

PIV를 이용한 액체 램제트 연소기내의 3차원 유동특성 연구

양근수* · 김규남* · 조동우* · 손창현** · 문수연** · 이충원**

Investigations of Three Dimensional Flow Characteristics in the Liquid Ramjet Combustor using PIV Method

G.S. Yang, C.H. Sohn, D.W. Cho, G.N. Kim, S.Y. Moon, C.W. Lee

Key Words: ramjet(램제트), combustor(연소실), PIV(입자 영상 속도계), vortex(와류), recirculation zone(재순환 영역)

Abstract

Three dimensional flow characteristics in a liquid fuel ramjet combustor are investigated using PIV method. The combustors have two rectangular inlets that form 90 degree each other. Three guide vane is installed in each rectangular inlet to improve the flow stability. We made three cases of test combustors in which those inlet angles are 30 degree, 45degree and 60 degree. Each combustor easily changes the size of combustor's recirculation zone with the replacement of combustors dome. The experiments are performed in the water tunnel test with the same Reynolds number in the case of Mach 0.3 at inlet. PIV software is developed to measure the flow field in the combustor and the accuracy of developed PIV program is verified with rotating disk experiment and standard data. The experimental results show that the two main streams from rectangular inlet collide near the plane of symmetry and generate two large longitudinal vortex, A large and complex three-dimensional recirculating flow is measured in the recirculation zone.

1. 서 론

액체 램제트 엔진은 그 구조가 산화제인 공기를 대기로부터 직접 흡입하므로 발사체의 크기와 중량을 줄이고 비행거리를 증대시킬 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾ 특히 최근에는 정지추력을 내기 위한 보조 부스터를 배제하고 액체 램제트 엔진의 연소실을 부스터로 사용한 통합형 액체 램제트 엔진이 개발되어 고성능, 고효율의 추진체로 더욱 관심을 받고 있다. 액체 램제트 엔진의 연소기 설계 요구조건은 다양한 비행조건에 따른 유입 유동의 변화에도 불구하고 안정적인데, 효율이 높은 연소를 유지하는 것이다.

연소실내의 연소영역은 화염을 안정시키는 영역과 화염을 전파시키는 영역으로 나눌 수 있다. 연소실로 들어오는 공기의 속도는 화염전파속도보다 빠르기 때문에 화염을 안정화시키는 구조로 연소실을 설계하는 것이 필수적이며, 일반적으로 연소실내에 재순환 영역을 형성시킴으로써 화염을 안정화 시킨다. 따라서 연소기의 성능은 연소실의 형상, 공기의 유입각도, 재순환 영역의 크기 등에 크게 영향을 받을 것으로 판단된다. 본 연구는 최적의 액체 램제트 엔진을 설계하기 위하여 연소실 형상/위치/유입형상 변화 실험을 자체 개발한 PIV 프로그램을 이용하여 측정하여 액체 램제트 엔진 연소실 내부의 3차원 유동 특성을 파악하고자 한다.

* 경북대학교 기계공학과 대학원

** 경북대학교 기계공학부

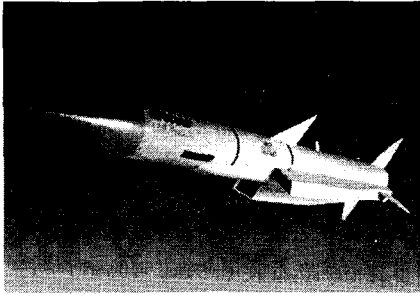


Fig.1 Meteor missile (Air-to-air missile)

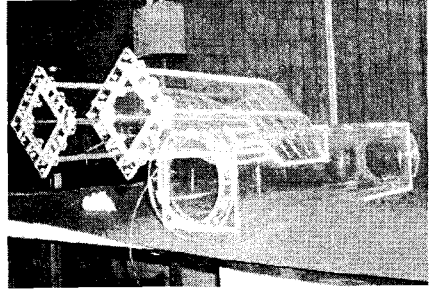


Fig. 2 Test Section

2. 본 론

2.1 실험

Fig. 1은 액체 램제트 엔진을 장착한 실전에 배치되어 있는 공대공 미사일인 Meteor 미사일로 동체 하단부에 사각덕트 형태의 두 개의 흡입구의 각도가 90도를 이루고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 Meteor 미사일의 형상을 참조하여 Fig. 2와 같은 연소실 실험형상을 제작하였다. 공기 유입구의 마하수는 0.3일때로 가정하고 레이놀즈수를 같게 적용하여 작동유체를 물로 사용하였으며 연소기의 직경은 180mm로 제작하였다. 그리고 공기 유입구로부터 연소실로 들어오는 유체의 유동안정화를 꾀하기 위해 공기유입구가 각을 이루는 곳에 두께 2mm인 안내깃을 3개 설치하였다.

2.1.1 연소실 실험형상

최적의 액체 램제트 엔진 형상을 구하기 위해서는 다양한 형상의 연소실 실험형상에 대한 실험이 필요하므로 이와 같은 요구조건에 맞게 연소실 실험형상을 제작하였다. 연소실 실험형상의 공기유입구 각도는 30도, 45도, 60도인 세 가지를 제작하였으며, 각 연소실 실험형상은 재순환 영역의 크기를 다섯 가지로 변화시키면서 실험을 할 수 있도록 제작하여 액체 램제트 엔진 연소실 내의 유동특성 중 중요한 부분인 재순환영역에서 재순환영역의 크기에 따른 유동특성을 파악하고자 하였다.

2.1.2 PIV 프로그램 개발 및 검증

액체 램제트 엔진 연소실 내의 유동특성을 연구하기 위하여 개발한 PIV 프로그램은 통계학적

인 방법인 상관 계수를 구하여 속도벡터를 추적하는 상호상관 방법을 사용하여 개발하였다. 개발한 PIV 프로그램의 정확성을 검증하기 위하여 두 가지 방법을 사용하였다. 첫 번째로 원판 위에 입자를 심어놓고 일정 회전속도로 원판을 회전시켜서 그 속도를 PIV 프로그램으로 측정하여 이론속도와 비교하여 보았다. 그 결과 이론 속도에 대한 오차범위는 0.7% 이내였다. 개발된 PIV 프로그램의 두 번째 검증방법으로 일본유동가시화협회에서 제공하는 standard data와 image data를 사용하였다. standard data는 정량적인 속도벡터를 가진 문서 파일(text file)이며, image data는 CCD로 찍은 영상과 같은 것이다. standard data에 대한 개발된 PIV 프로그램에 의해 측정된 값의 오차 범위는 1.8% 이하로 회전원판에 비해 standard data에 의한 검증방법에서 오차범위가 크게 나타났다. 이것은 standard data의 경우 검사영역(interrogation area)를 16x16으로 최소로 하였기 때문이며, 이 밖에 오차를 일으키는 요인은 입자의 크기 최대입자변위 등 다양하다. 두 검증방법을 통하여 개발된 PIV 프로그램의 정확성을 확보할 수 있었다.

2.1.3 실험 장치

실험장치의 전체적인 개략도를 Fig. 3에 나타나 있다. 유체는 펌프에 의해 개방탱크에서 밀폐탱크로 유입되며, 밀폐탱크와 펌프 사이에는 유량 조절밸브를 두어 일차적으로 유량을 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 밀폐탱크를 설치하여 펌프에서 발생할 수 있는 맥동현상을 줄이도록 하였다. 유체는 밀폐탱크에서 연소실 실험형상을 거쳐 다시 개방탱크로 유입되는 순환형태를 가지고 있다. 밀폐탱크와 연소실 실험형상 사이에는

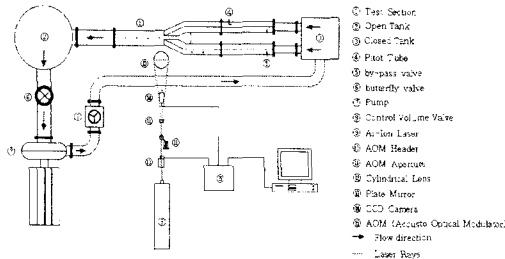


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

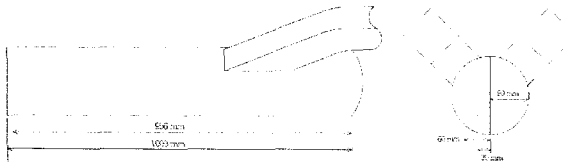


Fig. 4 Area range of a measurement

유체가 좀더 균일유동을 할 수 있도록 700mm 길이의 덕트를 설치하였다. 유입구로 들어가는 유체의 유량(속도)을 조절하기 위하여 ⑤번 지점에 미세유량을 조절할 수 있는 by-pass 밸브를 설치하였고, ④번 지점에 유량측정을 위한 마노미터를 설치하였다. 압력측정을 위해서 유입구 두 곳, 연소실의 네 곳에 압력을 측정할 수 있도록 하였다. 속도계측을 위한 PIV 시스템은 다음과 같다. 광원으로는 알곤-이온 레이저(Ar-Ion laser)의 광원을 사용하였으며, AOM 헤드에 의해 광원은 펄스광과 직진광으로 분리되고 어퍼처(Aperture)에 의해 펄스광만을 내보내게 된다. 원통렌즈에 의해 만들어진 평면광은 평면거울에 의해 측정하고자 하는 부분을 비추게 되고, 측정범위를 지나가는 입자는 광원에 의해 발광하는 것을 CCD 카메라로 영상화하게 된다. CCD 카메라로 의해 찍힌 영상은 프레임 그라버(frame grabber)에 의해 아날로그에서 디지털 영상으로 변환되게 되며, 이렇게 만들어진 디지털 영상을 PIV 프로그램을 이용하여 속도벡터를 추출하게 되는 것이다.

2.2 결과 및 고찰

연소실 내의 축방향 유동특성을 파악하기 위하여 Fig. 4에 측정범위와 측정단면의 위치를 나타내었다. 측정범위는 돔의 끝단에서 956mm 지점

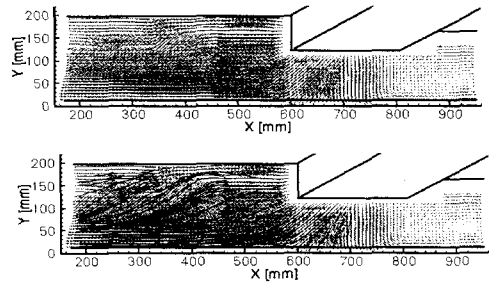


Fig.5 Velocity vector at plane of symmetry

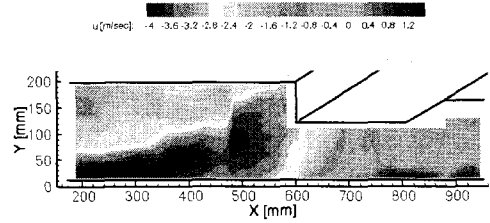


Fig. 6 Contour of u-vector at plane of symmetry

까지 측정하였으며, 측정단면은 중앙단면과 중앙에서 30mm, 60mm 떨어진 세 단면에서 측정하였다. 중앙단면에서의 측정결과인 속도벡터와 입자의 궤적을 Fig. 5에 나타내었다. 속도벡터의 방향을 보면 유입구 각도에 따라 유입구에서 연소실로 사선으로 흘러가다가 연소실의 바닥을 치고 연소실의 출구쪽으로 나가는 벡터와 연소실의 출구쪽 상단부분은 사선으로 좌하를 가리키고 있는 벡터가 보인다. 이러한 이차원적인 중앙단면에서의 유동현상을 보면 유입구에서 나온 유체는 유입구의 각도를 따라 사선을 그리며 출구쪽으로 나가는 것처럼 보이나 이것은 이차원적인 유동패턴이며, 실제로 연소실 내에서의 유동은 삼차원적으로 고찰할 필요가 있다. Fig. 6은 유동특성을 좀더 명확하게 파악하기 위해 중앙단면에서의 속도성분 중 u-속도성분만을 나타낸 것이다. 유입구 각을 따라 유입구에서 연소실 사선으로 흘러내려 연소실의 바닥을 따라 출구쪽으로 향하는 유체의 속도가 가장 빠른 것으로 나타나 있고 상대적으로 재순환영역에서의 속도는 아주 느린 것으로 나타나 있다. 액체 램제트 엔진 내에서의 유동특성 파악 중에서 재순환영역에서의 유동특성의 파악은 재순환의 정도에 따라 화염안정화와 지속적인 연소를 할 수 있기 때문에 중요하다. 따라서 재순환영역에서의 유동패턴을 확대하여 Fig.7에

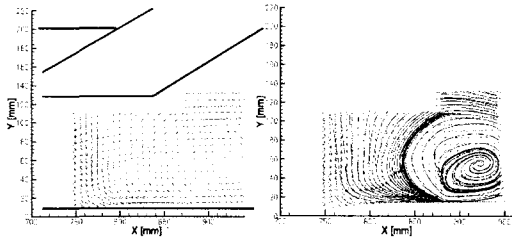


Fig. 7 Velocity vector of recirculation zone at plane of symmetry

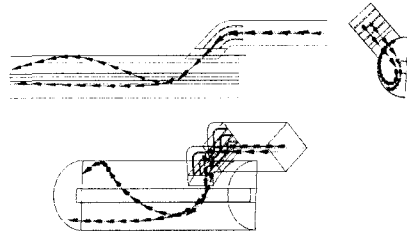


Fig. 9 Schematic trace of particle

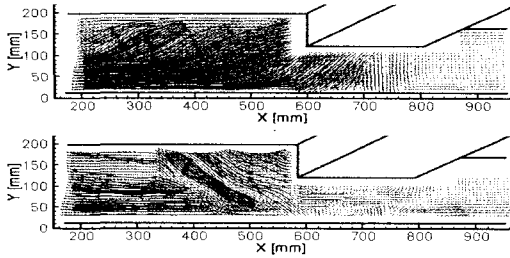


Fig. 8 Trace of particle at 30 and 60mm from plane of symmetry

중양단면에서 측정된 재순환영역에서의 속도벡터와 입자의 궤적을 도시하였다. 입자의 궤적을 보면 하나의 큰 선회류를 형성하고 있음을 알 수 있다. 앞에서의 연구결과는 중양단면에서의 이차원적인 유동특성만을 언급하였다. 하지만 실제 연소실 내에서의 유동은 삼차원적인 유동패턴을 가지며, 이차원적인 결과만으로는 유동특성을 명확히 설명하기 어렵다. 따라서 중양단면에서 30mm, 60mm 떨어진 단면에서의 유동특성을 동시에 파악하여 삼차원적인 유동특성을 파악하였다. Fig. 8의 상단 그림은 중양단면에서 30mm 떨어진 곳에서 측정된 결과이고, 하단 그림은 중양단면에서 60mm 떨어진 것을 볼 수 있다. 이러한 속도벡터를 나타내어진 곳에서 측정된 속도벡터를 나타내고 있다. 속도벡터의 방향을 보면 같은 위치에서 30mm, 60mm 떨어진 곳에서의 속도방향이 서로 반대는 것은 Fig. 9에 개략적으로 도시되어 있는 입자추적 결과와 같이 중양단면을 기점으로 좌우 대칭적으로 큰 선회류를 형성하며 연소실 출구쪽으로 유동현상이 일어남을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 PIV계측을 이용하여 서로 90도를 이루는 2개의 사각 유입구를 가진 액체 램제트 연소기내의 유속을 실시간적으로 동시 다점계측하고, 그에 따른 유동특성을 파악하였다. 유동장을 측정하기 위한 PIV 프로그램은 자체 개발하였으며, 개발된 PIV 프로그램은 회전 원판 실험과 일본유동가시화 협회에서 제공하는 Standard Data을 이용하여 그 정확성을 검증하였다. 실험 조건은 램제트 엔진의 공기 유입구에서의 유속이 마하 0.3인 경우에 대하여 레이놀즈수를 같게 하여 수조에서 실험을 하였다. PIV 계측을 통한 유동특성은 두 사각 유입구로부터 들어온 유동이 중양 대칭 단면에서 서로 충돌하면서 좌우 대칭의 큰 와류가 형성하여 연소실 내부 재순환영역을 형성함을 알 수 있었다. 연소실내에서의 주유동을 따른 유동특성을 파악한 결과, 연소실의 하부에서는 출구쪽으로 직선적인 빠른 속도성분을 가진 유동이 나타나며, 연소실 축방향으로 2개의 선회유동을 형성하면서 출구로 흘러감을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Eriksson L. E. , Johansson U. and Borg R. "CFD Analysis and Testing on a Twin Inlet Ramjet", AIAA/SAE/ASME/ASEE 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1993.
- (2) Ristori A., Heid G., Cochet A. and Lavergne G. "Experimental and numerical study of turbulent flow inside inside are search SD Rcombustor" AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999.

- (3) Bjorn Sjoblom, "Full scale liquid fuel Ramjet combustor tests"
- (4) Markus Raffel, Christian E. Willert and Jurgen Kompenhans, "Particle Image Velocimetry" 1997.
- (5) Adrian R. J., "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annual Reviews Fluid Mech., Vol.23, 1991, pp.261-304.
- (6) Adrian R. J., "An image-shifting technique to resolve directional ambiguity in double-pulsed velocimetry", Appl. Opt. Vol. 25, 1988, pp.3855-3858.
- (7) Adrian R. J., "Statistical properties of particle image velocimetry measurements in turbulent flow", Laser Anemometry in Fluid Mechanics, 1988, pp. 115-129.
- (8) Prasad A. K., Adrian R. J., Landreth C. C and Offutt P.W., "Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation", Exp. Fluids, Vol.13, 1992, pp.105-116.
- (9) Westerweel J., "Digital particle image velocimetry theory and application", PhD Thesis Delft University of Technology, 1993.
- (10) Adrian R. J., "Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry", Meas. Sci Technol 1997, pp.1393-1398.