

이상상태 분무 화염에서의 레이저 점화 및 분광 측정을 통한 피드백 제어 연구

이석환* · 김현우** · 도형록* · 여재익†

Simultaneous optical ignition and spectroscopy of a two-phase spray flame for feedback control System

Seok Hwan Lee* · Hyunwoo Kim** · Hyungrok Do** · Jack J.Yoh†

ABSTRACT

Simultaneous laser ignition and spectroscopy is a scheme that enables rapid determination of the local equivalence ratio and condensed fuel concentration during a reaction in a two phase spray flame. We have conducted quantitative analysis of the LIBS signals according to the equivalence ratio, droplet size, droplet number density and droplet concentration as a part of novel feedback control strategy proposed for flame ignition and stabilization with simultaneous in situ combustion flow diagnostics. This is a desirable scheme since such real time information onboard an engine for instance can be constantly monitored and fed back to the control loop to enhance the mixing process and minimize emissions of unwanted species and potential combustion instability.

Key Words : spray, laser induced plasma spectroscopy, ignition, droplet

분무(spray) 화염에서 당량비(equivalence ratio)와 액적의 크기 및 분포 등의 특성은 연소 효율과 화염의 안정성을 결정하는 중요한 파라미터이다[1]. 이러한 당량비와 액적의 특성을 측정하기 위해서 레이저 기반의 다양한 기법이 사용되었다. 레이저 유도 형광(Laser Induced Fluorescence, LIF) 기법과 라만 산란(Raman scattering)을 사용하여 당량비를 측정하는 연구가 수행되었다. 또한 스파크 유도 분광 분석(Spark-Induced breakdown spectroscopy, SIBS)이라는 점화 플러그에서 발생하는 스파크의 빛을 분광하여 당량비를 측정하는 기법이 개발되었다[2]. 하지만, 라만 산란 기법은 그 신호의 세기가 작고 형광신호의 방해로 인해서 측정에 어려움이 있다. 또한 SIBS는 점화스파크의 위치에 따라 측정위치가 제한적인 한계가 있다. 액적의 크기 및 분포는 레이저 회절(laser diffraction)을 기반으로 하는 기법과 레이저 산란(laser scattering)을 사용하는 기법이 사용되고 있다. 하지만 측정 장치의 복잡함으로 인해서 더 간단하고 정교한 기법이 필요한 상황이다.

레이저 유도 분광 분석법(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)은 강한 신호의 세기 및 장치의 간단함으로 인해서 연소 측정에 많은 가능성을 가지고 있다. LIBS는 강한 에너지의 레이저를 한 곳에 집중하여 플라즈마(plasma)를 발생시켜 그때 발생하는 빛을 측정하여 물질의 화학적 조성을 얻는 기법이다. LIBS를 이용하여서 배기가스에서의 금속 미세 입자를 측정하는 연구와 당량비 및 연료의 농도[3]를 측정하는 연구, 화염의 온도를 측정하는 연구가 수행되었다. 또한 레이저 점화(laser ignition)과 분광을 동시에 수행하여서 점화와 동시에 연료의 양을 측정하는 연구가 수행되었다[4]. 하지만 이러한 LIBS 연구는 대부분 가스 연료를 사용하는 화염을 측정하는 연구가 이루어지고 가솔린(gasoline)이나 디젤(diesel)과 같은 액체 연료의 화염은 거의 연구가 되지 않았다. 액체 연료를 사용하는 분무에서의 액적과 플라즈마의 상호작용은 아주 복잡한 현상을 가지고 있기 때문에 아직 연구가 필요한 상황이다. 액체-기체 이상상태에서 레이저 플라즈마를 발생시키면 기체 상태에서는 볼 수 없었던 현상이 생겨서 플라즈마의 발생 위치가 변화되게 되고 플라즈마의 존재 시간(life time)이 증가하게 된다.

본 연구에서는 분무화염에서 레이저 점화와

* 한국표준과학연구원

** 서울대학교, 기계항공공학부

† 연락처, khw202@snu.ac.kr

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

동시에 LIBS를 통해 당량비와 액적의 특성을 측정하였다. 그리고 레이저와 액적의 상호작용을 분석하기 위해 정량적인 당량비와 액적의 농도를 측정하여 보정곡선을 얻었다. 그리고 하나의 레이저 펄스를 이용하여서 이상상태의 분무에서 레이저 점화와 분광신호를 동시에 얻어 연소의 성질을 최적화 할 수 있는 피드백 제어 시스템을 구체화 하여 제시하였다.

실험방법

그림 1은 분무 화염의 레이저 점화와 LIBS의 실험 셋업을 보여준다. 가솔린(C_8H_{18}) 액적이 공기와 함께 섞여서 사이폰 노즐(siphon nozzle)을 통하여 분사되었다. 노즐끝단에서의 액적의 지름은 20~50 μm 이고 가솔린의 유량은 10 ml/min, 공기의 유량은 10 L/min으로 고정하였다. 레이저 점화와 LIBS 분석을 위해서 1064 nm 파장에 5 ns 펄스 폭을 갖는 Nd:YAG 레이저(Continuum, Surelite I)이 사용되었다. 100 mJ의 에너지를 갖는 레이저 빔을 100 mm 초점거리를 갖는 렌즈를 통과 시켜서 플라즈마를 발생시키고 발생된 플라즈마의 빛은 렌즈로 수집하여 분광기(Andor Mechelle 5000)를 거쳐 ICCD(Andor iStar)로 촬영하였다. 촬영 시 사용된 레이저 조사 후 ICCD 노출 까지 지연시간은 1 μs 이고 50 μs 동안 ICCD를 노출시켜 촬영하였다. 액적의 크기 및 분포는 쉐도우 그래프(shadow graph)로 측정하여 영상처리를 통하여 얻었다.

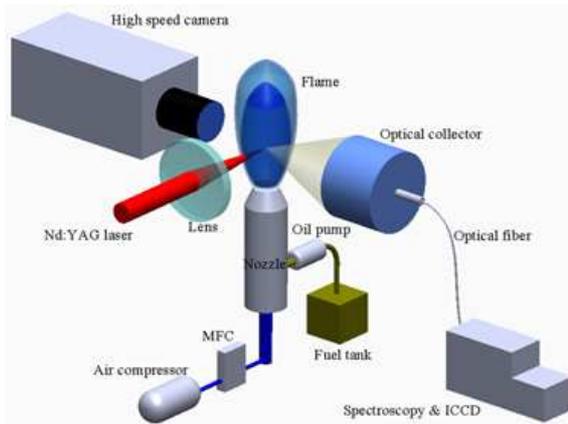


Fig. 1 Experimental setup.

레이저 점화 결과

먼저, 레이저 에너지와 액적의 크기를 변화시키면서 레이저 유도 플라즈마를 액적흐름에 발생시켰다. 세라믹 판으로 이루어져 있고 1.65MHz의 진동수를 갖는 네블라이저(Nebulizer)를 통해 일정한 크기의 액적을 발생시켰다. 그리고 이 액적들을 번센 버너(Bunsen Burner)로 보내졌다. 네블라이저로 보내지는 주

사기 펌프의 연료 유량은 3mL/min이다. 이렇게 아주 작은 가솔린의 액적은 네블라이저와 공기 건조 통로(drying channel)를 통해 만들어진다. 액적의 크기는 건조 통로를 통과하는 공기의 유량에 따라 바꿀 수 있다. 그리고 번센버너를 통과하는 연료의 레이놀즈 수는 500에서 2500의 크기를 가졌으며 속도는 0.5 m/s에서 4 m/s로 변화시켰다.

그림 2는 100 mJ의 에너지를 갖는 레이저를 스프레이에 조사 후 4개의 다른 시간에서 공기와 가솔린 액적에서 발생된 플라즈마의 모습을 보여준다. 레이저는 그림에서 오른쪽에서 왼쪽 방향으로 조사되었다. 플라즈마로부터 생긴 충격파는 가로방향과 세로방향으로 전파되었다. 각 경우의 플라즈마와 충격파의 모습은 전혀 다르게 발생하였다. 가솔린 액적에서 발생된 플라즈마가 공기에서 발생된 플라즈마 보다 가로 방향(레이저 조사 방향)으로 더 긴 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 액적이 레이저를 흡수하여서 흡수된 곳으로 플라즈마가 더 빠르게 전파되었기 때문이다.

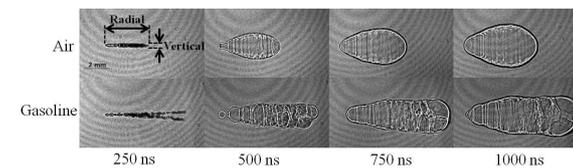


Fig. 2 Plasma images at four different times(200 ns, 500 ns, 750 ns and 1000 ns) in air and gasoline droplet stream.

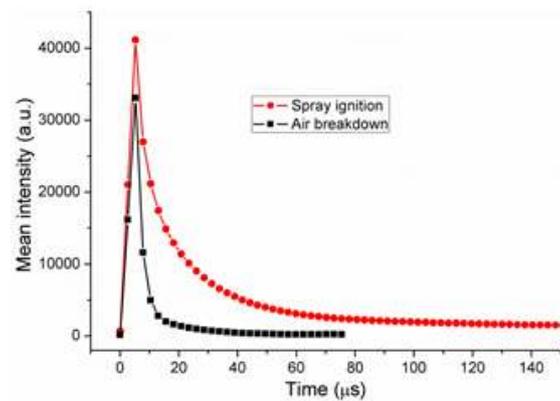


Fig. 3 The mean intensity of high speed images for air breakdown and spray ignition

그림 3은 공기의 붕괴와 스프레이의 점화를 고속카메라로 촬영하였을 때 발생한 방출 강도를 비교한 그래프이다. 방출 강도는 5장의 그림을 평균 내어 계산하였다. 공기 붕괴의 방출 강도는 약 10 μs 안에 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있다. 그 이후에는 방출 강도가 천천히 감소하

다가 대략 30 μ s이후에는 0에 수렴한다. 스프레이 점화의 방출 강도는 기하급수적으로 감소한다. 플라즈마 빛의 강도는 빠르게 감소하고 플라즈마가 화염핵으로 변하는 과정이 발생한다. 화학적 자발광은 연소 활성기로부터 화염핵 안에서 발생한다. 따라서 스프레이 점화의 방출 강도는 약 150 μ s까지 길게 지속되는 것이다. 이러한 경향성은 선행연구들과 비슷한 형태를 띄지만 액체 연료 액적에서 생긴 플라즈마가 화염핵으로 변화하는 연구는 처음으로 시도되었다. 가솔린 연료의 액적 크기는 연료의 휘발성 때문에 쉽게 감소한다. 그래서 방출 강도는 초기 화염핵에서 높게 나오고 가솔린의 높은 가연성 때문에 그 강도는 오랫동안 지속된다.

LIBS 결과

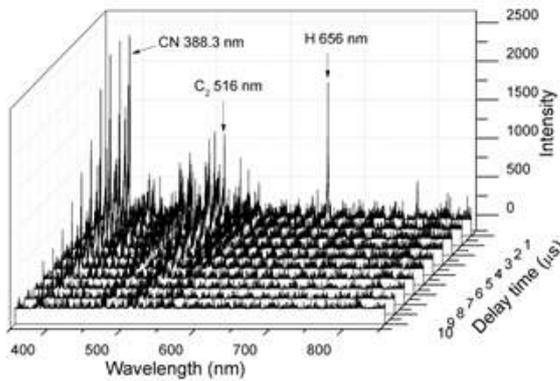


Fig. 4 Ensemble of the LIBS spectra according to delay time in spray after 1 μ s

레이저 점화와 동시에 당량비 및 액적의 농도를 측정하기 위해서 발생된 플라즈마로부터 분광신호를 측정하였다. 그림 4는 스프레이에서 1 μ s 이후 LIBS 분광 신호를 나타낸 것이다. 그림 7에서는 노출시간을 1 μ s으로 지정하였다. H 신호는 가솔린 연료로부터 나온 것이고 O 신호는 공기의 붕괴(breakdown)로 인해 발생한 것이다. 원자 신호들은(H와 O) 1 μ s안에 빠르게 감소하는 반면 분자 신호인 CN과 C2신호는 레이저 조사 후 1 μ s 지난 후에 발생한다. 이 분자 신호들은 플라즈마가 냉각되는 과정에서 이온화된 원자들이 재결합하면서 생겨난 것이다. 이는 알려지지 않은 물질에 포함되어 있는 탄소량을 결정하는데 사용될 수 있다.

그림 5(a)와 (b)는 각각 당량비에 대한 H/O LIBS 신호 세기 비와 액체 연료의 부피비의 세제곱근에 대한 C2/base LIBS 신호 세기의 비를 나타낸다. 이 그래프 모두 각각 당량비와 액체 연료의 부피비의 세제곱근에 대해서 직선형의 LIBS 신호 값을 나타낸다. 액체 연료의 부피는

연료의 수적밀도와 액적 부피를 곱해서 계산하였다. 그 다음 액체 연료의 부피는 플라즈마 체적인 0.0108mm³로 나누었다. 이 보정 곡선을 이용하여서 정량적인 당량비와 액체 연료의 부피비를 얻을 수 있다. 이러한 실험 결과들은 점화와 동시에 플라즈마에서 발생한 분광신호를 가지고 연료의 특성을 알 수 있다는 것을 나타낸다.

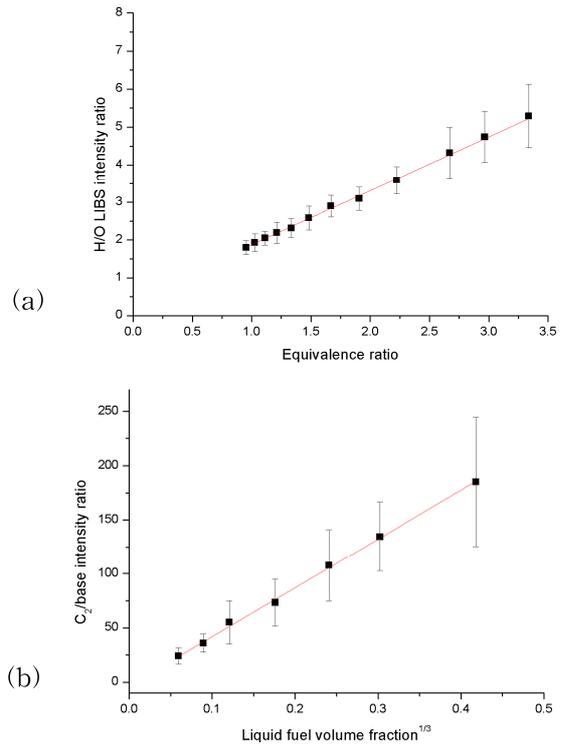


Fig. 5 Calibration curves (a) H/O ratio according to the equivalence ratio and (b) C2/base intensity ratio according to the cube root of liquid fuel volume fraction.

그림 6은 레이저를 통해 얻은 분광신호들을 이용하여 최적의 연소상태를 만들 수 있는 피드백 시스템의 흐름도를 나타낸 것이다. 먼저 레이저를 점화시키면 분광신호가 검출되고 앞에서 구한 보정곡선을 이용하여 연료의 당량비와 액적의 특성을 구할 수 있다. 우리가 스프레이를 연소시킬 때 최적의 상태를 갖는 당량비와 액적 특성들을 앞에서 구한 값들과 비교한 뒤 그 결과를 피드백하여 유량들을 조절한다. 이러한 피드백 루프는 원하는 당량비와 액적 특성이 나올 때까지 계속 반복한다. 연료의 유량을 이용하여 당량비를 결정하고 결정된 당량비를 고정된 뒤 연료와 공기의 전체 유량을 조절하여 액적의 특성을 결정한다. 그렇기 때문에 피드백 시스템에서 당량비를 먼저 피드백하여 원하는 당량비를 갖는 연료상태를 만든 뒤 당량비를 고정하여 전

체유량을 변화시켜 액적의 특성들을 변화시켜 최적의 연소상태를 만든다.

분무화염에서 당량비와 액체연료의 특성은 점화의 성질과 화염의 안정성 및 배기가스를 결정한다. 그러므로 본 연구에서는 하나의 레이저 펄스로 점화 및 LIBS를 활용한 연소진단을 통해 연료분사시의 중요한 파라미터들을 실시간으로 제어할 수 있는 피드백 시스템을 구축할 수 있음을 확인하였다. 이 피드백 시스템은 자동차 엔진 및 다양한 엔진에서 최적의 연소상태를 유지할 수 있는 도구로 사용될 수 있을 것이다.

[3] S. H. Lee, H. T. Hahn, J. J. Yoh, "Towards a two-dimensional laser induced breakdown spectroscopy mapping of liquefied petroleum gas and electrolytic oxy-hydrogen flames", *Spectrochim. Acta B*, Vol. 88, 2013, pp. 63-68.

[4] T. X. Phuoc, "Laser-induced spark for simultaneous ignition and fuel-to-air ratio measurements", *Opt. Laser Eng.*, Vol. 44, 2006, pp. 520-534.

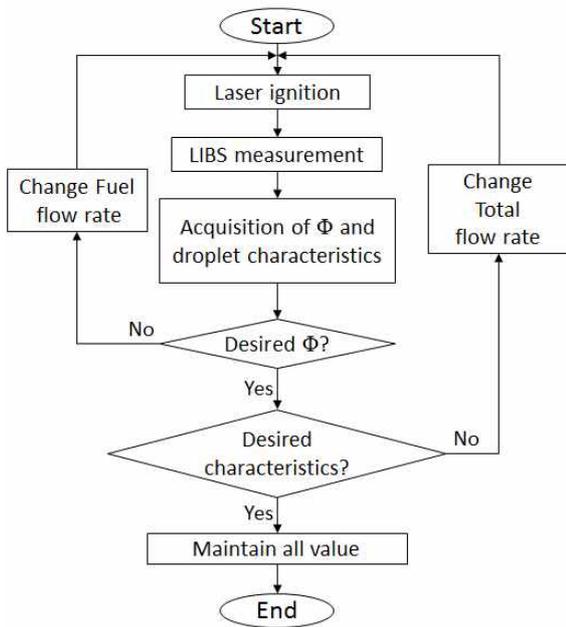


Fig. 6 Flow chart of the feedback control system

후 기

본 연구는 한국 연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NRF-2014M1A3A3A02034903)로부터 지원을 받아 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] C. C. Rasmussen, J. F. Driscoll, C. D. Carter, K.-Y. Hsu, "Characteristics of cavity-stabilized flames in a supersonic flow", *J. Propul. Power*, Vol. 21, 2005, pp. 765-768.
- [2] M. K. Roy, N. Kawahara, E. Tomita, T. Fujitani, "Jet-guided combustion characteristics and local fuel concentration measurements in a hydrogen direct-induction spark-ignition engine", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 34, 2013, pp. 2977-2984.