

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2019.23.2.053>

연소실 진단을 위한 LIBS 소형화 장비 개발

전형민^a · 김현우^a · 여재익^{a,*}

Development of LIBS Plug for Combustor Diagnosis

Hyung Min Jun^a · Hyunwoo Kim^a · Jai-ick Yoh^{a,*}

^aDepartment of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

ABSTRACT

LIBS plug, a simplified laser-induced breakdown spectroscopy(LIBS) device with the purpose of measuring the fuel distribution inside the combustion chamber, was developed and manufactured. The LIBS plug receives only two wavelengths (H:656.3 nm, O: 777 nm) that are closely related to the equivalence ratio in the overall spectrum. The calibration curve between the signal of the LIBS plug and the equivalence ratio was constructed, and the fuel distribution of gasoline-air and LPG-air mixtures was measured using the LIBS plug.

초 록

연소실 내부의 연료 분포를 실시간으로 측정하는 목적을 가진 소형화 장비인 LIBS plug가 개발 및 제작 되었다. LIBS plug는 레이저 유도 플라즈마 분광분석법 (Laser-induced breakdown spectroscopy : LIBS)를 응용한 장비로, 기존의 LIBS 결과인 전체 스펙트럼에서 당량비와 깊게 관여하는 두 개의 파장(H: 656.3 nm, O: 777 nm)만을 선정하여 측정할 수 있도록 하였다. 렌즈와 밴드패스 필터, 포토다이오드로 구성된 본 장비로 수집한 결과에 대한 분석이 이루어졌으며, 액체(가솔린)와 기체(LPG) 연료와 공기의 혼합물에서의 당량비 측정이 이루어졌다.

Key Words: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy(레이저 유도 플라즈마 분광법), Equivalence Ratio(당량비)

1. 서 론

연료의 고른 분포는 연소실 내의 안정적인 점화 및 연소에 필수적인 요소이다. 특히 공기흡입 엔진 내부에서 연소실 내부 유동의 속도가 빠른 경우에는, 그 유동의 불확실성과 민감한 특성으로 인해 유동을 방해하지 않으면서 내부의 상황을 진단하는 것이 해당 분야의 큰 관심사 중 한 가지이다[1]. 연소실에 대한 간섭을 최소화하면

Received 7 June 2018 / Revised 6 February 2019 / Accepted 11 February 2019
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2018년도 춘계학술대회(2018. 5. 30-6. 1, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

서 유동의 특성을 빠르게 파악할 수 있는 방법으로 레이저를 이용한 다양한 계측 방법이 개발되고 적용되어왔다[2]. 특히 유동이 연소실 내부 수 ms 내에 통과하는 스크램젯 엔진의 경우, 연료의 고른 분포를 유도하기 위해 그에 대한 실험적인 분석과 수치적인 해석이 제시되어 온 것을 확인할 수 있다[3]. 하지만 선행 연구들은 실험실 내에서 만들어진 유사한 유동을 측정할 것이기 때문에 실제로 작동하는 연소실 내부의 실시간 진단 결과와는 차이가 있을 수 있다.

본 연구는 위와 같은 한계점을 극복하기 위해 탄화수소 연료의 분포를 실시간으로 확인할 수 있는 소형화 Laser-induced breakdown spectroscopy(LIBS)장비를 제시한다. LIBS는 레이저 빔을 집광하여 순간적으로 해당 지점을 이온화시킨 이후 들뜬 전자가 바닥상태로 회복할 때 방출하는 원자 고유의 파장을 이용하여 구성 원자 성분을 분석하는 실험 기법이다. 선행 LIBS 연구로부터 LIBS 결과의 H(656.3 nm)와 O(777 nm)의 신호의 비가 당량비와 선형적인 관계를 가진다는 사실이 증명되었다[4]. 본 연구에서는 LIBS에서 수집하는 전체 스펙트럼이 아닌, 수소와 산소의 신호만으로도 당량비를 측정할 수 있다는 점에 착안하여 비교적 큰 부피를 차지하는 분광기와 ICCD를 사용하지 않는 소형 당량비 측정 장치(LIBS plug)를 개발하였다. LIBS plug는 수소와 산소의 원자 신호를 투과하는 밴드패스 필터와 렌즈, 포토다이오드로 구성되었으며, 이를 이용하여 각각 액체와 기체 상태의 탄화수소 연료인 가솔린과 LPG의 당량비에 따른 신호의 캘리브레이션 커브를 작성하였고 이를 이용하여 유동에서의 연료 분포를 측정하였다.

2. 실험 구성

2.1 Laser-Induced Breakdown Spectroscopy 구성

본 연구는 LIBS를 기반으로 한 연구이므로 기존의 LIBS 장비를 이용하여 연료 분포를 분석하는 연구가 선행되었다. Fig. 1은 LIBS 시스템의 구성을 나타낸다. 1064 nm 파장과 5 ns의 펄스

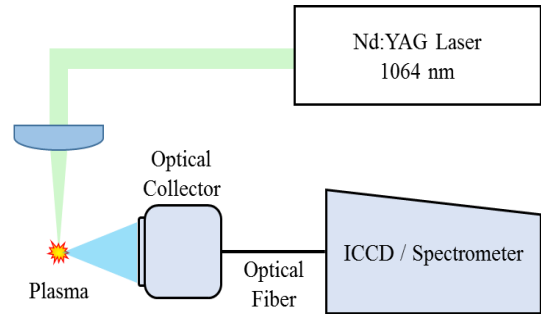


Fig. 1 LIBS setup.

폭을 가지는 Nd:YAG 레이저 (Continuum, Surelite III)를 이용하여 플라즈마를 형성하였다. 플라즈마 방출 빛은 광학 콜렉터와 광섬유를 통과하여 분광기 (Andor Mechelle 5000)를 거쳐 ICCD 카메라 (Andor iStar)로 수집되었다.

2.2 LIBS Plug 구성

간단한 구성으로 탄화수소 연료의 분포와 화염의 유무를 파악하기 위한 장비인 LIBS plug를 설계하고 제작하였다. 분광기와 ICCD를 이용한 선행 LIBS 연구들은 전체 스펙트럼에서 수소와 산소에 해당하는 각각 한가지의 피크의 신호 세기를 나누는 것인 H/O 비가 당량비와 선형적인 관계를 가진다는 것을 증명하였다[4,5]. LIBS plug는 수소 (656.28 nm)와 산소 (777.194 nm, 777.417 nm, 777.539 nm)의 원자 신호만을 받을 수 있도록 밴드패스 필터와 렌즈 그리고 포토디텍터를 장착하였다. 수소의 신호를 통과시키기 위해서는 656 nm를 중심으로 FWHM(Full width at half maximum)이 10 nm인 밴드패스 필터 (656FS10-12.5, Andover)를 사용하였고, 산소의 신호를 통과시키기 위해서는 780 nm를 중심으로 FWHM이 10 nm 인 밴드패스 필터 (780FS10-12.5, Andover)를 사용하였다. 각각의 필터 앞에는 플라즈마 방출 빛을 집광하기 위한 렌즈 (LA1074, Thorlabs)가 장착되었으며, 필터 뒤로는 필터를 통과한 빛을 수집하도록 포토다이오드 (FDS010, Thorlabs)가 장착되었다. 각각의 포토다이오드 신호는 BNC 케이블을 이용하여 오실로스코프 (WAVESURFER 64MXS-B,

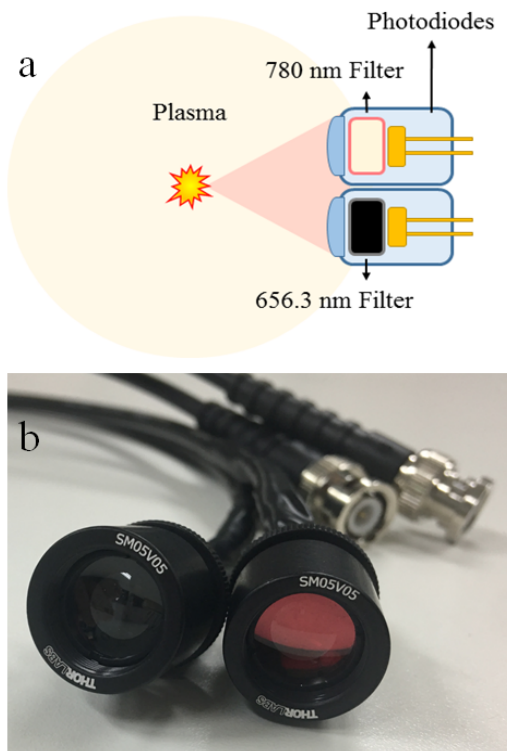


Fig. 2 (a) Experimental scheme of LIBS plug
(b) LIBS plug.

Teledyne LeCroy)로 전송되었다. LIBS plug의 모든 구성은 두 개의 렌즈 튜브 (SM05V05, Thorlabs)내에 위치하였으며, 각각 지름 17.5 mm와 길이 26.2 mm의 크기를 가진다. Fig. 2 (a)와 (b)는 LIBS plug의 구성과 실물 형상을 나타낸다.

2.3 실험 조건 설정

분석을 위한 유동은 총 두 가지 종류의 연료와 노즐을 이용하여 구성하였다. 연료로는 가솔린과 LPG가 사용되었으며 가솔린 연료의 경우에는 분젠 버너와 사이펀 노즐 (Delavan 30609-2)이, LPG 연료의 경우에는 분젠 버너만이 사용되었다.

가솔린 연료는 질량 유량 제어기를 이용하여 유량이 조절되었다. 연료의 당량비에 대한 LIBS plug 신호의 캘리브레이션 커브를 구성하기 위

해서 우선 초음파 플레이트 분무기를 이용하여 액적을 균일하게 분포시켰고, 이를 공기와 혼합하여 분젠 버너를 통과시켰다. 분젠 버너의 노즐 지름은 12 mm이며, 플라즈마는 분젠 버너의 노즐 바로 위에서 형성되었다. 이 때 당량비를 조절하기 위해 공기의 유량은 20 L/min으로 고정시킨 상태에서 가솔린의 유량을 1.15 mL/min부터 9.2 mL/min까지 조절하였다. 사이펀 노즐을 이용하여 가솔린 연료와 공기의 혼합물을 분무할 때에는 가솔린 유량을 10 mL/min으로, 공기 유량을 10 L/min으로 고정하여 실험을 진행하였다. 해당 실험 셋업 내에서의 액적의 크기의 분석과 이상상태 유동 내에서의 LIBS 신호의 분석은 선행 연구로부터 진행된 바 있다[6].

LPG 연료를 사용한 실험은 모두 분젠 버너를 이용하여 이루어졌는데, 당량비를 조절할 때에는 LPG 유량을 200 mL/min으로 고정한 뒤 공기 유량을 1.88 L/min부터 18.8 L/min까지 조정하였다.

가솔린 연료를 사용한 실험에서는 1064 nm의 파장을 가지는 레이저 빔을 사용한 반면, LPG 연료를 사용한 실험에서는 532 nm의 파장을 가지는 레이저 빔을 사용하였다. 모든 실험에서는 100 mJ의 레이저 에너지를 사용하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 LIBS plug의 신호 분석

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 가솔린 연료의 당량비에 따른 LIBS plug의 H와 O 신호이다. 단일 당량비에 대해서 40회의 반복실험을 진행하였으며, 결과는 반복실험의 평균값으로 나타내었다. 레이저의 집광으로 처음 플라즈마가 발생한 순간, H 신호와 O 신호 모두 급격하게 신호의 세기가 상승하는 현상을 볼 수 있다. 이는 플라즈마 컨티뉴엄 방출의 영향이라고 할 수 있다. 플라즈마 컨티뉴엄 방출은 플라즈마 형성 초기에 광대역으로 발생하는 강한 빛의 방출로, 플라즈마 초기에 원자 신호를 구분할 수 없게 만드는 원인이 된다[7]. 기존의 LIBS 실험에서는 이러한 간섭을

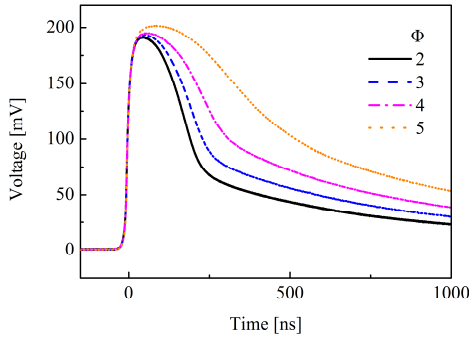


Fig. 3 H signal obtained with LIBS plug in various equivalence ratios.

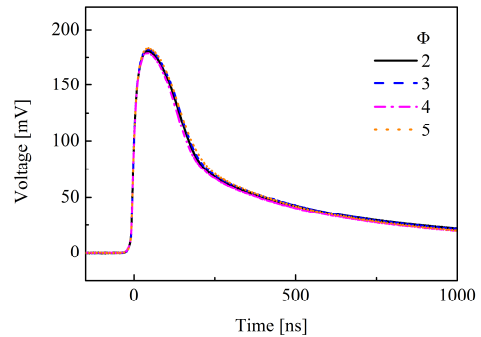


Fig. 4 O signal obtained with LIBS plug in various equivalence ratios.

최소화하기 위해 플라즈마 형성 이후 플라즈마 컨티뉴엄 방출이 크게 감소한 이후로 측정의 지연 시간을 설정하였다. LIBS plug의 신호는 포토 다이오드로 수집하기 때문에 매 순간에 대한 빛의 세기를 측정하므로 ICCD를 이용한 실험과는 다르게 지연 시간과 게이트 너비를 설정할 필요가 없다. 원자 신호의 분석을 위해서는 플라즈마 컨티뉴엄 방출의 영향이 줄어든 상태인 250 ns부터 1000 ns까지의 신호의 세기를 사용하였다. 또한 특정 지연 시간 이후로는 신호의 세기의 감소 기울기가 일정한 경향을 보였는데, 이는 측정 구간의 최소화 가능성을 제시한다. 특히, 측정과 동시에 플라즈마의 위치 변화가 존재하는 초음속 유동 내에서는 측정 오차를 줄이기 위해 측정 구간을 최소화할 필요가 있을 것으로 보인다. Fig. 3의 수소 신호는 당량비가 상승함에 따라 신호가 전체적으로 함께 상승하는 것을 확인할 수 있는 반면 Fig. 4의 산소 신호는 당량비가 상승하더라도 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 당량비 조절에 가솔린 연료의 유량을 조절하였기 때문이라고 할 수 있다.

3.2 연료-공기 혼합물에서의 LIBS plug

LIBS plug를 두 가지 연료-공기 혼합물 내에 적용하였다. 가솔린 연료를 사용한 경우 공기와 액체 상태의 연료가 혼합되었고 LPG 연료의 경우에는 연료 또한 기체 상태로 혼합되었다. 각각의 경우에서 LIBS plug를 적용하여 당량비에 따

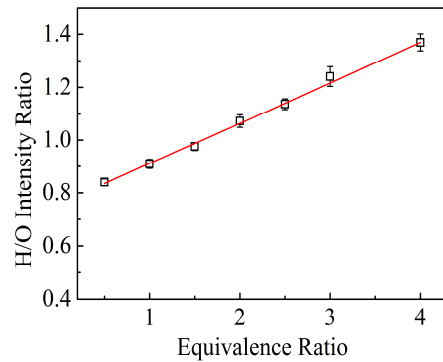


Fig. 5 Calibration curve between H/O intensity ratio and equivalence ratio of gasoline-air mixture.

른 캘리브레이션 커브를 구성할 수 있었으며, 이를 이용하여 분사되는 혼합물의 위치에 따른 당량비의 측정을 할 수 있었다. 본 연구는 상온, 상압 조건 내에서 진행되었다. LIBS는 온도와 압력의 변화에 영향을 받기 때문에 다른 조건의 환경을 분석하기 위해서는 추가적인 실험과 분석이 필요하다.

3.2.1 가솔린-공기 혼합물

수소와 산소의 250 ns부터 1000 ns까지의 신호의 세기의 평균값을 서로 나누어준 값인 H/O intensity ratio와 가솔린-공기 혼합물의 당량비 간의 캘리브레이션 커브가 Fig. 5에 나타난다. 당량비는 가솔린 연료의 유량을 조절하여 0.5에서 4까지 조성되었다. 상온, 상압 조건에서

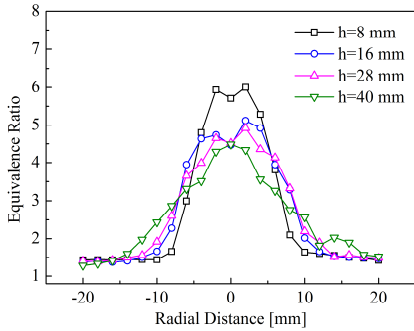


Fig. 6 Equivalence ratio of gasoline-air mixture in various locations.

당량비를 계산하였다. 실험 결과를 토대로 만든 피팅 곡선은 붉은 실선으로 표시되었으며, 결정 계수 (R^2)는 0.9959이다. 초음파 플레이트 분무기로 연료의 균일한 분포를 유도하였지만, 이상상태 유동의 특성으로 인한 각 당량비에서의 H/O 신호 비의 값의 변동 또한 존재하였다. 당량비가 높아질수록 연료의 분사량이 증가하여 상대적으로 균일하지 못한 유동이 형성되었으며, H/O 신호 비의 표준편차가 증가하는 현상을 볼 수 있었다. 표준편차는 각 평균값의 1.49%에서 2.97% 사이로 측정되었다.

이어서 가솔린 연료와 공기의 혼합물을 사이폰 노즐을 이용해 분사한 뒤 위치별로 H/O 신호 비를 측정된 뒤 캘리브레이션 커브를 토대로 해당 지점에서의 당량비를 추정하였다. 이 때 가솔린 연료의 유량은 10 mL/min으로, 공기의 유량은 10 L/min으로 고정되어 분사되었다. Fig. 6은 높이별, 노즐 중심에서부터의 반지름 길이별 당량비를 표시한 결과를 나타낸다. 높이가 높아질수록 중심 부분의 당량비가 낮아지면서 반지름 거리가 먼 부분의 당량비가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이를 토대로 스프레이 노즐의 분사 각도를 확인할 수 있다.

3.2.2 LPG - 공기 혼합물

위의 가솔린 - 공기 혼합물의 실험과 같은 절차로 실험을 진행하였다. 마찬가지로 250 ns부터 1000 ns까지의 신호를 사용하였으며, LPG - 공기

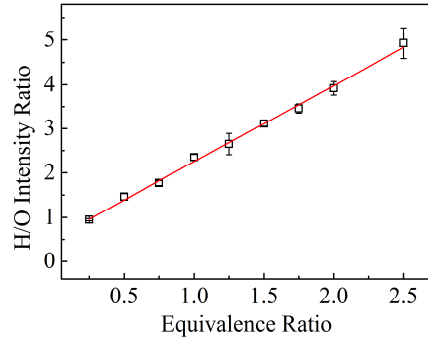


Fig. 7 Calibration curve between H/O intensity ratio and equivalence ratio of LPG-air mixture.

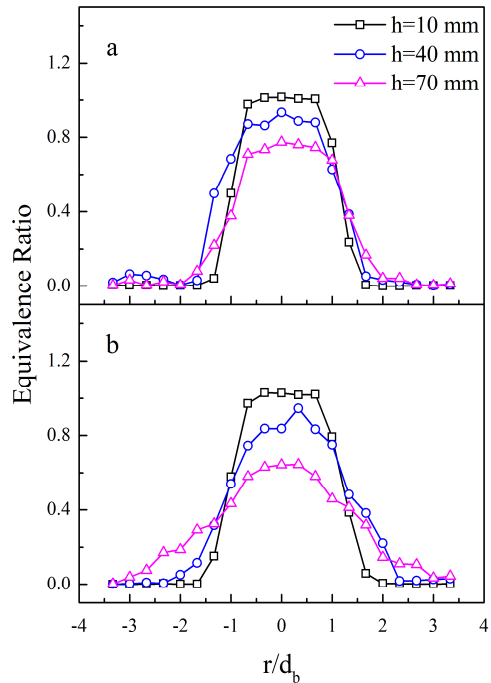


Fig. 8 Equivalence ratio of LPG-air mixture in various points locations. (a) 200 mL/min of LPG and 5 L/min of air (b) 600 mL/min of LPG and 15 L/min of air.

혼합물의 캘리브레이션 커브를 Fig. 7에 표시하였다. 단, LPG - 공기 혼합물의 당량비는 공기 유량을 조절하여 0.25에서 2.5까지 조성되었다. 이 때의 피팅 곡선의 결정 계수 (R^2)는 0.9971로 가솔린 - 공기 혼합물의 경우보다 더 정확한 결

과를 얻을 수 있었다. 이는 LPG - 공기 혼합물의 경우 단일 기체 상태이기 때문에 연료가 비교적 균일하게 분포되었기 때문인 것으로 보이며, 같은 이유로 H/O 신호 비의 변동 또한 작은 비율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

분젠 버너에서 LPG - 공기 혼합물의 높이별, 위치별 당량비를 측정하는 실험이 이어서 진행되었다. 이 실험은 연료와 공기의 같은 혼합 비율에서 유동의 부피, 즉 유동의 속도를 변수로 하여 두 개의 실험 결과를 작성하였으며 각각의 결과를 비교할 수 있었다. 첫 번째 실험은 200 mL/min의 LPG 가스와 5 L/min의 공기 유량을, 두 번째 실험은 600 mL/min의 LPG 가스와 15 L/min의 공기 유량을 사용하였다. Fig. 8에서 버너 위 10 mm, 40 mm, 70 mm 높이에서의 각 반지름 거리의 당량비의 측정 결과를 확인할 수 있다. 두 실험 모두에서 높이가 높아질수록 중심 부분 당량비는 떨어지면서 반지름 거리가 먼 곳의 당량비가 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 유속이 더 빠른 경우에 더 빠르게 퍼져나가는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 연소실 내에 장착을 목표로 하는 소형화 LIBS 장비를 설계 및 제작하였다. 렌즈, 밴드패스 필터와 포토다이오드로 구성된 이 LIBS plug는 레이저 유도 플라즈마에서 수소와 산소의 원자 신호의 세기를 측정할 수 있는 장치이며, 이 신호의 세기의 비인 H/O 세기 비와 당량비 간의 캘리브레이션 커브를 액체 상태인 연료(가솔린)와 기체 상태인 연료(LPG) 모두에서 구성할 수 있었다. 또한 스프레이로 분사된 연료-공기 혼합물과 분젠 버너에서의 연료-공기 혼합물에 대해 위치별 H/O 세기 비를 측정하였으며, 캘리브레이션 커브를 이용하여 해당 위치에서의 당량비를 추정할 수 있었다. 기존의 LIBS 신호와 당량비 간의 관계를 밝히는데 중점을 가졌던 연구들은 실제 유동의 측정에는 적용하기 힘들다는 단점을 가지고 있었다. 본 연구는 LIBS

이론을 이용하여 최소한의 구성 요소만으로 연소실 내에 적용할 수 있는 당량비 측정 장비를 개발하였다는 데에 의미가 있다. 이상상태 유동과 단일 기체상태 유동에서의 실험 결과를 제시하였으나, 두 가지 경우 모두 상온, 상압 조건에서 실험을 진행하였기 때문에 LIBS plug의 다양한 환경에서의 적용 가능성을 파악하기 위해서는 다른 조건에서의 추가적인 실험과 분석이 필요하다.

References

1. Tavoularis, S., *Measurement in Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, New York, N.Y., U.S.A., 2005.
2. Pitz, R.W., Grady, N.R., Shopoff, S.W., Hu, S. and Carter, C.D., "UV Raman scattering measurements of a Mach 2 reacting flow over a piloted cavity," *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 2008-244, Jan. 2008.
3. Gruber, M.R., Baurle, R.A., Mathur, T. and Hsy, K.Y., "Fundamental studies of cavity-based flameholder concepts for supersonic combustors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 1, pp. 146-153, 2001.
4. Stavropoulos, P., Michalakou, A., Skevis, G. and Couris, S., "Quantitative local equivalence ratio determination in laminar premixed methane-air flames by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS)," *Chemical Physics Letters*, Vol. 404, No. 4, pp. 309-314, 2005.
5. Keifer, J., Tröger, J.W., Li, S. and Aldén, M., "Laser-induced plasma in methane and dimethyl ether for flame ignition and combustion diagnostics," *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol. 103, No. 1, pp. 229-236, 2011.

-
6. Lee, S.H., Do, H. and Yoh, J.J., "Simultaneous optical ignition and spectroscopy of a two-phase spray flame," *Combustion and Flame*, Vol. 144, pp. 334-345, 2016.
 7. Miziolek, A.W., Palleschi, V. and Schechter I., *Laser-induced breakdown spectroscopy*, Cambridge University Press, New York, N.Y., U.S.A., 2006.