

# 선회 분무 연소기의 분무 및 연소특성 분석

윤성필\* · 안재현\* · 김용모\*\* · 김세원\*\*\*

## Combustion and Atomization Characteristics of Swirl-Stabilized Spray Burner

S. P. Yoon, J. H. Ahn, Y. M. Kim, S. W. Kim

**Key Words:** Atomizer(미립화기), Spray(분무), Swirl(선회), Droplet(액적), NOx(질소산화물), Recirculation(재순환)

### Abstract

The atomization characteristics of air-assist atomizer which is surrounded by a coflowing airstream is investigated. The air-assist, coflow air stream had swirl imparted to them in the same direction with 45 degree's angle swirlers. The fuel and air entered the combustor at ambient temperature and the combustor was operated in an unconfined environment. Diesel fuel was used for all the experiments. Drop size and mean velocity are reported for certain distances downstream from the nozzle. The droplet size and velocity measurements were performed using a two-component phase/Doppler particle analyzer and velocity profiles across the entire flowfield are presented.

### 1. 서론

연소분무에 있어서 중요한 물리적 과정중의 하나는 액적과 가스상과의 상호작용이다. 수치 모델링의 예측능력을 평가하기 위해 사용될 수 있도록 단순화된 형상을 가진 액체 연료 연소기를 제작하여 분무특성을 계측하였다. 분무 선회 유동장에 대한 많은 실험적 연구가 지금까지 수행되어 왔다. 비연소 상태에서의 선회 유동에 관한 초기 연구들은 Chigier, Syred와 Beer와 Lilly등 [1]에 의해 발표되었다. 이 결과는 집축식 측정법에 의한 것이었고 그 후에 레이저에 기반을 둔 비집축식 측정법이 개발되었다. Styles와 Chigier[2]와 Khalil와 Whitelaw[3]가 LDV(Laser

Doppler Velocimetry)를 이용하여 선회화염의 구조를 밝혀 내었지만 액적의 크기와 크기와 관련된 속도 측정은 가능할 수 없었다. 이에 반해 PDA(Phase Doppler Anemometry)는 액적의 크기와 속도를 동시에 측정이 가능하였다. Mao et al[4]은 PDA를 이용하여 공기보조 미립화기에 있어서의 SMD, 평균 축방향 액적 속도, 액적 수밀도에 대한 분포를 계측하였다.

Ghaffarpour와 Chehroudi는 상도플러 측정으로 공기 보조 연소기에서 노즐로부터 15 mm에서 100 mm까지 축방향으로 측정을 행하여 평균 액적 속도와 SMD를 6개의 축방향 측정점에서 보고하였다.

이에 본 연구에서는 경유를 이용하여 공기보조 미립화기를 이용한 미립화를 실현하고 미립화와 관련된 공기와 액적간의 상대속도와 점성등의 영향을 밝히고 향후 산업용 공기보조 연소기의 개발을 위한 기초데이터로써 활용하기 위해 액적과 주위의 공기와와의 상대속도를 크게 하여 액체연료를 미립화시키고 선회를 이용한 공기의 난류화로 액적의 분열을 촉진할 수 있도록 공기 보조 미립

\* 한양대학교 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학부

\*\*\* 한국생산기술연구원

화기를 설계하여 화염온도를 상승시키고 화염생성을 도와 연소시 발생하는 유해가스를 줄이는데 역점을 두고 설계하였고 초기단계로 당량비 1의 조건에서 연료 분무의 액적 속도와 액적 크기를 PDA로 측정하고 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 및 계측 장치

실험장치는 선회류를 이용하고 액체연료의 미립화를 촉진하기 위하여 먼저 모세관을 이용하여 액체 연료의 노즐을 중앙에 설치하고 그 주위로 내부 공기로 미립화를 촉진할 수 있도록 내부 공기 노즐을 설치하였다. 또한 그 외부로 동축류 공기가 선회하며 미립화를 도울 수 있도록 선회기를 장착한 외부 공기 공급부를 설치하였고 그림 1과 그림 2에 실물사진과 설계도를 나타내었다.

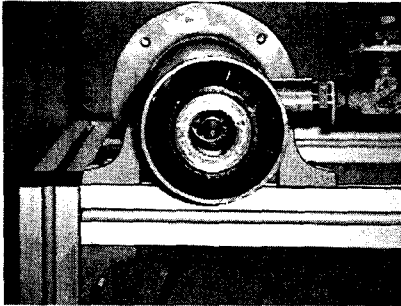


Fig. 1 Photograph of experimental setup (front view)

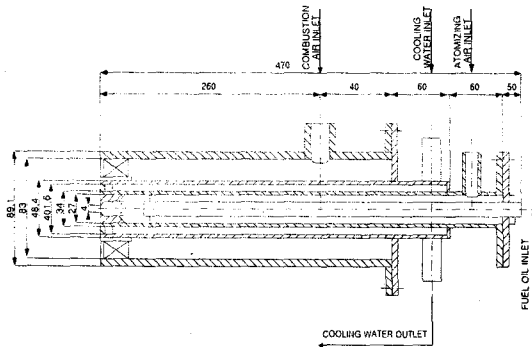


Fig. 2 Schematics of experimental apparatus

실험장치는 외부 공기부, 연료 공급부, 미립화 촉진을 위한 내부 공기부와 냉각수 순환부로 구성되어 있다. 선회공기부는 외경 83mm, 내경 48.4mm, 길이 300mm로 구성되어 있으며 선회기를 선회각도 45도로 베인 갯수 12개로 제작하였다. 연료공급부는 지름 13.7mm의 연료 공급관에 노즐 외경 3mm, 내경 1mm의 연료 노즐을 부착하였고 내부 공기부는 지름 27mm의 관에 노즐 지름 4mm의 관으로 이루어져 있으며 고압공기와 연결된 밸브부와 로터미터를 통해 유량을 조절하도록 제작되었다. 또한 화염반응시 열전달을 고려하여 냉각수 순환부를 두었다.

입경 및 유속의 측정은 PDA를 이용하여 측방향, 반경방향, 접선방향으로 정밀하게 3회 반복하여 하였으며, 착화후 화염장에서의 온도 측정은 K-type의 NiCr-Ni 온도센서를 이용하여 계측하였다.

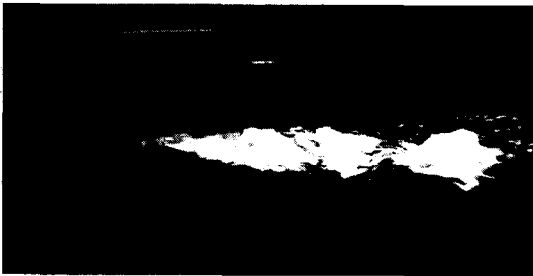
### 2.2 실험방법

화염장의 계측을 위하여 연료를 경유를 사용하였으며 트레이스를 이용하여 정확한 점에서 측정이 용이하도록 설치하였다. 연료의 유량은 60ml/min으로 유지하였으며 McMillan사의 연료 유량계(flow sensor)를 이용하여 조절을 확인하였고, 매스실린더를 이용해 단위시간당 분출되는 유량을 측정하여 유량계를 보정하였다. 또한 내부 공기 유량은 40 l/min, 동축류 공기 유량은 32, 40, 50 Nm<sup>3</sup>/hour로 변화시키며 온도측정을 하였으며 이중 PDA실험은 32 Nm<sup>3</sup>/hour의 당량비 1인 조건에서 수행하였다. 또한 화염의 측정은 중심 축방향으로 15 cm 떨어진 점으로부터 5 cm 간격으로 화염이 도달하는 거리까지 측정하였다. 온도 측정시 NiCr-Ni 온도센서를 이용하여 일정시간이 지난 후 온도가 안정된 후에 측정하였고 매번 평온으로 확인작업을 거쳤다. 화염 사진은 디지털 카메라를 이용하여 측면에서 촬영하였으며 화염의 길이와 화염부상 높이 등의 형상을 확인하도록 하였다.

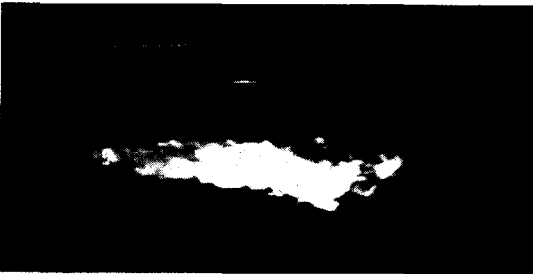
액체 연료 분사 장치를 이용한 화염장은 표 1에 나타낸 바와 같이 3가지 경우에 대해 측정하였으며 그림 3에는 각각의 경우의 실제 화염사진을 나타내었다.



(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3

Fig. 3 Flame patterns for three combustion condition

Table 1 Combustion conditions

	Fuel flowrate (ml/min)	Inlet air flowrate (l/min)	Swirl air flowrate (Nm <sup>3</sup> /min)	A/F ratio
case 1	60	40	32	14.60
case 2	60	40	40	17.92
case 3	60	40	50	22.40

연소 조건 1의 화염장은 화염이 약간 불안정하고 화염길이가 증가하며 조건 2에서 조건 3으로 갈수록 점점 노즐쪽으로 부착되고 작아지며 안정되어 가는 것을 볼 수 있다. 이는 세 화염중 선회 공기 유량이 최소인 case 1의 화염장은 선회에 의한 중앙 재순환 영역의 크기와 강도가 상대적으로 작기때문에 연료제트의 일부가 중앙 재순환 영역을 관통하고 미립화가 유동 후반부로 밀려나기 때문이며 case 3의 경우는 연료 제트가 상대적으로 넓은 재순환 영역에서 강한 역류유동과 대향류를 이루며 충분한 난류 혼합을 하기 때문에 미립화가 촉진되어 훨씬 안정된 화염을 가지게 됨을 알 수 있다.

### 3. 실험 결과 및 토의

#### 3.1 온도 측정

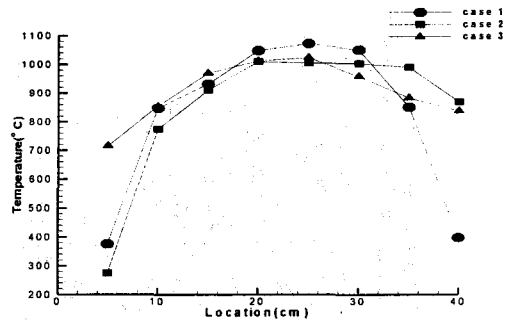
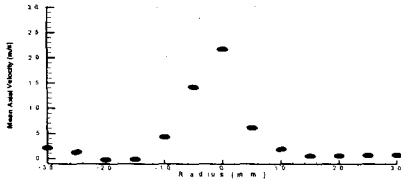


Fig. 4 Axial profiles of temperature along  $r=0\text{mm}$ .

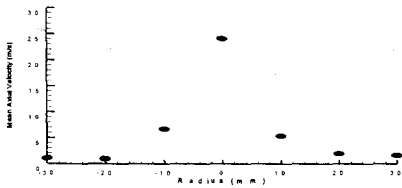
그림 4에서는 case 1,2,3에 따른 축방향거리에서의 온도분포를 나타내었다. 세 경우 모두 노즐 출구 지점에서 상대적으로 낮은 온도분포를 보이며 이는 인젝터 근방에서 화염장이 형성되어 있지 않고 연료 액적이 가열기간(droplet heatup period)에 있기 때문이다. 또한 case 3에서는 노즐 출구 부근에서 다른 경우에 비해 상대적으로 높은 온도를 나타내고 이는 선회공기에 의한 강한 중앙 재순환 영역의 형성으로 화염장이 노즐 근방에서부터 형성되기 때문이다. 그리고 case 1에서 후반부의 온도가 현저히 낮은 것은 화염이 부상하면서 축방향으로부터 화염의 이탈이 이루어진 데 원인이 있다.

### 3.2 속도장 계측

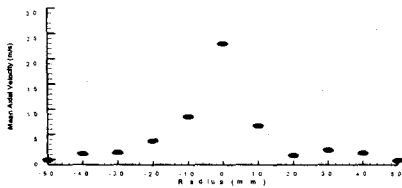
속도장 계측은 당량비 1인 case 1에 한해 실행하였으며 축방향, 반경방향, 접선방향의 세 방향으로 측정하였다.



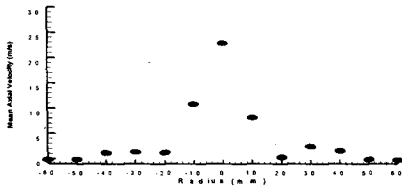
(a) 5 mm



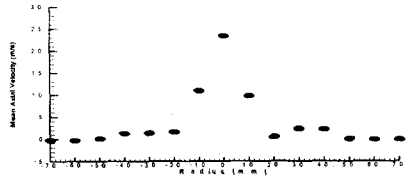
(b) 10 mm



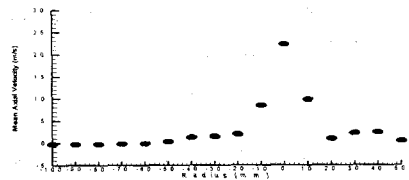
(c) 15 mm



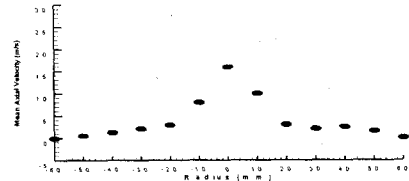
(d) 20 mm



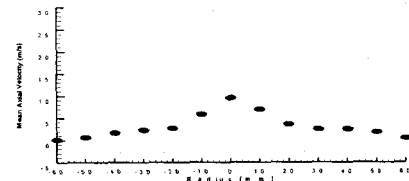
(e) 25 mm



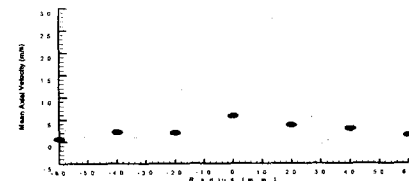
(f) 30 mm



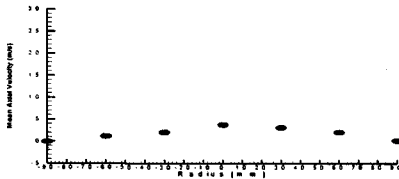
(g) 40 mm



(h) 50 mm



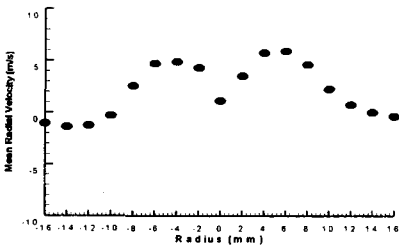
(i) 75 mm



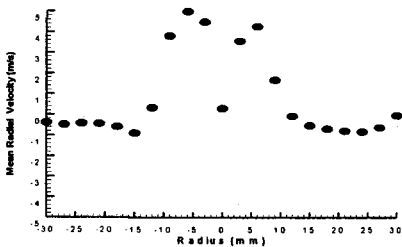
(j) 100 mm

Fig. 5 Radial profiles at the axial stations  
(  $x = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100\text{mm}$  )  
of mean axial velocity

Fig. 5에서 노즐 중심부의 연료분출부에서의 속도가 가장 빠른 것을 확인할 수 있으며 축방향 속도가 0보다 작은 곳이 있는데 그 이유는 선회류와 냉각수 라인부에 의한 Bluff 효과의 영향이다. 여기에서 5 mm 와 10 mm 는 화염 이전 단계로 이런 노즐 근방에서의 속도는 분무특성에 큰 영향을 미친다. 액적의 속도는 노즐로부터 거리가 멀어짐에 따라 반경방향 속도구배가 점차 감소됨을 확인할 수 있다.



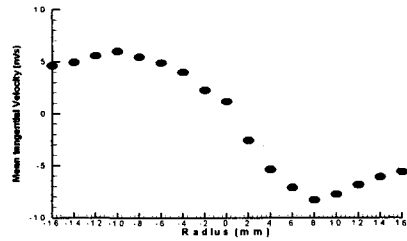
(a) 5 mm



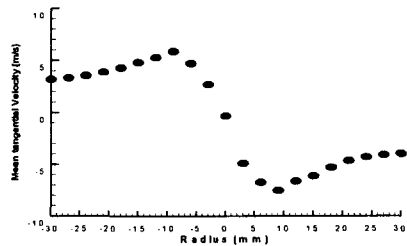
(b) 10 mm

Fig. 6 Radial profiles at the axial stations  
(  $x = 5, 10\text{ mm}$  ) of mean radial velocity

Fig. 6을 보면 비화염영역인 노즐로부터 5, 10 mm 거리에서의 반경에 따른 평균 반경방향 속도를 볼 수 있다. 속도분포는 대체적으로 좌우대칭을 유지하고 있으며  $r = 15\text{ mm}$  근방에서 연료액적이 음의 속도를 가지게 됨을 알 수 있다. 이는 상대적으로 작은 크기의 액적들의 궤적이 재순환 혼합기 유동장에 의해 지배되기 때문이다.



(a) 5 mm



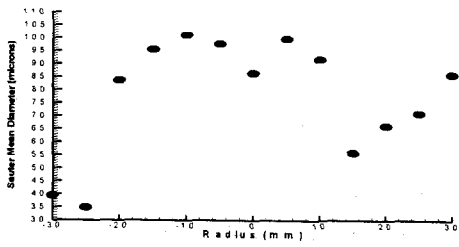
(b) 10 mm

Fig. 7 Radial profiles at the axial stations  
(  $x = 5, 10\text{ mm}$  ) of mean tangential velocity

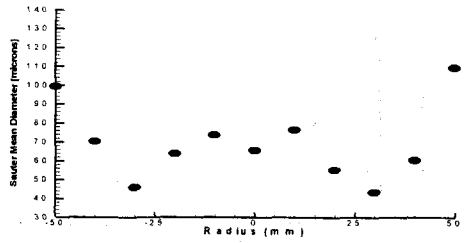
Fig. 7에서 free vortex와 forced vortex가 공존하는 이 영역에서 분무액적의 접선방향의 속도는 반경방향과 강한 관계가 있음을 볼 수 있다

### 3.3 액적 크기 계측

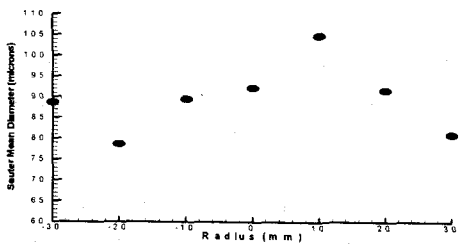
Fig. 8로부터 노즐로부터 분무가 진행될수록 액적의 크기가 줄어들음을 볼 수 있으며 좌우의 큰 액적들은 공기중에 분출된 액적이 응집되어 중력의 영향으로 가라앉은 것으로 확인되었다. 중심축으로부터 반경방향으로 25 mm에서 30 mm 떨어진 측정점에서는 난류유동과 공기와의 마찰로 인해 액적의 미립화가 촉진되어 액적의 크기가 많이 줄어들음을 확인할 수 있다.



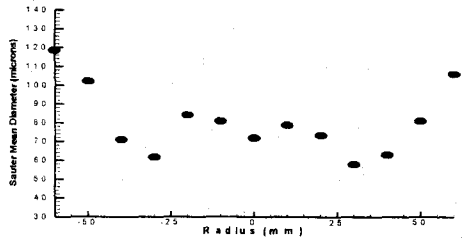
(a) 5 mm



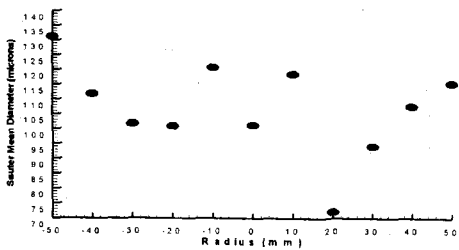
(e) 30 mm



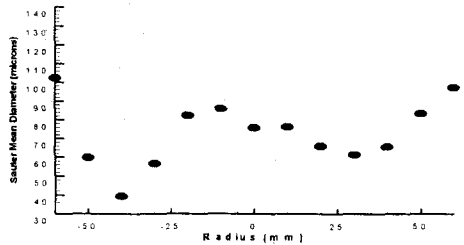
(b) 10 mm



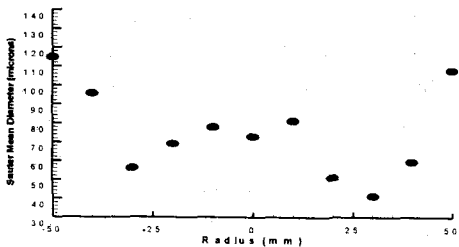
(f) 40 mm



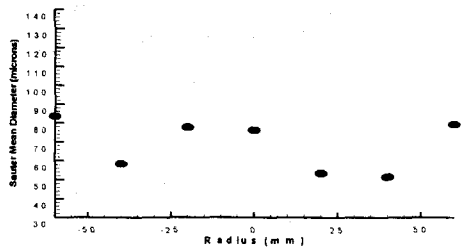
(c) 15 mm



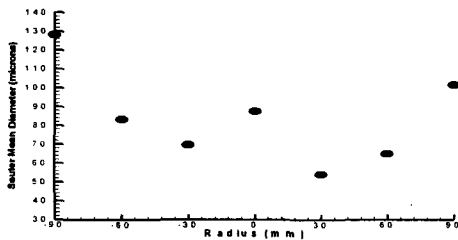
(g) 50 mm



(d) 25 mm



(h) 75 mm



(i) 100 mm

Fig 8. Radius distributions of SMD at the axial stations

(x = 5, 10, 15, 25, 30, 40, 50, 75, 100 mm)

이는 중심축으로부터 반경방향으로 20 mm에서 30 mm 떨어진 지점에서의 속도가 대체로 음의 값을 갖거나 중심축에 비해 상대적으로 낮은 값을 갖는 재순환영역을 비추어볼 때 중앙재순환 영역에서의 상대속도가 액적의 분열에 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다. 또한 중앙의 분무각을 중심으로 액적의 크기가 크게 계측되는 이유는 빠른 분무속도에 의해 액적이 분열되지 못한 것으로 점차 주변공기와의 혼합에 의해 액적의 분포구배가 줄어들음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 계획

액적분열과 속도와의 관계를 밝히기 위해 또한 액체연료를 이용한 공기보조미립화기의 설계에 응용하기 위해 당량비에 따른 온도측정과 당량비 1 인 조건에서의 PDA를 이용한 축방향, 반경방향, 접선방향의 속도측정과 SMD의 측정을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동일한 연료 유량 조건에서 당량비가 높을수록 공기의 양이 많아짐에 따라 난류강도가 강해지고 액적과 공기와의 상대속도차이가 커져 미립화가 촉진되어 화염이 안정됨을 확인할 수 있었다.
- 2) PDA 실험을 통해 조건별로 재순환영역을 정량적으로 확인할 수 있었고 각각의 속도 분포와 SMD와의 비교를 통해 액적과 공기와의 상대속도에서의 미립화의 영향을 확인할 수 있었다.
- 3) 노즐 중심부에서 반경방향, 접선방향, 축방향

으로 속도를 정량적으로 측정하였으며, 그 결과 전형적인 선회분무기의 특성을 잘 나타냄을 확인하였다.

- 4) 공기보조 연소기의 실험에 있어서 내부공기유량과 화염발생과의 관계를 분석하였다.

추후 스윙수에 대한 경우별 실험과 노즐과 미립화의 관계에 대한 추가실험이 도입된다면 공기보조 미립화기에 있어서 수치 모델과 비교할 수 있고 제작에 도움을 줄 수 있을 것이라 사료된다.

#### 참고문헌

- (1) Syred. N., and Beer. J., "Combustion in Swirling Flows : A Review", Combustion and Flame, Vol. 23. 1974 pp. 143-201
- (2) Styles. A. C., and Chigier. N. A., "Combustion of Air Blast Atomized Spray Flames", Sixteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Inst., Pittsburgh. PA. 1976. pp. 619-630
- (3) Khalil. E. E., and Whitelaw. J. H., "Aerodynamic and Thermodynamic Characteristics of Kerosene-Spray Flames", Sixteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Inst., Pittsburgh. PA. 1976 pp. 569-576
- (4) Mao. C. P., Wang. G., and Chigier. N., "An Experimental Study of Air-Assist Atomizer Spray Flames", Twenty-First Symposium (International) on Combustion. The Combustion Inst., Pittsburgh. PA. 1986. pp. 665-673
- (5) McDonell. V. G., and Samuelsen. G. S., "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. The Combustion Inst., Pittsburgh. PA. 1988. pp. 1961-1971
- (6) Danial L. Bulzan, "Structure of a Swirl-Stabilized Combusting Spray", Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No 6, 1995