

동축형 인젝터의 미립화 특성 Atomization Characteristics of shear coaxial twin fluid injector

한재섭* · 강경택* · 김 유* · 김선진**
J.S. Han*, G.T. Kang*, Y. kim*, S.J. Kim**

ABSTRACT

To understand the basic the structure of the spray field and to obtain the initial conditions for computational models for shear coaxial twin-fluid injectors. the atomization characteristics under different flow and geometric conditions were examined. The spray characteristics such as SMD, mean axial and radial velocities, Dia. of droplets and volume flux with a P.D.P.A. Water and nitrogen gas under atmospheric conditions were used as a test fluids.

The drops produced by shear coaxial injectors continue to disintegrate along the spray axis and decrease their sizes. SMD was the maximum at the spray center of spray and decreased with increasing radial distance. The results of this parametric study showed that SMD decreased with increasing gas injection velocity as well as with decreasing liquid injection mass flow rate. The relative velocity between gas and liquid flow played a significant role resulted in decreasing SMD and in spreading the spray. Recessing the liquid orifice resulted decreasing SMD and a spreading the spray. Recess of liquid orifice by 5.0mm showed best atomization characteristics in this experiment. Although drop diameter changes, shear coaxial injector sprays had constant velocity and exhibited a high degree of radial symmetry.

1. 서 론

2유체 동축인젝터 (coaxial twin fluid injector)는 액체산소와 액체수소를 추진제로 사용하는 SSME(Space Shuttle Main Engine)이나 유럽의 Arian 5, Vulcain 엔진과 같은 저온추진제 엔진에 널리 사용되고 있다. 추진제를 미립화 시키는 장치로서 사용하는 다른 여러 형태의 인젝터와 비교할 때 저속의 액체산화제 주위에 고속의 가스연료가 분사됨으로서 발생하는 전단력에 의해 추진제가 미립화되는 특징을 가지며, 이러한 메카니즘은 매우 복잡하여 아직까지 정확히 규명되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구는 실제 엔진의 초 임계압력(super critical pressure)이 아닌 저압조건에서 수행하

였고 모의유체로 물/질소가스를 단일 인젝터에 적용하여 분무입자의 크기 및 속도분포 등을 측정하여 2유체 동축 인젝터에 대한 분무특성에 대한 기초자료들을 얻고자 하였다. 실험으로부터 유출된 결과들은 여러 제한적 실험조건 범위에만 사용이 한정되는 등 실제 엔진 조건에 적용할 수 없는 경우가 있으나, 이런 제한조건에도 불구하고 유사한 조건에서 사용하는 인젝터의 설계변경, 미립화 및 인젝터 성능과 연소안정성 등을 유추하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

현재까지 액체로켓 엔진용으로 개발되고, 사용된 인젝터는 여러 종류가 있으며 그중 동축인

* : 충남대학교(Chungnam National University), ** : 청양대학(Chongyang Provincial College)

젝터는 연료 및 산화제 분사방법에 따라서 선회 동축형(swirl coaxial)과 전단 동축형(shear coaxial) 두 가지 종류가 이용되고 있다. 두 종류의 인젝터 모두 중심 오리피스에서 산화제를 분사하고, 액체 오리피스 주위의 원환 오리피스를 통해서 연료를 분사하도록 되어 있다. Shear coaxial의 경우, 연료측 분류가 액체 산화제를 미립화할 수 있도록 높은 운동량을 가져야 하므로 높은 분출속도를 유지하도록 설계된다. 연료측 분류의 운동량이 작은 경우 산화제 분류에 기계적인 선회장치를 부가한 것이 swirl coaxial 인젝터로 미립화 및 혼합효율이 좋고 안정된 연소특성을 가지고 있기 때문에 액체산소/ 수소 추진제를 이용하는 인젝터에 널리 사용되고 있다.

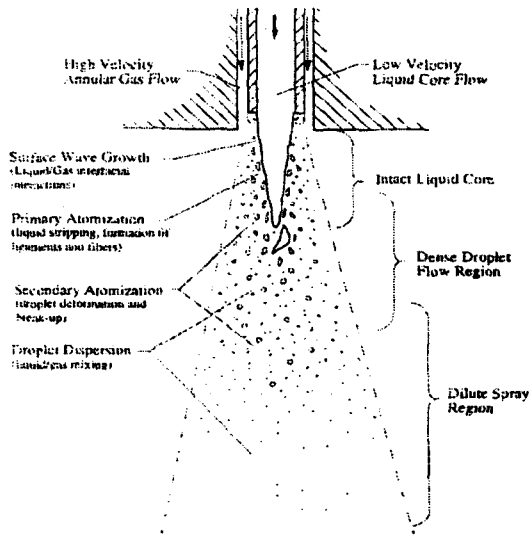


Fig. 1 Shear coaxial injector atomization regimes and spray processes

동축 인젝터에서는 인젝터 동축에서 분사되는 고속기체가 중심 오리피스에서 분사되는 저속의 액체분류에 교란(disturbance)을 생성하여 액주 표면이 분열되어 액적이 형성된다. 즉 액체와 기체의 공기역학적인 상호작용에 기인하여 액체

분류 표면에 생성되는 불안정한 파동의 성장으로 액적이 형성된다. 생성된 액적은 액체 표면에 작용하는 기체의 속도보다 더 높은 속도를 가지고 있는 주위기체에 의해서 이차 미립화된다. 이러한 고속 기체에 의한 액체의 미립화 과정은 액체 분류의 분열, 인젝터 내부 난류 전단층(turbulent shear layer)에서 불안정한 액적의 연속분열을 포함하는 복잡한 과정을 포함하고 있다. Fig. 1에 동축인젝터의 미립화 과정에 포함된 물리적인 과정을 도식화하였다.

2. 실험

연구의 수행을 위해 실험에서는 인젝터로 1.03 kN(250lbf)용 액체산소/기체메탄 추진제를 사용하는 전단 동축 인젝터(shear coaxial injector)를 사용하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용한 인젝터의 기하학적 형상이고, 액체 라인을 통해서 유입된 모의유체는 실험 치구의 내부 공간에 채워져 인젝터 산화제 유입 분기공(pylon)을 통해서 공급되어 중앙의 산화제 오리피스를 따라서 분사되고, 기체는 산화제 오리피스 주위 동축의 기체 오리피스를 통해서 분사된다.

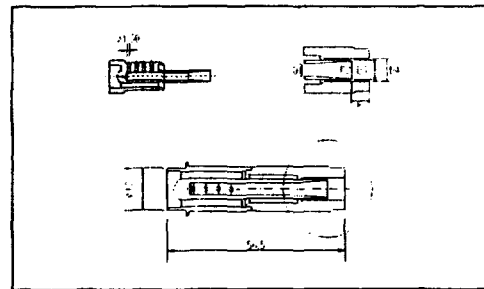


Fig. 2 Drawing of experimental injector

또한, 분사특성 및 연소안정성을 향상시키기 위해서 인젝터 끝단면에서 산화제 오리피스를 축소(recess)시키고 테이퍼를 준다. 본 실험에서는 축소(recess)길이의 영향을 살펴보기 위해서 인젝터의 기하학적 치수를 변화시켜서 인젝터를

제작하였다. Table. 1은 치수변화에 따른 실험용 인젝터의 유형이다.

Table. 1 Detail dimensions of experimental injectors

Experimental Parameters	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)	R (mm)	Injector No.
Recess	35	49	55	65	0.0	A1
	35	49	55	65	3.5	A2
	35	49	55	65	5.0	A3
	35	49	55	65	7.0	A4

동축인젝터의 미립화특성 실험을 위한 실험장치는 모의 추진제 공급장치 및 액체의 입경, 속도를 포함한 분무의 미립화 특성을 측정하는 Fig. 3와 같은 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)로 구성하였다.

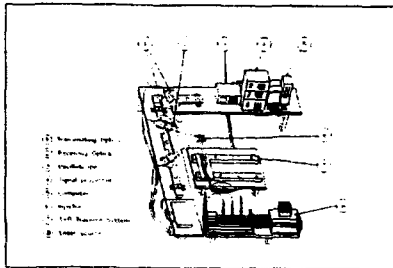


Fig. 3 P.D.P.A. system and Traverse system.

동축인젝터에서 생성되는 분무의 축방향에 따른 속도분포 및 평균입경을 고찰하기 위해서는 제작된 인젝터를 사용하여 분무의 중심축($r=0$ mm)을 따라서 축방향거리 15cm까지 실험을 수행하였다. 반경방향 측정을 위해서는 PDPA의 자동이송장치를 이용하여 각 단면을 설정하고 3mm씩 이송하면서 분무특성을 측정하였다.

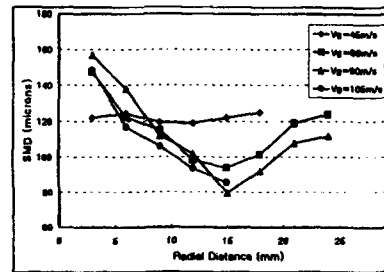
3. 결과 및 고찰

3.1 미립화에 대한 기체속도의 영향

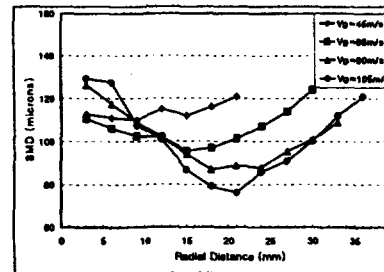
분무의 미립화에 대한 기체속도의 영향을 살

펴보기 위해서 A3인젝터를 이용하여 물의 압력을 0.21 kg/cm^2 ($Re_t = 6,900$, $V_t=1.5\text{m/s}$)으로 고정된 상태에서 기체질소의 속도를 45, 66, 90, 105 m/s로 변화시켜가면서 실험을 수행하여 생성된 액적의 반경방향 및 축방향 공간분포를 고찰하였다. 이 유동조건에서의 기체질소 유동 웨버 수는 110~580의 범위가 된다.

질소속도의 영향을 고찰하는데 있어서, 인젝터 끝단면으로부터 거리가 증가함에 따라서 액체 미립화에 작용하는 실제 기체속도는 감소하고, 인젝터 오리피스에서의 기체와 액체의 상대속도와 같지는 않지만 유효 기체속도 측정이 어렵기 때문에 오리피스 끝단면에서의 기체의 속도를 사용하였다. 또한 실제로 동축인젝터에서 액체의 미립화에 영향을 주는 요소는 기체의 액체에 대한 상대속도로 본 실험에서는 기체의 속도를 사용하여 고찰하였다.



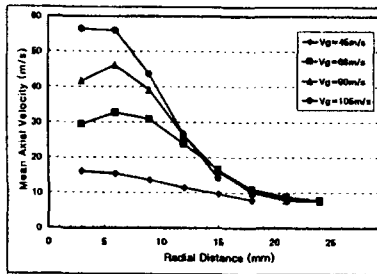
(a) $z=5$ cm



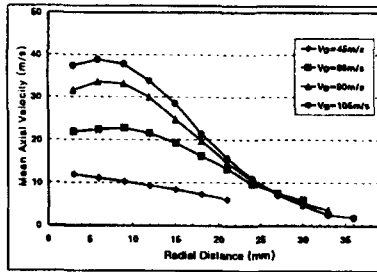
(b) $z=10$ cm

Fig. 4 Radial distribution of SMD with different gas injection velocity

($P_1 = 0.21 \text{ kg/cm}^2$, $Re = 6,900$)



(a) z=5 cm



(b) z=10 cm

Fig. 5 Radial distribution of mean velocity for gas injection velocity
($P_g = 0.21 \text{ kg/cm}^2$, $Re = 6,900$)

Fig. 4, 5는 상기의 유동조건에서 특정 축방향 거리($z=5, 10 \text{ cm}$)에서 측정된 분사 액적의 SMD 및 평균속도의 반경방향 분포를 나타낸 결과로서 기체속도가 증가함에 따라서 액적의 평균직경은 감소하였으며, 평균속도는 중심 축부위에서부터 외곽쪽으로 반경방향을 따르는 변화 폭이 급격히 크게 감소하였다.

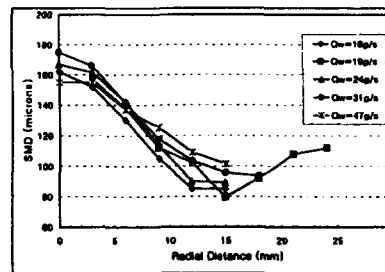
이러한 원인은 기체속도가 증가하면 액적에 더 높은 운동량을 주게 됨으로서 초기분열에 의한 영향보다는 액체와 기체의 혼합영역에서 전단효과를 높이고 증발 및 이차 미립화에 의해서 미립화 성능을 향상시키고 평균속도가 증가하는 것으로 사료된다.

3.2 미립화에 대한 액체유량의 영향

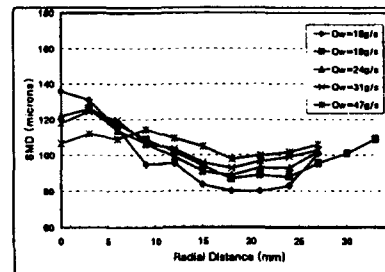
분무의 미립화 특성에 대한 액체유량의 영향을 고찰하기 위해서 A3인젝터를 이용해서 기

체질소의 가압압력을 5.2 kg/cm^2 으로 고정된 상태에서 물의 질량유량을 16, 19, 24, 31, 47 g/s로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 이 유동조건에서 물의 레이놀즈 수는 5,500~17,400이다.

Fig. 6, 7은 상기의 실험 유동조건에서 생성된 액적의 SMD와 평균속도의 반경방향 분포특성을 나타낸다.



(a) z=5 cm

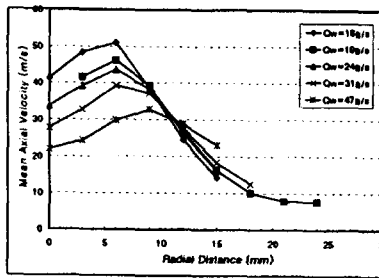


(b) z=10 cm

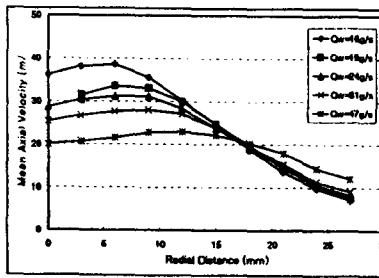
Fig. 6 Radial distribution of SMD for liquid injection flow rate
($P_g = 5.2 \text{ kg/cm}^2$, $We = 430$)

Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 분무의 중심축 근방에서는 액체의 질량유량이 큰 경우 SMD가 작은 경향을 보이지만 반경방향 거리가 증가하면서 SMD가 증가하여 반경방향거리 $r=5 \text{ mm}$ 이후에는 액체의 유동율이 큰 경우 SMD가 더 커지는 전형적인 분포특성을 보이고 있으며, Fig. 6(b)의 축방향 거리 $z=10 \text{ cm}$ 이후에는 SMD 변화 양상이 액체의 질량유량에 관계없이 일정한 형태를 가지고 있다. 반면에 축방향거리 $z=5 \text{ cm}$ 에서의 SMD 변동폭이 $z=10 \text{ cm}$ 에서의

변동폭보다 더욱 큰 경향을 나타내는 데 이것은 인젝터 끝단면 근처에서는 액체의 질량유량의 증가에 따른 평균직경의 변동이 기체의 전단력에 더욱 민감하게 변하기 때문이라고 사료된다.



(a) z=5 cm



(b) z=10 cm

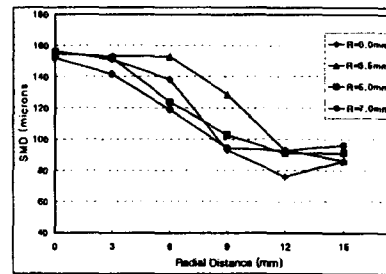
Fig. 7 Radial distribution of mean velocity for liquid injection flowrate

$$(P_g = 5.2 \text{ kg/cm}^2, We = 430)$$

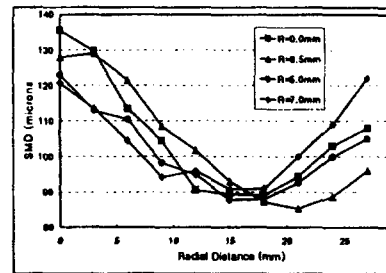
Fig. 7은 물 유량변화에 대한 액적 평균속도의 반경방향 분포를 나타내고 있다. 축방향거리 z=5 cm에서는 액체의 질량유량이 증가할수록 액적 평균속도는 감소하는 양상을 보이고 있으며 반경방향거리 r=5 mm까지는 증가하다가 급격히 감소하여 분무 바깥쪽에서는 10 m/s 정도로 일정해진다. 축방향거리 z=10 cm에서는 액적속도 변화의 기울기가 감소하여 반경방향 속도 변화폭이 작음을 알 수 있다. 또한, 액체유량이 증가할수록 평균속도의 변화가 작고 일정한 속도분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 물의 유량이 증가할수록 미립화 되지 않은 액주의 길이가 길어진다. 따라서 분무의 중심축 근처에서는 액적이 기체에 의해서 가속될 충분한 시간

이 부족하기 때문에 물의 유량이 증가할수록 액적 평균속도가 감소한다고 판단된다.

3.3 축소(Recess)에 따른 분무특성



(a) z=5 cm



(b) z=10 cm

Fig. 8 Radial distribution of SMD for liquid post recess length

$$(P_1 = 0.21 \text{ kg/cm}^2, P_g = 5.2 \text{ kg/cm}^2)$$

Fig. 8은 축방향거리 z=5cm 및 z=10 cm에서 측정된 축소(recess) 길이 변화에 대한 SMD의 반경방향 분포특성을 나타낸 것으로 오리피스 내부의 축소(recess)변화가 미립화 특성에 큰 영향을 가지고 있음을 알 수 있다. 중심축에서는 축소(recess)증가에 따라서 SMD가 감소하지만, 미립화 특성을 판단할 수 있는 반경방향 거리 r=5~15 mm 구역에서는 인젝터 A2일 때 SMD가 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과로부터 recess길이 3.5 mm인 경우를 제외하고 축소(recess)길이 증가에 따라서 미립화 특성이 향상되어짐을 알 수 있다. 축방향 거리 z=10cm (Fig. 8(b))인 경우 반경방향 거리 15mm 이상

의 분무 바깥 구역에서 recess길이 증가에 따라서 분무 액적 SMD가 다시 증가하는 경향을 갖는 것으로 나타나는 데 이는 미립화 구역에서 미립화된 액적이 액적 간의 증발이나 합체등 상호작용에 의해서 작은 크기의 액적들이 축소(recess)길이 증가에 따라 상대적으로 많이 소멸되기 때문이라고 사료된다.

Fig. 9는 일반적인 인젝터의 분무특성 해석시 가장 기본적으로 평균직경을 나타내는 D_{10} (Arithmetic Mean Dia.)으로 축소(recess)길이의 영향을 살펴본 결과로서 recess길이 3.5 mm에서 평균직경이 가장 크고, 7.0 mm에서 가장 작은 것을 명확히 알 수 있다.

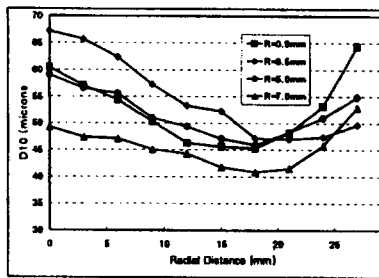
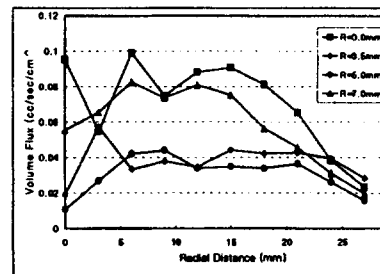


Fig. 9 Radial distribution of D_{10} for liquid post recess length ($P_l = 0.21 \text{ kg/cm}^2, P_g = 5.2 \text{ kg/cm}^2$)

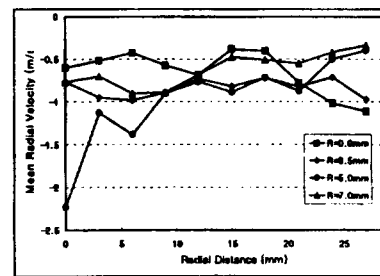
축소(recess)가 존재할 때 분무의 중심축에서 평균액적의 크기가 축소(recess)가 존재하지 않을 때보다 더욱 작아지는 것은 축소(recess)에 의한 오리피스 내부공간에서 액체의 미립화가 진행되고 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 축소(recess)의 존재에 의해서 분무의 미립화 특성이 향상되는 것은, 축소(recess)가 존재할 때 인젝터 끝단의 내부공간에 의해서 기체유동이 곧바로 팽창하는 것을 억제하여 액체분류와 기체유동의 초기 접촉면에서 더 높은 기체속도의 영향을 받도록 도와주기 때문이라고 판단된다.

Fig. 10은 recess길이에 따른 액적의 체적밀도

및 반경방향 속도 분포를 나타낸다. 축소(recess)길이가 3.5, 5.0 mm인 경우 체적밀도가 현저하게 감소하는 경향을 보인다. 이는 오리피스 내부공간에서 난류혼합(turbulent mixing)이 존재하여 미립화를 향상시킬 뿐 아니라 생성된 액적이 더욱 빨리 분산(dispersion)되어지기 때문이라고 판단된다.



(a) Volume flux



(b) Radial velocity

Fig. 10 Radial distribution of volume flux and radial velocity for liquid post recess length ($P_l = 0.21 \text{ kg/cm}^2, P_g = 5.2 \text{ kg/cm}^2$)

반경방향 속도분포에서도 축소(recess)가 존재할 때 반경방향 속도가 증가하고, 축소(recess)길이가 5.0mm에서 가장 큰 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 축소(recess)가 존재할 때 액적이 분산한다는 것을 유추할 수 있으며 연소 안정성 향상의 관점에서 본 실험조건 범위내에서는 축소(recess)길이 5.0mm인 경우가 가장 안정된 미립화 특성을 얻을 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 액체/기체 추진제를 사용하는 전단형 동축 인젝터의 기하학적 설계변수 및 작동조건에 따른 미립화 특성을 P.D.P.A.를 이용한 광학적 측정방법을 사용하여 실험적으로 고찰하였으며 주어진 실험범위 내에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 동축 인젝터에 의하여 생성되는 분무는 축방향 거리를 이동하면서 일정 축방향 거리까지는 액적 분열을 계속하여 액적 직경이 감소하지만 일정 거리 이상에서는 액적 간의 상호작용의 영향으로 액적 직경이 다소 증가하는 경향을 가지고 있으며, 분무의 중심축에서 액적 직경이 최대가 되고 반경방향 거리에 따라서 감소한다.
2. 기체 속도 증가 및 액체 유량 감소에 따라서 생성되는 액적 SMD는 감소하는 경향을 나타내며, 미립화는 기체와 액체의 상대속도에 가장 큰 영향을 받고 상대속도가 증가함에 따라서 미립화 특성은 향상된다.
3. 액체 오리피스 축소(recess)는 분무 미립화에 영향을 주어, SMD가 감소하고 분무를 분산시키며, 실험범위 내에서 액체 오리피스 직경의 1.5배인 축소(recess)길이 R=5.0 mm에서 가장 좋은 미립화 성능을 나타내었다.
4. 전단형 동축 인젝터에 의해서 생성되는 분무는 액적 직경에 관계없이 비교적 일정한 속도를 가지고 있으며, 반경방향 대칭성이 우수하였다.

본 연구에서 고찰한 전단형 동축 인젝터의 미립화 및 혼합특성 자료는 실제 액체로켓 설계시 인젝터 요소의 배열과 연소를 포함한 성능해석을 위한 초기 입력자료로 활용될 수 있을 것이다. 그러나, 실제 연소시험에서 생성되는 분무특성은 증발 및 연소과정을 포함한 더욱 복잡한 양상을 가지고 있을 것으로 추론되며, 이런 과

정을 포함한 분무특성 실험을 통하여 유용한 자료를 획득해야할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. M. Glogowski and M. M. Micci, " Shear Coaxial Injector Spray Characterization Near the LOX Post Tip Region, " AIAA Paper No. 95-2552, 1995.
2. S. A. Rahman and R. J. Santoro, " A Review of Coaxial Gas/Liquid Spray Experiments and Correlations, " AIAA Paper No. 94-2772, 1994.
3. R. J. Burick, " Atomization and Mixing Characteristics of Gas/Liquid Coaxial Injector Elements, " J. Spacecraft, Vol. 9, No. 5, May 1972.
4. Donald J. Hautman, " Spray Characterization of Liquid/Gas Coaxial Injectors with the Central Liquid Swirled, " Atomization and Sprays, Vol. 3, pp.373-387, 1993.
5. S. V. Sankar. A. Brena de la Rosa, A. Isakovic and W. D. Bachalo, " Liquid Atomization by Coaxial Rocket Injectors, " AIAA Paper No. 91-0691, 1991.
6. Michelle M. Zaller, Mark D. Klem, " Coaxial Injector Spray Characterization Using Water/Air Simulants, " NASA TM105322, NASA, 1991.
7. V. S. N. Activities Report, " Investigation of the Spray Characteristics of a Single Coaxial Injector, " Christophe Puissant Janvier, 1995.