Proceedings of
The Fourth National Congress on Fluids Engineering
August 23-25, 2006, Kyungju, Korea

액체로켓엔진 연소기용 단일 분사기 연소기와 축소형 연소기 수류/연소시험 결과 비교

김승한*, 한영민, 서성현, 문일윤, 이광진

Comparison of Combustion Performance between Single Injector Combustor and Sub-scale Combustor

Seung-Han Kim, Yeoung-Min Han, Seonghyeon Seo, Il-Yoon Moon, Kwangjin Lee

Keywords : 연소기; 동축 스월 분사기; 리세스수; 특성속도; 혼합효율;

Abstract

This paper describes the results of cold flow test and hot firing tests of an uni-element coaxial swirl injector and hot firing tests of a subscale combustor, as to the development effort of coaxial swirl injector for high performance liquid rocket engine combustor. A major design parameter for coaxial swirl injector is the recess number of a bi-swirl injector. The results of hot firing tests of the uni-element injector combustor and the sub-scale combustor are analyzed to investigate the effect of the recess number influencing on the combustion performance and pressure fluctuation. The test results of a cold flow test of the unielement combustor shows that it was shown that the change in recess number has significant effect on mixing characteristics and efficiency, while the effect of recess number on atomization characteristic is not The results of a series of firing tests using unielement and subscale combustor show that the recess length significantly affects the hydraulic characteristics, the combustion efficiency, and the dynamics of the liquid oxygen/kerosene bi-swirl injector. As a point of combustion performance, combustion efficiencies are 90% for unielement combustor and 95% for subscale combustor. The difference in the characteristic velocities between the unielement combustor and the subscale combustor may be caused by the difference in thermal loss to the combustor wall and the relative lengths of the combustion chamber. For a mixed type coaxial swirl combustor, the pressure drop across the injector increases as recess number becomes larger. The low frequency pressure fluctuation observed in unielement combustor can be related to the propellant mixing characteristics of the coaxial bi-swirl injector. The effect of the recess number on the pressure fluctuation inside the combustion chamber is more significant in uni-element combustor than the subscale combustor, of which the phenomena are also observed in time domain and frequency domain.

1. 서 론

액체로켓엔진 연소기 내에서의 점화, 성능, 효율, 연소안정성과 같은 연소과정의 질은 분사기 설계에 기인한 무화와 혼합 특성에 영향 받는다. 액체로켓엔진 연소기의 개발에 있어 연소성능과 안정성, 냉각특성 및 노즐유동 특성의 검증시험이 수행되어야 하며, 각각의 설계변수에 대한 검증이 필수적이다.

액체산소/케로신 액체로켓엔진용 실물형 연소기에 적합한 분사기를 평가하고 선택하기 위해 실물형 연소기의 연소시험 이전에 단일분사기 연소기에 대한 수류시험과 연소시험이 수행되었고, 축소형 연소기에 대한 연소시험이 수행되었다. 본 연구의 주된 목적은 액체산소/케로신 추진제조합의 액체로켓엔진 연소기에 적합한 동축 이중 스월 분사기의 내부/외부 혼합의 성능을 살펴보는 것이다. 특히, 본 연구는 액체산소 노즐 끝단의 후퇴길이가 연소성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 본 연구에서는 동축 스월 분사기의 동적인 안정성 관련 특성을 살펴보았다.

* 한국항공우주연구원 엔진그룹, detokim@kari.re.kr
** 한국항공우주연구원 연소기그룹, ymhan@kari.re.kr
*** 한국항공우주연구원 연소기그룹, sxs223@kari.re.kr
**** 한국항공우주연구원 연소기그룹, iymoon@kari.re.kr
***** 한국항공우주연구원 연소기그룹, lkj@kari.re.kr

2. 분사기 및 연소실 설계

2.1 액체-액체 동축 스월 분사기

그림 1에 제시되어 있는 형상은 일반적인 액체-액체 동축 이중 스월 분사기이고, 본 연구에서는 액체산소의 액막이 연료노즐 벽면에 부딪히는 거리에 변화를 주었다. 액체로켓엔진에 대한 액체-액체 동축 스월 분사기는 와류실의 존재유무에 따라 열림형과 닫힘형으로 구분할 수 있다.

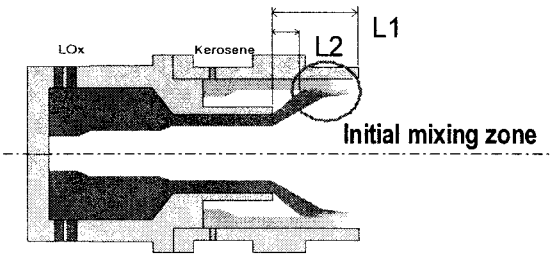

그림 1 동축 스월 분사기 형상

표 1 단위 분사기 규격

Injector Type	R.N ($\frac{L}{L}$)	d_{NOZZLE} (O/F)(mm)	d_O/d_F (mm)	Recess Length (mm)
Swirl (Mixed)	0.6	4.1/8.1	1.75/1.05	1.9
Swirl (Mixed)	1.0	4.1/8.1	1.75/1.05	3.2
Swirl (Mixed)	1.5	4.1/8.1	1.75/1.05	4.8
Swirl (Mixed)	2.0	4.1/8.1	1.75/1.05	6.4

그림 1과 표 1에 본 연구에 사용된 동축 스월 분사기 형상 및 규격을 나타내었다. 본 논문에는 동축 스월 분사기의 중심에 위치한 산화제 분사기는 와류실이 있고, 외곽 연료분사기는 와류실이 없는 경우인 혼합 동축 스월 분사기 결과를 제시하였다. 혼합형 동축 와류 분사기의 리세스 수(RN)는 0.6, 1.0, 1.5, 2.0로 변화시켰다. 리세스 수가 1.0 이상인 경우에는 연료와 산화제 액막이 분사기 내부에서 만나서 혼합된 이후에 분사기 후단으로 분사되게 되는 구조를 가진다.

2.2 단일분사기 연소기 및 축소형 연소기

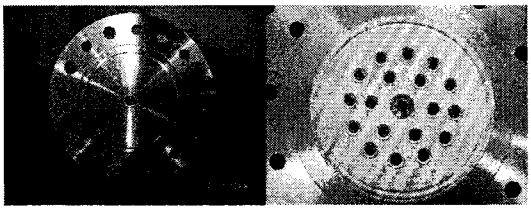

그림 2 단일 분사기 및 축소형 연소기 헤드

표 2 단일 분사기 및 축소형 연소기 규격

Item	단일분사기	축소형
Chamber Pressure [bar], P_c	52.5	52.5
Total Flow Rate [kg/s], m_T	0.316	6.01
LOx Flow Rate [kg/s], m_{ox}	0.232	4.42
Fuel Flow Rate [kg/s], m_f	0.084	1.59
Residence time [msec]	2.5	2.2
Characteristic length [m]	1.716	1.5
Chamber diameter [mm]	52.0	108

그림 2에 단일분사기 연소기와 축소형 연소기 헤드부 사진을 도시하였고, 표 2에 연소기 규격을 제시하였다.

3. 시험설비

3.1 연소시험설비

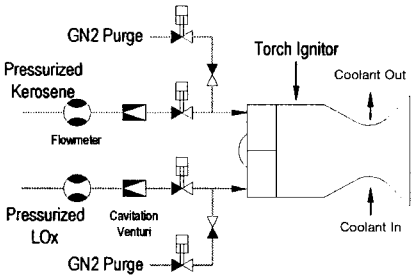

그림 3 연소 시험설비 개략도

그림 3에 연소시험설비 개략도를 도시하였다. 추진제 점화는 기체 메탄과 기체산소의 토치화염을 이용하여 케로신과 액체산소를 점화시키는 방식으로 이루어진다. 연소기로의 추진제의 공급은 질소 가압된 추진제 라인에 설치된 케비테이션 벤츄리에 의해 오리피스 후단의 연소압력 변화에 관계없이 일정하게 유지되게 된다. 연소 시험에 필요한 추진제 공급 및 퍼지 질소 공급을 위한 밸브 작동은 미리 설정된 순서에 따라 PLC 에 의해 자동 조작되도록 하였으며, 점화불량이나 연소실패의 경우 자동 종료가 되도록 비상정지 조건을 설정하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 단일분사기 수류시험 결과

분무형태

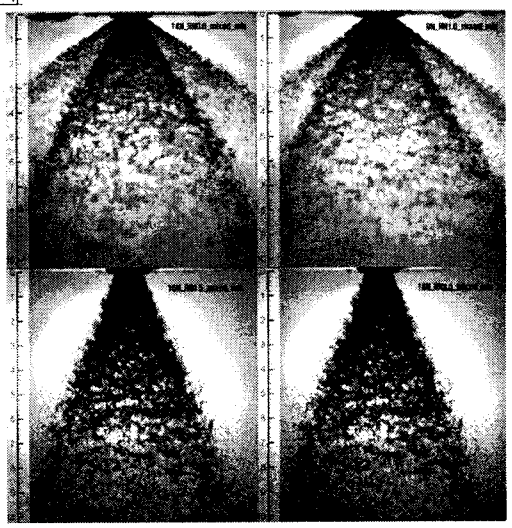

그림 4 분무 순간 영상

그림 4에 혼합형 동축 스월 분사기의 순간 영상들을 나타내었다. RN이 1.0 이하인 경우에는 내부의 산화제 분무각과 외부의 연료 분무각이 원래의 자체적인 값을 가지는데 이 경우 산화제와 연료 분무는 동축 스월 분사기의 노즐 출구 후방에서 혼합이 이루어지는 외부 혼합방식이다. 하지만 산화제 노즐의 리세스 수(RN)가 더 커지게 되면 연료와 모의 산화제 분무가 동축 스월 분사기의 내부에서 혼합이 이루어지고 노즐 출구 후방에서는 하나의 분무로 분사되게 되므로 이는 내부혼합 방식이다.

액적크기

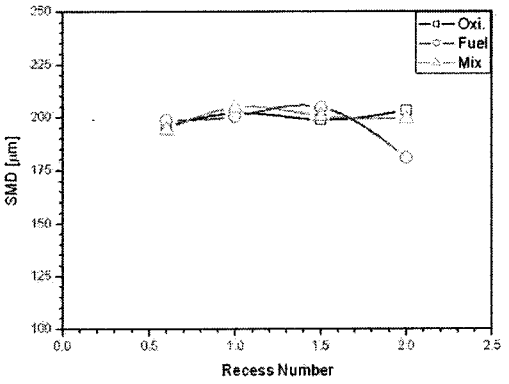

그림 5 Recess 수에 따른 SMD 측정값

그림 5에 동축 와류 분사기의 세 가지 분사조건(연료분무, 산화제분무, 동시분무)에서의 액적 크기 측정 결과를 리세스 수 변화에 대해 도시하고 있다. 액적크기 측정은 각각의 조건에서 50장의 순간 영상으로부터 추출한 수천 개의 유효입자이미지로부터 계산하였으며 측정은 분사기 출구에서 100mm 축 방향 위치에서 이루어졌다. 기체-액체 전단 동축형 분사기에 있어서는 액

적 크기가 RN 증가에 따라 감소하는 경향을 가진다는 것이 보고된다. 이는 기체-액체 제트 사이의 모멘텀 교환이 증가하기 때문이다. 이러한 경향은 본 연구에 사용된 액체-액체 분사기의 경우에는 재현되지 않았다. 액체-액체 분사기의 경우에, 작은 리세스 수에서 산화제 분무의 액적크기와 연료분무의 액적크기는 외부 혼합의 경우에는 동일한 크기를 유지하는 것으로 측정되었다. 하지만 RN 증가에 따라 동축 와류 분사기의 액적크기가 증가하는 것으로 관찰되었는데 이는 다음과 같은 이유로 판단된다. 첫째 두개의 액막의 내부혼합으로 인해 분사기 노즐 출구에서의 액막 두께가 증가, 둘째 높은 RN에 대해 분무각이 감소함으로써 액막의 분열이 발생하는 위치에서의 액막 두께가 증가, 셋째, 액막의 분열이후에 액적의 병합가능성이 증가. 산화제 분사 시, 와류분사기로부터의 액적은 산화제분사기 노즐의 RN이 0.6에서 2.0으로 변화함에 따라 거의 변화하지 않았다. 연료분사조건에서는 액적크기가 처음에는 약간 증가하다가 후에는 감소하였다. 연료와 산화제의 동시 분사에서 측정한 액적크기는 RN 변화에 따른 변화 정도가 매우 작았다.

혼합특성

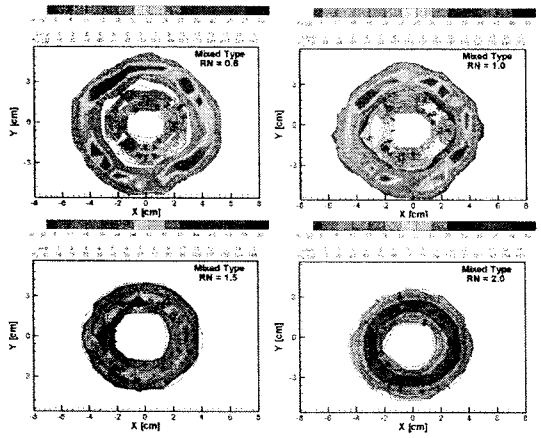

그림 6 Recess 수에 따른 단일 분사기 혼합특성

분무의 무화와 혼합이 액체로켓엔진 연소기의 연소성능에 영향을 미치는 중요 변수라고 알려져 있다. 동축 스월 분사기에 있어 추진제의 혼합은 동축 스월 분사기 내부에서의 액체상 혼합의 균일도와 분사기 외부에서 발생하는 추진제의 공간분포의 균일도, 공간적인 혼합비 분포의 균일도에 의해 영향을 받는다. 스월 분사기 요소의 성능을 평가하기 위해 혼합특성을 살펴보기 위한 비반응 수류시험이 케로신과 물을 이용하여 수행되었다. 기계식 패터네이터는 8mm×8mm 크기의 20×15개의 측정 셀로 구성되어 분사기 축방향 하류에서의 질량분포 특성을 측정하게 된다. 그림 6에는 혼합형 동축 와류 분사기의 2차원 추진제 혼합특성을 도시하였다. RN=0.6에서는 연료와 산화제의 분포 영역이 명확하게 구분되어 있다. RN이 증가함에 따라, 산화제와 연료의 분포영역이 서로 겹쳐지게 되어 RN이 1.5 이상이 되면 더 이상의 영역 구분이 불가하게 된다. 그림 6에 나타난 결과를 이용해서 혼합효율을 Rupe가 제안한 혼합효율 계산식을 이용하여 계산하였다. 위에서 언급한 바와 같이 RN이 1.0을 넘는 경우에 분사기 내부에서 이루어지는 산화제와 연료의 내부 혼합이 높은 혼합효율 결과를 보여주는데, RN이 1.5 이상인 경우에 측정된 혼합효율은 90% 이상이다. 결론적으로 혼합효율을 외부혼합의 경우에는 10% 이하, 내부혼합의 경우에는 90% 이상의 값을 가진다. 낮은 RN의 경우에서 추진제 간의 혼합은 분사기 출구 후방에서의 제트 혼합에 의해 주로 이루어지고, 높은 RN의 경우에는 추진제 사이의 혼합이 분사기 내부에서의 액막 혼합에 의해 주로 이루어진다. 일반적으로 두개의 액막의 혼합에 의한 emulsion 방식의 혼합효율이 외부 제트혼합에 비해 훨씬 높은 효율을 갖는 것으로 알려져 있다.

3.1 연소시험결과

그림 7, 8에 단일분사기 연소기와 축소형 연소기의 설계점 연소시험에서의 연소압 및 특성속도를 리세스 수의 함수로 도시하였다. 연소압과 특성속도의 리세스 수에 따른 거동은 단일분사기 연소기와 축소형 연소기에서 동일하게 나타나지만, 특성속도효율은 축소형 연소기가 단일분사기 연소기에 비해 유의미하게 높고, 모든 경우에서 95% 이상의 특성속도 효율을 가짐을 확인하였다. 단일분사기 연소기와 축소형 연소기에 있어서 특성속도의 차이는 벽면으로의 열손실과 물리적인 화염길이에 대한 상대적인 연소실 길이에 영향받은 것으로 보인다.

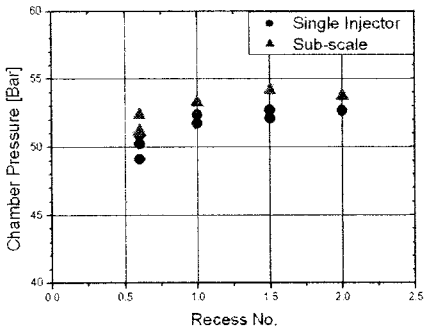

그림 7 Recess 수에 따른 연소압 비교

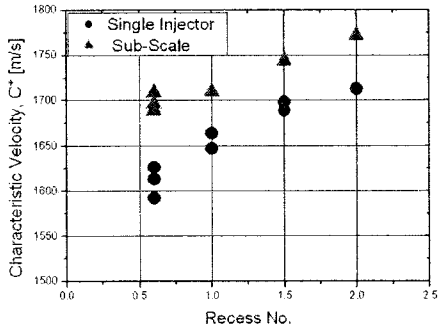

그림 8 Recess 수에 따른 특성속도 비교

3.2 동적 특성

그림 9에 단일분사기 연소기의 연소실 압력섭동을 시간에 대해 도시하였는데, 리세스 수가 커짐에 따라, 단일 분사기 연소기의 압력 섭동값이 커지다가 리세스 수가 2.0인 경우에는 다시 줄어들었다. 이는 그림 10의 연소압에 대한 주파수-시간 선도에서도 확인되는데, 리세스 수가 1.0이상인 경우 시간이 지남에 따라 여러 파장 범위의 압력섭동이 증가하고 있다. 리세스 수가 0.6인 외부혼합형 단일분사기 연소기의 경우 압력 섭동값이 상대적으로 작은 값을 보여주고 있다.

축소형 연소기에서의 연소실 압력섭동 결과에서는 단일분사기 연소기 결과와는 달리 리세스 수에 의한 영향을 나타나지 않는다. 축소형 연소기 결과에서 연소압력섭동의 주파수-시간 선도에서도 리세스 수 변화의 영향이 나타나지 않음을 확인하였다.

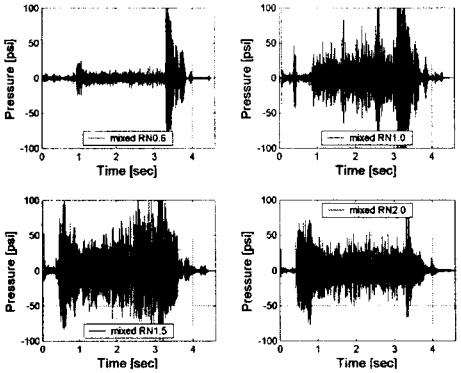

그림 9 단일 분사기 연소기 연소압력섭동

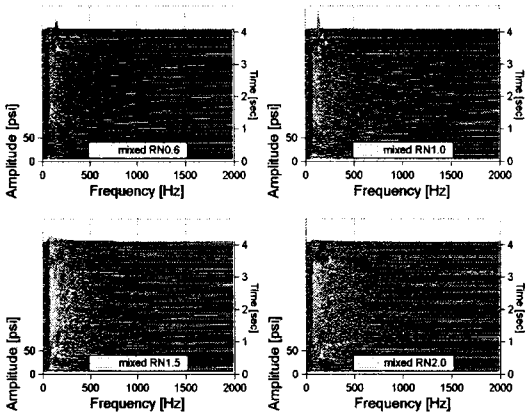

그림 10 단일분사기 연소기 주파수-시간 선도

그림 11에 연소실 동압특성을 살펴보기 위해 연소압 섭동의 RMS 값을 정상연소압에 대해 무차원화하여 리세스 수의 함수로 도시하였다. 여기에서 그림 9와 그림 10에서 나타난 바와 같이 단일 분사기 연소기의 경우에는 리세스 수의 변화에 따른 연소압 섭동 경향이 크게 변하는데 비해 축소형 연소기의 경우에는 리세스 수 변화에 따른 효과는 미미한 것으로 판단된다. 하지만, 단일분사기 연소기와 축소형 연소기 모두 4% 이내의 허용가능한 수준의 압력섭동 범위를 갖는다. 축소형 연소기의 압력섭동이 단일분사기 연소기의 압력섭동에 비해 리세스 수에 대한 민감성이 덜한 것으로 판단되는데, 이는 19개의 분사기로 이루어진 축소형 연소기에서의 응답의 분산효과에 기인한 것으로 볼 수 있다. 축소형 연소기 결과와의 비교로부터 앞서 그림 9와 그림 10에서 나타난 단일분사기 연소기의 압력섭동의 시간에 따른 변화는 많은 부분이 단일 분사기 연소기와 공급계의 연동에 기인한 것으로 판단된다. 단일분사기 연소기에서는 분사기 내에서 내부 혼합/반응이 되는 경우의 연소압의 저주파 섭동이, 외부혼합의 경우에 비해 상당히 크게 나타나지만, 축소형 연소기에서는 유의미한 차이는 관찰되지 않았다.

4. 결 론

액체로켓엔진의 분사기의 연소성능 및 압력섭동 특성을 파악하기 위해 단일분사기 연소기와 축소형 연소기의 연소시험 결과를 리세스 수에 따라 비교 분석하였다. 단위분사기 연소기에 대한 모의유체를 이용한 수류시험 결과, 액체산소 노즐의 리세스 수는 본 연구에서 사용한 분사기 설계에 대해서는 액적 크기에 큰 변화가 관찰되지 않았다. 이는 일반적인 예측과는 차이가 있는 것이다. 혼합특성은 액체산소 노즐의 리세스 수 증가에 따라

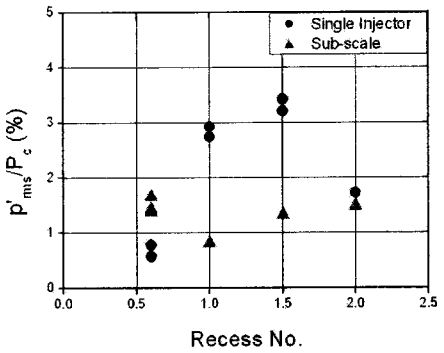

그림 11 Normalized RMS fluctuation

추진제 사이의 예혼합이 증가하여 혼합 효율이 90%를 상회하였다. 측정된 연소성능과 연소압 결과로부터 액체산소 노즐 리세스 수가 증가함에 따라 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 분사기의 연소효율은 노즐 출구 이전에서의 내부혼합의 정도에 따라 증가하였다. 연소성능 측면을 고려하면 본 논문에 제시된 분사기에서 단일 분사기에 대해 90%, 축소형 연소기에 대해서 95% 이상의 특성속도효율을 확인하였다. 단일분사기 연소기와 축소형 연소기 사이의 특성속도 차이는 연소기 벽면으로의 열손실과 화염길이에 상대적인 연소실 길이의 영향으로 판단된다. 본 연구에서 혼합형 동축 와류분사기의 경우에는 리세스 수가 커짐에 따라 분사기 차압이 증가하였다. 연소압의 고주파 섭동 측면에서는 단일분사기 연소기의 경우가 분사기 19개로 이루어진 축소형 연소기의 경우보다 리세스 수의 변화에 따른 동압섭동 특성의 변화가 민감한 것으로 나타나며, 이는 동압섭동의 시간에 대한 섭동 뿐만 아니라 주파수 측면에서도 관찰되었다. 연소실에서 관찰된 저주파 압력섭동 특성들은 추진제의 질유량율의 공간적, 시간적 섭동과 액체산소 노즐 포스트 리세스 수 증가에 따른 분사기 내부 제한 체적 내에서의 추진제 막의 내부혼합에 기인한 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Huzel, D. K. and Huang, D. H., 1992, "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA.

[2] 김종규, 김인태, 임병직, 김승한, 문일윤, 한영민, 설우석, 2004, "액체로켓엔진 연소기용 분사기의 분무특성 및 혼합특성에 관한 연구", 제3회 유체공학학술대회

[3] Kendrick, D., Herding, G., Scouflaire, P., Rolon, C. and Candel, S., 1999, "Effects of a Recess on Cryogenic Flame Stabilization", Combustion & Flames, Vol.118:327-339

[4] Tripathi A., Juniper M., Scouflaire P., Rolon J.-C., Durox D. and Candel S., 1999, "LOx Tube Recess in Cryogenic Flames Investigated Using OH and H2O Emission," AIAA-99-2490

[5] Sivakumar D. and Raghunandan B. N., 1998, "Role of Geometric Parameters on the Drop Size Characteristics of Liquid-Liquid Coaxial Swirl Atomizers, Atomization and Sprays, Vol. 8, pp. 547-563

[6] Rupe, J. H., 1953, "The Liquid-Phase Mixing of a Pair of Impinging Streams", Progress Report No. 20-195, Jet Propulsion Laboratory

[7] Bazarov V. G., and Yang V., 1998, "Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics", J. Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, September-October