

예혼합 분무화염내의 이중적 액적 연소속도에 관한 관찰

이 치 우* · 심 한 섭

진주산업대학교 자동차공학과

Observation on Double-droplet Combustion Speed in Premixed Spray Flame

Chi-Woo Lee* · Han-Sub Shim

Department of Automotive Engineering, Jinju National University, Gyeongnam 660-758, Korea
(Received 15 June 2004 / Accepted 31 August 2004)

Abstract : In order to elucidate the modes of double-droplet combustion speed in premixed spray flame, the difference between flame propagation speed and droplet cluster disappearance speed are experimentally investigated using a premixed spray burner system. It was confirmed that flame speed concerned with premixed-mode combustion in the spray flame was approximately 2.0 m/s in average while mean disappearance speed of droplet clusters, which were dominated by diffusion-mode combustion in downstream of the flame, was evaluated as much as 0.45 m/s. It was clarified that both characteristics of premixed-mode and diffusion-mode combustion in spray flames are of much difference in nature, even though both speed, which are supposed to depend on local properties of the spray itself and flow conditions surrounding droplet clusters, are scattered in experiments.

Key words : Premixed spray flame(예혼합 분무화염), Combustion(연소), Droplet combustion(액적연소), Flame propagation(화염전파), Droplet cluster(액적 클러스터)

1. 서 론

최근 분무연소는 공업적으로 폭 넓게 활용되어지고 있으며, 그 연소특성은 분무기로부터 분사되어지는 액체연료의 분무특성에 크게 의존한다.^{1,2)} 분무화염은 예혼합적 화염특성과 확산적 화염특성을 동시에 지니고 있는 구조로 되어 있다.^{3,4)} 즉, 분무류내에서 화염전파 현상은 예혼합적 특성을 개개의 액적 주위에 형성되어지는 화염으로 확산적 특성을 띠고 있다고 알려져 있다.⁵⁾ 분무화염내에서 액적 클러스터(Droplet cluster)로서의 연소거동은 단일 액적연소로서가 아니라 다수의 액적 집합체로서의 연

소거동에 관한 관찰이 필요하다.^{6,7)} 실용 분무기에 있어서 분무화염은 연소기구 자체의 복잡함과 함께 조건에 따른 유동장의 영향 또한 받게 되므로 화염은 더욱 복잡한 구조를 하고 있다. 종래의 분무화염에 관한 실험적 연구는 분무화염의 연소속도를 화염면 위치로부터 일원적으로 도출하는 것이 대부분이다.⁸⁾ 분무류내에 전파하는 화염속도를 미소중력 상태에서 계측하거나,^{9,10)} 예혼합 분무화염면의 거동을 시간 평균적으로 관찰하여 분무화염의 연소속도를 도출하고, 분무의 평균입경과의 관계에 대하여 고찰한 예가 있다.¹¹⁾

그러나 많은 실험적 연구에 있어서 분무화염내에서 예혼합 연소적인 전파화염속도, 확산 연소적인 액적 및 액적 클러스터의 소실속도를 각각 구별하

*To whom correspondence should be addressed.
leecw@jinju.ac.kr

여 도출한 예는 발견되지 않는다. 공업적으로 분무 화염내의 전과화염속도 및 액적 클러스터의 소실속도는 각각 연소로 내에 있어서 화염위치 및 화염길이로서 반영되어지기 때문에 구별하여 취급할 필요가 있다고 생각한다.

본 실험에서는 예혼합 분무 화염내에서 전과화염속도 및 액적 클러스터의 소실속도를 각각 구별하여 도출·비교하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 분무단면화상 계측과 위상도플러 측정에 의한 분무류장의 계측을 병행하여 화상처리 및 해석을 통하여 전과화염속도 및 액적 클러스터의 소실속도를 각각 구별하여 도출하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 예혼합 분무류내의 전과화염속도 및 액적 클러스터의 소실속도를 도출하기 위해 분무단면화상 촬영과 위상도플러속계(Phase Doppler Anemometry, PDA)를 이용하여 분무류장을 계측한다.

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 예혼합 분무버너의 구조이다. 연료는 시판되고 있는 백등유이며, 연료 펌프에 의해 연료탱크로부터 버너포트 상류 440 mm에 설치된 2유체 분사노즐에 보내진다. 2유체 분사노즐에 있어 액체연료는 압축기로부터 공급되어지는 무화용 공기로 미립화 되어지고, 액적농도가 거의 일정한 분무원추의 중앙부만이 버너포트에 보내어지며, 분무 주변부는 드레인으로서 배출되어지는 구조로 되어 있다.

연소용 공기는 송풍기로부터 맥동제어 용기를 지난후 오리피스를 지나 버너 하부로부터 공급되며, 연소용 공기는 연료분부와 혼합되어 예혼합 분무류로서 버너포트로부터 상방향으로 분출되어진다. 또한, 파일럿 화염용 수소는 오리피스를 통과한 후 환상의 파일럿 버너포트로부터 분출되어진다. 예혼합 분무버너는 동축 이중관 구조이며, 내경 52.7 mm이다. 버너포트 옆에 폭 1 mm 환상의 수소확산 파일럿 버너가 있다. 또한, 그 주위에는 내경 58.7 mm, 외경 80.9 mm의 환상의 유로에 주류와 동축·동속의 공기를 흐르게 함으로서 화염을 안정화 시킴과 동시에 분무류가 반경방향으로 넓어지는 것을 억제하는

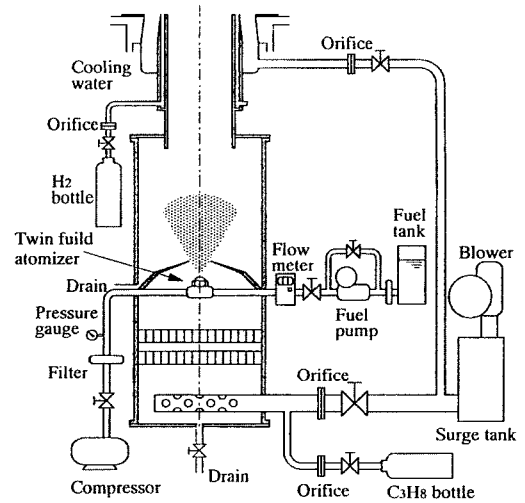


Fig. 1 Structure of premixed spray burner

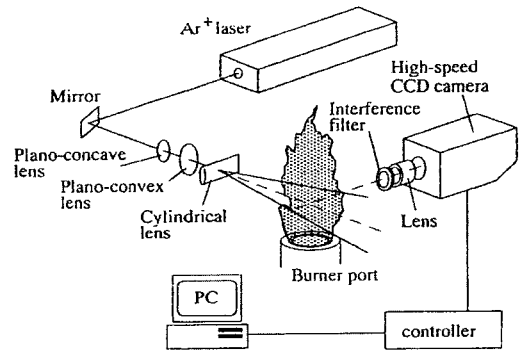


Fig. 2 Experimental apparatus

구조로 되어 있다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 실험장치 구성도이다. 실험조건은 연소용 공기의 단면평균유속 5.5 m/s, 백등유-공기 질량유량비 0.045 kgfuel/kgair (Equivalence Ratio=0.75), 무화용 공기압력 0.4 MPa이다. 좌표축은 버너포트 중심을 원점으로 하여 화염 하류방향을 h축, 반경방향을 r축으로 지정했다. 분무단면화상 촬영용 레이저시트 광원으로서 아르곤 이온 레이저(Spectra-Physics, Stable 2017, 발진 파장 514.5 nm, 실효출력 4 W)를 이용했다. 레이저 광은 일련의 렌즈계에 의해 버너 중심축을 포함한 수직단면을 비추는 평면광이 형성된다. 레이저 시트광에 의해 액적으로부터의 Mie 산란광 화상은 광간섭 필터(중심파장 514.5 nm, 반치폭 1.8 nm)를 지

나 배경광이 제거되어진 후, 레이저시트에 수직방향으로 설치된 고속도 CCD 카메라(Kodak, Ektapro HS Model 4540)에 의해 촬영되어진다. 분무단면화상의 촬영범위는 유효화소수 256×128 pixel(실공간 140×70 mm)이다. 촬영되어진 분무단면화상은 PC를 통해 디지털 기록되어진 후, 워크 스테이션(Hewlett Packard, Series 75)에 의한 이치화처리(binairized process, 화상데이터에 대한 처리 및 해석) 등의 화상처리가 행하여진다. 또한, 화상처리 해석 시에는 C언어에 의한 자작의 프로그램을 이용하였다. 분무단면화상의 촬영은 레이저시트광 강도의 높이방향의 제약으로부터 수직방향으로 분할하였다.

PDA 광학계와 신호처리기는 시판의 장치(Dantec, 송광계 60X, 수광계 57X10, 신호처리기 58N10)를 이용하였고, 광원에는 아르곤 이온 레이저(NEC, GLG3200, 발진파장 514.5 nm)를 사용했다. 광전자 증배관으로부터의 출력신호는 신호처리기에서 처리되어진 후, PC(IBM, PS/486DX-33MHz)에서 해석되어진다. 여기서 도플러 신호의 수광방향은 광축에 대해 70.3°로 설정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Binarized process의 경계치 결정

본 실험에서는 분무단면화상의 경계와 개개의 액적 클러스터를 도출하기 위해 촬영된 분무단면화상에 대해 이치화처리를 하였다. 이치화처리를 하는 것은 화상처리 해석결과의 정확성 및 신뢰성을 높이기 위해 중요하다. 아르곤이온 레이저로부터 나온 레이저광은 반사미러 및 일련의 렌즈계를 지나 레이저 시트광으로 된다. 이 때 레이저광 강도는 가우스분포 형상을 하고 있기 때문에 레이저시트 중심부의 강도가 가장자리보다 강하다. 따라서, 본 실험에서는 다음과 같은 방법으로 이치화처리의 경계치를 결정하였다.

Fig. 3에 나타낸 것과 같이 600장의 서로 시간적으로 연속하고 있지 않는 화상(랜덤화상)을 해석 대상으로 한다. 이 600장의 랜덤 화상군의 각 행마다 휘도치 히스토그램을 구한다.

Fig. 4(a), (b)는 이와 같이 랜덤 화상 600장을 누적하여 산출한 화상중의 하부로부터의 제 3행(Fig. 3



Fig. 3 Example of spray cross-sectional images

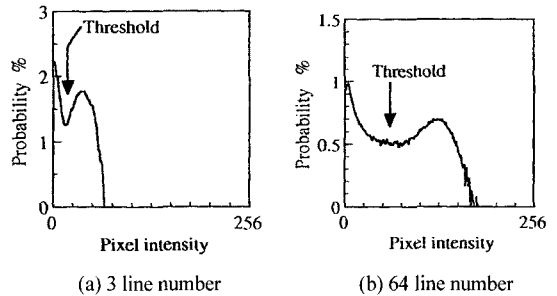


Fig. 4 The difference between luminous frequency distributions by height direction in images

에서 가로방향 화상의 하단부)과 제 64행(Fig. 3에서 가로방향 화상의 중앙부)의 픽셀 휘도치 히스토그램이다. 여기서, 히스토그램의 종축은 출현빈도의 최대치로 정규화 하였다. 이것으로부터 레이저시트 중앙부에 대응하는 제 64행에 있어서는 픽셀의 휘도치가 전체적으로 크고 레이저시트의 가장자리에 해당하는 제 3행은 액적으로부터의 Mie 산란광 강도가 낮기 때문에 화상중의 휘도치도 작게 되고 히스토그램도 휘도치가 낮은 쪽으로 치우친 분포를 하고 있다. 그러나 어느 경우도 히스토그램중의 쌍봉형 부분의 중간 즉, 계곡 부분을 취해 이치화처리의 경계치로 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 휘도의 히스토그램을 각 행마다 정리하여 화상화한 Fig. 5(a)이다. Fig. 5(b)는 이를 3차원으로 표시한 것이다. Fig. 5(a)의 횡축은 앞의 히스토그램과 같이 픽셀의 휘도치를 나타내고 0부터 255까지이다. 종축은 촬영된 화상의 각 행에 대응한다. Fig. 3의 화상의 농염은 앞의 히스토그램의 종축 즉, 출현확률을 나타낸다. 이것으로부터 레이저시트 중심부에서는 가장 레이저 강도가 강하고 가장자리로 갈수록 레이저강도가 약하게 되는 것을 알 수 있다. 각 행마다의 히스토그램의 계곡을 연결하면 그림내

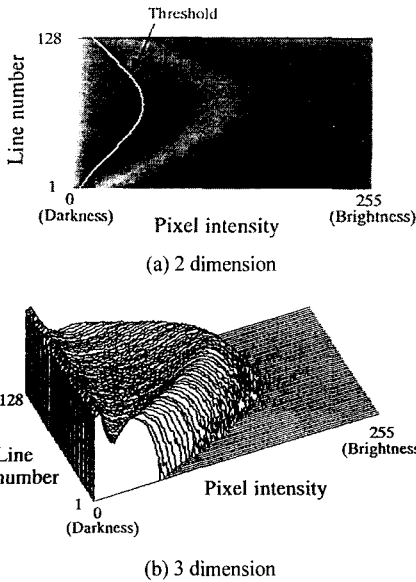


Fig. 5 Appearance frequency distribution of luminous value in images(calculated from 600 sheets of random images)

의 백선으로 표시한 가우스 분포 형상이 된다. 본 실험은 이 백선상의 값으로부터 각 행마다 이치화처리의 경계치를 결정하였다.

3.2 예혼합 분무화염내의 전파화염속도

3.2.1 연속분무류의 경계의 추출

이 절에서는 예혼합 분무화염중에 형성되어지는 전파화염속도의 도출에 대해 조사한다.

Fig. 6은 $h=5\sim 75$ mm의 영역에서 촬영된 분무단면화상을 나타낸 것이다. 이 영역에서 분무류는 연속적으로 존재하며, 화상에서 보는 바와 같이 연속분무류의 복잡한 형상은 예혼합 연소적인 화염전파에 의해 형성되어졌다고 생각된다. 이 형상을 추출하기 위해 Fig. 7과 같이 이치화처리 하고, 이치화처리 방법은 앞 절에서 상술한 바와 같다. 이치화처리를 한 후에 연속분무류의 경계면은 Fig. 8과 같이 된다.

본 실험에 있어서 촬영화상의 대비값(contrast)이 높게 유지되도록 촬영영역을 한정하여 실험을 하였기 때문에 분무경계와 배경영역의 경계가 명확히 구분되며, 이치화 처리에 관한 오차는 거의 무시할 수 있는 정도이다.

랜덤하게 촬영된 600장의 분무단면화상에 대해

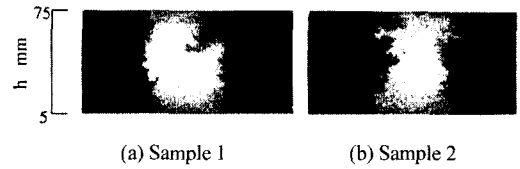


Fig. 6 Instantaneous spray images measured at $h = 5\sim 75$ mm

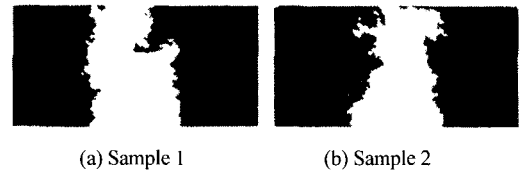


Fig. 7 Binarized images

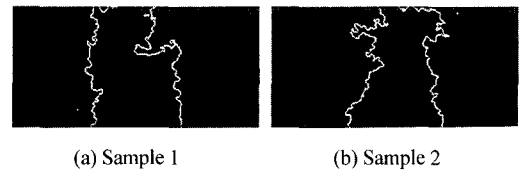


Fig. 8 Extracted spray boundary images

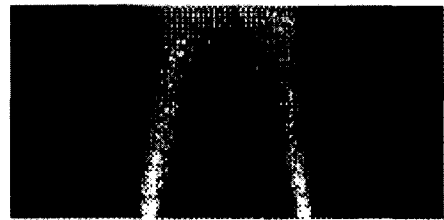


Fig. 9 Overlapped image of spray boundary

이치화처리를 하여 이를 중첩시키면 Fig. 9와 같은 화상이 얻어진다. 또한, 중첩화상에는 11×11 메디안 필터 처리를 하였다. 화상의 각 픽셀 휘도치는 시간평균적으로 본 연속분무류 경계의 존재빈도를 나타낸다. 여기서, 600장의 화상은 시간적으로 전혀 연속하고 있지 않는 랜덤화상을 해석대상으로 할 필요가 있다. 왜냐하면 버너포트로부터 연속적으로 존재하는 분무류 경계의 중첩 즉, 시간평균적으로 본 연속분무류 경계의 존재빈도를 계산할 경우 연속화상에서는 촬영시간이 아주 짧기 때문에 현상의 통계적 평균을 도출하기에 부적절하기 때문이다.

Fig. 9는 화상을 이용하여 예혼합 분무화염에서의 전파화염속도를 연속분무류의 소실속도로서 도출한다. 즉, 화상중의 연속분무류의 평균 경계 위치

를 구해 삼각법의 적용을 시도한다. 삼각법을 적용할 때는 분무류장의 유동장 계측이 필요하다. 이를 위해 예혼합분무의 유동장 및 분무특성을 조사하기 위하여 위상 도플러 유속계를 사용하였다.

3.2.2 위상도플러 유속계에 의한 분무류장의 계측

Fig. 10은 예혼합 분무 화염내에 액적에 대한 2차원 평균속도벡터의 계측 결과이다. Fig. 10에서 관측되어지는 바와 같이 액적은 외부공기와의 전단에 의한 영향도 비교적 작고, 바깥 영역을 제외하고는 거의 버너 중심축에 평행하게 약 7.0 m/s로 비행하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 $r=15$ mm에 있어서 액적입경 D 와 입경에 따른 버너 축방향속도 평균치 $V_h(D)$ 와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 11 (a) $h=25$ mm, (b) $h=75$ mm는 각각 버너 높이 방향의 계측위치를 나타낸다. 또한, 그림중의 종방향의 선분은 $V_h(D)$ 의 시간평균치(●로 표시)를 중심으로 $V'_h(D)$ (축방향 속도 변동의

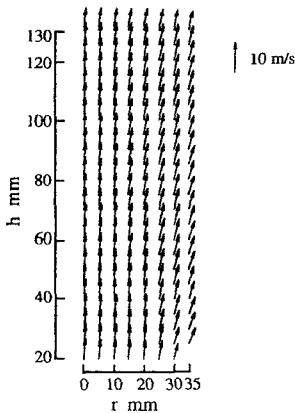


Fig. 10 Measured flowfield of the premixed spray

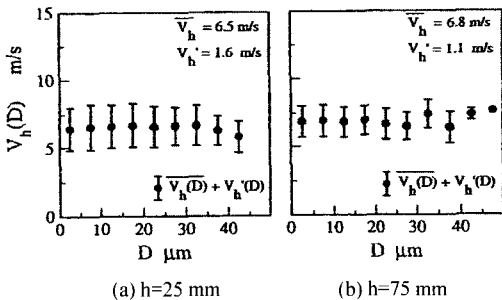


Fig. 11 Size-classified axial mean and rms velocity of droplets($r=15$ mm)

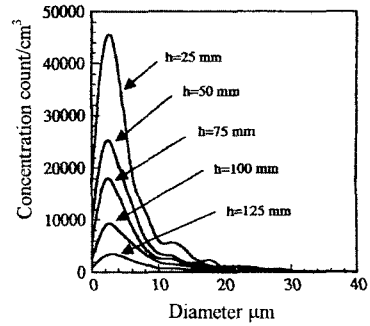


Fig. 12 Number density size distribution of the premixed spray

rms값)를 나타내고 있다. 통상 연소로 등의 분무화염에서는 액적입경에 따라 비행이력이 다르기 때문에 입경에 따른 속도벡터를 구할 필요가 있다. 이 그림으로부터 본 실험에 있어서는 어느 위치에 있어서도 입경에 의한 속도차는 작고 또한, 액적 전체로부터 산출한 평균속도벡터가 유동장 전체의 특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 “예혼합분무”의 조건이 실현되고 있다는 것을 나타낸다. 분무화염의 연소특성은 분무의 입도분포에 크게 영향 받는다. Burgoyne et al.(12)은 $10 \mu\text{m}$ 이하 액적에서의 연소과정, 특히 전파화염으로서 거동은 가스연료와 거의 같은 거동을 나타낸다고 지적하였다.

Fig. 12는 예혼합 분무화염내에 있어서 분무의 입도수밀도분포의 축방향 변화를 나타낸 것이다.

본 실험 조건하에서는 Sauter 평균입경은 $30 \mu\text{m}$ 정도이고, 하류로 감에 따라 작은 증가 경향을 확인할 수 있었다. 입도분포형상의 변화에 나타나고, 하류로 감에 따라 작은 입경액적이 존재할 수 있는 확률이 감소하고 있는 것으로 나타난다. 이는 작은 입경일수록 증발 및 연소에 의해 소멸하는 액적이 많다는 것을 시사한다.

3.2.3 전파화염속도의 도출

분무 단면화상으로부터 구한 연속분무류의 경계 위치와 위상도플러계측에 의한 유동장 측정 결과를 이용하여 삼각법을 적용한다.

Fig. 13에 나타낸 것과 같이 연속분무류의 경계와 예혼합 분무류장이 이루는 각 θ 는 16.5° 로 구해진다. 이 때 분무경계위치에 있어서 액적의 평균속도 $U=7.0$ m/s이기 때문에 전파화염 속도 $S=2.0$ m/s로

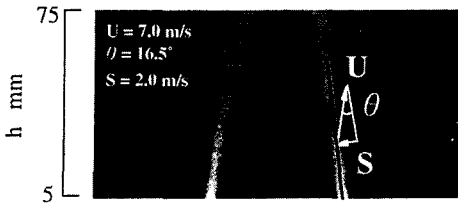


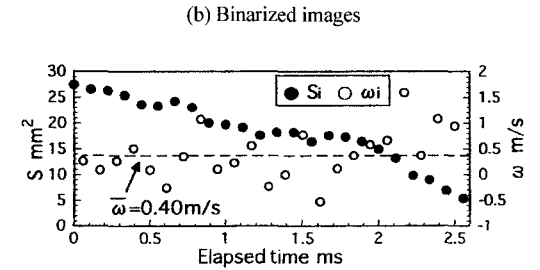
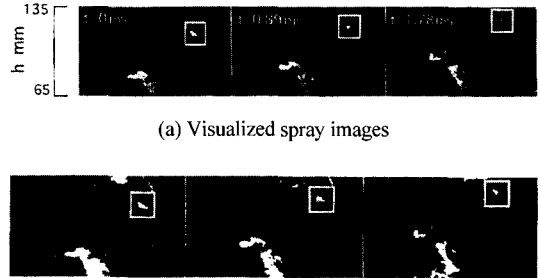
Fig. 13 Definition of the speed of propagating flames

구해진다. 여기서, 이 값은 분무화염내에 있어서 전파화염속도의 평균치라는 것에 유의해야 한다. 즉, Fig. 8과 같이 분무경계의 위치가 변동하고 있는 것으로부터 알 수 있는 바와 같이 분무화염에서의 전파화염속도 또한, 시간적 · 공간적으로 변동하고 있다. 이와 같은 분무화염내의 전파화염속도 변동이 어떠한 기구로 일어나는가는 명확하지 않지만 분무의 시간적 · 공간적인 불균일성과 관계가 있다고 생각된다. 이것은 분무특성의 변동과 전파화염의 속도변동을 함께 고려하여 고찰할 필요가 있다는 것을 시사한다. 다음 절에서는 이들 예혼합적인 화염 전파를 거쳐 형성되어지는 액적 클러스터의 소실속도를 도출한다.

3.3 예혼합 분무화염내의 액적 클러스터의 소실속도

예혼합 분무화염내에서는 연속분무류가 화염전파에 의해 소실되어지는 한편 잔존하는 일부의 분무류가 액적 클러스터를 형성하여 하류영역에서 천천히 연소한다. 앞 절에서는 전파화염속도를 도출하였지만, 여기서는 하류영역에 있어서 액적 클러스터의 소실속도를 화상처리 해석으로부터 구한다.

Fig. 14(a)는 촬영영역 $h=65\sim 135$ mm에 있어서 분무단면 연속화상의 일례를 나타낸 것이다. 촬영은 프레임 레이트(flame rate) 9000 장/s로 하고, 화상은 8장 간격으로 나열되어 있다. 화상내 사각으로 둘러싼 액적 클러스터의 소실속도의 시간변화를 구하였다. 먼저 조사하려고 하는 액적 클러스터의 단면적 S 를 구하기 위해서 촬영화상의 이치화처리를 하여 Fig. 14(b)를 얻는다. 해석대상으로 삼은 액적 클러스터가 다음의 촬영 화상에서 어느 위치로 이동했는가를 화상상관법에 의해 계산한다. 여기서, 2화상 간에 있어서 액적 클러스터는 약 2 pixel 정도밖에



(c) Variation of cross-sectional and disappearance speed of droplet cluster

Fig. 14 Image processing procedure to obtain disappearance speed of droplet cluster

이동하지 않고 형상변화도 작기 때문에 비교적 쉽게 계산되어진다.

액적 클러스터의 단면적 S_i 의 변화량과 바깥 주변 길이 λ_i 로부터 소실속도 ω_i 가 다음 식에 의해 계산되어진다.

$$\omega_i = (S_i - S_{i+1}) / (\lambda_i \cdot \Delta t) \tag{1}$$

여기서, S_i 와 S_{i+1} 은 각각 연속한 i 번째와 $i+1$ 번째 화상의 액적 클러스터 단면적, Δt 는 2화상간의 시간차 1/9000 (s)이다. Fig. 14 (c)는 이와 같은 방법으로 하여 구한 화상내 사각으로 둘러싼 액적 클러스터의 단면적 S_i 및 소실속도 ω_i 의 시간변화를 나타낸 것이다. 촬영화상으로부터도 알 수 있는 바와 같이 액적 클러스터는 하류방향으로 이동하면서 바깥 주변부터 차례로 소실되어진다. 여기서, 화상처리 해석 결과 구해진 액적 클러스터의 소실속도는 약 0.4 m/s를 중심으로 변동하며, 이 액적 클러스터의 소실속도의 평균치 $\bar{\omega}$ 는 0.40 m/s 인 것을 알 수 있다.

이와 같은 화상처리해석을 분무단면화상내의 모든 액적 클러스터에 대해 행하여 액적 클러스터의 소실속도의 분포를 구하면 Fig. 15와 같이 된다. 이것으로부터 액적 클러스터는 평균적으로 약 0.45

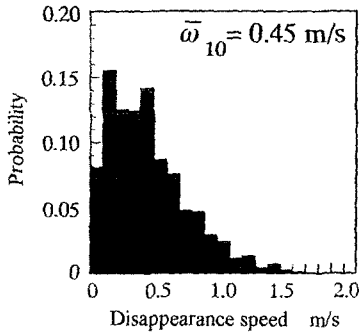


Fig. 15 Probability distribution of disappearance speed.

m/s의 속도로 소실하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 계산된 소실속도는 1.5 m/s까지 넓은 범위이다. 이것은 각 액적 클러스터의 특성 차이 즉, 각 액적 클러스터마다의 액적수밀도, 입도분포, 증기농도 분포, 분위기 산소농도, 분위기 및 온도 등의 차이에 기인한다고 판단된다. 앞 절에서 도출한 분무화염내의 전과화염속도와와의 차이는 명확히 구분되어진다. 따라서, 분무화염내의 액적 소실과정에 있어서 화염전파에 의한 소실과 액적 클러스터로서의 소실을 구별하여 고려할 필요가 있는 것을 알 수 있다.

4. 결론

예혼합 분무화염내의 전과화염속도와 액적클러스터의 소실속도를 도출하기 위해 분무단면화상 및 위상 도플러계측을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 예혼합 분무화염내의 화염전파속도를 분무단면화상으로부터 얻어지는 분무류경계의 평균위치 및 위상 도플러계측에 의한 액적속도로부터 도출하여 그 유용성을 나타내었다.
- 2) 예혼합분무류내의 전과화염속도는 시간적·공간적으로 변동하지만 본 실험조건에 의해 형성되어진 화염의 상류영역에 있어서는 평균적으로 약 2.0 m/s 였다.
- 3) 예혼합 분무화염내의 액적 클러스터의 소실속도를 분무단면연속상의 화상처리 해석으로부터 계산했다. 그 결과 본 실험 조건에 의해 형성되어진 화염의 하류영역에 있어서는 시간적·공간적으로 변화 하지만 평균적으로 약 0.45 m/s

었다.

- 4) 예혼합 분무화염내에 있어서 전과화염속도와 액적 클러스터의 소실속도는 다르기 때문에 각각 구별하여 고려할 필요가 있다.

References

- 1) D. Y. Jeong and J. T. Lee, "A Development of Ultra High Pressure Injection Equipment for Study on Diesel Spray Characteristics with Ultra High Pressure," Transactions of KSAE, Vol.11, No.11, pp.50-59, 2003.
- 2) Y. M. Woo, C. S. Bae and T. W. Lee, "Effects of Port Fuel Injection Characteristics upon HC Emission in SI Engines," Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.8-15, 2003.
- 3) Y. H. Won and C. R. Lim, "Impinging Atomization of Intermittent Gasoline Sprays," Transactions of KSAE, Vol.6, No.5, pp.174-181, 1998.
- 4) G. J. Yoon, "Developing Trend on the Gasoline ULEV Technology," Journal of KSAE, Vol.20, No.2, pp.26-35, 1998.
- 5) F. A. Williams, Combustion Theory Second Edition, The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc., 1985.
- 6) H. H. Chiu and T. M. Liu, "Group Combustion of Liquid Droplets," Combust. Sci. Tech., Vol.17, pp.127-142, 1977.
- 7) H. H. Chiu, H. Y. Kim and E. J. Croke, "International Group Combustion of Liquid Droplets," Nineteenth Symp. (Int.) on Combust., The Combustion Institute, pp.971-980, 1982.
- 8) C.-W. Lee, C.-W. Kim and S.-P. Kim, "A Study of Heat Flux in a Constant Volume Combustion Chamber," IMechE, Vol.217, No.9, pp.825-832, 2003.
- 9) Y.-J. Yang, F. Akamatsu, M. Katsuki and C.-W. Lee, "Characteristics of Self-excited Combustion Oscillation and Combustion Control by Forced Pulsating Mixture Supply," KSME International Journal, Vol.17, No.11, pp.1820- 1831, 2003.
- 10) D. R. Ballal and A. H. Lefebvre, "Flame

- Propagation in Heterogeneous Mixtures of Fuel Droplets, Fuel Vapor and Air," Eighteenth Symp. (Int.) on Combust., pp.321-328, 1981.
- 11) C. E. Polymeropoulos and S. Das, "The Effect of Droplet Size on the Burning Velocity of Kerosene-Air Sprays," Combust. Flame, Vol. 25, pp.247-257, 1975.
- 12) J. H. Burgoyne and L. Cohen, "The Effect of Drop Size on Flame Propagation in Liquid Aerosols," Proc. Ryo. Soc. Lond, A, Vol.225, pp.375-392, 1954.