548 大韓機械學會論文集 第19卷 第2號, pp. 548~558, 1995

〈論 文〉

2유체 분사노즐을 이용한 분무 및 연소특성에 관한 실험적 연구

백민수* · 오상헌*

(1994년 9월 23일 접수)

An Experimental Study on the Characteristics of Sprays and Spray Flames by Twin-Fluid Atomizer

Min-Su Paek and Sang-Heun Oh

Key Words: Spray(분무), Spray Flame(분무화염), Laser Light Sheet(레이저 단면광), Flame Holder(보염기), Droplet Number Density(액적 수밀도), Internal Group Combustion Mode(내부 집단연소 모드)

Abstract

An experimental investigation has been conducted to study the spray and combustion characteristics using the air-assisted twin fluid atomizer. Axial mean and fluctuating velocity components as well as drop-size distributions in non-reaction spray were measured with a nonintrusive phase doppler technique. Droplet number density distributions were also visualized using high speed CCD camera. Locations of spray and flame boundaries are obtained by direct photographic method. It is confirmed that at the fixed fuel flow rate, the increase of the atomizing air flow causes improvements on both spray and combustion characteristics under stable flame conditions. Internal group combustion modes where flame is located inside the spray boundary are observed to exist in the upstream region of higher droplet number density.

1. 서 론

액체연료의 분무연소는 가정용 난방 기기에서 산업용 엔진에 이르기까지 응용범위가 매우 다양한 분야이다. 이러한 분무연소는 액적의 미립화, 증발 및 증발된 연료 증기의 확산, 연소 등의 과정을 거치면서 NO_x, Soot와 같은 오염물질을 발생시키고 분무 액적의 증발 및 가스와의 혼합 특성이 화염의 안정성에 중대한 영향을 미친다. 실제 분무연소 시스템에서는 높은 수밀도와 분무의 비균질성(속도 및 크기)때문에 과농 연료 지역에서 온도 및 농도 구배가 크고 분무군을 통한 화염의 전파가 불규칙적이므로 유해물질의 배출이 과다하고 화염 안정 범위가 좁다. 이러한 분무화염의 구조는 액적의 크기, 속도, 수밀도, 액적과 주위 기체와의 대류 및 연료의 증발 특성, 액적간 상호 작용등 많은 인자들에 의하여 지배되어지고 있다.

지금까지 이론적 연구[1,2]와 실험적 연구[3~12]가 많이 수행되어 왔으나 이론적 연구는 주로 단일 액적 및 희박 분무군에 대해 해석하므로서 실제 상황과는 많은 차이를 나타내고 있다. 또한 실험적 연구는 가스 확산화염과는 달리 안정된 화염을 얻기 어렵고 측정의 어려움 때문에 제한적으로 연구가

*정회원, 부산대학교 기계공학과 및 기계기술연구소

진행되고 있다. 그 중 이론적 모델로서 타당성을 인정받고 있는 Chiu 등[2]의 집단연소모델은 분무군의 특성을 나타내는 집단연소수에 따라 (a) 외부 집단연소, (b) 내부 집단연소, (c) 개별 액적연소 등으로 구분하였다. 그러나 그가 제시한 집단 연소수를 실험적으로 구하여 분무화염의 연소형태를 검증하기란 현재로서는 매우 어렵다. 그러나 분무연소의 궁극적 목표인 연소효율을 높이고 공해물질의 배출을 저감시키는 연소기의 설계 및 개발을 위해서 분무연소 과정의 이해는 필수적이며 분무연소의 명확한 해석을 위해서는 다음의 몇가지 의문들에 대한 적절한 해답을 얻는 것이 중요하다. 첫째, 액적은 개별적으로 연소하는가? 혹은 집단으로 연소하는가? 둘째, 화염은 어떻게 안정되는가? 셋째, 선회유동장에서 분무구조가 연소에 미치는 영향은 무엇인가? 그리고 가스와 액적 유동장의 상호작용은 어떻게 이루어 지는가? 등이다. Onuma와 Ogasawara 등[3]이 분무화염의 구조는 가스 확산화염의 구조와 유사하다는 결과를 발표한 이후 이러한 분무화염의 특성규명을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 최근 실험 연구의 대부분은 분무연소에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 분무 액적의 크기, 속도, 수밀도, 이들의 상관관계에 있다고 판단하고 이들이 연소장에서 어떻게 변화하는가를 연구함으로서 분무화염의 구조와 특성을 추론하고 있다. 최근 이러한 분무 특성을 측정하기 위해서 광학장비들이 많이 이용되고 있으며 LDV, 빛의 회절을 이용한 Malvern, 도플러 위상을 이용하는 PDA, 그외 화상처리 방법 등이 주로 활용되고 있다.[4~11]

본 연구에서는 분무화염의 구조 및 특성을 규명하기 위한 기초 연구로서 PDA를 이용하여 액적의 크기, 속도, 액적의 크기 및 속도의 상관관계를 구하였다. 또한 화상처리 장치를 이용한 입자의 산란광 강도 분포를 가시화 함으로서 정성적인 입자의 수밀도 분포에 관한 정보를 얻음으로서 분무 특성을 조사하고 열전대를 이용한 화염의 온도측정, 화염의 가시화를 통하여 분무 특성이 화염에 미치는 영향을 추론하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 노즐은 air-assist형의 노즐로서 비연소 및 연소 모두 연료를 수직 상방향으로 분사하여 대기압 개방상태에서 측정하였다. 다음의 Table 1은 본 연구에 사용한 실험조건을 나타낸 것으로서 연료는 상온의 백등유(Kerosene)를 사용하였으며 연료량은 17.8 cc/min으로 일정하게 유지하고 미립화 공기량은 화염이 장시간 안정될 수 있는 상한의 공기량인 32.0 *l*/min, 하한의 공기량인 18.5 *l*/min, 앞 두 조건의 가시화염 길이가 중간 정도인 22.0 *l*/min으로 하였다.

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치와 사용한 노즐의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 공기 공급계와 연료 공급계로 구분되며 노즐의 분출 직경은 ϕ3.2 mm이다. 또한 화염의 안정을 위하여 직경 22 mm, 높이 35 mm의 보염기(flame holder)를 비연소 및 연소시 노즐 선단에 부착하여 사용하였다.

액적의 크기 및 속도 등의 동시측정은 PDA (particle dynamics analyzer : Dantec)를 이용하여 실시하였으며 이것은 액적에 의하여 산란된 도플러 신호의 위상차와 주기를 이용한 것으로서 현재 분

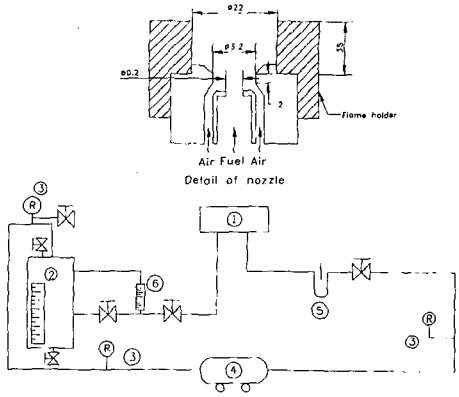


Fig. 1 Schematic diagran of experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Condition	A	B	C
Fuel(cc/min)	17.8	17.8	17.8
Air(*l*/min)	32.0	22.0	18.5

무연소 연구에 활발히 사용되고 있으며 액적의 크기와 속도 측정은 매우 정확한 것으로 알려져 있다. Fig. 2는 본 실험에 이용한 PDA의 개략도로서 최대출력 5 W의 아르곤-이온 레이저(spectra physics model 2016), 전달부, 이송계(dantec model 57G15), 수광부, 도플러 신호처리계(Dantec Model 58N10), 개인용 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 레이저 출력을 2 W 1-D, 파장 514.4 nm의 녹색파장을 이용하여 측정하였으며 레이저 비임 간격은 38 mm, 전달부(transmitter)의 촛점거리는 400 mm이다. 이때 간섭무늬 간격은 5.42 μm, 간섭무늬의 수는 44개이다.

분무 연소장의 온도 측정은 직경 0.3 mm Pt/Pt-Rh 13% 열전대를 이용하였고 복사와 전도에 의한 열손실은 고려하지 않았다. Data는 아날로그/디지탈 변환기(A/D converter)를 이용하여 개인용 컴퓨터로 통계처리하였다. 분무군에서 입자의 수밀도 분포에 대한 정성적 결과를 얻기 위하여 분무군의 중심 단면을 레이저 단면광과 CCD 카메라를 이용하여 산란광의 강도를 화상처리 하였다. 이때 광원은 2 W 아르곤-이온 레이저의 514.5 nm의 단색광을 사용하였고 광 fiber와 cylindrical렌즈를 이용하여 형성된 단면광의 폭은 약 1 mm이다. 이 단면광에 의하여 Mie산란된 광을 중심파장 513 nm, 반치폭10 nm의 광필터에 의하여 noise광을 제거한 후 미약한 화상을 화상증폭기(image intensifier)를 이용하여 증폭하여 화상처리하였다. 이때 화상의 획득(grab)시간은 100 nsec이다. 또한 분무화염장의 가시화는 광원(1 KW)을 이용하여 화염경계의 밝은 청색부분을 상대적으로 상쇄시키고 화염중에 존재하는 액적의 산란광을 촬영하였으며 이 결과를 화염의 직접사진을 촬영하여 비교하였다. ASA 1600의 필름과 NIKON-FM2의 카메라를 이용하였고 셔터(shutter)속도는 직접사진의 경우는 1/2000 s, 분무화염의 산란광 촬영은 1/4000 s이다. Fig. 3은 이것의 개략도이다.

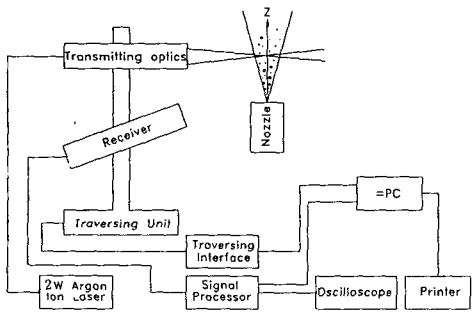


Fig. 2 Schematic diagram of the diagnostic system for the fiber optical PDA

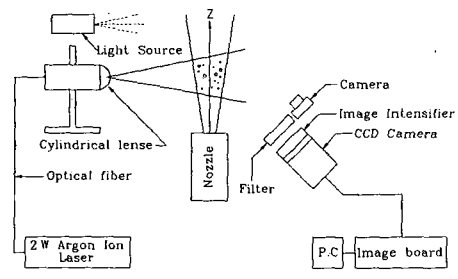


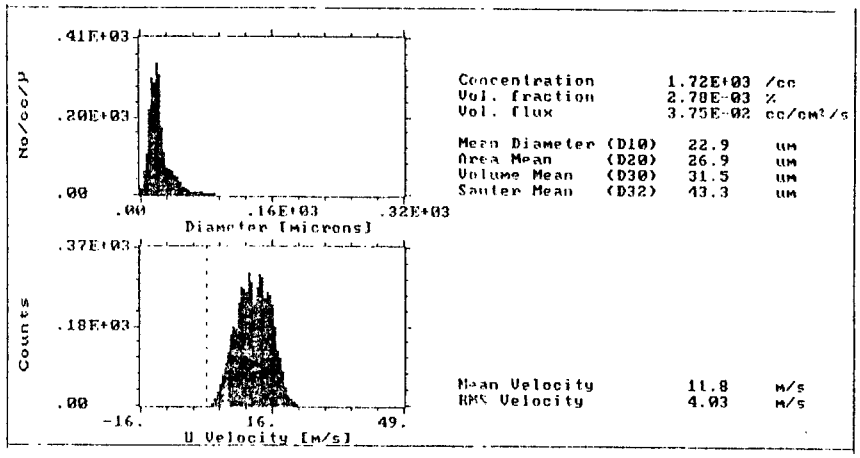
Fig. 3 Image processing and visualization system

3. 결과 및 고찰

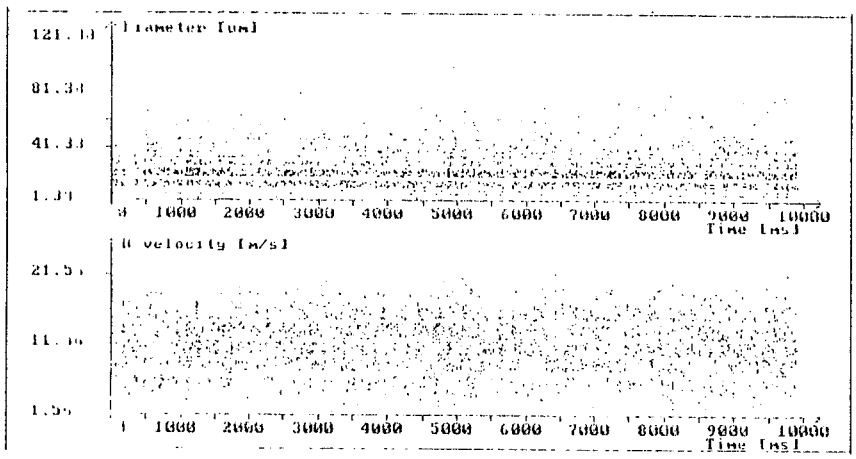
3.1 액적의 크기 및 속도

분무연소화염에서 연소 효율과 공해물질의 저감을 위해서는 근본적으로 화염의 구조에 관한 규명이 이루어져야 한다. 이러한 분무화염의 구조는 노즐의 형태와 분무의 상태에 크게 영향을 받으며 그 중 액적의 크기, 속도, 공기와 액적의 상대속도, 수밀도 등의 상호 작용에 크게 지배된다. Fig. 4는 PDA를 이용하여 본 연구의 비연소 분무장에서 얻은 전형적인 결과로서 (a)는 액적의 크기와 속도 분포를 나타낸 것이고 (b)는 액적의 크기와 속도의 시간에 따른 분포를 나타낸 것이다. 이러한 전형적 결과를 살펴보면 본 실험의 액적크기 분포는 0~150 μm 범위에 존재하며 입자는 시간에 따라 연속적으로 균일한 분포를 하고 있는 것을 알수 있다.

Figs. 5~7은 17.8 cc/min의 일정한 연료량에 공기량을 32.0 l/min(조건 A), 22.0 l/min(조건 B), 18.5 l/min(조건 C)으로 변화시켜 PDA에 의해 측정한 연소기 선단으로부터 거리 2 mm, 50 mm, 100 mm 단면의 액적 크기 결과이다. 2 mm 단면의 경우, 축 중심에서 조건 A의 경우는 25 μm, 조건 B의 경우는 35 μm, 조건 C의 경우는 45 μm 정도로 미립화 공기량이 증가할수록 연료 액적의 크기는 작아져 미립화가 양호하다. 또한 분무의 축 중심에서 멀어질수록 액적의 크기는 커지나 미립화 공기량이 많을수록 축 중심과 분무 경계의 액적 크기 차이는 상대적으로 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) Size and velocity display



(b) Time series of diameter and velocity

Fig. 4 Typical measurements of a nonburning spray

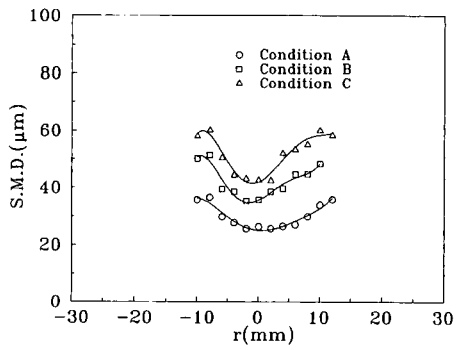


Fig. 5 Variations of sauter mean diameter with radial position(r) at 2 mm axial position for nonburning conditions

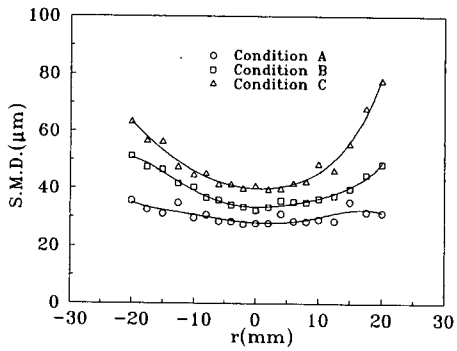


Fig. 6 Variations of sauter mean diameter with radial position(r) at 50 mm axial position for nonburning conditions

Fig. 6은 연소기 선단으로부터 축방향거리 50 mm 위치에서 액적 크기 분포를 나타내고 있으며 Fig. 5의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 2 mm위치와 비교하면 모든 조건에서 분무군의 경계 즉, 반경방향으로 갈수록 액적의 크기는 축 중심에 비해 상대적으로 크게 감소하여 균일하여지며 이러한 경향은 하류로 갈수록 두드러지고 있다.(Fig. 7) 그러나 축 중심에서는 분무 바깥 부분과는 달리 2 mm 단면과 50 mm 단면을 비교하면 액적의 크기에 큰 차이가 없으나 100 mm 단면의 경우는 50 mm 단면보다 조건에 따라 3~8 μm 정도 증가하였다. 이것은 축 중심부근의 상대적으로 작은 액적이 운동량을 잃고 분무군 외부로 이동하고 또한 액적의 속도 감소에 의하여 액적이 충돌, 합체하기 때문으로 생각된다. Figs. 8~10은 분무 유동장에서 PDA를 이용해서 액적 크기와 동시측정한 축방향 평균속도를 나타내고 있다. 보염기 선단으로부터 2 mm 위치의 결과인 Fig. 8에서 공기량이 증가할수록 액적의 속도도 증가하는 전형적인 제트형 속도 분포를 하고 있다. Fig. 9의 50 mm 단면의 속도 분포는 2 mm 단면보다 크기는 1/2로 줄어 들었고 축 하류로 갈수록 축 중심에서 액적의 속도는 크게 감소되고 있다.

Figs. 11~13은 2 mm와 50 mm, 100 mm 단면의 축방향 속도성분의 RMS값으로 공기량이 18.5 *l*/min과 22.0 *l*/min의 경우는 평균속도 분포와 유사한 경향을 가지나 평균속도의 25%~50%로서 다소

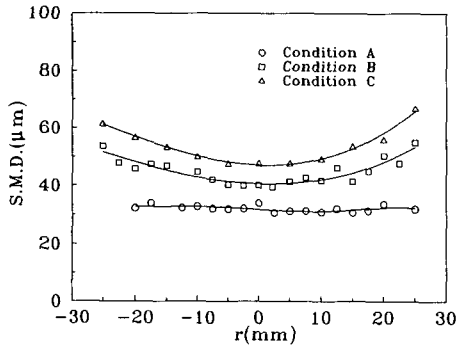


Fig. 7 Variations of sauter mean diameter with radial position(r) at 100 mm axial position for nonburning conditions

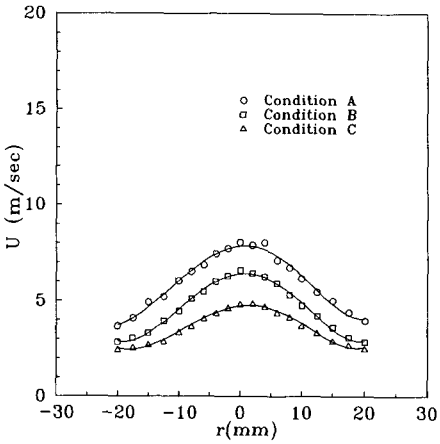


Fig. 9 Variations of axial(U) component of droplet mean velocity with radial position(r) at 50 mm axial position for nonburning conditions

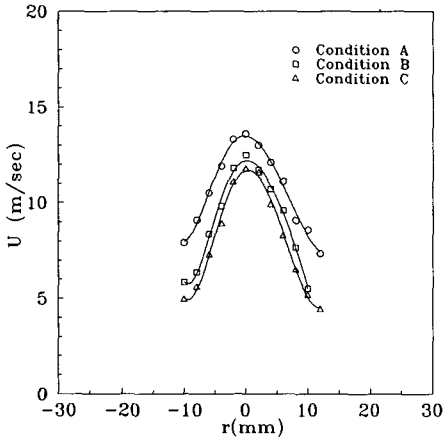


Fig. 8 Variations of axial(U) component of droplet mean velocity with radial position(r) at 2 mm axial position for nonburning conditions

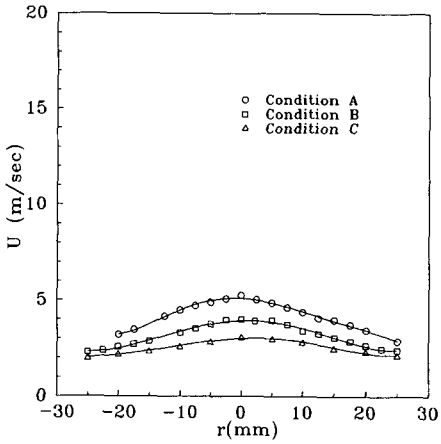


Fig. 10 Variations of axial(U) component of droplet mean velocity with radial position(r) at 100 mm axial position for nonburning conditions

큰 값이다. 공기량이 32.0 l/min인 경우는 2 mm 단면에서 5.5 m/sec 전후로 비교적 균일하지만 다른 두 실험조건과 비교하면 반경방향으로 이동함에 따라 감소하지 않고, 특히 r=7.5 mm부근에서 큰 RMS 값을 가지는 것은 보염기 선단 주위에서 공기량이 상대적으로 적은 두 경우보다 많은 양의 공기유입(entrainment)현상이 발생하기 때문으로 생각된다. 또한 SMD와 평균 및 RMS 속도 측정결과로 부터 SMD가 작고 평균속도가 클수록 분무액적의 RMS 속도 값은 큰 것을 알 수 있다.

액적의 크기와 속도의 상관 관계 : 액적과 가스와의 상대 속도는 미립화 및 증발율 등에 미치는 영향이 크기 때문에 상대 속도에 관한 특성이 분무에서 중요하나, 이상 유동장에서 각각의 속도를 동시 측정하는 것은 어렵다. 따라서 작은 액적은 가스 유동장과 빠른 속도로 동적 평형에 도달하므로 상대 속도에 대한 특성을 추론할 수 있다. Fig. 14는 조건 A에서 0~10 μm, 25~35 μm, 45~55 μm 범위의 액적의 크기와 속도와의 관계를 축방향거리 2 mm, 50 mm, 100 mm 단면에서의 결과이다. 2 mm 단면의 축 중심부근에서 0~10 μm 범위의 액적 평균속도는 13 m/sec이고 25~35 μm 범위의 액적 평균속도는 15 m/sec로 45~55 μm의 액적 평균속도보다 크다. 이것은 조건 A가 다른 조건보다 공기량이 많아 노즐 선단에서 공기 유동이 복잡하고 속도가 빨라 어느 정도 이상의 크기를 갖는 액

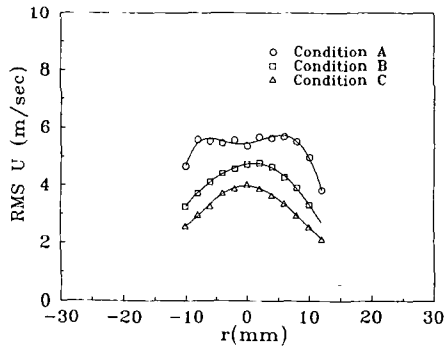


Fig. 11 Variations of R. M. S. for axial velocity component with radial position(r) at 2 mm axial position for nonburning conditions

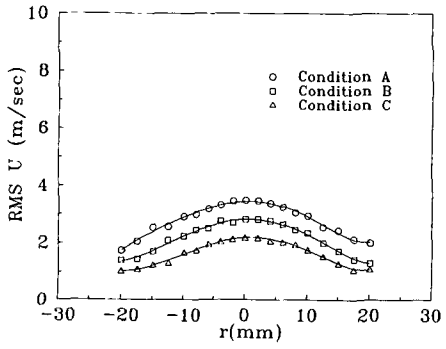


Fig. 12 Variations of R. M. S. for axial velocity component with radial position(r) at 50 mm axial position for nonburning conditions

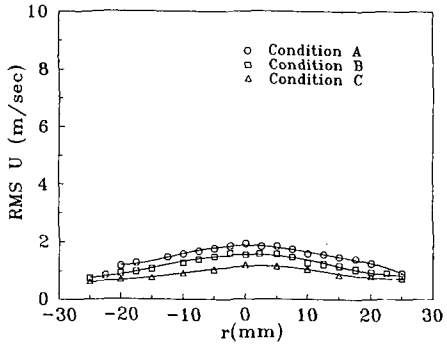


Fig. 13 Variations of R. M. S. for axial velocity component with radial position(r) at 100 mm axial position for nonburning conditions

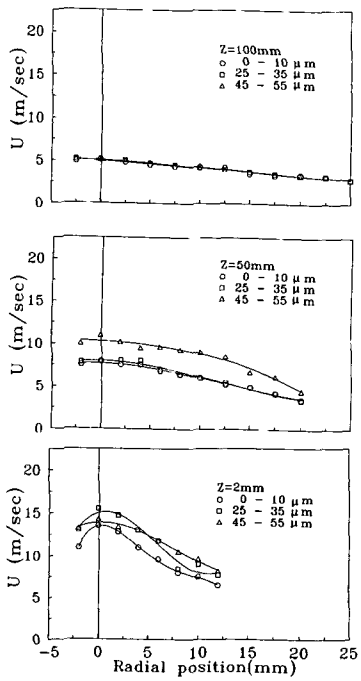


Fig. 14 Evolutions of measured axial velocity component of different drops (condition A)

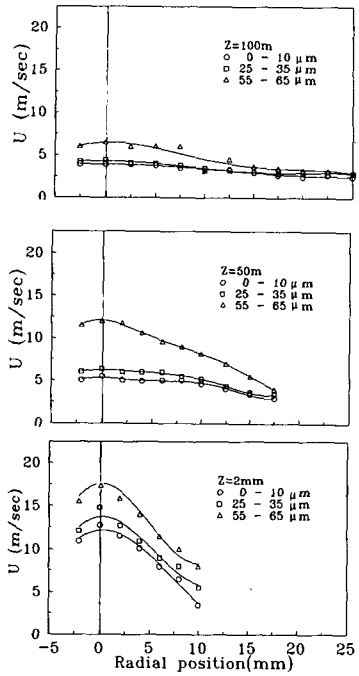


Fig. 15 Evolutions of measured axial velocity component of different drops (condition B)

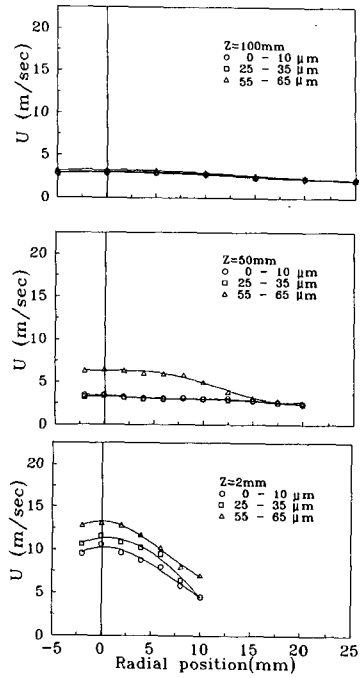


Fig. 16 Evolutions of measured axial velocity component of different drops (condition C)

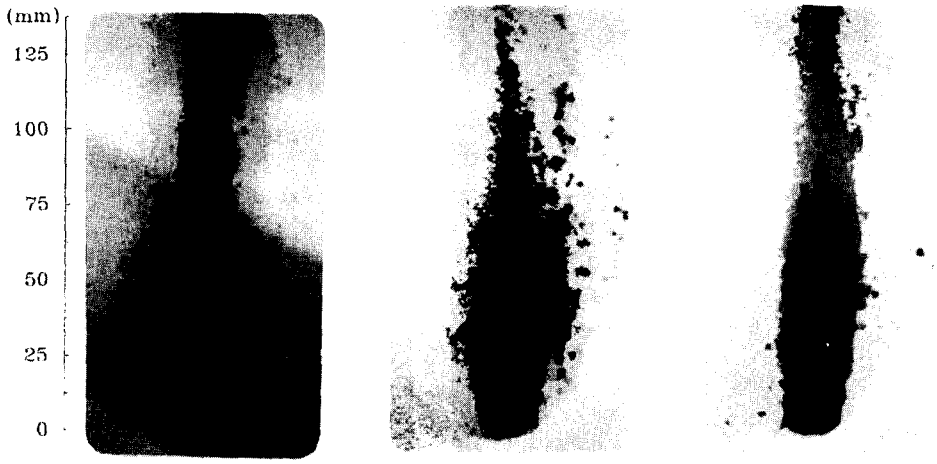
적들의 경우 이 영역에서 작은 액적이 큰 액적보다 빨리 가속되기 때문으로 생각된다. 50 mm 단면에서는 관성력이 큰 45~55 μm 영역의 액적 크기를 제외하면 평균 액적의 속도는 큰차이가 없고 100 mm 단면에서는 액적의 크기에 따른 평균속도 차는 거의 없다. Fig. 15와 Fig. 16은 조건 B와 조건 C의 0~10 μm, 25~35 μm, 55~65 μm 범위의 액적 평균속도로서 전체적으로 큰 액적의 평균속도가 작은 액적의 평균속도보다 크게 나타나고 있다. 또한 하류로 감에 따라 이러한 속도차는 감소하여 액적의 크기에 관계없이 비슷한 속도를 갖는다. 이러한 결과들로부터 유동장이 복잡한 노즐 선단 축 중심의 일부 영역을 제외한 대부분의 영역에서 액적의 속도가 가스의 속도보다 빠르며 하류로 감에 따라 액적과 가스의 상대 속도는 감소한다는 것을 알 수 있다.

3.2 입자 산란광의 가시화

분무 및 분무연소의 진단 및 해석에서 액적의 크기 및 속도와 함께 중요하게 취급되는 특성이 입자의 수밀도이다. Fig. 17은 비연소시 분무 입자의 수밀도에 관한 정성적 특성을 규명하기 위하여 레이저 단면광과 화상처리를 이용하여 얻은 결과이다. 레이저 단면광을 이용하여 분무군의 축 중심의 액적들을 Mie산란시켜 화상의 gray level을 등간격으로 가상색을 이용하여 화상화한 것이다. 조건 A의 경우 노즐 선단의 중심부에 존재하는 흰색영역과 진한 청색부분이 액적의 산란광 강도가 높은 것을 나타내고 있으며 따라서 이 영역에서 수밀도가 가장 높다. 모든 조건에서 노즐 선단의 축 중심부에서 수밀도가 가장 높으며, 또한 미립화 공기량이 많아 입자의 크기가 작은 조건 A의 경우가 다른 두 조건보다 전반적으로 산란강도가 강하며 수밀도가 가장 높다.

3.3 온도분포

Figs. 18~20은 각 화염의 평균온도 분포를 축방향거리 20 mm, 50 mm, 100 mm에서 측정한 결과이다. Fig. 18은 20 mm 단면의 결과로서 3개의 화염 모두 축 중심으로부터 반경방향으로 일정거리에서 최고온도를 나타내고 있으며 공기량이 증가할수록 최고온도의 위치는 축 중심으로 이동하며 온도도 높게 나타난다. Fig. 19는 50 mm 위치의 결과로 이러한 현상이 더욱 뚜렷이 나타나고 있다.



(a) Condition A (b) Condition B (c) Condition C

Fig. 17 Image of nonburning spray droplets

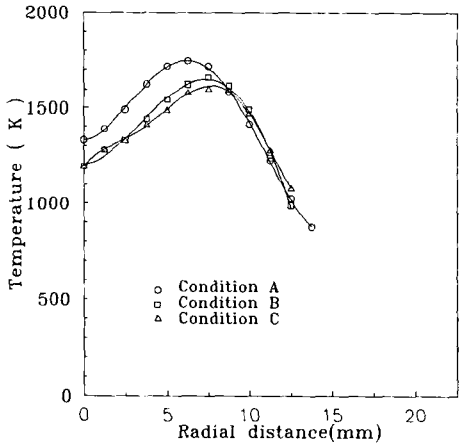


Fig. 18 Radial temperature distributions at 20 mm section for spray flame

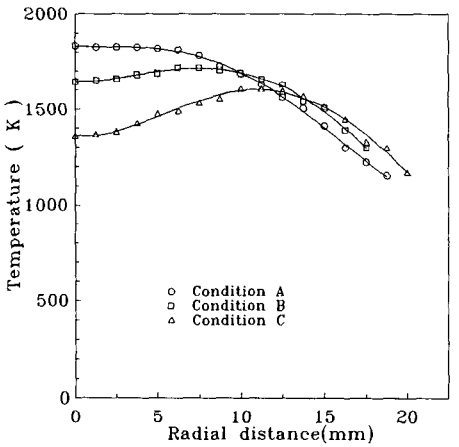


Fig. 20 Radial temperature distributions at 100 mm section for spray flame

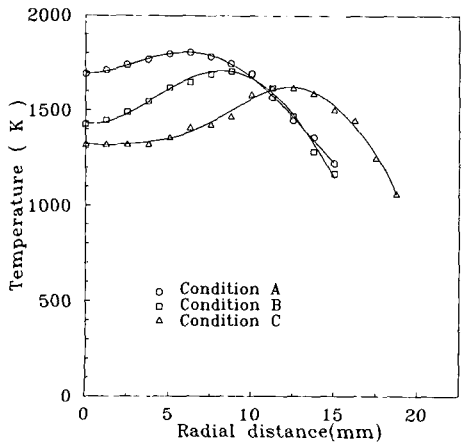


Fig. 19 Radial temperature distributions at 50 mm section for spray flame

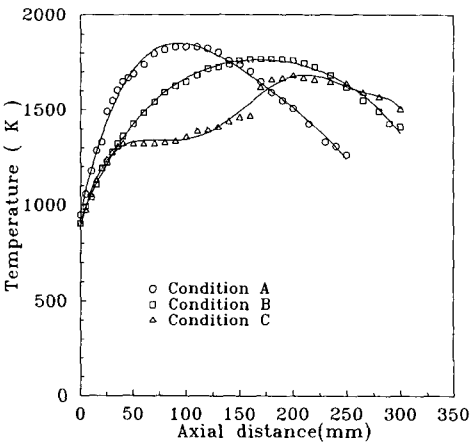
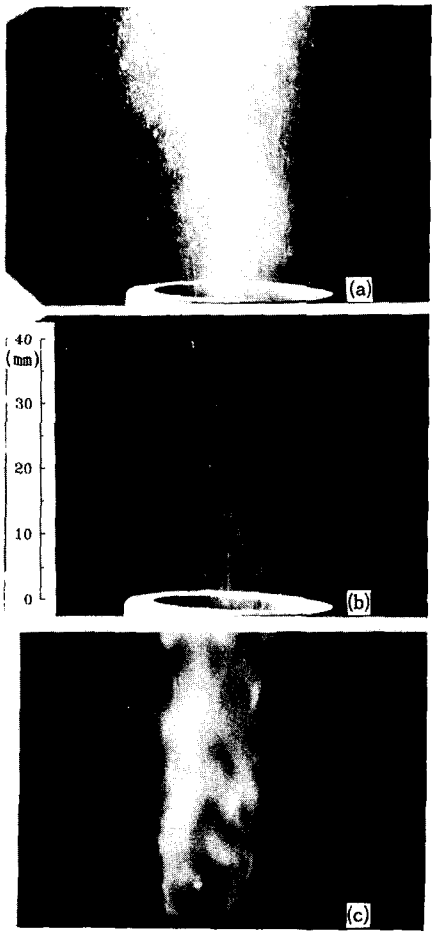


Fig. 21 Centerline temperature distribution for spray flame

Fig. 20은 단면 100 mm 위치의 온도 분포로서 공기량이 18.5 *l*/min의 화염은 반경거리 $r=12$ mm 주위에서 최고 1570K의 온도를 가지고 축 중심과는 200K 정도 차이를 가진다. 그러나 공기량이 증가할수록 이러한 축 중심과 반경방향의 최고온도 차이는 줄어들어 공기량이 32.0 *l*/min으로 증가한 경우는 축 중심에서 반경 방향 7 mm 위치까지는 최고온도 1820K 정도로 균일하여 졌음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 화염이 축 중심까지 침투하여 내부에서 증발한 연료가 연소하여 높은 온도 영역을 형성한다고 생각된다. Fig. 21은 각 조건에서 축방향에 따른 온도 분포를 나타낸 결과로 공기량이 18.5 l/min인 경우에는 약 50 mm 단면에서 120 mm 단면까지는 축 중심의 온도 상승이 크지 않다. 이러한 결과로부터 연료가 과농하고 산소의 부족 등으로 화염이 침투하지 못하며 단지 주위의 고온영역으로 인하여 증발하고 일부는 soot로 되기 때문인 것으로 생각된다. 공기량이 증가함에 따라 산소의 공급이 많아지고 또한 주위로 부터의 공기 유입이 증가하여 화염은 분무군의 내부로 침투하며 soot 등의 발생이 억제되어 고온의 보다 양호한 화염을 얻을 수 있다고 판단된다. 실제 조건 C의 공기량이 부족한 축 중심부의 일부 영역에서는 온도 측정시 열전대 선단에 soot가 부착되는 현상을 발견할 수 있었다. 또한 비연소시 액적의 크기, 속도, 액적과 속도의 상관관계, 수밀도, 평균온도, 화염의 관찰 등으로부터 동일한 연료량의 각 조건에서 액적의 미립화가 양호하고 주위공기의 유입이 많은 조건 A에서 가장 양호한 화염을 얻을 수 있었다. 또한 보염기 주위의 외부공기 유입이 활발한 영역에서는 개별액적 연소현상도 나타났으며 각 조건에서 속도가 빠르고 S. M. D.가 큰 액적은 고온영역을 통과 하면서 증발하여 연소를 완료하지 못하고 화염대 외부로 빠져나와 개별적으로 연소하거나 消火되는 것을 확인할 수 있었다.

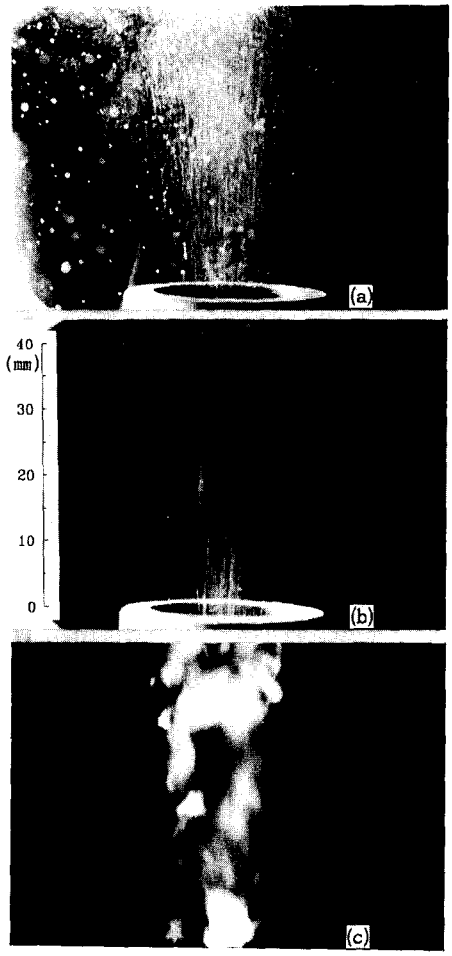
2.1 화염의 가시화

분무화염의 형태를 결정하는 인자는 매우 많으나 그 중 대표적으로 액적의 크기가 작아지고 수밀도가 증가하여 증발율이 커지면 단일 액적연소에서 내부 집단연소의 형태로 이동하며 이러한 경향은 산업로, 로켓등 노즐부근의 과농한 혼합기에서는 외부 집단 연소형태로 연소한다고 알려져 있다. Figs. 22~24는 본 연구에서 제작 사용한 2유체 분사노즐 부근에서 분무화염을 가시화한 결과로서 (a)는 비연소시 분무군의 경계를 확인하기 위하여 연소중 갑자기 消火시켜 분무를 광원으로 산란하여 직접 사진촬영한 것이며 또한 그림 (b)는 할로겐 램프를 이용하여 화염을 조명하여 촬영한 것으로서 화염중의 밝은 청색부분을 상쇄시켜 액적들에 의해 산란된 광을 촬영한 것이며 (c)는 직접사진 결과이다. Fig. 22는 연료량 17.8 cc/min, 공기량 32.0 *l*/min에 대한 결과로 (a)와 (b)를 비교하여 보면 비연소시 분무 경계와 연소시 산란광에 의하여 존재하는 액적의 경계는 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 (b)와 (c)를 비교하면 큰 차이를 나타내고 있다. 사진 (c)에서의 가시 화염존재 영역보다 사



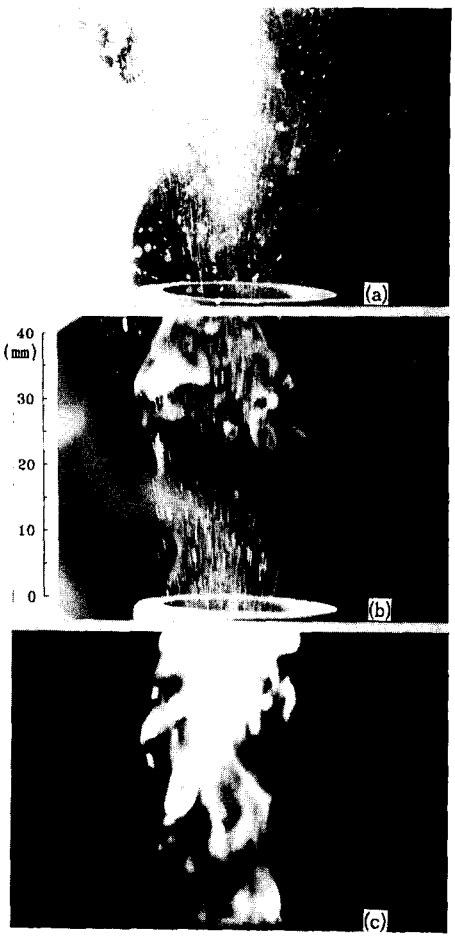
(a) Spray
(b) Scattered flame with lamp
(c) Direct flame

Fig. 22 Photography of condition A



(a) Spray
(b) Scattered flame with lamp
(c) Direct flame

Fig. 23 Photography of condition B



(a) Spray
(b) Scattered flame with lamp
(c) Direct flame

Fig. 24 Photography of condition C

진 (b)에서 액적이 존재하는 영역이 넓다는 것을 알 수 있다. Fig. 23과 Fig. 24는 동일한 연료량의 경우 공기량이 22.0 *l*/min와 18.5 *l*/min일 때의 가시화 결과로 조건 A와 유사한 경향을 보이고 있으나, 공기량이 감소함에 따라 청색화염에서 적색화염으로 변화되고 있다. 이러한 결과로부터 화염대의 평균적 위치는 분무 경계 내부에 존재하고 화염대 외부에 존재하는 액적들은 개별적 연소를 하거나 혹은 연소하지 못하고 액적 상태로 존재하여 일부는 화염대로부터의 강한 복사열에 의하여 증발한다고 생각된다. 즉 대부분의 분무 액적들은 외부 집단연소 모델로 연소하고 있으나 화염대에서 완전히 증발연소하지 못한 일부 큰 액적이 화염대를 이탈하여 개별 연소하는 내부 집단연소 형태의 화염으로 연소한다고 판단된다.

4. 결 론

분무연소의 특성과 화염의 구조는 액적의 크기, 속도, 공기와 액적간 상대 속도, 수밀도, 연료의 증발특성, 액적간 상호작용 등 많은 인자들에 의하여 지배되며 특히 비연소시 분무의 초기 특성이 화염에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 2유체 분사노즐에서 PDA를 이용하여 분무특성을 연구하고

화상처리 시스템으로 분무의 산란강도를 화상화 함으로서 수밀도에 대한 정성적 특성을 알 수 있었다. 또한 화염의 온도측정과 가시화를 실시하여 연소특성을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 액적의 미립화는 미립화 공기량이 많을수록 양호해져 액적의 크기가 작고 평균속도가 크며 평균속도의 RMS 값도 크다. 또한 노즐 선단 축 중심 부근의 높은 수밀도 영역을 제외한 대부분의 영역에서 하류로 이동함에 따라 액적의 평균 입경 및 속도는 감소한다. 그러나 노즐 선단 축 중심 부근의 높은 수밀도 영역은 액적의 충돌, 합체 등의 현상으로 S. M. D.의 변화가 없거나 약간 증가하였다.

(2) 액적의 크기와 속도의 상관 관계로부터 노즐 선단의 일부 영역을 제외한 대부분의 영역에서 공기 유동장에 빨리 추종할 수 있는 10 μm 이하의 미소 액적은 큰 액적의 속도보다 작다. 즉 노즐 출구부근을 제외한 대부분의 영역에서 공기의 속도보다 액적의 평균속도가 빠르다.

(3) 산란광 강도의 화상으로부터 분무입자의 수밀도를 정성적으로 얻을 수 있으며 본 연구에 사용된 노즐에서는 노즐 선단의 축 중심부에 많은 입자들이 존재한다.

(4) 가시화 사진을 통하여 보염기 상단의 비연소시 분무 경계와 연소시 산란 방법에 의하여 확인한 액적의 존재영역은 거의 일치하며, 직접 사진 결과의 가시화염 존재영역은 액적 존재영역보다 내부에 존재 한다. 이것은 비연소시 크기가 크고 속도가 빠른 액적들이 고온의 연소영역을 통과하면서 완전 증발 연소하지 못하고 화염대를 빠져나와 개별 액적 연소를 하거나 혹은 消火된 액적으로 蒸發한다.

참고문헌

(1) Dwyer, H. A. and Sanders, B. R., 1986, "A Detailed Study of Burning Fuel Droplets," Twenty-First Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 633~639.

(2) Chiu, H. H. and Liu, T. M., 1977, "Group combustion of Liquid Droplets," *Combustion Science and Technology*, Vol. 17, pp. 127~142.

(3) Onuma, Y. and Ogasawara, M., 1974, "Studies of the Structure of a Spray Combustion Flame," *Fifteenth Symposium (International) on Combustion.*

(4) Edwards, C. F. and Rudoff, R. C., 1990, "Structure of a Swirl-Stabilized Spray Flame by Imaging, Laser Doppler Velocimetry, and Phase Doppler Anemometry," Twenyt-Third Symposium(International) on Combustion, Institute, pp. 1353~1359.

(5) Khalil, E. E. and Whitelaw, J. H., 1976, "Aerodynamic and Thermodynamic Characteristics of Kerosene-SprayFlames," *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, Institatute pp. 569~576.

(6) Yule, A. J. and Balado, R., 1984, "Fuel Spray Burning and Initial Conditions," *Combustion and Flame* 55 : 1~12.

(7) Ghaffarpour, M. and Chehroudi, B., 1993, "Experiments on Spray Combustion in a Gas Turbine Model Combustor," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 92, pp. 173~200.

(8) Presser, C., Guta, A. K., Avedisian, C. T. and Semerjian, H. G., 1990, "Fuel Property Effects on the Spray Flames," *Twenty-Third Stmposium (International) on Combustion Institute*, pp. 1361~1367.

(9) Mao, C. -P., Wang, G. and Chigier, N., 1986, "An Experimental Study of Air-Assist Atomizer Spray Flames," *Twenty-First Symposium (International)* on Combustion, Institute, pp. 665~673.

(10) McDonell, V. G. and Samuelsen, G. S., 1988, "Application of Two Component Phase Doppler Interferometry to the Measurement of Particle Size, Mass Flux, and Velocities in Two Phase flows," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion Institute*, pp. 1961~1971.

(11) Presser, C., Gupta, A. K. and Semertian, H. G., 1993, "Aerodynamic Characteristics of Swirling Spray Flames : Pressure-Jet Atomizer," *Combustion and Flame* 92, pp. 25~44.

(12) 백민수, 오상헌, 1992, "LDV를 이용한 분무 액적의 크기, 속도 측정과 분무연소 특성에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제20권, 제2호, pp. 115~124.