

〈논 문〉

기류분사 노즐에 의한 선회 분무 화염의 구조에 관한 실험적 연구

오상현* · 백민수** · 김동일***

(1995년 5월 29일 접수)

An Experimental Study on Swirling Spray Flame Structure by Air-Blast Nozzle

Sang-Heun, Oh, Min-Su, Paek and Dong-Il, Kim

Key Words : Air Blast Nozzle(기류분사노즐), Phase-Doppler Technique(위상 도플러 기법),
Air Entrainment(공기 유인), Main Reaction Region(주 반응영역)

Abstract

Detailed experimental study has been made of air blast kerosene spray flames with and without swirl in combustion air flow. Phase/Doppler detect technique is used to measure Sauter mean diameter, axial component mean and rms velocity, size-velocity correlation, and number density. These measurements are obtained for both nonreacting and reacting cases under several stable flame conditions. The results show that the introduction of swirl to the combustion air modifies the spatial distribution of droplet size, velocity, and number density, and thus alters the flame structure. However, due to the weak swirl intensity, the overall structure of swirling flames are essentially same as that of nonswirling flames. Physical model of structure of air blast atomized spray flames is projected to show that spray flames are composed of three distinct regions : the two-phase mixture region, the main reaction and the intermittent combustion region. Near the atomizer, two phase mixture of droplet and air is formed in the core region. This dense spray region is characterized by high droplet number density and the strong convective effect. There follows the main combustion region where the main flame penetrates within the spray boundary. Main reaction region of these flames are governed by internal group combustion mode. Finally there exists the intermittent combustion region where local group burning or isolated droplet burning occurs.

1. 서 론

액체 연료의 분무에서 액적 형성, 증발, 확산 및

연소 과정은 산업로, 보일러, 가스터빈, 디젤엔진 등과 같은 실제 연소계의 광범위한 운전에서 매우 중요하다. 그러나 분무연소에 관한 정확한 해석은 액적 크기 및 속도 분포에 영향을 미치는 액적의 증발, 연소, 그리고 물질 및 열전달의 2상간 상호 종속성이 존재하기 때문에 매우 어렵다. 연소 효율을 높이고 분무 화염에서 오염 물질의 생성을 억제하

*회원, 부산대학교 기계공학과 기계기술연구소

**회원, 부산대학교 기계기술연구소

***부산대학교 기계기술연구소

기 위해서는 분무 및 분무 화염의 특성과 구조에 관한 자세한 이해가 요구된다. 일반적으로 연소기에서 이러한 과정들은 다상의 3차원 난류유동으로서 복잡한 물리 화학적 현상을 수반한다. 과거 분무 연소에서 주목되지 못하였던 중요한 변수 중의 하나는 반응하는 주위 유동장과 연료 액적 사이의 상호 작용에 관한 것으로서 분무 연소는 단순히 연소하는 액적들의 집합체가 아니라 액적과 액적, 액적과 주위 기체와의 상호 작용에 크게 의존한다는 것이다. Faeth⁽¹⁾와 Williams⁽²⁾는 분무연소에서 복잡한 물리 화학적 과정의 상호 작용을 입자 배열을 통해 연구하였다. Onuma⁽³⁾ 등은 화염의 구조를 규명하기 위하여 가스유동 특성, 화염온도 및 화학적 조성, 연소시 액적의 수밀도 등을 연구함으로써 분무 화염의 구조와 특성은 난류 확산 화염에 가깝다고 하였으나 이러한 분무 화염의 구조는 연료의 증발과 확산 특성 등에 의하여 크게 달라지는 복잡

한 구조를 하고 있다고 보고되고 있다.⁽⁴⁻⁵⁾ 광학적 진단 기술이 분무와 분무 화염의 특성에 관한 정량적 정보를 얻기 위하여 사용되고⁽⁶⁻¹³⁾ 있으며 특히 최근에는 액적의 크기와 속도 등에 관한 공간적으로 분해능이 우수한 위상/도플러(phase/Doppler) 간섭계가 이용되고 있다. 실제 연소 시스템의 대부분은 주위 공기 유동에 선회를 가하여 사용되므로 선회가 가해진 분무 화염에 관한 연구도 이루어져 왔다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 그러나 이러한 대부분의 연구가 선회 효과에 의한 화염의 크기, 형태, 안정성 등에 주목을 두어 왔고, 액적의 크기 및 속도와 주위 공기와 의 상호 작용에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구의 목적은 선회가 가해진 2유체 분사 노즐에 의해 형성된 분무 및 분무 화염의 구조를 이해하고 모델 검증 및 개발에 필요한 기초적인 자료를 얻고자한다. 연구에서는 2유체 분사 노즐을 이용하여 2차 공기에 선회를 가함으로서 비연소시 연

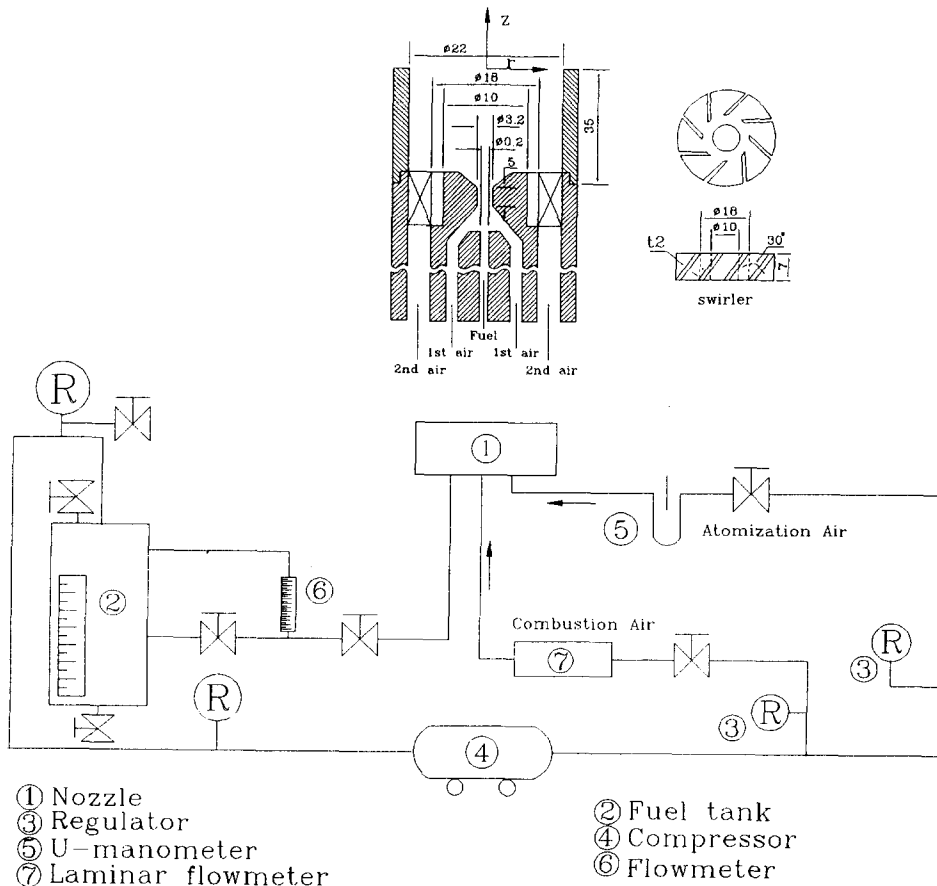


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

료 액적의 크기, 속도, 수밀도 및 이들의 상관 관계를 PDA를 이용하여 계측함으로써 선회가 없는 경우와 2차 공기에 선회가 있는 경우의 분무 구조를 비교한다. 또한 동일한 조건에서 연소시 화염중의 액적의 거동, 즉 액적의 SMD, 축 방향 성분의 속도, 액적의 공간적 수밀도 등을 계측함으로써 선회 분무 화염의 구조와 특성을 조사한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 노즐은 air-blast 형의 노즐로서 비연소/연소 모두 수직 상방향으로 연료를 분사하여 대기압 개방 상태에서 계측하였다. Fig. 1은 노즐의 개략도로서 연료 분출 직경은 0.2 mm이고 연료와 공기가 내부에서 혼합되는 내부 혼합형 노즐로서 연료 및 1차 공기의 분출 직경은 3.2 mm이다. 또한 2차 공기가 노즐 주위에 공급되었다. 2차 공기의 선회를 위하여 베인(vane)형태의 높이 7 mm, 간극 1 mm의 선회기를 설치하였으며 선회가 없는 경우는 선회기를 제거하였다. 베인의 각이

30°인 경우 선회강도는 0.38 정도이며 선회가 있는 경우는 비연소시 및 연소시 동일한 선회 강도를 사용하였다. 또한 화염의 안정을 위하여 노즐 선단에 높이 35 mm, 내경 22 mm의 실린더형 보염기(flame holder)를 설치하여 화염을 안정화시켰다. 연구에 사용된 연료는 상온의 백등유를 사용하였으며 연료의 유량은 연료 탱크의 압력조절로서 제어하였으며 수시로 보정하였다. 미립화를 위한 1차 공기량은 26.5 l/min이고, 연소용 공기인 2차 공기량은 30.0 l/min이다.

분무 연소장의 온도 측정은 직경 0.3 mm Pt/Pt-Rh 13%의 수냉식 3중관 열전대를 이용하였고 복사와 전도에 의한 열 손실은 고려하지 않았다. 온도측정 data는 아날로그/디지털 변환기(A/D converter)를 이용하여 개인용 컴퓨터로 1000개 이상 통계처리하여 평균하였다. 액적의 크기 및 속도 등의 동시 측정은 선행 연구⁽⁸⁾에서 사용한 PDA를 이용하여 실시하였다.

광원으로서는 Ar⁺ 레이저의 파장 514.4 nm를 사용하였으며 비임(beam) 간격은 38 mm, 전달부

Table 1 The configuration of particle dynamic analyzer

(a) Transmitting optics setup

Fringe spacing	5.42	microns
No. of Fringe	44	EA
Delta X	0.24	mm
Delta Y	0.24	mm
Delta Z	5.02	mm
Laser power	1.8	watts
Laser wavelength	0.5145	microns
Gaussian beam diameter	1.10	mm
Beam separation	38	mm
Lens focal length	400	mm

(b) Receiving optics setup

Maximum diameter	316.6	microns
Phase factors U1-2, U1-3	Reflection 2.015, 0.820	deg./micron
Maximum particle concentration	0.1E6	EA/cm ³
Angle adjustment	0.5	mm
Scattering angle	125	degrees
Lens focal length	310	mm
Direction of fringe motion	negative	
Particle/medium refractive indexes	1.42/1.00	
Particle density	0.80	g/cm ³

(transmitter)의 초점거리는 400 mm이다. 이때 간섭 무늬 간격은 5.42 m, 간섭 무늬의 수는 44개이다. Table 1에 전달부와 수광부의 특성을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 비연소시 분무 특성

액적의 SMD : Fig. 2는 연료량 17.8 cc/min, 미립화 공기량 26.5 l/min, 2차 공기량 30.0 l/min의 조건에서 air-blast 형 노즐에 의해 형성된 분무 액적의 SMD 분포를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 비연소시 축 방향 거리 2 mm, 25 mm, 50 mm에서 반경 방향에 따른 결과로서 SMD의 크기 분포가 40 m 전후로 큰 차이가 없고 축 중심에서 멀어짐에 따라 SMD가 증가한 후 분무 가장자리에서 약간 감소하는 경향을 가진다. 이러한 경향은 분무 중심에서는 상대적으로 빠른 유속으로 인하여 공기와 연료 및 유적의 큰 전단력이 발생함으로써 미립화가 상대적으로 잘 이루어지기 때문으로 생각된다. 또한 축 방향 거리 2 mm, 25 mm, 50 mm 단

면으로 이동함에 따라 액적의 SMD는 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 2차 공기에 의하여 하류로 이동함에 따라 액적의 미립화를 촉진하고 유적의 속도 감소를 완화하여 충돌 등에 의해 합체되는 액적의 수가 감소하기 때문이다. Fig. 2(b)는 2차 공기의 선회에 의한 비연소시 액적의 미립화 특성인 SMD를 각 위치에 따라서 나타낸 결과로 z=2 mm 단면에서 축 중심의 SMD는 51 μ m이고 축에서 멀어짐에 따라 증가하여 r= \pm 10 mm에서는 55 μ m이다. 2차 공기의 선회에 의해서 액적의 SMD의 반경 방향에 따른 분포가 r=0~ \pm 10 mm 영역에서는 상대적으로 증가하고 r=10 mm 외측에서는 감소하였다. Fig. 3은 비연소시 2 mm 단면의 축 중심에서 시간에 따른 액적의 크기 분포를 나타낸 것으로서 2차 공기에 선회가 있는 Fig. 3(b)가 10 μ m-40 μ m의 액적이 비교적 균일하게 분포하는데 비하여 선회가 없는 경우 Fig. 3(a)는 20 μ m 이내의 액적이 조밀하게 분포한다. 이것은 2차 공기의 선회에 의하여 분무군 중심에서 액적의 미립화 특성이 나빠지고 또한 상대

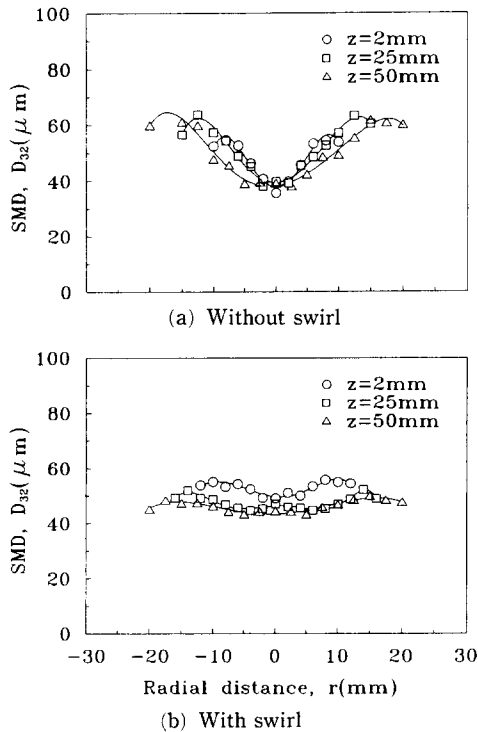


Fig. 2 Distributions of Sauter mean diameters of nonreacting spray.

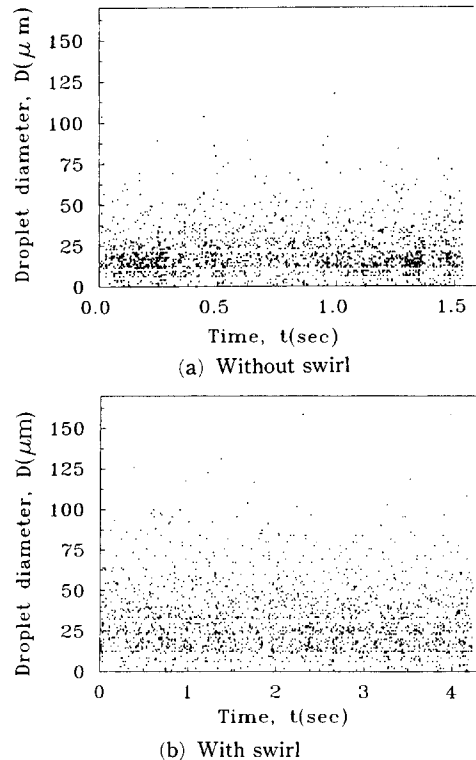
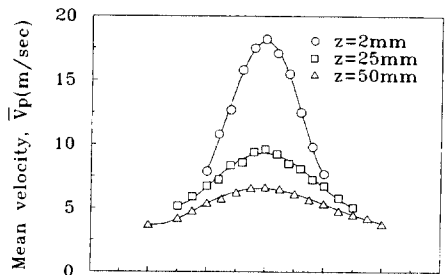


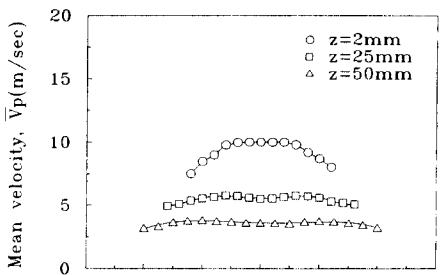
Fig. 3 Time history of droplet diameter at z=2mm, r=0mm with nonreacting spray.

적으로 작은 액적이 분무군 외측으로 유인되었다고 생각된다. 따라서 2차 공기에 선회가 있는 경우 액적의 SMD 분포가 상대적으로 균일한 것은 축 중심부에서 선회에 의하여 평균 공기 유속이 감소하여 축 중심부의 미립화 특성을 상대적으로 나쁘게 하고 원심력에 의하여 작은 입자는 분무군 외부로 이동하여 단면에 따른 SMD 분포가 균일하게 되었다.

액적의 축 방향 평균 및 rms 속도 : Fig. 4는 비연소시 액적의 축 방향 평균 속도를 나타낸 것으로서 (a)는 선회가 없는 경우이며 (b)는 선회가 있는 경우에 대한 결과이다. 선회가 없는 경우 축 방향 거리 2 mm 단면 중심에서 18 m/sec로 가장 빠르고 중심에서 멀어짐에 따라 액적의 축 방향 평균 속도는 급격히 감소한다. $z=25$ mm 단면에서는 축 중심의 축 방향 평균 속도는 9 m/sec로 $z=2$ mm 단면 중심의 1/2로 감소하였다. $z=50$ mm 단면에서 축 중심의 평균 속도는 7 m/sec이며 반경 방향에 따라 감소한다. 이러한 액적의 축 방향 속도 분포는 선회가 없는 공기의 제트 속도 분포와 유사하다. 그러나 (b)에서 2차 공기에 선회를 가한 경우 액적의 축 방향 평균 속도 거동은 (a)와는 다른



(a) Without swirl



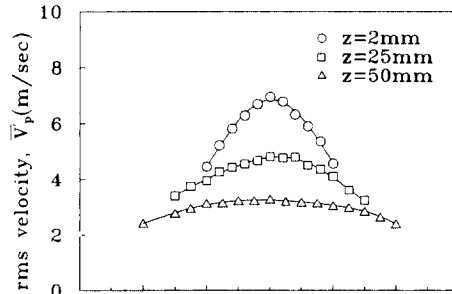
(b) With swirl

Fig. 4 Distributions of axial mean droplet velocity of nonreacting spray.

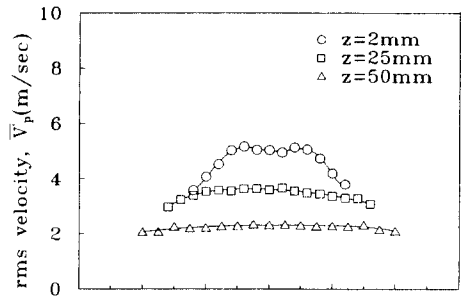
분포를 갖는다. $z=2$ mm 단면에서 $r=0 \sim \pm 6$ mm 까지는 액적의 축 방향 평균 속도가 10 m/sec로 상당히 균일하고 $r=\pm 6$ mm 외측은 선회가 없는 경우 보다 완만하게 감소한다. 또한 $z=25$ mm 단면에서는 5 m/sec, $z=50$ mm 단면에서는 3.5 m/sec로 전단면에 걸쳐서 비교적 균일한 축 방향 평균 속도를 갖는다.

Fig. 5는 액적의 축 방향 속도 성분에 대한 rms 속도를 나타낸 것으로서 그 경향이 선회가 없는 경우 및 2차 공기의 선회가 있는 경우 모두 평균 속도 분포와 유사하다.

액적의 크기와 속도의 상관 관계 : Fig. 6은 액적의 크기와 속도의 상관 관계를 선회가 없는 경우와 2차 공기에 선회가 있는 경우에 대한 결과로 액적의 수는 두 경우 2×10^2 개를 기준으로 하였다. 축 방향 거리 $z=2$ mm의 축 중심에서 측정된 결과 선회가 없는 (a)와 2차 공기에 선회가 있는 (b)를 비교하면 선회가 없는 조건에서 액적의 크기는 $0 \sim 80 \mu\text{m}$ 범위이며, 축 방향 속도 분포도 $0 \sim 35$ m/sec이다. 그러나 2차 공기에 선회가 있는 경우,



(a) Without swirl



(b) With swirl

Fig. 5 Distributions of axial root mean square droplet velocity of nonreacting spray.

액적 크기는 0~100 μm 로 넓어졌고 축 방향 속도 성분은 0~25 m/sec로 감소하였다. 이러한 특성은 앞의 액적의 크기와 속도에서 언급한 선화의 특성 때문으로 생각된다. 또한 두 조건 모두 액적의 크기가 클수록 축 방향 평균 속도가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 미소 액적 혹은 액적이 작을수록 기체(공기)의 속도와 차이가 작고 기체와 유사한 유동을 한다고 가정하면 큰 입자의 속도가 작은 입자의 속도보다 크기 때문에 큰 입자의 축 방향 속도가 기체보다 빠르다는 것을 알 수 있다.

액적의 수밀도 : 액적의 공간적 수밀도는 분무 연소에 미치는 가장 큰 인자 중의 하나이다. 이러한 액적의 수밀도는 분무되는 연료량, 액적의 크기, 액적의 속도 및 노즐의 분사각 등에 따라 크게 달라진다. Fig. 7은 연료량 17.8 cc/min, 1차 공기량 26.5 l/min, 2차 공기량 30.0 l/min에 대한 액적의 공간적 수밀도이다. 선화가 없는 (a)에서 $z=2\text{ mm}$ 단면의 축 중심에서 단위 체적 당(cc) 입자의 공간적 수밀도는 2.3×10^3 개로 매우 높고 분무군 외측의 $r = \pm 10\text{ mm}$ 위치에서는 3×10^2 개로 분무군

중심에 비하여 1/10 정도이다. $z=25\text{ mm}$, $z=50\text{ mm}$ 단면으로 감에 따라 이러한 분무의 수밀도는 폭이 넓어지고 수밀도도 조금 높아진다. 이것은 연료 액적의 퍼짐(dispersion)에 의한 수밀도의 감소 효과보다 연료 액적의 속도 감소로 인하여 액적이 공간적으로 누적되기 때문으로 생각된다. (b)는 2차 공기에 선화를 가한 경우로서 선화가 없는 경우와 비교하면 축 중심의 공간적 수밀도가 분무군의 폭이 넓어져 액적간의 공간적 거리가 넓어졌다.

3.2 연소시 분무 및 화염 특성

앞에서 비연소시 연료량 17.8 cc/min, 1차 공기량 26.5 l/min, 2차 공기량 30.0 l/min에 대하여 선화가 없는 경우와 2차 공기에 선화가 있는 경우에 관한 비연소시 액적의 SMD 및 축 방향 평균 속도에 관하여 나타내었다. Fig. 8은 이러한 분무에 화염이 형성되었을 경우 평균온도 분포를 나타낸 것으로 선화가 있는 화염이 선화가 없는 경우보다 반경 방향에 따른 온도의 변화가 작으나 전체적인 온도 분포는 낮다.

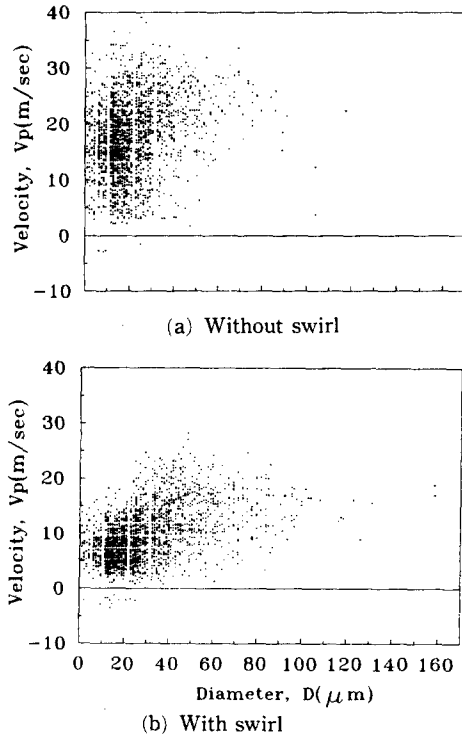


Fig. 6 Distributions of size-velocity correlation of droplet at $z=2\text{ mm}$, $r=0\text{ mm}$ with nonreacting spray.

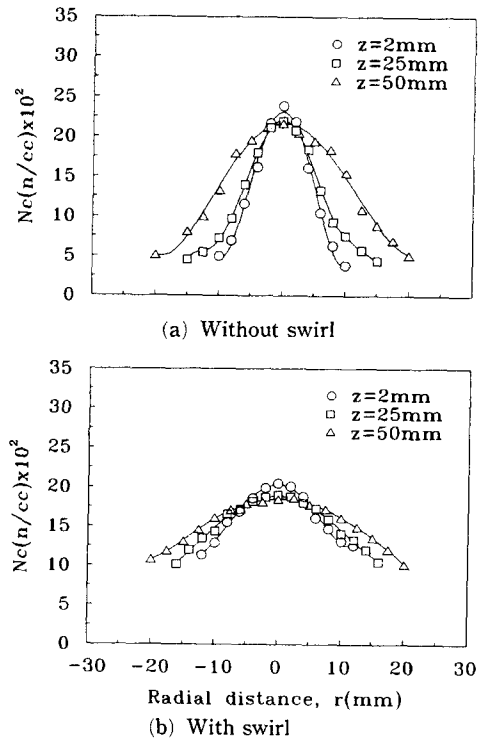


Fig. 7 Distributions of number density of nonreacting spray.

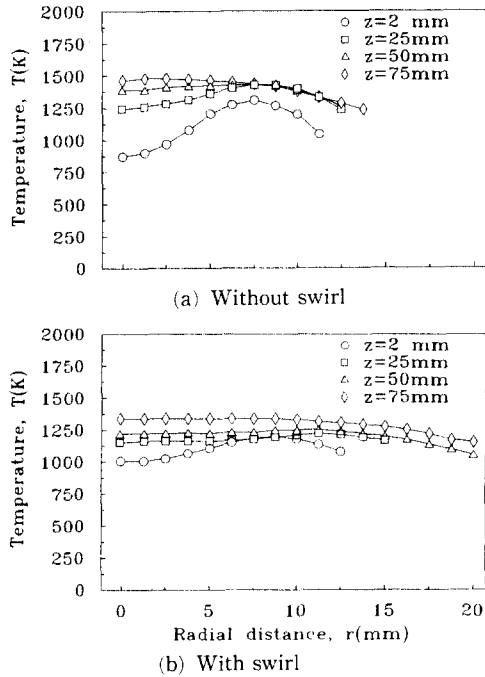


Fig. 8 Radial distribution of mean temperature of spray flame.

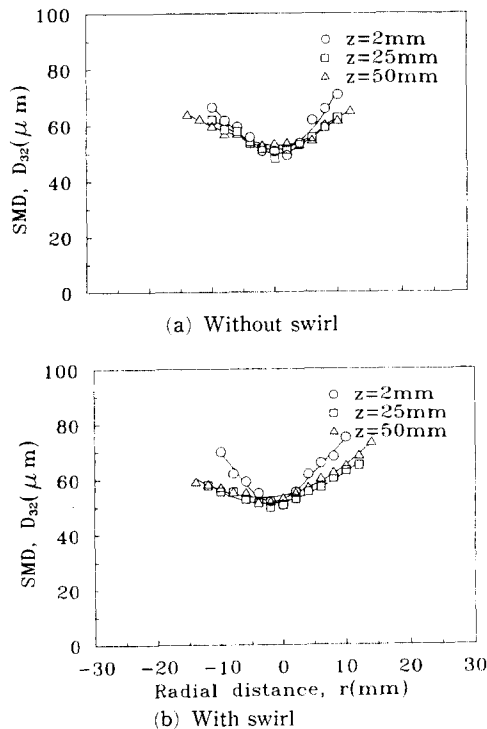


Fig. 9 Distributions of Sauter mean diameters of reacting spray.

본 절에서는 분무 특성이 연소장에서 어떻게 변화하며 분무 화염의 구조에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

액적의 크기 : Fig. 9(a)는 선회가 없는 경우에 $z=2$ mm, 25 mm, 50 mm 단면에서 액적의 SMD 분포를 나타낸 것으로써 각 단면에서 액적의 크기 분포는 축 중심에서 반경 방향으로 갈수록 증가하는 형태를 보이고 있다. 이러한 경향은 기본적으로 비연소시 크기 분포와 같은 경향으로서 비연소시는 $38\mu m \sim 62\mu m$, 연소시는 위치에 따라 다소 차이가 있으나 축 중심에서 $50\mu m$ 에서 중심으로부터 멀어짐에 따라 증가하여 분무군 외측에서 $62\mu m$ 정도의 값을 가진다. 또한 축 중심부에서 액적의 크기가 비연소시보다 상대적으로 크게 증가한 것은 축 중심에 크기가 작은 액적의 수가 많기 때문에 주위의 고온 열에 의하여 선택적 증발이 발생하고 잔존하는 큰 액적에 의하여 SMD가 크게 증가하였다. Fig. 9(b)는 2차 공기에 선회를 가한 경우의 SMD 분포로서 선회가 없는 경우와는 달리 비연소시의 분포와 차이가 있다. 이것은 비연소시 연소용 공기의 선회에 의하여 분무군 중심의 상대적으로 작은 액적들이 원심력에 의하여 축 외부로 이동함으로써 중심부는 큰 액적의 수밀도가 높고 바깥쪽은 작은 액적들의 수밀도가 상대적으로 높다. 그리고 연소시에는 미소 액적들이 급속히 증발, 소멸함으로써 비연소시와 비교하여 중심보다 바깥부분의 SMD 증가가 현저하다고 생각된다. 따라서 선회의 유무에 관계 없이 화염중의 액적 크기 및 분포는 큰 차이가 없다.

액적의 축 방향 평균 및 rms 속도 분포 : Fig. 10은 연소시 액적의 축 방향 평균속도 분포를 나타낸 것이다. 선회가 없는 (a)의 $z=2$ mm 단면에서 축 중심부의 축 방향 평균 속도는 45 m/sec이고 $r=10$ mm 위치에서는 11 m/sec로 급격히 감소하며 $z=50$ mm 단면에서는 축 중심의 평균 속도는 35 m/sec로 $z=2$ mm 단면보다 10 m/sec 감소하였으며 축 중심에서 멀어질수록 감소한다. (b)는 선회가 있는 경우의 화염 중에 존재하는 액적의 축 방향 평균 속도로서 비연소시와 비교하면 $z=2$ mm의 축 중심에서는 4배 증가하였고 $z=50$ mm 단면에서는 최고 9배정도 증가하였다. 연소시 선회가 없는 경우와 비교하면 $z=2$ mm 단면에서는 축 중심에서 45 m/sec 이던 속도가 40 m/sec로 감소하고 또한 반경방향에 따른 속도 감소 폭이 상대적으로 완만

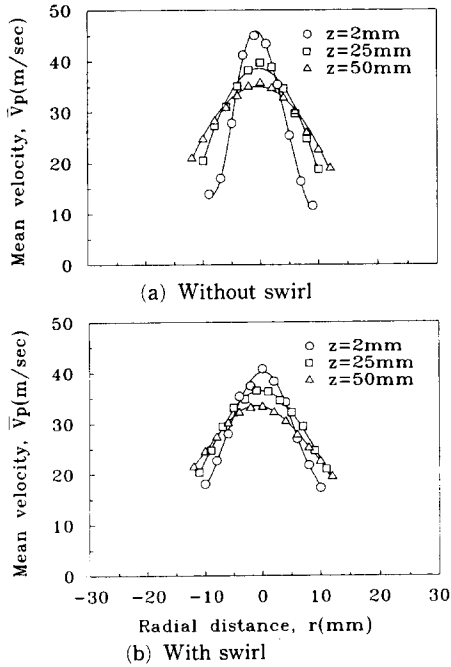


Fig. 10 Distributions of axial mean droplet velocity of reacting spray.

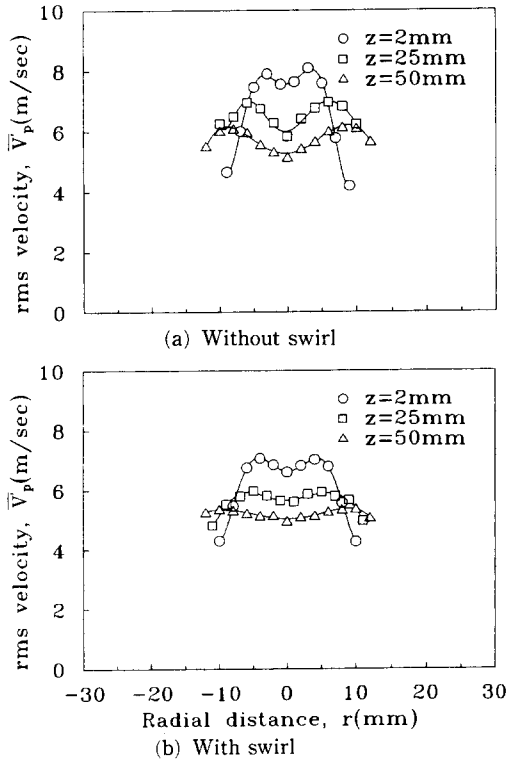


Fig. 11 Distributions of axial root mean square droplet velocity of reacting spray.

해 졌고 $z=25$ mm와 $z=50$ mm에서는 속도가 축 중심부에서 2~3 m/sec 감소하였을뿐 선회가 없는 경우와 유사하다.

Fig. 11은 연소시 축 방향의 rms 속도 분포를 나타낸 것이다. (a)의 선회가 없는 경우는 $z=2$ mm에서는 $r=\pm 4$ mm, $z=25$ mm에서는 $r=\pm 6$ mm, $z=50$ mm에서는 $r=\pm 10$ mm 위치에서 최대 rms 속도를 가진다. 즉 이 영역에서 공기誘引이 활발하다고 생각된다. (b)의 선회가 있는 경우 액적의 축 방향 rms 속도는 선회가 없는 경우와 경향은 유사하며 절대값은 위치에 따라 0.5 m/sec~1.5 m/sec 정도 감소하였고 단면에 따른 변화 폭은 완화되었으며 최고 피크 값의 위치도 반경방향으로 약간 이동하였다. 이러한 것으로 부터 2차 공기에 선회가 있는 경우, 주위 공기의 유인이 감소하고 주 연소 반응영역이 2차 공기의 선회가 없는 경우보다 외측에 존재한다는 것을 알 수 있다.

액적의 크기와 속도의 상관 관계 : Fig. 12는 연소장에서 축 방향 거리 2 mm 단면 중심의 액적의 크기와 속도의 상관 관계를 나타낸 것으로 비연소

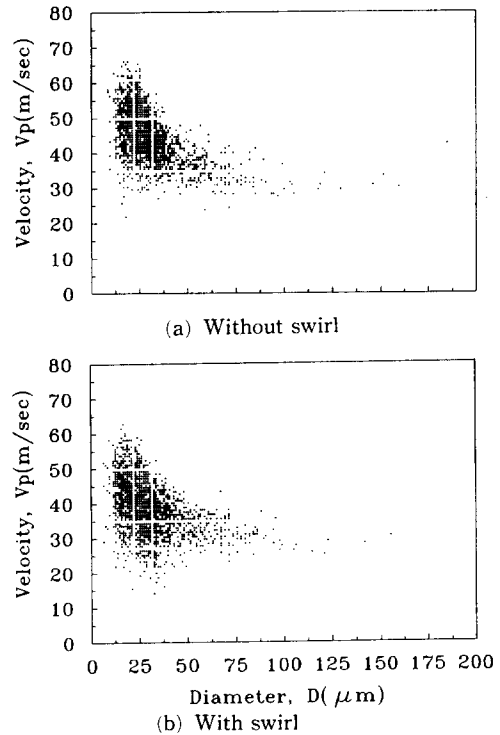


Fig. 12 Distributions of size-velocity correlation of droplet at $z=2$ mm, $r=0$ mm with reacting spray.

시와는 달리 액적이 작을수록 축 방향 속도가 크게 나타난다. 이것은 연소에 의한 체적 팽창 등에 의하여 화염 중에 존재하는 미소 액적들은 주위의 공기의 팽창과 함께 급속한 속도 증가를 일으킨다. 그러나 비교적 큰 액적들은 관성에 의하여 주위의 가스와 상대 속도가 발생하여 가스 유동장의 속도보다 작아지기 때문이다. 따라서 큰 액적들은 상대적으로 작은 액적보다 입자의 속도가 작다. 또한 Fig. 13은 50 mm 단면의 중심에서는 작은 액적의 속도가 상대적으로 감소하여 액적의 크기에 관계없이 비슷한 속도로 평형에 도달한다. Fig. 14는 시간에 따른 액적의 크기 분포로서 (a)의 선회가 없는 경우와 (b)의 선회가 존재하는 경우 모두 비연소시와 비교하면 연소에 의하여 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 작은 액적은 거의 존재하지 않는다. 이러한 것은 미소 액적의 경우 증발에 필요한 열량이 크지 않고 짧은 시간에 순간적으로 증발하기 때문으로 생각된다.

액적의 공간적 수밀도 : Fig. 15는 연소시 화염중의 액적의 수밀도를 나타낸 것이다. (a)는 비선회

의 결과로서 비연소시의 결과와 비교하면 $z=2\ \text{mm}$ 단면의 비연소시 수밀도는 2.4×10^3 개/cc에서 1.8×10^3 개/cc로 감소하였다. 또한 $z=50\ \text{mm}$ 단면에서 축 중심의 비연소시 수밀도는 2.1×10^3 개/cc이며, 연소시의 수밀도는 3×10^2 개/cc로 비연소시의 1/7정도로 감소하였다. 또한 축방향 $z=50\ \text{mm}$ 단면, 반경방향 $r=6\ \text{mm}$ 에서 비연소시 수밀도는 2×10^3 개/cc이고 연소시 수밀도는 80개/cc로서 비연소시의 1/25로 감소하였다. 이러한 결과로부터 $z=2\ \text{mm}$, $z=25\ \text{mm}$, $z=50\ \text{mm}$ 단면에서 액적의 공간적 수밀도를 비교하면 $z=25\sim 50\ \text{mm}$ 단면보다 $z=2\sim 25\ \text{mm}$ 단면에서 액적의 수밀도의 감소가 크다. 따라서 $z=25\sim 50\ \text{mm}$ 구간보다 $z=2\sim 25\ \text{mm}$ 영역에서 증발 및 반응이 활발하다. (b)는 2차 공기에 선회를 가한 경우, 화염중에 존재하는 액적의 공간적 수밀도를 나타낸 것으로서 (a)와 비교하면 화염중에 존재하는 액적의 수밀도는 화염 중심 영역에서는 선회가 없는 경우의 1/2정도이고 $r=\pm 8\ \text{mm}$ 외측은 비슷하거나 조금 높다. 또한 $z=25$

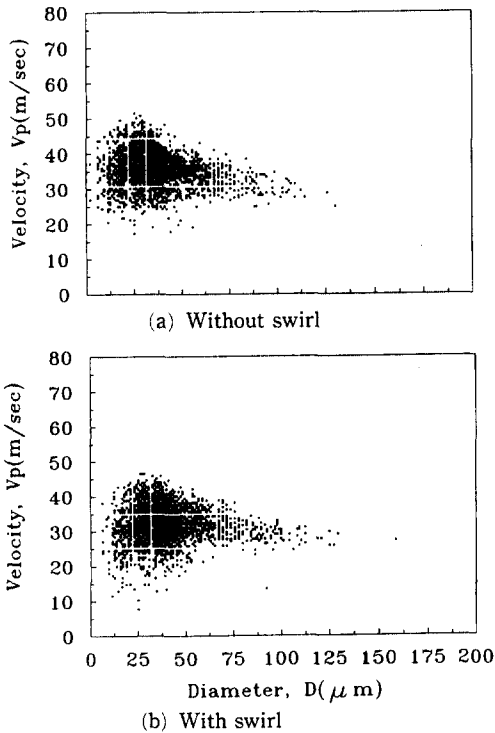


Fig. 13 Distributions of size-velocity correlation of droplet at $z=50\text{mm}$, $r=0\text{mm}$ with reacting spray.

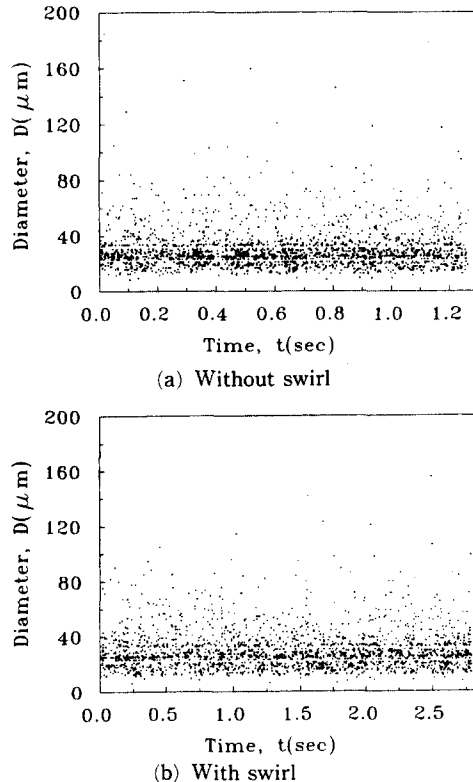


Fig. 14 Time history of droplet diameter of reacting spray at $z=2\text{mm}$, $r=0\text{mm}$.

mm, $z=50$ mm 단면의 수밀도의 공간적 분포는 단면에 걸쳐 비교적 균일하다. 따라서 선회에 의해서 화염중에 존재하는 액적의 공간적 수밀도의 분

포가 균일하여졌을뿐 아니라 비연소시의 결과와 비교하면 $z=2$ mm 단면의 수밀도가 비선회의 경우보다 크게 감소하였다. 선회가 있는 경우 증발 및 반응이 활발한 영역이 노즐방향으로 이동하였음을 알 수 있다.

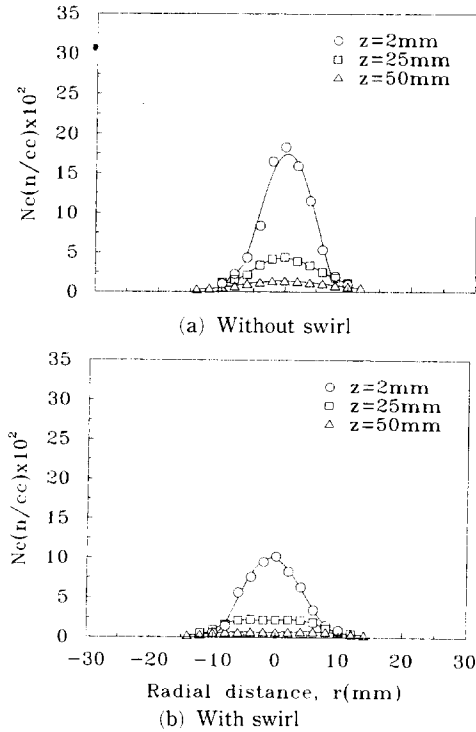


Fig. 15 Distributions of number density of reacting spray.

3.3 2차 공기에 선회가 작용하는 경우의 분무 및 화염 구조

선회가 없는 2차 공기가 공급되었을 경우 비연소시 분무의 구조는 2차 공기에 의하여 2 mm 단면에서 액적의 크기분포는 축 중심과 반경방향에 따른 편차가 크며 50 mm 단면에서 액적의 수밀도는 기류 및 액적의 급격한 속도 감소로 인하여 50 mm 단면에서 액적간 거리가 가까워져 높은 수밀도를 나타낸다. 2차 공기에 선회가 있는 경우에는 분무의 폭이 증가하고 액적의 크기는 단면에 따른 분포가 비교적 균일하게 되었다. 또한 Fig. 16의 (a), (b)는 선회가 없는 경우와 있는 경우의 1/250s 노출의 직접 사진이다. 2차 공기의 선회에 의하여 화염의 길이는 크게 감소하지 않았으나 화염의 폭은 증가하였다. 이러한 것은 2차 공기의 선회에 의하여 연소시 보염기 선단의 상류부에서는 액적의 속도, 수밀도 등에서 차이를 일으키나 하류로 갈수록 액적의 크기, 속도 및 수밀도 등에 큰 차이가 발생하지 않는다. Fig. 16의 (c)는 선회가 있는 경우에 광원에 의한 산란화염을 1/1000s로 촬영한 결

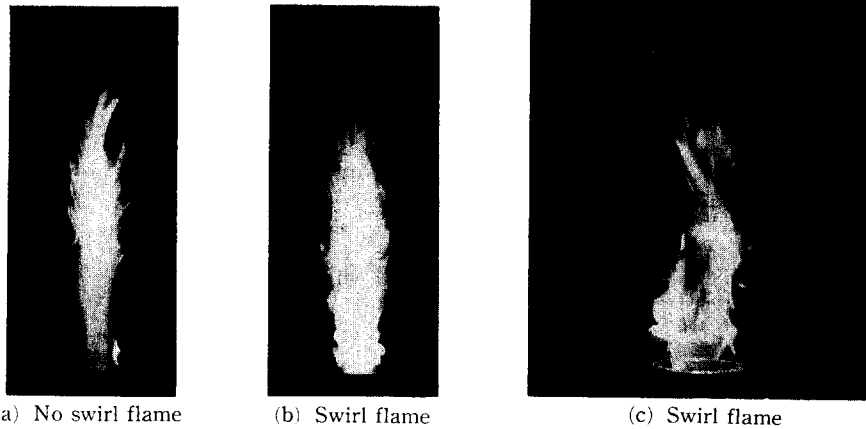


Fig. 16 Photographs of direct[(a), (b); shutter speed: 1/250s] and scattering flame. [(c) : shutter speed: 1/1000s]

과로서 본 실험의 분무화염은 보일러 주위를 제외한 대부분의 영역에서 내부 집단 연소가 이루어짐을 알 수 있다.

내부 혼합형 기류 분사 노즐에 의하여 형성된 분무 화염의 개략적 구조를 본 연구의 결과와 선행 연구⁽⁸⁾로부터 Fig. 17에 모델화 하였다. 액적의 크기, 수밀도, 그리고 액적의 크기와 속도의 관계로부터 화염의 노즐선단 중심부 영역에서는 액적의 수밀도가 매우 높은 액적과 기류가 공존하는 2상 혼합영역, 그 외부에 主燃燒 領域, 간헐적 연소 영역으로 구분할 수 있다. 2상 혼합 영역에서는 액적의 증발과 가속화가 이루어지고 主燃燒 領域에서는 2상 혼합영역에서 증발한 연료 증기가 주위에서 유입된 공기 등에 의하여 활발한 연소가 이루어진다. Chiu 등이 제시한 이론적 집단 연소모델의 외부 집단 연소는 액적의 수밀도가 높고 기상과 액적의 상대속도가 큰 노즐선단 분무 경계 외측에 하나의 가스 확산화염과 같이 형성되어 존재하나 그 영역은 매우 작다. Fig. 16(c)의 가시화 사진에서 잘 나타난 바와 같이 선회화염의 대부분의 영역에서 내부 집단 연소화염이 지배적이다. 따라서 분무경계의

內側에 主火焰이 형성되고 主火焰의 내부는 액적과 증발된 연료 증기가 공존하는 영역으로서 연료 증기가 과농하여 화염이 형성되기 어렵다. 또한 이 영역에서 과농한 혼합기는 산소가 부족하고 액적에 의한 냉각등으로 연료증기의 일부는 검댕(soot)으로 되며 주위 공기의 誘引 등에 의하여 국부적으로 가연 혼합기를 이루는 영역에서 선택적 국소 집단 화염이 형성된다. 화염 영역 외부의 액적들은 개별 액적 화염이 형성되거나 개별 액적 주위에 형성된 화염이 消火되어 증발이 진행되는 액적 상태로 飛行한다. 또한 상대적으로 액적의 크기가 크고 속도가 빠른 화염 내부의 일부 액적도 화염 경계 외부로 이탈하여 개별 액적 연소를 하거나 소화되어 액적으로 존재한다. 화염이 하류로 진행함에 따라 연소에 의하여 혼합기의 농도가 감소하고 火焰帶가 내부로 침투한다. 또한 분무의 감쇠 영역 하류, 즉 主火焰領域의 선단부분은 연료증기의 농도가 낮아짐에 따라 혼합기 전체에 화염이 형성되기 어려워지고 소규모 액적군 외부에 화염이 형성되는 국소 집단 화염(local group flame-multi droplet flame)이 간헐적으로 발생한다. 이러한 영역에서 완전히

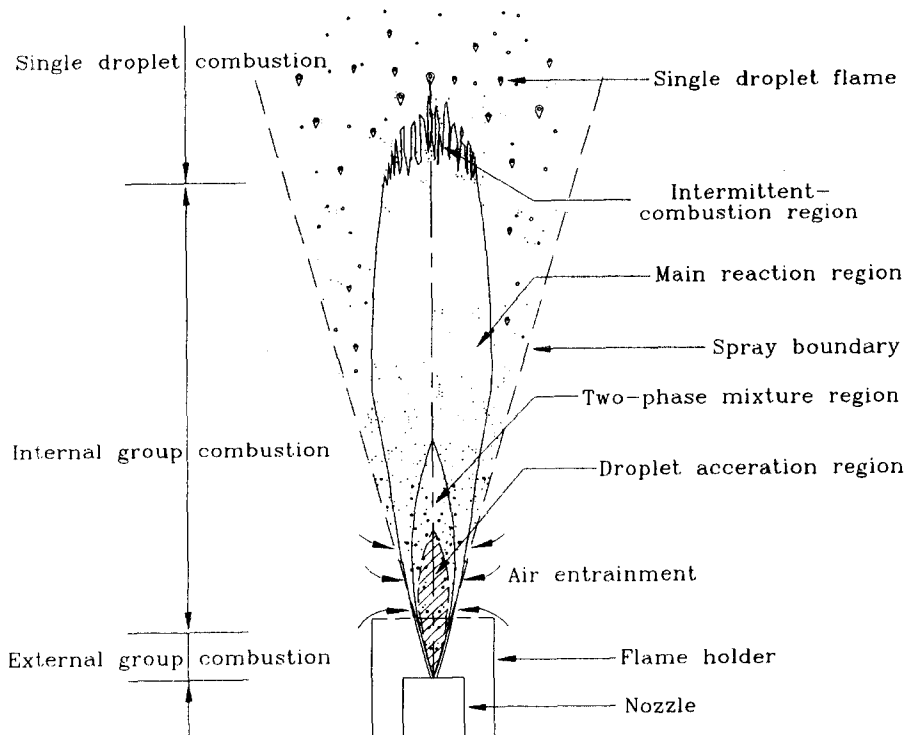


Fig. 17 Schematic diagram of physical model of airblast atomized jet spray flame.

증발하지 못한 액적들은 화염영역에서 이탈하여 개별 액적 화염을 형성하고 소화 및 증발과정을 거친다. 또한 2차 공기의 선회에 의하여 화염의 폭이 넓어지고 증발된 연료증기와 액적이 공존하는 연료 과농의 2상 혼합영역의 범위가 좁아지고 主燃燒領域이 넓어진다는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 2차 공기의 선회는 선회강도가 0.4 정도로 약한 선회이기 때문에 선회에 의하여 각 화염의 국소적 영역에는 다소 차이가 있으나 화염구조의 근본적 차이는 없다.

4. 결론

일반적으로 분무 화염에 많이 사용되는 2유체 내부 혼합형 분사 노즐에서 2차 공기에 선회를 주었을 때와 비선회의 경우에 비연소시 및 연소시 액적의 거동 특성을 PDA를 이용하여 연구하였다. 본 연구에서 기류 분사 노즐에 의하여 형성된 분무화염의 구조에 관한 물리적 모델을 제시하였으며 다음의 결론을 얻었다.

(1) 비연소시 2차 공기의 선회에 의하여 단면에 따른 액적의 SMD, 축 방향 평균 및 rms 속도 분포는 선회가 없는 경우에 비하여 비교적 균일하여진다.

(2) 대부분의 영역에서 비연소시 액적의 속도는 기류의 속도보다 빠르며, 연소시는 기류의 속도보다 액적의 속도보다 크다.

(3) 연소시 액적의 SMD는 2차 공기의 선회 유무에 관계없이 크기 및 분포 경향이 유사하며, 액적의 선택적 증발에 의하여 비연소시보다 각 단면에서 증가하였다.

(4) 보염기 선단 부근에서 화염에 의해 액적의 증발 및 연소가 활발히 일어나고 2차 공기의 선회에 의하여 연소 중 액적의 수밀도는 선회가 없는 경우에 비하여 상대적으로 낮다.

(5) 2차 공기에 선회가 있는 화염은 선회가 없는 경우에 비하여 화염의 폭이 넓어지고 증발된 연료 증기와 액적이 공존하는 연료 과농의 2상 혼합 영역의 범위가 좁아져 주된 연소 영역이 넓어진다.

참고문헌

(1) Faeth, G. M., 1983, "Evaporation and Combustion of Sprays," *Prog. Energy Combust.Sci.*, Vol.

9, pp. 1~76.

(2) Kalyan, A. and William, R., 1992, "Interactive Progress in Gasification and Combustion. Part I: Liquid Drop and Arrays and Clouds," *Prog. Energy Combust.Sci.*, Vol. 18, pp. 221~295.

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

(4) Owen, F. K., Spadaccini, L. J., Kennedy, J. B. and Bowman, C. T., 1979, "Effects of Inlet Air Swirl and Fuel Volatility on the Structure of Confined Flames," *Seventeenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania*, pp. 467~473.

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

(6) 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.

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

(8) 백민수, 오상현, 1995, "2유체 분사 노즐을 이용한 분무 및 연소 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집, 제19권 제2호, pp. 548~558.

(9) 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.

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

(11) Mao, C.-P., Wang, G. and Chigier, N., 1986,

- "An Experimental Study of Air-Assist Atomizer Spray Flames," *Twenty-First Symposium (International) on Combustion, the Combustion Institute*, pp. 665~673.
- (12) Edwards, C. F. and Rudoff, R. C., 1990, "Structure of a Swirl-Stabilized Spray Flame by Imaging, Laser Doppler Velocimetry, and Phase Doppler Anemometry," *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*,
- (13) 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.