

# Stereoscopic PIV 속도장 측정기법을 이용한 액체 램제트 연소기에서의 2차 재순환 유동장 측정

김석주\* · 최종하\* · 박철우\*\* · 손창현\*\*

## Flow Characteristics of secondary recirculation region for using Stereoscopic PIV in a Liquid Fuel Ramjet Combustor

S. J. Kim\*, J. H. Choi\*, C. W. Park\*\*, C. h. Sohn\*\*

### Abstract

Flow characteristics at secondary recirculation zone in a liquid fuel ramjet combustor are investigated using CFD and 3-D Stereoscopic PIV method. The combustors have two rectangular inlets that form 90 degree each other. Three guide vanes were installed in each rectangular inlet to improve the flow stability. The tested angle of the air intakes was 60 degree. The experiments were performed in the water tunnel test with the same Reynolds number in the case of Mach0.3 at inlet. Both computational and experimental results showed the secondary recirculation flow occurred at the front junction of inlet main stream and combustor chamber. The size of secondary recirculation region increased with upon closer center of axial combustor. Since the performance of combustor depends on not only the main recirculation in the dome region but also the secondary recirculation flow in a junction region, the optimal angle of the air intakes should consider the recirculation size as frame holder.

**Key Words :** Secondary Recirculation Zone(2차 재순환영역), Flow Stability(유동안정화)  
Guide Vane(안내 깃), Combustor Chamber(연소기), Frame Holder(화염 안정기)

### 1. 서론

국가의 방위능력과 관련하여 보다 나은 성능의 무기 체계 개발에 대한 연구는 국내외적으로 끊임없

이 진행되고 있으며, 현재 기계 및 전자 통합시스템의 발달과 더불어 공격 또는 방어대상 체계의 성능이 매우 빠른 속도로 발전되고 있다. 특히, 유도 무기의 성능향상은 놀라운 속도로 가속화되고 있는데, 이에 따른 상대적 성능향상의 요구와 필요는 고성능의 추진기관을 요구하게 되어 램제트(Ramjet) 추진기관에 대한 관심이 높아지고 있다. 이미 선진 각국은 각종 유도미사일 체계를 중심으로 램제트 추진기관의 개발을 완료하여, 공대공(Air-to-Air), 지대공(Surface-to-Air), 대함(Anti-Ship), 대레이더(Anti-Radar), 순항(Cruise)

---

† 경북대학교 기계공학부 대학원  
E-mail : chsohn@knu.ac.kr

\* 경북대학교 기계공학부 대학원

\*\* 경북대학교 기계공학부

에서 대륙간 탄도탄(ICBM)에 이르기까지 다양한 영역에서 응용하고 있다. 액체 램제트 엔진은 로켓 엔진과 달리 산화제를 자체에 탑재하지 않고, 대기 중에서 흡입구를 통해 흡입한 공기를 산화제로 사용한다. 램제트에서는 공기 흡입구로 들어오는 공기는 충격파를 지나고 확대관을 지나면서 속도가 떨어져서 압력이 상승하여 공기를 압축한 것과 같은 결과를 얻는다. 따라서 제트엔진과 달리 압축기가 필요 없고 산화제를 탑재할 필요성이 없으므로 높은 비추력을 얻을 수 있고 소형화 할 수 있으며, 사정거리가 증가한다. 램제트 엔진에서 비행속도, 고도, 회전운동 등의 비행 형태가 변화하면 비행체 주위의 유동이 바뀌고 공기 흡입구에 유입하는 공기의 압력, 속도, 유량등이 설계점과 달라져 연소기 내에서의 연소상태가 변화하여 비행상황에 따라서는 불완전 연소로 인해 발생추력이 낮아져 비행속도를 저하시킨다. 따라서 안정된 연소 상태에서 램제트를 작동시키기 위해서는 비행체의 상태가 변화하여도 성능저하가 적은 최적의 연소기 설계기술이 필요하다. 액체 램제트 엔진은 다양한 비행조건에 따른 유입 유동의 변화에 대하여 안정적이며, 효율이 높은 연소를 유지해야 한다. 그러나 실제 액체 램제트 추진기관은 로켓 추진기관과 달리 유입구의 형상, 유동입구각(flow inlet angle), 안내깃의 유무 및 선회 영역의 크기에 따라 커다란 차이점을 지니고 있기 때문에 안정된 상태에서 액체 램제트 엔진을 작동시키기 위해서는 비행체의 상태가 변화하여도 성능저하가 적은 최적의 연소기 설계기술이 필요하다. 특히 화염의 안정화와 고효율의 연소를 얻기 위해서는 유입공기가 연소실에서 재순환 영역을 형성하도록 하여 연료와 흡입공기와의 혼합을 촉진시키는 동시에 균일한 연소를 가져오게 하는 것이 중요하다. 이러한 연소조건은 연료주입각이 기존의 연구에서 밝혀진 것과 같이 30도와 45도 보다 60도에서의 2차 재순환 영역을 이용한 연소를 보다 안정화시킬 수 있다고 생각되며, 또한 화염 안정기(Flame holder)의 역할을 하는 연소기에 직접적으로 영향을 미치므로 실제 액체 램제트 연소기의 최적설계가 가능하다고 판단된다<sup>[7]</sup>. 따라서 본 연구에서는 Stereoscopic PIV 기법 중 Translation 방법과 수치해석을 이용하여 연료주입구의 각도와 연소실 중앙단면 거리변화에 따른 제 2차 재순환 영역에서의 유동특성을 알아보고자 한다.

## 2. 수치해석 및 실험장치와 방법

### 2.1 수치해석조건

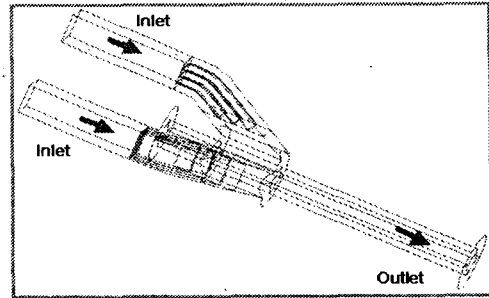


Fig. 1 Grid generation

Fig. 1은 유입각도가  $60^\circ$  이고, Dome size가 60mm 인 경우, 액체 램제트 연소기에서의 2차 재순환 영역에서의 유동특성을 파악하기 위해 CFD-ACE를 이용하여 격자를 생성하였다. Grid 수가 670,000개로 구성된 격자 생성은 모듈 개념의 격자를 사용하여, 작동유체가 유입되는 두 개의 Inlet 영역과 연소실 영역으로 구성되어 있다. 마하수 2로 비행하는 비행체를 작동유체가 물인 경우로 해석하여 Inlet속도는 3.7m/sec이고, 난류 모델은  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 출구조건인 압력과 온도는 1 atm, 300K를 사용하였다.

흡입구로부터 연소실로 유입되는 다수의 공기유입관의 유동 조건이 비행체의 받음각과 Yaw각에 따라 달라지므로 지배 방정식은 3차원, 정상 상태의 Navier-stokes 방정식을 유한 체적 방법을 사용하여 수치해석하였다.

### 2.2 실험장치

본 실험에서는 실제 유동은 공기이지만 유입구 입구에서의 속도를 기준으로 레이놀즈(Reynolds) 상수를 사용하여 작동유체를 물로 하였다. 실제 램제트의 유입구에서의 공기속도가 마하수 2이기 때문에 압축성의 영향은 무시할 수 있으며, 연소상태가 아닌 Cold flow 조건으로서 Water tunnel을 제작하여 실험하였다.

실험에서 제작된 액체 램제트 연소실 형상은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 사각 덕트의 유입구는 2개로 하고, 서로  $90^\circ$ 의 각을 이루는 형태로 제작하였다. 유입구에서 연소실로 유입되는 유체의 유동안정화를 꾀하기 위해 공기유입구의 각도가 생기는 부분에 두께 2mm의 안내깃(guide vane)을 세 개 설치하였다. 그리고 속도계측을 위한 영상획득시 빛의 왜곡이나 산란현상을 방지하기 위해 원형의 연소실 외곽에 사각덕트 형태로 만들어주고 Water를 사용하여 실험하였다.

Fig. 3은 Stereoscopic PIV 기법을 사용한 시스템 구성이며, 두 대의 카메라가 실험용 램제트를 측정하기 위해 설치되어 있다.

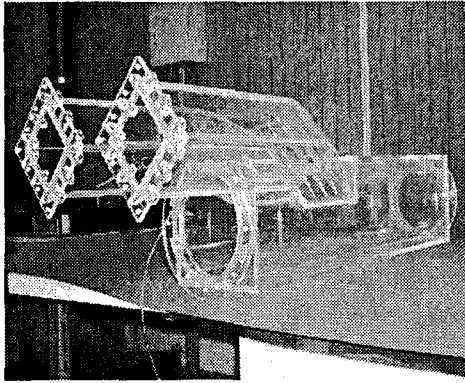


Fig. 2 실험용 램제트의 형상

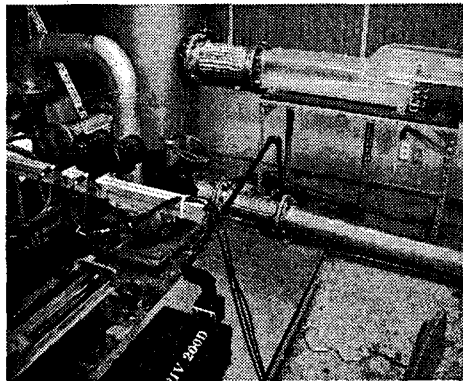


Fig. 3 Stereoscopic PIV기법을 사용한 실험용 램제트의 시스템

### 2.3 실험방법

본 실험에서는 Stereoscopic PIV 기법중 Translation 방법을 사용하였다<sup>[1-6]</sup>.

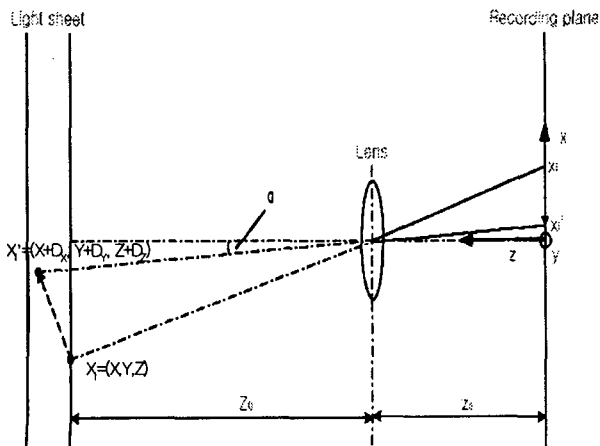


Fig. 4 Translation method of Stereoscopic PIV

Translation 방법에서는 카메라렌즈의 광학축이 측정평면과 수직을 이루고 있으며, CCD 영상기록면 중심으로부터 일정간격 Shift 되어있다. 이 기법은 두 대의 카메라로 측정된 2차원 평면투사를 그대로 이용하여 3차원 속도벡터를 구하는 방식이다. Fig. 4는 입자 변위와 영상기록면에 기록되는 변위 사이의 관계를 나타낸 그림이다. 두 대의 카메라를 Translation 방식으로 설치하고 시간간격  $\Delta t$ 로 레이저 평면광을 조사하였을 때 영상기록면에 나타나는 변위는 수식(1), 수식(2)와 같이 표현된다.

$$x'_i - x_i = -M \left( D_X + D_Z \frac{x'_i}{z_0} \right) \quad \dots (1)$$

$$y'_i - y_i = -M \left( D_Y + D_Z \frac{y'_i}{z_0} \right) \quad \dots (2)$$

다음으로 XZ평면과 YZ평면이 Z축과 이루는 각을  $\alpha$ 와  $\beta$ 로 정의하면 수식(3)과 같다.

$$\tan \alpha = x'_i / z_0, \quad \tan \beta = y'_i / z_0 \quad \dots (3)$$

따라서, 오른쪽 카메라로 측정된 속도성분  $U_r$ 와  $V_r$ 는 수식(4)와 같다.

$$U_r = -\frac{x'_i - x_i}{M \Delta t}, \quad V_r = -\frac{y'_i - y_i}{M \Delta t} \quad \dots (4)$$

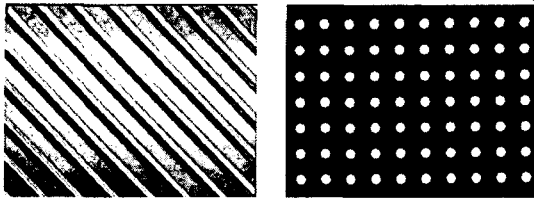
같은 방법으로 왼쪽 카메라로 측정된 속도성분  $U_l$ 과  $V_l$ 도 같은 방법으로 구할 수 있다. 구해진 4개의 관계식( $U_r, U_l, V_r, V_l$ )으로부터 3가지 속도성분 ( $U, V, W$ )을 구하면 수식(5), 수식(6), 수식(7)과 같다.

$$U = \frac{U_r \tan \alpha_l + U_l \tan \alpha_r}{\tan \alpha_r + \tan \alpha_l}, \quad \dots (5)$$

$$V = \frac{V_r \tan \beta_l + V_l \tan \beta_r}{\tan \beta_r + \tan \beta_l} \quad \dots (6)$$

$$W = \frac{U_l - U_r}{\tan \alpha_r + \tan \alpha_l} = \frac{V_l - V_r}{\tan \beta_r + \tan \beta_l} \quad \dots (7)$$

3차원 속도 성분의 보정을 위해서 Fig. 5와 같은 보정판을 사용하여 보정하였고<sup>[8]</sup>, Fig. 6은 Stereoscopic PIV 기법을 이용하여 측정될 유동장의 위치를 나타내고 있으며 실험용 램제트의 중앙단면에서 각각 40mm, 60mm, 80mm 간격이다.



(a) Calibration target with grooves (b) Calibration target

Fig. 5 보정 판

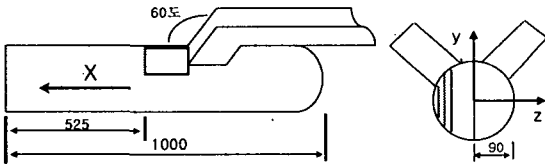


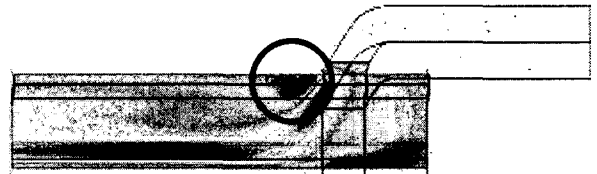
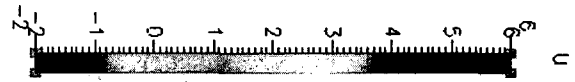
Fig. 6 실험용 램제트의 측정지점

### 3. 결과 및 고찰

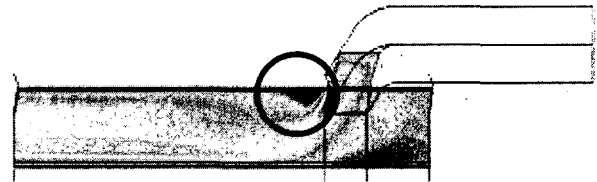
Fig. 7의 수치해석결과 램제트 연소기 유입구와 연소기 본체가 만나는 부분인 원형으로 표시한 위치에서 2차 재순환영역이 생김을 확인할 수 있다. 재순환 영역의 속도 크기는 주 유속에 비해 상당히 작기 때문에 연소의 안정에 큰 도움이 된다. 그리고 2차 재순환 영역은 중앙에서 80mm의 경우에는 생성되지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 Stereoscopic PIV기법을 이용한 3차원 속도를 측정된 실험결과를 나타낸 것이다. 측정결과 연소실 중심거리에서 멀어질수록 2차 재순환 영역의 크기가 점점 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 CFD 해석과 일치하는 결과이다. 중앙에서 40mm위치 한 곳에서의 측정 결과는 유입구의 중심에 위치하여 2차 재순환이 가장 클 것으로 예상되는 부분이다. z-축 방향의 속도 성분을 살펴보면 상단부분에서 중앙대칭면에서 멀어지는 방향으로 속도장이 형성되고 측정의 하단 부위에서는 중앙대칭면으로 향하는 방향으로 속도가 측정됨을 확인할 수 있다. 측정의 하단부에서는 유입구의 주 유동이 유입되는 방향과 일치하여 전체적으로 연소기 단면에서 나선형의 유동을 형성하면서 연소기 출구쪽으로 이동함을 알 수 있다. 그러나 측정 단면의 상단부위는 2차 재순환 영역이 생성되는 위치이며, 특히 이 영역에서의 연소실 단면에서의 선회유동 특성은 주유동의 선회 방향과는 반대 방향임을 알 수 있다. 중심거리가 60mm인 위치에서의 측정결과는 재순환 영역이 40mm에서 보다 작아짐을 알 수 있다. 연소기의 형태가 원형의 형태를 가지므로

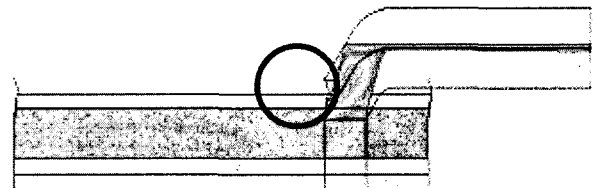
중심거리에서 떨어진 80mm에서 측정된 3차원 속도 성분인 z-방향 속도의 결과는 중앙 대칭단면 방향으로의 속도만 형성되고 있음을 알 수 있다. x-y 평면에서 측정된 속도 성분을 보면 전체적으로 연소기 상부 방향으로 향하는 속도장이 형성되고 있다. 따라서 전체적인 유동 형성은 두 유입구에서 들어온 유체가 중앙 대칭단면에서 서로 부딪혀서 두개의 큰 와류를 형성하고 있다.



(a) 중앙단면으로부터 40mm

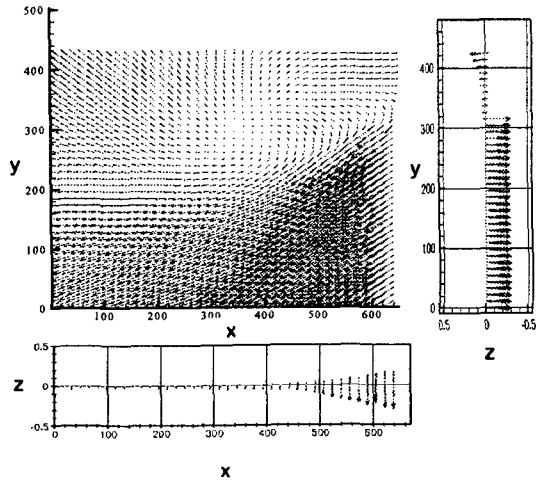


(b) 중앙단면으로부터 60mm

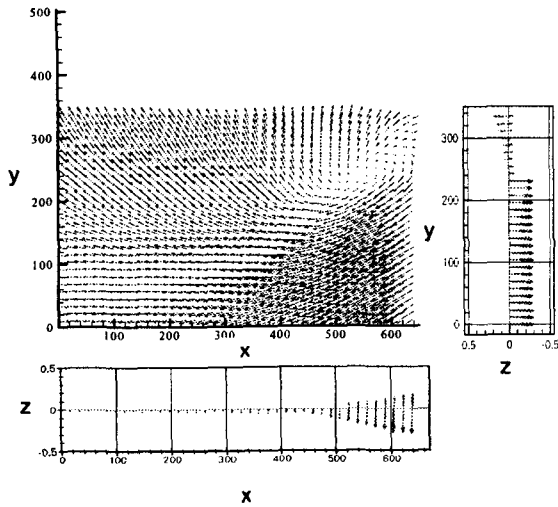


(c) 중앙단면으로부터 80mm

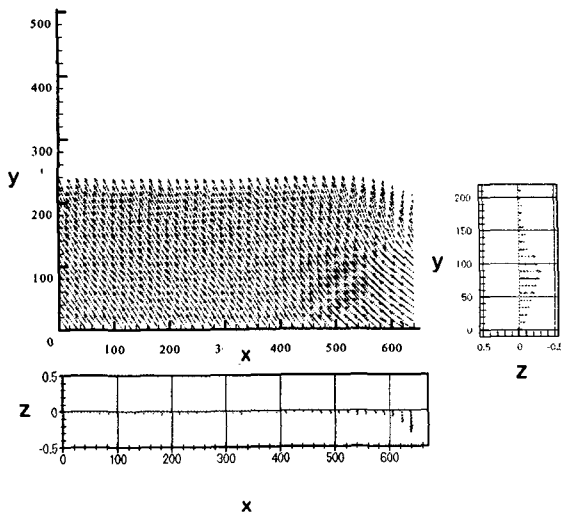
Fig. 7 축방향의 Z축 속도분포



(a) 중앙단면으로부터 40mm



(b) 중앙단면으로부터 60mm



(c) 중앙단면으로부터 80mm

Fig. 8 램젯의 2D와 3D의 속도성분

#### 4. 결론

본 연구는 램젯 연소실에서 유입각도가 60도인 경우에 제 2차 재순환 영역에서의 유동특성을 수치해석과 Translation기법을 사용한 3차원 Stereoscopic PIV 속도장 측정기법을 이용하여 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

유입각도 60도인 경우 돔에 형성되는 1차 재순환영역과 함께 유입구와 연소기 본체가 마주치는 영역에서 2차 재순환영역의 형성이 뚜렷이 측정되었다. 따라서 이러한 2차 재순환영역은 돔에서 생성되는 재순환 영역과 함께 연료의 안정된 연소와 완전 연소에 주요한 역할을 수행함도 알 수 있다. 특히 연소실 단면에서 보았을때 2차 재순환 영역에서의 선회유동 특성은 주유동의 선회 방향과는 반대방향임을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 결과는 3차원 Stereoscopic PIV 계측 방법을 사용함으로써 얻을 수 있는 성과라 판단된다.

#### 참고 문헌

- 1) Hinsch K. D, 1995, Three-dimensional particle velocimetry Measurement, Science & Technology 6742-753
- 2) Klasu D H and Heiko H(1966) "Three-dimensional velocity and vorticity measuring and image analysis techniques Th. Dracos(ed), Kluwer Academic publishers, Netherlands, 129-152
- 3) Lawson N. J., and Wu J., 1977, Three-dimensional particle image velocimetry: Error analysis of stereoscopic techniques Meas. Sci. Technol. 8 894-900
- 4) Prasad A. K., Adrian R. J., 1993, Stereoscopic particle image velocimetry applied to liquid flows., Exp. Fluids 15: pp.49-60
- 5) 도덕희, 1999, 3차원 PIV를 이용한 유동장의 3차원 계측, 대한기계학회 '99년도 유체공학부문 춘계학술강연회 강연집, 한양대학교 백남학술정보관, 5월 14일, pp.41-49.
- 6) Keane RD: Adrian RJ., 1991, Cross-correlation analysis of particle image fields for velocity

measurement. In: Experimental and Numerical Flow Visualization.(ed. Khalighia B et al.). ASME FED. Vol. 128, pp1-8, Atlanta: New York

7) 손창현, 홍종식, 문수연, 이충원, 2003, 액체 램젯트 연소기내의 이차유동 특성, 한국추진공학회 춘계학술대회 논문집, 137-140,

8) Yoon J. H., Lee S. J., 2002, Direct comparison of 2D PIV and Stereoscopic PIV measurements, Measurement Science & Technology Vol.20(5) 1631-1642