

레이저 유도 플라즈마 분광분석법을 이용한 연소 가스 온도 측정 기술

이석환* · 김용규* · 강웅* · 정육철* · 이주현* · 김성훈* · 양인영**

Measurement of combustion gas temperature using laser-induced breakdown spectroscopy

Seok Hwan Lee** · Yong-Gyoo Kim* · Woong Kang* · Wukchul Joung* · Joo Hyun Lee*
· Sunghun Kim* · Inyoung Yang**

ABSTRACT

Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) is a technique that complements the disadvantages of conventional laser-based combustion diagnosis techniques such as weak signal strength, complex equipment configuration, and low accuracy. In this study, basic research was carried out to measure the combustion gas temperature of scramjet engines using LIBS. Spray flames were generated from Jet A-1 fuel used in scramjet engines and gas temperatures were measured at the top of the flames with a calibrated thermocouple. The LIBS signals were acquired at the same points as the temperature measurement positions of the thermocouple. The LIBS spectra were analyzed to obtain a calibration curve between the LIBS signal and the reference temperature measured at the thermocouple. Therefore, it was confirmed that the combustion gas temperature can be measured in-situ using LIBS.

초 록

레이저 유도 플라즈마 분광분석법 (Laser-induced breakdown spectroscopy : LIBS) 은 기존의 레이저 기반의 연소 진단 기법들의 약한 신호세기, 복잡한 장비 구성, 낮은 정확도 등의 단점을 보완하는 기법이다. 본 연구에서는 LIBS를 활용하여 스크램 제트 엔진의 연소 가스 온도를 측정하기 위한 기초 연구가 수행되었다. 스크램 제트 엔진에서 사용되는 Jet A-1 연료로 스프레이 화염을 만들고 교정된 열전대로 화염 상부에서의 가스 온도를 측정하였다. 그리고 열전대의 온도 측정위치와 동일한 지점에서의 LIBS 신호를 획득하였다. LIBS 스펙트럼을 분석하여 LIBS 신호와 열전대로 측정된 기준 온도와의 보정곡선을 얻었다. 그래서 본 연구를 통해 LIBS를 활용하여 연소 가스의 온도를 in-situ 하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

Key Words: Laser-induced breakdown spectroscopy(레이저 플라즈마 분광 분석법), Scramjet combustor(스크램제트 연소기), Combustion gas temperature(연소 가스 온도)

1. 서 론

스크램제트 엔진을 추진기관으로 사용하는 극 초음속 비행체는 로켓 추진 비행체와 비교하여 동일 추진체 대비 장거리 비행이 가능하여 군사 용 유도 무기 분야뿐만 아니라 우주 발사체 분야, 초고속 정찰기 및 수송기 분야에서 유망한 미래 항공 기술로서 주목받고 있다. 스크램제트 엔진의 연료 분사 특성, flame holder 위치, 연 소기 구조에 따라서 다양한 연소 현상이 일어날 수 있다. 하지만 이러한 스크램제트 엔진은 초음 속의 연소 반응의 고온, 고속의 환경으로 인해서 연소 진단의 어려움을 가지고 있다. 직접 온도 센서를 삽입하는 방법은 낮은 측정 정확도, 유동 교란 야기, 센서의 파손 등의 단점이 있어 레이 저를 활용한 연소 진단이 사용되어 왔다. 레이저 를 활용하여 연소 가스 온도를 측정하기 위해서 Absorption spectroscopy[1], Rayleigh scattering[2], Laser-induced fluorescence(LIF)[3], Raman scattering spectroscopy[4], Coherent anti-stokes Raman scattering(CARS)[5] 등 다양 한 방법들이 사용되고 있다. 하지만 이러한 방법 들은 신호의 세기가 약하고 측정 정확도에 한계 가 있으며 측정 셋업이 복잡하며 고가인 단점들 이 있다. 그래서 최근 이러한 단점들을 보완하는 방법들이 개발되어 왔으며 그중에 하나가 레이저 유도 플라즈마 분광분석법(Laser induced breakdown spectroscopy : LIBS)를 활용하여 온 도를 측정하는 것이다[6]. LIBS는 고출력의 레이저를 순간적으로 조사하여 고온의 플라즈마를 만들어 이때 발생하는 빛을 분광하는 기법으로 신호의 세기가 세고 비교적 셋업이 간단하고 높 은 정확도로 온도를 측정할 수 있다. 이를 이용 하면 온도 뿐만 아니라 연료의 농도, 가스의 밀 도를 측정 할 수 있고 고온의 플라즈마를 활용 하여 연료를 점화 시킬 수 있어 점화와 동시에 연소상태를 측정할 수 있는 장점이 있다[7].

본 연구에서는 LIBS를 활용하여서 초음속 연 소기의 연소 가스의 온도를 in-situ 로 측정하기 위한 기초 연구로 스크램 제트 엔진에서 사용하 는 연료인 Jet A-1 연료를 사용한 화염에서의 온 도를 LIBS로 측정하는 연구가 수행되었다. LIBS 로부터 얻은 신호와 교정된 온도계로 측정된 기 준 온도와의 보정곡선을 얻었다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 실험셋업을 보 여준다. 연소가스의 온도를 측정하고자 Jet A-1 연료를 사용하여 실제 화염을 만들었다. 연료는 펌프(Dosing pump, Simdos)를 사용하여 5 mL/min 의 유량으로 노즐로 보내어졌고 공기압 측기로부터 공기가 MFC(Mass flow controller) 를 통하여 노즐로 보내어졌다. 노즐은 Siphon 노즐(Delavan SN30609-2) 사용하였고 압축된 공기 를 노즐 팁으로 보내어 강화 압력으로 연료를 미립화 시키는 원리가 사용되었다. 온도 측정은 soot 이나 남아있는 연료의 미립자의 영향을 받 지 않기 위해서 노즐로부터 120 mm 떨어진 곳 에서 측정되었다. 기준 온도 측정을 위해서 교정 된 열전대를 활용하여 온도 측정을 수행하였다. 열전대의 교정값은 Table 2 와 같다. 그리고 열 전대를 활용하여 측정한 동일한 지점에서 LIBS 측정을 수행하였다. LIBS 측정을 위해서 Nd:YAG 펄스 레이저 (Q-smart 850, Quantel)가 사용되었다. 레이저 에너지는 100 mJ 로 고정 하였고 second harmonic generator를 이용하여서 532 nm 파장을 사용하였다. 펄스 폭은 5 ns 이고 빔 직경은 9 mm 이었다. 150 mm 초점거 리를 갖는 렌즈에 에너지를 조사하여 플라즈마 를 발생시켰고 발생된 플라즈마는 60 mm 초점 거리를 갖는 렌즈를 통과하여 분광기(Andor Holospec-F/1.8)으로 보내어졌다. 분광기는 545 nm에서 917 nm 까지의 범위의 파장을 0.96 nm 의 정밀도를 가지고 측정할 수 있다. 분광된 빛 은 ICCD (Andor I-star)로 측정되었다. 레이저가

* 한국표준과학연구원

** 한국항공우주연구원 엔진시스템 연구팀

† 교신저자, E-mail: seokhwan.lee@kriss.re.kr

조사된 후 일정시간동안에 전자-전자 충돌로 인해서 노이즈로 작용하게 되는 continuum 이 발생하는데 이를 피하기 위해서 레이저 조사 후 2 μ s 의 지연시간 후 200 ns 의 노출시간동안 분광신호를 측정하였다.

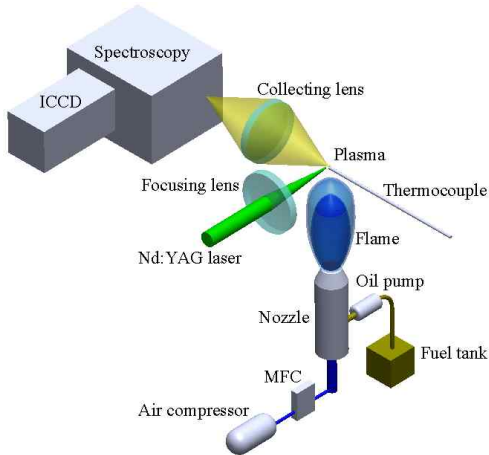


Fig. 1 Experimental setup

Table 1. Calibration results of the reference thermocouple

Set temp.	emf/ μ V	temp/C	DUT	Deviation temp
800	7931.5	798	796.3	-1.7
900	9193.4	898.6	896.6	-2
1000	10502.5	996.8	996.9	-2.2

2.2 실험 결과

Fig. 2 는 교정된 열전대를 활용하여 화염으로부터 120 mm 높이에서 방사방향으로 측정된 연소 가스의 온도를 보여준다. 화염으로부터 떨어져 있기 때문에 온도가 Jet A-1 연료 화염의 단열온도 (Adiabatic temperature, 2093 $^{\circ}$ C)보다 훨씬 낮은 온도를 보여주는 것을 확인할 수 있다. 측정은 화염의 방사방향(X 축)으로 이루어졌다. Fig. 2로부터 화염의 안쪽(X=0 mm)부터 화염의 바깥쪽 (X=100 mm)으로 갈수록 온도가 감소하

는 것을 확인할 수 있다.

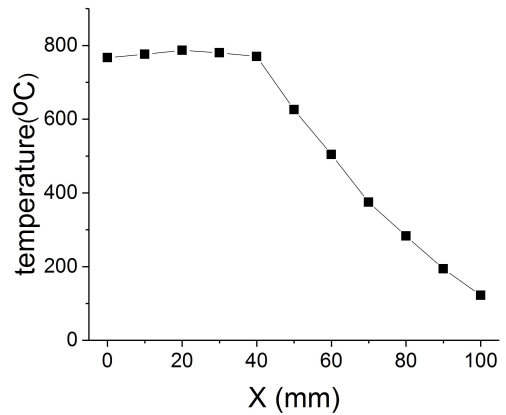


Fig. 2 Reference temperature along the radial direction at 120 mm height of the flame

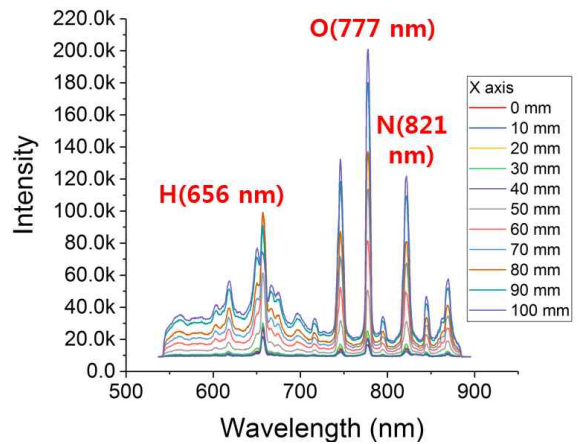


Fig. 3 LIBS spectra according to the radial direction at the 120 mm height of the flame

Fig. 3 은 노즐로부터 120 mm 높이에서의 방사방향(X 축)으로의 측정위치에 따른 LIBS 스펙트럼을 보여준다. 연소 생성물로부터 얻은 수소 (H:656 nm), 산소(O:777 nm), 질소(N:821 nm)의 신호가 측정됨을 알 수 있다. 이 원자 신호를 분석하면 연료의 당량비를 측정할 수 있게 된다 [7]. 또한 이 스펙트럼을 분석하면 플라즈마의 세기를 측정할 수 있게 되는데 이는 밀도의 합

수로 나타낼 수 있다[6]. 온도는 밀도와 압력의 함수 이므로 플라즈마의 세기를 측정함으로써 온도를 측정할 수 있게 된다.

식 (1) 은 신호의 세기와 가스 밀도와의 관계를 나타낸다. 신호의 세기(I)는 밀도와 비례의 관계를 가지고 있고 이를 이용하여 가스의 밀도를 측정할 수 있다.

$$I_{ki} = n_k A_{ki} h \nu_{ki} \quad (1)$$

$$n_k = \frac{n_0 g_k e^{-\frac{E_k}{kT}}}{Z(T)}$$

n_k : excited - state populatoin

n_0 : total vumber density of the species

k : Boltzmann constant

T : temperature (LTE)

Z : partition funcion

I_{ki} : emission intensity

by the radiative transition

Fig. 4는 LIBS 스펙트럼에서 원자신호가 없는 부분의 신호를 평균한 값(base 신호)을 측정 위치에 따라서 나타낸 것이다. Base 신호는 플라즈마의 세기에 비례하여 나타나므로 base 신호를 측정하므로 플라즈마의 세기를 측정 할 수 있다. 그러므로 식 (1) 을 이용하여 base 신호를 이용하여 밀도를 얻을 수 있고 측정 지점의 압력은 대기압이므로 이를 이용하여 온도를 측정할 수 있게 된다.

Fig. 5 는 같은 측정 위치에서 측정된 LIBS base 신호를 열전대로 측정된 온도에 따라서 나타낸 것이다. 측정위치마다 다른 온도와 다른 base 신호를 가지므로 온도에 따른 보정곡선을 얻을 수 있었다. Fig. 5 에 나타난 것과 같이 base 신호와 온도는 서로 반비례의 관계에 있으며 직선형의 관계를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 이 보정곡선을 이용하면 LIBS 측정으로 in-situ 하게 연소가스의 온도를 측정할 수 있을 것이다.

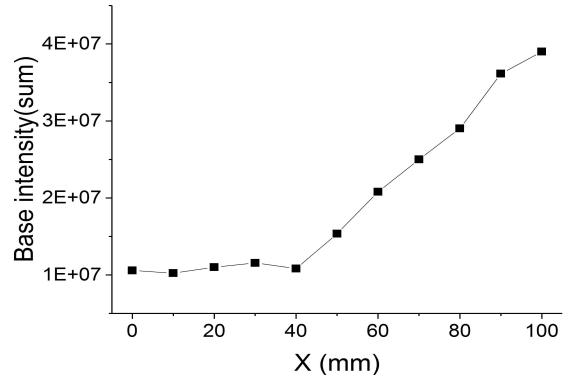


Fig. 4 Base intensity according to measurement positions along the radial direction at the 120 mm height of flame

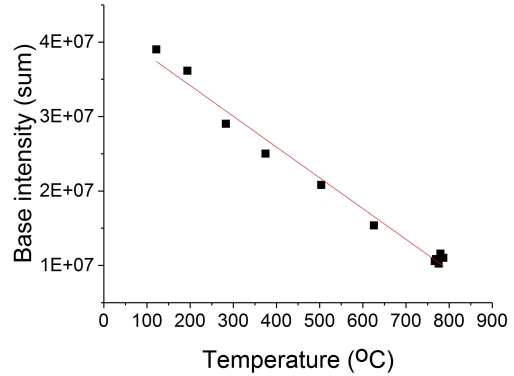


Fig. 5 Base intensity according to the temperature

3. 결 론

본 연구에서는 초음속 연소기의 연소 가스 온도를 측정하기 위해 LIBS를 활용하여 가스 온도를 측정하는 연구가 수행되었다. 실제 초음속 연소기에 사용되는 Jet A-1 연료를 활용하여 스프레이 화염을 만들고 교정된 열전대를 이용하여 위치에 따른 온도를 측정하였다. 그리고 같은 위치에서의 LIBS 측정을 통하여 위치에 따른 스펙트럼을 얻었다. LIBS 스펙트럼 분석을 통하여 base 신호가 온도와 반비례의 직선형의 관계가 있음을 확인 하였다. 이를 이용하면 초음속 연소

기의 연소가스 온도를 in-situ 하게 측정 할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2016년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회 민군융합기술연구사업 (No. CMP-16-06-KARI)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

1. Hieta, T., and Merimaa, M., "Spectroscopic measurement of air temperature," *International Journal of Thermophysics*, Vol. 31, No. 8-9, 1710, 2010.
2. Miles, R. B., Lempert, W. R., and Forkey, J. N., "Laser rayleigh scattering," *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, No. 5, R33, 2001.
3. Schulz, C., Sick, V., "Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems," Vol. 31, No. 1, 75, 2005.
4. Rabenstein, F., and Leipertz, A., "Two-dimensional temperature determination in the exhaust region of a laminar flat-flame burner with linear Raman scattering," *Applied Optics*, Vol. 36, No. 27, 6989, 1997.
5. Roy, S., Gord, J. R., and Patnaik, A. K., "Recent advances in coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy: Fundamental developments and applications in reacting flows," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 36, No. 2, 280, 2010.
6. Do, H., Carter, C. D., Liu, Q., Ombrello, T. M., Hammack, S., Lee, T., and Hsu, K.-Y., "Simultaneous gas density and fuel concentration measurements in a supersonic combustor using laser induced breakdown," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35, No. 2, 2155, 2015.
7. Lee, S. H., Do, H., and Yoh, J. J., "Simultaneous optical ignition and spectroscopy of a two-phase spray flame," *Combustion and Flame*, Vol. 165, 334, 2016.