

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(9), 789-795(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.9.789

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

분광분석을 활용한 고에너지 레이저 환경에서의 알루미늄-산소 화학반응 연구

김창환*

The spectroscopic study of chemical reaction of laser-ablated aluminum-oxygen by high power laser

Chang-hwan Kim*

Defense Industry Technology Center, Agency for Defense Development, Korea*

ABSTRACT

Laser-induced combustions and explosions generated by high laser irradiances were explored by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). The laser used for target ablation is a Q-switched Nd:YAG laser with 7 ns pulse duration at wavelength of 1064 nm laser energies from 40 mJ to 2500 mJ (6.88×10^{10} - 6.53×10^{11} W/cm²). The plasma light source from aluminum detected by the echelle grating spectrometer and coupled to the gated ICCD(a resolution ($\lambda/\Delta\lambda$) of 5000). This spectroscopic study has been investigated for obtaining both the atomic/molecular signals of aluminum - oxygen and the calculated ambient condition such as plasma temperature and electron density. The essence of the paper is observing specific electron density ratio which can support the processes of chemical reaction and combustion between ablated aluminum plume and oxygen from air by inducing high laser energy.

초 록

이차 추진제로 많이 쓰이는 알루미늄을 고출력 레이저를 조사하여 공기 중의 산소와 반응시켜 발생하는 알루미늄과 산소의 화학 반응을 레이저 분광분석법을 이용하여 연구를 수행 하였다. 7ns의 펄스 주기와 1064nm의 주파수를 가진 Q-switched Nd:YAG 레이저로 40 - 2500mJ(6.88×10^{10} - 6.53×10^{11} W/cm²)의 에너지가 공급되었으며, 플라즈마 빛은 echelle 회절 분광기와 ICCD 카메라로 감지하였다. 분광분석을 통하여 알루미늄과 산소의 원자/분자 신호 분석과 현상이 일어나는 플라즈마 환경의 특성 연구를 위해 들뜸 온도(2200K~6600K) 및 전자밀도(3.15×10^{15} ~ 2.38×10^{16} cm⁻³) 계산, 그리고 알루미늄 표면의 크레이터(Crater) 분석을 수행하였다. 본 연구는 고 레이저 복사 조도 환경하에서 발생하는 화학 반응과 플라즈마의 특성을 파악하는 방법을 제시하고 있다.

Key Words : Laser ablation(레이저 삭마), High-power laser(고에너지 레이저), Laser-Induced Breakdown Spectroscopy(레이저 분광), Aluminum chemical reaction & combustion(알루미늄 화학반응 및 연소)

† Received : July 10, 2016 Revised : August 11, 2016 Accepted : August 30, 2016

* Corresponding author, E-mail : kchkch007@add.re.kr

I. 서 론

레이저는 뛰어난 빔 안정성과 신뢰성 높은 반복 실행이 가능성 때문에 다양한 산업과 학문분야에 응용되어지고 있다. 빔과 물질 상호작용의 주 매커니즘인 레이저 삭마(laser ablation)는 목표 물질을 승화(sublimation), 융해(fusion), 침식(erosion), 녹임(melting), 이온화(ionization) 등의 현상을 동반한다. 낮은 복사조도(irradiance, $\leq 10^6$ W/cm²)에서는 레이저 펄스 주기 시간동안 레이저 에너지가 열로 빠르게 바뀌면서 분산되는데, 증기화(vaporization) 현상이 주를 이룬다. 하지만 일정 복사조도 이상($\geq 10^8$ W/cm²)에서는 표면 증기화에 앞서, 샘플 표면이 급격히 증기화 온도에 도달하여 폭발 현상이 발생하게 된다[1].

고폭약 중 연소율 조절에 탁월한 성능을 보여 줌으로써 알루미늄의 연소반응 연구는 과거부터 큰 관심을 받아오고 있다. 1970년대에 Glassman [2]의 알루미늄과 산소의 녹는점과 끓는점이 폭발에 미치는 영향과 Brzustowski[3]의 끓는 상태에서는 산화막 형성 없이 반응이 정상상태로 유지된다는 연구를 시작으로 현재까지 연구가 활발히 진행되고 있다. 1980년대에는 각각의 알루미늄 상태, 산화제의 종류, 압력, 그리고 온도 조건에서 알루미늄의 연소시간을 얻는 연구가 주를 이루었다[4]. 그리고 최근에는 주변 온도와 산화제 레벨의 관계[5], 알루미늄 분진의 크기에 따른 효과[6], 액체 환경에서의 연소현상[7], 산화제 종류에 따른 폭발현상 연구[8]가 꾸준히 진행되고 있다. 본 저자는 앞선 연구에서 속도우그래프 가시화와 X선 회절법(X-Ray Diffraction, XRD)을 이용하여, 고에너지 레이저 삭마 현상 연구를 수행 하였다. 이전 연구를 통해, 알루미늄에 일정량의 레이저 에너지가 조사되면 알루미늄 표면에서 입자 분출(ejection) 및 초음속 연소(Detonation)가 발생하는 것을 확인 하였다[9].

본 논문에서는 고 복사조도영역 (10^{10} - 10^{11} W/cm²)에서 발생하는 알루미늄과 공기 중의 산소와의 연소현상에 관해 레이저 분광법(LIBS)을 이용하여 100ns - 5000ns 시간대의 현상을 분석 하였다. 레이저 분광법은 레이저를 통해 발생된 플라즈마로부터 목표 물질의 정보를 담고 있는 스펙트럼을 수집하여 분석하는 방법이다. 실시간 분석, 높은 민감도, 간결함 등의 장점 때문에 위험물질 해석이나 우주탐사 등에 이용되어지고 있다[10, 11]. 본 연구를 통해, 수 ns의 매우 빠른 시간 동안 일어나 분석이 어려웠던 레이저에 의한 알루미늄과 산소의 화학반응을 분광학적 분석

을 바탕으로 증명하고 있으며, 현재 연구가 진행중인 고레이저 에너지 환경에서 발생하는 알루미늄-산소의 데토네이션 현상 분석의 기초자료로도 이용될 수 있다는 것에 의미가 있다.

II. 본 론

2.1 Experimental Setup

알루미늄과 산소 연소현상 실험 개요도가 Fig. 1에 나타나 있다. 알루미늄 표적의 삭마를 위하여 1064nm파장에서 10 Hz 펄스와 7 ns 지속시간의 Q-switched Nd:YAG 레이저 (Continuum Powerlite plus II, 최대 강도 3000mJ/pulse)가 이용되었다. 매번 안정된 레이저 에너지를 사용하기 위하여, 레이저 빔을 사용하기 전에 플래시 램프를 충분히 가열시켰다. 빔의 에너지는 플래시 램프 전압 조절을 통해 변화시켰으며 실험에서는 최소 40mJ에서 최대 2500 mJ의 레이저 에너지가 이용되었다. 빔은 초점 거리가 100mm인 볼록 렌즈에 의해 모아졌으며, 1T × 50 mm × 50 mm 알루미늄 판(Si 0.4%, Fe 0.5%, Cu 1.2~2%, Mn 0.3%, Mg 2.1~2.9%, Cr 0.3%, Zn 5.1~6.1%)이 같은 지점에 고정 되었다.

알루미늄으로부터의 플라즈마 빛은 echelle 회절 분광기(Andor Mechelle)와 coupled to the gated ICCD (200 to 900 nm 범위에서 분사능($\lambda/\Delta\lambda$) 5000)를 통해 수집되었다. 알루미늄 표적과 평행하고 삭마 레이저와 수직으로 광학 파이버(fiber, 30 μ m)가 설치되었으며, 초점거리 100mm인 볼록렌즈를 지나면서 스펙트럼 신호를 실시간으로 분광기에 전달하였다.

펄스 발생기 (565-8CG, 100 MHz, 지연시간 500 ps)는 삭마 레이저와 분광기 사이의 동조화에 이용 된다. 또한 정확한 실험값을 얻기 위해

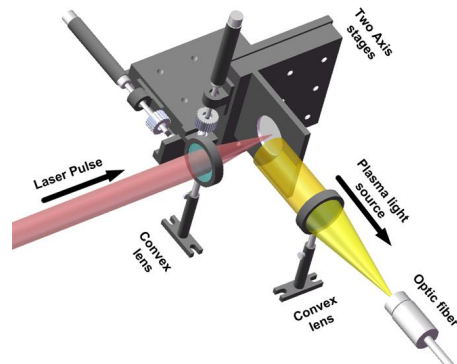
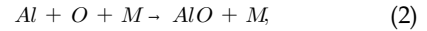
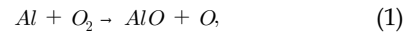


Fig. 1. Schematic of the experimental setup

오실로스코프(Tektronix TDS-2014)와 포토다이오드가 사용되었다. 공초점(confocal) 현미경 표면 분석기(a vertical resolution 200 nm (X10))를 통해 알루미늄 크레이터를 분석하였다.

2.2 결과 및 논의

Figure 2는 증가하는 레이저 에너지에 따른 파장(wavelength)에 따른 변화를 보여주고 있다. 본 실험에서의 분광기는 단일 작동 모드로 사용되었기 때문에, 각각의 스펙트럼은 매번 새로운 식마 상태에서부터 얻어졌다. 그럼에도 불구하고, 같은 실험 조건에서 다섯 번 이상 반복되어 얻어진 스펙트럼들은 높은 현상 재현성을 나타내고 있으며, 특정 원자 및 분자 스펙트럼 신호를 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 주요 원소 스펙트럼으로는 알루미늄 394.4, 396.2 nm, 수소 656.2 nm, 산소 777.4, 844.7 nm, 탄소 247.8 nm, 등이 있다. 주요 원자 스펙트럼 이외에 나트륨, 칼슘과 같은 경미한 신호도 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 저에너지(300mJ미만) 영역에서 AIO 분자의 천이 현상을 확인 할 수 있었다. AIO 분자는 알루미늄 판 표면에서 여기된 알루미늄 원자와 원자 및 분자 상태의 산소와 아래의 화학반응을 통해 주로 생성된다. 레이저 에너지가 증가함에 따라 컨티넘(continuum)도 증가하여 300mJ 이상에서는 확인이 불가하였지만, AIO 분자의 신호 세기는 40mJ에서 300mJ까지 레이저 에너지가 증가함에 따라 선형적으로 증가 하였다. AIO 분자 신호는 $\Delta v=+2$ 에서 $\Delta v=-2$ 천이를 가지는 $B^2\Sigma^+-X^2\Sigma^+$ 상태를 약 450 ~ 550 nm 영역에서 확인할 수 있었다.



앞서 설명된 바와 같이, AIO 분자는 알루미늄 판 표면에서 여기된 알루미늄 원자와 원자 및 분자 상태의 산소와 아래의 화학반응을 통해 주로 생성된다. 이러한 상태는 주로 레이저 조사에 따른 플라즈마와 목표 물질인 알루미늄 판의 분해 때문에 발생된다고 할 수 있다. 식 (1)과 (2)의 화학반응식에서, AIO 분자의 생성은 Al 원자의 양에 비례하여 증가한다는 것과 원자 및 분자 상태의 산소 또한 큰 영향이 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 LIBS 분광법을 이용하여, 고에너지 레이저 조사에 따른 알루미늄과 산소의 원자 상태의 특성을 Al 394.4, 396.2 nm와 O 777.4 nm의 신호 세기 및 신호 세기비를 통해 분석하였다. 본 분석의 타당성은 RDX/Al 샘플에 대해 LIBS 분광 신호의 강도 및 강도비를 통해 해당 물질의 구성 정보 및 데토네이션 정보까지 확인한 Amir et al 논문에서 입증되었다[12]. 레이저 에너지가 증가함에 따라, 컨티넘 또한 증가하지만, 알루미늄과 산소의 신호는 충분히 확인할 수 있다. 산소(777.4nm)의 신호 강도는 레이저 에너지 증가에 비례하여 증가하지만(Fig. 3) 알루미늄(394.4nm, 396.15nm)의 신호세기는 상대적으로 산소에 비해 크게 증가하지 않는다(Fig. 2). 알루미늄의 주요 신호인 394.4nm와 산소 777.4nm의 신호세기를 비교한 것이 O/Al 1이며, 알루미늄(396.15nm)와 산소 777.4nm를 비교한 것을 O/Al 2로 그래프화 하였다(Fig. 4). 950mJ이상

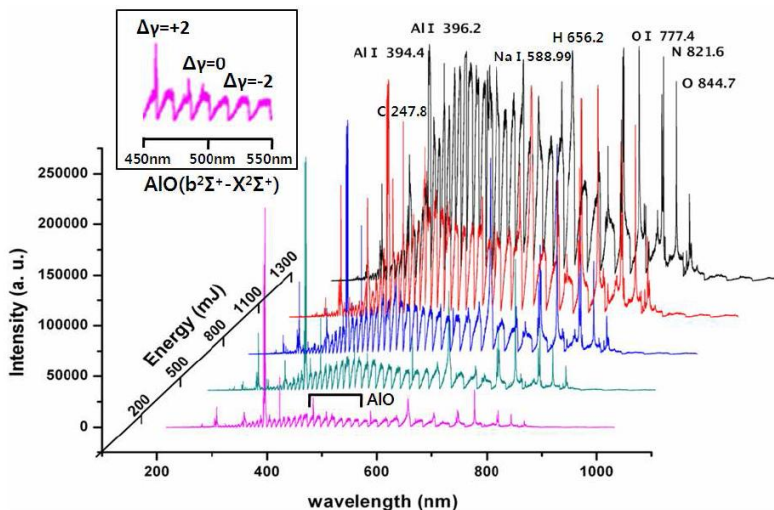


Fig. 2. Typical time-resolved emission spectra of aluminum at 300ns (gate width: 50 μs)

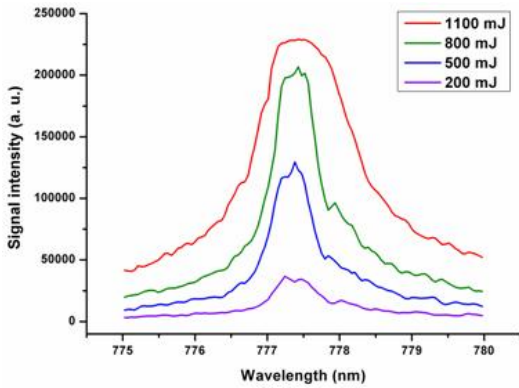


Fig. 3. Spectral analysis of O I at delay time = 400 ns and gate width = 50 μs

서는 알루미늄과 산소의 신호 세기비가 일정해지며 1로 도달하는 것을 알 수 있다. 이는 일정 레이저 에너지 이하에서는 많은 양의 여기된 알루미늄 원자가 존재하지만, 상대적으로 적은 양의 산소 원자 및 분자로 인해 화학반응이 제한적으로 이루어진다는 것을 유추할 수 있다. 하지만 공기 중에 산소를 여기 시킬 레이저 에너지의 증가로 인해, 산소 원자 및 분자의 양이 증가하게 되고 보다 활발한 화학반응이 일어나게 되는 것이다.

목표 물질인 알루미늄과 공기중의 산소를 여기시키는 플라즈마의 특성 파악을 위해, 플라즈마의 온도와 전자 밀도계산이 필요하다. 평행 분광 측정법에서, 볼츠만 분포(Boltzmann distribution)에 의해 유도되어지는 이중 스펙트럼 방법(two-line method)이 플라즈마 온도를 계산하는데 이용되었다[13].

$$\frac{I^*}{I} = \left(\frac{\lambda g^* A^*}{\lambda^* g A} \right) \exp\left[-\frac{(E^* - E)}{kT} \right] \quad (3)$$

A, A^* 는 transition probability (10^8 s^{-1}), g, g^* 는 statistical weight, k 는 Boltzmann constant ($8.6173324 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$), E, E^* 는 energy of the upper level (cm^{-1}), λ, λ^* 는 주파수, 그리고 I, I^* 는 스펙트럼 신호세기이다. 계산에 사용된 각 인자의 값들은 Table 1에서 확인 가능하다. 볼츠만 분포를 이용하여 온도를 계산할 때, 플라즈마의 온도 변화율은 매우 작고, 수집된 스펙트럼은 균질의 온도와 구성 성분이라는 Local Thermodynamics Equilibrium (LTE) 가정을 만족해야 한다. 이것은 여기된 상태는 붕괴(collision) 후 자연스러운 방사(radiation)를 발생시키는 높은 하방 천이(de-excitation) 가능성을 가진다는 것을 말하고 있다[14]. 보다 정확한 온도 계산을 위해 상위 에너지 차가 크고, transition probability이 상대적으로 높고, 높은 에너지 레벨을 가지는 알루미늄 394.40nm와 396.15nm의 신호가 각기 다른 펄스 지연시간에서 플라즈마 온도를 계산하는데 이용되었다. 플라즈마 온도는 에너지가 변함에 따라 2200K에서 6600K를 가진다는 것을 알 수 있다 (Fig. 5(a)). 레이저 에너지 조사 후, 온도가 큰 값을 나타내는 것은 많은 수의 전자들 충돌 때문이며, 이 시기에는 전자와 이온 간의 재결합(recombining)이 주를 이룬다. 지연시간이 커짐에 따라 온도는 급격히 감소하다가, 외부 환경과의 온도차가 줄어들어 따라 감소폭 또한 작아진다. 그리고 Stark broadened line의 full width at half maximum [FWHM]과 전자 밀도와의 관계를 아래의 식(4)로 표현할 수 있다[15].

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right) + 3.5\omega \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right)^{5/4} (1 - 0.75N_D^{-1/3}) A \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right) \quad (5)$$

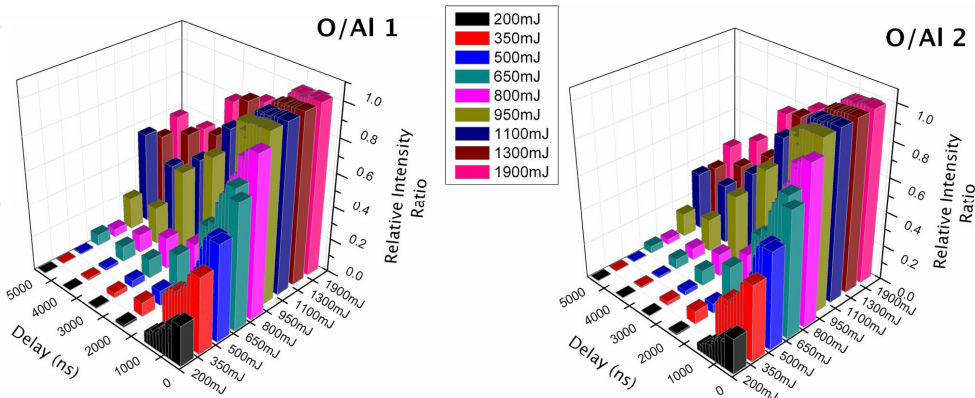


Fig. 4. Intensity ratios between aluminum and oxygen at different delay times

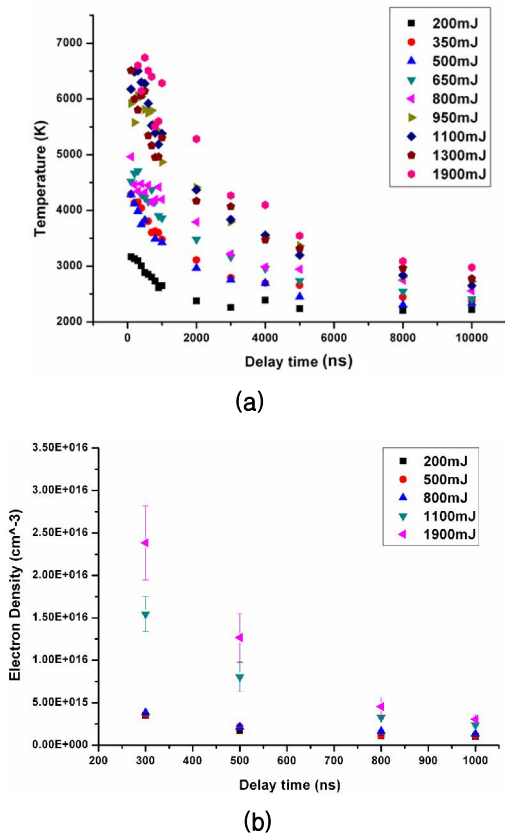


Fig. 5. (a)plasma temperature, (b)Electron density at different delay times

N_e 는 전자밀도(cm^{-3}), $\Delta\lambda_{1/2}$ 는 FWHM, ω 는 전자 영향 상수(electron impact parameter)[16], 그리고 N_D 는 Debye shielding 매개변수이다. 전자 밀도는 플라즈마가 자가 흡수(self absorption)를 무시할 만큼 광학적으로 얇다는 것을 가정한 Stark Broadening 효과 [17]로 검증될 수 있다. 플라즈마는 여기된 원자들의 충돌은 증가하나, 압력과 도플러 확장(Doppler broadening)이 상대적으로 작은 상태가 되어 스펙트럼 신호 폭은 Stark Broadening을 따른다. 실험으로부터 얻어진 산소 스펙트럼(777.4 nm)의 신호는 Lorentzian Line shape 함수를 통해 피팅(fitting)하였다. 식

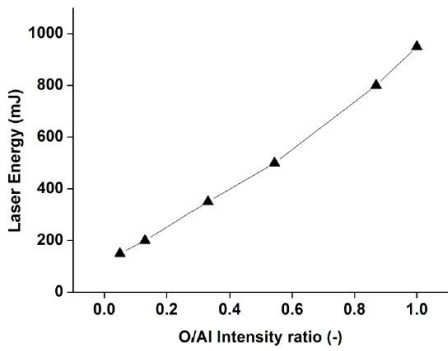
(4)에서, 첫 항은 전자 확장(electron broadening)의 의미를 가지고, 두 번째 항은 준정적(quasi-static) 이온 확장(ion broadening)을 나타낸다. 본 실험에서는 준정적 이온 확장의 영향이 미비하므로, 식 (5)처럼 두 번째 항을 생략 가능하다. 플라즈마 온도 2200K ~6600K에 해당하는 전자밀도는 3.15×10^{15} 에서 $2.38 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 값을 나타내며(Fig. 5(b)), 약 $\pm 15\%$ 오차를 가진다. 온도와 마찬가지로 초기 단계에서 전자밀도는 급격히 감소하며, 플라즈마 냉각(plasma's cooling) 때문에 감소폭은 줄어들게 된다. 선택된 스펙트럼의 LTE 조건의 상태를 판단하기 위해 확인 될 임계 전자 밀도 분포(Critical value of electron density distribution, $N_{e,critical}$)는 아래의 식 (6)과 같다[15].

$$N_{e,critical} \geq 1.6 \times 10^{12} T^{1/2} (E_k - E_i)^3 \quad (6)$$

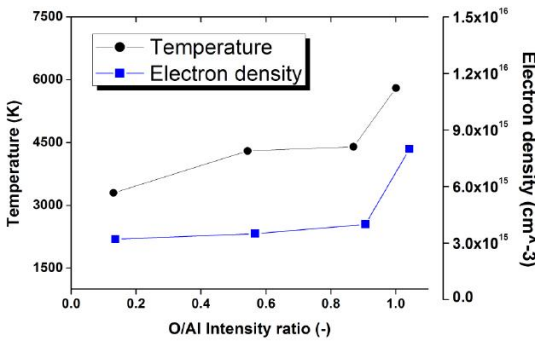
$E_k - E_i$ 는 가장 큰 에너지 차이(1.59eV, Table 1)이며, T는 플라즈마 온도이다. 가장 높고 가장 낮은 플라즈마 온도의 값을 이용하면, 임계 전자 밀도는 약 3.02×10^{14} 에서 $5.23 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 이 값들은 모든 지연시간(delay time)에서 LTE 상태를 만족을 검증하고 있으며, 계산된 플라즈마의 온도와 전자밀도 값들이 신뢰성을 가진다는 것을 나타내고 있다. 앞서 구한 O/Al 신호 세기비와 레이저 에너지의 관계를 정리하면 Fig. 6(a)와 같이 비례한다는 것을 재차 확인 할 수 있다. 이를 플라즈마 온도 및 전자밀도와 함께 그려보면, O/Al 신호 세기비가 증가할수록 온도 및 전자 밀도도 함께 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 6(b)). 플라즈마 온도는 전자 에너지와 전자 밀도는 단위 체적당 전자의 밀집도를 나타내는데, O/Al 신호 세기비가 약 1.0일 때 각각 크게 증가한다. O/Al 신호 세기비가 약 1.0일 때의 레이저 에너지는 약 950mJ로, 본 저자의 이전 논문에서 데토네이션과의 발생 에너지와 유사한 것을 확인 할 수 있다. 이를 통해 고복사 조도 환경에서 생성되었던 데토네이션과의

Table 1. NIST data of g, A, and E for energy levels of O (I) and Al (I) [18]

Wavelength, λ [nm]	E_i [cm^{-1}]	E_k [cm^{-1}]	Statistical Weight, g[-]	Transition Probability, A [10^8 s^{-1}]
394.40 Al I	0	25347.76	2	0.499
396.15 Al I	112.061	25347.76	2	0.980
777.42 O I	73768.2	86627.78	5	0.369



(a) O/Al intensity ratio vs laser energy

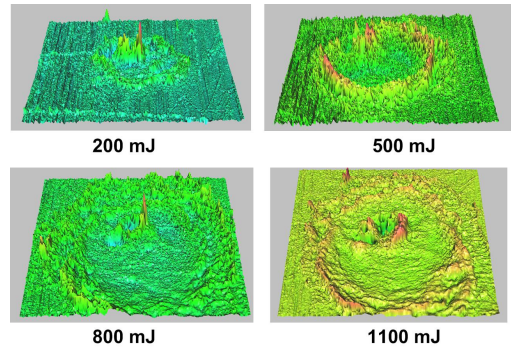


(b) O/Al intensity ratio vs T_{plasma} vs N_e

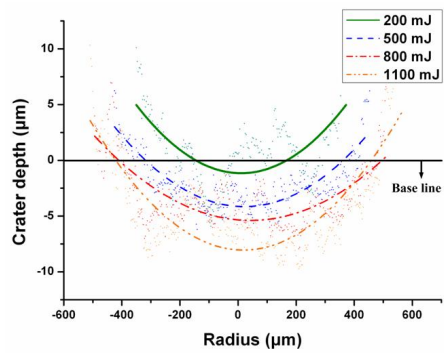
Fig. 6. Analysis of plasma using spectral data of aluminum and oxygen

발생 환경은 플라즈마 온도 약 6000K 이상, 전자 밀도 약 10^{16} cm^{-3} 이라는 것을 확인 하였다.

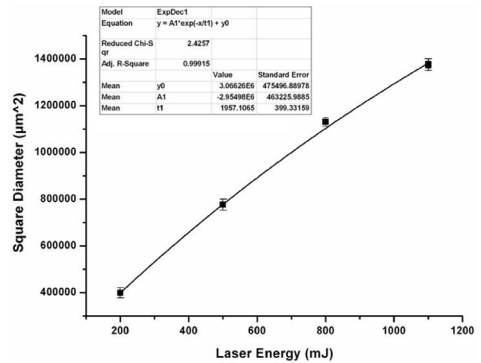
알루미늄 원자와 산소 원자/분자 생성에 지대한 영향을 끼치는 플라즈마의 특성을 알기 위해 공초점 현미경 표면 측정기(Surf Nano Focus)를 이용하여 알루미늄판의 크레이터를 측정하였다 (Fig. 7(a)). 각 레이저 에너지의 따른 명확한 특징 식별을 위해 10번의 레이저 펄스가 조사되었다. 크레이터의 깊이와 지름의 분석 방법은 표면 분석기를 통해 얻은 측정값을 점으로 표현한 후, 각 값들을 피팅하여 선을 그렸다. 그 후에 각 피팅선들을 기준선(Base Line)에 맞추어 정렬 후에 기준선 대비 X축값을 지름, Y축값을 깊이로 정의하였다. 삭마된 깊이는 레이저 에너지 증가에 따라 약 $1\mu\text{m}$ 에서 $8\mu\text{m}$ 까지 변화하였다 (Fig. 7(b)). 또한 알루미늄판에 형성되는 크레이터의 지름은 증가하는 레이저 에너지에 비례하여 증가함을 알 수 있다($r^2 > 0.99$, Fig. 7(c)). 이는 레이저 조사에 의해 알루미늄판 표면에 만들어지는 플라즈마 또한 레이저 에너지 증가에 따라 신뢰성 있게 생성되었다는 것을 의미하고 있다.



(a) Laser craters on aluminum plate after 10 shots of laser pulses



(b) Crater depth in different laser energies



(c) Square diameter of crater

Fig. 7. Crater characteristics of aluminum plate

III. 결 론

본 연구에서는 LIBS 분광분석법을 활용하여 산소와 알루미늄의 스펙트럼을 측정하고, 신호 및 신호세기 비율을 분석하였다. 또한 이와 연관된 플라즈마의 특징 분석을 위해, 온도 및 전자 밀도 계산과 알루미늄 표면의 크레이터를 측

정하였다. 레이저 조사에 의해 발생하는 화학반응은 매우 짧은 시간 내에 이루어지므로 그것을 분석하고 증명하는 것은 쉽지 않다. 따라서 분광학적 분석을 바탕으로, 고 복사 조도환경에서의 발생하는 알루미늄과 산소의 화학반응을 검증할 수 있는 가능성을 제시 하였다는 것에 의미가 있다. 본 연구 결과는 고 에너지 레이저로 인해 발생하는 테토네이션과에 대한 분광분석에 적용 될 수 있을 것으로 예상된다.

References

- 1) Russo, R. E., "Laser ablation," Appl. Spectrosc., Vol. 49, 1995, 14A
- 2) Glassman, I., "Metal Combustion Processes," American Rocket Society Preprint 938-59, New York, 1959
- 3) Brzustowski T. A., Glassman I., "Spectroscopic Investigation of Metal Combustion," Heterogeneous Combustion, Academic Press, New York, 1964, pp 41-74
- 4) Price, E. W., "Combustion of Metalized Propellants, Fundamentals of Solid-Propellant Combustion," Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 90, 1984, pp. 479-514
- 5) Trunov J M. A., Zhu X., Dreizin E. L., "Effect of polymorphic phase transformations in Al₂O₃ film on oxidation kinetics of aluminum powders," Combustion and Flame, Vol. 140, 2005, pp. 310 - 318
- 6) Beckstead M. W., "Correlating Aluminum Burning Times," Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 41, No. 5, 2005, pp. 533 - 546
- 7) Risha G. A., Son S. F. , Yetter R. A., Yang V., Tappan B. C., "Combustion of nano-aluminum and liquid water," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, 2007, pp. 2029 - 2036
- 8) Zhang F., Gerrard K., Ripley R. C., "Reaction Mechanism of Aluminum-Particle - Air Detonation," J. Propul. Power, Vol. 25, No. 4, 2009, pp. 845
- 9) Kim C., Gojani A. B., Yoh J. J., "Surface chemical reaction of laser ablated aluminum sample for detonation initiation," J. Appl. Physics, Vol. 109, Issue. 9, 2011, pp. 3510-3515
- 10) Miziolek, A. W., Palleschi, V., Schechter, I., "Laser Induced Breakdown Spectroscopy," Cambridge university press, 2006, pp. 1-40
- 11) Choi S. J., Yoh J. I., "Characteristics of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) at Space Environment for Space Resources Exploration," J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 40, Issue. 4, 2012, pp. 346-353
- 12) Amir Hossein R., Mohammad Hossein K., Masoud Kavosh T., Seyyed Mohammad R. D., Amir Hossein F., Seyyed Jabbar M., and Ali M., "Approach for determination of detonation performance and aluminum percentage of aluminized-based explosives by laser-induced breakdown spectroscopy," Applied Optics, Vol. 55, Issue 12, 2016, pp. 3233-3240
- 13) Cremers D. A., Radziemski L. J., "Handbook of Laser-induced Breakdown Spectroscopy," John Wiley & Sons Ltd, 2006, pp. 31-36
- 14) Singh J. P., Thakur S. N., "Laser-induced Breakdown Spectroscopy," 1st, ELSEVIER, 2007, pp. 83-108
- 15) Zhang Y., Zhao Z., Xu T., Niu G.H., Liu Y., Duan Y., "Characterization of local thermodynamic equilibrium in a laser-induced aluminum alloy plasma," Journal of Applied Optics, Vol. 55, Issue 10, 2016, pp. 2741-2747
- 16) Griem H.R., "Plasma Spectroscopy," McGraw-Hill, New York, 1964, pp. 1-250
- 17) Sarandaev E. V., Salakhov M. K. H., "Regularities in the Stark widths and shifts of spectral lines of singly-ionized aluminum," Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol. 56, Issue 3, 1996, pp. 399-407
- 18) Harilal S. S., O'Shay B., Tillack M. S., Mathew M. V., "Spectroscopic characterization of laser-induced tin plasma," Journal of Applied Physics, Vol. 98, Issue 1, 2005, pp. 3306-3312