d)에서 2배정도 더 넓은 가공영향부가 나타나고 있다 따라서 어느 수준의 가공주파수에 도달하면 환형의 가공영향부가 존재하게 되고, 그 가공 영향부의 크기는 주파수에 비례하여 커진다는 것을 알 수 있다.



(a) Plot of etched depth as a function of the number of irradiated laser pulses, using KrF excimer laser at 0.9 J/cm²



(b) Plot of etched depth as a function of the number of irradiated laser pulses, using KrF excimer laser at 1.4 J/cm²

Fig. 11 Effect of laser fluence on the machining affected zone

에너지 밀도에 따른 가공영향부의 크기변화를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 (a)와 (b)의 x축의 범위가 일정하지 않은 것은 (b)의 레이저 에너지 밀도가 (a)보다 약 1.6배 크기 때문에, 1,500펄스 이후에서는 가공영향부의 증가로 인해 크랙과 박리 및 관통이 발생하여 더 이상 정확한 값을 얻기 힘들었다.

그림 (a)에서는 가공영향부가 펄스수에 따라 계속해서 증가하는 모습이 잘 나타나있으나, (a)와 (b)의 경향을 비교하기 위해서 1,500펄스까지의 결과만을 비교해보았다. 가공된 구멍의 직경은 펄스수에 무관하게 약 170 μ m로 거의 일정하였다. 그러나 가공영향부의 크기는 펄스수의 증가에 따라 점차 증가하였으며, 레이저의 에너지 밀도가 작은 경우와 큰 경우 모두 유사한 양상을 나타내었다. 따라서 가공영향부의 증가에 대해서 레이저의 에너지 밀도보다 펄스수의 증가가 영향이 큰 것으로 보인다.

3.4 실험 결과 분석

본 연구의 궁극적인 목적은 관형 용융 실리카에 깨끗한 구멍을 관통시키는 것이다. 여러 가지 예비시험을 토대로 얻어진 Fig. 12의 자료들을 종합해 보면 깨끗하게 관통된 구멍을 만들 수 있을 것으로 보인다.

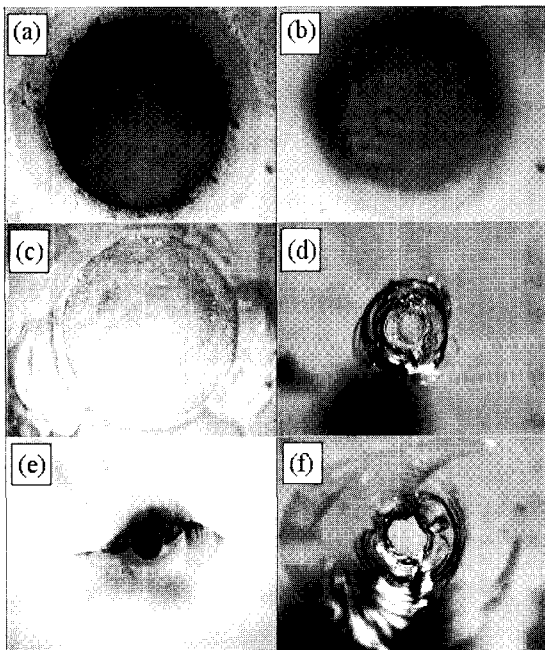


Fig. 12 Photographs of the kind of hole by etching process

그림에서 (a), (b)는 실험 후 측정 가능한 것 중 가장 깊은 가공을 한 것으로 깊이가 132.6 μ m이었다. 3000펄스를 30Hz로 가공한 것으로 가공시간은 100초가 소요되었다. 사용한 관형 용융 실리카의 두께는 500 μ m이므로 관통하기 위한 수치적인 예상시간은 377초이다. 하지만 가공주파수나 에너지 밀도가 너무 높아지게 되면 가공영향을 이기지 못하고 Fig. 12(c)~(f)와 같이 크랙과 박리 현상이 나타나게 되며, 가공선단부도 깨끗하지 않게 된다.

따라서 깨끗한 구멍형상의 가공을 위해서는 레이저의 에너지밀도와 식각액의 물농도를 고려하여, 레이저 조사 주파수를 적절하게 낮추면서 생산성도 동시에 고려하는 최적화가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 파장 248nm의 KrF 엑시머 레이저와 피렌-아세톤 용액을 이용한 레이저 식각 방법을 이용하여, 관형 용융 실리카 위에 미세 구멍 형상을 가공하였다. 여러 가지 가공인자를 변화시키면서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Laser Induced Wet Etching을 이용하면 기존의 레이저 직접 조사 방법보다 적은 에너지로 가공이 용이하여, 가공정밀도가 높고 용융이나 화학반응에서 나타나는 버(burr)등이 발생하지 않아 가공부의 표면이 깨끗하다.

(2) 가공인자로는 레이저의 에너지밀도, 레이저 조사량(펄스수), 식각액 물농도, 가공주파수가 파악되었다. 각각의 인자에 대한 식각량은 선형적으로 증가한다.

(3) 레이저 에너지 밀도와 가공주파수가 너무 높아지면 펄스 당 가공량이 많아지게 되어 가공선단부에서 깨끗한 형상을 얻을 수 없을 뿐만 아니라, 가공영향으로 인해 소재가 손상될 수 있다.

(4) 레이저 에너지 밀도와 가공주파수가 임계값을 초과하면 펄스 당 가공량이 증가하고, 가공영향이 발생되어 가공선단부에서 깨끗한 형상을 얻을 수 없을 뿐만 아니라, 가공영향으로 인해 소재가 큰 손상을 입을 수 있다. 그러나 이 두 인자를 조절하면 깨끗한 형상의 구멍을 관통시킬 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능

초미세 광·열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부 과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) M. Elwenspoek and H. Jansen, 1998, "Silicon Micromachining" CAMBRIDGE University Press, New York, pp. 1~16.
- (2) 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.
- (3) S. ONO, S. Nakaoka, J. Wang, H. Niino and A. Yabe, 1997, "Formation of ELastic Cone-Like Microstructures on the Composite of ELastomer and Carbon Black by Excimer Laser Ablation", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, pp. L1387~L1389.
- (4) J. F. Ready, 1997, "Industrial Application of Lasers", Academic Press, San Diego, pp.409~420.
- (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.