

# UV 레이저 미세 가공공정에서의 물 액적 렌즈 효과에 관한 연구

신보성\*, 이정한<sup>+</sup>

(Manuscript received: Jan, 19, 2012 / Revised: May, 22, 2012 / Accepted: Jul, 20, 2012)

## A Study on Water Droplet Lens Effect of UV Laser Micromachining Process

Bo Sung Shin\*, Jung Han Lee<sup>+</sup>

### Abstract

Recently UV laser micromachining processes is widely introduced to meet the needs of advanced components of IT, BT and ET industries. Due to the characteristics of non-contact and high-speed laser processing, UV laser micromachining is applied to manufacture very thin substrate such as polymer, metals and composite. These minimum line width obtained by UV laser micromachining is generally determined from laser wavelength, optical lens and its numerical aperture. In this paper we will show the lens effect of water droplet on the surface of workpiece to reduce the line width when UV laser light is irradiated and focused through the water droplet. Because of the refraction effect generated by the semi-spherical or spherical shape of water droplet, we can find smaller line width. And water droplet could not only protect thermal deformation, but also carry away burr around micro dent. Firstly fundamental theory of minimum line width was derived from relationship between the geometry of water droplet and laser light trace, and then experimental and simulation results will be finally compared to verify the effectiveness of water droplet lens effect of UV laser micromachining process.

**Key Words** : Micromachining(미세가공), Water droplet(물 액적), Thermal deformation(열 변형), Lens(렌즈), Transmittance(투과), Refraction(굴절)

## 1. 서론

근래 들어 점차 미세화되어 가는 IT, BT, ET 분야의 첨단 부품의 소비자 요구에 부응하기 위해 정밀가공의 한 방안으로 짧은 파장 영역의 레이저 미세가공이 각광 받고 있다. UV 레이저 미세가공은 비접촉, 고속화가 가능하고 선평이 미세하기 때문에 점차 수요가 늘고 있는 추세이다. 이러한 UV 레이저를 이용한 미세가공(micromachining)에서의 선평(linewidth)은 레이저 파장과 광학렌즈의 NA에 의해서 결정된다. LSP(Laser

Shock Processing)는 레이저 조사 시 재료의 표면에서 발생하는 플라즈마(plasma)의 순간적인 팽창이 표면에 압력파로 작용하여 재료의 변형을 야기해서 가공이 이루어지는 공정이다. Fig. 1은 LSP의 원리를 개략적으로 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 집중화된 레이저 빔이 가공 표면의 바로 위의 물을 순간적으로 팽창시키게 되고 그 충격 압력파(shock pressure)에 의하여 재료 표면이 순간적으로 폭발 성형되어진다. LSP 공정은 전적으로 열적 효과를 배제하고 광-기계적 충격파(photo-mechanical shock wave)의 효과에 의해 가공된다. 또는 레이

\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소 (bosung@pusan.ac.kr)  
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

+ 부산대학교 기계공학부

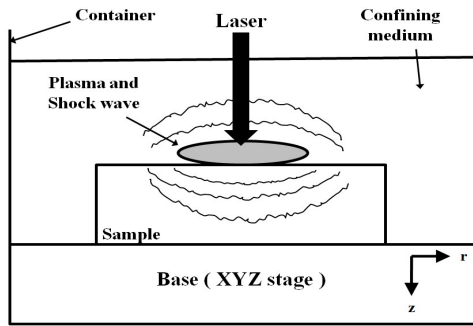


Fig. 1 Principle of Laser Shock Processing

저 플루언스(fluence) 조절을 통해서 충격파의 발생을 제어하는 가공 등에 대한 연구가 최근 들어 보고되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 그러나 LSP 공정은 물속에서 가공이 일어나기 때문에 소재의 열변형을 배제하지만, 미세가공의 선폭을 줄여주지는 못하는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 355nm UV 펄스 레이저의 가공에서 물 액적(water droplet)의 구면 형상으로부터 발생하는 렌즈 효과(lens effect)에 대하여 살펴보고자 한다. 또한 이로부터 UV 레이저 미세가공에서의 가공선폭을 최소화할 수 있는 그 가공성에 대해서 이론적 접근 및 실험결과를 논의한 다음, 이와 관련된 선행 연구들로부터 원인 규명을 해보고자 한다. 특히 물 액적하에서의 미세 가공은 공기중의 가공과는 달리 버(burr)가 발생하지 않는 이유와 가공 부위 주변이 열변형이 없이 깨끗한 가공이 되는 현상 규명을 위하여 상용 전산 해석 프로그램을 이용한 충격파의 천이 구조 해석을 수행하여 소성 변형 형상과 등가 응력 분포도 함께 살펴보고자 한다.

## 2. 이론적 접근

빛의 굴절은 매질 내에서 빛의 속도(또는 파장)는 변하나 진동수는 변하지 않기 때문에 발생하는 물리적 현상이다. 이때 통과하는 빛의 진동수는 변하지 않는다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 빛이 공기 중에서 입사하면 빛의 일부는 반사하고 일부는 물 속에서 굴절하여 진행하게 된다. 이 때 법선과 굴절된 빛 사이의 각을 입사각(angle of incidence)라고 하며, 상온에서의 물의 굴절율은 1.33으로 공기의 굴절율 1.003 보다 크기 때문에 물 속에서의 굴절각(angle of refraction)은 공기 중에서의 입사각보다 작아지게 된다. 즉 입사각과 굴절각 사이에는  $\sin\theta_i = n_{water} \sin\theta_j$ 의 관계식이 있다.

앞서 설명한 LSP 공정에서는 물 수면이 평면이기 때문에 입사한 레이저 빔이 물속을 투과하더라도 가공선폭이 축소되지는 않는다. 그러나 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 가공소재의 표면 위에 반구 형태의 물 액적을 올려놓은 경우에 굴절각에 의해 가공선폭은  $x_1$  으로 줄어들게 되며 평행 빔의 크기가  $x_2$ 와 비교하면 ( $x_2-x_1$ ) 만큼 작아지는 효과가 있음을 알 수 있다. 즉

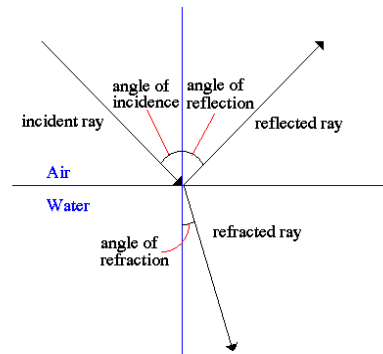
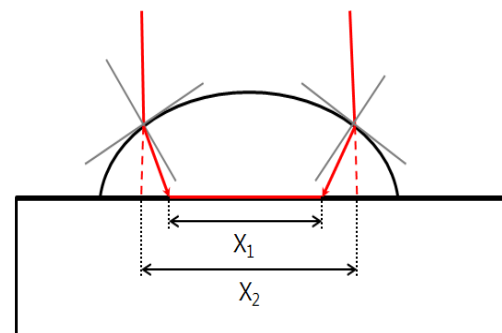


Fig. 2 Reflection and refraction of incident light



(a)



(b)

Fig. 3 Principle of linewidth minimization; (a) semi hemispherical shaped water droplet and (b) measured its contact angle

물 액적의 기하학적인 표면 형상에 의하여 렌즈 효과가 생김을 알 수 있다. 물방울의 모양이 반구 형태에서 구 형태로 변해 갈수록 점차 가공선폭을 줄어들게 된다. 그러나 정확한 반구 형상을 실험에서 얻을수 얻을 수 없었으며, 반구에 가까운 접촉각 즉, 89.9°에 가까운 친수 표면에서 측정된 결과가 Fig. 3(b)에서 보여진다. 그리고 실제적으로 가공표면이 친수성에서 역수성으로 변함에 따라 이러한 물 액적의 형태가 점차 반구 형태에서 완전한 구 형상으로 접촉각이 증가함을 알 수 있다. 본 실험에서는 예를 들어, Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 완전한 구의 물 액적 형상에서 최소선폭은 2배의  $x_2$ 이다. 수학적으로는 다음 식 (1)과 같이 구해진다. 그러나 Fig. 4(a)에서와 같이 실제적으로 측정된 최대 접촉각은 161°에 가까운 각도 얻을 수 있었다. 이러한 접촉각은 초소수성 표면코팅에 의한 것이다.

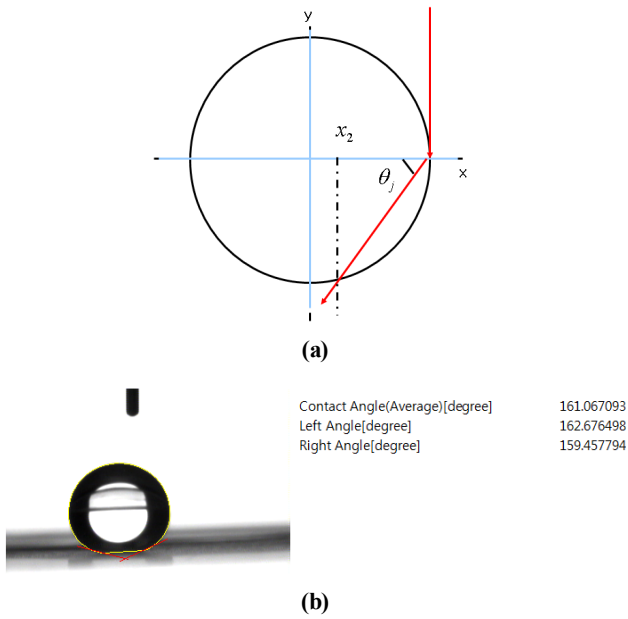


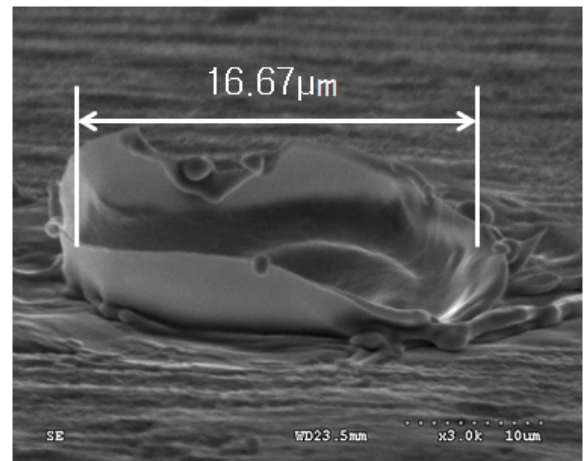
Fig. 4 Theoretical minimum linewidth; (a) perfect spherical shaped water droplet and (b) measured its contact angle

$$x_2 = \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right) r \quad (1)$$

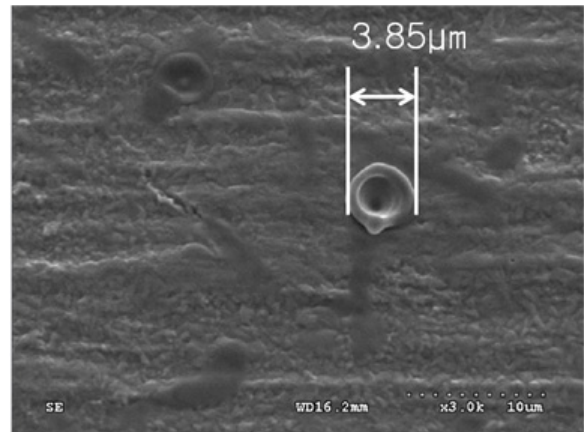
여기서 매질이 공기와 물인 경우,  $m$ 은  $\tan\theta_j$ 으로 정의된 값이고, 굴절율이 각각 1.0과 1.33이므로, 굴절각이  $48.78^\circ$ 로 계산된다. 따라서, 물 액적의 반경이  $30\mu\text{m}$ 인 경우,  $x_2$ 는 식 (1)에 의해  $3.91\mu\text{m}$  인 것을 알 수 있다. 그리고 극단적으로 이론을 확장하여, 식 (1)에서 선폭이 0이 되는 경우를 생각해 보면,  $m$  값이 1.0인 경우이며, 이 때 물의 굴절율이 1.414 임을 유추할 수 있다. 실질적으로 물의 굴절율을 향상시키기 위하여 염분을 추가하기도 하지만 그 굴절율의 상승값은 미비하다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 실험재질과 중간매질은 각각 구리와 물이 사용되었으며 사용된 레이저는 AVIA 355-23 이다. 물 액적 렌즈 효과에 의한 선폭이 줄어드는 양을 확인하기 위하여 공기 중에 노출된 상태 (a)와 반구형태의 물 액적을 올려놓은 상태 (b)로 나누어 실험하였으며, 버(burr)의 형태와 가공 선폭을 측정하고 비교하였다. Fig. 5는 가공된 구리의 표면을 SEM으로 촬영한 결과이다. 가공된 홀들의 크기를 측정한 결과 (a)의 경우  $16.67\mu\text{m}$ , (b)의 경우  $3.85\mu\text{m}$ 으로 4배 이상의 선폭이 줄어드는 렌즈 효과를 확인하였다. 또한 중간매질로 공기 분위기에서 가공한 (a) 경우와 비교하면, 물 액적을 이용한 (b)의 경우에는 버(burr)의 형태와 크기가 작게 나타났다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 LSP 공정과 같이 순간적인 가공 중에 발생한 열은 가공 부위를



(a)



(b)

Fig. 5 SEM photos of micro dents on the surface of thin copper film under (a) open air, and (b) hemisphere water droplet

둘러싼 물에 의해 손실되기 때문에 가공 홀 주변에 가공으로 인해 흩어진 입자조각들이나 버 형태가 관찰되지 않고, 전반적으로 미세 홀 내부가 깔끔하게 가공된 것으로 사료된다.

이러한 가공 현상의 차이는 여러 가지가 있으나, 공기 중에서 가공된 경우는 레이저 충격파의 최대값이  $0.4\text{Gpa}$  인 것에 비하여 물속의 최대 충격 압력파는  $3.35\text{Gpa}$  로 매우 높은 것이 주된 원인으로 사료된다<sup>(4)</sup>. 즉, 동일한 레이저 강도 약  $4.5\text{GW}/\text{cm}^2$ 가 조사되는 가공 조건에서, 공기 중에 비해 물속에서의 충격파의 세기가 공기 중에 비해 약 4 - 10 배 정도 강하게 작용함을 알 수 있다<sup>(5)</sup>. 또한, 물속에서 레이저와 가공 물질이 상호 작용할 때, 발생하는 버는 충격파로부터 발생하는 공기 방울(bubble)과 함께 순간적으로 물속에서 유체가 강제로 흘러 가거나 이동하기 때문에 관찰되지 않게 된다. 이러한 원인에 대한 설명은 선행 연구의 결과와 일치한다. 이때 발생하는 가공부위 주변의 버는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 물속의 열 대류(convection) 현상에 의하여 공기 방울과 함께 유체 이동에 의해 유동이 생

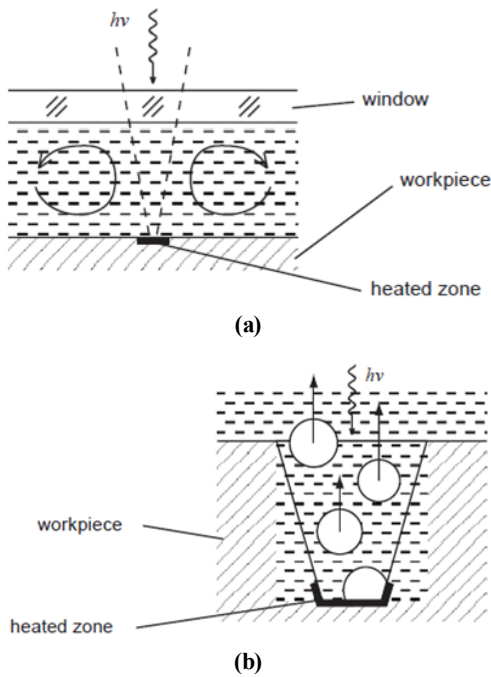


Fig. 6 Laser light induced fluid motion that carries away burr from the working zone: (a) convection (b) bubble motion

sec 이상 길어지면 발생되지 않는다고 보고되고 있다. 물론 이러한 원인 외에도 다른 원인에 의하여 가공부위의 버 감소가 일어날 수도 있을 것이다. 즉. 초고속 카메라 혹은 다른 측정 방식으로 액적 내부를 실시간으로 나노초 이내의 유체이동 및 반응을 촬영한다면 추후연구에 의하여 이러한 가공 부위의 버 감소 원인 혹은 메카니즘은 보다 상세히 밝혀지리라 예상된다.

그리고 Fig. 7에서는 물 액적 속에서 레이저 충격파를 구리 표면에 가했을 때 가공 부위의 소성 변형 거동을 보여주는 천이 구조(transient structure) 해석 결과로서 소성 변형율과 등가응력을 보여주고 있다. ANSYS 해석 프로그램을 사용하여 레이저 펄스 시간 동안 열적인 효과를 전혀 고려하지 않고 순수한 압력 충격파만 조사되는 경우에 대하여 변형 거동 해석을 수행하였다. 이때, 레이저 조사가 시작된 후 약  $3.0 \times 10^{-8}$  sec 시간 후에 등가 Von-Mises 응력값이 2.1Gpa이 발생하며 최대로 변형하였다. 이러한 해석 결과를 통하여 실제 가공 부위의 덴트 형상은 열적인 효과 보다는 비교적 기계적 압력 충격파에 의한 효과에 매우 큰 영향을 받고 있으며, 그 변형 형상이 실제 물액적 가공 덴트(dent) 형상과 시뮬레이션 결과가 유사한 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 실험을 통해서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, LSP 를 이용한 금속 가공 시 열적 효과에 의한 버의 생성을 억제시킬 수 있었다 이러한 주된 원인으로는 아주 짧은 시간에 발생하는 물속의 온도 차이에 의한 대류현상과 충격파로 인해 발생하는 공기방울의 이동이라고 할 수 있다.

둘째, 중간 매질에서의 파의 굴절에 의한 미세 선폭의 가공이 가능하였다. 평면의 물 속에서와 달리, 반구 형태의 물 액적 아래에서는 물의 굴절율에 의한 렌즈효과에 의해, 공기 중에서의 선폭에 비해 약 25%의 최소 선폭을 얻을 수 있었다.

향후 굴절율이 물보다 높은 중간 매질을 이용하거나 가공 재질의 표면을 기계적, 혹은 화학적으로 개질하여 접촉각을 증가 시킴으로서 액적의 형상이 반구 혹은 구 등의 형태로 제어한 다음, 보다 향상된 초미세 선폭 가공에 관한 추가 연구를 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제 기술혁신사업인 “차세대 초정밀/초고속 레이저 복합/유연 가공기술 개발” 과제(과제번호: 10033796)의 지원으로 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

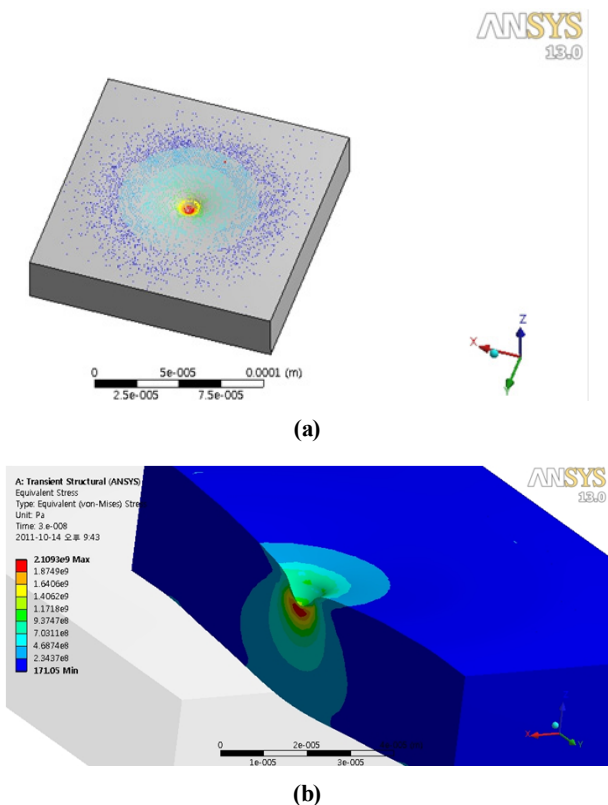


Fig. 7 Computer simulation results of micro dent processed by LSP: (a) plastic deformation, and (b) stress distribution

간다고 설명되고 있다<sup>(6,7)</sup>. 이러한 공기 방울의 생성과 유동은 아주 짧은 펄스 레이저에서 관측되며, 레이저 펄스 폭이 100μ

## References

- (1) Hu, T., Yao, Z., and Hu, J., 2006, "3-D FEM Simulation of Laser Shock Processing," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, No. 3-4, pp. 1426~1435.
- (2) Zhang, W., and Lawrence Yao, Y., 2001, "Microscale Laser Shock Processing-Modeling, Testing and Microstructure Characterization," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 3, No. 2, pp. 128~143.
- (3) Oh, J. Y., and Shin, B. S., 2007, "A Study on Laser Ablation of Copper Thin Foil by 355nm UV Laser Processing," *Journal of the Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 134~139.
- (4) Kruusing, A., 2004, "Underwater and Water-assisted Laser Processing: Part 2-Etching, Cutting and Rarely used Methods," *Optics and Lasers Engineering*, Vol. 41, No. 2, pp. 329~352.
- (5) Kruusing, A., 2004, "Underwater and Water-assisted Laser Processing: Part 1-General Features, Steam Cleaning and Shock Processing," *Optics and Lasers Engineering*, Vol. 41, No. 2, pp. 307~327.
- (6) Shafeev, G. A., and Simakhin A. V., 1992, "Spatially Confined Laser-induced Damage of Si under a Liquid Layer," *Appl Phys A*, Vol. 54, No. 4, pp. 311~316.
- (7) Ohara, J., Nagakubo, M., Kawahara, N., and Hattori, T., 1997, "High Aspect Ratio Etching by Infrared Laser Induced Micro Bubbles," *Proceedings of the IEEE Tenth Annual International Workshop on MEMS*, pp. 175~179.