

技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.4.346>

우주 자원 탐사를 위한 레이저 유도 플라즈마 분광분석법의 우주 환경에서의 특성 분석

최수진*, 여재익**

Characteristics of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) at Space Environment for Space Resources Exploration

Soo-Jin Choi* and Jai-Ick Yoh**

ABSTRACT

The Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) has great advantages as an analytical technique, namely real-time analysis without sample preparation, ideal for mobile chemical sensor for space exploration. The LIBS plasma characteristics are strongly dependent on the surrounding pressure. In this study, seven types of target (C, Ti, Ni, Cu, Sn, Al, Zn) were investigated for their elemental lifetime. The target was located in vacuum chamber which has the pressure range of 760 to 10^{-5} torr. As the pressure is decreased, the elemental lifetimes of carbon and titanium declined, while all other targets showed increased lifetimes until reaching 1 torr and declined with continued pressure decrease. The boiling point and electronegativity amongst the physicochemical properties of the samples are used to explain this peculiarity.

초 록

레이저 조사 시 발생하는 플라즈마를 성분 분석에 이용하는 Laser-Induced Breakdown Spectroscopy(LIBS)는 우주 자원 탐사에 적합한 실시간 성분 분석 기술이다. LIBS 플라즈마의 특성은 주위 압력의 영향을 크게 받는다. 본 연구에서는 다양한 물성치를 갖는 일곱 가지 원소(C, Ti, Ni, Cu, Sn, Al, Zn)의 지속시간(lifetime)이 760 - 10^{-5} torr의 압력 범위에서 분석되었다. 압력이 낮아짐에 따라 탄소와 티타늄의 lifetime은 감소하였고, 그 밖의 원소들은 1 torr의 압력에서 가장 오랜 시간동안 검출되었다. 원소별 lifetime 결과를 통하여 낮은 압력 하에서 플라즈마의 특성과 원소별 끓는점 및 전기음성도의 관계를 규명하였다.

Key Words : Laser-Induced Breakdown Spectroscopy(레이저 유도 플라즈마 분광분석법), Plasma(플라즈마), Elemental lifetime(원소별 지속 시간), Component analysis(성분 분석), Low pressure(저압), Space resources exploration(우주 자원 탐사)

† 2011년 10월 21일 접수 ~ 2012년 2월 28일 심사완료

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 중신회원, 서울대학교 기계항공공학부

교신저자, E-mail : jjyoh@snu.ac.kr

서울시 관악구 관악로 599

I. 서 론

탐사선을 이용한 우주 탐사가 시작된 초기에는 궤도에서 촬영한 행성 표면의 사진을 지구로 전송하고 수명이 다한 탐사선은 행성에 낙하하여 폐기되거나 특정 궤도를 돌며 우주 쓰레기로 남았다. 이후 우주 탐사 기술은 발전을 거듭하여 유인 탐사선을 활용한 표본 채취 및 무인 탐사로봇에 의한 행성 구성 물질 성분 분석 등의 성과를 이루었다. 자원탐사 시 월석과 같은 샘플을 직접 채취하여 지구로 귀환할 경우 월석의 성분을 분석하여 달의 생성연대 등의 정보를 획득할 수 있다. 그러나 월석 채취 시 우주선의 질량이 증가하고, 반드시 귀환해야만 한다는 어려움이 있다. 또한 수십~수백 kg에 해당하는 월석 채취를 위하여 일반적으로 유인 우주선의 발사가 요구된다. 그러므로 선진 우주 강국들은 토양 채취와 더불어, 무인 탐사선으로의 적용이 용이하고 직접 물질을 채취할 필요 없이 행성 자체에서 분석이 가능한 분광 분석법 또한 탐사 기술로 활용하고 있다.

분광 기반의 탐사 기술은 선진 우주 강국을 중심으로 연구가 진행되고 있다. 기존의 암석이나 토양을 직접 채취해 오는 탐사 방식에 비하여, 분광 기반 탐사 기술은 행성 자체에서 성분 분석이 가능하다는 점에서 주목받고 있다. 특히 Alpha-proton X-ray spectrometer[1]는 NASA의 이전 화성 탐사 위성에 탑재되었던 기술이다. 그러나 이 기술은 수 cm 이내의 근거리 측정만 가능하고, 계산 시간이 수 시간으로 오래 걸린다는 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 기존 분광 기술의 문제점을 해결하기 위하여 레이저 유도 플라즈마 분광 분석법 (Laser Induced Breakdown Spectroscopy : LIBS)을 우주 탐사 기술로 적용하고자 한다.

LIBS 성분 분석법은 분석 시간이 상당히 짧아 실시간 분석이 가능하고, 시료를 준비하기 위한 전처리 과정이 불필요하여 시약에 의한 오염 및 미량의 시료 분석 시 시료의 손실 우려가 없다. 화학적 사전 준비가 요구되지 않으므로 화학 약품에 의한 환경 오염이 발생하지 않고, 분석 후 폐기물 및 오염 물질이 생성되지 않아 친환경적인 성분 분석이 가능하다. 또한 고체·액체·기체의 모든 상 및 전도·비전도성 물질에 걸쳐 모든 물질의 정확한 성분분석이 가능하다. 이와 같은 장점으로 인하여 LIBS 기술을 활용한 우주 자원 탐사 연구가 선진 우주 강국을 중심으로 진행 중

이다[2-3]. 특히 미국의 NASA에서는 2011년 11월에 발사된 화성 탐사 로버 Curiosity에 ChemCam이라는 명칭의 LIBS 장비를 탑재시켰고, 유럽의 ESA는 2013년에 발사 예정인 화성 탐사선에 LIBS 장비를 탑재시킬 계획이다. 이 중에서 ChemCam에 탑재된 레이저는 질량이 530 g으로 우주 탐사에 적합하도록 경량화, 소형화를 달성하였다. 현재 미국과 유럽 등 일부 국가에서는 LIBS 장비를 우주 탐사 외의 화학 성분 분석에도 널리 적용하고 있다. 그러나 국내에는 아직 LIBS 기술이 도입되는 단계이므로 해외에서 수입한 장비를 활용하여 연구를 진행하는 과정에 있다.

본 연구에서는 달 및 우주 자원 탐사에 LIBS 기술을 적용하기 위하여 우주 환경을 모사한 진공 챔버를 활용하여 실험을 수행하였다. 우선 대기압에서 레이저의 자외선(266, 355 nm), 가시광선(532 nm), 적외선(1064 nm) 영역을 고려하여 최적의 파장을 도출하였다. 또한 다양한 물성치를 갖는 원소들의 신호가 검출되는 lifetime을 압력에 따라 실험적으로 분석하였고, 물질의 물리·화학적 물성치를 활용하여 관계를 규명하였다.

II. LIBS 성분 분석 원리 및 방법

LIBS는 레이저 조사 시 발생하는 플라즈마를 성분 분석에 이용하는 방법이다. 펄스 레이저 빔이 렌즈를 통과하여 매우 높은 에너지 밀도로 시료에 조사되면 높은 온도와 압력에 의해 기체 분자가 전자와 양이온 상태로 공존하는 플라즈마 상태로 붕괴된다. 이 때 발생하는 플라즈마는 자유 전자와 여기된 원자 및 이온을 포함하고 있으며, 원소의 종류 및 여기 상태에 따라 고유 파장의 빛을 방출한다. 즉 여기 상태의 원자 및 이온은 일정 수명 이후 에너지를 방출하며 다시 바닥 상태로 돌아가는데, 이때 원소의 종류 및 여기 상태(첫 번째 여기 상태, 두 번째 여기 상태 등)에 따라 고유의 파장을 방출한다. 방출된 빛은 스펙트럼 형태로 나타나게 되고, 이를 해석하여 물질 성분의 정성, 정량적인 분석이 가능하다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 시편들의 대기압에서의 LIBS 스펙트럼이다. 원소별 방출선이 나타나는 파장 및 분자가 방출되는 밴드, 그리고 신호 세기 등이 상이함을 확인할 수 있다. 본 실험에서 분석된 물질의 대표적인 peak의 파장은 Table 1에 명시되어 있다.

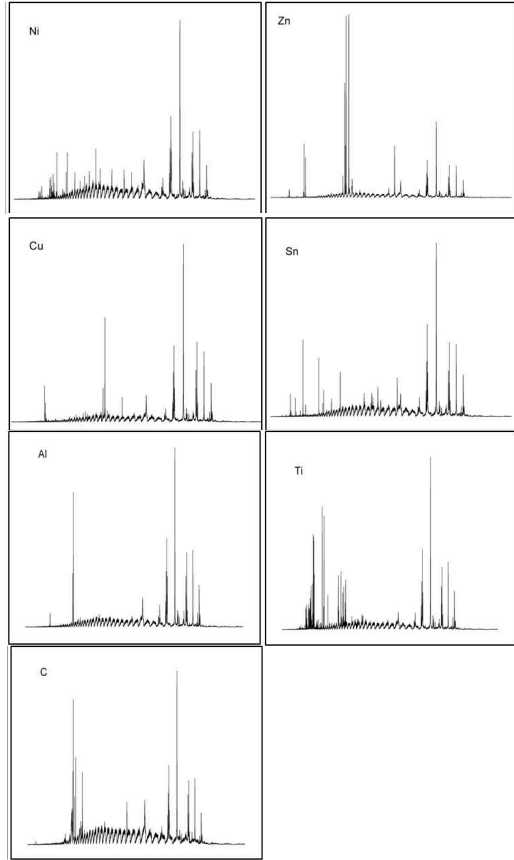


Fig. 1. LIBS spectrum of various elements

Table 1. Wavelength of elements

Element	Wavelength (nm)
C	247.8561
Ti	499.1066
Ni	341.4764
Cu	521.82
Sn	283.9976
Al	396.152
Zn	481.0532

III. 실험 장비 구성

LIBS 시스템에는 일반적으로 플라즈마 발생을 위한 펄스 레이저, 레이저 빔을 시료에 조사하기 위한 미러 및 렌즈 등의 광학장비, 플라즈마 빛을 수집하여 해석하기 위한 분광기, 그리고 스펙트럼을 해석하고 결과를 보여주는 컴퓨터가 포함된다. 본 실험에서는 우주 환경을 모사할 수 있

는 진공 챔버가 추가적으로 사용되었다.

플라즈마를 발생시키기 위한 레이저로는 1064, 532, 355, 266 nm의 파장과 10 Hz의 반복률(repetition rate), 그리고 5-7 ns의 펄스폭을 갖는 Nd:YAG 레이저(Surelite I, Continuum)를 사용하였고, 펄스 당 45 mJ의 에너지가 사용되었다.

실험에 사용된 분광기는 에셀 그레이팅을 사용하여 200-900 nm의 전 영역 파장의 signal을 동시 분석이 가능하다. 레이저와 분광기(Andor Mechelle)/ICCD(Andor, iStar)는 펄스 제너레이터(BNC 565 Digital pulse generator)에 연결하여 시간적 동기화를 하였다.

시편으로는 순도 95% 이상의 비금속 원소인 탄소(흑연)와 금속 원소인 니켈, 구리, 주석, 알루미늄, 납, 그리고 티타늄이 사용되었다. 각각의 시편은 $760 - 10^{-5}$ torr의 압력 범위를 갖는 진공 챔버 내부에 위치한 XYZ stage에 장착되었다.

LIBS 성분 분석에서 신호의 검출 시간은 가장 중요한 요소 중의 하나이다. LIBS 스펙트럼은 신호 검출 시간에 따라 매우 민감하게 변화한다. 레이저가 조사된 후 수 마이크로초 동안에는 플라즈마에서 발생하는 강력한 하얀 빛인 continuum이 발생하여 스펙트럼의 background, 즉 예러로 존재하게 된다. 레이저 조사 후 시간이 지남에 따라 background가 감소하고 이온 및 중성자, 분자 등의 스펙트럼을 확인할 수 있다. 일반적으로 LIBS 신호의 최적 검출 시간은 플라즈마가 발생하고 1~2 μ s 이후이다.

본 실험에서 데이터 획득을 위하여 레이저가 조사된 이후 분광기가 신호 측정을 시작하기까지의 시간인 delay time은 원소의 방출선이 검출 가능한 시간까지 변화되었고, 분광기가 신호를 받아 들인 시간인 TTL width는 50 μ s로 설정되었다.

IV. 실험 결과 및 분석

4.1 레이저 파장에 의한 플라즈마 특성 분석

본 연구에 사용된 Nd:YAG 레이저는 1064, 532, 355, 266 nm의 네 가지 파장의 빔을 조사할 수 있으므로 자외선, 가시광선 및 적외선에 이르기까지 다양한 파장 조건에서 성분 분석을 하기에 적합한 레이저이다. 현재 일반적으로 LIBS 연구에 사용되는 파장은 1064 nm로 NASA의 ChemCam은 1067 nm, ESA의 ExoMars에 탑재될 레이저는 1064 nm를 사용하고 있으나, 레이저 파장에 의한 효과는 아직 정확하게 규명되어 있지 않다. 레이저 파장과 물질 사이의 상호작용

은 상당히 복잡한 관계에 있으므로 메커니즘이 뚜렷이 정의되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 대기압 조건인 760 torr에서 네 가지 파장의 빔을 조사하는 Nd:YAG 레이저를 활용하여 실험을 진행하고 최적 조건의 레이저 파장을 결정하였다.

Fig. 2와 3은 네 가지 레이저 파장에 대하여 탄소와 알루미늄을 1 μs delay time에서 검출한 스펙트럼이다. 탄소의 경우 탄소 중성 원자가 대기 중의 질소와 빠른 속도로 결합하여 CN 밴드를 형성하므로 1064 nm의 빔을 조사할 경우에만 탄소 중성 원자가 매우 약하게 검출된다.

탄소와 알루미늄 모두 짧은 파장의 레이저 빔을 조사하면 신호 세기가 감소한다. 적외선 영역의 레이저를 조사할 경우 레이저 방향으로 팽창하는 플라즈마가 발생되고, 자외선 영역의 레이저를 조사하면 구처럼 둥근 형태의 플라즈마가 생성된다[4]. 본 실험에서는 레이저 빔과 수직인 방향에서 플라즈마를 검출하였으므로 1064 nm

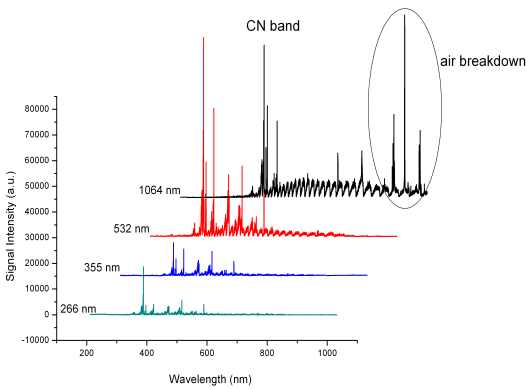


Fig. 2. LIBS spectrum of carbon according to laser wavelength

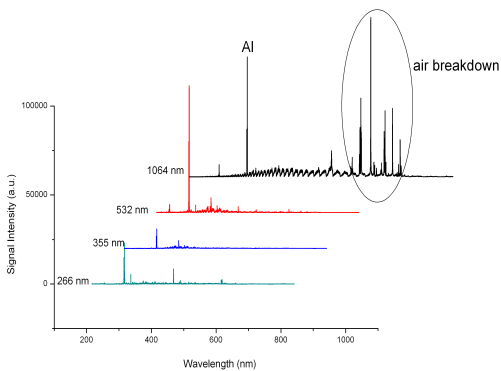


Fig. 3. LIBS spectrum of aluminum according to laser wavelength

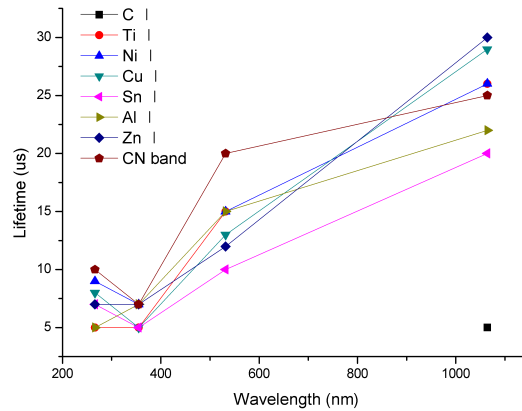


Fig. 4. Elemental lifetimes according to various laser wavelength

파장에서 발생된 플라즈마가 효율적으로 검출되었다.

실험에 사용된 7가지의 원소 및 CN 밴드의 신호 검출이 지속되는 시간, 즉 lifetime이 Fig. 4에 나타나있다. 적외선 레이저를 조사할 때가 자외선 영역에서보다 lifetime이 3배 가량 향상되었다. 또한 탄소 중성 원자는 1064 nm 파장에서만 잠시 검출되었으나 강력한 CN 밴드가 형성되어 탄소의 존재 여부를 검증할 수 있었다.

짧은 파장의 빔을 사용할 경우 검출기 모듈의 최적 배열을 통하여 신호 세기를 증가시키고 일부 원소에서는 보다 향상된 흡수율로 인하여 효율적인 분광이 가능하다. 그러나 Nd:YAG 레이저는 1064 nm 파장을 기반으로 그 외에 harmonic generator와 dichroic mirror를 추가로 장착하여 532, 355, 266 nm 파장의 빔을 생성한다. 또한 532 nm 빔의 에너지는 1064 nm 빔의 절반, 355, 266 nm 빔의 에너지는 532 nm 빔의 절반 수준에도 미치지 못한다. 따라서 harmonic generator와 dichroic mirror가 추가될수록 경량화 및 소형화가 어렵고 에너지 손실이 커지기 때문에 우주 자원 탐사에서는 1064 nm의 빔을 사용하는 것이 효율적이다. 따라서 본 연구에서는 우주 탐사에 최적으로 규명된 1064 nm 파장의 빔을 적용하였다.

4.2 대기 압력에 의한 플라즈마 특성 분석

본 실험에서는 대기 압력에 의한 플라즈마의 특성 및 원소별 lifetime을 분석하기 위하여 $760 - 10^{-5}$ torr의 압력 범위에서 진공 실험을 수행하였다. 이 범위는 4 - 7 torr로 모사되는 화성의 대기압을 포함하고 있다. 또한 레이저 유도 플라

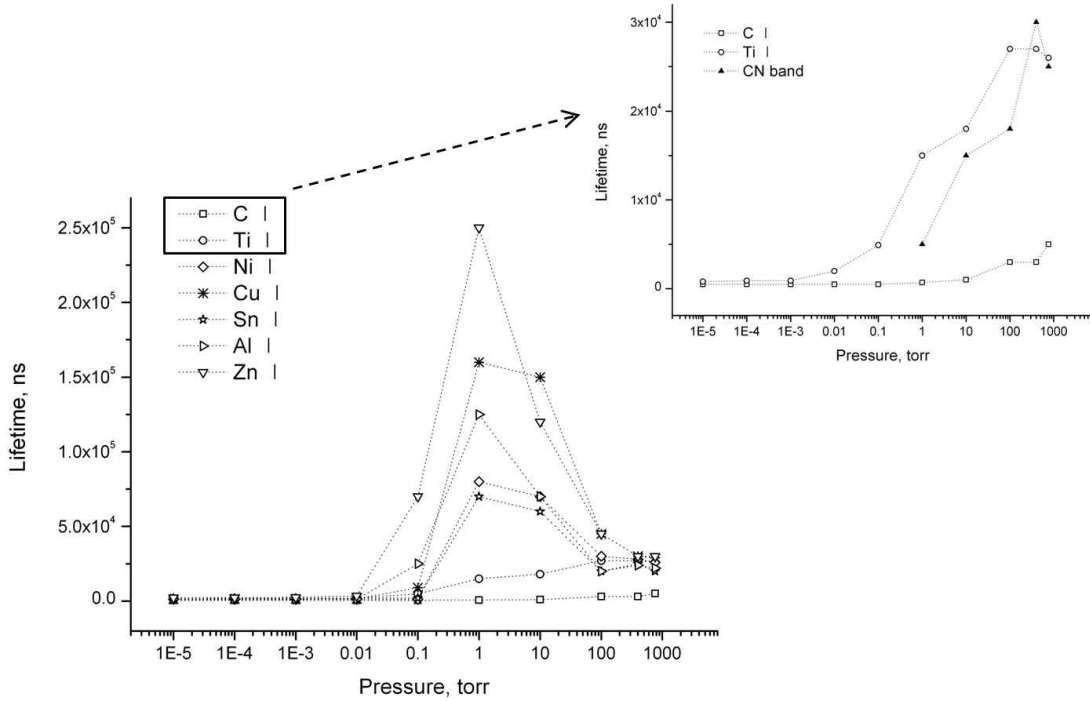


Fig. 5. Elemental lifetimes of neutral atoms in low pressure conditions(1 bar = 760 torr)

즈마는 10⁻² torr 이하의 압력에서는 일정한 특성을 갖는 것으로 알려져 있으므로 [8] 달 환경도 모사할 수 있는 범위이다.

Fig. 5는 각각의 중성 원자의 압력에 대한 lifetime을 나타낸다. Lifetime 측정을 위하여 원소별로 NIST 데이터베이스를 기준으로 대표적인 몇 가지 파장의 방출선이 사용되었다. Lifetime은 signal to noise를 고려하여 원소의 존재가 식별 가능한 범위에서 측정되었다. 그림 5에서 탄소와 티타늄의 lifetime은 주위 압력이 낮아짐에 따라 감소함을 알 수 있다. 그밖의 원소의 lifetime은 1 torr에서 최대값을 보였다.

주위 압력이 낮아지면 플라즈마가 급격히 팽창하여 소멸되므로 탄소와 티타늄의 경우 lifetime이 감소한다. 두 원소를 비교해보면 압력이 증가할수록 탄소가 티타늄보다 급격히 소멸된다. 대기압 조건에서 탄소 중성원자는 5 μs, 티타늄 중성원자는 26 μs까지 검출이 가능하다. 그리고 1 torr부터 탄소 원자가 대기 중의 질소 원자와 결합된 CN 밴드가 형성된다(Fig. 6). LIBS 스펙트럼에서 분자 신호는 원자와 달리 분자를 구성하는 원소들의 회전/진동 운동으로 인하여 가 molecular band 형태로 나타난다. Table 2에 원소들의 여러 물성치가 나타나 있다. 원자 반지름

이 작은 원소는 높은 이온화 에너지를 필요로 하고 큰 전기 음성도를 갖는다. 전기음성도는 원자가 전자를 끌어당기는 힘이다. 따라서 전기음성도가 큰 탄소는 주위의 질소와 쉽게 반응하여 CN 밴드를 형성하였으므로 압력이 증가함에도 불구하고 탄소 중성원자의 lifetime이 매우 짧았다.

Fig. 5에서 탄소와 티타늄을 제외한 다른 원소들은 1 torr의 압력에서 가장 긴 lifetime을 갖는다. 이러한 결과는 몇 가지 참고문헌의 신호세기 결과와 일치한다. Dreyer et al.은 칼슘과 마그네슘, 그리고 철의 중성 원자 신호 세기가 5-7 torr에서 증가함을 확인하였다[5]. Yalcin 또한 4 torr에서 알루미늄의 신호 세기가 증가함을 확인하였고[6], 이러한 증가는 낮은 압력에서 플라즈마의 냉각이 서서히 진행되기 때문이라고 분석하였다. 반면에 Vadillo et al.은 498.17 nm 파장의 티타늄 중성 원자의 신호 세기를 분석하였는데, 주위 압력이 감소하면 신호 세기 또한 감소하였다[7]. 이러한 차이점은 실험 장비 구성의 차이로부터 야기되었다고 해석되었다[8]. 그러나 위의 결과들은 동일한 조건에서 수행된 본 실험의 결과와 유사하다. 따라서 원소의 물리적 특성과 압력에 대한 lifetime의 관계를 규명하기 위하여 참고문헌에서 사용된 4가지 원소(마그네슘, 실리콘, 철,

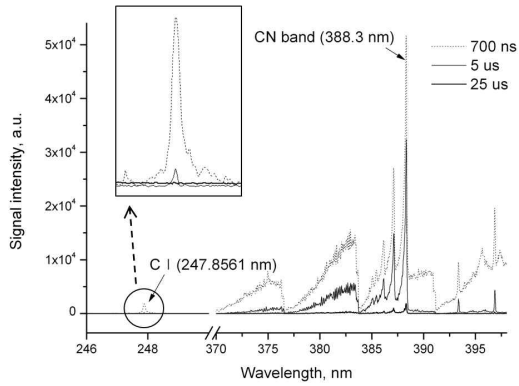


Fig. 6. LIBS spectra of CN band and neutral carbon atom from graphite target according to gate delay at 760 torr

칼슘)의 물성치를 추가적으로 분석하였다.

레이저-물질 사이의 현상에서 높은 에너지 밀도의 펄스 에너지가 시편에 전달되면 그 표면의 온도는 순식간에 물체의 기화온도를 넘어서게 되고, 표면의 증발에 의해 열이 방출되는 시간은 레이저의 펄스 지속시간에 비해서 오래 걸리므로 금속 표면의 물질이 증발하기도 전에 그 내부의 온도 또한 증발 온도를 넘어서게 된다. 내부 물질의 온도와 압력은 임계점 이상으로 상승하게 되고, 그로 인해 물질들이 순간적으로 기화된 후 전자, 중성자 및 양이온 상태로 분리되어 공존하는 플라즈마상태로 붕괴된다. 따라서 플라즈마의 생성 과정은 물질의 끓는점 및 기화엔탈피와 연관된다.

낮은 압력 하에서는 플라즈마의 냉각 효과가 감소한다. 따라서 탄소와 티타늄을 제외한 대부분의 원소의 lifetime이 1 torr에서 증가한 것이

다. Table 2에서 대기압 조건에서 탄소와 티타늄은 높은 끓는점과 기화엔탈피 값을 갖는다. 따라서 탄소와 티타늄 원자는 일정 온도 이하로 냉각되면 쉽게 증기 상태를 벗어나기 때문에 플라즈마 냉각 효과가 감소된 영향을 받지 않는다. 반면에 아연은 낮은 끓는점을 갖기 때문에 1 torr에서 가장 긴 lifetime을 갖는다.

Eq. (1)은 증기 압력과 증기 온도 사이의 관계를 보여주는 Clausius-Clapeyron Equation이다. 여기서 $R (= 8.3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$ 와 Δh 은 각각 기체 상수와 기화엔탈피이다. 이 관계식은 주어진 상태의 온도와 압력으로부터 특정 압력에서의 끓는점을 구할 수 있다. Clausius-Clapeyron Equation으로부터 특정 압력에서의 끓는점을 Eq. (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \frac{\Delta h}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{1}{\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)\left(\frac{R}{\Delta h}\right) + \frac{1}{T_1}} \quad (2)$$

Eq. (2)로부터 계산된 원소의 압력 변화에 대한 끓는점은 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 플라즈마의 냉각 효과가 적용되는 온도의 기준점을 추측할 수 있다. 1 torr에서는 2174 - 2435 K의 범위에 기준점이 존재하여 기준 온도 이상에서는 플라즈마 냉각 효과가 감소되는 영향을 받지 않을 것이다. 결론적으로 1 torr 이하의 압력에서는 급격한 플라즈마의 팽창이 주요 요소이고, 1 torr 이상의 압력에서는 플라즈마의 냉각 효과가 lifetime 감소의 원인이다.

레이저-물질 사이의 상호작용은 매우 복잡한 현상이므로 낮은 압력 하에서의 플라즈마의 급격

Table 2. Physicochemical properties of test samples

Element	Radius [pm]	First ionization energy [kJ/mol]	Electro-negativity	Boiling point [K]	Heat of vaporization [kJ/mol]
C	67	1086.5	2.55	4300	715
Ti	176	658.8	1.54	3560	425
Ni	149	737.1	1.91	3186	378
Cu	145	745.5	1.90	3200	300
Sn	145	708.6	1.96	2875	290
Al	118	577.5	1.61	2792	293
Zn	142	906.4	1.65	1180	119
Mg	145	737.7	1.31	1363	128
Si	111	786.5	1.90	3173	359
Fe	156	762.5	1.83	3134	347
Ca	194	589.8	1.0	1757	155

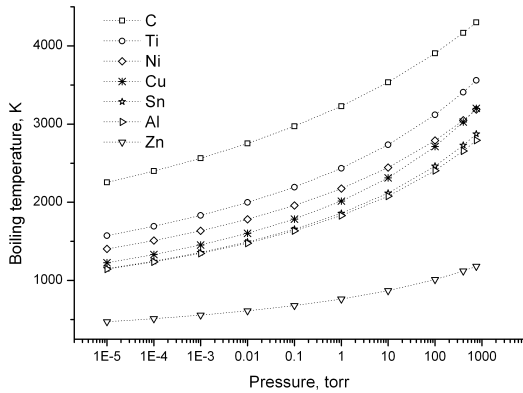


Fig. 7. Estimated boiling point of each element

한 팽창 및 냉각 효과 감소 외에도 복합적인 요소가 원소별 lifetime에 영향을 미친다. 즉 플라즈마 shielding 효과, 신호 세기, 강력한 신호가 생성되는 파장 범위, 원소의 반응성에 따른 분자화 등이 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 그러나 주요 원소의 물성치에 대한 lifetime 데이터를 통하여 그 밖의 원소들의 lifetime을 예측하여 효율적인 검출을 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 LIBS 시스템의 우주 탐사로의 적용을 위하여 실제 운용 환경을 모사한 진공 실험이 $760 - 10^{-5}$ torr의 압력 범위에서 수행되었다.

우선 Nd:YAG 레이저의 네 가지 파장 중에서 경량화·소형화를 달성하기에 가장 적합한 파장인 1064 nm 파장을 적용할 때에 자외선 영역의 파장보다 3배 가량 오랜 시간 동안 LIBS 플라즈마를 검출하였고, 따라서 이후의 LIBS 연구에서는 1064 nm의 파장을 적용하였다.

진공 실험에서 압력이 감소함에 따라 탄소와 티타늄의 lifetime이 낮은 압력 하에서의 급격한 플라즈마 팽창으로 인하여 감소되었다. 또한 큰 전기음성도를 갖는 탄소는 중성 원자의 lifetime이 매우 짧았다. 그밖의 모든 원소들은 1 torr에서 가장 오랜 시간 동안 검출되었다. 원소의 끓는점에 따라 플라즈마 냉각 효과에 차이가 있기 때문에 원소별 lifetime 경향이 상이하게 나타났음을 물리화학적 물성치를 활용하여 설명하였다.

본 실험을 통하여 낮은 압력 하에서 플라즈마의 특성과 원소별 끓는점, 그리고 전기음성도의 관계를 규명하였고, 유사한 물성치를 갖는 원소

의 플라즈마 거동 특성 유추를 통하여 효율적인 분광이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 BK21과 서울대학교 항공우주신기술 연구소(IAAT), 그리고 한국연구재단을 통하여 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다(2009-0092017). 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) R. Rieder, T. Economou, H. W?nke, A. Turkevich, J. Crisp, J. Bruckner, G. Dreibus, H. Y. McSween Jr, "The Chemical Composition of Martian Soil and Rocks Returned by the Mobile Alpha Proton X-ray Spectrometer: Preliminary Results from the X-ray Mode", *Science*, Vol. 278, No. 5344, 1997, pp. 1771 - 1774.
- 2) C. Fabre, S. Maurice, R. Wiens, V. Sautter, "ChemCam LIBS Instrument: Complete Characterization of the Onboard Calibration Silicate Targets (MSL Rover)", 41st Lunar and Planetary Science Conference, No. 1533, 2010, pp. 1835.
- 3) G. B. Courreges-Lacoste, B Ahlers, F Rull, "Combined Raman spectrometer / laser-induced breakdown spectrometer for the next ESA mission to Mars", *Spectrochimica Acta Part A*, 68, 2007, pp. 1023-1028.
- 4) S. Darwiche, M. Benmansour, N. Eliezer, D. Morvan, "Investigation of optimized experimental parameters including laser wavelength for boron measurement in photovoltaic grade silicon using laser-induced breakdown spectroscopy", *Spectrochimica Acta Part B*, 2010.
- 5) C. B. Dreyer, G. S. Mungas, P. Thanh, J. G. Radziszewski, "Study of sub-mJ-excited laser-induced plasma combined with Raman spectroscopy under Mars atmosphere-simulated conditions," *Spectrochimica Acta Part B*, 62, 2007, pp. 1448-1459.
- 6) S. Yalcin, Y. Y. Tsui and R. Fedosejevs, "Pressure dependence of emission intensity in femtosecond laser-induced breakdown

spectroscopy," J. Anal. Atomic Spectrom, 19, 2004, 1295-1301.

7) J. M. Vadillo, J. M. Fernandez Romero, C. Rodriguez, J. J. Laserna, "Effect of plasma shielding on laser ablation rate of pure metals

at reduced pressure," Surface and Interface Analysis, Vol. 27, Issue 11, 1999, pp. 1009-1015.

8) A. J. Effenberger, Jr., J. R. Scott, "Effect of atmospheric conditions on LIBS spectra," Sensors, 10, 2010, pp. 4907-4925.