

상호상관 PIV를 이용한 예혼합 분무화염의 계측에 관한 연구

양영준* · 김봉환

진주산업대학교 자동차공학과

(2005년 9월 21일 접수, 2005년 11월 16일 채택)

A Study on Measurement of Premixed Spray Flame using Cross-correlation PIV

Young-Joon Yang^{*} and Bong-Hwan Kim

Department of Automotive Engineering, Jinju National University

(Received 21 September 2005, Accepted 16 November 2005)

요 약

예혼합 분무화염의 상세한 연구기구를 관찰하기 위하여 예혼합 분무화염 중의 분무단면상의 확대촬영과 또한 연소시의 순간적 이차원 유동장을 얻기 위해 미소시간차를 가진 2연속 분무단면 화상에 대해 상호상관 PIV를 적용하였다. PIV에 통상 사용되어지는 펄스 레이저가 아닌 연속발진 레이저를 PIV에 적용하는 기법 등을 나타내었다. 또한 통계적 PIV 해석법을 이용하여 얻은 상호상관 PIV의 결과를 PDA에 의해 측정된 결과와 비교하여, 상호상관 PIV는 PDA의 계측에 의한 결과와 잘 일치한다는 결론에 이르렀다. 연속발진 레이저를 이용한 상호상관 PIV를 예혼합 분무화염에 적용하여 본 연구에서 적용한 기법이 분무화염의 구조를 관찰하는데 매우 유용함을 검증하였다.

주요어 : 예혼합 분무연소, 확대촬영, 이차원 유동장, 상호상관 PIV, PDA

Abstract — In an attempt to elucidate combustion mechanism of premixed spray flame in detail, both the enlarged photographing, which was performed for spray cross-sectional images of premixed spray flame, and the cross-correlation PIV, which was performed for consecutive time-series images to obtain instantaneous two dimensional flow field, were applied. This study indicated that CW laser as well as pulse laser could be applied for PIV. Furthermore, the results of cross-correlation PIV, which was self-made PIV program, was shown in good agreement with those of PDA. Therefore, it was verified that cross-correlation PIV using CW laser in this study could be effectively used for observing structure of premixed spray flame.

Key words : Premixed spray combustion, Enlarged photographing, Two dimensional flow field, Cross-correlation PIV, PDA

1. 서 론

분무연소는 디젤엔진 및 가솔린엔진을 비롯하여 각종 연소기, 공업로 등에 폭넓게 이용되어지고 있다. 그러나

그 연소기구는 지금까지도 충분히 해명되어져 있지 않으며 분무연소기의 설계·개발에 있어서 연소효율의 향상, 유해물질의 배출억제 등을 달성하려면 실험과 수치 해석을 반복하여 최적의 연소기 형상과 운전조건 등을 찾아내야 한다^{[1][2]}. 그러나 여전히 기술자의 경험에 의지하는 부분도 많이 남아있다. 장래에는 유해물질의 배출 규제가 더 엄격해질 것은 자명한 일이며 기술자의 경험에 의지하기보다도 신뢰성을 높은 수치시뮬레이션에 의한 고효율적인 분무연소기의 개발·설계가 더욱 요구되

*To whom correspondence should be addressed.
Department of Automotive Engineering, Jinju National University
Tel: 055-751-3646
E-mail: yangyj@jinju.ac.kr

어지고 있다^[64].

그러나 분무화염은 다수의 유적(droplet)으로 구성되어져 있기 때문에 엄밀한 수치시뮬레이션을 행하기 위해서는 각각의 유적의 거동을 추적함과 동시에 기상(gas phase)과의 상호작용도 고려하여야만 한다. 각각의 유적은 입경, 속도, 운동방향이 다르기 때문에 그 계산은 극도로 복잡하다. 실용연소로의 개발을 위해 수치시뮬레이션으로 개발을 행한다는 관점으로부터 분무연소의 본질을 파악한, 보다 정확한 분무연소 모델을 구축하는 것이 필요불가결하다. 이를 위해서는 지금까지 해명되지 않은 부분이 남겨져 있는 분무화염의 기초적인 연소거동을 실험적으로 해명하고 그 연소 메커니즘을 파악하는 것이 중요하다. 분무연소에는 액체연료의 미립화, 주위 공기와의 혼합, 증발, 연소라고 하는 많은 과정이 존재하고 또한 이들 각 과정이 서로 깊게 영향을 끼치고 있기 때문에 그 연소형태는 상당히 복잡하다. 또한 실용연소로의 분무화염에 있어서 특유의 연료 유적의 입도분포나 시간적·공간적 불균일성과 더불어 유동장 자체도 상당히 복잡하다.

따라서 분무연소의 기초적인 연소기구를 관찰하기 위해서는 그에 적합한 연소장을 선택하는 것이 중요하다. 이를 위해 Mizutani *et al.*^[65]은 액체의 미립화 직후의 복잡성을 추측하고 유동장을 단순화한 예혼합 분무화염을 분무연소 연구에 도입하였다. 그 후 Akamatsu *et al.*^[66]은 동일한 예혼합 분무버너에 수소화산 파이로트버너를 첨가하여 연소성을 향상시킨 후 화염발광신호와 PDA를 이용하여 유적입경과 속도의 동시 시계열계측을 행하고 분무화염의 유적군 연소형태의 상세한 해명을 시도하여 예혼합 분무화염의 연소기구에 대하여 상세하게 고찰하였다. 또한 Chiu *et al.*^[71]이 제창한 균연소수를 실험적으로 구하는 것에 성공하여 그 균연소수는 평균적으로 관찰되어지는 연소상태와 일치한다는 결과를 얻었다. 계속하여 Tsushima^[8]는 동일한 예혼합 분무화염에 대해 고속도 CCD 카메라와 아르곤 이온 레이저를 이용하여 예혼합 분무화염중의 분무단면상을 시간 연속적으로 관찰하였다. 또한 개발된 광학적 수광프로브인 다파장 고공간분해능 집광프로브(Multi-color Integrated Cassegrain Receiving Optics (MICRO))^[9]를 이용하여 화염중의 국소영역으로부터의 화염발광 신호를 계측하였다. 이와 같이 Tsushima는 현상을 시간평균화하지 않고 연소거동을 관찰하여 예혼합 분무화염의 거시적인 연소거동에 관하여 고찰하였다.

Fig. 1은 Tsushima *et al.*^[10]이 행한 레이저 시트에 의해 가시화된 분무류의 시계열 화상이다. 그림 안의 화살표로 나타낸 것처럼 상당히 빠른 속도로 분무류가 반경방향으로 침식되어 부분적으로 소실하는 거동이 관찰되었다. 그 결과 예혼합 연소적인 선택적 화염전파에 의

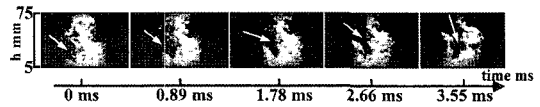


Fig. 1. Example of time-series images for preferential flame propagation in premixed spray stream.

해 분무류가 분단되고 유적클러스터가 형성된다는 결론에 이르렀다. 그러나 이 분무류의 소실이 선택적 화염전파에 의한 것이 아닌 유동장의 와류운동에 기인하는 것이 아닌가 하는 의문이 PDA에 의한 시간평균적인 유동장 계측에서는 남아 있었다.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구토대 위에 보다 향상된 예혼합 분무화염의 상세한 연소기구를 관찰하는 것을 목적으로 한다. 예혼합 분무화염의 상세한 구조를 관찰하기 위해 분무단면상의 확대촬영을 행하고 액체연료분무의 소실 및 연소거동에 관한 고찰을 하였다. 또한 얻어진 화상에 대해 상호상관 PIV를 적용함으로써 지금까지 행해져 온 시간평균적인 유동장 계측이 아닌 순간적인 유동장을 이차원적으로 도출하였다. 상호상관 PIV에 의해 도출되어진 순간적인 이차원 유동장을 PDA의 결과와 비교함으로써 그 신뢰성을 검증하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 예혼합 분무버너

본 실험에서는 미립화 과정이 완료된 유적을 공기류에 부유시켜 유적과 기상의 슬립속도(slip velocity)를 최대한 억제함으로써 유동장을 단순화한 예혼합 분무화염을 계측대상으로 하였다. Fig. 2에 예혼합 분무버너의 구조를 나타낸다. 연료펌프에 의해 연료탱크에서 버너포트(burner port) 상류 440 mm에 설치된 2유체 분사노즐로 보내어진 액체연료(시판의 백등유)는 압축기에서 공급된 무화용 공기로 미립화 된다. 이때 유적수밀도가 거의 같은 분무원추의 중앙부만이 버너포트에 보내어지고 분무 주변부는 드레인(drain)으로 배출되는 구조로 되어 있다. 버너포트는 내경 52.7 mm의 스테인레스로 주위에 폭 1 mm의 수소화산 파이로트 버너를 가지고 있다. 그 외주부에는 내경 58.7 mm, 외경 80.9 mm의 환상의 유로가 있고 여기에 주류(main flow)와 동축·동속의 공기류를 흘려 보냄으로써 화염을 안정시킴과 동시에 분무유선이 넓어지는 것을 억제하는 구조로 되어 있다. 연소용 공기는 송풍기에서 맥동억제용 용기를 통과한 후 오리피스를 통해 버너 하부에서 공급된다. 연소용 공기는 2유체 분사노즐 위의 좁은 환상영역을 통과해 연료분무와 혼합되어 예혼합 분무류로서 버너포트에서 연적

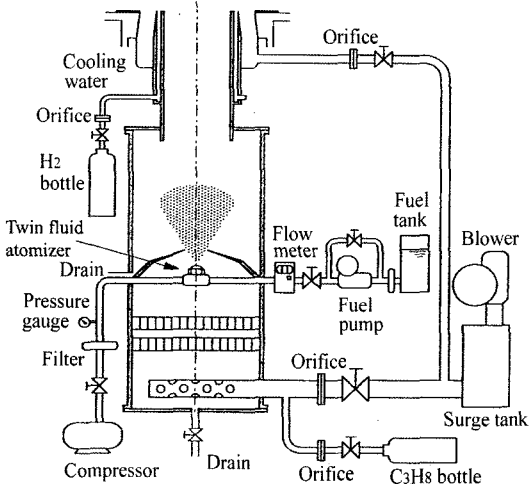


Fig. 2. Structure of premixed spray burner.

상방으로 분출되어 화염을 형성한다. 파이로트 화염용의 수소는 오리피스를 통과한 후 환상의 파이로트 버너에서 분출되어 파이로트 화염을 형성한다. 역화시의 대책으로서 탄산가스를 연료분사실의 하부로부터 분출할 수 있는 구조로 되어있다. 실험조건은 연소용 공기의 출구 단면 평균유속 5.5 m/s, 등유-공기 질량 유량비 0.045 kg_{fuel}/kg_{air}(당량비 0.75에 상당), 무화용 공기압력 0.4 MPa로 하였다. 좌표축은 버너포트 중심을 원점으로 하여 화염 하류방향에 h축, 반경방향에 r축을 취하였다.

2-2. 확대촬영 광학계

본 실험에서는 예혼합 분무화염의 상세구조를 관찰하기 위하여 분무단면상에 관한 확대촬영을 하였다. 그 촬영광학계를 Fig. 3에 나타내었다. 아르곤 이온 레이저(NEC, GLG3460 시리즈, 발진파장 : 514.5 nm)로부터의 레이저광은 반사미러에서 반사된 후 원통렌즈(cylindrical lens)에 의해 버너중심축을 포함한 수직단면을 조사하는 두께 약 0.3 mm의 시트 광(sheet beam)이 된다. 레이저 시트광에 의해 조사된 유적으로부터의 Mie 산란광상은 공간섭 필터(日本光學, 중심파장 : 514.5 nm, 반치폭 : 1.8 nm)을 통해 배경광을 제거한 뒤 카메라 렌즈(Nikon, 초점거리 : 50 mm, f 값 : 1.2), Extension Tube(COSMICAR/PENTAX, ITEM No. EX-C6)를 통과한 후 Image Intensifier(I.I., Hamatsu photonics, C6653MOD)에 의해 증폭되어 레이저 시트에 수직방향으로 배치된 CCD 카메라(Kodak MEGAPLUS Camera Model ES 1.0)에 의해 촬영된다. Extension Tube는 화상을 확대하기 위해 사용되었다.

촬영영역은 Fig. 4에 나타난 것처럼 실제 공간이 약

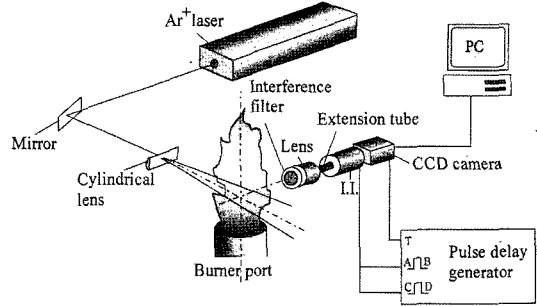


Fig. 3. Experimental apparatus.

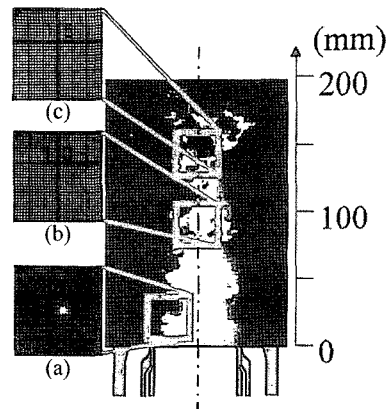


Fig. 4. Photographing region of spray cross-sectional images.

30×30 mm인 3영역에 대해 행하였다. 3영역은 예혼합적인 화염전파가 일어나고 있는 영역인 h=30~60 mm, r=2~32 mm의 영역((a), 이후 상류역이라 부른다), 연속 분무류가 분단되어 유적클러스터의 형성이 빈번하게 일어나고 있는 영역인 h=80~110 mm, r=15~15 mm인 영역((b), 이후 중류역이라 부른다), 연속 분무류는 존재하지 않게 되고 유적클러스터가 확산적으로 연소하고 있는 영역인 h=130~160 mm, r=15~15 mm인 영역((c), 이후 하류역이라고 부른다)이다⁸⁾. 더욱이 본 실험에서는 얻어진 화상에 대해 상호상관 PIV를 적용하여 상류역, 중류역, 하류역에서의 순간적인 이치원 유동장을 구하였다. 상호상관 PIV를 적용하기 위해서는 미소시간 간격을 가진 2연속 화상을 촬영할 필요가 있다. 이 때문에 본 실험에서는 CCD 카메라를 트리거 이중노광(triggered double exposure) 모드에서 사용하였다.

이 모드에서는 Fig. 5에 나타난 것처럼 펄스지연장치(PDG(pulse delay generator), STANFORD RESEARCH SYSTEM, MODEL DG535)로부터의 TTL 신호에 의해 CCD 카메라가 제 1노광 255 μs, 제 2노광 33 ms에

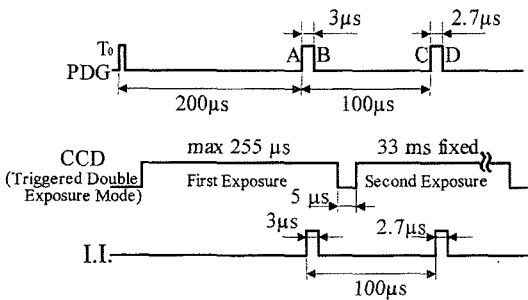


Fig. 5. Synchronized timing between CCD camera and I.I. by PDG.

서 셔터를 닫는다. 제 1노광과 제 2노광의 시간간격은 5 µs이다. 통상 상호상관 PIV를 적용하기 위해 미소시간 간격을 가진 2연속화상을 촬영하기 위해서는 제 1노광, 제 2노광 각각에 있어서 Nd-YAG 레이저 등의 펄스레이저를 조사하여 유체에 혼입된 시드 입자(seed particle)로 부터의 산란광상을 촬영함에 의해 고속에서 변동하는 현상을 순간적으로 잡아내는 방법을 취한다. 그러나 본 연구에서는 연속발전 레이저인 아르곤 이온레이저를 이용하고 있고 또한 화상회도의 증폭이 필요하기 때문에 Fig. 5에 나타난 것처럼 CCD 카메라의 제 1노광, 제 2노광 각각에 있어서, I.I.에서 시간간격 100 µs의 미소 시간간격을 가진 2연속화상을 촬영하였다. 또한 I.I. 고속셔터의 개방시간은 CCD 카메라의 제 1노광에 있어서는 3 µs, 제 2노광에 있어서는 2.7 µs로 하였다. 얻어진 화상은 유효 화소수 1008×1018 pixel(실공간에서 약 30×30 mm에 대응)이며 퍼스널 컴퓨터(DELL, Model No. MMP)에 디지털 기록되어진다.

2-3. I.I. 셔터 개방시간의 최적화

Fig. 5에 나타난 것과 같이 본 실험에 있어서 제 1노광과 제 2노광에서 I.I. 셔터의 개방 시간이 다른 것은, 만약 셔터의 개방시간을 동일하게 하면 CCD 카메라의 노광시간이 제 1노광과 제 2노광에서 상당히 다르기 때문에 촬영되는 화상이 첫째 장은 어둡게, 둘째 장은 밝게 되어 버리기 때문이다. 따라서 두장의 화상의 밝기를 동일하게 하기 위하여 제 2노광에서의 I.I.의 셔터 개방시간을 짧게 함으로서 화상회도를 보정하였다. 이 보정을 위해서 CCD 카메라 제 2노광에서의 I.I. 셔터의 개방시간은 어느 정지물에 대해 I.I. 셔터 개방시간을 여러 가지로 바꿔 촬영함에 의해 결정하였다.

2-4. 상호상관 PIV를 이용한 순간적 이차원유동장의 도출방법

PIV(particle image velocimetry)는 크게 나누어 자기

상관 PIV와 상호상관 PIV의 2종류가 있다. 두 경우 모두 입자화상을 이용하여 입자군의 이동을 추적함으로써 속도의 공간 분포를 구하는 방법이지만, 자기상관 PIV에서는 미소 시간간격을 가진 이중노광에 의해서 한 장의 화상에 두 시각의 입자분포를 겹쳐 촬영하여 그 화상의 자기상관에서 입자군의 이동을 산정하기 때문에 유속의 방향이 확인되지 않을 뿐더러 오차가 발생하기 쉽다⁽¹¹⁾. 따라서 본 연구에서는 미소시간 간격을 가진 2장의 화상을 촬영하고 이 2장의 입자화상의 상호상관에 의해 유속의 순간적 이차원분포를 구하였다. 통상 PIV를 적용하기 위해서는 유동장에 추적입자(tracer particle)를 혼입하고 그 입자군의 이동을 추적할 필요가 있지만 본 실험에서 대상으로 하는 예혼합 분무화염은 연료유적 자체가 추적입자의 역할을 하기 때문에 입자의 혼입은 필요하지 않다. Fig. 6에 상호상관 PIV에 의한 순간적 이차원 속도분포 측정의 개략도를 나타낸다. x는 반경방향 거리, y는 축방향 거리를 나타낸다. 본 실험에서는 계산시간의 단축을 위해 1008×1018 pixel의 원 화상(original image)을 3분의 1로 압축한 336×340 pixel의

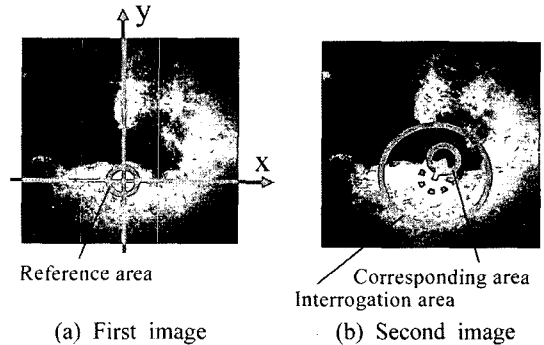


Fig. 6. Measurement of instantaneous two dimensional velocity distribution by cross-correlation PIV.

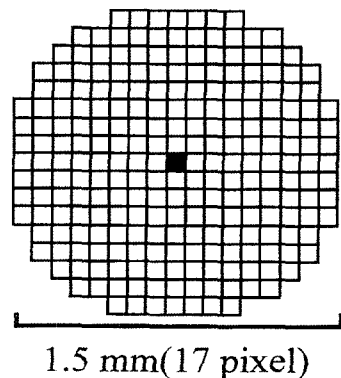


Fig. 7. Schematic diagram of reference area.

화상에 대해 자작의 상호상관 PIV 프로그램을 적용하여 상호상관계수를 계산하였다. 상호상관계수의 계산은 먼저 첫 번째 장의 화상에서 Fig. 7에 나타난 것과 같은 작은 영역을 설정하고 이것을 기준영역(reference area)으로 한다. 본 실험에서는 직경 17 pixel(실공간에서 직경 1.5 mm에 상당)의 원으로 선정한 영역을 기준영역으로 하였다. 다음의 두 번째 화상에서는 기준영역의 중심을 원점으로 하고 설정한 수사영역(interrogation area)의 중심점 $p(x, y)=p(0, 0)$ 에 있어서 임의의 근방점 $q(k, l)$ 를 중심으로 하는 영역(크기는 기준영역과 동일) 중의 화상위도 패턴과의 상호상관계수 $R_g(k, l)$ 를 계산한다.

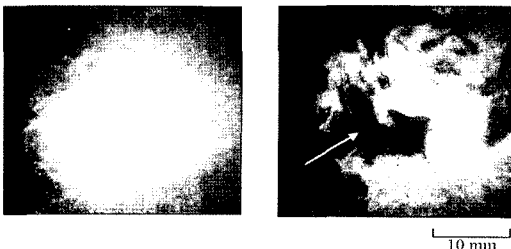
$$R_g(k, l) = \frac{\sum_i (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_i (f_i - \bar{f}_i)^2 (g_i - \bar{g}_i)^2}} \quad (1)$$

단, 첫 번째 장의 화상에 있어서 기준영역의 강도레벨을 $f_i(0, 0)$, 두 번째 장의 화상에 있어서의 기준영역의 강도레벨을 $g_i(k, l)$ 로 한다. 또한 \bar{f}_i , \bar{g}_i 는 기준영역 내의 강도레벨의 공간평균치를 나타낸다. 이 상호상관계수 $R_g(k, l)$ 이 최대값을 취하는 공간적 위치(corresponding area)에 첫 번째 장의 화상의 기준영역이 이동했다고 생각하고 그 이동거리와 방향에서 입자군의 속도벡터를 구한다. 본 실험에서는 속도벡터를 전 픽셀(336×340 pixel)에 대해서 산출하고 상관계수가 0.7 이상의 벡터만을 유효한 결과로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 분무단면 확대화상(화상크기 : 30×30 mm)

Fig. 8(a), (b)에 상류역($h=30\sim60$ mm, $r=2\sim32$ mm)의 경우의 분무단면 화상의 예를 나타낸다. (a)는 비연소시, (b)는 연소시의 화상이다. 우선 (a)의 비연소시의 화상을 관찰하면 분무의 농도는 균일하지 않지만 연속분무류로서 존재하고 있고 명확한 경계를 가진 유적클러스터는



(a) Case of no combustion (b) Case of combustion

Fig. 8. Example of spray cross-sectional images (upstream region).

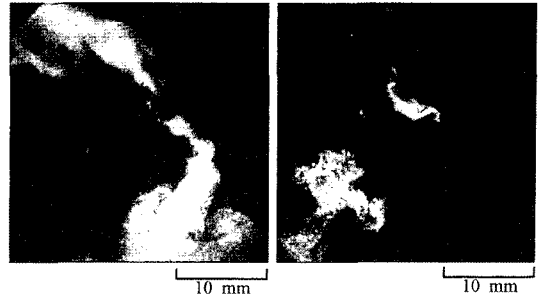


Fig. 9. Example of spray cross-sectional images (middle-stream region, case of combustion).

존재하고 있지 않아 예혼합분무의 조건이 달성되어져 있다. 또한 분무의 경계도 거의 유동에 평행으로 존재하고 있다. 한편 (b)의 연소시에는 그림 내에 화살표로 나타난 것처럼 분무류의 일부가 반경방향으로 침식되어 부분적으로 소실되어 있는 모습이 확인된다. 이 분무류의 소실은 연소거동에 기인해서 일어나는 현상이며 Tsushima^[8]가 고속도 CCD 카메라를 이용하여 시간연속적으로 촬영한 예혼합 연소적인 선택적 화염전파가 일어나고 있다고 여겨진다.

Fig. 9에 중류역($h=80\sim110$ mm, $r=15\sim15$ mm)에서 촬영된 화상내의 전형적인 분무단면 화상의 예를 나타낸다. 왼쪽의 그림은 연속분무류가 분단되는 순간이 가시화 되어있고 오른쪽 그림은 이미 연속분무류가 분단되어 유적클러스터가 형성되어 있는 모습이 가시화되어 있다. 이 차이는 상류역에서의 화염전파가 어떻게 일어났는가에 기인한다고 예상되어진다. 즉 오른쪽의 그림과 같이 유적 클러스터가 형성되어 있는 경우는 이미 화염전파가 일어나기 쉬운 영역에 “선택적으로” 예혼합 연소적인 화염전파가 일어나고 연소성이 낮은 영역이 존재하고 있다고 예상되어진다. 이와 같이 관찰영역이 같아도 촬영되는 화상에 차이가 관측되어지는 것도 분무 화염의 특성중 하나인 분무의 시간적·공간적 불균일성에 기인한다.

Fig. 10에 하류역($h=130\sim160$ mm, $r=15\sim15$ mm)에서의 분무단면 화상의 예를 나타낸다. 이 그림으로부터 하류역에서 연속분무류는 존재하지 않고 유적클러스터만이 관찰되고 있다. 또한 이 영역에서 화상을 촬영하면 분무상이 촬영되지 않는 경우도 있었다. 그 이유는 이 영역보다도 상류 측에서의 분무가 모두 연소되어 버렸기 때문이라고 여겨지며 결국 이 영역에서 관찰되는 유적클러스터는 이 영역보다도 상류 측에서 모두 연소될 수 없었던 분무영역이며 클러스터 자신이 연료중기의 공급원이 되어 외부로부터 확실적으로 완만한 연소반응이 일어나고 있다고 여겨진다.

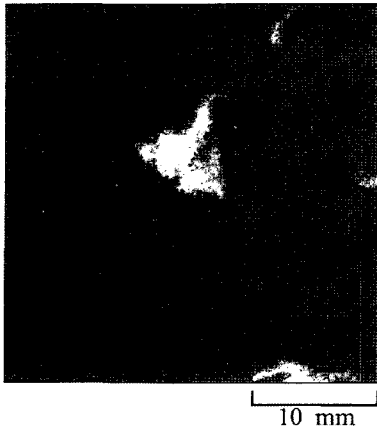


Fig. 10. Example of spray cross-sectional image (downstream region, case of combustion).

3-2. 상호상관 PIV에 의한 순간적 이차원 유동장

본 항에서는 분무류의 소실이 화염전파에 의한 것이 아닌 유동장의 와류운동에 기인하는 것이 아닌가 하는 의문에 대한 답을 얻고자 한다. 이를 위해 촬영한 분무 단면화상과 그 화상에 대해 상호상관 PIV를 적용해 얻어진 순간적 이차원 속도장으로부터 분무단면형상과 유동장의 관계에 대해서 고찰을 한다.

Fig. 11에 상류역에서 촬영된 2연속 화상에 대해 상호상관 PIV를 적용함에 의해 얻어진 순간적 이차원 유동장을 나타낸다. 그림에는 원래의 화상(분무화상)도 겹쳐서 나타내고 있다. Fig. 11에 나타난 속도벡터는 각 속도벡터의 시작점을 중심으로 하여 그 주위의 직경 1.5

mm의 원 영역에 포함되는 벡터를 평균해서 산출한 것이다. 그림에 나타난 속도벡터내의 분무가 가시화되어 있는 영역내(하얀 영역)의 벡터에 주목하면 그 유동장에는 약간의 교란(disturbance)이 관찰되기는 하나 대부분의 벡터는 거의 수직방향을 향하고 있음을 알 수 있다. 특히 분무류가 부분적으로 소실하고 있는 영역(그림 중에 원으로 둘러싼 부분)에 주목하면 이 영역을 둘러싼 분무 영역에 있어서도 벡터가 거의 수직방향을 향하고 있음을 알 수 있다. 이것은 분무류의 부분적인 소실이 유동장의 와류운동에 기인하는 것이 아니라는 것을 나타낸다. 더욱이 분무가 가시화되고 있는 영역의 외측(검은 영역)에도 속도벡터가 산출되어 있다. 이 영역에서는 벡터가 분무경계방향을 향하고 있는 것이 많이 확인 된다. 이것은 이 영역에서는 유적 자체의 이동에 의한 휘도의 불균일성보다 유적이 완전히 소실해 가는 경계의 휘도의 불균일성이 지배적이 되기 때문에, 이 경계의 이동을 쫓고 있기 때문이라고 예상되어진다. 이후 이 경계를 완전소실경계라고 부르기로 한다. 전술한 것처럼 이 분무류의 소실은 연소거동에 기인해서 일어나는 현상이다. 즉 상류역에서 분무류의 소실은 유동장의 영향이 아니고 화염전파에 의해 일어나고 있다고 여겨진다. 이와 같이 생각하면 완전소실경계의 이동을 나타내는 벡터는 화염전파속도를 나타내고 있다고 생각할 수 있다. 그러나 여기서는 화염발광의 계측을 하고 있지 않으므로 완전소실 경계의 이동이 화염전파에 의한 것이라고 단정할 수 없다. 따라서 이를 더욱 명확히 하기 위해서는 추후 국소영역으로부터의 화염발광 계측을 병행함에 의해 화염전파 속도에 대해 고찰을 추가하여 확인하는 것이

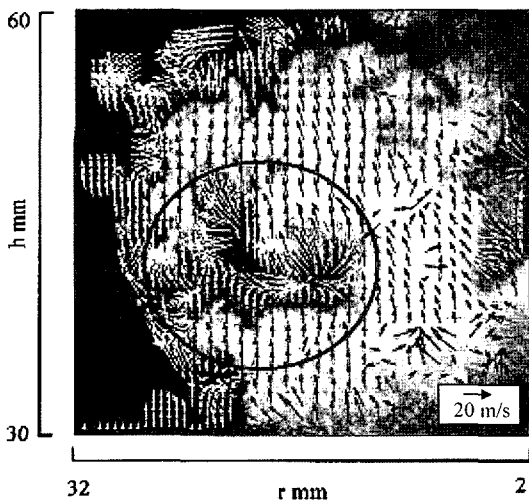


Fig. 11. Example of instantaneous two dimensional flow field (upstream region).

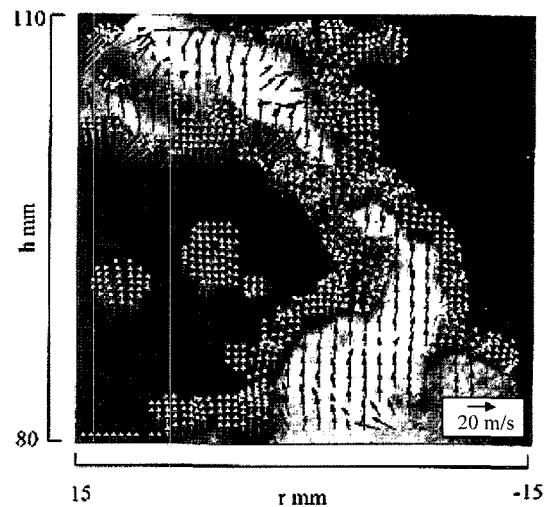


Fig. 12. Example of instantaneous two dimensional flow field (middlestream region).

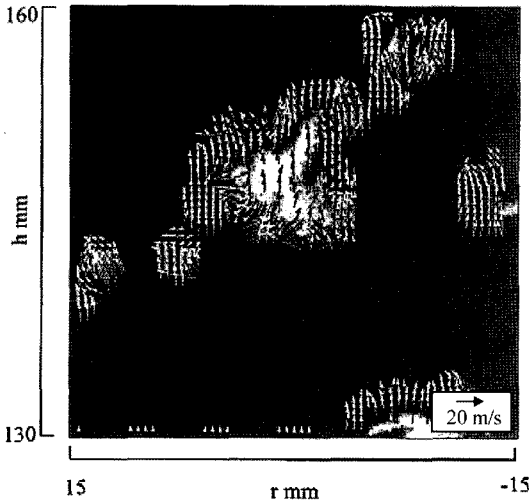


Fig. 13. Example of instantaneous two dimensional flow field (downstream region).

필요하다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 중류역, 하류역에서 촬영된 화상과 상호상관 PIV에 의해 계산된 유동장을 겹쳐서 함께 표시한 것이다. 위의 그림들 모두 상류역과 비교하면 유동장의 교란은 약간 커지기는 하지만 분무가 가시화되어 있는 영역에서 속도벡터는 거의 수직방향을 향하고 있기 때문에, 유동장의 외류운동이 아니라 연소거동에 의하여 분무류가 분단되어 클러스터가 형성되어가는 모습을 나타내고 있다.

3-4. PIV에 의한 유동장과 PDA 제측에 의한 유동장의 비교

본 항에서는 상호상관 PIV에 의해 계산된 순간적 이차원 유동장의 타당성을 검토하기 위하여 기존의 PDA를 이용하여 제측된 시간평균 유동장의 제측결과와 비교하였다. Fig. 14에 Tsushima *et al.*^[12]에 의해 제측된 유적입경 D와 입경마다의 버너 축방향 속도의 평균값

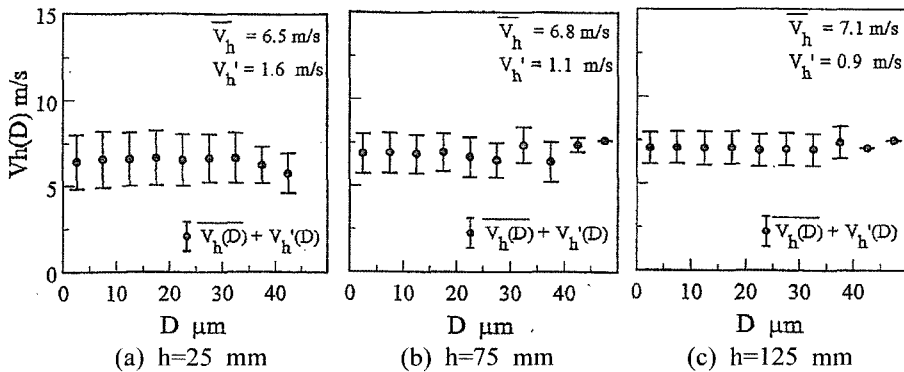


Fig. 14. Mean and rms values for droplet velocity of axial direction.

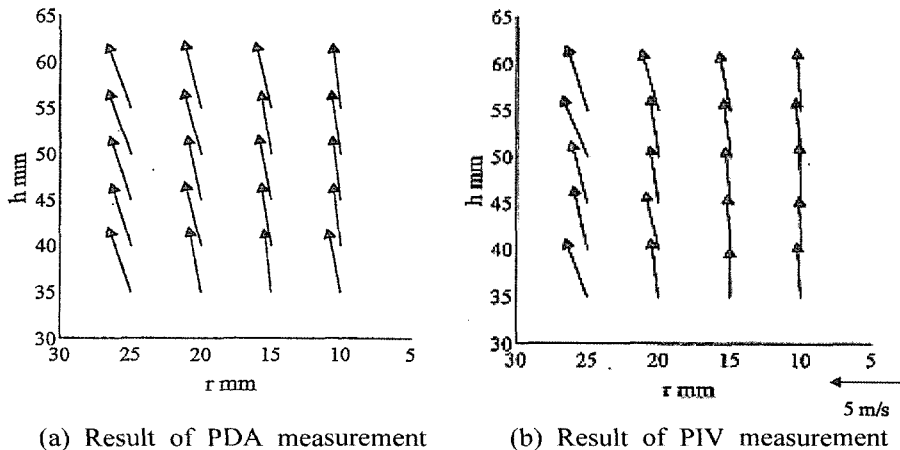


Fig. 15. Mean velocity vector of flow field.

$\overline{V}_r(D)$ 의 관계를 나타낸다. 계측위치는 반경방향은 모두 $r=15$ mm, 높이방향은 (a) $h=25$ mm, (b) $h=75$ mm, (c) $h=125$ mm이다. 이 그림에서 어느 위치에서나 입경에 의한 속도차는 작고 전 유적에서 산출한 속도벡터가 유동장 전체의 특성을 표현하고 있는 것을 알 수 있다. 즉 PIV를 적용하여 유적군의 이동을 계측함으로써 본 실험에서 이용한 예혼합 분무화염의 유동장을 포착할 수 있다.

Fig. 15의 (a)에 상류역에서 PDA를 이용하여 계측된 평균유동장 벡터를, (b)에 상호상관 PIV를 이용하여 계

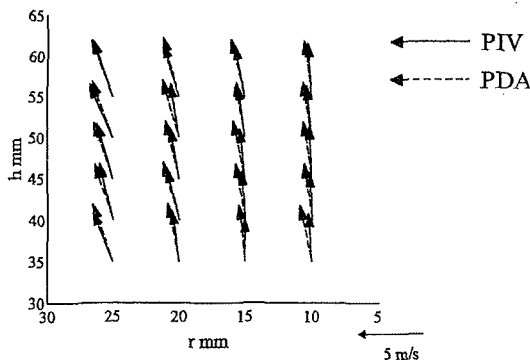


Fig. 16. Comparison of mean velocity vector between PIV and PDA.

산한 유동장을 나타낸다. (b)에 나타난 속도 벡터는 PDA의 계측점에 대응하는 점을 중심으로 하여 주위 1 mm 각의 범위 에 포함되는 벡터를 300 세트의 PIV 계산결과로부터 전부 골라내어 평균한 벡터이다.

Fig. 16에 Fig. 15의 (a)와 (b)를 겹쳐서 나타내었다. 파선으로 나타낸 벡터가 PDA 계측 결과이며 실선으로 나타낸 벡터가 PIV 계산 결과이다. 이들 그림으로부터 양자에서 도출된 평균유동장은 잘 일치하고 있는 것이 확인 된다. 따라서 평균유동장에 있어서 상호상관 PIV를 이용하여 계산되는 속도는 타당하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 17과 Fig. 18에 $h=40, 45, 50, 55$ mm에 있어서 반경방향 위치 r 과 액적속도의 평균값 \overline{V} 의 관계를 나타낸다. Fig. 17은 PDA에 의한 결과(축방향 속도), Fig. 18은 PIV에 의한 결과이다. 또한 그림 중의 세로방향의 선분길이는 \overline{V} 의 시간평균값(그림 내 ●로 표시)를 중심으로 V' (속도변동의 rms 값)의 크기를 나타낸다. Fig. 17과 Fig. 18을 비교하면 속도의 평균값은 거의 일치하고 있지만 rms 값은 PIV에 의한 결과가 PDA에 의한 결과의 약 2배 정도인 것을 알 수 있다. 이는 PDA와 PIV의 계측원리에 기인한다고 예상되어진다. 각 유적의 속도를 계측하는 PDA와는 달리 PIV에서는 화상회도 패턴을 이용하여 기준영역에 포함된 전 유적의 군(group)으로서의 속도를 산출한다. 그러나 기준영역에 큰 입경의 유적이 포함될 경우, 이 큰 입경의 유적의 휘도가 크기 때문에 화상회도 패턴 중에서 큰 입경의 유적의 휘

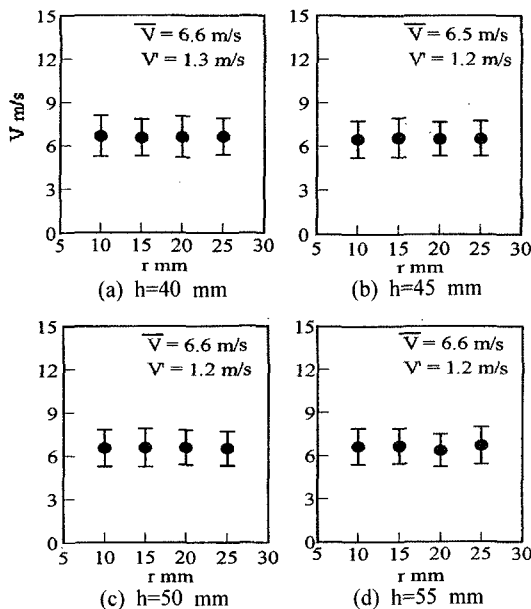


Fig. 17. Mean and rms values of droplet velocity by PDA.

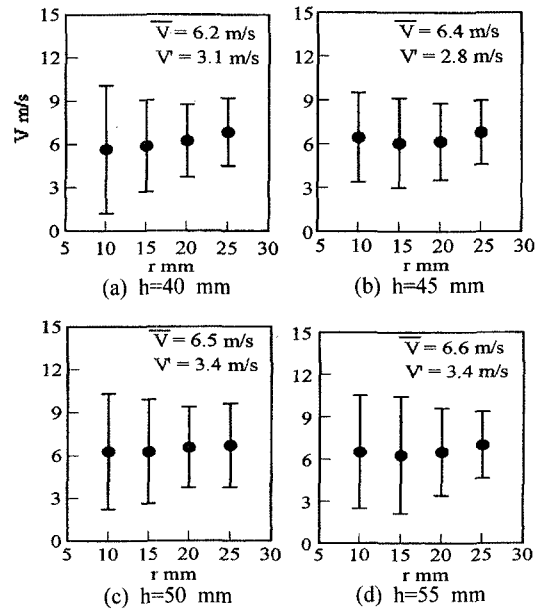


Fig. 18. Mean and rms values of droplet velocity by PIV.

도가 지배적이 되어 군(group)으로서의 속도가 아닌 큰 입경의 유적의 이동을 추적하게 되어버리는 것이 예상된다.

Akamatsu⁶⁾가 행한 PDA 계측에 의하면 입경의 크기가 50~70 μm 의 유적은 비교적 큰 슬립속도를 가지고 있다. 즉 이러한 큰 입경의 유적이 존재하면 PIV의 기준 영역에 포함되는 다른 입경의 유적의 이동은 무시되어 버리기 때문에 비교적 큰 슬립속도를 가진 큰 입경의 유적의 속도가 결과적으로 크게 영향을 끼치게 되어 속도 변동의 rms 값은 PDA에 의한 결과와 비교하여 커진다고 예상되어진다.

4. 결 론

예혼합 분무화염의 구조를 관찰하기 위하여 분무단면상의 확대촬영을 하였다. 또한 연소시의 순간적 이차원 유동장을 얻는 것을 목적으로 미소 시간차를 가진 2연속 분무단면 화상에 대해 상호상관 PIV를 적용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연소시의 분무류의 부분적인 소실은 연소거동에 기인하여 일어난다.

(2) 상류역에 상호상관 PIV에 의해 연소시의 순간적 이차원 유동장을 구한 결과, 분무가 가시화되어 있는 영역에서는 속도벡터가 거의 수직방향으로 향하고 있는 것으로부터 분무류의 소실은 유동장의 영향이 아니라 화염전파에 의한 것이다.

(3) 중류역과 하류역에 있어서 분무가 가시화되어 있는 영역의 속도벡터는 거의 수직방향을 향하고 있으며 이는 유동장의 와류운동이 아닌 연소거동에 의하여 분무류가 분단되어 클러스터가 형성되는 것을 나타낸다.

(4) 상호상관 PIV에 의해 얻어진 시간평균 속도장을 PDA의 계측 결과와 비교하였다. 그 결과 서로 잘 일치한다는 것이 확인되었다.

참고문헌

1. 송용식; 양인권; 김봉석; 류정인. “초음파 에너지 조사 고점도 바이오디젤 혼합연료의 미립화 특성에 관한 연구”, 한국에너지공학회, 2004, 13, 4, 235.
2. Semiao, V.; Andrade, P.; Carvalho, M.G. “Spray characterization: numerical prediction of sauter mean diameter and droplet size distribution”, Fuel, 1996, 75, 15, 1707.
3. 정재모; 안달홍; 박정규. “발전용 저 NO_x 가스터빈의 연소불안정 안정화에 관한 연구”, 한국에너지공학회, 2004, 13, 2, 144.
4. Miller, N.; Powell, E.A.; Chen, F.; Zinn, B.T. “The use of air staging to reduce the NO_x emissions from coal burning rijke pulse combustors”, Combust. Sci. and Tech., 1993, 94, 411.
5. 水谷幸夫; 西本武雄. “亂れのある噴霧流の火焰速度”, 日本機械學會論文集, 1972, 38, 311, 1844.
6. 赤松史光. “液體燃料噴霧の油滴群燃焼舉動に関する研究”, 大阪大學博士論文, 1995.
7. Chiu, H.H.; Liu, T.M. “Group combustion of liquid droplets”, Combust. Sci. and Tech., 1977, 17, 127.
8. 津島將司. “噴霧火焰の巨視的燃焼舉動と光學的計測に関する研究”, 大阪大學博士論文, 1998.
9. 若林卓; 赤松史光; 香月正司; 水谷幸夫; 池田裕二; 河原伸幸; 中島健. “多波長高空間分解能 集光プローブの開発”, 日本機械學會論文集, 1996, 64, 619B, 925.
10. 津島將司; 齋勝寬泰; 赤松史光; 香月正司. “豫混合噴霧火焰の巨視的燃焼舉動(第1報)”, 日本機械學會論文集, 2000, 66, 648, 307.
11. 川那辺洋. “噴霧火焰の構造ならびに亂れ生成・消滅機構に関する研究”, 京都大學博士論文, 1996.
12. 津島將司; 齋勝寬泰; 赤松史光; 香月正司. “豫混合噴霧火焰の巨視的燃焼舉動(第2報)”, 日本機械學會論文集, 2000, 66, 650, 222.