

PIV측정을 통한 램제트 연소기의 유입각과 돔 크기에 따른 순회 유동 특성

김규남* · 손창현** · 이충원**

Recirculation Characteristics by the Inlet Angle and Dome Size of a Liquid Ramjet Combustor using PIV Method

Gyu-Nam Kim* · Chang-Hyun Sohn** · Choong-Won Lee**

ABSTRACT

Flow characteristics in a liquid fuel ramjet combustor were investigated using the PIV method. The combustor has two rectangular inlets that form a 90° angle each other. Three cases of test combustors are made in which those inlet angles are 30° , 45° and 60° . The experiments were performed in a water tunnel test with the same Reynolds number as Mach 0.3 at the inlet. PIV software was developed to measure the characteristics of the flow field in the combustor. A large and complex recirculating flow was measured in the dome area with 4 different dome size. Experimental results shows that 1/3 dome size of combustor diameter is suitable and smaller inlet angle provide large recirculation flow at the dome of combustor as a frame holder in this experimental ranges but need to consider secondary recirculation flow in a junction region to optimize the configuration of ramjet combustor.

초 록

PIV 방법을 이용하여 액체 램제트 연소실 내부의 유동 특성을 측정하였다. 연소기는 2개의 사각 단면의 유입구가 90도의 각도를 가지고 있으며, 유입각이 30° , 45° , 60° 의 3가지 경우를 연소실 실험 모형으로 제작하였다. 실험은 유입구에서의 속도가 마하 0.3의 경우로 레이놀즈 상수를 적용하여 수조에서 실험을 수행하였다. PIV 프로그램은 자체 개발하였다. 4가지의 돔 크기에 대하여 돔에서 생성되는 복잡한 1차 재순환 유동을 측정하였다. 실험한 범위에서 돔의 크기는 연소실 직경의 1/3정도가 적당한 것으로 판단되며 유입각은 작을수록 재순환 영역이 커짐을 알 수 있으나 최적의 연소기 형상은 2차 재순환 영역과 함께 고려되어야 한다.

Key Words: Ramjet(램제트), PIV, Combustor(연소기), Dome size(돔 크기), Inlet angle(유입각)

† 2007년 1월 17일 접수 ~ 2007년 2월 13일 심사완료

* 학생회원 경북대학교 기계공학부 대학원

** 종신회원, 경북대학교 기계공학부

연락처, E-mail: chsohn@knu.ac.kr

1. 서 론

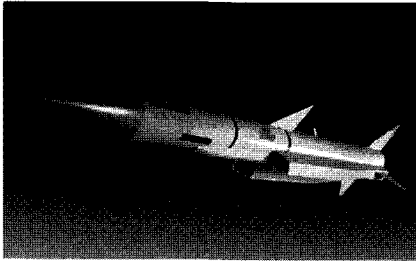


Fig.1 Meteor missile (Air-to-air missile)

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 안정적이며, 효율이 높은 연소를 유지하는 것이다. 연소실내의 연소영역은 화염을 안정시키는 영역과 화염을 전파시키는 영역으로 나눌 수 있다. 연소실로 들어오는 공기의 속도는 화염전파속도 보다 빠르기 때문에 화염을 안정화시키는 구조로 연소실을 설계하는 것이 필수적이며, 일반적으로 연소실내에 재순환 영역을 형성시킴으로써 화염을 안정화시킨다. 따라서 연소기의 성능은 연소실의 형상, 공기의 유입각도, 재순환 영역의 크기 등에 크게 영향을 받을 것으로 판단된다. 본 연구는 최적의 액체 램제트 엔진을 설계하기 위하여 연소실내의 공기 흡입 유입각도와 재순환 영역의 크기를 변화하여 그 유속을 계측하여 연소실 화염 안정성에 좋은 형상을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 실험장치

Figure 1은 액체 램제트 엔진을 장착하여 실전에 배치되어 있는 공대공 미사일인 Meteor 미사일을 보여주고 있으며, 동체 하단부에 사각덕트 형태의 두 개의 유입구가 90° 각을 이루고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 Meteor 미사일의 형상을 참조하여 Fig. 2와 같은 연소실 실험모형을 제작하였다.[3] 고도 10,000 m의 조건에서 비행속도가 마하 2.0의 조건으로 비행할 경우 연소실로 유입되는 공기 유입구의 마하수는 0.3으로 설정하고, 압력 회복률은 0.7로[4]로 가정하였다.

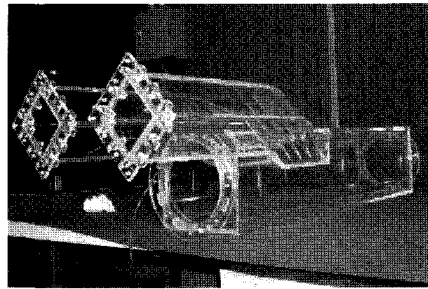


Fig. 2 Test Section

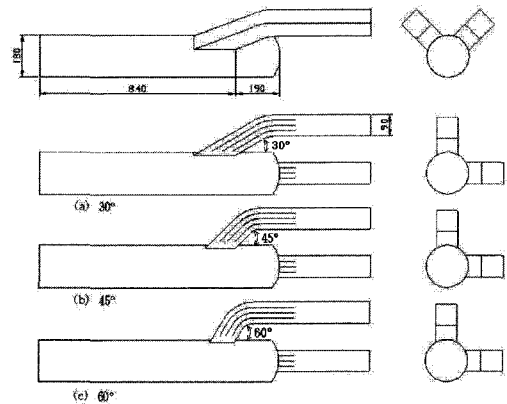


Fig. 3 Test section with different inlet angles

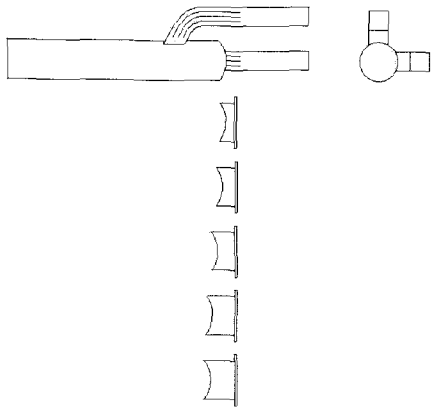


Fig. 4 Test section with changeable 5 different dome size

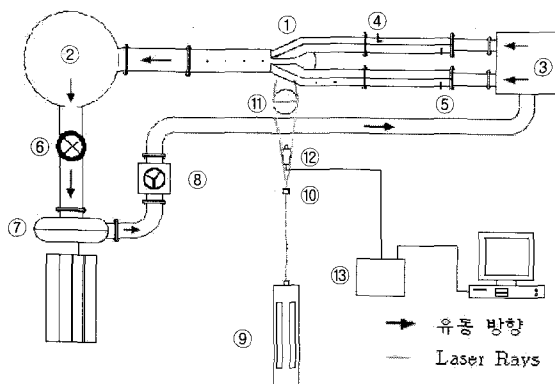


Fig. 5 An apparatus for experiment

이 작동 조건은 참고 문헌 [5]의 램제트 엔진의 대표적인 작동 조건에서 비행 마하수가 2.0 일 때의 램제트 연소기 입구 조건과 유사하다. 연소실 유입 공기의 마하 수가 0.3의 조건은 아음속 영역이므로 비압축성 유체로 가정할 수 있으므로 작동 유체를 물로 실험할 수 있으며, 레이놀즈 상사를 적용하면 유입구의 유속은 3.7 m/sec로 실험하였다. 레이놀즈 상사를 통해 주어진 조건에서의 레이놀즈수는 약 3.7×10^5 이며, 이 조건에서의 실제 램제트 엔진의 직경은 약 90 mm이고 실험에 사용한 연소기의 직경은 180 mm 이다. 공기 유입구로부터 연소실로 들어오는 유체의 유동 안정화를 피하기 위해 공기 유입구가 각을 이루는 곳에 두께 2 mm인 안내

깃을 세 개 설치하였다. 최적의 액체 램제트 엔진 형상을 구하기 위해서는 다양한 형상의 연소실 실험모형에 대한 실험이 필요하므로 이와 같은 요구조건에 맞게 연소실 실험모형을 제작하였다. 연소실 실험모형의 공기 유입구 각도는 Fig. 3에서와 같이 30°, 45°, 60°의 세 가지를 제작하였다. 각각의 유입구 각도에 대한 연소실 돔의 크기를 바꾸기 위해서 돔의 크기를 바꾸어 끼울 수 있는 형태인 Fig. 4로 설계 제작하여, 돔의 크기를 다섯 가지로 변화시키면서 실험하여 액체 램제트 엔진 연소실 내의 유동특성 중 중요한 부분인 재순환영역의 크기에 따른 유동특성을 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 연소기의 직경을 기준으로 돔의 길이 비가 2/9, 3/9, 4/9, 5/9의 4가지 경우를 실험하였다. 측정 범위는 연소실의 축 중앙 대칭 단면을 기준으로 유입구 중간부분에서 돔 끝단까지 측정하였다.

실험장치의 전체적인 개략도는 Fig. 5에 나타나 있다. 유체는 펌프 ⑦에 의해 개방탱크 ②에서 밀폐탱크 ③으로 유입되며, 밀폐탱크와 펌프 사이에는 유량조절밸브를 두어 일차적으로 유량을 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 밀폐탱크 ③를 설치하여 펌프에서 발생할 수 있는 맥동현상을 줄이도록 하였다. 밀폐탱크와 연소기 실험모형 사이에는 유체가 좀 더 균일유동을 할 수 있도록 700 mm 길이의 덕트를 설치하였다. 유입구로 들어가는 유체의 유량(속도)을 조절하기 위하여 ⑤번 지점에 미세유량을 조절할 수 있는 by-pass 밸브를 설치하였고, ④번 지점에 유속측정을 위한 마노미터를 설치하였다. 속도계측을 위한 PIV 시스템의 광원으로는 200 mJ의 Dual Head Nd-Yag laser의 광원을 사용하였다.

액체 램제트 엔진 연소실 내의 유동특성을 연구하기 위하여 개발한 PIV 프로그램은 통계학적으로 속도벡터를 추적하는 상호 상관법 (Cross-correlation Method)[6-9]를 사용하였고, 개발한 PIV 프로그램의 정확성을 검증하기 위하여 두 가지 방법을 사용하였다.

첫 번째 방법은 원판 위에 입자를 심어놓고

일정 회전속도로 원판을 회전시켜서 그 속도를 PIV로 측정하여 이론속도와 비교하여 보았다. Fig. 6은 회전원판을 PIV로 측정한 속도 벡터를 나타내고 있다. 이론적인 속도 값과 비교하였을 때의 상대 오차는 0.7% 이하였다.

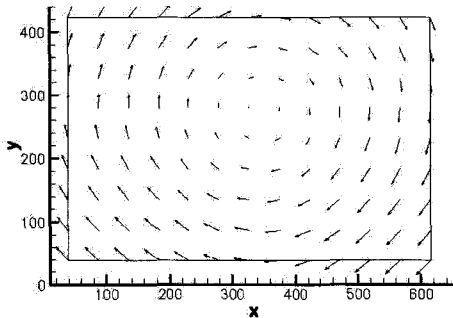


Fig. 6 Velocity vectors for rotating disk for validation of PIV software

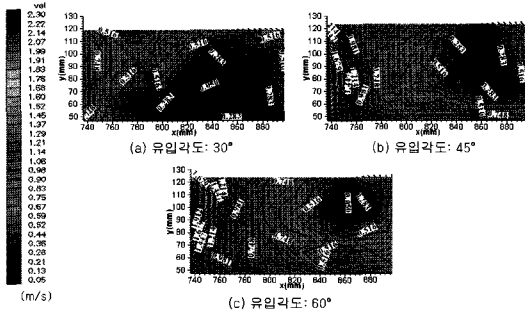


Fig. 7 Velocity vectors and contours with different inlet angles for a 5/9 (100mm) dome size

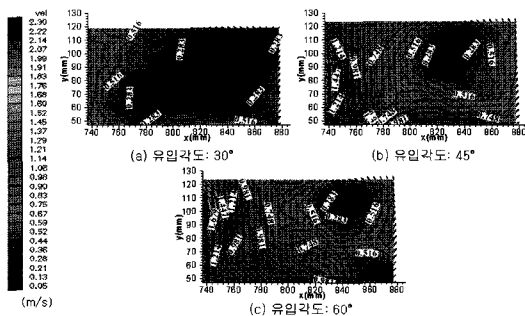


Fig. 8 Velocity vectors and contours with different inlet angles for a 4/9 (80mm) dome size

개발된 PIV 프로그램의 두 번째 검증방법으로 일본 유동가시화협회에서 제공하는 표준 영상 자료를 사용하여 비교하였다. 표준 자료에 대한 개발된 PIV 프로그램에 의해 측정된 값의 오차는 1.8% 이내의 정확도를 보여 주었다.[10]

2.2 결과 및 고찰

PIV로 유속을 측정한 측정범위는 중앙 단면의 돔의 끝단에서 유입구 중간 지점까지 측정하였고, 30 fps로 200장의 영상을 평균 한 결과이므로 순간 속도의 특성파악은 측정 데이터의 동영상을 통해 일부 파악할 수 있었으나 제한적이라 할 수 있다. Fig. 7은 유입각도가 30°, 45°, 60°이고, 돔 크기가 5/9 (100 mm)일 때의 평균 속도 벡터와 등속도 분포를 보여주고 있다. 유입각도가 클수록 저속선회영역의 크기가 점점 작아짐을 알 수 있고, 와류의 중심부분이 재순환 영역의 우측 상단으로 점차적으로 올라감을 보여 준다. 이는 유입각도가 증가할수록 유입구에서 들어오는 유동이 재순환영역으로 영향을 많이 끼치기 때문이라 판단된다. 연소의 측면에서 본다면 유입각이 30°일 때의 경우가 나머지 경우보다 저속 선회 영역이 더 크기 때문에 화염의 안정화를 유지시킬 수 있는 화염 유지기 (Flame holder)의 역할을 할 수 있다고 판단된다. 그러나 돔의 크기가 5/9의 경우에 순간 속도 벡터에서 2개의 선회 유동이 생성되는 경우가 관찰되었으며, 이는 돔의 크기가 필요 이상으로 크기 때문이라고 판단된다.

Figure 8은 유입각도가 30°, 45°, 60°이고, 돔 크기가 4/9 (80 mm)일 때의 속도 벡터와 등속도 분포를 나타낸다. 등속도 분포를 나타내는 스케일은 동일한 스케일을 사용하여 속도 분포를 비교하였다. Fig. 8에서 유입각도가 증가할수록 저속 선회 영역의 크기가 점점 협소해짐을 알 수 있고, 와류의 중심 부분도 재순환 영역의 우측 상단으로 올라감을 알 수 있다. 이는 Fig. 7의 경우와 유사한 성향을 보여주는 것으로 유입각이 증가할수록 재순환영역에서의 유동이 유입구에서 들어오는 유동에 의해 영향을 많이 받

기 때문이며, 30도의 유입각에서 순간 속도 벡터에서는 두개의 재순환 영역이 생성되었다가 사라짐이 관찰되었다.

Figure 9는 유입각도가 30°, 45°, 60°이고, 돔 크기가 3/9 (60 mm)일 때의 속도 벡터와 등속도 분포를 보여주고 있다. 유입각도가 증가할수록 저속 선회 영역의 크기가 작아짐을 알 수 있었다. 유입각도가 30°일 때의 경우에는 Fig. 7과 Fig. 8의 경우와는 달리 순간 속도 벡터에서 발견된 2개의 선회 유동이 생성되지 않고 하나의 선회 유동만 형성되었으며, 유입각도 30°의 경우 저속 선회영역이 연소기 돔 영역을 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

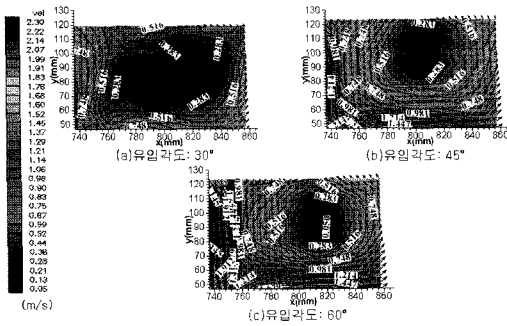


Fig. 9 Velocity vectors and contours with different inlet angles for a 3/9 (60mm) dome size

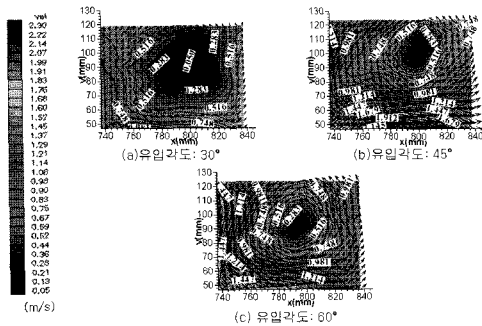


Fig. 10 Velocity vectors and contours with different inlet angles for a 2/9 (40mm) dome size

Figure 10은 유입각도가 30°, 45°, 60°이고 돔 크기가 2/9 (40 mm)일 때의 속도 벡터와 등속도 분포를 보여주고 있다. 앞의 경우와 마찬가지로 유입각도가 증가할수록 저속 선회 영역이 현저히 작아짐을 보여주고 있다. 선행 연구로 수행한 수치해석 결과[11]는 유입각이 커질수록 입구에서의 총 압력에 비해 출구에서의 압력이 낮아져 압력 손실이 증가함을 보여주었다. 따라서 압력 손실 면에서는 유입각이 작을수록 램제트 연소실 형상으로 유리하다고 할 수 있다. 그러나 돔에서 생성되는 1차 재순환 영역 외에도 연소실과 유입구가 마주치는 영역에서 발생할 수 있는 2차 재순환 영역은 유입각이 작아지면 생기기 않을 수 있기 때문에 최적의 형상은 1차와 2차 재순환 영역 모두를 함께 고려하여야 하며, 유입각과 돔의 크기와 2차 재순환 영역과의 상호 관계에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

3. 결 론

액체 램제트 엔진의 연소기 내부 유동을 유입각도가 각각 30°, 45°, 60°이며, 돔의 크기가 연소기 직경 비로 2/9, 3/9, 4/9, 5/9로 변화하여 PIV 방법을 사용하여 유속을 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유입각이 증가함에 따라 재순환 영역의 유속이 증가하고, 화염안정화에 필요한 저속 선회영역은 후방 상부의 일부 영역만을 차지한다.
- (2) 유입각이 30°일때 저속 선회영역은 돔 전체를 차지하지만 과도하게 돔이 큰 경우 2개의 선회유동이 관찰되었다.
- (3) 수행된 실험 조건에서는 낮은 압력 손실과 안정된 화염유지를 위해서는 유입각이 큰 경우보다 낮은 유입각이 유리하며, 돔 크기가 연소기 직경의 1/3 정도가 적당한 형상으로 판단되나, 연소실의 최적형상은 유입각에 따른 2차 재순환 영역과의 상호 관련과 함께 고려하여야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 일부 교육부 BK21 사업의 지원에 의하여 수행되었고, 국방과학연구소 “흡인공기와의 혼합을 고려한 액체연료 연소연구(액체램젯)” 과제로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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 a research SDR combustor", AIAA/ASME/SAE/ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1999
3. 오대환, 임상규, 손창현, 이충원, "액체 램젯트 엔진의 3차원 분무 및 연소 반응 해석", 한국추진공학회지, 제3권 제2호, pp.18-24
4. 久保田浪之介, "ラムジェット工學" 1996
5. 田丸 卓, "次世代航空エンジン燃焼器の課題", 燃焼研究, 第88號, 1991
6. Raffel, M, Christian, E. W and Kompenhans, J, "Particle Image Velocimetry", Springer-Verlag, Berlin ,1998.
7. Adrian, R. J., "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", Annual Reviews Fluid Mech., Vol.23, 1991, pp.261-304
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 intrrogation" , Exp. Fluids , Vol.13, 1992, pp.105-116
9. Adrian, R. J., "Dynamic rages of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry", Meas. SciTechnol 1997, pp 1393-1398
10. Sohn, C.H., Yang, G.S., Kim, G. N., Moon, S. Y., Lee, C. W., "Investigations of Three-dimensional Flow Characteristics in a Liquid Ramjet Combustor Using the PIV Method, Journal of Visualization", 2002, Vol. 5, No. 1, pp.59-65
11. 김규남, "액체 램젯트 엔진 연소실 재순환 영역에서의 유동 특성", 경북대학교 공학석사 학위 논문, 2001