

ORIGINAL ARTICLE

동시계측에 의한 난류 미분탄 화염의 순간구조에 관한 연구

황승민*

호서대학교 건축토목환경공학부 환경공학전공

Study on Instantaneous Structure of Turbulent Pulverized Coal Flame by Simultaneous Measurement

Seung-min Hwang*

Department of Environmental Engineering, Hoseo University, Chungcheongnam-do, 31499, Korea

Abstract

In this study, a laser sheet technique and PLIF (Planar laser-induced fluorescence) are applied to a laboratory-scale pulverized coal burner of the open type, and the spatial relationship of the pulverized coal particle zone and the combustion reaction zone is examined by simultaneous measurement of Mie scattering and OH-LIF images. It is found that this technique can be used to investigate the spatial relationship of the combustion reaction zone and pulverized-coal particles in turbulent pulverized-coal flames without disturbing the combustion reaction field. In the upstream region, the combustion reaction occurs only in the periphery of the clusters where high-temperature burned gas of the methane pilot flame is entrained and oxygen supply is sufficient. In the downstream region, however, combustion reaction can be seen also within clusters of pulverized-coal particles, since the temperature of pulverized-coal particles rises, and the mixing with emitted volatile matter and ambient air is promoted.

Key words : Pulverized coal combustion, PLIF, Mie scattering, Simultaneous measurement

1. 서론

에너지 문제가 심각해지는 요즘 에너지 획득을 위한 새로운 기술개발이 각 방향으로 급속하게 진행되고 있다. 그러나 신기술의 확립 및 실용화 측면에 있어서 아직 많은 시간이 필요하며 앞으로도 석유나 석탄을 비롯한 화석연료의 이용에 크게 의존해 갈 것으로 예상된다. 이러한 상황 하에서 최근에 지구환경 오염

이나 미세먼지 대응책의 하나로서 연소 배출물에 대한 규제강화가 행하여지고 있으며 그 규제치는 점점 더 강화되어지고 있다. 또한 저공해화에 대한 연소기술의 요구도 한층 엄격함을 더하고 있다. 이러한 요구에 부응하여 친환경적이며 고효율적인 연소를 실현하기 위해서는 유해한 연소 배출물을 제거하기 위한 후처리 기술개발뿐만이 아니라 연소현상 그 자체에 대한 제어가 필수 불가결하다(Hwang, 2005).

Received 27 March, 2018; Revised 24 April, 2018;

Accepted 30 April, 2018

*Corresponding author: Seung-min Hwang, Department of Environmental Engineering, Hoseo University, Chungcheongnam-do, 31499, Korea
Phone: +82-41-540-5704
E-mail: hwangsm@hoseo.edu

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

화석연료 중 석탄은 다른 화석연료에 비해 매장량이 풍부하고 산지가 편재되어 있지 않기 때문에 공급 안정성이 높고 경제성·실용성에도 뛰어나 향후 각종 에너지원과의 적절한 조합에 의한 안정적인 공급을 도모하는데 있어서 매우 중요한 에너지원으로 다시 주목 받고 있다. 현재 가장 일반적으로 이용되어지고 있는 석탄이용 기술은 석탄을 평균입경 40 μm 정도로 분쇄하여 버너에서 연소시키는 미분탄 연소방식이다. 이 미분탄 연소는 미분탄 입자의 기상으로의 분산, 휘발분의 방출, 공기와 휘발분의 혼합 및 연소(휘발분 연소), 그리고 고체탄소의 표면연소(char 연소) 등 복잡한 과정이 상호작용을 일으키면서 동시에 일어나기 때문에 매우 복잡한 현상이다. 더욱이 연료입자는 서브 마이크론에서부터 백 마이크론 정도까지 넓은 입경분포를 갖고 있기 때문에 여러 연소형태가 혼재하고 있을 것으로 예상되어지지만, 그 기초적 메카니즘은 불명한 점이 많다. 따라서 미분탄 연소에 관한 새로운 기술개발 및 환경오염에 대한 대책은 주로 경험적 지식에 의존하고 있는 것이 현실이다(Hwang, 2005; 2010).

이와 같이 미분탄 연소에 관한 메카니즘 해명이 진척되지 않고 기술개발 및 환경오염에 대한 대책이 주로 경험적 지식에 의지할 수밖에 없는 원인 중 하나는 연소장에 있어서의 계측이 매우 어렵다는 점을 들 수 있다. 미분탄 연소에 관한 계측은 대부분 발전용 보

일러와 상이한 스케일의 모델버너를 이용하여 열전대나 가스 샘플링 프로브 등의 접촉법에 의한 계측기기를 사용하여 계측되기 때문에 미분탄 입자의 상세한 거동이나 정확한 화염구조를 관찰하는 것이 곤란하였다. 그러나 최근에 비접촉법으로 유동장이나 화학종 농도의 계측이 가능한 레이저 응용 계측기술이 주목 받고 있으며, 이들 기술을 이용하여 연소장을 어지럽히지 않고 높은 공간·시간 분해능 하에서 여러 물리량의 계측이 가능하여졌다(Hwang et al., 2003; 2003; 2005; Hwang, 2010).

본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 광학계의 조정이 용이하고 연소장치의 조작을 간편하게 할 수 있는 실험실 규모의 안정된 난류 미분탄화염이 형성 가능한 소형 모델버너를 제작하였다. 평면 레이저 유기형광(Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF)(Mokhov et al., 1997; Schulz et al., 1997; Thomson et al., 1997; Hwang, 2005)을 상기의 소형 모델 미분탄 버너에 적용하여, OH 라디칼의 순간 2차원분포를 계측함과 동시에 레이저 시트법에 의한 미분탄 입자 단면화상과의 동시 측정을 시행하였다. 이를 통하여 얻어진 연소반응 영역과 미분탄 입자존재 영역과의 위치관계를 명확히 하는 것으로 난류 미분탄 화염의 상세구조에 대하여 고찰하였다. 또한, 화염의 순간구조를 정량적으로 고찰하기 위하여 화염 중심축에 있어서 OH-LIF 화상의 강도분포와 미분탄 입자단면화상의

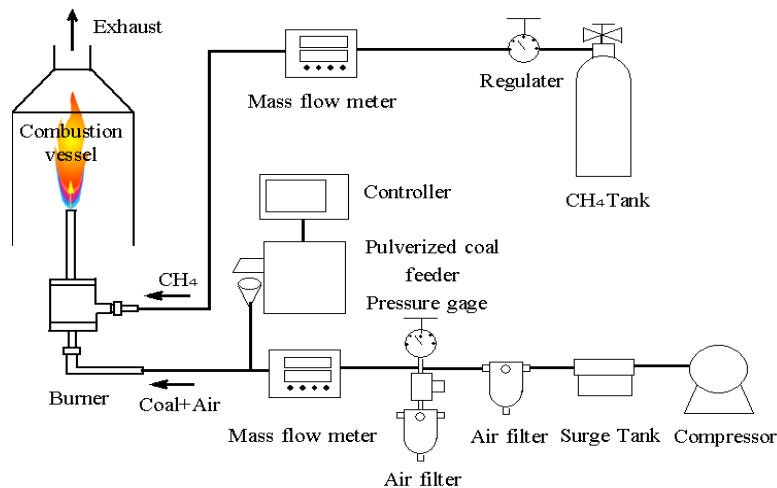


Fig. 1. Configuration of pulverized coal burner and supply system.

강도분포에 대하여 통계해석(Hino, 2002)을 실시하였다.

나타내었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 미분탄 연소장치

본 연구에서 이용한 난류미분탄 연소장치의 공급계를 포함한 전체의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 버너는 여러 광학계측을 용이하게 하기 위하여 대기개방형으로 하였으며, 내경 0.6 mm의 주류 원형관과 그 주위에 환상 슬릿트 유로(폭 0.5 mm)를 갖는 이중관 구조로 되어있다. 연소용 주류공기는 컴프레서로부터 공급되어 유량 제어장치에서 유량을 제어한 후 미분탄용 인젝터에 유입된다. 인젝터에서는 스크류 피더에 의해 정량 공급된 미분탄이 공기에 흡인·혼합되어 버너부에 이송되어진 후 주류 원형관으로부터 미분탄 입자-공기의 고·기 이상류로 분출된다.

본 연구에 있어서 미분탄의 공급량이 적고, 미분탄만으로 안정된 화염을 형성하는 것이 어렵기 때문에 미분탄을 공급하는 주류 원형관 외측에 설치된 폭 0.5 mm의 환상 슬릿트로 메탄을 공급하여 착화원으로 하였다. 사용한 석탄은 뉴란즈탄(Newlands coal)이며 실제 발전소에서 사용되는 것과 동일한 입경분포를 갖는 것을 이용하였다. 뉴란즈탄의 성상을 Table 1에

Table 1. Properties of pulverized coal

High heating value ^{*1}	29.1 MJ/kg
Low heating value ^{*2}	28.1 MJ/kg
<hr/>	
Proximate analysis	[wt%]
Moisture ^{*2}	2.60
Ash ^{*1}	15.20
Volatile matter ^{*1}	26.90
Fixed carbon ^{*1}	57.90
<hr/>	
Ultimate analysis	[wt%]
Carbon ^{*1}	71.90
Hydrogen ^{*1}	4.40
Nitrogen ^{*1}	1.50
Oxygen ^{*1}	6.53
Total sulfur ^{*1}	0.44
Combustible sulfur ^{*1}	0.39

*1 Dry basis, *2 As received

2.2. 광학계측 장치

본 연구에서는 평면 레이저 유기형광법을 난류 미분탄 연소장에 적용하여 OH 라디칼의 순간 2차원 분포를 측정하여 휘발분의 연소형태를 상세히 검토함과 동시에 레이저 시트법에 의해 미분탄 입자의 단면화상을 측정하여 연소반응 영역과 미분탄 입자 존재영역과의 위치관계에 대하여 고찰을 하였다. Fig. 2에 본

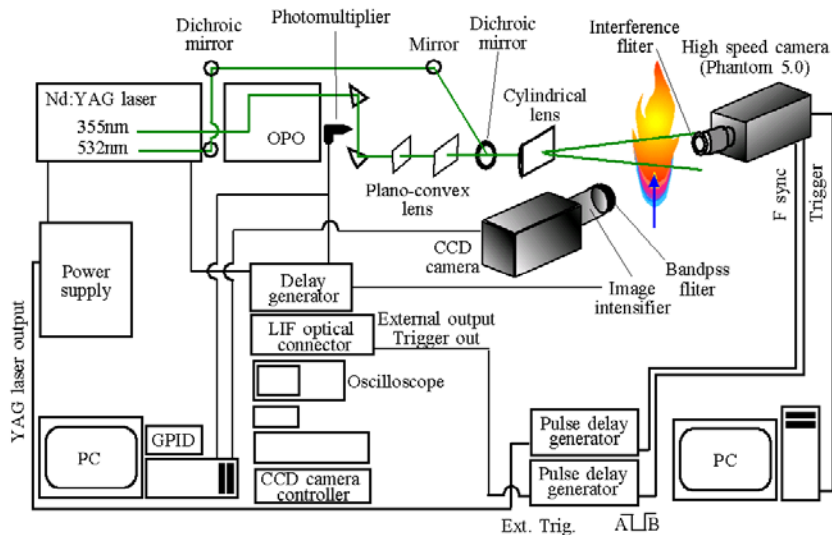


Fig. 2. Schematics of simultaneous measurement system for OH-PLIF and Mie scattering of pulverized coal particles.

연구에 이용한 측정 광학계의 개략도를 나타내었다.

레이저 시트의 광원으로서 Nd:YAG 펄스 레이저를 이용하였다. OH-PLIF용 파장가변 레이저의 여기용에는 355 nm의 제3고조파를, 미분탄 단면화상의 가시화용에는 파장 532 nm의 제2고조파를 이용하였다. OH 라디칼의 여기파장으로서 (1, 0) 밴드의 P1(8) 흡수선(285.586 nm)을 선정하였다. 미분탄 단면화상의 가시화용 532 nm 레이저 광은 다이크로익 밀러(Dichroic Mirror, D.M.)를 이용하여 OH-LIF용 레이저와 동일한 광로로 하였다. 레이저 시트 광에 조사된 OH-PLIF 화상과 미분탄 입자의 미산란(Mie scattering) 화상은 레이저 시트의 수직방향으로 설치된 2대의 CCD 카메라에 의해 촬영된다. OH-PLIF 화상은 이미지 증강장치(Image Intensifier, I.I.)가 내장된 CCD 카메라(Nippon Roper Co., EEV 02-06-202, 화소수 : 576 (W) × 384 (H) pixel)에 의해 촬영하였다. 그 때, 또 하나의 고속도 CCD 카메라(Vision Research Co., Phantom Ver. 5.0, 화소수 : 1240 (W) × 1240 (H) pixel)와 동기화 하여 광원의 펄스 레이저와 동기화된 화상 1장만 촬영하였다. 2대의 CCD 카메라와 레이저 펄스의 동기화에는 2대의 펄스 제너레이터(Pulse delay generator, Stanford Research Systems Co., Model DG 535)를 이용하였다.

각각의 파장의 광만을 투구시키기 위해 각 CCD 카메라 렌즈의 선단에 광 간섭필터(OH-LIF용 : 중심파장 320 nm, 반치폭(Half-width) 10 nm, 미분탄 입자의 미산란용 : 중심파장 532 nm, 반치폭(Half-width) 9.09 nm)를 설치하고 배경 광을 제거하였다. 또한, OH-LIF 측정에 있어서는 공기의 레이리 산란(Rayleigh scattering) 광화상을 촬영하여 세로축의 레이저 광 강도 분포의 보정을 실시하였다.

OH-LIF 화상 및 미산란 화상의 촬영영역은 Fig. 3과 같이 설정하였으며, 두 영역이 중복되는 해석대상 영역은 30 mm × 30 mm로 하였다. 또한, 측정에 있어서 촬영영역의 높이를 $z = 15\sim 45$ mm, $45\sim 75$ mm, $75\sim 105$ mm, $105\sim 135$ mm, $135\sim 165$ mm, $165\sim 195$ mm로 총 6 영역에서 촬영을 진행하였다.

2.3. 실험방법 및 조건

실험 시 주류 원형관에는 공기를 공급하고 주위의

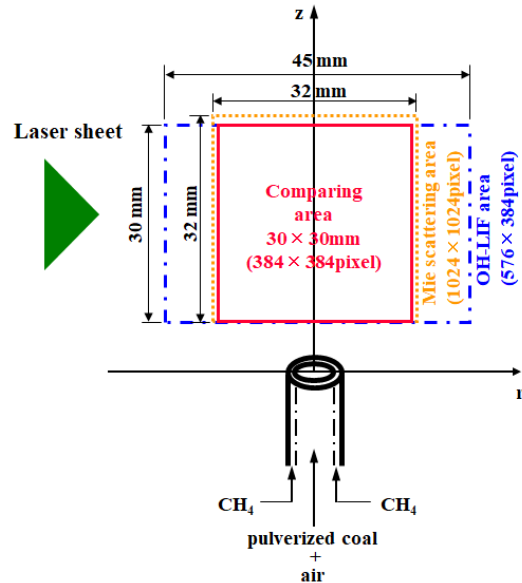


Fig. 3. Measurement and data processing area.

환상 슬릿트에는 메탄을 공급하여 메탄 파일롯트 화염을 형성시켜 화염이 안정된 후 미분탄을 공급하여 미분탄의 공급량이 소정의 양(8.92 g/min)이 된 후에 계측을 실시하였다. 미분탄, 공기 및 메탄의 공급량은 Table 2에 나타내었다. 미분탄 운송용 공기량은 미분탄 입자가 운송용 공기배관 내에 침적되지 않을 정도의 유속을 갖으며, 미분탄과 공기의 공급량 비가 실제 미분탄 버너의 1차 공기연소 영역과 동일하도록 설정하였다. 또한 환상 슬릿트로부터 보염용으로 공급하고 있는 메탄의 공급량은 안정한 미분탄 화염이 형성 가능하도록 최저량으로 설정하였다. 계측 시에는 버너출구 단면의 중심을 원점으로 하여 화염 하류방향을 z 축, 반경방향을 r 축으로 하였다.

Table 2. Experimental conditions

Pulverized coal feed rate	1.49×10^{-4} kg/s
Thermal input of coal*	4.19 kW
Thermal input of CH ₄ *	0.83 kW
Air flow rate	1.80×10^{-4} m ³ /s
CH ₄ flow rate	2.33×10^{-5} m ³ /s
Bulk equivalence ratio	$\Phi = 6.09$

* Based on lower heating value

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미분탄입자의 단면화상

Fig. 4에 각 촬영영역의 높이에서 연소시와 비연소시의 순간 미분탄입자의 단면화상을 나타내었다. 비연소 측정시에는 연소 상태에서 미분탄 공급량이 설정치가 된 시점에서 파일럿 화염에 메탄 공급을 일시 정지하여 비연소 상태로 만든 후 다시 메탄을 공급하여 연소 상태와 동일한 흐름 조건 하에서 측정을 실시

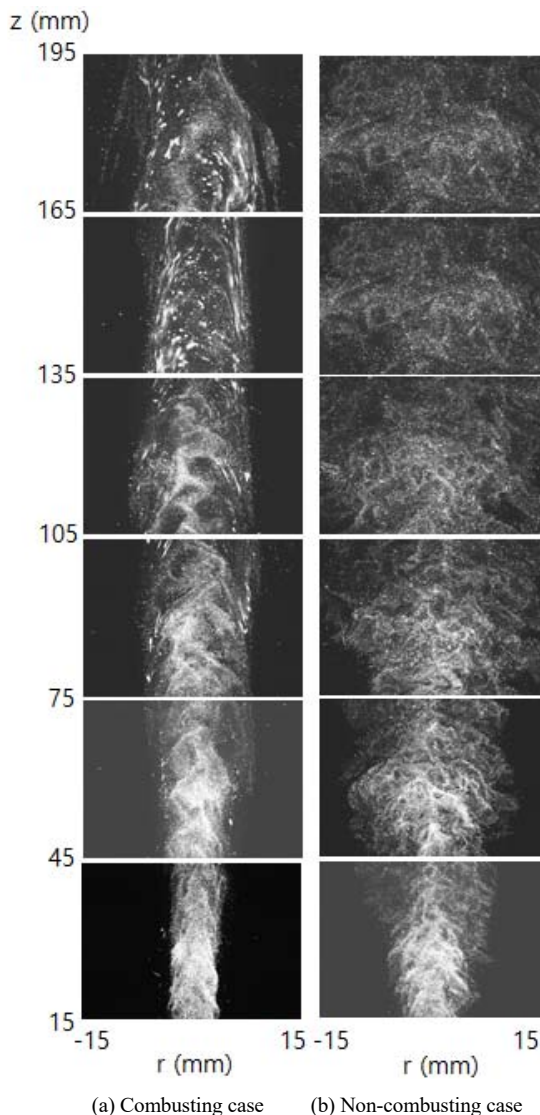


Fig. 4. Mie scattering images of pulverized coal particles.

하였다. Fig. 4에 나타난 순간 화상에서 미분탄 입자 수밀도 분포는 난류의 대규모 조직구조(Coherent structure)가 관찰된다. 기상과 비교하여 비중이 크기 때문에 이러한 대규모의 조직구조는 볼 수 없다는 의견도 있지만, 실제로 이런 구조가 관찰되었다는 것은 흥미롭다고 생각된다. 또한, 전체적인 미분탄 입자의 수밀도 분포를 관찰하면 비연소시의 경우에는 하류로 갈수록 분포가 넓어지며 수밀도가 균일하게 감소하고 있지만, 연소시의 경우에는 $z = 135 \text{ mm}$ 정도가 되면 미분탄 입자 수밀도의 질음과 열음을 뚜렷하게 볼 수 있다. 이것은 연소반응이 국소적으로 일어남으로서 공간적으로 불균일하게 열팽창이 일어나는 것이나, 연소성이 높은 미분탄 입자영역이 선택적인 소실에 따른 것으로 생각된다. 이 결과에 대해서는 OH-LIF 화상과 미분탄 입자의 단면화상과의 동시측정을 통해 상세히 살펴보겠다.

3.2. OH-LIF 화상과 미분탄 입자의 단면화상의 동시측정

다환방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAH)은 주로 탄화수소 연료나 석유, 석탄 등 화석연료의 불완전 연소와 환원성 분위기 하에서 열분해에 의해 발생한다. 이 PAH는 다양한 분자구조를 갖기 때문에 넓은 파장범위에서 흡수대역 및 발광대역을 가지며, 화염 중에 다량으로 존재하기 때문에 LIF법을 연소장에 적용할 경우에 PAH가 여기되는 것을 고려할 필요가 있다. 따라서, 예비실험으로 입사광의 파장을 서서히 변화시키면서 형광화상 측정을 시행하여 PAH 여기의 영향에 대해 검토하였다. Fig. 5는 본 실험에서 사용한 OH-LIF 강도의 여기파장인 285.586 nm에서 촬영한 형광화상과 여기파장에서 조금 벗어난 285.600 nm에서의 형광화상을 나타낸 것이다. 촬영영역은 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 이며 반경방향 위치는 $r = -15 \sim 15 \text{ mm}$, 높이방향 위치는 $z = 45 \sim 7 \text{ mm}$ 이다. 이 결과로부터 본 실험에 사용한 여기파장인 285.586 nm에서 PAH의 여기에 의한 형광영향은 거의 없다고 생각된다.

OH-LIF 화상과 미분탄 입자 단면상의 동시측정을 실시하여 연소반응 영역과 미분탄 입자존재 영역과의 위치관계를 조사한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 측정된 두 화상은 1 펄스의 레이저에 의해 가시화된 것이다.

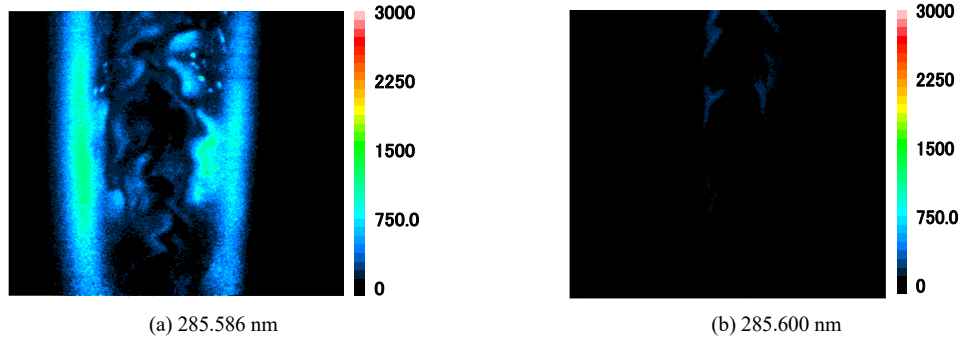


Fig. 5. Difference of LIF images by changing the wavelength of laser irradiation.

또한, 두 화상의 중심 횡단면($z = 30 \text{ mm}, 60 \text{ mm}, 90 \text{ mm}, 120 \text{ mm}, 150 \text{ mm}, 180 \text{ mm}$)의 휘도분포를 Fig. 7에 나타내었다.

OH-LIF 화상과 미분탄 단면상을 비교해보면, 화염 상류부에서는 미분탄 입자의 존재영역 주변부에서 OH-LIF 강도가 높고, 하류부로 갈수록 미분탄 입자가 존재하고 있는 영역에서 OH-LIF 강도가 높아지고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 버너 포트 근방의 상류부에서는 메탄 화염에 의한 연소반응 영역이 분류 조직구조에 밀려들어 산소 공급이 좋은 미분탄 입자의 수밀도가 높은 영역의 주변부에서만 연소 반응이 일어나고 있으며, 화염의 하류로 가면서 미분탄 입자의 온도가 상승하고 휘발분의 방출이 진행됨과 동시에 주위 공기와의 혼합이 촉진되어 미분탄 입자의 존재영역에서도 연소반응을 볼 수 있게 되는 것을 알 수 있다.

이것을 Chiu et al.(1982)이 제창한 액체연료 분무 연소의 군연소(Group combustion)에 적용하면, 화염 상류부에서는 외부 군연소에 상당하는 연소형태, 화염 하류부에서는 내부 군연소에 상당하는 연소형태라고 판단된다.

3.3. 통계해석에 의한 연소형태의 검토

화상의 정성적인 관찰만으로는 미분탄 연소의 정량적인 평가를 할 수 없기 때문에 Fig. 6에 나타난 OH-LIF 화상과 미분탄 입자 단면상의 동시측정 결과에서 두 화상의 중심축 상의 휘도분포에 대하여 통계해석을 실시하였다. 해석에 있어서 FFT 처리시 이용한 총 데이터 수는 256 (28)개 이며 기본 파수는 50

1/m에 상당한다. 또한, 해석을 실시한 영역의 총 데이터 수를 256개로 했기 때문에 화상 중에서의 높이 방향의 길이로 환산하면 20 mm가 된다.

화상 신호 $f_i(t)$ 의 복합 스펙트럼을 $F_i(f)$ 로 하면 파워 스펙트럼 $W_i(f)$, 크로스 스펙트럼 $X_{ij}(f)$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

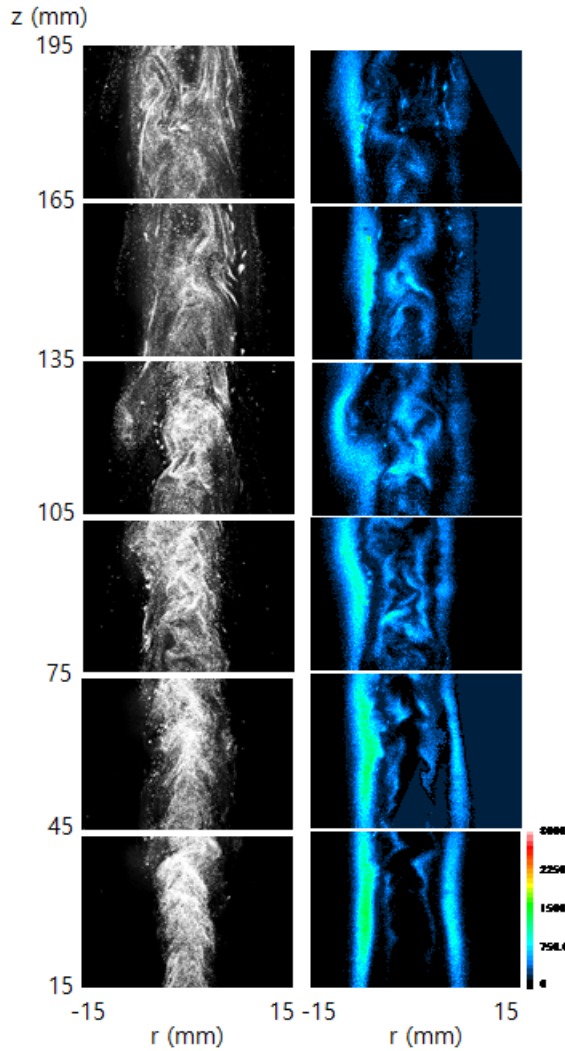
$$W_i(f) = F_i(f) \cdot \overline{F_i(f)} \quad (1)$$

$$X_{ij}(f) = F_i(f) \cdot \overline{F_j(f)} \quad (2)$$

여기서, $\overline{F_i(f)}$ 는 $F_i(f)$ 의 켈레 복소수 스펙트럼이다. 또한, 첨자 i, j 는 미 산란광과 OH-LIF의 강도치로 대치된다.

Fig. 8에 미 산란광 강도분포의 자기상관관계 $R_{MS}(\tau)$ 를 나타낸다. 여기서, 가로축 τ 는 이동 거리(Displacement distance)이다. 자기상관관계의 영역확대(제로 크로스치의 폭)은 미분탄 입자의 농도 집단(입자군)의 규모에 관계한다고 생각된다. 자기상관관계의 형상 변화를 보면, 하류로 갈수록 형상이 끝이 날 카롭게 된다. 예를 들어 상류의 $z = 15 \sim 45 \text{ mm}$ 로부터 하류의 $z = 165 \sim 195 \text{ mm}$ 에 걸쳐서 제로 크로스치의 폭인 이동거리는 약 9.68 mm에서 5.94 mm로 점차 좁혀지고 있는 것으로부터 미분탄 입자의 연소가 진행됨에 따라 입자군의 규모가 감소하고 있다는 것을 알 수 있다.

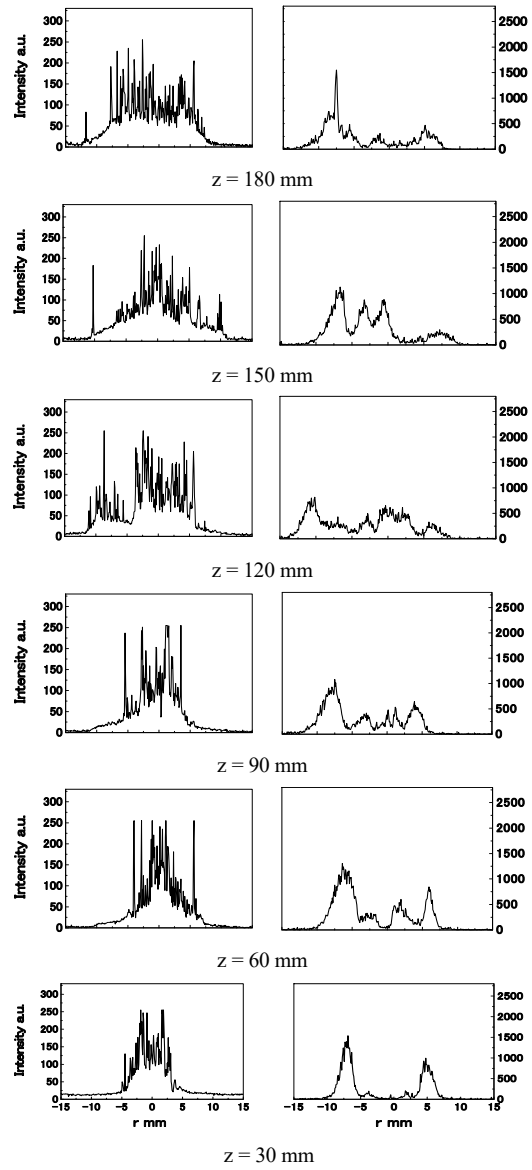
Fig. 9에 미 산란광과 OH-LIF 강도의 상호상관관계 $S_{MS,OH}(\tau)$ 를 나타낸다. 여기서, 가로축 τ 는 미



(a) Mie scattering (b) OH-LIF

Fig. 6. Simultaneous images of Mie scattering of pulverized coal particles and OH-LIF.

산란광에 대한 OH-LIF의 이동 거리이다. 화염의 상류 역에서의 $S_{MS, OH}$ 형상 ($\tau = 0$ mm)는 깊은 구덩이를 갖지만, 미분탄 입자의 휘발과 연소가 진행됨에 따라 양의 피크로 변하고 있다. 이러한 것로부터 연소가



(a) Mie scattering (b) OH-LIF

Fig. 7. Distribution of brightness intensity of Mie scattering images of pulverized coal particles and OH-LIF on the central horizontal line.

진행되면서 미분탄 입자군의 주위에 존재하고 있던 연소반응 영역이 미분탄 입자 군 내부에서도 볼 수 있게 되는 것을 확인할 수 있다.

최근, 연소의 수치 시뮬레이션도 LES (Large Eddy

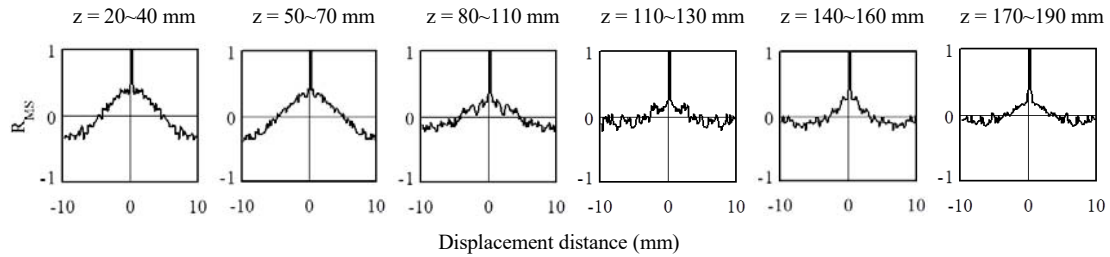


Fig. 8. Auto-correlation coefficient of Mie scattering intensity of pulverized coal particles.

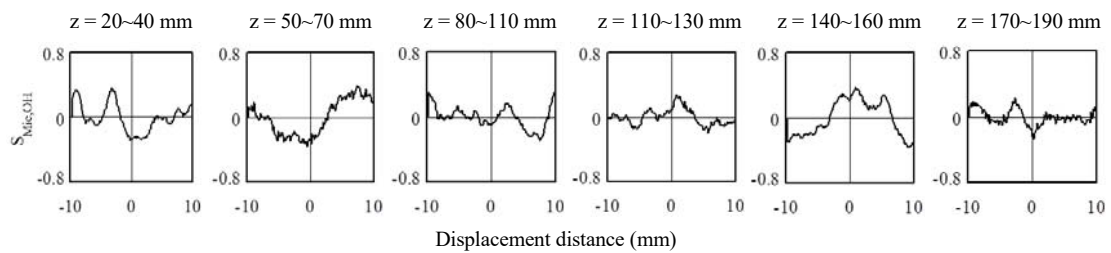


Fig. 9. Cross-correlation coefficient between Mie scattering intensity of pulverized coal particles and OH-LIF intensity.

Simulation)을 기반으로 한 것으로 이행되고 있다. LES에 있어서는 그 정밀도 검증을 위하여 화염의 시간평균 구조뿐만 아니라 화염의 순간구조에 관한 데이터가 필수적이다. 본 연구에서 얻어진 측정결과는 미분탄 연소의 상세구조의 해명뿐만 아니라 미분탄 연소의 수치 시뮬레이션의 정밀도 평가를 위한 데이터 베이스로서도 매우 유효하다고 사료된다.

4. 결론

평면 레이저 유기형광(Planar Laser-Induced Fluorescence, PLIF)을 모델 미분탄 버너에 적용하여 OH 라디칼의 순간 2차원 계측함과 동시에 레이저 시트법에 의한 미분탄 입자의 단면상과의 동시측정을 시행하여 연소반응 영역과 미분탄입자 존재영역과의 위치관계에 대하여 고찰을 하였다. 또한, 화염의 순간구조를 상세히 고찰하기 위하여 OH-LIF 화상의 강도분포와 미분탄입자 단면상의 강도분포를 이용하여 통계해석을 실시한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 본 연구방법에 의해 연소 반응장을 방해하지 않고 난류 미분탄화염 내에서의 연소반응 영역과 미분탄입자 존재영역과의 위치 관계를 조사할 수 있었다.

2) 버너포트 근방의 상류역에서는 메탄의 연소반응 영역이 분류의 조직구조에 의해 말려들어 미분탄입자의 수밀도가 높은 영역 주변부의 산소 공급이 좋은 부분에서만 연소반응이 일어난다. 하지만, 화염의 화류로 가면서 미분탄입자의 온도가 상승하고 휘발분 방출이 진행됨과 동시에 주변 공기와의 혼합이 촉진되어 미분탄입자의 존재영역에 있어서도 연소반응을 볼 수 있게 된다.

3) 본 연구에서 얻어진 화염의 순간구조에 관한 측정데이터는 미분탄연소의 상세한 구조에 대한 해명뿐만 아니라 LES를 기반으로 한 미분탄연소의 수치 시뮬레이션의 정밀도 평가를 위한 데이터 베이스로서도 매우 유효하다고 사료된다.

REFERENCES

- Akamatsu, F., 1996, A Study on combustion behavior of droplet cluster in liquid fuel spray, Ph. D Thesis, Osaka University, Osaka, Japan.
- Chiu, H. H., Kim, H. Y., Croke, E. J., 1982, Internal Group Combustion of Liquid Droplet, *Proc. Combust. Inst.*, 19, 971-980.
- Hino, M., 2002, Spectrum Analysis, Asakura Publishing

- Co., Ltd.
- Hwang, S. M., Kurose, R., Akamatsu, F., Tsuji, H., Makino, H., Katsuki, M., 2005, Application of Optical Diagnostics Techniques to a Laboratory-Scale Turbulent Pulverized Coal Flame, *Energy & Fuels*, 19(2), 382-392.
- Hwang, S. M., Kurose, R., Oomagari, K., Akamatsu, F., Tsuji, H., Makino, H., Katsuki, M., 2003, Proceeding of the 4th Asia-Pacific Conference on Combustion, ASPACC2003, 414-417.
- Hwang, S. M., Kurose, R., Oomagari, K., Akamatsu, F., Tsuji, H., Makino, H., Katsuki, M., 2003, Proceeding of the International Conference on Power Engineering -03 (ICOPE-03), 393-398.
- Hwang, S. M., 2005, A Study on flame structure of Multi-Phase combustion by optical measurement, Ph. D Thesis, Osaka University, Osaka, Japan.
- Hwang, S. M., 2010, A Study on the Particle Behavior in Turbulent Pulverized Coal Flame, *Korean Society of Environmental Engineers*, 32(12), 1111-1118.
- Mokhov, A. V., Levinsky, H. B., van der Meij, C. E., 1997, Temperature dependence of laser-induced-fluorescence of nitric oxide in laminar premixed atmospheric-pressure flames, *Appl. Opt.*, 36(15), 3233-3243.
- Schulz, C., Sick, V., Heinze, J., Stricker, W., 1997, Laser-induced-fluorescence detection of nitric oxide in high-pressure flame with A-X(0,2) excitation, *Appl. Opt.*, 36(15), 3227-3232.
- Thomson, D. D., Kuligowaki, F. F., Laurendeau, N. M., 1997, Background corrections for laser-induced-fluorescence measurements of nitric oxide in lean, high-pressure, premixed methane flames, *Appl. Opt.*, 36(15), 3244-3252.