

충돌형 Quadlet 인젝터의 연소성능 예측에 관한 실험적 연구

김종욱* · 박희호* · 한재섭* · 김선진** · 김 유*

An experimental study for the prediction of combustion performance of the Unlike Impinging Quadlet Injector

J.W. Kim* · H.H. Park* · J.S. Han* · S.J. Kim** · Y. kim*

ABSTRACT

For the prediction of combustion performance of the Unlike Impinging Quadlet Injector (OOOF type), mixing efficiency, mixing characteristic velocity, and efficiency of mixing characteristic velocity were obtained from the cold test. Water/Kerosene were used for simulants, The momentum ratio of oxidizer and fuel were mixing correlating parameter. Orifice discharge coefficient, spray pattern and mass distribution were measured.

As a result, invasion-depth had strong effect on mixing efficiency, mixing characteristic velocity, and efficiency of mixing characteristic velocity. Mixing efficiency and efficiency of mixing characteristic velocity showed maximum value for momentum ratio 1.67(TMR = 2.5), and fuel rich state showed larger decreasing ratio than oxidizer rich state.

초 록

Unlike impinging Quadlet injector(OOOF type)에 대한 혼합효율, 혼합특성속도, 혼합특성속도효율을 연소성능을 예측하기 위해 비연소 실험을 통하여 구하였다. 모의 추진제는 물(H₂O)와 케로신(CH_{1.97})을 사용하였고, 혼합상관인자로서 산화제, 연료 분류의 운동량비를 사용하였다. 인젝터 분무특성을 파악하기 위해 오리피스(orifice) 각 hole에 대한 유량계수, 분무형상, 질량분포 획득이 수행되어졌다.

연구 결과, 침투깊이는 혼합효율, 혼합특성속도, 혼합특성속도 효율에 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한, 혼합효율 및 혼합특성속도 효율은 MR=1.67(TMR = 2.5)에서 87%로 최대값을 가지며 산화제 과잉 상태보다 연료 과잉상태에서 더 큰 감소율을 보였다.

기 호 설 명

v	: Jet velocity (m/s)
d	: Orifice diameter (mm)
C^*	: Characteristic velocity (m/s)
E_m	: Mixing efficiency

*충남대학교 기계공학과 (Chungnam National University, Dept. of Mechanical Eng.)

**청양대학 소방안전관리과 (Chongyang Collage)

MR : Momentum Ratio(Oxi. mass/Fuel mass)
 ρ : Density (kg/m³)
 ηc^* : Efficiency of characteristic velocity
 r : Normalized local mixture ratio
 (= lmr/1+lmr)
 R : Normalized total mixture ratio
 (=TMR/1+TMR)
 lmr : local mixture ratio
 TMR : Total mixture ratio

참 자

l : Local
 f : Fuel
 o : Oxidizer
 s : simulant
 t : Total

1. 서 론

액체로켓과 관련하여 가장 중요한 사항을 열거하라고 한다면, 아마도 인젝터, 펌프, 냉각장치 등을 꼽을 수 있을 것이다. 마지막 두 항목이 선진국의 경우 어느 정도의 기술수준에 도달하여 있다고 한다면 인젝터는 아직도 여러 가지 문제를 안고 있으며, 계속하여 연구가 진행중인 로켓 개발 시 가장 유의해야 할 부품이다. 인젝터의 임무는 기본적으로 부분적인 melt down, 로켓의 대 참사를 불러들일 수 있는 연소불안정성(Combustion Instability)이 발생하지 않도록 해야 하는 임무이외에도 연소실에 설계유량을 연소에 가장 적합한 형태로 공급하여 로켓 엔진이 최대 성능과 연소를 할 수 있도록 하는 것이다. 따라서, 이와 관련한 많은 연구가 필요한 실정이고 비용을 절약하고 간단하게 엔진의 성능을 평가할 수 있는 방법 중 하나로 모의 추진제를 사용하여 인젝터로부터 분사되는 추진제의 혼합상태를 고찰하는 혼합성능시험을 들 수 있다. 이 방법은 실제 관찰이 어려운 엔진의 연소상태를 예측케 하여 엔진 성능향상을 모색하게끔 할 뿐 아니라 실제 연소시험시 나

타나는 문제점을 찾아낼 수 있게 하는 장점이 있다.

본 연구에서는 통상적인 방법으로 사용되어지는 Cold flow test를 통한 실험적 방법으로 접근하여 혼합효율, 혼합특성속도, 혼합특성속도 효율 등과 관련한 로켓엔진의 연소성능의 이해와 예측을 위한 기초자료를 구하고자 하였다. 실험을 위해서는 Lox/Kerosene 추진제 시스템에 적용되어질 수 있는 Unlike impinging Quadlet Injector(OOOF type)를 사용하였다.

2. 이론적 고찰

로켓엔진의 연소성능의 이해와 예측을 위한 실험적 방법에서 혼합성능을 평가하기 위한 척도로는 혼합효율, 혼합특성속도, 혼합특성속도효율 등이 주로 사용되어진다. Jack Rupe^[6]에 의해 제안된 혼합효율 E_m 은 인젝터로부터 분사되는 모의 추진제의 혼합정도를 나타내는 척도로서 국부 혼합비가 총 혼합비로부터 이탈된 정도를 질량으로 가중하여 나타낸 값을 말하며 다음과 같이 정의된다.

$$E_m = \left[1 - \frac{\int_0^{MF(r=R)} (R-r) dMF}{\int_0^R dr} - \frac{\int_{MF(r=R)}^1 (R-r) dMF}{\int_1^R dr} \right] \times 100\% \quad (1)$$

혼합, 미립화된 모의 추진제는 격자셀로 된 Patternator에서 채집되므로 (1)을 이산화된 형식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$E_m = \left[1 - \sum_{i=1}^n \frac{M_{st} \cdot (R-r)}{M_{st} \cdot R} - \sum_{i=1}^n \frac{M_{st} \cdot (R-r)}{M_{st} \cdot (R-1)} \right] \times 100\% \quad (2)$$

여기서 E_m 은 0~100%의 범위를 갖는데 채집된 모든 표본의 혼합비율이 분사된 혼합효율과 동일할 때 100%를 나타낸다.

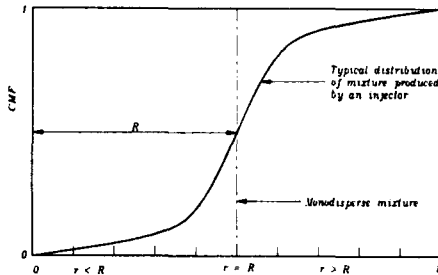


Fig. 1 Cumulative mass distribution

혼합효율 E_m 과 밀접한 관계를 갖고 있는 것은 혼합비 빈도분포 또는 누적질량분포(CMF)이다. 혼합비 빈도 분포는 국부 혼합비의 변화에 따라 빈도가 어떻게 분포하는지를 나타내고 누적질량분포는 빈도 분포의 누적 합을 말한다.

Fig. 1은 누적 질량분포 곡선으로 $CMF=0$ ($r < r$), $r=RR$, $CMF=1$ ($r > RR$)곡선과 가까울수록 혼합효율이 높으며, 이탈할수록 혼합효율은 떨어진다.

혼합특성속도 C_{mix}^* 는 cold flow test 결과로부터 실제 연소시의 추진제의 특성속도를 예측하기 위해 이용된다. 연소시험을 거치지 않고 연소성능을 쉽게 예측하는 방법으로 Nurick이 제안한 가정을 사용하는 방법이 있다^[7]. 이는 연소과정을 연소성능에 지배적인 영향을 주는 초기 혼합과정과 증발과정으로 분리하여 연소성능을 각 과정에서의 효율의 곱으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta C^* = \eta C_{mix}^* \times \eta C_{vap}^* \quad (3)$$

여기에서, 추진제의 증발효율을 100%로 가정하면 연소효율 예측에서 혼합특성속도 효율이 연소성능을 나타내는 특성속도 효율을 반영하게 된다.

모의추진제의 혼합비로부터 실제 추진제의 혼합비로의 환산은 모의 추진제의 밀도와 운동량 비를 기초로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{M_o}{M_f} = \sqrt{\frac{\rho_o \cdot \rho_{sf}}{\rho_f \cdot \rho_{so}}} \cdot \frac{M_{so}}{M_{sf}} \quad (4)$$

식(4)로부터 총 혼합비와 국부혼합비의 환산을 진행할 수 있으며, 이때 혼합특성속도 C_{mix}^* 는 다음과

같다.

$$C_{mix}^* = \frac{\sum_i C_{theo}^* \cdot M_i}{M_t} \quad (5)$$

여기서 C_{theo}^* 는 추진제의 특성속도로써 연소프로그램인 CEC code로부터 얻은 값이다. 그리고, M_i 는 각 실린더에 채집된 모의 산화제와 모의 연료의 질량의 합으로서 국부질량이라 하고 M_t 는 국부 질량들의 총 합을 나타낸다.

혼합특성속도효율은 총 혼합비에서의 특성속도 C_{theo}^* 과 혼합특성속도 C_{mix}^* 의 백분율을 나타낸다. 즉,

$$\eta C_{mix}^* = \frac{C_{mix}^*}{C_{theo}^*} \times 100\% \quad (6)$$

3. 실험장치 및 방법

Unlike Impinging Quadlet Injector (OOOF형)의 혼합성능을 예측하기 위한 장치로 크게 모의 추진제 공급장치, 인젝터 그리고 인젝터로부터 분사되어 혼합 미립화된 추진제를 채집하는 patternator로 나눌 수 있다.

본 실험에 사용된 인젝터는 Uni-element로서 한 개의 센터 연료분류와 그 주위 120° 간격의 3개의 산화제 분류가 충돌하여 추진제의 혼합, 미립화를 얻어내는 Unlike Impinging Quadlet Injector이다.

Table 1. Design value of Injector

Type	Unlike Quadlet Impinging Stream OOOF type
Impinging Length (Li)	10.4 mm
Impinging Angle (θ)	30°
Oxi. orifice diameter	2.2 mm
Fuel orifice diameter	2.2 mm
Total mass flow rate	356 g/s
Combustion pressure	200 psia

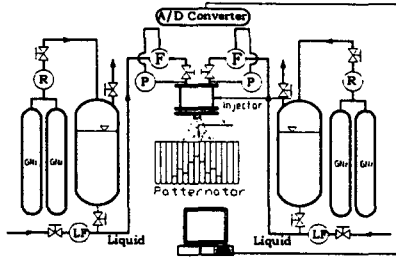


Fig. 2 Experimental set-up for measuring mass distribution

분사액체는 가연성이 없는 질소가스로 압축하였고 압력용기는 100atm까지 견딜 수 있는 특수용기를 사용하였으며, 인젝터로 분사액체를 공급하기 위한 실험장치는 Fig.2과 같다.

물과 Kerosene은 각각 진공펌프로 인해 고압용 stainless tank에 담겨지게 된다. 추진제가 담긴 탱크는 압축질소가스를 사용하여 regulator를 통해 원하는 가압 조건이 생성되고 이렇게 가압된 추진제는 수동 On/Off 밸브, 유량계, Needle 밸브를 거쳐 인젝터로 공급되어진다. 전체유량을 고정시킨 상태에서 각 모의 추진제간의 미세 유량조절을 위해 인젝터 직전에 Needle 밸브를 설치하였다.

또한, 질량 유량계와 압력계를 설치하여 data aquisition system으로 모의 추진제의 질량 유동율과 압력조건을 얻어내어 가압 조건을 확인한 뒤 실험 후에도 질량 유동율과 압력 데이터를 획득할 수 있게 하였다. 각 셀 들을 통해 mass cylinder에 채집된 물과 kerosene은 밀도 차로 인해 서로 분리가 되므로 상대적으로 밀도가 큰 물이 실린더의 밑 부분에 위치하게 되고 밀도가 작은 kerosene이 물위에 자리잡게 되기 때문에 물의 체적과 전체 체적을 측정하여 각 모의 추진제의 질량을 얻을 수 있다. 본 실험에서는 인젝터로부터 분사된 추진제를 채집하기 위한 장치로 patternator를 설계, 제작하였다. 이 장치는 격자셀, 유도관, 매스 실린더로 구성되어 있으며 격자셀은 직사각형 내에 가로 25개, 세로 15개의 셀로 나누어져 있고 각 셀의 크기는 1cm×1cm이다. 셀 들 각각에 유도관이 부착되어 있어 분사된 모의추진제가 매스 실린더에 채워지게 된다.

본 연구에서는 이러한 실험장치를 구성하여 모의

추진제로 물/kerosene을 사용하여 총유량을 356g/s로 고정시키고 각 추진제간의 질량 유동율을 바꾸어 가며 운동량 비를 0.37부터 4.65까지 변화시키며 인젝터의 기본적인 분무특성과 함께 혼합효율, 혼합특성속도 그리고 혼합특성속도효율에 대하여 고찰하였다. 또한, 이러한 결과를 환산하여 LOX/kerosene을 사용하였을 때의 혼합특성속도효율도 예측하였다.

4. 결과 및 고찰

충돌형 액막의 형태는 통상적으로 flat sheet 형태를 나타내는데 본 실험에 사용된 인젝터의 경우는 산화제만 보냈을 경우 flat sheet가 확연히 관찰되었으나 산화제와 연료를 동시에 공급하였을 경우는 sheet 형태가 분명히 관찰되지는 않았지만 채집된 추진제의 질량분포를 관찰해 보면 Photo.1과 같이 삼각뿔 형태로 sheet가 생성되었음을 알 수 있다.

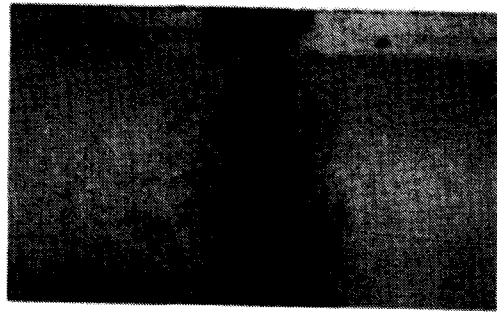


Photo.1 Spray pattern of OOF Injector

4.1 운동량 비에 따른 질량분포

Fig. 3(a),(b),(c)는 운동량비가 변화할 때 질량분포를 나타낸 그림으로 낮은 운동량 비에서는 Fig3.(a)에서 보여주는 바와 같이 전반적으로 좁은 질량분포 영역을 가진다.

이는 인젝터 센터 연료분류의 운동량이 주위 산화제 분류의 운동량보다 상대적으로 크기 때문에 넓게 퍼지려고 하는 산화제 분류의 특성을 감소시키기 때문에 sheet의 생성이 억제되고 원뿔모양의 질량분포의 좁은 영역형태의 분무군이 생성되는 것으로 사료된다.

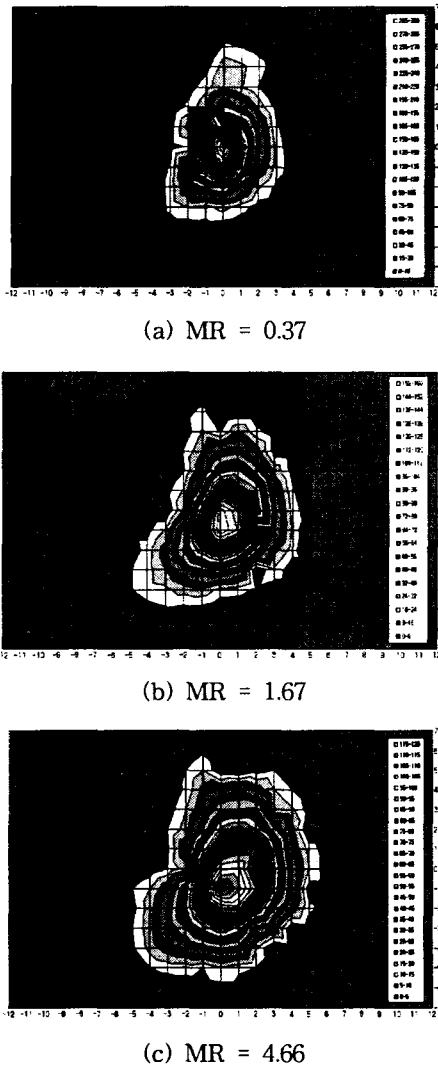


Fig. 3 The effect of momentum ratio on mass distribution

운동량이 점점 증가할수록 상대적으로 큰 운동량의 산화제 분류가 연료분류를 뚫고 충돌하므로 Fig. 3(b), (c)에서 보여주는 바와 같이 분산각이 커져 낮은 운동량에서의 질량분포보다 넓게 퍼져있음을 알 수 있다.

Fig. 3(b)에서는 산화제, 연료의 적절한 운동량 비로 인해 (a), (c)에 비하여 방사형 형태의 비교적 고른 질량분포를 보이고 있음을 알 수 있었는데 이는 산화제 충돌로 인한 spray sheet가 3방향으로

생성되는 결과로 사료된다.

4.2 운동량 비에 따른 혼합효율 및 누적질량분포

Fig. 4는 운동량 비 변화에 따른 혼합효율을 나타낸 것으로 운동량 비 1.67(혼합비 2.5)부근에서 혼합효율이 87%로 최대를 보이고 있으며, 운동량비가 1.67에서 멀어짐에 따라 혼합효율은 감소함을 보여주고 있다. 특히, 운동량 비 1.67를 중심으로 볼 때 운동량비가 큰 구역에서 보다 작은 구역에서 더 급격한 감소율을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

이러한 결과는 산화제 분류가 중심의 연료분류를 파고드는 침투깊이와 관련이 있다고 사료된다. 즉, 운동량비가 작을 때는 연료의 운동량이 산화제의 운동량 보다 커서 침투깊이는 작아지기 때문에 중심부근의 혼합비는 작고 바깥부분의 혼합비는 커지며, 운동량 비가 큰 경우는 침투깊이는 깊어지게 되어 인접해 중심부근의 혼합비는 커지고 미립화 성능은 좋아지지만 바깥부분의 혼합비는 작아지게 된다.

Fig. 5(a),(b),(c)는 혼합비 변화에 따른 국부 질량 분포 데이터들을 바탕으로 하여 혼합비-빈도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 국부혼합비를 총 혼합비로 무차원화 한 것이고 Y축에서 실선은 누적질량분포를, 막대선은 혼합비 빈도분포를, 그리고 점선은 무차원된 총 혼합비를 나타낸다.

Fig. 5(b)는 $TMR = 2.5(MR = 1.67)$ 에서의 혼합비-빈도분포를 나타낸 것으로 최대 빈도를 갖는 혼합비가 $R=0.71$ 의 왼쪽에 있지만 혼합비가 다른 것들보다 작은 범위 내에 집중되는 경향이 크므로 누적 질량분포가 급격히 증가하고 혼합 효율도 양호함

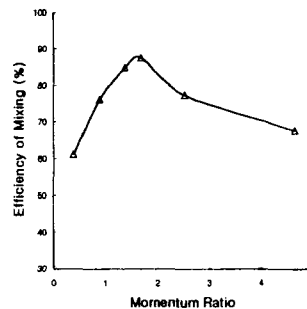
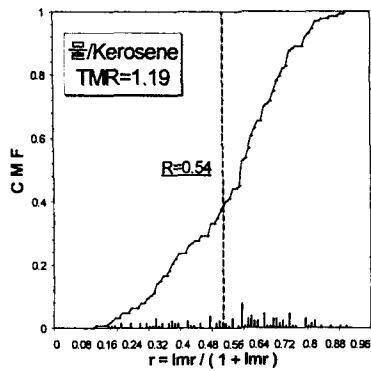
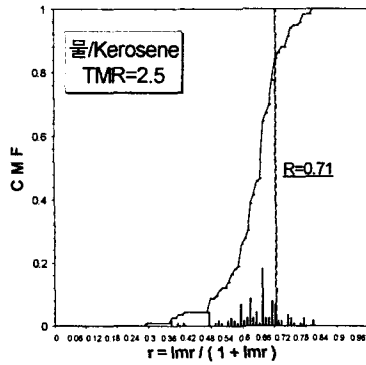


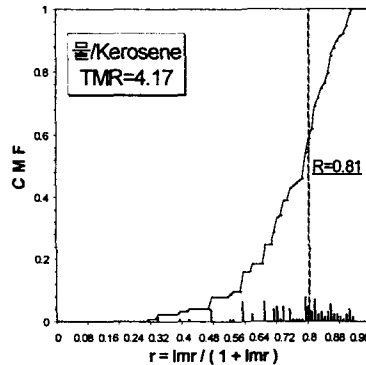
Fig. 4 The effect of momentum ratio on efficiency of mixing



(a) MR = 0.37



(b) MR = 1.67



(c) MR = 4.66

Fig. 5 The effect of mixture ratio on cumulative mass distribution

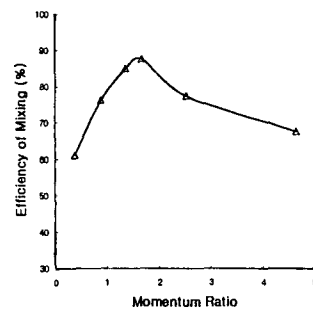
을 보여주고 있다. 이에 반해 TMR_{opt} 의 양단(MR = 0.37, 4.66)에서는(연료 량이 많아지거나 또는 산화제 량이 많아지면) Fig. 5(a), (c)에서 볼 수 있

듯이 R과 r_{max} 가 불일치하고 혼합비 불균형으로 인해 누적질량분포는 계단형태로 천천히 상승하며 혼합비-빈도분포가 넓은 범위에 분산됨을 알 수 있었다.

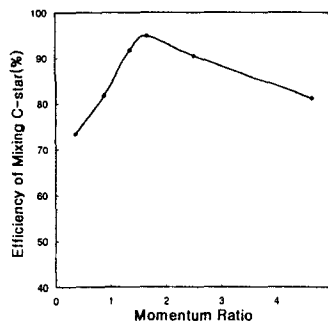
4.3 혼합특성속도 및 효율 예측

LOX/kerosene에 대한 총 혼합비와 국부혼합비 환산을 위해 국부질량과 총 질량의 비를 측정할 수 없기 때문에 모의 추진제를 사용하였을 때와 같다고 가정하고 식(2)와 (4)를 이용하여 혼합특성속도 및 효율 예측하였다.

Fig. 6(a), (b)는 실제 추진제 (LOX/kerosene) 사용시 운동량 비 변화가 혼합효율 및 혼합특성속도 효율에 미치는 영향을 보여주는 것으로 Fig. 4의 모의 추진제를 사용한 결과와 거의 같은 경향을 보였으며 혼합효율의 최대 운동량 비는 1.67(TMR = 2.5)이었다. 혼합특성속도효율도 운동량 비 1.67에



(a)



(b)

Fig. 6 The effect of momentum ratio on efficiency of mixing and efficiency of mixing characteristic velocity.

서 최대치가 존재하였으며, 최대를 나타내는 운동량 비 부근에서의 혼합특성속도효율의 변화는 작으며 이 부근에서 벗어날수록 효율이 급격하게 떨어지는 것을 볼 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 Unlike Impinging Quadlet Injector (OOOF type)에 대해서 cold flow test를 수행하여 혼합효율, 혼합특성속도, 혼합특성속도 효율과 관련하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 침투 깊이는 혼합효율, 혼합특성속도, 혼합특성속도 효율에 영향을 끼쳤다.
2. 모의 추진제의 혼합효율 및 혼합특성속도 효율은 운동량 비 1.67(TMR = 2.5) 근방에서 87%로 최대이고 혼합효율은 연료 과잉상태에서 산화제 과잉 상태에서 보다 더 큰 감소율을 보였다.
3. 실제추진제의 혼합효율 및 혼합특성속도 효율도 모의 추진제 사용 시 경향과 유사하였으며, 운동량 비 1.67(TMR = 2.5) 근방에서 최대 값을 나타내었다.
4. 실제 연소실험에서 높은 연소성능을 얻기 위해서는 운동량 비 1.67 근방에서 연소실험을 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김유 외 4명, "액체 로켓 엔진용 Unlike Triplet Impinging 인젝터(O-F-O형)의 분무 및 연소효율에 관한 연구", 항공우주공학회 춘계 학술발표회 논문집, 1997년 4월.
2. Kazuo SATO, "A Study of N2O4/Amine Injector Elements Part 1 Cold Flow Test", 航空宇宙技術報告 TR-899, 1986년 2월.
3. A.Ferrenberg, V.Jaqua, "Arinuzatuib and Mixing Study Inerim Report", NASA-CR-170943, Rocketdyne, July 1983.
4. 김선진, "衝突型 Doublet 인젝터의 噴霧特性 및 燃燒性能에 관한 實驗的 研究". 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1997년 8월.
5. 차영란, '액체로켓엔진의 연소성능 예측에 관한 연구' 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1999년 2월.
6. F.W.Hoehn, J.H. Rupe, J.G.Scotter "Liquid Phase Mixing of Bipropellant Doublets" Technical Report 32-1546. NASA
7. W.H. Nurick and S.D. Clapp, "An Experimental Technique for measurement of Injector Spray Mixing", J.Spacecraft, Vol.6, No.11, 1969.