

액체로켓용 Unlike-doublet 인젝터의 혼합특성 연구

A Study on Mixing Characterization of Unlike-doublet Injector for Liquid Rocket Engine

이 인 수, 정 기 훈, 임 병 직, 윤 영 빈
Insu Lee, Kihoon Jung, Byoungjik Lim, Youngbin Yoon
서울대학교 기계항공공학부
School of Mechanical and Aerospace Eng., Seoul Nat. Univ.

Abstract

The mixing of propellant and its mass distribution of unlike-doublet impinging injector, which is known to affect the combustion efficiency significantly, have been studied using PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence). The results show that fuel jet penetrates considerably into the oxidizer jet at impinging point as variation of momentum ratio. and then stream flows inclined because of variation of momentum ratio. Consequently, the mixing efficiency shows that maximum efficiency is at MR=3. after MR=3, mixing efficiency decreases slightly.

Key Words : Momentum Ratio, unlike-doublet injector, PLIF, mixing efficiency, Penetration depth

1. 서 론

지금까지 액체연료를 사용하는 로켓 엔진의 인젝터에 대한 연구는 분무 액적의 크기 및 분포 특성 연구와 같은 연소효율에 영향을 미치는 연구에 초점을 두어왔다. 그러나 실제 액체 로켓 엔진 내에서의 연소는 고온, 고압의 환경 내에서 일어나게 되므로 액체상태의 연료 및 산화제 액적이 매우 빠르게 기화된다. 따라서 분무 액적의 크기 및 분포 특성과 같은 미립화 특성보다는 연료와 산화제의 혼합특성이 연소효율을 결정하는 변수로 작용하게 된다[1].

액체 로켓용 인젝터의 혼합 특성에 관한 비 반응 실험은 서로 용해되지 않는 두 종류의 모의 연료와 산화제를 분사시킨 뒤 이를 격자셀로 수집하여 각각의 질량을 구하는 포집법을 주로 사

용하여왔다. 그러나 이러한 방법은 공간 분해능이 떨어지며, 유동을 교란시키고 정밀한 측정이 용이하지 않아 오차 범위가 크다는 단점이 있었다. 최근 들어 연료의 유량 분포를 액적의 형광 신호로부터 정량화하는 레이저 유도 형광기법(PLIF)을 이용하여 연료/산화제의 혼합 특성을 측정하는 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. 본 연구에서는 PLIF 기법을 unlike-doublet 인젝터의 분무장에 적용해서 연료와 산화제의 혼합 분포 및 혼합 효율을 측정함으로써 실제 연소시 화염의 초기 조건을 예측할 것이다.

2. Unlike-doublet 인젝터의 설계 및 실험조건

Fig. 1은 실제 실험에 사용된 unlike-doublet 인

젝터이다. 노즐은 정밀 표면 가공을 한 금속 튜브를 사용하였다. 인젝터 오리피스 직경의 결정은 LOX와 Kerosene의 최적 혼합비인 2.3을 기준으로 결정하였는데, 산화제와 연료에 대하여 각각 1.40mm와 1.04mm를 택하였다. 노즐 내부의 정확한 표면 거칠기를 알 수 없기 때문에 분사되는 제트의 유동 특성을 예측할 수 없으나 제트의 순간 이미지로부터 분사압이 0.5bar 이상에서는 명확한 난류 특성을 갖게됨을 확인할 수 있었다. 또한, 인젝터의 길이는 12cm로 두어, 길이 대 직경비(L/d)가 산화제와 연료에 대해 각각 85.7, 115.4가 되도록 하였으며 모의추진제로는 연료와 산화제 모두 물을 사용하였다.



Fig. 1 Unlike doublet Injector

한편, unlike-doublet Injector의 분무 특성 변수로서 가장 큰 영향을 미친다고 알려진 바 있는 운동량비(momentum ratio, MR)를 선택했는데 이는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$MR = \frac{N_o \dot{m}_o v_o}{N_f \dot{m}_f v_f} \quad (1)$$

이때, 오리피스의 개수는 $N_o = 1$, $N_f = 1$ 이므로,

$$MR = \frac{\dot{m}_o v_o}{\dot{m}_f v_f} = \frac{\dot{m}_o^2 / (\rho_o A_o)}{\dot{m}_f^2 / (\rho_f A_f)} \quad (2)$$

$$= \frac{\dot{m}_o^2 \rho_f d_f^2}{\dot{m}_f^2 \rho_o d_o^2}$$

또한 분사유량은 다음과 같이 유량계수, 밀도,

분사압의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (3)$$

식(3)과 식(2)로부터,

$$MR = \frac{(C_{do} A_o \sqrt{2\rho_o \Delta p_o})^2 / (\rho_o A_o)}{(C_{df} A_f \sqrt{2\rho_f \Delta p_f})^2 / (\rho_f A_f)} \quad (4)$$

$$= \frac{C_{do}^2 A_o \Delta p_o}{C_{df}^2 A_f \Delta p_f} = \frac{C_{do}^2 d_o^2 \Delta p_o}{C_{df}^2 d_f^2 \Delta p_f}$$

이때, 각 오리피스의 유량 정보로부터 구한 유량계수 $C_{do} = 0.5644$, $C_{df} = 0.4463$ 과 오리피스 직경을 대입하면,

$$MR = 2.8778 \frac{\Delta p_o}{\Delta p_f} \quad (5)$$

따라서 실험변수인 운동량비는 산화제와 연료의 분사압력 ΔP_o , ΔP_f 으로 조절하였다. Table 1에 이상의 실험조건을 정리하였다.

Table. 1 Experimental Conditions

Fuel diameter d_f (mm)	1.04
Oxidizer diameter d_o (mm)	1.4
Momentum Ratio, MR	0.5, 1, 2, 2.3, 3, 4
Impinging angle (deg)	30
Orifice distance (mm)	3

3. 실험 방법 및 결과 분석

3.1 분무 경사각

unlike doublet 인젝터의 분무는 Fig. 2(a)에서와 같이 연료와 산화제의 유량의 차이로 인해 like-doublet과는 달리 분무 경사각(stream inclination angle)을 갖게된다. 그러나 측면에서

보면(Fig. 2(b)) like-doublet과 같이 충돌점에서부터 팬(fan) 형상의 역막을 이루며 분열된다. 이러한 분열의 주기성은 충돌형 인젝터에서 공통적으로 나타나는 현상이다[3].

Fig. 3은 stream inclination을 측정하기 위한 실험장치를 보여주고 있다. Stroboscope의 발광주기를 600 rpm으로 고정하고 카메라의 노출시간을 0.1초로 하여 분무의 순간 이미지를 얻었다. 보다 선명한 이미지를 얻기 위해서 간접촬영 기법을 이용하였고 렌즈의 왜곡현상을 최소화하기 위하여 측정위치를 항상 렌즈의 중앙에 위치하도록 하였다. 각 조건에 대하여 총 20장의 이미지를 얻은 뒤, 이를 통계 처리하였다. 한편, stream inclination 각도는 충돌점에서 3cm 하류의 지점을 기준으로 측정하였다.

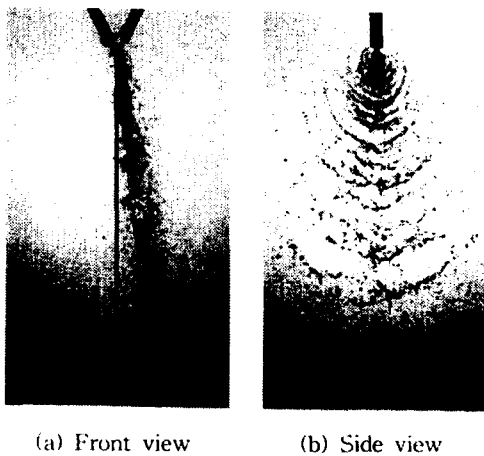


Fig. 2 Spray shapes of unlike-doublet injector ($\Delta P_f = 4 \text{ bar}$, $\Delta P_o = 3.11 \text{ bar}$ at MR-2.3)

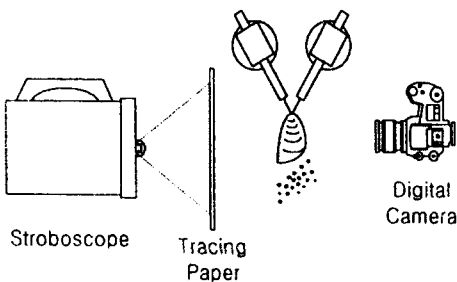


Fig. 3 Experimental setup for Stream Inclination

이론적인 분무 경사각은 Fig. 4의 기하학적 형상에서 운동량 보존 법칙에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tan \beta = \frac{\dot{m}_f v_f \sin \alpha_f - \dot{m}_o v_o \sin \alpha_o}{\dot{m}_f v_f \cos \alpha_f + \dot{m}_o v_o \cos \alpha_o} \quad (6)$$

$$= \frac{\frac{\dot{m}_f^2}{\rho_f A_f} \sin \alpha_f - \frac{\dot{m}_o^2}{\rho_o A_o} \sin \alpha_o}{\frac{\dot{m}_f^2}{\rho_f A_f} \cos \alpha_f + \frac{\dot{m}_o^2}{\rho_o A_o} \cos \alpha_o}$$

이때 식(3)을 식(6)에 대입하면,

$$\tan \beta = \frac{C_{df}^2 d_f^2 \Delta p_f \sin \alpha_f - C_{do}^2 d_o^2 \Delta p_o \sin \alpha_o}{C_{df}^2 d_f^2 \Delta p_f \cos \alpha_f + C_{do}^2 d_o^2 \Delta p_o \cos \alpha_o} \quad (7)$$

따라서 식(7)에 의하면 산화제와 연료의 운동량비가 같게 되면 분무 경사각 β 는 0이 된다. 또한 그림에서 보는 것처럼 시계 방향으로 도는 β 를 양으로 잡았다.

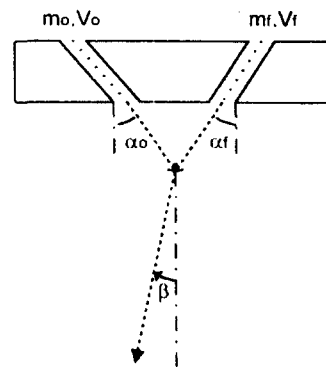


Fig. 4 Stream Inclination angle

Fig. 5는 연료의 분사압을 4.14bar로 고정하고 산화제의 분사압을 조절하여 운동량비를 0.5, 1.0, 2.0, 2.3, 3.0, 4.0으로 증가시키면서 분무 경사각을 측정한 결과이다. 그림으로부터 산화제의 유량이 점차 증가함에 따라 운동량 차에 의해 직경이 작은 연료 쪽으로 흐름이 기울어짐을 알 수 있다. 또한 이론 값과 실험 값은 전체적인 경향성은 같다고 할 수 있으나 그 크기 차이가 매우 크기 때문에 분무 경사각을 정량적으로 예측하는 데에는 식(7)이 적절하지 않은 것으로

판단된다. 이는 산화제 제트와 연료제트가 모두 한 점에서 만난다는 가정이 부적절하기 때문이다. 한편, 운동량비가 증가함에 따라 이론 값과 실험 값 사이의 차이는 점차 줄어든다.

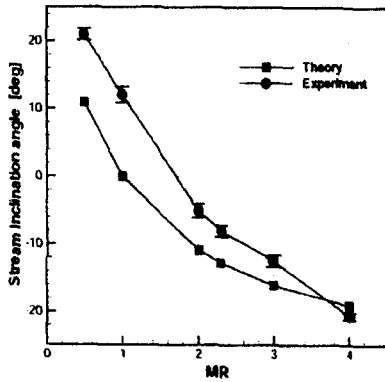


Fig. 5 Stream Inclination angle as a function of Momentum Ratio(MR)

Fig. 6은 운동량비를 2.3으로 고정시켜놓고, 연료와 산화제의 분사압을 증가시키면서 분무 경사각을 측정한 결과를 보여주고 있다. 식(7)에 의하면 운동량비만 동일하다면 추진제의 절대적인 유량과는 무관하게 일정한 분무 경사각을 갖는다. 그러나 실제로는 유량이 커짐에 따라 경사각도 증가하다가 산화제의 분사압이 3bar 이상이 되면 8.로 수렴해 간다. 그러나 Fig. 5와 비교해볼 때 추진제의 유량은 운동량비에 비해 분무 경사각에 큰 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

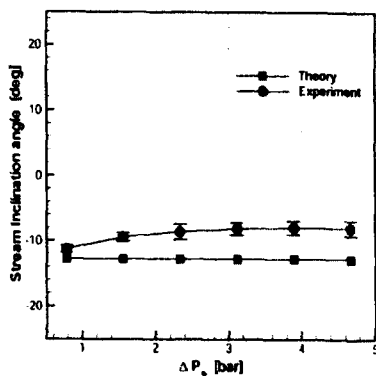


Fig. 6 Stream Inclination angle as a function of mass-flow rate at MR = 2.3

3.2 침투 깊이

Fig. 7은 침투 깊이를 측정하기 위한 장치이다. 물과 형광염료를 혼합한 모의 산화제에 Ar이온 레이저 평면광을 평행하게 조사한 후 산화제의 분무 분포를 기록하고 동일한 실험 조건에서 연료에 형광염료를 혼합하여 연료만의 분무 분포를 얻는다. 카메라의 노출 시간은 0.1sec을 주었으며 각 실험 조건 별로 20장이 이미지를 얻어 분석하였다.

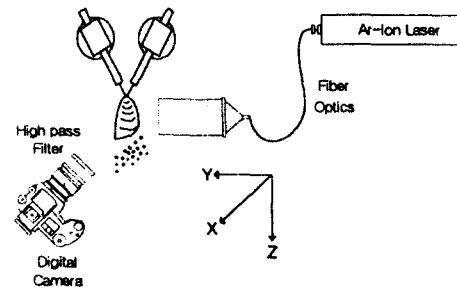


Fig. 7 Experimental setup for Penetration depth

Fig. 8은 실험결과를 보여주고 있는데, 상대적으로 분사 속도가 큰 연료(line)가 산화제(field)를 침투하며 혼합이 이루어지고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(a)-(c)로부터 운동량비에 따른 침투 깊이에 변화를, (c)와 (d)로부터 추진제의 유량에 따른 침투 깊이에 변화를 알 수 있는데, 어떤 경우에도 연료는 산화제의 중심에까지 침투해 들어가므로 unlike-doublet의 혼합성능은 매우 우수하다는 것을 예측할 수 있다. 그러나 Ashgriz 등[4]이 언급하였던 것처럼 유량 또는 운동량비에 따라 연료제트가 산화제 제트를 그대로 통과하거나 반사되는 경우는 찾아볼 수 없었다. 따라서 그들이 예측한 unlike-doublet의 세가지 혼합 메커니즘은 유효하지 않으며, 산화제와 연료의 공간분포로 볼 때 충돌에 의한 혼합 효과는 어떠한 조건에서도 매우 크다고 할 수 있다.

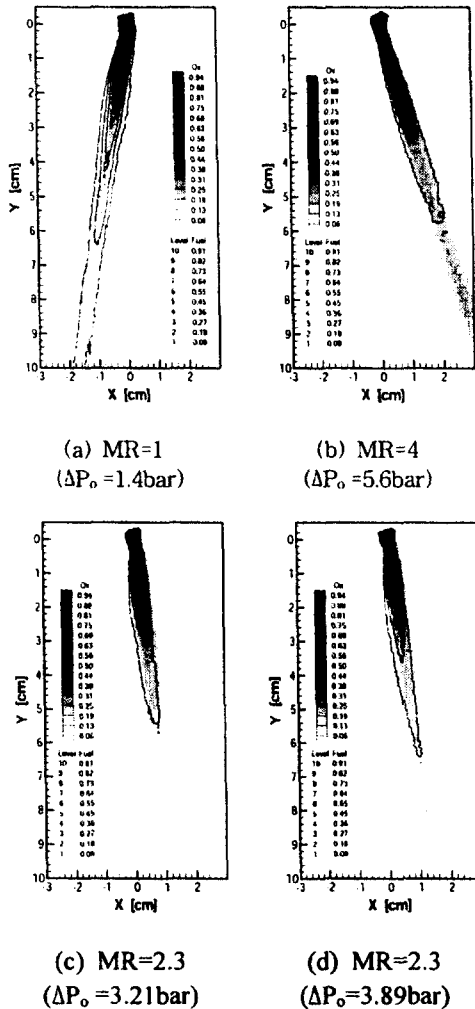


Fig. 8 Visualization of Penetration depth
(a)-(c) $\Delta P_0 = 4.14\text{bar}$, (d) $\Delta P_0 = 5\text{bar}$

3.3 분무 단면의 혼합 분포 특성

형광 분자의 농도에 비례하는 형광신호의 강도를 이용하는 PLIF이론[5]은 형광 염료가 시험 유체 내에 균일하게 존재하고 있다면, 형광 신호의 강도는 유체의 체적, 즉 질량과 입사되는 레이저 광의 강도에 비례하게 되므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$G_f = C_f' I_i(x, y) \delta m = C_f' I_i(x, y) \rho \quad (8)$$

이때 액적이 존재하는 모든 영역의 신호강도의 합은 총 분사유량과 같은 의미를 갖기 때문에 정량화의 기준으로 삼을 수 있다. 따라서 측정 평면상에서 얻어지는 형광신호의 강도로부터 그 위치에서의 유량 플럭스(mass-flux)를 정량화 할 수 있다.

Fig. 9는 PLIF를 이용하여 단면방향의 유량분포를 측정하기 위한 실험장치와 실험에서 사용된 좌표계이다. Ar-Ion 레이저(514.5nm)로부터 얻은 빔은 fiber optics를 통해 평면 광으로 조사된다. 모의제 추진제는 514.5nm의 파장에서 형광을 일으키는 형광염료를 용해시키기 위해 메틸 알콜을 물과 4:1의 비율로 첨가하여 사용하였다. 연료의 분사압은 연료탱크를 가압 해주는 압축공기로 1차 조절하며 노즐 입구에서 감압기를 통해 보다 미세하게 2차 조절된다. 형광신호는 550nm high-pass 필터를 거쳐 디지털 카메라로 감지되며, 분무가 수직방향으로 이루어지므로 카메라의 수직방향 접근이 불가능하기 때문에 측면에서 촬영한 후 이미지 처리를 통해 원근 보정을 해준다. 형광신호는 각각 1초의 노출시간을 준 5개의 이미지를 평균하여 구한다. 실험에 사용한 좌표계는 형성되는 액막의 폭 방향을 X, 두께 방향을 Y, 중력 방향을 Z로 정하였다. 측정 단면의 위치는 인젝터 면으로부터 Z방향으로 3cm으로 하였다.

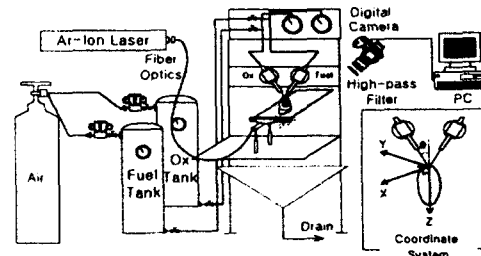


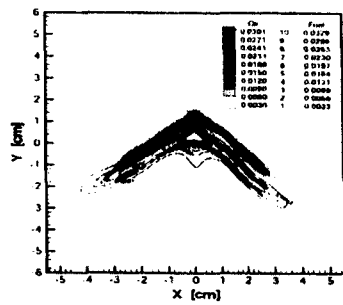
Fig. 9 Experimental setup for PLIF

Fig. 10은 운동량비에 따른 연료와 산화제의 개별적인 분포 특성과 혼합 특성을 동시에 보여주고 있다. 전체적인 단면 분포는 like-doublet 인

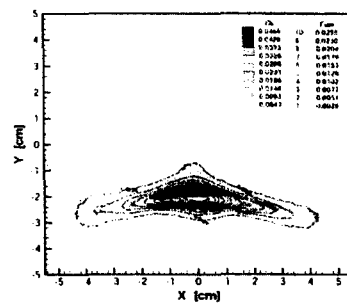
젝터의 분무와는 달리 $Y=0$ 이 아닌 공간상에서 기울어진 특성을 보이고 있다. Fig. 10(a)는 연료에 비해 산화제의 운동량비가 작아서 산화제가 연료를 감싸면서 산화제 방향으로 치우친 'V'자 모양을 이루게 된다. 운동량비가 증가함에 따라 산화제 제트의 속도가 커지므로 Fig. 10(b)-(d)에서와 같이 단면 모양의 비 대칭성이 완화된다. Fig. 10(e)의 운동량비 3에서는 산화제 제트와 연료제트의 운동량이 가장 이상적이어서 like-doublet에서 보여지는 일자형의 대칭적인

단면 분포특성을 보이게 된다. 따라서 이 운동량비에서 최대의 혼합효율이 이루어 질 것으로 예측된다. 운동량비가 3보다 커질 때에는 Fig. 10(f)에서처럼 연료 방향으로 치우친 'V'자 형상을 나타내므로 다시 혼합효율이 감소될 것으로 보인다.

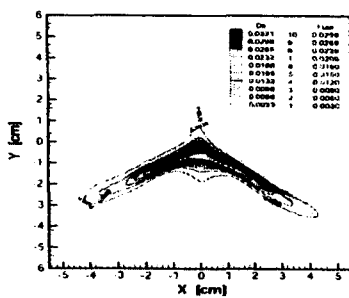
또한, 운동량비가 변하더라도 전반적으로 우수한 혼합성능을 보이고 있으나, 상대적으로 속도가 큰 연료에 중앙 집중현상은 여전히 존재하였다. 이것은 연소 안정성에 좋지 않은 영향을 미



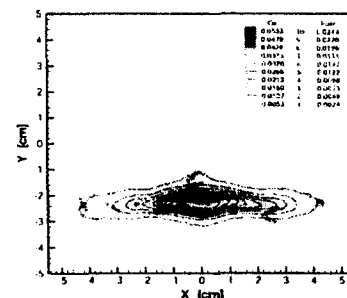
(a) MR=0.5 ($\Delta P_o=0.7\text{bar}$)



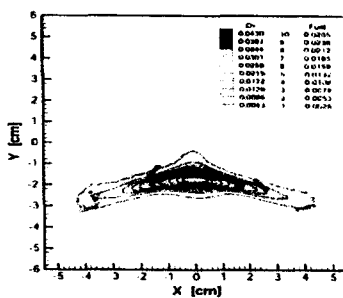
(d) MR=2.3 ($\Delta P_o=3.21\text{bar}$)



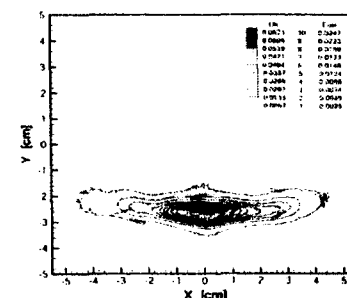
(b) MR=1.0 ($\Delta P_o=1.4\text{bar}$)



(e) MR=3.0 ($\Delta P_o=4.19\text{bar}$)



(c) MR=2.0 ($\Delta P_o=2.8\text{bar}$)



(f) MR=4.0 ($\Delta P_o=5.59\text{bar}$)

Fig.10 Process of mixing Fuel and Oxidizer($Z=3\text{cm}$)

치는 요인이 될 것이다.

PLIF 단면 측정 결과로부터 운동량비가 증가함에 따라 'V'자 모양에서 대칭형으로 분포특성이 변화함을 알 수 있었다. 이러한 혼합 분포 특성을 보다 정량적으로 분석하기 위하여 단면에서의 혼합효율을 다음과 같이 구하였다[6].

$$E_m = 1 - \left(\frac{\sum_0^R m_i(R-r)}{M_i R} + \frac{\sum_0^{\bar{r}} m_i(R-\bar{r})}{M_i(R-1)} \right) \quad (9)$$

여기서 M_i 는 단위시간에 분사되는 전체 유량을, m_i 은 이 미지상의 한 화소에서 유량을 의미하며, R , r 은 각각 전체 유량의 산화제 질량분율과 한 화에서의 산화제 질량분율로서 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{M_{i,Ox}}{M_{i,Fuel} + M_{i,Ox}}, \quad r = \frac{m_{i,Ox}}{m_{i,Fuel} + m_{i,Ox}} \quad (10)$$

여기서 \bar{r} 은 $r \geq R$ 인 경우에 사용된다.

Fig. 11은 PLIF으로부터 얻은 연료와 산화제의 단면 분포를 이용하여 식(9)로부터 구한 혼합효율을 운동량비의 함수로 나타낸 결과이다. Fig. 10의 단면 분포로부터 예측한 바와 같이 운동량비가 3일 때 최대의 혼합효율을 보이며 운동량비가 더 커질 경우 산화제 유량이 지나치게 증가해서 혼합효율은 다소 떨어짐을 알 수 있다.

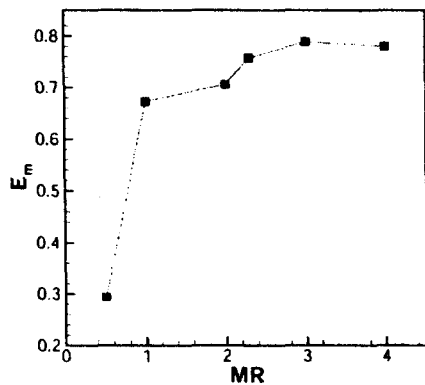


Fig. 11 Mixing efficiency as a function of MR

IV. 결 론

PLIF 기법을 사용하여 unlike-doublet 인젝터의 연료와 산화제 각각의 유량 단면 분포를 측정함으로써 비 반응 조건에서 연료와 산화제의 충돌로 인한 추진체의 혼합과정을 이해할 수 있었다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전체 분무 형상은 유량차로 인해서 분무 경사각을 갖을 뿐, 분무의 분열 과정은 like-doublet과 동일하다.
2. 분무 경사각 측정 실험결과로부터 이론식은 운동량비에 따른 경사각의 정성적인 변화를 예측할 수 있지만 그 절대적인 크기에 상당한 차이를 보이고 있으므로 적절하지 못하다. 또한 운동량비는 분무 경사각을 지배하는 변수이며 추진체의 유량은 상대적으로 영향이 작다.
3. 침투 깊이 측정으로부터 운동량비나 유량의 어떠한 조건에서도 산화제와 연료 제트가 교차하거나 반사되는 현상은 나타나지 않으며 매우 효율적인 혼합이 이루어짐을 알 수 있다.
4. PLIF 단면 혼합 분포 측정결과로부터 운동량비가 증가함에 따라 혼합효율이 증가하다가 운동량비 3에서 최대 혼합효율을 보임을 알 수 있다. 이는 연료와 산화제의 분포가 'V'자 형에서 대칭형으로 변화하기 때문이며 운동량비가 3 이상일 때에는 산화제 유량이 지나치게 증가하여 혼합효율은 다시 감소한다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 KSRⅢ와 과학기술부의 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] W.E. Anderson, H.M. Ryan, and R.J.

- Santoro, "Impinging Jet Injector Atomization", *Liquid Propellant Rocket Combustion Instability*, AIAA, 1990.
- [2] V. McDonell, V. Phi, and S. Samuelsen, "Structure of Sprays Generated by Single Unlike Doublet Injectors", *35th AIAA Joint Propulsion Conference*, 99-2464, 1999.
- [3] M.F. Heidmann, R.J. Priem, and J.C. Humphrey, "A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets", *NACA TN 3835*, March 1957.
- [4] N.S. Ashgriz, B.L. William, D.G. Talley. "Mixing Mechanisms in a pair of Impinging Jets", *Journal of Propulsion Power*, Vol.17, No.3, May-June 2001.
- [5] Kihoon Jung, Youngbin Yoon, Sang-soon Hwang, "Spray Characteristics of Impinging Jet Injectors Using Imaging Techniques," *36th AIAA Joint Propulsion Conference*, Jun AIAA, 2000
- [6] Robert W. Riebling, "Effect of Orifice Length to Diameter Ratio on Mixing in the Spray from a Pair of Unlike Impinging Jets", *J. Spacecraft and Rocket*, Vol.7, pp. 894-896, 1970.