

# 불꽃점화 구형분무화염에서 고공간 분해능을 가진 집광프로브의 응용

양 영 준

동아대학교 기계공학과

(2004. 5. 18. 접수 / 2004. 8. 10. 채택)

## Application of Light Collecting Probe with High Spatial Resolution to Spark-Ignited Spherical Spray Flames

Young-Joon Yang

Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

(Received May 18, 2004 / Accepted August 10, 2004)

**Abstract :** In order to obtain the flame propagation speed in freely falling droplet suspension produced by an ultrasonic atomizer, a light collecting probe named Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics (MICRO) is applied to spark-ignited spherical spray flames. Two MICRO probes are used to monitor time-series signals of OH chemiluminescence from two different locations in the flame. The flame propagation speed is calculated by detecting the arrival time difference of the propagating flame front. In addition, time-series images of OH chemiluminescence are simultaneously obtained by a high-speed digital CCD camera to ensure the validity of the MICRO system. Furthermore, relationship between the spray properties measured by phase Doppler anemometer (PDA) and the flame propagation speed are discussed with three different experimental conditions by changing the fuel injection rate. It was confirmed that the MICRO probe system was very useful and convenient to obtain the flame propagation speed and that the flame propagation speed was different depending on the spray properties.

**Key Words :** light collecting probe, chemiluminescence, spray combustion, flame propagation speed

### 1. 서 론

액체연료 분무화염은 불균일 이상류 (two-phase flow)이므로 근본적으로 복잡한 천이구조를 가지고 있다. 수밀도, 액적크기, 액적속도와 같은 분무특성의 불균일성 (inhomogeneity)은 다양한 연소현상을 일으키는 난류반응의 결과로 더욱 연소현상을 복잡하게 만드는 요인이 된다. Continillo et al. 등<sup>1-5)</sup>에 의해 분무화염에는 확산적인 연소현상뿐만 아니라 예혼합적인 거동 또한 관측되어진다고 보고 되어지고 있다. Akamatsu et al.<sup>6)</sup>은 분무류에서 화염전파 메커니즘과 화염구조를 관찰하기 위하여 자유낙하하는 액체에 대한 기초적인 실험을 하였다. 그 결과 액적간에 의존하는 연소하기 쉬운 연료중기 성분이 나 미소액적 영역중을 비휘염이 선택적으로 전파하

고 그 배후에는 액적 클러스터가 확산연소 형태로 랜덤하게 출현하는 것을 나타내었다.

본 실험은 Akamatsu et al.<sup>6)</sup>의 기초실험을 토대로 하여 자유낙하 분무중에 불꽃점화에 의해 구형화염을 형성시켜 시간연속적으로 화염전파 거동을 상세하게 관찰하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 multi-color integrated receiving optics (MICRO) (Akamatsu et al.<sup>7)</sup>)라 명명한 2대의 집광프로브를 불꽃점화기에 대해 수직 상방향으로 각기 다른 2곳에 설치하여 OH라디칼 자발광의 동시 측정을 하였다. 2대의 MICRO프로브에 의한 각각의 자발광신호가 검출되기 시작하는 시간차를 구하여 화염전파속도를 도출하고, 또한 MICRO프로브와 동시 측정한 고속도 CCD카메라에 의해 OH라디칼 자발광의 시계열 화상을 촬영하였다. PDA에 의해 측정된 분무특성과 화염전파속도와의 관계가 3개의 다른 연료주입율 조건을 이용하여 조사하였다. 2대의 MICRO프로브

을 이용하여 화염전파속도를 도출하는 방법은 매우 유용하고 또한 화염전파속도는 분무의 특성에 따라 다른 의존 형태를 보인다는 것이 확인되었다.

## 2. 실험 장치

Fig. 1은 본실험에서 이용한 실험장치 및 광학계를 나타낸다. 외란의 영향을 방지하기 위해 수직 사각형 덕트 (280×280×1325mm, 상하단 개방형)의 상단 중앙에 자기 변형형 (magnetostriction-type) 진동자를 갖는 초음파분무기 (resonance frequency : 18.5 kHz)가 설치되었다. 액체연료 (백등유)는 미세주입이 가능한 펌프 (Fugawa science, JPV-W)에 의해 분무기에 공급되어진다. 분무기에서 미립화 되어진 액체연료는 자유낙하하면서 주위공기와 혼합하여 분무기로부터 400mm 밑에 설치된 전극간극 4mm의 전기 점화기 (방전시간 20ms)에 의해 점화되어진다. 실험은 공급연료 유량이 4.4, 6.3, 11.0cm<sup>3</sup>/min의 각각의 조건에 대해 약 100회씩 반복하여 각 조건에서의 화염전파속도를 비교하였다. 화염에서 국소적인 OH 라디칼 자발광을 검출하기 위해서 multi-color integrated cassegrain receiving optics (MICRO)로 명명한 2대의 집광프로브를 이용했다.

Fig. 2에 MICRO 프로브 내부구조를 나타낸다. 이것은 오목거울 (concave mirror) 및 볼록거울 (convex mirror)과 광파이버 (Mitsubishi Densen Co. Ltd., ST-U200D-SY, NA : 0.2, core diameter : 200 μm)로 구성되어 있고 종래의 단렌즈계 광학계에서 문제

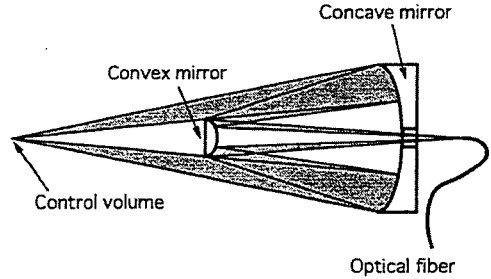


Fig. 2. configuration of the multi-color integrated cassegrain receiving optics (MICRO).

시되는 색수차 문제를 해소하고 구면수차를 최대한 억제하는 최적화 설계가 되어져 있다. 이 시스템의 집광율분포 특성은 Akamatsu et al.<sup>7)</sup>에 의한 광선추적법 (ray-tracing method)에 의하면 유효측정체적이 MICRO의 광축에 대해 길이 1.6mm, 직경 200 μm인 것으로 평가되었다.

Fig. 3은 파장분리 및 검출부를 나타낸다. 파장분리부에서는 파이버 끝단으로부터 사출된 광이 collimating lens (Mitsubishi Densen Co. Ltd. D-95HL-SF, f: 10mm)에 의해 평행광으로 되어 광간섭 필터 (peak wavelength : 308.5nm, half-value width : 18nm)를 통과한 후, 광전자 증배관 (photomultiplier, Hamamatsu, R106UH)에 의해 OH 자발광신호가 검출되어진다. 광전자 증배관으로부터의 출력신호는 I/V변환기 (NF electronic instrument, Model LI-76)에 의해 전압신호로 변환되고, 자작의 V/V앰프에서 증폭되어진

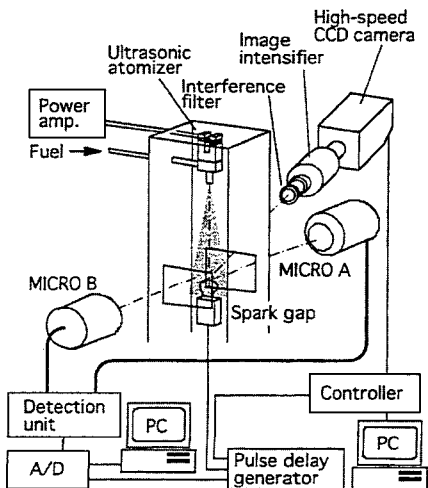


Fig. 1. Experimental apparatus.

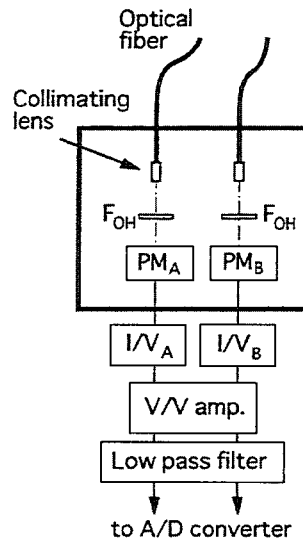


Fig. 3. Configuration of detection unit of the MICRO system.

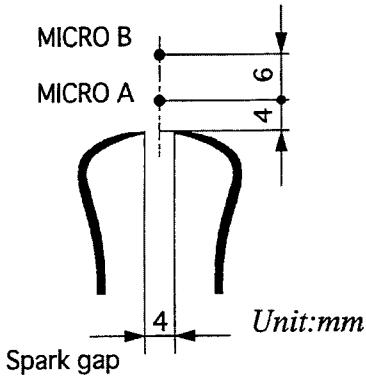


Fig. 4. Arrangement of measurement locations of two MICRO probes and the spark gap.

후 로우패스 필터 (low pass filter, NF electronic, FV-665, cut off frequency : 5kHz)에서 고주파 노이즈를 제거한 후 A/D컨버터 (Elmec, EC-2390)에 의해 12 bit의 디지털 기록되어 컴퓨터 (NEC, PC9801-VX)에 저장된다.

Fig. 4는 2대의 MICRO프로브의 각각의 초점위치와 전극간극의 공간적 배치를 나타낸다. MICRO A는 전극간극 중앙의 상방향 4mm, MICRO B는 그 상방향 6mm의 지점에 초점위치가 오도록 설치되었다. 분무화염의 전개과정을 관찰하기 위해 2대의 MICRO프로브와 고속도 CCD카메라 (Kodak, EKTAPRO HS 4540)를 동시 계측하여 고속도 CCD카메라로부터 OH자발광신호의 시계열 화상을 촬영하였다. 고속도 CCD카메라를 이용한 OH 자발광 화상 데이터는 광간섭필터 (peak wavelength : 308.5 nm, half-value width : 18nm)와 image intensifier (Hamamatsu, C4273)를 지난 후 유효 화소수 256×256 pixels로 기록되어진다. Pulse delay generator (Stanford Research Systems, WC Model DG535)가 스파크 방전과 각 측정 장치들을 동기 시키기 위해 사용되어진다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. MICRO프로브 시스템의 성능평가

MICRO프로브를 분무화염에 적용하기 이전에 MICRO시스템의 성능에 대한 실험적 검증을 먼저 하였다. MICRO의 유효측정체적은 광선추적법에 의한 결과에 따르면 길이 1.6mm, 직경 200 μm이지만, 유효측정체적 이외의 곳으로부터의 신호도 검출되어질 만큼 고감도로 설계되어졌기 때문에 유효측정체적 이외의 곳으로부터 신호도 검출되어질 가능성

이 있다. 따라서 MICRO프로브 시스템에 의한 OH라디칼 자발광과 정전탐침 (electro-static probe or 이온 프로브, Pt-Pt13%Rh, diameter : 100 μm, length : 1mm)에 의한 이온전류를 난류 예혼합가스 분젠 화염에 대해 동시 측정하였다.

Fig. 5는 화염의 직접 사진을 나타낸다. 버너 포트는 내경 11.4mm이고 그림내의 +표시는 버너포트 상방향으로 50mm이며 MICRO 및 이온 프로브의 동일 측정점을 나타낸다.

Fig. 6은 이온전류 신호와 MICRO에 의해 검출된 OH라디칼 자발광신호의 동시 시계열 계측 결과를 나타낸다. 이 결과로 MICRO에 의한 OH라디칼 자발광신호는 이온전류 신호와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. MICRO프로브의 유효측정체적 이외의 곳으로부터 집광되어진 신호는 무시할 수 있는 정도라는 것을 알 수 있다. 따라서 MICRO프로브 시스템은 유동장을 교란시키지 않고 국소적인 연소 현상을 관측할 수 있는 충분한 고공간 분해능을 갖고 있다고 할 수 있다.

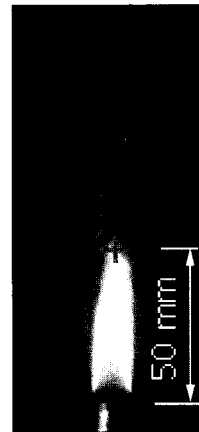


Fig. 5. A direct photograph of the premixed Bunsen flame with the measurement point of both the MICRO system and the electro-static probe.

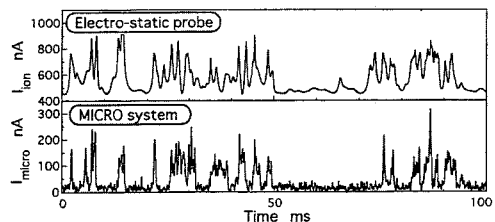


Fig. 6. Time-series signals of OH radical chemiluminescence obtained by the MICRO system and ion current detected by the electro-static probe.

3.2. 구형 분무화염의 전개 과정에 대한 관찰

Fig. 7은 고속도 CCD카메라에 의한 OH 라디칼 자발광 연속상과 2대의 MICRO에 의해 검출된 OH 라디칼 자발광신호 ( $I_{OH}$ )의 동시 시계열 계측 결과를 나타낸다. 화상내 +표시는 각각 2대의 MICRO의 측정위치를 나타낸다 (상 : MICRO B, 하 : MICRO A). 촬영된 OH라디칼 자발광 연속상으로부터  $t=3.3ms$  (화상 B)에 전극간격간의 방전이 확인되어진다. 방전 후 착화가 일어나고 구형화염이 형성되어 천천히 성장해 간다. 구형화염의 전파속도를 도출하기 위해 인접하는 2지점으로부터의 OH라디칼 자발광신호를 관측하면,  $t=10.4ms$  (화상 C)에 OH라디칼 자발광신호가 검출되어지기 시작하는 것을 알 수 있다. 이때 동시에 촬영되어진 화상 C는 구형 화염이 MICRO A의 측정위치를 통과하려 하고 있고, 화상과 국소 발광 계측이 잘 대응하고 있는 것을 알 수 있다. 또한  $t=47.7ms$  (화상 G)에 MICRO B에 의한 OH라디칼 자발광 신호가 검출되기 시작하여 이때 MICRO B의 측정위치를 화염이 통과해 가고 있는 모양이 화상으로부터도 확인되어진다. 이것으로부터 자유낙하 분무중을 화염이 전파할때 MICRO A와 MICRO B의 각각의 OH라디칼 자발광의 검출 시간차를 구하면  $\Delta t=37.3ms$ 가 된다. MICRO A와 MICRO B의 측정위치의 간격  $L$ 는 6.0 mm이므로 화염전파속도  $V$ 는 식 (1)에 의해 0.16 m/s가 된다.

$$V = L / \Delta t \tag{1}$$

이 실험은 분무연소는 이상류이며 시간적·공간적으로 불균일하다는 것을 고려하여 같은 점화실험을 각각의 실험조건에 대해 약 100회씩 행하여 화염전파속도의 통계적 도출을 시도하였다. Fig. 8은 점화실험에 의해 구해진 화염전파속도  $V$ 의 확률분포를 나타낸다. 3개의 조건에 대한 화염전파속도의 평균치  $\bar{V}$ 는 0.26m/s와 0.29m/s 범위에 있는 것을 알 수 있다. 반면 변동치  $V'$ 는 연료주입율의 증가에 따라 조금씩 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 연료주입율의 증가에 따라 분무의 불균일성이 증가하기 때문이라고 생각되어진다. 액적은 자유낙하하고 있으므로 이를 고려한 실제의 수정 화염전파속도  $V_c$ 가 도출되어야 한다. 또한 분무특성은 화염 구조와 직접적으로 연관되어 있으므로 평균직경, 입경분포, 수밀도등을 조사할 필요가 있다.

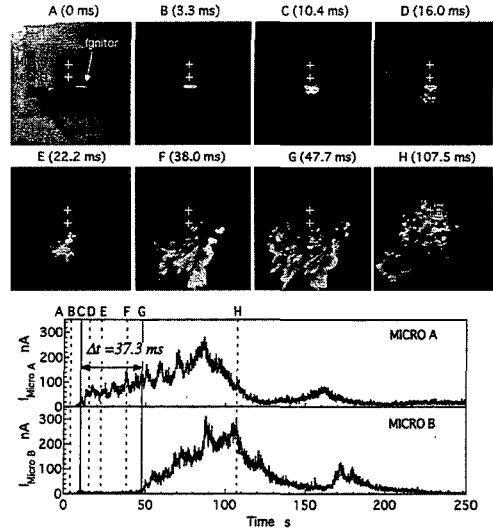


Fig. 7. Time-series date of OH chemiluminescence images recorded by the high speed CCD camera and local OH chemiluminescence monitored by the two MICRO systems.

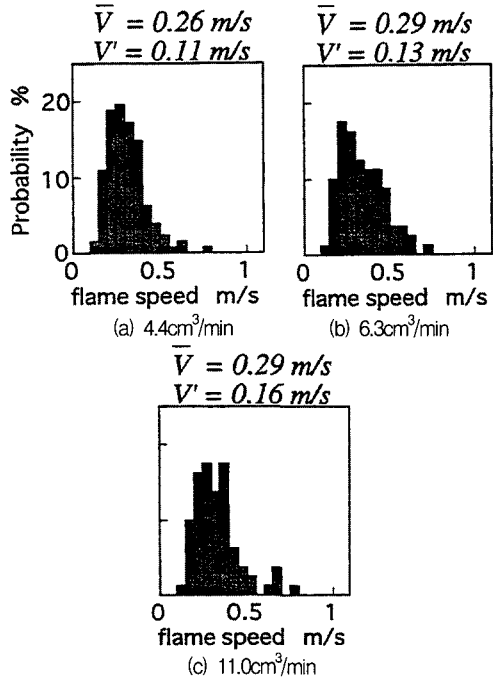


Fig. 8. Probability distribution of the flame propagation speed.

Fig. 9는 각각의 연료공급조건에 대해 위상 도플러유속계 (phase doppler anemometry)를 이용한 자유낙하 분무류중의 액적입경 및 낙하속도의 계측 결과를 나타낸다. PDA의 측정위치는 2대의 MICRO

프로브의 초점위치의 중간 즉 스파크 간극 상방향으로 7mm 지점에 설치했다. 3개의 다른 조건에 대해 자유낙하 액적의 액적크기 분포가, sauter 평균직경 ( $D_{32}$ ), 평균속도 ( $\bar{U}$ ), RMS 속도 ( $U'$ )와 함께 나열되었다. Sauter평균직경, 평균속도와 RMS속도는 액적주입율에 따라 증가하고 있는 것을 나타내고 있다. 수정된 실제 화염전파속도  $V_c$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$V_c = V + \bar{U} \quad (2)$$

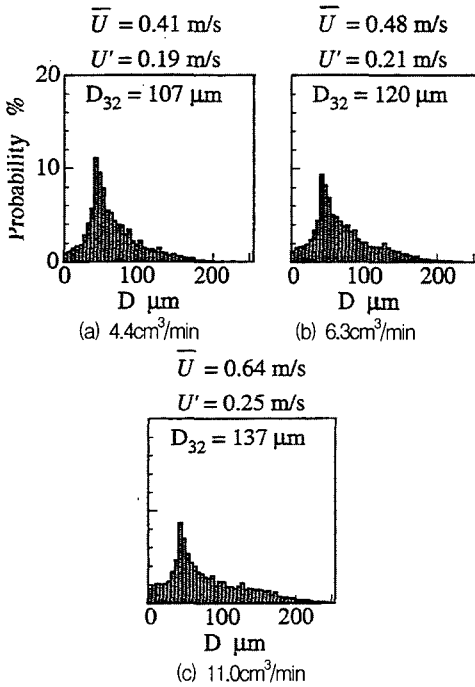


Fig. 9. Size distribution of the droplet suspension at the three different fuel injection rate.

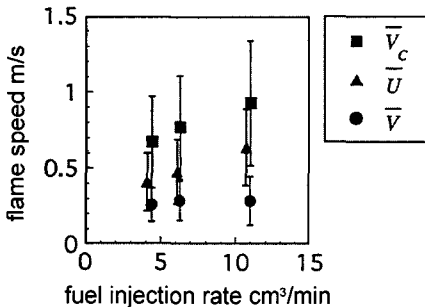


Fig. 10. Variation of actual flame propagation speed at the three different fuel injection rate.

Fig. 10은 3개의 실험조건에 대해서 Fig. 9에 나타난 자유낙하 액적의 평균속도  $\bar{U}$ 와, Fig. 8에 나타난 화염전파속도  $\bar{V}$ 를 고려한 수정된 화염전파속도  $\bar{V}_c$ 의 변화를 나타낸다. 기호  $\bullet$ 는 평균치를 선분길이는 RMS값을 나타낸다. 실제 수정된 화염전파속도는 연료주입율에 따라 점진적으로 증가함을 보인다. 연료주입율의 증가는 작은 액적의 질량을 증가시키고 이것은 큰 액적에 비해 작은 액적의 증발율이 증가된 데에 기인하며, 이는 화염전파에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

분무연소 시스템에서 화염전파속도를 측정하기 위하여 multi-color integrated receiving optics (MICRO)라 명명한 2대의 집광프로브가 구형분무화염에 적용되었다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) MICRO프로브의 성능을 이온프로브와 비교함으로써 실험적인 검증을 하였다. 그 결과 MICRO프로브는 유동장을 교란시키지 않으면서 화염내의 국소적인 연소반응을 관측하기에 충분한 고공간 분해능을 가지고 있다.

2) 각 MICRO시스템에 의해 검출되어진 2개의 자발광신호의 개시점 사이의 시간차에 의해 화염전파속도가 계산되었다. 이 방법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 동시계측으로 고속도 CCD카메라에 의한 OH자발광 시계열화상을 얻었다. 그 결과 MICRO프로브 시스템은 화염전파와 같은 시간 의존적인 현상을 관측하는데 매우 유용하였다.

3) PDA에 의해 계측된 분무특성과 화염전파속도 사이의 관계가 3개의 다른 연료주입율에 대해 조사되었다. 그 결과 화염전파속도는 분무특성에 따라 다른 의존 형태를 보였다.

#### 참고문헌

- 1) G. Continillo, W. A. Sirignano, "Counterflow Spray Combustion Modeling", *Combust. Flame*, Vol. 81, pp. 325~340, 1990.
- 2) A. Cessou, D. Stepowski, "Planar Laser Induced Fluorescence Measurement of [OH] in the Stabilization Stage of a Spray Jet Flame", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 118, pp. 361~381, 1996.

- 3) J. B. Greenberg, I. Silverman, Y. Tambour, "A New Heterogeneous Burning Velocity Formula for the Propagation of a Laminar Flame Front Through a Polydisperse Spray of Droplets", *Combust. Flame*, Vol. 104, pp. 358~368, 1996.
- 4) S. C. Li, F. A. Williams, "Experimental and Numerical Studies of Two-stage Methanol Flames", *Proc. of the Combustion Institute*, Vol. 26, pp. 1017~1024, 1996.
- 5) H. H. Chiu, C. L. Lin, "Anomalous Group Combustion of Premixed Clusters", *Proc. of the Combustion Institute*, Vol. 26, pp. 1653~1661, 1996.
- 6) F. Akamatsu, K. Nakabe, M. Katsuki, Y. Mizutani, T. Tabata, "Structure of Spark-Ignited Spherical Flames Propagating in a Droplet Cloud", in *Developments in Laser Techniques and Applications to Fluid Mechanics*, Ed. R. J. Adrian, D. F. G. Durao, F. Durst, M. V. Heitor, M. Maeda, J. H. Whitelaw, pp. 212~223, Springer-Verlag, 1994.
- 7) F. Akamatsu, T. Wakabayashi, S. Tsushima, M. Katsuki, Y. Mizutani, Y. Ikeda, N. Kawahara, T. Nakajima, "Development of Light-Collecting Probe with High Spatial Resolution Applicable to Randomly Fluctuating Combustion Fields", *Measurement Science and Technology*, Vol.10, pp. 1240~1246, 1999.