

연소장에서의 광학식 수광프로브의 적용

양 영 준[†]

Application of Optical Receiving Probe in Combustion Field

Young-Joon Yang[†]

Abstract

A light collecting probe named Multi-colored Integrated Receiving Optics (MICRO) is experimentally examined to verify its performance. For these purposes, the time-series signals of MICRO probe is compared with those of electro-static probe and light-guided probe by monitoring, for example, such as OH radical chemiluminescence, CH radical band and droplet Mie scattering. In addition, the experiment was conducted by using laminar premixed Bunsen flame, turbulent premixed Bunsen flame and premixed spray flame, respectively. It was confirmed that the performance of MICRO probe was very useful and convenient to obtain the chemiluminescence signals from local regions in turbulent premixed Bunsen flame and premixed spray flame.

Key Words : Light collecting probe, MICRO probe, Chemiluminescence, Flame

1. 서 론

분무화염은 반응성 이상류(two phase flow)이므로 장시간의 계측이 곤란하다고 여겨져 왔다. 이에 대한 이유로서는 액적의 부착현상에 의해 열전대나 정전탐침(electro-static probe)등과 같은 접촉식 프로브의 사용이 어렵고 또한 얻어지는 계측치의 신뢰성이 낮은 것에 기인한다.

Nakabe *et al.*^[2]와 Akamatsu *et al.*^[3]는 예혼합 분무화염의 미세구조를 조사하기 위해 화염중의 국소영역으로부터의 OH 라디칼 자발광, CH 밴드의 발광신호, 액적 Mie 산란광 신호에 대해 물리적인 시야제한 프로브(light-guided probe)를 이용하여 계측했다. 그러나 시야제한 프로브등의 접촉식 프로브는 연소장을 교란시킬 염려가 있고 또한 분무단면상계측(spray cross-sectional image measurement)등과 같은 레이저 계측기술과 동시에 사용하기 어려운 문제도 있다. 따라서 비접촉계측이 가능하고 광학적으로 시야를 제한한 수광 프로브(이하 광학식 수광 프로브(optical receiving probe)

라 한다)가 필요하다 할 수 있다.

화염중의 국소영역으로부터의 발광계측은 레이저 유기형광법(Laser Induced Fluorescence)^[4], 레이저 단층상법(Laser Tomography)^[5], 위상 도플러법(Phase Doppler Anemometry)^[6]등과 같이 프로브 광을 대상영역에 입사하는 계측법과 다르다. 화염발광계측에 있어서 지금까지 그래스 렌즈(glass lens)와 핀홀(pinhole)을 이용한 단렌즈 광학계(single-lens optics)^[7]가 폭넓게 이용되어지고 있다. 그러나 단렌즈 광학계는 계측파장에 따라 초점위치가 변하는 색수차(chromatic aberration)나 렌즈의 내측과 외측을 통과한 광에 의해 초점위치가 변하는 구면수차(spherical aberration)의 문제가 있다^[8]. 따라서 Wakabayashi *et al.*^[9]는 오목거울(concave mirror)과 볼록거울(convex mirror)을 조합하여 광파이버로 집광(light collecting)하는 카세그린형 수광계(Multi-colored Integrated Cassegrain Receiving Optics, MICRO)를 개발하여 광선추적법(ray-tracing method)을 이용한 성능평가를 행하였다. 카세그린 광학계는 Kaurenn *et al.*^[10]와 Nguyen *et al.*^[11]에 의해 다파장화상의 동시계측에 적용된 예가 보고 되어지고 있다. MICRO는 국소영역으로부터의 발광계측을 위한 수광 광학계로 설계되었고, Wakabayashi *et al.*의 해석 결과, 개발된 MICRO는 1) 색수차가 없기 때문에 각 파장의 초점위치가 같

동아대학교 기계공학과 RS222(RS222 Department of Mechanical Engineering, Dong-A University)

[†]Corresponding author: yangyj-du@hanmail.net
(Received : June 22, 2004, Accepted : August 16, 2004)

다 2) 오목거울과 볼록거울을 최적 설계함에 의해 구면수차를 거의 해소할 수 있다 3) 광파이버를 이용하기 때문에 쉽게 측정체적을 가시화할 수 있다 4) 집광을 분포특성이 뛰어나다 등의 이점을 갖고 있는 것을 나타내었다. 그러나 Wakabayashi *et al.*가 행한 성능평가법은 광선추적법을 이용한 시뮬레이션이기 때문에 화염의 국소영역으로부터의 발광계측 가능여부를 실험적으로 조사할 필요가 있다.

따라서 본실험에서는 개발한 MICRO의 실험적 성능평가에 대한 고찰을 연구목적으로 한다. 이를 위해 먼저 층류 예혼합 분재화염을 대상으로 실험을 한 후, 난류 예혼합 화염에 적용하여 MICRO에서 수광된 OH 라디칼 자발광과 정전탐침에 의한 이온전류 신호와의 비교를 행하였다. 나아가 MICRO를 예혼합 분무화염에 적용하여 이전에 이용되어져 온 집축식의 시야제한 프로브에서 얻어진 화염 발광신호와 비교하였다.

2. 실험 장치

그림 1과 그림 2는 본실험에서 이용한 MICRO의 직

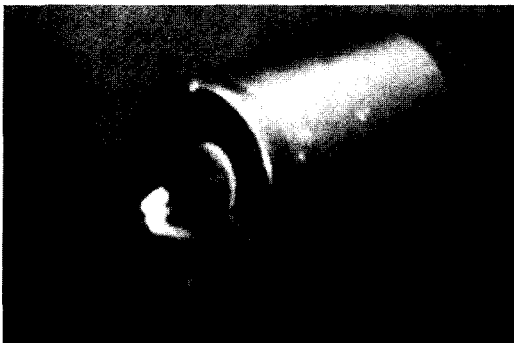


그림 1. MICRO의 직접사진
Fig. 1. Direct photograph of MICRO.

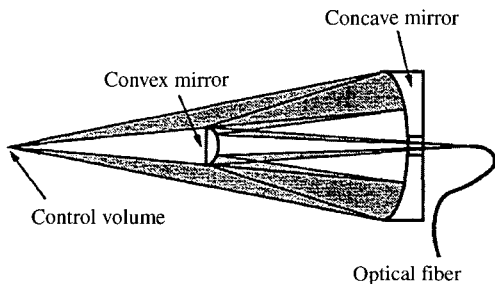


그림 2. MICRO의 구성
Fig. 2. Configuration of MICRO.

접사진 및 구성을 나타낸다. MICRO의 광학배치에 대해서는 문헌^[12]에 상술 되어져 있다. 그림 1에 나타난 것과 같이 MICRO는 오목거울 및 볼록거울과 광파이버로 구성되어져 있고 종래의 단렌즈계 광학계에서 문제시 되는 색수차 문제를 해소하고 구면수차도 최대한 억제하는 최적화 설계가 행하여져 있다. 또한 본실험에서 이용한 MICRO의 볼록거울로부터 초점위치까지의 거리는 300 mm이며, 실질상 이 거리가 MICRO의 작동거리(working distance)에 상당한다.

측정위치부터의 발광은 오목거울과 볼록거울에 의해 반사되어 코아경(core diameter) 200 μm 의 광파이버 케이블(Mitsubishi Densen Co. Ltd., ST-U200D-SY, NA=0.2)에 의해 집광 되어진 후, 그림 3에 나타난 파장분리·검출부에 들어간다. 여기서 광파이버 케이블은 화염발광의 파장범위를 고려하여 자외 및 가시역 투과형의 것을 사용했다. 파장 분리부에서는 파이버 끝단으로부터 사출된 광이 콜리메이팅 렌즈(collimating lens, Mitsubishi Densen Co. Ltd., D-95HL-S · F, $f=10\text{ mm}$)에 의해 평행광으로 되어 2장의 다이크로익 미러(dichroic mirror)에 의해 파장분리된다. 이와 같은 광파이버를 이용하는 이점으로는 1) 수광 광학계와 파장분리·검출부를 분할함으로써 실험장치 주위의 공간을 줄일 수 있고 광학계의 설치 및 조정등의 편리성이 향상된다 2) 파장분리·검출부측의 광파이버를 He-Ne 레이저 등의 가시광선과 접속해 파이버 끝단에 광을 입사함으로써 MICRO 전방에 형성되어지는 측정체적을 쉽게 가시화할 수 있다. 특히 2)에 있어서 형성되어지는 측정체적은 파장에 의존하지 않기 때문에 OH 라디칼등의 자외역과 현재 반도체 레이저를 이용한 계측이 주목되어지고 있는 CO₂ 등의 적외역과 같은 폭넓은 발광신호를 검출할때 광학계의 미세조정에 위력을 발휘한다.

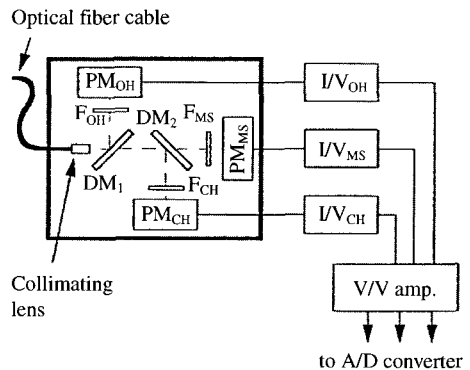


그림 3. MICRO 시스템 검출부의 구성
Fig. 3. Configuration of detection unit of MICRO system.

과장분리·검출부에서의 검출과장은 실험 목적에 따라 변경 가능하다. 본 실험에서는, 층류 및 난류 예혼합 분젠 화염을 대상으로 한 실험에는 OH 라디칼 자발광만을 검출하고, 예혼합 분무화염을 대상으로 한 실험에는 OH 라디칼자발광, CH 밴드의 발광과 액적으로부터의 Mie 산란광을 동시에 검출하였다. 각 과장의 분리에는 다이크로미러 DM1과 DM2 및 공간선택필터 F (중심과장, 반치폭은 OH 밴드발광용이 308.5 nm와 18 nm, CH 밴드발광용이 430.5 nm와 1.0 nm, Mie 산란광용이 514.5 nm와 1.0 nm로, 각각 첨자 OH, CH, MS로 표시)를 이용하고 분리후의 각 발광은 광전자증배관 PM(photomultiplier tube, R106UH)에 의해 검출되어진다. 광전자증배관으로부터의 출력신호는 I/V 변환기(NF Electronics Instruments, Model LI-76)에 의해 전압신호로 변환되고 자작의 V/V앰프에서 증폭되어진다. 로우패스 필터(low-pass filter, NF Electronic, FV-665)에서 고주파 노이즈를 제거한 후 A/D 컨버터(Elmec, EC-2390)에 의해 12 bit의 디지털 기록되어 컴퓨터(NEC, PC9801-VX)에 저장된다.

3. 결과 및 검토

3.1. 층류 예혼합 분젠화염을 이용한 검증

MICRO의 성능평가를 위해 먼저 층류 예혼합 분젠 화염을 이용한 실험을 하였다. 실험에는 내경 13 mm, 외경 16 mm의 분젠버너를 사용하고 연료는 프로판을 이용하였다. 실험조건은 당량비 1.2, 노즐출구의 단면 평균유속 1.5 m/s ($Re=1300$)으로 설정하여 층류 예혼합 화염을 형성시켰다. 실험은 MICRO의 측정체적중심을 버너포트로부터 상방향 10 mm의 위치로 하고 분젠버너를 MICRO에 향해서 전후좌우 이동시킴으로서 분젠화염내의 OH 라디칼자발광을 계속하여 MICRO의 공간분해능에 대한 검증을 하였다.

그림 4와 그림 5는 분젠화염을 MICRO에 대해 좌우 및 전후로 이동하여 얻어지는 분젠 화염내 OH 라디칼 자발광 강도의 반경방향분포를 나타낸다. 실험에 이용한 층류 예혼합 분젠화염의 반응영역은, 육안에 의하면 버너중심으로부터 반경방향 5 mm의 위치에 있었던 것으로부터, 특히 그림 4의 경우의 버너를 좌우로 이동시킨 경우에는 반응영역의 피크가 잘 검출되어지는 것을 알 수 있다. 그러나 반응이 일어나지 않아야 할 중심축 부근에 있어서도 OH 라디칼자발광 신호가 검출되어지고 있다. 이것은 그림 5의 경우의 버너를 전후방향으로 이동시킨 경우보다 현저히 나타나고 있다.

그림 5로부터 버너를 전후로 이동시킨 경우에는

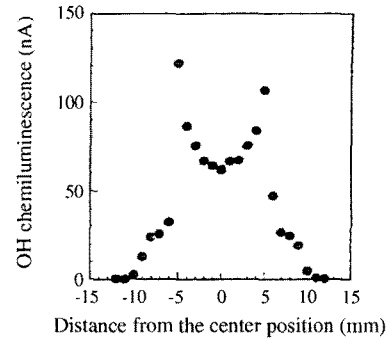


그림 4. 층류예혼합 분젠화염중의 OH 발광강도 분포 (MICRO를 화염에 대해 좌우로 이동)

Fig. 4. Distribution of OH chemiluminescence intensity in laminar premixed Bunsen flame (MICRO is traversed to left and right sides for flame).

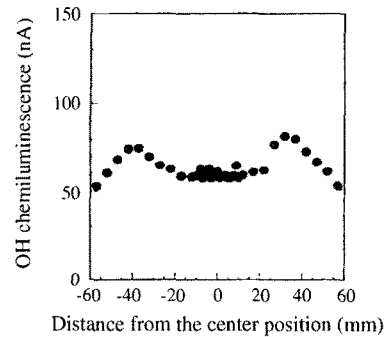


그림 5. 층류예혼합 분젠화염중의 OH 발광강도 분포 (MICRO를 화염에 대해 전후로 이동)

Fig. 5. Distribution of OH chemiluminescence intensity in laminar premixed Bunsen flame (MICRO is traversed to back and forth sides for flame).

MICRO의 실효측정체적이 화염내에 위치해 있지 않을 때에도 발광신호가 검출되어지고 있는 것을 알 수 있다. 여기서 검출되어지는 것은 명확히 MICRO의 실효 측정체적 바깥으로부터의 발광신호이다.

그림 6은 Wakabayashi *et al.*에 의해 행하여진 광선 추적법에 의한 MICRO의 집광율 분포특성에 대한 해석결과를 나타낸다. Wakabayashi *et al.*은 광선추적법에 의한 해석에 있어 MICRO의 실효측정체적은 집광율의 피크치로부터 $1/e^2$ 이 되는 영역으로 정의하고 있고, MICRO 광학계의 광축 (z축) 방향으로 1.6 mm, 반경 (r축) 방향으로 200 μ m를 실효측정체적으로 하였다. 그러나 본실험 결과는, 예를들어 집광율분포에 뛰어난 광학계를 이용한다 하여도 배경광으로서 실효측정체적 바깥으로부터의 발광신호를 검출할 가능성이 있는 것을 나타낸다.

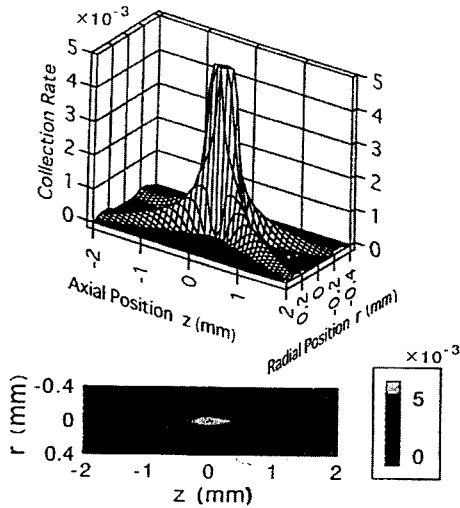


그림 6. 광선추적법으로 계산된 MICRO의 집광율 분포 (Wakabayashi *et al.*^[9] 문헌 인용)

Fig. 6. Distribution of light collecting rate of MICRO calculated from ray-tracing method (citation from Wakabayashi *et al.*^[9]).

3.2. 난류 예혼합 분철회염을 이용한 검증

앞절에서 서술한 바와 같이 층류화염을 대상으로 한 경우는, 집광율분포 특성이 뛰어난 MICRO 광학계의 이점이 그다지 나타나지 않았다. 여기서는 난류 예혼합 분철회염을 이용하여 MICRO에 의한 국소영역으로부터의 발광신호검출 가능성에 대해 조사한다.

실험에는 내경 11.4 mm의 분철티너를 이용하였다. MICRO의 측정체적중심과 정전탐침(이온 프로브)의 소선 끝부분의 위치가 거의 일치되도록 설치하여 화염 중의 동일영역으로부터의 OH 라디칼 자발광과 이온전류를 모니터링할 수 있도록 하였다.

그림 7은 실험에 이용한 난류 예혼합 분철회염의 직접사진이며 그림내의 +표시는 MICRO 및 이온 프로브의 측정점이다. 측정점은 버너 중심축상에서 버너포트 출구로부터 상방향 50 mm의 위치에 있으며 난류 예혼합 화염의 내焰 끝부분에 상당한다.

실험에 이용한 이온 프로브의 구조를 그림 8, 이온전류 측정계를 그림 9에 나타낸다. 이온 프로브는 수냉을 하였으며 탐침의 소선은 고온 화염중에 있어서 내산성과 도전도가 좋은 직경 0.1 mm, 감응부 길이 1.0 mm의 Pt-13%Rh 합금을 이용했다. 측정계는 어스를 버너로 하고 정전탐침의 감응부는 부의 일정전압(-18 V)에 의해 양이온을 포획하여 검출된 이온전류는 I/V변환기(NF Electronics Instruments, Mode LI-76)에 의해 전압신호로 변환된 후 V/V앰프에서 증폭되어지고 A/D 컨



그림 7. 난류예혼합 분철회염의 직접사진과 MICRO 및 이온 프로브의 측정점

Fig. 7. Direct photograph of turbulent premixed Bunsen flame with measurement point of both MICRO system and electro-static probe.

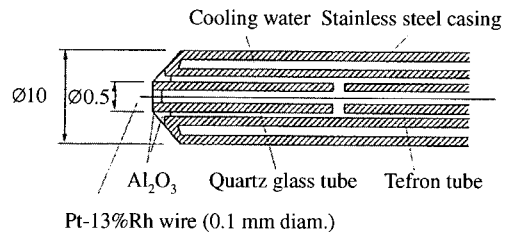


그림 8. 이온프로브의 구조

Fig. 8. Structure of electro-static probe.

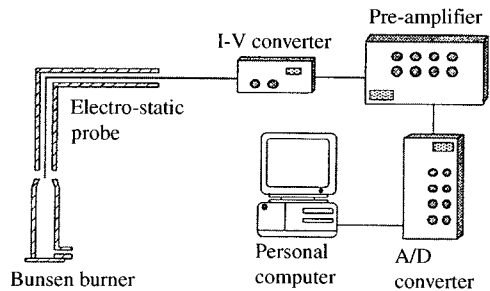


그림 9. 이온전류 측정 시스템

Fig. 9. Ion current measurement system.

버터(Elmec, EC-2390)에 의해 12 bit 디지털 데이터로 변환되어 컴퓨터(NEC, PC9801-VX)에 기록되어진다.

그림 10은 난류 예혼합 화염에 대한 이온전류신호와 MICRO에 의해 검출된 OH 라디칼 자발광신호의 동시 시계열계측 결과를 나타낸다. 여기서 MICRO에 의해 검출된 OH 라디칼 자발광신호는 고주파성분의 노이즈 제거를 위해 컷오프 주파수(cut-off-frequency) 5 kHz로 설정된 로우패스 필터를 통과하도록 하였다.

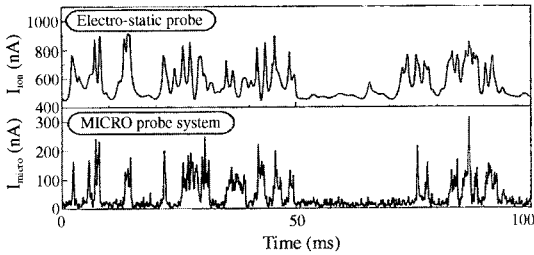


그림 10. 이온전류 신호와 MICRO에 의한 OH 라디칼 자발광 신호의 동시 시계열 신호

Fig. 10. Time-series signals of OH radical chemiluminescence obtained by MICRO system and ion current detected by electro-static probe.

이 결과로부터 MICRO에 의한 OH 라디칼 자발광 신호가 이온전류 신호와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 이온 전류신호는 화염중의 양이온을 검출하고 있어 OH 라디칼과 완전히 일치하지는 않지만, 화염중의 국소영역에 있어서 연소반응의 존재를 나타낸다. 이온 전류신호가 MICRO에 의한 OH 라디칼 자발광신호와 잘 일치하고 있는 것으로부터 MICRO를 이용한 국소 반응영역의 검출이 가능하다는 것을 알 수 있다. 이것은 앞 절의 층류화염을 이용한 실험에서 얻어진 결과에 반하지만, 다음과 같이 해석되어진다.

먼저 층류화염과 난류화염의 차이는 연소반응영역이 공간적으로 변동하고 있는가 않는가에 있다. 난류 화염 중에는 실효측정체적 바깥의 연소반응영역으로부터의 OH 라디칼 자발광이, 층류화염을 이용한 검증실험에서 관측되어지는 것처럼, 검출되어 배경광으로서 중첩해 오지만 화염면이 변동하고 있기 때문에 화염면이 MICRO의 실효측정체적내를 지나면 급격한 피크로서 OH 라디칼 자발광신호가 검출되어진다. 이 때문에 검출되어지는 발광신호는 실효측정체적내로부터의 발광이 지배적이 되고 국소영역으로부터의 발광계측이 가능하게 된다. 즉 연소반응영역이 공간적으로 변동하며 존재하고 있는 곳일수록 MICRO가 갖는 집광유평특성의 우위성이 나타난다고 할 수 있다. 여기서 오목거울과 볼록거울의 선정에 따라 집광유평특성을 변화시킬 수 있는 것을 고려하면, MICRO를 이용하여 국소영역으로부터의 발광계측을 시도할 때에는 계측장에 맞춘 광학계의 설계가 필요하게 되고 대상으로 하는 곳에 국소영역으로부터의 발광계측이 가능한가 어떤가를 사전 예비실험을 통해 확인할 필요가 있다. 따라서 다음 절에서는 예혼합 분무화염에 MICRO를 적용한 경우에 검출되는 발광신호와, 이전에 사용되어져 온 접촉식 시야제한 프로브를 이용한 광학계에 의해 검출된 발광신

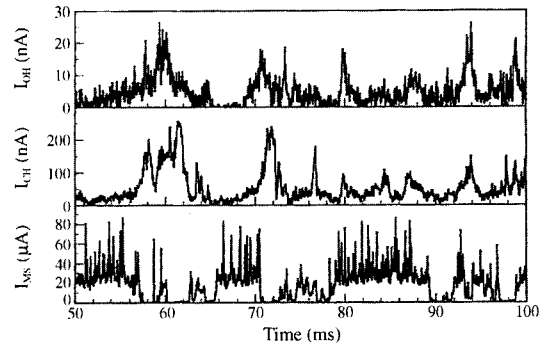


그림 11. MICRO에 의해 검출된 예혼합 분무화염으로부터의 발광신호(측정위치 $h=50$ mm, $r=15$ mm)

Fig. 11. Chemiluminescence signals emitted from premixed spray flame detected by MICRO (measurement position $h=50$ mm, $r=15$ mm).

호를 비교하는 것으로, MICRO를 이용하여 분무화염 중에 있어서 국소발광계측이 가능한지를 검증한다.

3.3. 예혼합 분무화염을 이용한 검증

그림 11에 MICRO에 의해 검출된 예혼합 분무화염 중의 OH 라디칼 자발광신호, CH 밴드의 발광신호, 액적 Mie산란광신호의 시계열계측 결과를 나타낸다. 여기서 MICRO는 측정 체적중심이 버너포트 중심축으로부터 반경방향으로 15 mm, 버너포트 출구로부터 상방향 50 mm의 위치에 오도록 설치하였다. 한편 그림 12에 시야제한 프로브를 이용한 수광 광학계(receiving optical system)를 나타낸다. 여기서 시야제한 프로브는 검출되어지는 화염발광이 광로상의 적분치가 되지 않도록 삽입되어져 있고 검출영역은 직경 2 mm, 길이 4 mm로 제한되어져 있다.

검출영역내로부터의 발광신호는 석영렌즈 CL로 집광되고 다이크로익미러 DM₁과 DM₂에 의해 파장 선택되어진 후 핀홀 P에 결상되어진다. 광간섭필터 F(중심 파장, 반치폭은 OH 밴드발광용이 308.5 nm와 18 nm, CH밴드발광용이 430.5 nm와 1.0 nm, Mie산란광용이 514.5 nm와 1.0 nm로, 각각 첨자 OH, CH, MS로 표시)을 통해 배경광을 제거하여 광전자증배관 PM에서 검출되어진다.

그림 13은 시야제한 프로브를 이용한 경우의, 동일 측정위치(중심축으로부터 반경방향으로 15 mm, 버너포트출구로부터 상방향으로 50 mm)에 있어서 각 발광신호의 시계열계측 결과이다. 그림 11과 그림 13을 비교하면 양 광학계에서 얻어지는 발광신호는 같은 정도의 분해능을 나타내고 있고 또한 신호파형도 아주 유

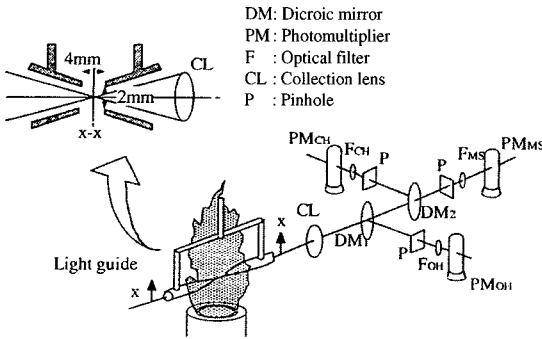


그림 12. 시야제한 프로브를 이용한 수광 광학계
Fig. 12. Receiving optical system with light-guided probe.

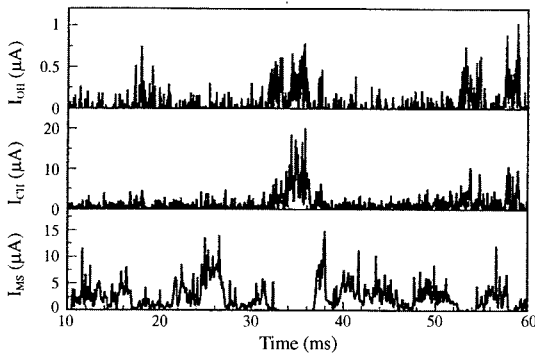


그림 13. 시야제한 프로브에 의해 검출된 예혼합 분무화염으로부터의 발광신호(측정 위치 h=50 mm, r=15 mm)
Fig. 13. Chemiluminescence signals emitted from premixed spray flame detected by light-guided probe (measurement position h=50 mm, r=15 mm).

사하다는 것을 알 수 있다. 시야제한 프로브를 이용한 과거의 실험에 있어서는 단렌즈 광학계에서 집광했기 때문에 색수차등의 문제를 포함하고 있어 양자의 단순한 비교는 할 수 없다. 그러나 여기서 이용한 파장 분리부와 검출부는 시야제한 프로브 및 MICRO를 이용한 어느 경우에 있어서도 같은 구성이라는 것을 고려하면, MICRO는 시야제한 프로브를 이용한 이전의 광학계와 동등한 공간분해능을 가지며 예혼합 분무화염 중의 국소영역으로부터의 발광신호에 대한 비접촉식 검출이 가능하다고 생각되어진다.

4. 결 론

개발한 광학식 수광 프로브인 Multi-colored Integrated Cassegrain Receiving Optics (MICRO)를 층류 예혼합 분무화염, 난류 예혼합 분무화염, 예혼합 분무

화염의 각각에 적용하여 실험적인 성능평가를 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MICRO가 갖는 공간적인 집광율특성의 우위성은 난류장등과 같은 발광영역이 공간적으로 불균일하게 분포하고 있는 장에 나타난다.
- (2) 난류 예혼합 분무화염에 있어서 이온전류신호와 MICRO에 의한 OH 라디칼 자발광신호는 잘 일치한다.
- (3) 예혼합 분무화염에 MICRO를 적용한 경우, 이전에 얻어진 시야제한 프로브에 의한 발광신호계측 결과와 동일한 경향을 나타내는 것으로부터 MICRO에 의한 예혼합 분무화염중의 국소영역으로부터의 발광신호계측이 가능하다.

참고 문헌

- [1] D. E. Kim, S. H. Lee, E. J. Cha, and S. W. Kang, "Basic research of non-invasive optical transcutaneous pCO₂ gas sensor & analytic equipment", *The Korean Sensors Society*, vol. 13, no. 4, pp. 103-108, 2004.
- [2] 中部主敏, 水谷幸夫, 平尾知之, "火炎發光と油敵ミ-散亂による噴霧火炎と氣液混燒火炎の構造觀察", *日本機械學會論文集*, 55-516B, pp. 2517-2525, 1989.
- [3] 赤松史光, 中部主敏, 水谷幸夫, 香月正司, "予混合噴霧流中で燃焼する油滴群の光學的計測", *日本機械學會論文集*, 60-577B, pp. 3172-3178, 1994.
- [4] M. J. Dyer and D. R. Crosley, "Two-dimensional imaging of OH laser-induced fluorescence in a flame", *Optics Letters*, vol. 7, no. 8, pp. 382-384, 1982.
- [5] L. Boyer, "Laser tomographic method for flame front movement studies", *Combust. Flame*, vol. 39, pp. 321-323, 1980.
- [6] W. D. Bachalo and M. J. Houser, "Phase/doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distribution", *Opt. Eng.*, vol. 23, no. 5, pp. 583-590, 1984.
- [7] 伊藤宏一, 本望行雄, 宋戴翼, 五味努, "ラジカルの發光強度による瞬間燃空比の計測", *日本機械學會論文集*, 52-481B, pp. 3362-3371, 1986.
- [8] 岸川利郎, "光學入門", オプトロニクス社, 1987.
- [9] 若林卓, 赤松史光, 香月正司, 水谷幸夫, 池田裕二, 河原伸辛, 中島健, "多波長高空間分解能集光プロ-ブの開発(第1報, 光線追跡法による空間分解能の評價)", *日本機械學會論文集*, 64-619B, pp. 925-930, 1998.
- [10] P. Kauranen, S. Andersson-Engels, and S. Svanberg,

“Spatial mapping of flame radical emission using a spectroscopic multi-colour imaging system”. *Appl. Phys.*, B53, pp. 260-264, 1991.

- [11] Q. V. Nguyen and P. H. Paul, “The time evolution of a vortex-flame interaction observed via planar

imaging of CH and OH”, *Twenty-Sixth Symp. (Int.) on Combust.*, The Combustion Institute, pp. 357-364, 1996.

- [12] 若林卓, “對向流噴霧火炎の形成, 計測ならびに構造に関する研究”, 大阪大學博士論文, 1997.



양 영 준 (Young-Joon Yang)

- 1991년 2월 동아대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
- 1996년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 2002년 7월 오사카대학교 대학원 기계물리 연소공학 전공(공학박사)
- 1996년 1월 ~ 1998년 2월 (주)한국중공업
- 2002년 4월 ~ 2003년 2월 (주)이온공학 연구소(일본 국가연구기관)
- 현 동아대학교 기계공학과 연구원
- 주관심분야 : 연소공학 광계측