

이중공기공급 속도비에 따른 이류체 선회분무 특성 연구

A Study of Two-Phase Swirl Spray Characteristics on Dual Airblast Velocity Ratio

강신재*, 오재하**, 송기정***, 노병준*
S.J. Kang*, J.H. Oh**, K.J. Song***, B.J. Rho*

ABSTRACT

In this study, spray characteristics of a dual airblast atomizer are addressed. Three dimensional characteristics of a dual airblast atomizer with air swirl are measured to provide the significant data. The liquid flow rate was fixed at 0.06 kg/min, and atomizing air was controlled at the liquid-air mass ratio of 4.0. The performance of the spray with co-swirl and counter-swirl flow was investigated at each point in the developed spray region using a three-component phase Doppler particle analyzer. This instrument was also used to evaluate the concentration profiles. The three dimensional mean velocity were investigated to present flow characteristics of the dual airblast atomizer. In addition, drop size distributions, mean droplet size profile, and droplet concentration were analyzed to understand atomization characteristics. This experimental results can be conveniently utilized for the preliminary design of gas turbine engines for aircraft.

Key Words : Dual Airblast Atomizer(2중 공기충돌 미립화기), Swirler(선회기), Co-swirl, Counter-swirl, Sauter Mean Diameter(SMD), Phase Doppler Particle Analyzer(FDPA), Air-to-Liquid Mass Ratio

1. 서 론

분무노즐은 크게 압력식 노즐과 2유체 분사노즐로 분류할 수 있는데, 압력식 노즐은 액체만을 고압으로 분사시켜 주위 기체와의 급격한 압력차와 충돌, 확산 등에 의해 미립화시키는 장치로서, 디젤엔진, 제트엔진, 펌프트엔진, 가스터빈 등의 연료분사장치로 사용되고 있다. 2유체 분사노즐은 액체와 기체를 동시에 분사시켜 미립화시키는 장치로서, 고속의 기체와 저속의 액체가 상호충돌, 혼합, 마찰 등에 의해 미립화가 이루어진다. 이 두 노즐 중에서 특히 2유체 분사

노즐은 분무가 보다 균일하고 미세하게 된다. 또한, 적용 가능한 액체의 범위가 넓으며, 저압에 의해 작동되는 등 우수한 성능을 가지고 있다. 별도의 공기 공급장치가 필요하다는 장점에도 불구하고 2유체 분사 노즐은 그 우수성을 인정받아 순간불꽃점화기관, 가스터빈, 로켓엔진, 산업용 노의 연소기와 페이트와 같이 점성이 높은 액체의 미립화에도 널리 응용되고 있다.

또한 선회유동은 계순환 영역을 형성시켜 화염의 안정화에 기여하고, 강한 난류를 일으켜 연료와 공기의 혼합을 증대시켜 과농연료의 양을 감소시켜 주어 배기가스 배출량을 줄임과 동시에 연소 효율도 높일 수 있다. 그리고 액적과 유동의 상대속도를 증가시켜 액적의 미립화를 활발하게 하여 기화되는 연료의 양을 증가시켜 주기도 한다.

이에 본 실험에서는 2유체 분사노즐에 이중

* 정회원, 전북대학교 기계공학부

자동차신기술연구소

** 전북지역 자동차 부품개발 기술혁신 센터

*** 전북대학교 정밀기계대학원

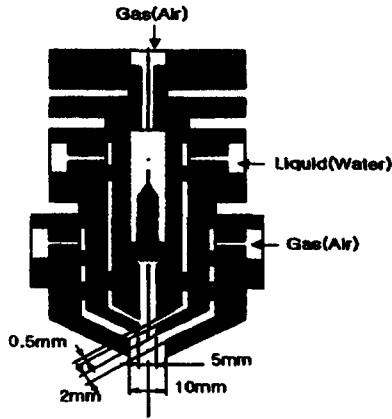


Fig. 1 Schematic of the dual airblast atomizer

선회기를 장착하여 내외로 공급되는 공기의 속도비에 따른 유동특성, 선회특성, 미립화 특성 연구를 살펴보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1. 실험장치

일반적으로 압력식 미립화기의 초기 분무각은 공급되는 유량에 따라 크게 변화하지 않는 특성을 가지고 있다. 그러나 이유체 노즐로부터 얻어지는 분무 특성은 공급되는 기체와 액체의 유량에 따라 크게 변화하는 특성을 가지고 있다.

본 실험에서는 이유체 분무가 많이 적용되는 가스 터빈의 연소기에서 화염의 길이와 화염의 안정화를 제어할 수 있고, 연소기 내부로 공급되는 공기와 연료의 혼합특성을 강화하기 위하여 노즐 내부와 외부에 2중 선회장치를 부착하여 내외 선회기로 공급되는 공기의 속도비에 따른 분무 특성을 살펴보고자 하였다.

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 이중선회기를 부착한 공기충출 미립화기로서, 외부 공기 공급 선회기의 각도는 시계방향으로 각각 30°, 45°로 제작을 하였고, 내부 공기 공급 선회기의 경우에는 시계방향과 반시계 방향으로 각각 30°로 제작하였다. 또한 유체 유입 경로는 대칭을 이루도록 제작을 하여 유동이 한쪽으로 치우치지 않도록 하였다. 내부 공기의 경우에는 노즐의 상단에서 하나의 경로를 통해 흐르도

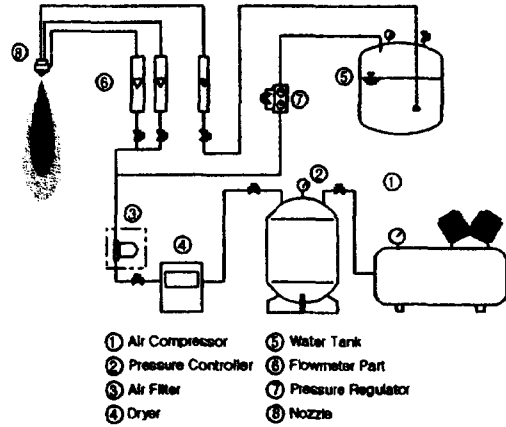


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

록 하였으며, 외부 공기의 경우에는 노즐의 외부에서 방사형으로 4개의 통로를 통해 공급되어 진다. Fig. 1에서 보듯이 공기와 액체가 노즐 선단에서 혼합되어 분사되도록 설계, 제작하였다.

본 실험에서는 액적의 크기와 속도를 동시에 측정하기 위해 3차원 PDPA 시스템을 이용하였다. PDPA 시스템은 광학계, 신호처리기, 3차원 이송장치로 구성되어 있으며, 광원은 공냉식 레이저(Ar-ion 750mw)를 사용하였다. 또한 분무 노즐은 3차원 이송장치에 부착하여 측정위치로 컴퓨터에 의해 자동으로 이송되어 진다. Fig. 2는 분사 실험 장치의 개략도이다.

2.2. 측정방법

노즐 출구를 좌표계의 원점으로 하여 분무의 측방향을 z축, 반경방향을 r축으로 설정하였다. 각각의 선회기의 각이 다르므로 그에 따른 분사각의 차이로 인해서 각 노즐 조건에 따라서 측정점의 위치는 다르게 설정하였다. 측정 점의 수는 반경방향으로는 41점, 측방향으로는 12점을 측정점으로 하여 전체 462점이다. 이때 반경방향을 측정 위치점들은 노즐의 외부에서 중심축으로 이동할수록 점점 좁혀지게 하였고, 측방향의 측정 위치점들은 노즐에 가까울수록 조밀하게 하였다. 측방향의 측정 위치는 노즐의 출구에서 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 85, 100, 120mm의 거리에 위치해 있다. 측정시간은 15초로 제한하였으며 이때 받은 데이터 수는 10,000개로 설정하였다.

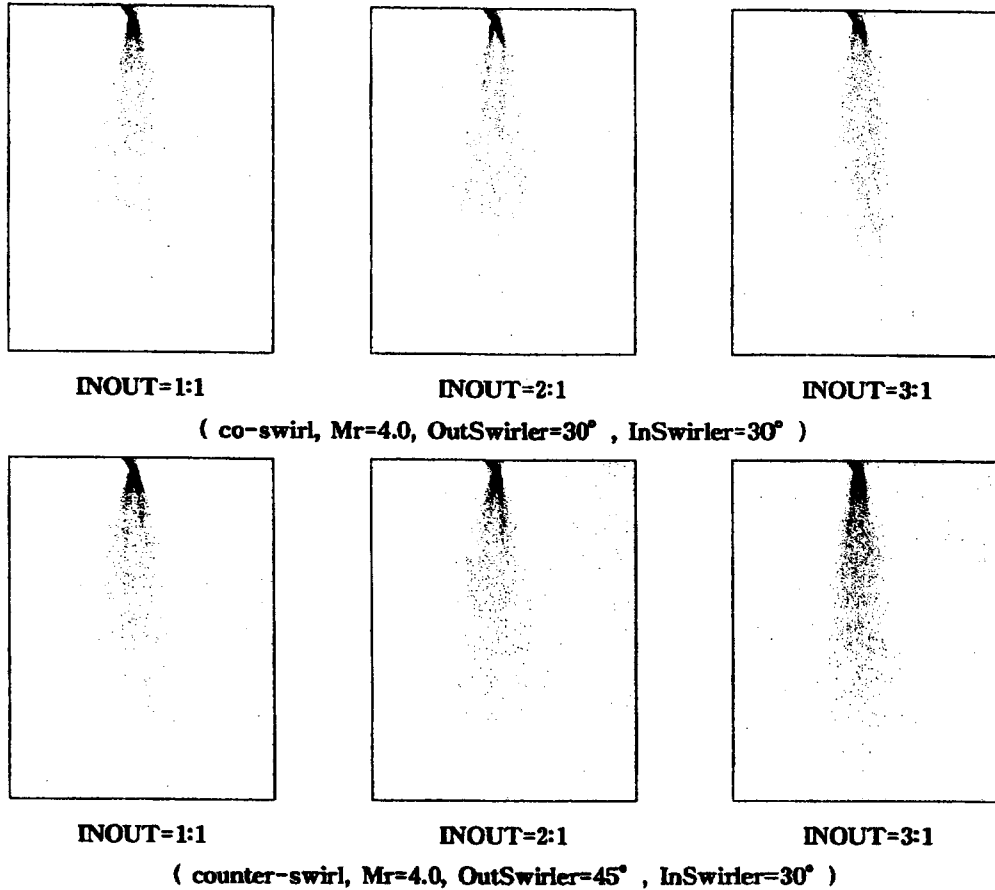


Fig. 3 Photograph Illustrating Atomization

노즐에 공급되는 액체는 물이며, 공급되는 기체는 공기를 이용하였다. 공급되는 물의 질량 유량은 0.06 kg/min 이며, 물에 대한 공기의 질량비 Mr은 4로 정하였다. 또한 내·외 공기 유량비 INOUT에 따른 분무 특성을 알아보기 위해서 각각의 유량비 INOUT은 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0이다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 분무형상

분무사진에서 나타나는 빛의 밝기는 분무 내에 포함된 액적들의 밀집도와 관련될 수 있을 것이다. 즉 어둡게 보이는 부분이 액적의 밀집도 큰 부분이며, 밝게 보이는 부분이 액적이 희박한 부분이 된다. 또한 분무형상을 통해 분무 유동장의 전체적인 구조를 전체적, 정성적으로 이해할 수 있으며, 그 분무형태를

직관적으로 알 수 있다.

Fig. 3은 외부선회각 30°, 45°, 내부선회각 30° 일 경우에 내외공기속도비 INOUT에 대하여 나타낸 분무사진들이다. 전체적으로 각각의 그림은 원주방향으로 액적들이 밀집되어 있는 중공부의 존재를 확인할 수 있으며, 중심에서 약간 벗어난 부근에서 액적들이 밀집되어 있음을 확인할 수 있다. 중공부가 존재하는 영역에서는 분무 중심부에서 상대적으로 내부공기류의 속도가 느리고 상대적으로 액적의 밀집도가 적어 연소 유동장에서는 화염의 안정화에 기여 하기도 한다.

분무 사진을 통해 분무 형상을 살펴보면 내외 공기 속도비 INOUT가 증가할수록 분무폭이 작아짐을 모든 분무사진에서 볼 수 있다. 이는 공기속도비가 증가할수록 내부공기의 속도가 외부공기 유속보다 빨라지기 때문이며, 이로 인해 외부공기 유입현상이 발

생하기 때문이다. 이러한 주위 공기 유입현상은 노즐 근처의 액막이 표면장력에 의해서 안쪽으로 수축되는 효과와 내외 공기 속도비의 차이로 인해 분무 중심부와 외부에서 압력차가 발생하여 액적의 궤적이 안쪽으로 휘어 들어오기 때문이다.

또한 내외 선회각의 방향이 동일한 경우, 외부 선회각이 45° 일 때 분무 중심에서 증공부가 크게 나타나고 있다

3.2 평균속도

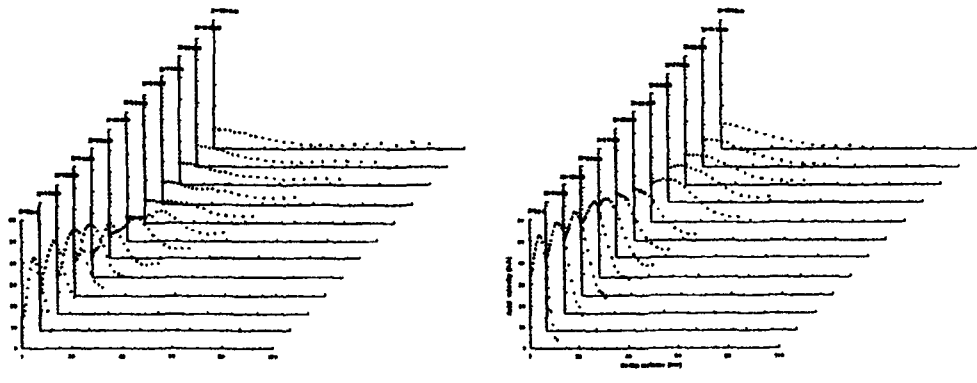
3.2.1 축방향속도(Axial velocity)

Fig. 4 은 본 실험에서 적용된 유동조건에 대하여 측정된 전체적인 축방향 평균속도분포를 도시한 것이다. 분무 유동장의 초기 영역에서는 반경방향과 선회방향 속도성분이 증가하게 되어 분무의 중심에서 축방향 평균속도가 감소하게 된다. 이로 인해 최대속도가 유동중심에서 벗어난 위치에서 나타나고 있으며, 이는 선회분무유동의 특성으로 인해 나타나는 말안장 형태의 축방향 평균속도분포(u)를 보이고 있다.

축방향의 거리가 점점 증가되어짐에 따라 선회 방향 속도의 크기는 축방향의 거리에 따라 감소되어지고 분무 하류영역에서는 선회조건과 내외공기속도비의 변화에 관계없이 자유공기분사 유동과 유사한 정규분포 속도선도를 나타내고 있다.

Fig. 5 (a)는 유동 중심부(centerline)의 축방향 평균속도를 일정한 선회 조건과 축방향(z) 거리에 따라 내외 공기속도비의 변화량에 대하여 표시하였다. 모든 선회조건에 대하여 분무 초기 영역에서는 내외공기속도비 INOUT에 대하여 다양한 평균속도분포를 보이고 있으나, 분무 하류영역에서는 자유 원형 분사 유동과 유사한 속도분포로 감소하고 있다. 특히 coswirl인 경우 분무초기영역에서는 다양한 속도분포를 보이지만 Z=30mm 이후에는 내외 공기속도비 변화에 관계없이 일정한 속도분포를 유지하고 있다. 그리고, 모든 선회조건에 대하여 내·외 공기속도비가 클수록 유동중심속도가 커지고 있는데, 이는 공기속도비가 클수록 내부공기유동의 운동량이 많아지기 때문이다.

CT3030의 모든 속도비, CO3030에서 속도비가 적을 때, CT4530에서 속도비가 클 경우에 분무초기 영역에서 하류영역으로 진행함에 따라 중심속도가 증가한 후 그 이후에는 다시 감소하는 속도분포를 보이고 있다. 그 이외의 선회조건과 속도비 조건에 대해서는 자유원형 분사유동의 중심속도 감소와 비슷하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이를 앞에서 보았던 분무사건과 같이 비교 분석해 보면, 축방향 평균속도(u)와 증공부의 발생위치 사이에 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 다시말해 증공부가 발생하기 직전까지는 축방향 평균속도가 증가하다 증공부가 발생한 위치부터는 속도가 감소하고 있음을 확인할 수



(a) Mr=4.0, co-swirl, Out=30° , In=30° , INOUT=1:1 (b) Mr=4.0, counter-swirl, Out=45° , In=30° , INOUT=3:1

Fig. 4 Axial mean velocity profiles

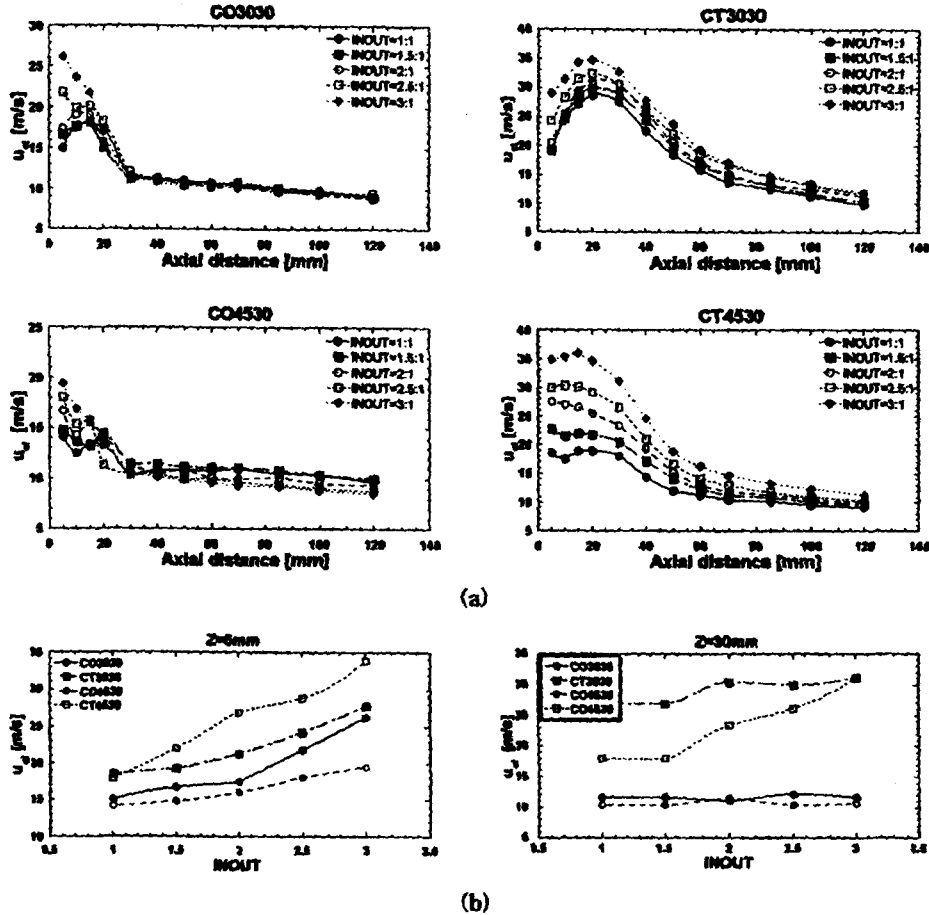


Fig. 5 Axial mean velocity profiles along the centerline

있다. 즉 co-swirl의 경우에는 내외속도비에 따라 차이는 있으나 노즐 선단에 가까운 지점에서부터 증공부가 발생하고 있으며, counter-swirl의 경우에는 $z=20\text{mm}$ 인 지점부터 발생하고 있다.

모든 내외 공기 속도비에 대하여 counter-swirl이 co-swirl 보다 큰 평균속도분포를 보이고 있으며, 특히 CT3030인 선회조건에서 가장 큰 속도분포를 보이고 있다.

Fig. 5 (b)는 선회조건과 축방향의 거리 $z=5, 30\text{mm}$ 인 지점에서 축방향 속도값을 내외공기속도비의 변화량에 따라 도시한 것이다. $z=5\text{mm}$ 에서는 속도비가 증가함에 따라 중심속도가 증가하고 있으며, counter-swirl이 co-swirl보다 큰 속도 분포를 보이고 있다. 유동이 발달하여 $z=30\text{mm}$ 인 지점에 이르러서는 counter-swirl과 co-swirl의 속도차이가 크게 나타나고 있으며, 여전히 counter-swirl이

co-swirl보다 큰 속도분포를 보이고 있다. 또한 counter-swirl의 경우에는 내외공기속도비가 증가할수록 속도는 증가하나 co-swirl은 거의 일정한 분포를 보이고 있다.

3.2.2 반경방향 속도(Radial velocity), 선회방향속도(Swirl velocity)

분무 유동장에서 난류특성과 분무의 확산을 액적의 속도와 관련하여 표현할 수 있는 성분은 반경방향과 선회방향 속도 성분이다.

Fig. 6은 $z=5, 30\text{mm}$ 인 지점에서의 선회조건과 내외 공기속도비가 일정할 경우 반경방향속도의 변화량을 도시하였다. 일정한 선회조건에 대해서 $z=5\text{mm}$ 인 영역에서는 모든 내외속도비에 대하여 분무의 확산으로 갈수록 중심부의 0속도에서 증가하여 최고점에 도달한 후 다시 감소하게 된다.

Counter-swirl 조건의 분무 중심부에서 음의 반경

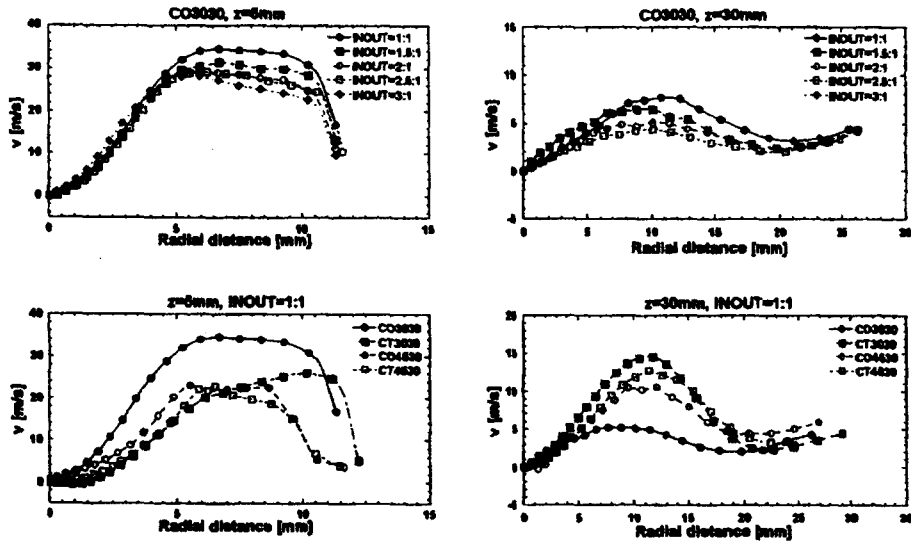


Fig. 6 Radial mean velocity profiles

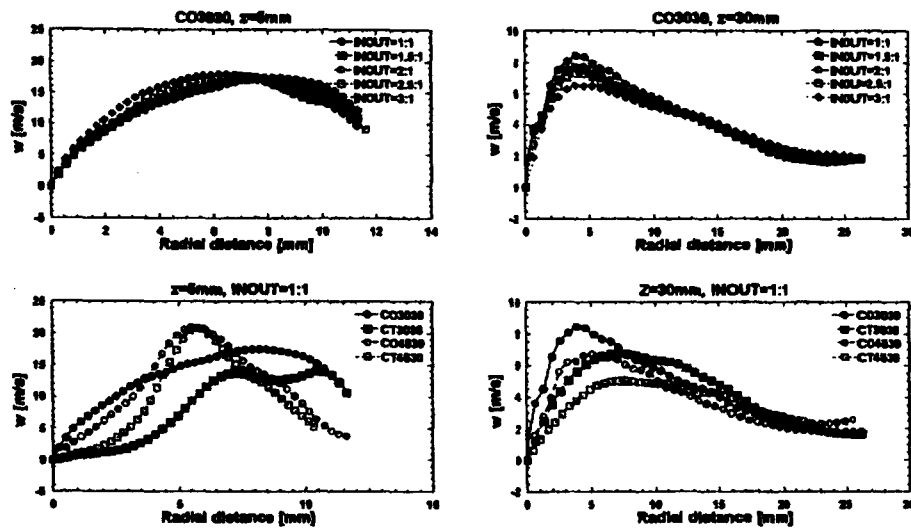


Fig. 7 Swirl mean velocity profiles

방향 성분을 발견할 수 있는데 그 이유는 외부와 내부의 공기가 충돌할 때 외부 공기 운동량 증가하기 때문이며, 내부 공기 운동량이 증가할수록 양의 반경방향속도성분으로 변화된다. $z=5\text{mm}$ 인 영역에서는 역적의 운동이 큰 공기의 영향을 많이 받게 된다. 그러나 $z=30\text{mm}$ 영역에서는 분무의좌으로 갈수록 약간 증가하다 다시 감소하고 외곽 영역에서는 다시 약간 증가하는 경향을 보인다. 이와 같이 분무의좌에서 반경방향 속도의 증가는 공기류의 반경방향속도증가를 의미하는 것이 아니라 역적 자체의 속도 증

가를 의미한다. 이것은 분무 초기영역에서 주 분무 유동장을 벗어난 큰 역적들이 관성력에 의하여 어느 정도의 반경방향 속도성분을 유지하면서 계속적으로 운동하기 때문으로 여겨진다. 계속해서 분무하류로 진행함에 따라 반경방향 속도 성분은 주위 공기와의 마찰과 외부공기 유입 현상으로 인하여 감소하게 될 것이다.

Fig. 6의 아래 두 그림은 내외공기속도비가 일정할 경우에 선회조건에 따라 도시한 것으로, $z=5\text{mm}$ 지점에서는 co-swirl이 counter-swirl보다 큰 반경방

향 속도 분포를 확인할 수 있다. 이는 내외공기가 충돌할 때의 속도의 중첩과 상쇄현상으로 설명되어 진다. counter-swirl의 경우에 분무 중심부근에서 내외 공기의 충돌로 인한 음의 속도성분을 다시 한번 확인할 수 있다.

Fig. 7은 선회방향속도분포를 반경방향과 같은 축방향 위치에서 도시한 것으로 반경방향의 속도 선도와 유사한 경향을 보이고 있다. $z=5, 30\text{mm}$ 모두 내외공기속도비가 증가할수록 선회방향이 감소하는 경향을 보이고 있으나 그 차이가 크게 나타나지는 않는다.

내·외 공기 속도비가 일정할 경우 선회조건에 대해 살펴보면, 분무초기영역에서는 외부선회기의 선회각이 클수록 큰 선회방향 속도분포를 나타내며, 분무외곽으로 갈수록 급격히 최대점에 이르렀다가 급격히 감소하는 속도분포를 가지는 반면에 작은 외부 선회각은 서서히 증가되어졌다가 감소하는 속도분포를 보이게 된다. 선회방향에 대해 살펴보면, 일반적으로 예측할 수 있듯이 co-swirl의 유동이 counter-swirl의 유동보다 분무초기에서 더욱 큰 선회방향 속도분포를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 서로의 공기 유동이 교차로 인해서 서로의 운동량이 중첩과 상쇄되어 나타나는 현상이다. 그러나 분무 하류로 진행되어짐에 따라 선회조건과 내외공기속도비에 상관없이

이 거의 유사한 선회속도 분포를 보이고 있다.

3.3 미립화 특성

3.3.1 크기분포

Fig. 8은 모든 선회조건에 대하여 축방향 $z=30\text{mm}$ 인 지점의 분무 중심에서 내외공기속도비에 따라 얻어진 액적의 크기분포를 나타낸 것이다. 내외공기속도비 INOUT의 변화량에 따라 큰 차이는 발생하지 않으나 CO3030를 제외하고는 내외공기속도비가 증가할수록 작은 액적의 분포가 많아지고 있어 내부공기속도가 빠를수록 미립화에 유리함을 알 수 있다.

선회조건에 대해 살펴보면, 외부선회기의 각도에 상관없이 co-swirl의 경우에 작은 액적들의 크기분포 범위는 좁으나 확률밀도는 2배 이상 높게 나타나고 있다. Co-swirl의 경우에 내부유동과 외부유동의 중첩효과로 인해 상대속도가 증가되어질 것으로 생각되며, counter-swirl의 경우는 두 유동이 충돌하면서 상대속도가 감소되어지고 그로 인해 액적의 크기가 커지고 있다.

3.3.2 평균직경(SMD)

Fig. 9 (a)는 선회조건과 내외공기속도비에 따른

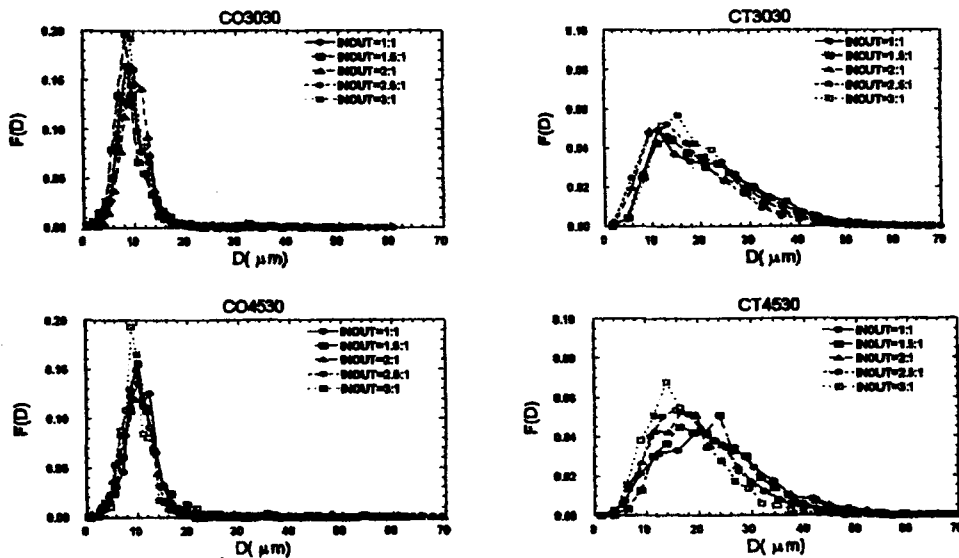


Fig. 8 Droplet size distribution(center-point, $z=30\text{mm}$)

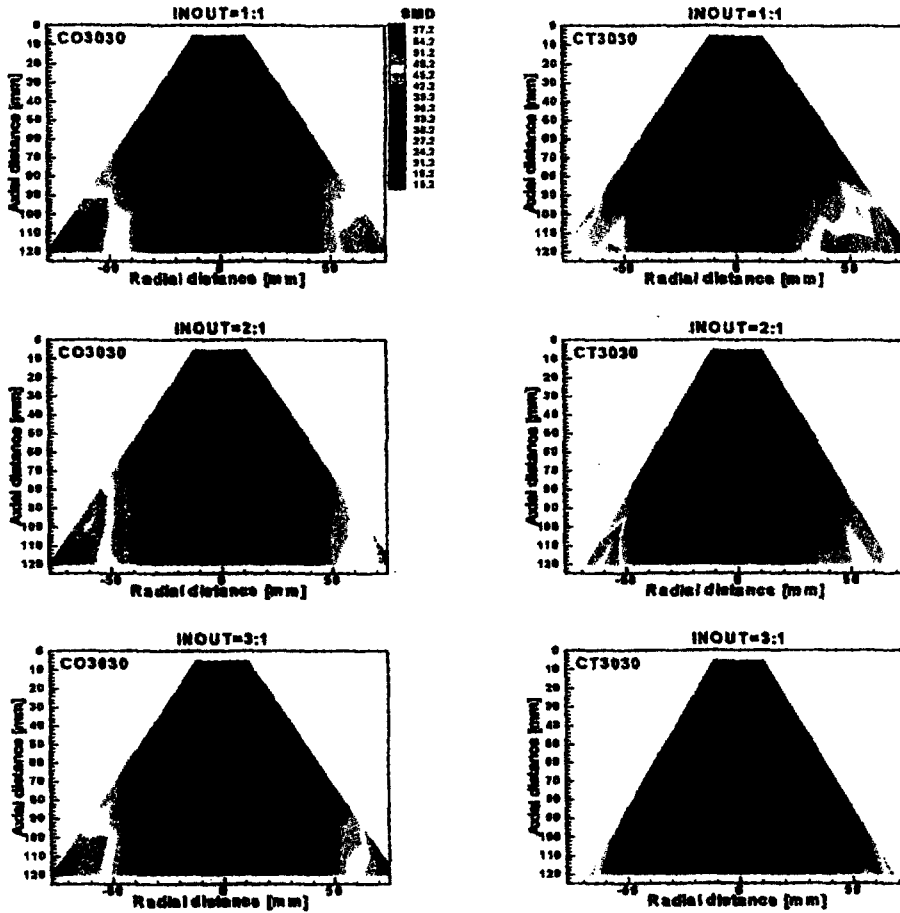


Fig. 9 (a) Contour of mean drop size

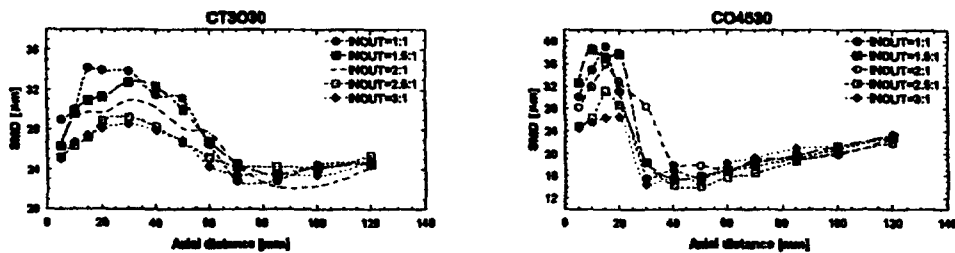


Fig. 9 (b) Variation in mean drop size along the centerline

평균직경의 분포를 전 축방향에 대해 도시하여 정성적인 평균직경의 분포를 알고자 하였다. 외부선회기의 선회각에 관계없이 co-swirl이 counter-swirl의 경우보다 전반적으로 작은 크기분포를 보이고 있으며, 분무 외곽에서는 큰 크기분포를 보이고 있어 액적과 주위공기의 상대속도가 낮은 영역임을 확인할 수 있다. 또한 내외공기속도비가 증가할수록 작은

액적 크기분포가 분무하류 영역까지 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 9 (b)는 선회조건이 일정할 경우에 내외공기 속도비에 대한 평균액적 직경의 변화량을 도시한 것이다. 선회기의 방향에 관계없이 내외공기속도비가 증가할수록 평균액적 직경이 감소하고 있다.

외부선회각이 45° 일 경우에는 축방향의 거리

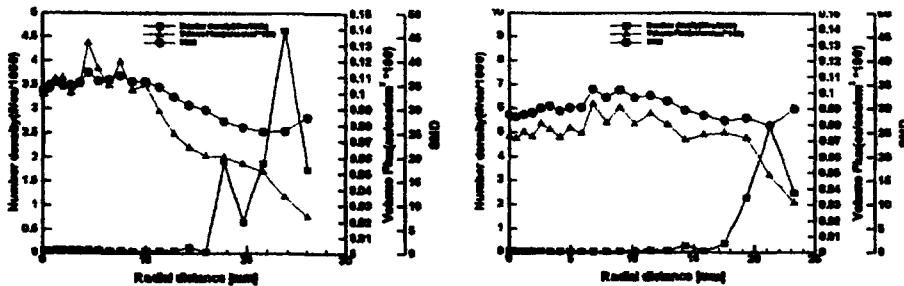


Fig. 10 Spray Characteristics at CT3030 and z=30mm

z=20mm인 지점까지는 평균직경이 증가하다 그 이후에는 15 μm 까지 급격히 감소하는 경향을 보이고 있으며, z=40mm 이후에는 40 μm 까지 다시 증가하는 분포를 나타내고 있는데 이 영역은 자유분사유동과 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 외부선회회의 선회각이 30° 일 경우에는 축방향의 거리에 따라 완만히 증가하다 감소하는 경향을 보인 후 그 이상의 하류로 갈수록 다시 증가하는 경향을 보이고 있다.

미립화 특성은 co-swirl이 counter-swirl보다 우수하게 나타나고 있다.

분무 중심부에 존재하는 증공부 내에서 축방향 평균속도와의 관계를 살펴볼 때, 평균속도 증가할수록 평균직경이 큰 분포를 보이다 그 이후 속도가 감소할 때 평균직경 또한 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 액적의 크기 편차가 작을 경우에 액적 분포가 균일하다고 볼 때, 분무중심영역에서 counter-swirl의 경우가 co-swirl의 경우보다 균일도가 좋을 수 있다.

3.3.3 수밀도, 유동체적률

Fig. 10은 축방향의 거리 z=30mm인 지점에서 선회조건과 내외공기속도비에 대하여 액적의 SMD, 수밀도, 유동체적률을 동시에 표시하였다.

액적의 SMD는 Radial distance=10mm인 지점에서 최대 SMD 분포를 보이며, Radial distance=20mm인 지점에서 최소 SMD 분포를 보이고 있으며, 그 이상의 가장 자리에서는 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 분무 가장 자리에서의 액적의 SMD 증가의 원인은 작은 액적이 주 유동을 충실히 따라가는 반면 큰 액적은 운동량 때문에 주 유동을 가로질러 바깥쪽으로 향하는 부분이 많기 때문이며 또한 작은 액적들이 주 유동을 따라가다 선회

성분에 의해 여러 작은 액적이 재결합하여 큰 액적으로 생성되기 때문으로 사료된다. Radial distance=20mm인 지점에서 SMD 최소값은 공기 충돌형 분무화에 의해 이루어진 액적들이 주 유동을 따라 흘러가고 높은 속도로 인한 큰 액적의 붕괴가 일어나기 때문이다.

단위체적당 개수를 나타내는 수밀도는 Radial distance=16mm인 지점까지 낮은 분포를 보이고 있으며 그 이후부터는 점점 증가하여 r=20mm 지점에서 극대값을 나타내고 있다. 이 극대값은 공기 충돌형 방식에 의해 액적이 주 유동을 따라가다 분무 가장 자리 부근에서 속도를 잃고 그 곳에 머무는 과정에서 생기는 것으로 생각된다. 일반적으로 속도가 높은 지역에서는 데이터 취득률이 높아도 수밀도는 낮은 반면 속도 경계층에서는 그 반대의 결과가 나온다. 이러한 경향은 주 유동(속도가 높은 지역)에 의해 운반되는 도중에 유동 가장자리로 가면서 속도가 감소되어 단위체적당 개수(수밀도)가 증가하였기 때문이라 생각된다.

체적 유동률은 연료가 운반되는 양은 나타내는 것으로 SMD와 데이터 취득률의 함수로 표시할 수 있다. 즉 SMD와 데이터 취득률이 높을수록 높은 체적률을 나타낸다. 따라서 체적률은 SMD가 큰 부분(r=10mm)에서 높게 나타나며, SMD 증가에 의한 영향보다는 약하나 많은 액적의 운반으로 인해 속도가 큰 지역에서는 약간 증가한다. 수밀도가 높은 지역에서 체적률의 낮은 값은 이 지역에서 작은 액적이 많이 정체해 있음을 의미한다.

4. 결 론

이중공기 공급 선회 노즐을 통해 형성되는 분무 특

성 및 유동특성을 여러 선회조건과 내외공기속도비를 변화시켜 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 분무사진을 살펴본 바, 선회조건이 일정할 경우 내외공기속도비 증가할수록 분무각이 감소하며, 내외공기속도비가 일정할 경우 내외선회각의 방향이 동일한 경우, 외부선회각의 각이 45° 일 때 큰 분무폭을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

2) 분무 증양에서 평균속도와 증공부의 관계를 살펴본바, 증공부가 발생하기 직전까지는 축방향 평균속도가 증가하여 최대값을 보인 후, 증공부가 발생한 위치부터는 속도가 감소하고 있음을 확인 할 수 있었다.

3) 반경방향과 선회방향의 평균속도가 분무의 확산 및 난류유동에 영향을 미치는 인자임을 예상할 때 co-swirl이 counter-swirl의 경우보다 클 때 확산상태가 커지고, 내외공기속도비가 증가할수록 분무초기 및 주유동영역에서 속도값이 커지고 있었다.

4) 크기분포의 경우, 전체적으로 co-swirl이 counter-swirl보다 미립화 성능이 우수한 선회조건임을 알 수 있었으며, 전반적으로 내외공기속도비가 증가할수록 SMD의 분포가 작아짐을 본 실험을 통해 알 수 있었다.

Turbines and Power, Vol. 110, pp.105-110, 1988

4. Rizk, N. K., Mostafa A. A., and Mongia, H. C., "Modeling of Gas Turbine Fuel Nozzle", Atomization and Spray Technology, pp.241-260, 1987

5. De Corso, S. M., Demeny, G. A., and Pittsburgh, E., "Effect of Ambient and Fuel Pressure on Nozzle Spray Angle", Transactions of ASME, vol. 79, No. 3, pp.607-615, 1957

6. Kang, S. J., Rho, B. J., Oh, J. H., and Lee, S. G., "Swirl Effect on the Spray Characteristics of a twin-fluid jet", KSME Journal, Vol.12, No.10, 1998

7. Lefebvre, A. H., Atomization and Sprays, Hemisphere Pub., New York, 1989

8. Bayvel, L., Orzechowski, Z., Liquid Atomization, Taylor & Francis, 1993

9. Lefebvre, A. H., Gas Turbine Combustion, Hemisphere Publishing Corp., New York, pp.195-256, 1983

10. Gupta, A. K., Lilley, D. G., Syred, N., Swirl Flows, Energy and Engineering Science Series, Abacus Press, 1984

11. Zhao, Y. H., Hou, M. H., and Chin, J. S., "Drop Size Distributions from Swirl and Airblast Atomizer", Atomization and spray Technology, pp.3-15, 1986

참고문헌

1. Kihm, K. D., Chigier Norman, and Sun Frank, "Laser Doppler Velocimetry Investigation of Swirler Flowfields", Journal of Propulsion and Power, Vol.6, No.4, pp.364-374, 1990

2. Mao, C. P., Oechsle, V., and Chigier, N., "Drop Size Distribution and Air Velocity Measurements in Air Assist Swirl Atomizer Sprays", ASME, Vol.9, pp.64-69, 1987

3. Aigner, M., and Wittig, S., "Swirl and Counterswirl Effects in Prefilming Airblast Atomizers", Journal of Engineering for Gas