

## 나노초 가시광 레이저 펄스를 이용한 사파이어 미세천공 공정의 해석

오부국<sup>\*†</sup>, 정영대<sup>\*\*</sup>, 김남성<sup>\*\*</sup>, 김동식<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>포항공과대학교 기계공학과, <sup>\*\*</sup>EO Technics Co., Ltd.

### Analysis of Sapphire Microdrilling by a Nano Second Visible Laser Pulse

Bukuk Oh<sup>\*</sup>, Youngdae Jung<sup>\*\*</sup>, Namsung Kim<sup>\*\*</sup>, Dongsik Kim<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering Pohang University of Science and Technology,

<sup>\*\*</sup>EO Technics Co., Ltd.

#### ABSTRACT

Engineering ceramics as sapphire are widely used in industry owing to their superior mechanical and corrosion properties. However, micromachining of sapphire is a considerable challenge due to its transparency. Recently, direct ablation of sapphire has been demonstrated with a visible laser pulse at sufficiently high laser intensity. In this work, the theoretical model for pulsed laser ablation of sapphire is suggested and numerical analysis is carried out using the model. Sapphire ablation begins with plasma generation by the laser interaction with surface defects, impurities and contaminations in the initial stage of machining. Subsequent absorption of the visible laser beam can be explained by three mechanisms: metalization of sapphire surface due to the EUV radiation from the hot plasma, increments of surface roughness and temperature-dependent absorption coefficient. Comparison of the computation results with experimental observation indicates that the proposed model of sapphire is reasonable.

**Key Words** : Micromachining, Nd:YAG laser, pulsed laser ablation, sapphire

#### 1. 서 론

사파이어( $Al_2O_3$ )는 기계적, 광학적 성질이 우수하고 부식에 강하여 적용분야가 매우 다양하다. 그러나 이러한 우수한 성질에도 불구하고, UV에서 IR에 이르는 넓은 영역에서 투명하고 큰 경도와 취성으로 인하여 사파이어의 미세가공이 상당히 까다롭다. 따라서, 사파이어 미세가공에 대한 이전의 대부분의 연구는 물질과 레이저 에너지의 커플링(laser energy coupling with material)의 효율에 집중되어 있다. 최근에는, 높은 레이저 강도의 가시 레이저 펄스를 이용하면 직접적인 사파이어 어블레이션이 가능함이 밝혀졌다.<sup>1,2</sup> 하지만 이 공정에 대한 체계적인 이론모델과 해석결과는 없는 상태이다. 따라서, 본 연구에서는 사파이어 어블레이션의 이론적 모델을 제안하고 532 nm

파장의 나노초 Nd:YAG 레이저를 이용한 사파이어( $Al_2O_3$ ) 미세천공공정을 대상으로 수치해석과 실험을 수행하여 수치해석과 실험결과를 토대로 해석모델을 검증하고자 한다.

#### 2. 가시광 레이저에 의한 사파이어 어블레이션 기작

가시광 레이저에 의한 사파이어 어블레이션 기작(mechanism)으로는 자가집속화(self-focusing)와 DIC(defects, impurities and contaminations)를 고려할 수 있다.

먼저, 사파이어와 같이 투명한 재료의 레이저 유발 손상은 자가집속화(self-focusing) 현상의 가능성이 있다.<sup>3</sup> 사파이어의 임계 에너지(critical energy for

self-focusing)의 계산값은 9 mJ이다. 본 연구에서 고려한 532 nm 레이저 에너지의 최대값은 7 mJ 이므로 사파이어 어블레이션 기작에서 자가집속화(self-focusing)를 배제하였다.

한편, 사파이어와 같은 투명한 물질의 레이저 유발 손상은 물질 표면에서 일어날 수 있음이 알려져 있다.<sup>4,7</sup> 유전체 표면의 레이저 유발 손상은 레이저와 유전체 자체의 직접적 상호작용이 아닌 표면 위 결함의 이온화 현상이 원인으로 밝혀졌다.<sup>8</sup> 일반적으로 물이나 유기물 같은 불순물은 사파이어보다 이온화 임계 값이 낮아 사파이어 표면에서 비교적 쉽게 플라즈마 상태가 된다. 만약, 고온 고압 상태의 플라즈마가 표면의 일정 지점에 집중된다면, 강한 플라즈마 압력이 한정된 지점에 작용할 것이다. Fig. 1에서와 같이 플라즈마가 균열 내부에서 발생한다면, 균열부에 순간적으로 큰 힘이 가해져 표면이 상당한 기계적 손상을 입게 될 것이다.

Fig. 2의 실험은 Fig. 1의 원리를 뒷받침한다.<sup>8</sup> 두 유리판의 양쪽 끝 거리가 각각 250 nm와 100 μm가 되도록 기울여 설치하고, 첫 번째 판의 표면에 1064 nm 파장의 10 ns 레이저 펄스를 조사한다. 그 결과, 두 유리판의 거리가 가까울수록 첫 번째 유리판의 손상이 잘 일어나는 것으로 나타났다. 이는 super polishing을 하지 않은 표면(플라즈마 구속 상태)에 발생한 플라즈마는 super polishing을 한 표면의 경우보다 더 큰 충격을 유발함을 의미한다.

### 3. 수치해석모델

사파이어에 형성된 온도장은 식 (1)의 지배방정식을 통해 예측할 수 있다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{1}$$

( $\rho$  : 밀도,  $c_p$  : 비열,  $T$  : 온도,  $t$  : 시간,  $k$  : 열전도율)

식 (1)의 경계조건으로는 표면 가열 모델을 사용

Seed of initial plasma generation

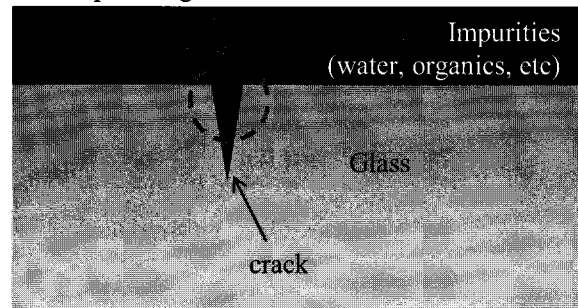


Fig. 1 Concept of initial plasma generation on a transparent surface.

한다. 사파이어 표면이 금속화 표면(metal-like surface)임을 가정하였을 때, 광학적 침투 깊이(optical penetration depth,  $d_{opt}$ )와 열적 침투 깊이(thermal penetration depth,  $d_{th}$ )는 각각 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$d_{opt} = \frac{1}{\alpha} \ll 10 \text{ nm} \tag{2}$$

$$d_{th} \approx \sqrt{\alpha_t t_{FWHM}} = 770 \text{ nm} \tag{3}$$

( $\alpha$  : 532 nm 레이저의 흡수계수,  $\alpha_t$  : 열확산율  $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $t_{FWHM}$  : 펄스 폭 FWHM = 6 ns)

광학적 침투 깊이가 열적 침투 깊이보다 매우 작으므로, 수치해석의 경계조건으로 레이저에 의한 가열을 표면 가열 모델(surface heating)로 간주할 수 있다. 그리고, 사파이어 표면의 반사율( $R$ )은 표면의 조도(roughness) 증가로 인하여 0이라 가정한다면, 레이저에 의한 표면 가열 모델은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$S_{surf} = \left[ \frac{E}{(\pi r_w^2) t_{FWHM}} \right] \times \left[ \exp\left(-\frac{r^2}{r_w^2}\right) \right] \times [I(t) \exp(-\alpha_{pl} \delta)] - j_{ev} L_{ev} \tag{4}$$

( $E$  : 펄스 에너지,  $r_w$  : 빔의 반지름,  $r$  : 중심으로부터의 거리,  $I(t)$  : 시간에 따른 펄스 모양,  $\alpha_{pl}$  : 유효 플라즈마 흡수 계수  $1.34 \times 10^6 \text{ 1/m}$ ,  $d$  : 플라즈마 층의 두께,  $j_{ev}$  : 기화에 의한 질량 유출량,  $L_{ev}$  : 사파이어의 증발 잠열)

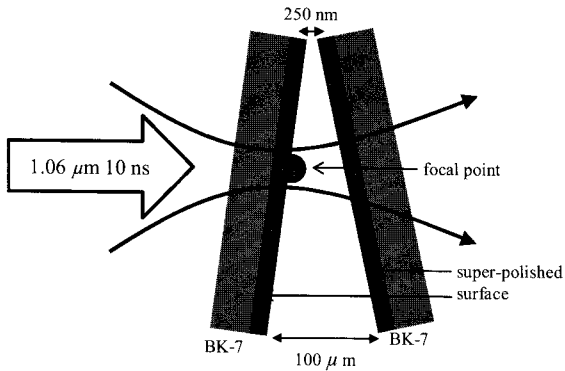


Fig. 2 Experiment for verifying the effect of plasma confinement on laser-induced damage threshold.

식 (4)에 나타난 것과 같이 레이저 강도는 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 따른다.

한편, 어블레이션 과정에서 발생한 플라즈마 차단 효과(plasma shielding)로 인해 사파이어 표면에 조사되는 레이저 에너지가 감소한다. 이 현상에 대한 분석은 매우 복잡하지만, 다음의 3가지 가정을 통하여 단순화할 수 있고 식 (4)의 세 번째 대괄호의 수식과 같이 모델링 하였다.<sup>11</sup> 첫째, 플라즈마 층의 두께는 어블레이션된 깊이와 같고 둘째, 유효 플라즈마 흡수 계수는 일정하며 셋째, 플라즈마의 팽창효과는 무시할 수 있다.

어블레이션 과정에서 사파이어의 용해와 기화가 일어난다. 일반적으로, 표면에서의 기화에 의한 질량 유출량은 식 (5)의 Hertz-Knudsen equation을 따른다.

$$j_{ev} = (1 - \beta) \frac{p_{sat}}{\sqrt{2\pi R_{gas} T_s}} \quad (5)$$

( $\beta$  : 재응착율,  $p_{sat}$  : 포화 압력,  $R_{gas}$  : 기체 상수,  $T_s$  : 표면 온도)

$p_{sat}$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{sat} = p_0 \exp\left(\frac{L_{ev}(T_s - T_v)}{R_{gas} T_s T_v}\right) \quad (6)$$

식 (6)에서  $p_0$ 는 주변 압력,  $T_v$ 는 사파이어의 끓는점이다.

식 (1)의 지배방정식과 식 (4)의 경계조건으로 수치해석을 수행하였다. 차분화 방법으로는 FEM을

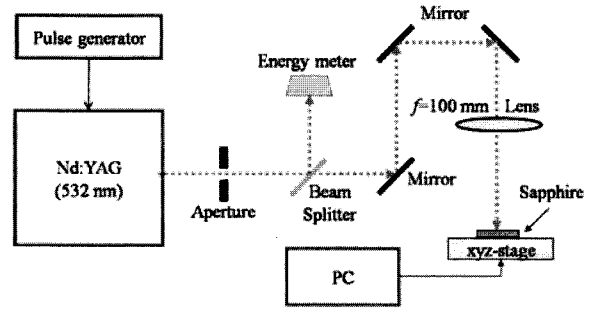


Fig. 3 Experimental setup for sapphire ablation.

사용하였고, COMSOL Multiphysics 상용 소프트웨어와 본 연구에서 개발한 user subroutine을 기반으로 해석을 수행하였다.

#### 4. 실험

Fig. 3은 사파이어 어블레이션 실험장치의 개략도이다. 실험에서 사용한 광원은 파장 532 nm, FWHM 6 ns, 빔 직경 6 mm인 Nd:YAG 레이저이며 이것을 10 Hz의 반복률로 조사하였다. 레이저의 에너지는 beam splitter를 이용하여 실시간으로 측정하였고, 균일한 빔을 이용하기 위하여 2 mm 지름의 aperture를 이용하였다. 사파이어 표면에 집속된 레이저 빔의 직경은 40 - 120  $\mu\text{m}$ 이다.

#### 5. 결과

##### 5.1 실험결과 및 토의

Fig. 4는 각기 다른 펄스 에너지로 어블레이션 한 사파이어의 표면의 사진이다. 레이저 빔의 크기는 약 40  $\mu\text{m}$ 이며 사파이어의 손상이 시작되는 임계 fluence는 약 0.04 mJ(3 J/cm<sup>2</sup>, 0.53 GW/cm<sup>2</sup>) 이고 이는 불투명한 물질의 임계 fluence보다 약 10배 정도 큰 값이다. Fig. 4(a)에서 구멍 주변에 미세한 균열이 많이 있는 것으로 보아 Fig. 2의 원리와 같이 사파이어가 광 기계적 손상(photomechanical damage)을 입을 가능성이 큼을 알 수 있다.

Fig. 5는 7.8 GW/cm<sup>2</sup>의 레이저 에너지로 1 - 60회에 걸쳐 조사하였을 때 측정된 사파이어 표면

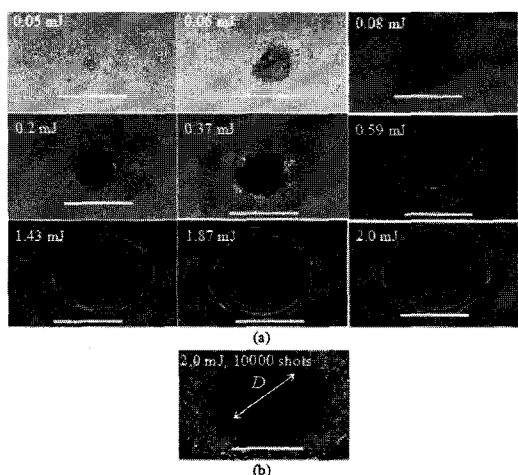


Fig. 4 Surface images at different laser energies after (a) 100 and (b) 10000 pulses ( $2r_w = 40 \mu\text{m}$ ). The scale bar is  $50 \mu\text{m}$  long.

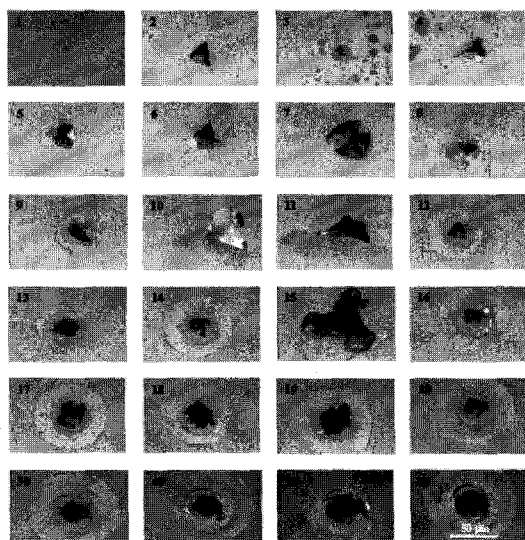


Fig. 5 Surface images of a drilled hole after different laser shots ( $7.8 \text{ GW/cm}^2$ ).

사진이다. 사파이어 표면의 손상 크기는 약 20회 이하인 경우 횡수에 크게 비례하지 않는 특성을 보였다. 측정된 레이저 에너지 분포는 2% 미만의 작은 표준 편차를 가지므로, 레이저 에너지의 불안정성은 표면 손상을 변화시키는 원인이 아니다. 이러한 사실은 사파이어의 손상이 무작위적인 요소 즉, DIC(defects, impurities and contaminations)에 의해서 일어난다는 것을 입증한다. 20회의 레이저 조사 이후 표면 손상의 무작위적 특성은 무시할 수 있다.

사파이어 표면의 위에서 발생한 플라즈마가 흑체이고, 플라즈마에서 발생하는 전 영역의 전자기파가

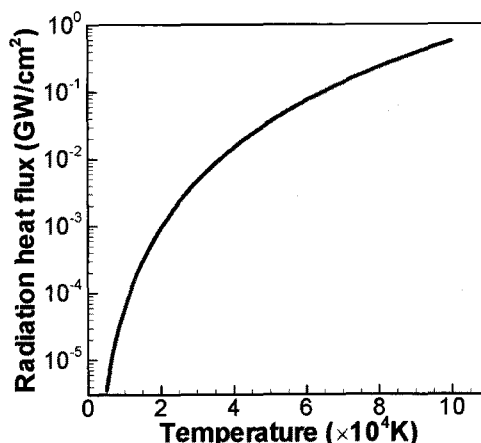


Fig. 6 Heat flux by plasma radiation as a function of plasma temperature.

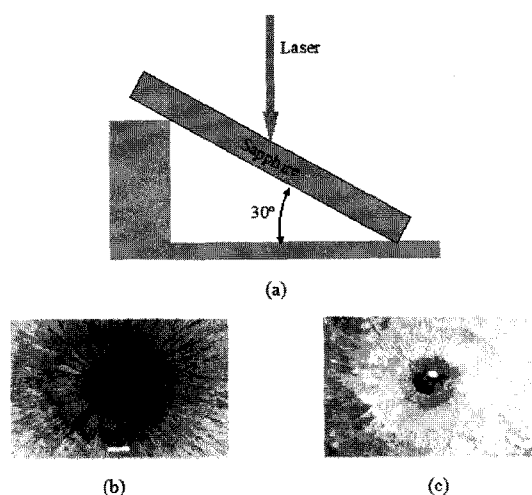


Fig. 7 (a) Ablated surface images by oblique laser shots ( $5.7 \text{ mJ}$ , 4200 shots) with (b) front-light and (c) back-light illumination.

모두 사파이어 표면에 흡수된다는 가정 하에, Fig. 6의 그래프를 얻었다. 플라즈마의 일반적인 온도는  $10^4 - 10^5 \text{K}$  인데 플라즈마의 온도가  $10^5 \text{K}$  보다 낮다면 최대 복사 열유속(maximum radiation heat)은  $0.5 \text{ GW/cm}^2$  미만이고 이는 사파이어 어블레이션 임계 열유속인  $0.53 \text{ GW/cm}^2$  보다 작기 때문에 플라즈마 복사 에너지에 의한 사파이어 표면의 간접적인 가열만으로 사파이어 표면 손상을 설명할 수 없다.

Fig. 7은 사파이어의 방향과 레이저 조사 방향을  $30^\circ$  어긋나게 하여 어블레이션 시킨 사진이다. 입사한 레이저 빔의 진행 방향이 구멍의 방향과 일치하므로 레이저에 의한 직접적 가열이 532 nm 레이저의 사파이어 어블레이션 기작의 주요한 부분임을 알 수 있다.

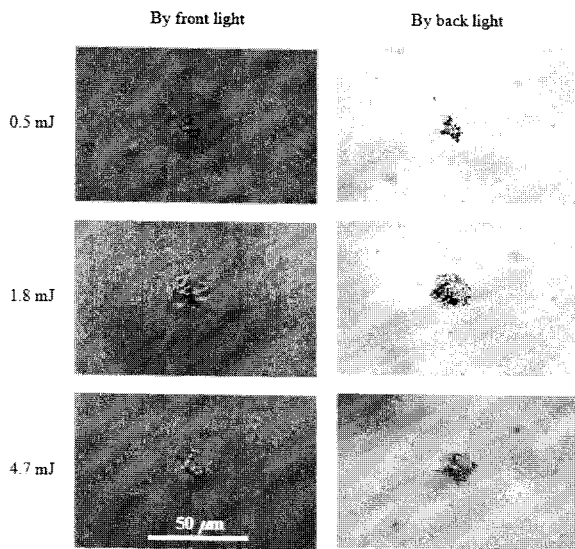


Fig. 8 Optical microscope images of damaged surface by a single shot at various energies ( $r_w = 60 \mu\text{m}$ ).

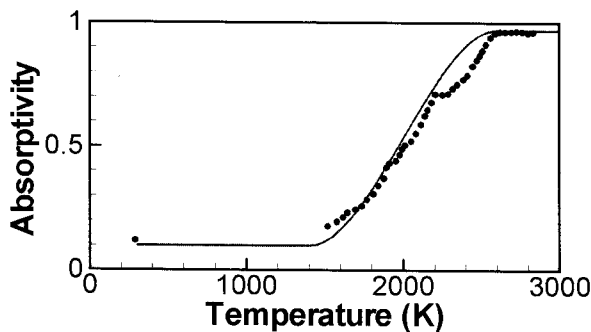


Fig. 9 Temperature-dependent absorptivity of sapphire for 1064 nm.<sup>9</sup>

사파이어의 band gap은 7.8 eV이고 이에 대응하는 파장은 160 nm이다. 플라즈마 온도가  $10^4$  K를 초과하면 EUV 영역( $< 200 \text{ nm}$ )에서 최대 강도 파장의 빛이 방출된다. 특히, 160 nm이하( $2 \times 10^4$  K 이상)의 EUV에 의하여 가전자대의 전자가 전도대까지 전이한다. 따라서 여기된 전자밀도가 증가하면서 금속화된 사파이어는 가시 광 레이저 빔을 흡수하게 된다.

Fig. 8은 다양한 에너지의 레이저를 한번의 펄스만 조사한 사파이어 시편에 전방과 후방 조명을 비추었을 때의 사진이다. 사파이어 손상 크기는 대략  $20 \mu\text{m}$ 로 레이저 빔의 크기  $120 \mu\text{m}$ 에 비하여 작으며, 손상된 표면 안에 검은 점으로 이루어진 영역을 관찰할 수 있다. 이 검은 영역은 레이저 에너지에

의하여 사파이어 표면이 불투명하게 변하였고, 표면의 조도(roughness)가 증가한 상태이다. 이는 사파이어 플라즈마 발생 및 레이저 빔 흡수를 증가시켜 어블레이션을 촉진한다.

Fig. 9는 1064 nm 레이저에 의한 사파이어의 흡수계수와 사파이어의 온도와의 관계를 나타낸다.<sup>9</sup> 사파이어가 가열되어 온도가 올라갈수록 사파이어의 1064 nm 레이저에 대한 흡수 계수가 증가한다. 일반적으로, 사파이어의 온도가 증가할수록 많은 양의 레이저 에너지를 흡수한다.<sup>10</sup> 본 연구에서 사용한 532 nm 파장의 경우, 온도에 따른 흡수율이 보고된 바 없으나 Fig. 9와 비슷한 경향을 보일 것으로 추정된다.

### 5.2 수치해석 결과 및 토의

Fig. 10(a)는 일정한 두께의 시편을 레이저로 완전하게 관통하는데 필요한 펄스 수이다. 이를 통하여 레이저 1 펄스당 어블레이션 깊이를 예측할 수 있다. Fig. 10(b)는 수치해석 결과와 실험 결과가 비교적 잘 일치함을 보여준다. 실험을 통해 구한 사파이어 어블레이션 임계 fluence는 약  $0.38 \text{ GW/cm}^2$  ( $0.86 \text{ mJ}$ ,  $2.3 \text{ J/cm}^2$ )이다.

Fig. 11은 시간에 따른 표면 온도와 표면 진행 속도(surface receding velocity)의 변화이다. 표면의 온도가 사파이어의 녹는점(2326 K)을 초과할 경우, 표면이 증발하면서 사파이어 표면이 깎여 내려간다. 표면 진행 속도( $j_{ev}/\rho$ )는 Fig. 11(b)에 제시되어 있으며, 최대 10 m/s 수준의 크기를 가진다. Fig. 12는 시간에 따른 어블레이션 깊이를 나타낸다. Fig. 12로부터 레이저 펄스 지속시간 내에 어블레이션이 완료됨을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 532 nm 가시 광 레이저에 의한 사파이어 어블레이션 기작을 분석하고 이 공정에 대한 수치 모델을 제안하였다. 모델은 다음 세가지 기작을 반영하였다. 첫째, 표면의 결합에 의하여 플라즈마가 발생하고 둘째, 플라즈마 발광에 따른

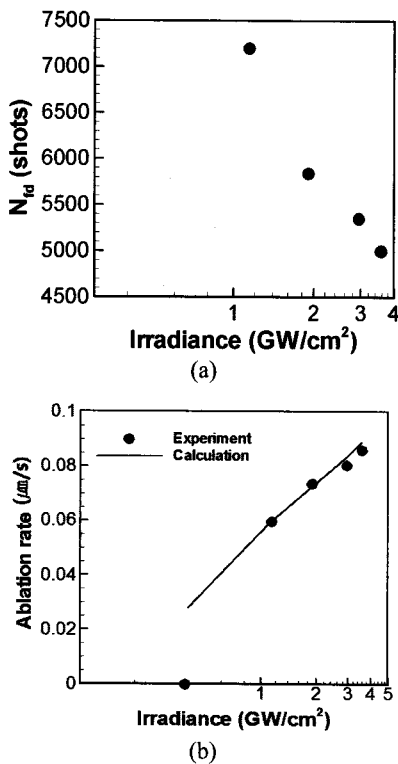


Fig. 10 (a) Number of pulses for full drilling of sapphire ( $r_w = 110 \mu\text{m}$ ) and (b) the comparison of measured ablation data with calculation.

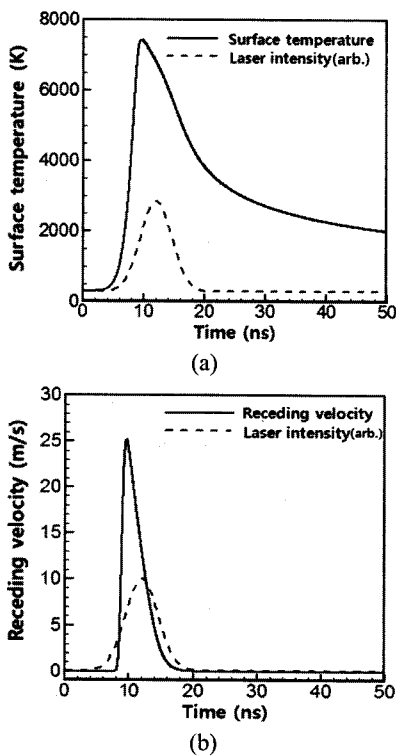


Fig. 11 Temporal variations of the surface temperature and the receding velocity at the center of beam spot on the sapphire surface ( $r = 0, z = 0$ ) for 1.1 GW/cm<sup>2</sup>.

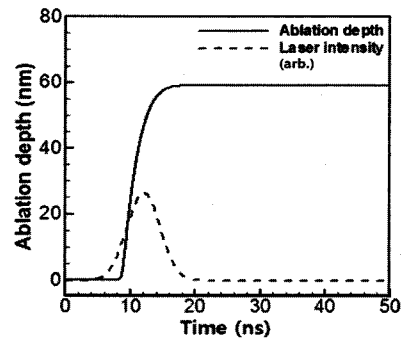


Fig. 12 Temporal variation of the ablated depth by surface evaporation at the center of beam spot on the sapphire surface ( $r = 0, z = 0$ ) for 1.1 GW/cm<sup>2</sup>.

표면의 금속화 현상(metalization of the surface)이 일어나며 셋째, 사파이어의 온도 상승으로 인하여 흡수계수가 증가한다. 이 이론적 모델을 바탕으로 수치해석을 수행한 결과 수치해석 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 보였다. 이러한 연구 결과는 향후 사파이어 미세천공 공정을 최적화 하는데 기여할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 첨단레이저응용 미세가공 기술 개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 연구 결과의 정리에 도움을 준 박병구 연구원에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) E. Gu, C. W. Jeon, H. W. Choi, G. Rice, M. D. Dawson, E. K. Illy, M. R. H. Knowles, Micromachining and dicing of sapphire, gallium nitride and micro LED devices with UV copper vapour laser, Thin Solids Film, Vol. 453, pp. 462-466, 2004.
- 2) Chen T, and Darling R. B., Laser micromachining of the materials using in microfluidics by high precision pulsed near and mid-ultraviolet Nd:YAG lasers, Journal of Material Processing and Technology, Vol. 198, pp. 248-253, 2008.
- 3) Soileau, M.J., Hagan, D.J., Young, J., Sheik-

- Bahae, M., Van Stryland, E.W., Nonlinear optical characterization of CdTe as applied to limiting at 1.06  $\mu\text{m}$ , Conference on lasers and electro-optics, pp. 94-97, 1989.
- 4) Rousseau, D.L., Leroi, G.E., Falconer, W.E., Charged-particle emission upon ruby laser irradiation of transparent dielectric materials, Journal of applied physics, Vol. 39(7), pp. 3328-3332, 1968.
  - 5) Aleshin, I.V., Bonch-Bruevich, A.M., Zinchenko, V.I., Imas, Ya.A., Komolov, V.L., Effect of absorbing inhomogeneties on optical breakdown of transparent dielectric materials, Sov Phys Tech Phys, Vol. 18(12), pp. 1648-1650, 1974.
  - 6) Hopper, R.W., Uhlmann, D.R., Mechanism of inclusion damage in laser glass, Journal of Applied Physics, Vol. 41(10), pp. 4023-4037, 1970.
  - 7) Koldnov, V. F, Manenkov, A. A., Mechanism of the interaction between ultrashort laser pulses and transparent solids, Izvestiya Akademii Nauk. Ser. Fizicheskaya, Vol. 63(4), pp. 786-795, 1999.
  - 8) Glebov, L. B., Intrinsic laser-induced breakdown of silicate glasses, Proceedings of SPIE, Vol. 4679, pp. 321-331, 2001.
  - 9) Zhang, Z., Modest, M.F., Energy requirements for ablation or decomposition of ceramics during CO<sub>2</sub> and Nd : YAG laser machining, Journal of applications, Vol. 10, pp. 212-218, 1998.
  - 10) Allmen, M. V., Laser-Beam Interactions with Materials-Physical Principles and Applications (Berlin: Springer), Vol. 2, pp. 43, 1987.
  - 11) Atanasov P. A, Eugenieva E. D, Nedialkov N. N., Laser drilling of silicon nitride and alumina ceramics: A numerical and experimental study, Journal of Applied Physics, Vol. 89, pp. 2013-2016, 2001.