

# 미분탄의 고효율 연소를 위한 광학계측 적용성 평가 - 세도 도플러 입자 분석계-

황 승 민 | 호서대학교 벤처전문대학원 보건환경과, 교수 | hwangsm@hoseo.edu

정 진 도 | 호서대학교 환경공학과, 교수 | jdchung@hoseo.edu

이 글에서는 미분탄 화염에 적용 가능한 최신 광학계측 기술 중 세도 도플러 입자 분석계(SDPA; Shadow Doppler Particle Analyzer)의 계측기술에 관한 설명과 이를 실험실 규모의 미분탄 화염에 실제 적용하여 미분탄 입자의 속도와 입자형상 및 입경을 동시 계측한 예를 소개한다. 이러한 광학계측 기술은 미분탄 연소나 분무연소 등의 혼상연소를 이용하는 여러 공업장치의 설계나 조작조건 최적화에 도움이 될 뿐만 아니라, 효율적인 에너지 사용을 위한 연소 매커니즘의 해명이나 수치해석 기술의 고도화에 중요한 정보를 얻기 위한 유효한 수단이다.

에너지 정책의 기본적 목표로서는 경제성장(economic growth), 에너지 수요안정(energy security) 및 환경보전(environmental protection)이라고 하는 3E의 동시달성이 불가피하다. 더욱이 에너지 문제는 한 나라의 국내 사정 혹은 경제 정세만으로는 해결할 수 없으며, 국제적인 관계와 지구온난화 문제로 대표되는 환경문제, 그리고 미래에 대한 전망 등 항상 공간적·시간적 확대를 근거로 한 종합적인 시각에서 생각하지 않으면 안 된다.

이러한 상황 속에서 신에너지는 청정한 석유 대체 에너지로서 에너지의 안정공급 및 지구환경보전의 관점에서 매우 중요하며, 그 개발은 석유위기를 계기로 국내외에서 매우 활발히 전개되고 있다. 그러나 현재 개발 중의 각종 신에너지는 기술면, 경제성, 공급량에 있어서 그 수요확대는 현재로서는 불충분하며, 앞으로도 우리의 생활은 석유나 석탄을 비롯한 화석연료에 크게 의존해갈 것으로 예상된다. 따라서 청정하고 동시에 고효율적인 연소를 실현하기 위해서는 연소배기 가스 중의 유해물질을 제거하기 위한 후처리기술의 개발뿐만 아니라 연소과정 그 자체에 대한 제어가 필수불가결하다.

이와 같은 화석연료 중에서도 석탄은 다른 화석연료에 비해 매장량이 풍부하고 산지가 편재되어 있지 않기 때문에 공급안정성이 높고 경제성, 실용성에도 뛰어나 향후 각종 에너지원과의 적절한 조합에 의한 안정공급을 도모하

는데 있어서 매우 중요한 에너지원이기 때문에 다시 주목받고 있다. 현재 가장 일반적인 석탄 이용 방법은 석탄을 평균입경 40 $\mu$ m 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 상당히 복잡한 현상이다. 따라서 그 이론적 취급은 매우 곤란하며, 현재로서는 연소기술 개발의 대부분이 경험 공학적으로 행하여지고 있고, 막대한 경비와 기간을 필요로 한다.

이와 같은 미분탄 연소 기술개발을 효율적으로 추진하기 위해서는 연소 화염 내 입자거동이나 반응에 관여하는 라디칼 농도 등을 정확히 평가하는 것이 중요하다. 이러한 배경 하에서 최근 레이저 등을 사용하는 광학계측 기술이 크게 발전하여 연소장을 어지럽히지 않고 높은 공간·시간 분해능 하에서 화염 내의 입자속도 등의 입자거동이나 연소반응에 기여하는 라디칼의 직접측정이 가능해졌다.

본 총설에서는 미분탄 화염에 적용 가능한 최신 광학계측 기술 중 세도 도플러 입자 분석계와 이를 실제 실험실 규모의 미분탄 화염에 적용하여 미분탄 입자의 속도와 입자형상·입경의 동시계측 기술에 대해 소개한다.

## 세도 도플러 입자 분석계

최근 난류 중의 입자거동을 측정하는 방법으로서 비접촉으로 매우 높은 공간·시간 분해능을 갖는 레이저 계측법이 주목되고 있다. 이 기술은 연소장을 어지럽히지 않고 계측이 가능하며, 프로브나 열전대를 연소장에 삽입하여 측정하는 종래의 방법에서는 계측이 불가능하였던 물리량

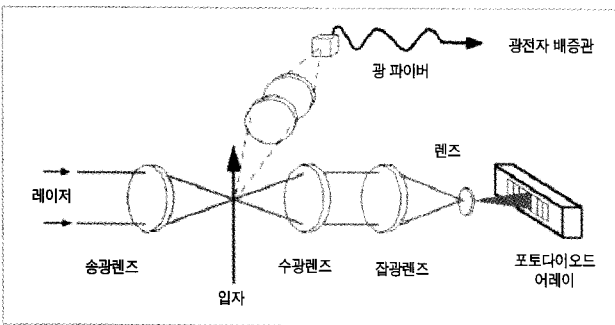


그림 1 SDPA 광학계 시스템

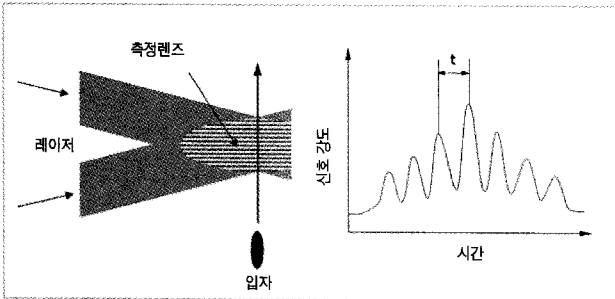


그림 2 측정영역 및 도플러 신호

을 얻을 수 있는 등 많은 이점을 갖고 있다.

현재, 입자 속도에 대해서는 레이저 도플러 유속계(LDV; Laser Doppler Velocimetry)가 일반적으로 이용되고 있다. 그러나 LDV는 입경분포를 갖는 연료입자의 총체적인 속도만을 측정하기 때문에 연소에 따르는 입경변화나 입경별 입자속도 등 상세한 검토가 불가능하다. 그 때문에 현재 입자 속도와 입경을 동시에 측정하는 방법으로서 페이즈 도플러 입자 분석계(PDPA; Phase Doppler Particle Analyzer)가 주로 이용되고 있다. 그러나 PDPA는 입자 산란광을 복수의 디텍터에 의해 검지하여 그 도플러 신호의 위상차와 입자의 곡률과의 관계로부터 입경을 구하는 방식이기 때문에 그 적용은 분무액적 등의 구형입

자에 한정되어 있으며 미분탄 입자와 같은 부정형 입자에 대해서는 측정이 불가능하다. 이러한 배경 속에서 미분탄 입자와 같은 부정형 입자에 대한 속도, 입자형상 및 입경의 동시측정이 가능한 방법으로서 LDV시스템을 확장한 세도 도플러 입자 분석계가 개발되어 주목받고 있다. SDPA는 비접촉 유속측정법으로서 현재 일반적으로 이용되고 있는 LDV에 화상처리 기술을 더 한 것으로서 단일입자 속도와 입경의 동시계측이 가능한 수법이다.

그림 1은 SDPA 광학계의 구성을 나타내고 있다. SDPA는 입자 속도를 측정하는 전방 산란형 LDV 송광계와 측정체적을 통과하는 입자에 의해 생성되는 레이저 광의 세도로부터 입자형상을 구하기 위한 광학계로 구성된다. 이 그림에서 입자형상을 구할 때 필요한 수광렌즈, 대물렌즈 및 포토다이오드 어레이(photodiode array)를 제한 것이 LDV 송광계에 해당한다. 레이저는 빔 분리기에 의해 2개로 분리되어 집과 동시에 렌즈(집점거리 500mm)에 의해 집광되어 그 교차점이 광 강도의 명암(간섭무늬)을 갖는 측정점(측정체적)이 된다. 측정체적의 크기는 직경 128 $\mu$ m, 길이 2.6 $\mu$ m이며, 간섭무늬 간격은 5.27 $\mu$ m이다. 측정점에 도달한 입자는 간섭무늬에 대응한 빛을 산란하며, 그 산란광은 수광 광학계(집점거리 500mm)를 통하여 전기신호(도플러 신호)로 교환된다. 그림 2는 측정점과 도플러 신호를 모식적으로 나타낸 것이다. 이 도플러 신호의 산 부분은 간섭무늬의 밝은 부분(명)에 해당하며 이 산과 산의 시간간격 t를 구하는 것으로 입자속도를 측정하는 것이 가능하다. 즉, 간섭무늬의 간격을  $\delta$ 라고 하면 입자속도 V는 다음의 식으로 주어진다.

$$V = \frac{\delta}{t} \quad (1)$$

간섭무늬의 간격  $\delta$ 는 레이저의 파장 및 두 개의 레이저 교차각도에 의해 기하학적으로 결정된다. 산과 산의 간격 t를 도플러 신호로부터 구하는 방법에 대해서는 몇 가지 방법이 개발되어 있으나, 이 연구에서는 비교적 정도가 좋은 FFT법을 이용하였다.

입자의 2차원 형상은 측정체적을 통과하는 입자에 의해 형성된 레이저 광의 세도를 수광렌즈 및 대물렌즈에 의해

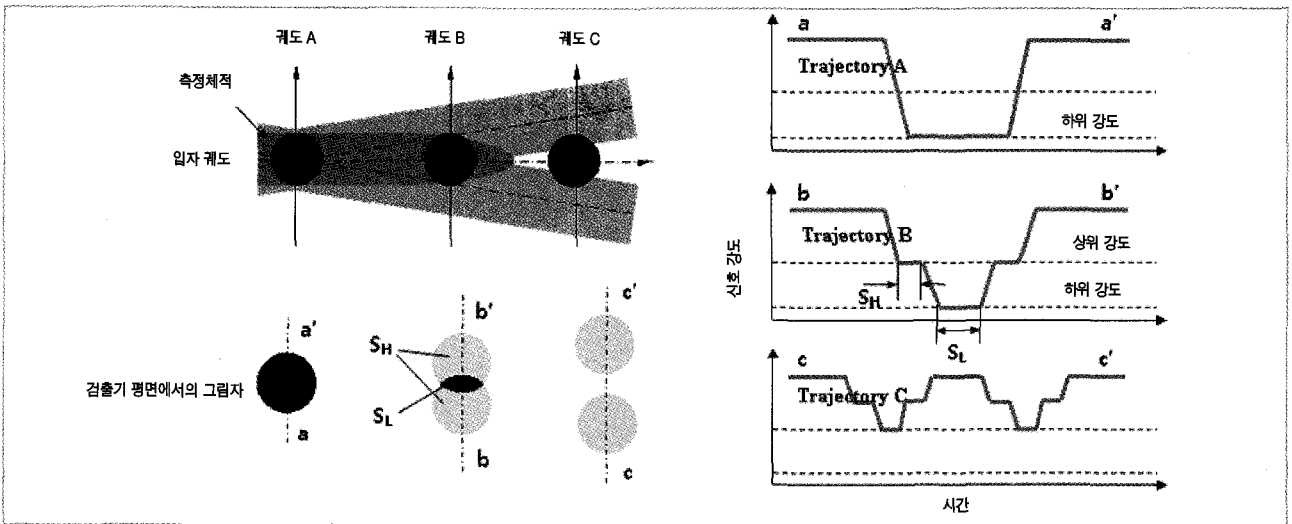


그림 3 측정영역 내 입자동과 위치 및 포토다이오드 어레이 신호강도 변화

64개 픽셀을 갖는 1차원 포토다이오드 어레이 표면에 투영하여 그 투영상의 시계열 데이터와 LDV에 의해 측정된 입자속도의 값으로부터 입자의 2차원 형상이 얻어진다. 입자형상의 측정원리를 설명하기 위해 그림 3에 측정점에서의 입자위치와 투영상의 시계열 데이터 관계를 나타내었다. Trajectory A는 입자가 측정점의 거의 중앙을 통과하는 경우의 입자궤적을 나타내고 있다. 이 경우 포토다이오드 어레이 상의 신호강도는 입자가 측정점에 존재하고 있는 동안

Lower level이 된다. 즉, 입자가 측정점을 통과할 때의 Lower level의 지속시간에 대한 계측결과와 그 입자에 대한 LDV로부터 측정된 속도의 값으로부터 입자상(입자의 2차원형상)이 구해진다. 이에 대하여 Trajectory B는 입자가 측정점의 중앙에서 약간 떨어진 위치를 통과하는 경우의 입자궤적을 나타낸 것으로 입자가 존재하는 위치에 대하여 신호강도가 upper level과 lower level의 두 가지 값을 갖는다. 이 경우는 upper level과 lower level의 지속시간으로부터 입자상이 계측된다.

그림 4는 입자가 측정체적을 통과할 때, 포토다이오드

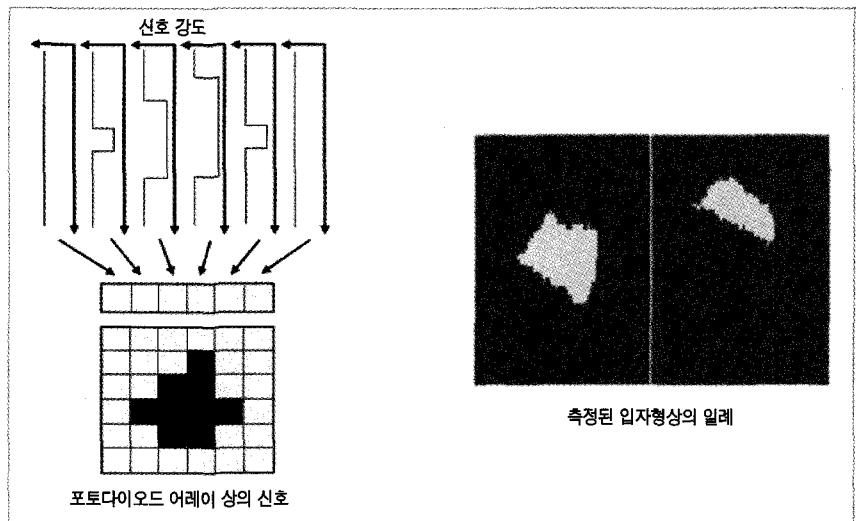


그림 4 입자형상의 산출

어레이 상의 신호와 입자형상의 계측결과의 한 예를 나타낸 것이다. 이 화상을 이용하여 입자가 차지하는 영역의 픽셀수를 카운트하여 입자 투영면적이나 입경(등가원 직경) 등을 구하는 것이 가능하다.

### 미분탄 입자의 속도와 입자형상 · 입경의 동시계측

#### 미분탄 화염의 개요

본 연구에서 대상으로 한 미분탄 화염은 광학계측을 용

이하에 수행하기 위해 실험실 규모의 소형 대기개방형으로 하였다. 난류미분탄 화염의 직접사진(노광시간: 1/8,000s)을 그림 5에 나타내었다. 화염은 버너 근방에서 메탄 파일럿 화염에 의해 미분탄 입자가 착화되어 연소가 진행된다.

표 1 석탄의 성상

High heating value <sup>*1</sup>	29.1MJ/kg
Low heating value <sup>*2</sup>	28.1MJ/kg
Proximate analysis	[wt %]
Moisture <sup>*2</sup>	2.60
Ash <sup>*1</sup>	15.20
Volatile matter <sup>*1</sup>	26.90
Fixed carbon <sup>*1</sup>	57.90
Ultimate analysis	[wt %]
Carbon <sup>*1</sup>	71.90
Hydrogen <sup>*1</sup>	4.40
Nitrogen <sup>*1</sup>	1.5
Oxygen <sup>*1</sup>	6.53
Total sulfur <sup>*1</sup>	0.44
Combustible sulfur <sup>*1</sup>	0.39

\*1 Dry basis, \*2 As received

표 2 실험 조건

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

\* Based on low heating value

사용한 석탄은 뉴란즈탄(Newslands bituminous coal)이며 50%경(질량기준)을 40 $\mu$ m 정도로 분쇄한 것을 이용하였다. 뉴란즈탄의 성상을 표 1에 나타내었으며, 미분탄, 공기 및 메탄 공급량 등 실험조건을 표 2에 나타내었다. 메탄의 공급량은 안정한 미분탄 화염이 형성 가

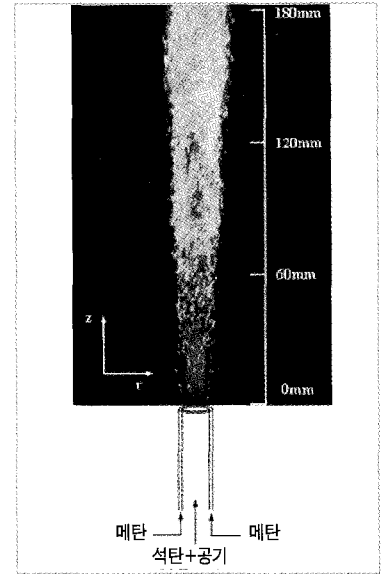


그림 5 난류 미분탄 화염의 직접 사진

능한 최소량으로 설정하였다. 계측 시, 버너출구 단면의 중심을 원점으로 하여 화염하류 방향을 z축, 반경방향을 r축으로 하였다.

### 미분탄 입자의 속도장

그림 6에 SDPA와 LDV에 의해 계측한 버너 중심축 상의 미분탄 입자의 축 방향 속도의 평균값 U와 속도변동 rms(root mean square)값 u'의 분포를 나타내었다. 비연소 시의 미분탄 입자속도의 평균속도는 z가 증가하면서 급히 감속하지만, 연소 시에는 비연소 시와 비교하여 서서히

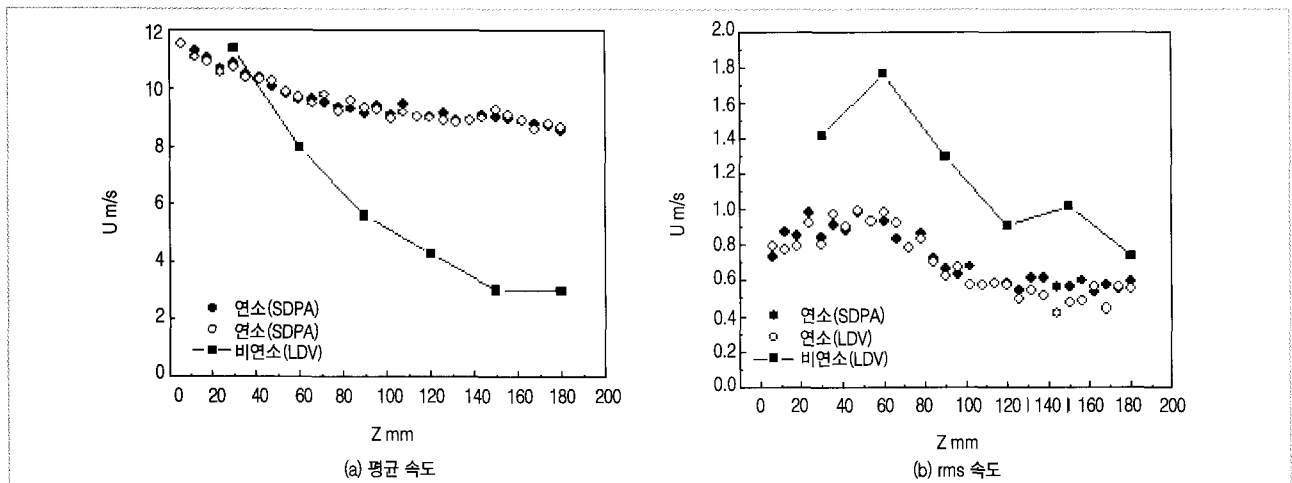


그림 6 SDPA와 LDV에 의해 측정된 미분탄 입자의 평균 및 rms 속도의 축방향 분포

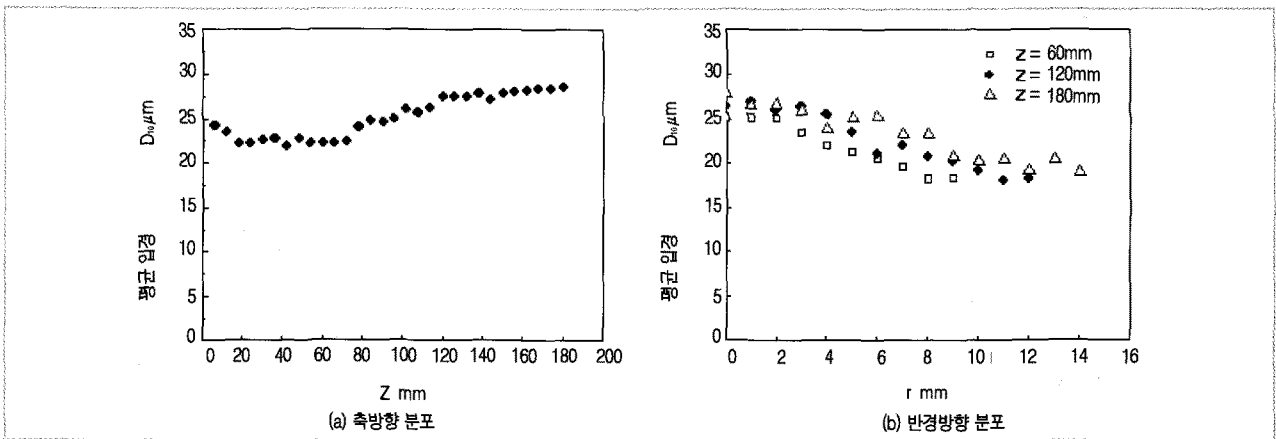


그림 7 SDPA에 의해 측정된 미분탄 입자의 평균입경

감속하고 있다. 이것은 연소반응에 따른 온도상승에 의해 기상의 열팽창이 생기기 때문이다. 한편, 연소 시의 속도 변동 rms값은 비연소시와 비교하여 작은 차이를 나타내고 있다. 연소 시에는 온도가 상승하여 기체 밀도가 저하하고 동점성 계수가 상승하기 때문에 기류의 난류가 제어되기 때문이라고 생각된다.

#### 연소에 따른 입경 및 입자형상 변화

그림 7 (a) 및 (b)에 SDPA에 의해 측정된 미분탄 입자의 평균입경(등가원 직경)의 버너 중심축 및 반경방향의 분포를 나타내었다. 중심축방향의 평균입경 변화를 보면  $z$  증가에 따라 한번 감소한 후 서서히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 증가는 다수의 작은 입경의 미분탄 입자가 휘발분을 방출하고 연소반응에 의해 소실되기 때문이라고 생각되어진다. 한편, 반경방향의 입경분포 변화는  $r$ 이 증가함에 따라 입경이 감소하고 있음을 알 수 있다.

#### 미분탄 입자의 입경별 속도장

본 절에서는 미분탄 입자의 거동을 좀 더 상세히 조사하기 위하여 미분탄 입자의 입경을  $5\mu\text{m}$ 마다 나누어 각 입경별 입자의 속도장을 구하였다. 그림 8 (a)에 버너중심축 상  $z = 60, 120, 180\text{mm}$  위치에서 입경별 축방향 평균속도 및 속도변동 rms값을 나타내었다. 어느 화염높이에서도  $10\mu\text{m}$  이하의 미소입자 속도에 대해서 큰 입경입자의 평균속도가 약간 크지만, rms값은 입경에 관계없이 거의 일정하며, 이

결과로부터 화염 중심부에서는 미분탄 입자의 속도는 입경에 크게 의존하지 않는다는 것을 알 수 있다.(그림 8)

(b)에  $z = 60, 120, 180\text{mm}$ 의 화염 외부에서의 입경별 축방향 평균속도 및 속도변동 rms값을 나타내었다. 큰 입경 입자는 관성력이 크기 때문에 작은 입경입자에 비해 기류의 영향에 의한 입자속도 저하가 작게 나타난다. 이 때문에 어느 화염위치에 있어서도 큰 입경의 입자일수록 입자 평균속도와 속도변동 rms값은 커지며 화염 외부에서의 미분탄 입자속도는 입경에 크게 의존하고 있음을 알 수 있다.

### 맺 음 말

이 글에서는 미분탄 화염에 적용 가능한 최신 광학계측 기술 중 세도 도플러 입자분석계와 이를 실제 실험실 규모의 미분탄 화염에 적용하여 미분탄 입자의 속도와 입자형상·입경의 동시계측 기술에 대해 소개하였다. 이 광학계측 기술은 미분탄 연소나 분무연소 등의 혼상연소를 이용하는 여러 공업장치의 설계나 조작조건의 최적화에 도움이 될 뿐만 아니라, 연소 메커니즘 해명이나 수치해석 기술의 고도화에 중요한 정보를 주기위한 유효한 수단이라고 생각된다.

#### 참고문헌

- (1) S.M. Hwang, R. Kurose, F. Akamatsu, H. Tsuji, H. Makino and M. Katsuki, "Application of optical

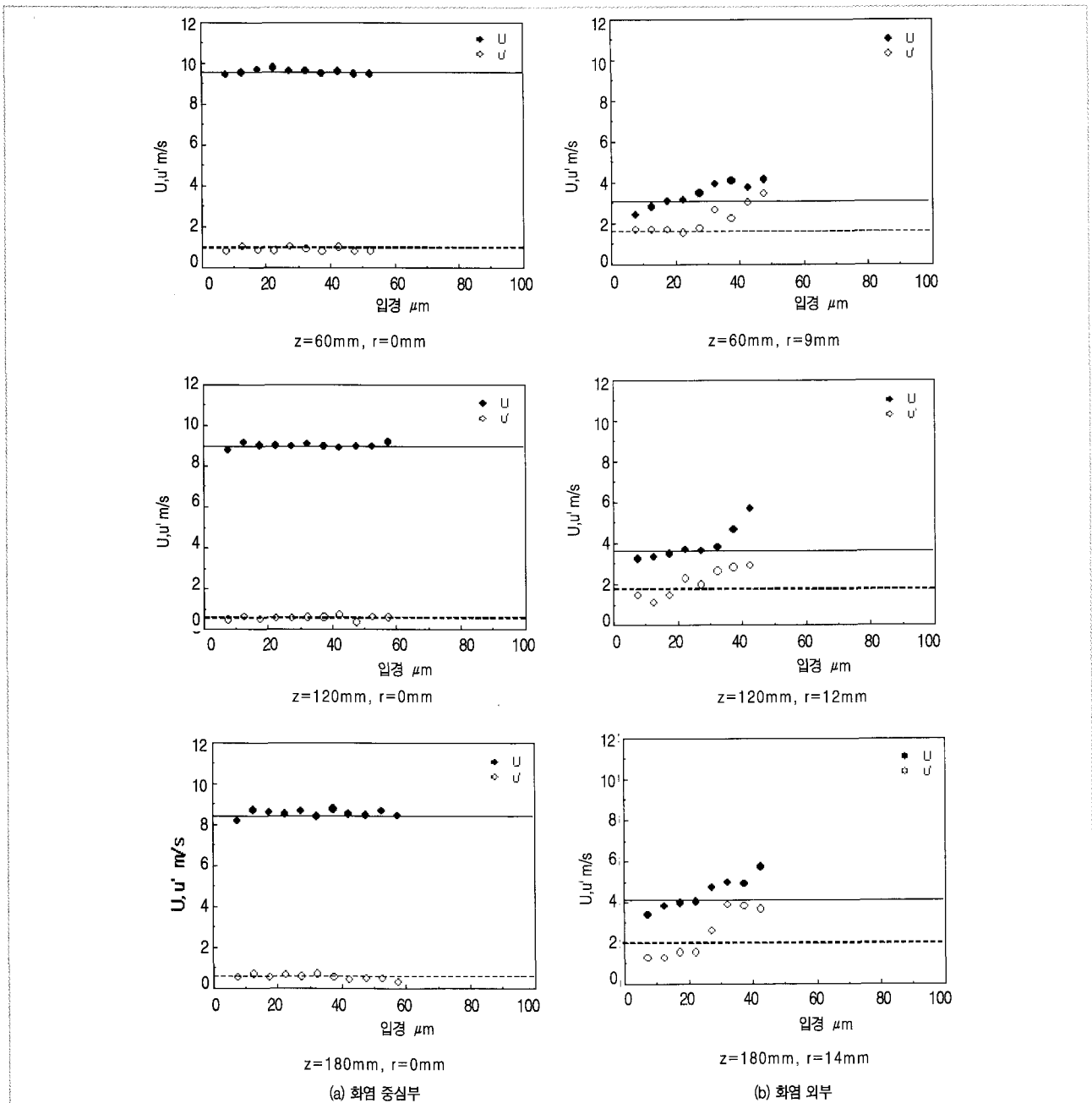


그림 8 입자 크기(5 $\mu$ m)별 평균 및 rms 속도(z = 60, 120, 180mm)

diagnostics techniques to a laboratory-scale turbulent pulverized coal flame”, Energy & Fuels, Vol.19, No.2 (2005), pp. 382~392.

(2) S.M. Hwang, R. Kurose, F. Akamatsu, H. Tsuji, H. Makino and M. Katsuki, “Observation of Detailed Structure of Turbulent Pulverized-Coal Flame by

Optical Measurement (Part 1, Time-Averaged Measurement of Behavior of Pulverized-Coal Particles and Flame Structure”, JSME International Journal Series B, Vol. 49, No. 4 (2006), pp. 1316~1327.