

화염의 정성적 당량비 측정을 위한 Plasma Diagnostics 에 관한 연구

이석환* · 여재익**

Plasma spectroscopy aimed at quantifying the flame equivalence ratio

SeokHwan Lee*, Jai-ick Yoh**

ABSTRACT

The equivalence ratio is measured by LIBS(Laser-induced Breakdown spectroscopy) in hydrocarbon flame and high temperature (~ 3200 °C) oxyhydrogen flame, where a stoichiometric mixture of hydrogen and oxygen is produced from water through electrolysis. The ratio of the hydrogen and oxygen (H/O) atomic lines intensities is used for quantitatively determining the equivalence ratio. laser energy is evaluated for determining the optimal condition for plasma diagnostics. The minimum laser energy for generating plasma in a laminar premixed hydrocarbon flame was about 70 mJ, whereas oxyhydrogen flame. consequently the irradiated spot of a lower density in high temperature oxyhydrogen flame gave rise to bigger plasma in size, thus limiting the spatial resolution of the LIBS measurement.

Key Words : Hydrocarbon flame, Oxyhydrogen flame, Laser-induced breakdown spectroscopy, Equivalence ratio

LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy)는 레이저를 높은 에너지로 한곳에 집중하여 조사하여서 물질을 붕괴시켜 그때 발생하는 플라즈마를 측정하여 물질의 화학적 성분을 분석하는 기법이다. 이 LIBS를 이용하여서 최근 연소현상을 분석하는 연구들이 많이 이루어지고 있다. LIBS를 이용하여서 연소배출가스에서의 금속미세입자를 측정하고[1,2] 당량비를 측정하였다[3,4]. 또한 화염내부에서의 당량비[5]와 온도를 측정[6]하는 연구도 진행되었다. 하지만 아직 LIBS를 이용하여서 화염을 측정하기 위해서는 많은 연구되어야 할 부분들이 남아있다.

본 연구에서는 LIBS 를 이용하여서 화염내부에서의 당량비가 측정되었다. 특히 LIBS 로 화염내부의 당량비를 측정할 때 공간적 정밀도가 평가되었다. 또한 기존의 연구들은 주로 탄화수소 연료에서의 LIBS 측정이 연구되었는데 본 연구에서는 탄화수소화염보다 훨씬 온도가 높은 수소-산소 (EOH - Electrolitic OxyHydrogen)화염에

서의 당량비가 LIBS 로 측정되었다.

그림 1 은 본 연구에서 사용된 실험셋업을 나타낸다. 1064파장의 Nd:YAG 레이저가 120mm 초점거리를 가지고 있는 렌즈를 통하여서 플라즈마가 화염 내부에서 발생되었다. 레이저 에너지는 70 mJ로 고정하였다. 발생된 플라즈마는 석영 렌즈를 거쳐서 옵티컬 파이버를 통해 분광기로 보내어 지고 ICCD로 측정되었다. LIBS 측정시 사용된 지연시간(레이저 조사후 ICCD 측정 까지의 시간은 1 μ s 이고 ICCD의 노출 시간은 1 μ s 이다.

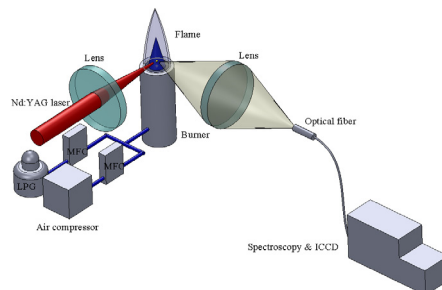


Fig. 1 Schematic diagram

* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처자, jjyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-9334 FAX : (02)-882-1507

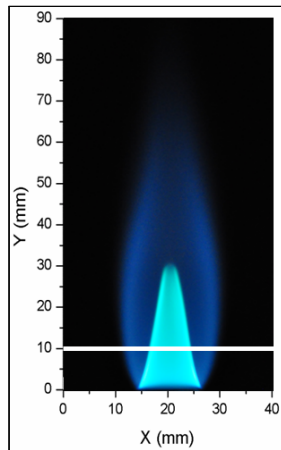


Fig. 2 hydrocarbon flame image

그림 2 는 실험에서 사용된 Bunsen 타입의 버너로부터 얻어진 화염의 이미지이다. 버너 안쪽 지름은 9.6 mm 이고 버너의 길이는 200 mm 이다. 화염의 레이놀즈 수는 728 으로 층류화염이고 화염의 당량비는 1.4 로 맞추었다.

그림 3 는 화염의 버너에서 10 mm 위에서 얻어진 LIBS 측정으로 얻어진 스펙트럼이다. 그림 3에서 보이듯이 수소 α 신호인 656 nm 피크와 산소 신호인 777 nm 피크가 보이는 것을 확인할 수 있다.

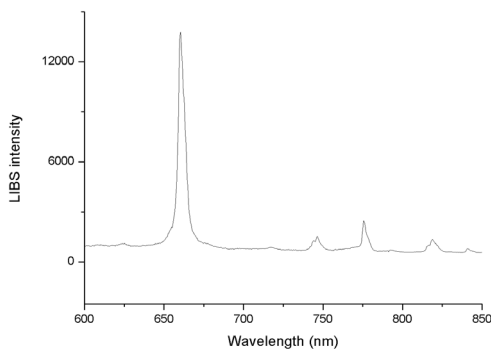


Fig. 3 LIBS spectrum in flame

그림 4 는 버너에서 10 mm 떨어진 곳에서 수평 방향으로 이동하며 얻어진 H와 O LIBS 신호이다. H의 신호는 화염의 중앙에서 크게 나오고 화염의 바깥에서는 작아지는 것을 확인할 수 있다. O의 신호는 연소가 일어나는 화염의 안쪽에서는 신호가 낮고 바깥에서는 높아지는 것을 볼 수 있다.

그림 5 는 버너에서 10 mm 떨어진 곳에서 수평

방향으로 이동하며 얻어진 H/O O LIBS 신호의 비이다. 이 H/O 신호의 비는 보정을 통하여 화염의 당량비를 나타낼 수 있다. H/O신호는 가운데에서 가장 크고 바깥으로 갈 수록 작아진다. 그리고 화염 내부의 안쪽 콘(inner cone)과 화염 외부의 계면에서 H/O 신호가 급격하게 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이것으로 LIBS의 공간 정밀도 화염을 측정하기에 충분하다는 것을 알 수 있다.

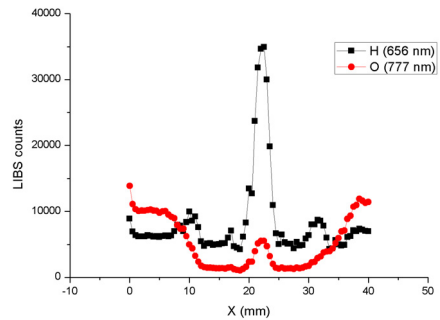


Fig. 4 H, O LIBS signal along the horizontal direction at 10 mm above the inlet nozzle

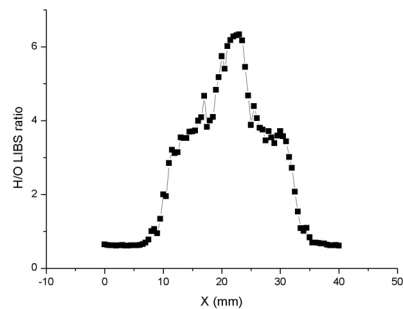


Fig. 5 H/O LIBS ratio along the horizontal direction at 10 mm above the inlet nozzle

그림 6은 EOH 화염의 이미지이다. EOH 화염은 동축타입의 버너가 사용되었고 안쪽의 홀은 0.68 mm 이고 바깥쪽의 홀은 3.1 mm 이다. EOH 화염은 단일온도가 3200 °C로 위의 그림 2에 제시된 탄화수소화염(propane-air) 보다 약 1000 °C 높다. EOH 화염은 당량비가 1로 고정되어 연소가 안으로부터 일어난다. 그러므로 화염의 크기가 작아지게 된다.

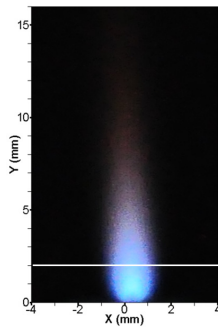


Fig. 6 Flame image from EOH gas

그림 7은 버너로부터 2 mm 위에서의 EOH 화염의 H/O 신호를 나타낸 것이다. 화염이 고온이 될수록 레이저로 플라즈마를 발생시키기 위한 한계 레이저 에너지가 커지게 된다. 그러므로 레이저 플라즈마의 크기도 커지게 된다. 그래서 그림 7에서 보는 것과 같이 LIBS 측정의 공간적 정밀도가 낮아지게 된다.

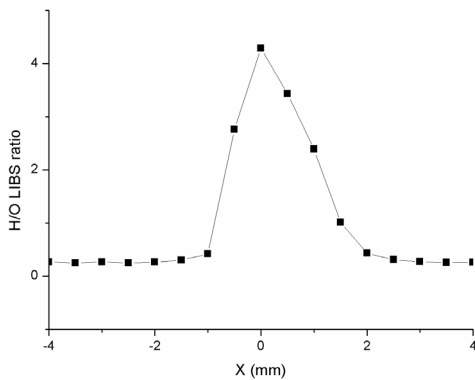


Fig. 7 H/O LIBS ratio along the horizontal direction at 2 mm above the inlet nozzle

본 연구는 LIBS를 이용하여서 탄화수소 화염 및 수소-산소 화염에서의 당량비가 측정되었다. 탄화수소 화염에서의 LIBS의 공간적 정밀도가 연소현상을 충분히 측정할 정도로 높음을 확인하였다. 그리고 고온의 수소-산소 화염에서는 플라즈마를 발생시키기 위해서 사용된 높은 레이저 에너지로 인해서 높은 공간정밀도가 낮아지는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab-2009-0092017), 그리고 서울대학교의 WCU(warol Class University-R31-2008-000-10083-0)로부터 지원받아 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] H. Zhang, F.-Y. Yu도, J. P. Singh, "Laser-induced breakdown spectroscopy as a multimetal continuous-emission monitor", *Appl. Optics*, Vol. 38, 1999, pp. 1459-1466.
- [2] S. G. Buckley, H. A. Johnsen, K. R. Henchen, D. W. Hahn, "Implementation of laser induced breakdown spectroscopy as a continuous emissions monitor for toxic metals", *Waste Manage.*, Vol. 20, 2000, pp. 455-462.
- [3] F. Ferioli, P. V. Puzinauskas, S. G. Buckley, "Laser-induced breakdown spectroscopy for on-line engine equivalence ratio measurements", *Appl. Spectro.*, Vol. 57, No. 9, 2003, pp. 1183-1189.
- [4] F. Ferioli, S. G. Buckley, P. V. Puzinauskas, "Real-time measurement of equivalence ratio using laser-induced breakdown spectroscopy", *Int. J. Engine Reserch*, Vol. 7, 2006, pp. 447-457.
- [5] P. Stavropoulos, A. Michalakou, G. Skevis, S. Coris, "Laser-induced breakdown spectroscopy as an analytical tool for equivalence ratio measurement in methane-air premixed flames", *Spectrochim. Acta Part B*, Vol. 60, 2005, pp. 1092-1097.
- [6] J. Kiefer, J. W. Troger, Z. Li, T. Seeger, M. Alden, Al. Leipertz, "Laser-induced breakdown spectroscopy flame termometry", *Combust. and Flame*, Vol. 142, 2012, pp. 3576-3582.