

질소분사 음향시험을 통한 충돌형(FOOF) 분사기의 안정성 평가에 관한 연구

유덕근* · 이광진** · 서성현** · 한영민** · 최환석** · 설우석***

Study on the Stability Test of Impinging(FOOF) Injector on GN₂ Purge Cold Flow Test

Doc koon Yoo* · Kwang jin Lee** · Seong hyeon Seo** · Young min Han** · Hwan seok Choi** · Woo seok Seol***

ABSTRACT

In the experimental study of N₂ purge cold flow test of impinging(FOOF) injector for determining of instability region, the whistling sound which has a specific frequency is generated. The frequency of whistling is proportional to the gas flow velocity in part of the oxidizer orifice and due to the coupling of the vibrating gas column and the natural frequency of pipe-orifice shape, the discontinuous jumping phenomena arises. The whistling phenomena have no effect on the combustion instability. Compared the damping factor of 1T1L mode with the hot fire test, the instability region of N₂ purge cold flow test is very much like that. It means that flow instability by impinging or mixing of jet is the main reason of combustion instability of impinging injector(FOOF) in the hot firing test.

초 록

충돌형(FOOF) 분사기의 불안정 영역을 결정하기 위해 질소분사 음향시험을 수행하였다. 파이프와 오리피스 형상을 가지는 분사기 내 산화제 부분에서 유동속도에 비례하고, 비정상적으로 jumping하는 특정 주파수를 가지는 whistling이 발생한다. 동일한 조건의 연소시험과 비교해 본 결과 whistling 현상은 연소현상에는 영향을 주지 않는다. 질소분사 음향시험과 연소시험에서 얻은 연소실 내 1T1L mode의 damping factor를 비교하여 불안정 영역을 구해보면, 비슷한 조건에서 불안정 영역을 가진다. 이것은 유동의 충돌, 혼합에 의한 유동불안정 현상이 연소시험에서 연소불안정을 발생시키는 주요한 인자임을 의미한다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Impinging Injector(충돌형 분사기), Stability Test(안정성 평가), Flow Instability(유동불안정), Acoustic Test(음향시험), Whistling(휘파람)

* 과학기술연합대학원대학교(UST) 발사체시스템전공

** 한국항공우주연구원 연소기그룹

*** 한국항공우주연구원 엔진그룹

연락처, E-mail: wsseol@kari.re.kr

1. 서 론

액체로켓 엔진 연소실 내에서 발생하는 연소

불안정 현상은 연소기 개발에 있어서 가장 큰 난제로 여겨져 현재까지도 지속적으로 연구되고 있다. 실제 크기의 엔진의 연소시험을 수행하기 전에 경제적, 시간적으로 효과적인 개발진행을 위해 여러 가지 모델 연소시험을 통해 실물형 연소기에서 발생할 수 있는 연소불안정 현상을 예측하거나 비교할 수 있다[1]. 상압기상 연소시험의 경우, 단일 혹은 다수의 분사기의 모델 연소시험을 통해 분사기 개발 초기단계에서의 여러 후보 분사기들의 상대적인 연소안정성을 평가하는 시험기법이다[2][3][4].

Pikalov V. P는 분사기의 안정성 평가를 위한 방법으로 상압기상 연소시험뿐만 아니라 연소과정없이 공기 혹은 질소 분사에 의한 음향가진 분석을 통해 연소실내의 불안정성을 평가하여 상압기상 연소시험과의 유사한 불안정 영역을 확인하였다[5].

본 논문에서는 액체로켓 엔진의 충돌형(FOOF) 분사기의 질소분사 음향시험을 수행하였다. 가스상태의 질소 유동속도에 따른 특정 주파수를 가지는 whistling 현상을 분석하고 연소현상에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 유동조건을 동일 시한 질소분사 음향시험에서의 불안정 경계와 상압기상 연소시험 결과를 비교하여 유동의 충돌이 연소불안정의 주요한 원인임을 밝혀내는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 구성

전체 실험장치 구성은 Fig. 1과 같다. 산화제와 연료에 공급되는 질소는 질소탱크에서 1차

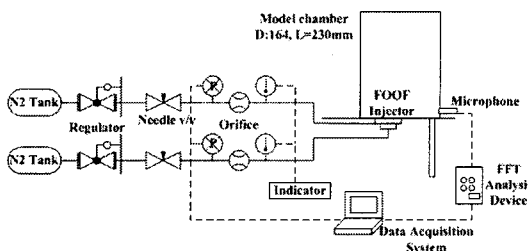


Fig. 1 Experimental set up for N₂ purge test

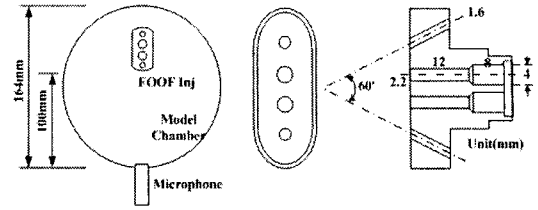


Fig. 2 Impinging(FOOF) injector installed in chamber

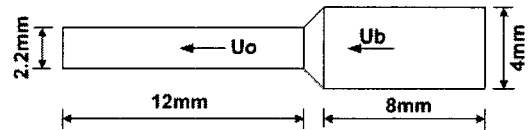


Fig. 3 Oxygen part of FOOF Injector

조절압력으로 공급되며, 오리피스 전단 압력을 needle valve로 조절하여 분사기로 공급되는 유량을 제어한다. 오리피스의 교정은 wet gas meter를 사용하였다. 오리피스 전단압력은 데이터 획득 장치에 저장되어 실험 조건을 정확히 파악할 수 있도록 하였다.

모델연소실은 open-end type으로 직경 164 mm, 길이 230 mm의 형상을 가진다. 분사기는 연소실내의 불안정 모드를 쉽게 야기시키기 위해 Fig. 2과 같이 한쪽으로 치우친 상태로 장착하였다.

분사기 반대편에 마이크로폰(microphone)을 장착하여 연소실내에서 발생하는 불안정 정도를 측정하였다. 마이크로폰에 의해 측정되는 연소실내의 음향특성은 FFT 분석장치(PULSE 3560D)를 거쳐 컴퓨터에 저장된다.

본 실험에서는 산화제와 연료의 분사 직경이 2.2, 1.6 mm이고, 충돌각이 30°인 충돌형(FOOF) 분사기를 사용하였다. 산화제 부분은 Fig. 3에서와 같이 적정 L/D비를 맞추기 위해 단면적 변화를 주는 오리피스 형태로 되어있다. 오리피스 전, 후단의 유동속도를 각각 U_b , U_o 라고 정의한다.

3. 실험방법 및 결과

3.1 Whistling Phenomena of FOOF Injector

산화제와 연료에 질소공급을 따로 하여 분사기에서 발생하는 whistling 현상을 살펴보았다. 산화제는 0.1~0.45 g/s, 연료는 0.06~0.24 g/s의 범위에서 질소를 각각 0.01 g/s씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 특정 주파수를 가지는 소음을 whistling이라고 정의한다.

연료의 경우는 whistling 현상이 발생하지 않았다. 하지만 Fig. 4에서와 같이 산화제의 경우 0.23 g/s 이상의 유동 조건에서는 특정 주파수를 가지는 whistling 현상이 발생한다. 이 조건은 FOFB 분사기의 산화제 오리피스에서 whistling 이 발생할 수 있는 최소유량으로 Reynolds 수는 1840이다.

Anderson[6]은 이러한 현상을 Reibungstone (friction tone)과 Pfeifentone(pipe or whistle tone)으로 구별하여 설명한다.

Friction tone은 가스유동 속도에 비례하고, Pipe tone은 파이프내의 가스의 longitudinal vibration으로 파이프 형상의 공진 주파수로의 비정상적인 jumping 현상을 보여준다. Figure 5

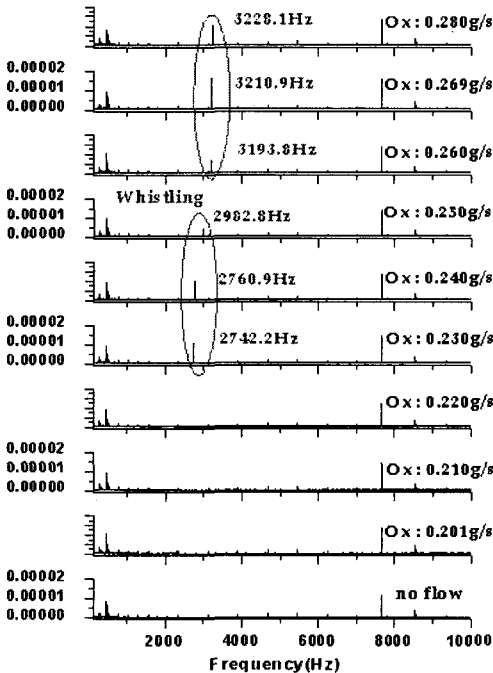


Fig. 4 Whistling frequency of FOFB Injector on Ox mass flow rate without chamber

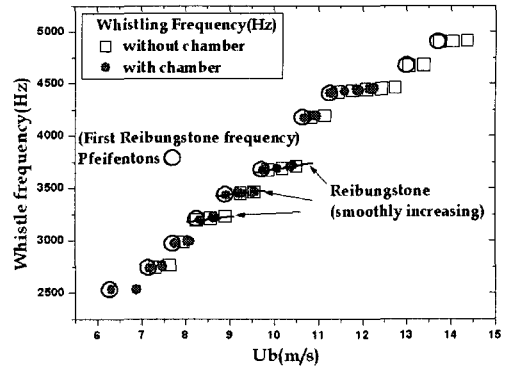


Fig. 5 The whistling frequency on Ox flow velocity in oxygen part of injector

는 산화제 유동속도에 따른 whistling 주파수값을 나타낸 것이다. 연소실 유무에 상관없이 산화제 유동속도에 따라 whistling 주파수는 증가하며, 비정상적으로 jumping하는 결과를 보여준다. 이것은 산화제 오리피스 전단 파이프내의 유체(질소)의 진동이 파이프와 오리피스 형상에서의 고유진동수와 coupling되어 나타나는 현상으로 pipe의 길이(L), 오리피스 직경(d), 파이프 단면적(S), 가스내의 음속(c)값을 이용하여 이론적으로 whistling 주파수($w = 2\pi f$)을 계산할 수 있다.[7]

$$\cot\left(\frac{wL}{c}\right) = -\left(\frac{Ld}{S}\right)\left(\frac{c}{wL}\right) \quad (1)$$

식 (1)과 실험에서의 whistling 주파수값을 비교하면 Table 1과 같다. 가스 내의 음속은 340

Table 1 Comparison of experimental and theoretical values of whistle frequency

Theoretical value		Experimental value	
f(Hz)	$2\pi f L / c$	f(Hz)	$2\pi f L / c$
2565.0	0.37920	2532.8	0.37445
2931.6	0.43341	2967.2	0.43867
3298.4	0.48763	3193.8	0.47217
3665.2	0.54187	3429.7	0.50705
4032.2	0.59612	4171.9	0.61677
4399.3	0.65039	4409.4	0.65188

m/s라 가정할 때 실험값과 이론값은 Table 1에서와 같이 일치한다.

3.2 Effects on Combustion Instability

연소실을 장착한 상태에서 산화제와 연료에 질소를 분사하면 연소실내의 불안정 모드의 주파수와 whistling 주파수가 동시에 발생한다.

연소시험과 유동조건이 동일한 질소분사 음향시험결과를 비교함으로써 연소현상에 주는 영향을 살펴보았다. Figure 6은 질소분사 음향시험과 상압기상 연소시험을 비교한 것이다.

질소분사 음향시험의 경우 산화제 분사기에서의 whistling 주파수 peak의 크기가 커서 가진에 의한 연소실내의 불안정 모드는 거의 나타나지 않는다. 하지만 상압기상 연소시험의 경우는 산화제 분사기에서의 whistling 주파수와는 상관없이 연소실내의 1T1L mode의 peak가 크게 나타난다. 이것은 산화제 분사기에서의 whistling은

연소현상에는 영향을 주지 않으며, 연소불안정을 판단함에 있어도 크게 고려하지 않아도 됨을 의미한다. Figure 6의 질소분사 음향시험 결과에서 약 1250Hz에 해당하는 1T1L mode을 확대하여 살펴보면 Fig. 7과 같다. 해당주파수의 감쇠정도를 나타내는 감쇠인자(damping factor)값을 비교해 보면 연소시험에서의 값보다 매우 작은 값을 가진다. 하지만 산화제와 연료의 분사조건에 따라 각각 다른 값을 가지고 있으며 크기가 연소시험에서와 비슷한 경향성을 가진다.

3.3 Stability test of N2 purge cold flow test

산화제와 연료의 유량을 연소시험과 동리하게 공급하여 얻은 1T1L mode의 peak의 damping factor를 비교하였다. 연소시험에서 1T1L mode의 damping factor값은 이전에 수행되었던 실험값을 사용하였다[3]. 불안정 영역을 결정하는 조건에서의 damping factor는 절대적인 기준이 없

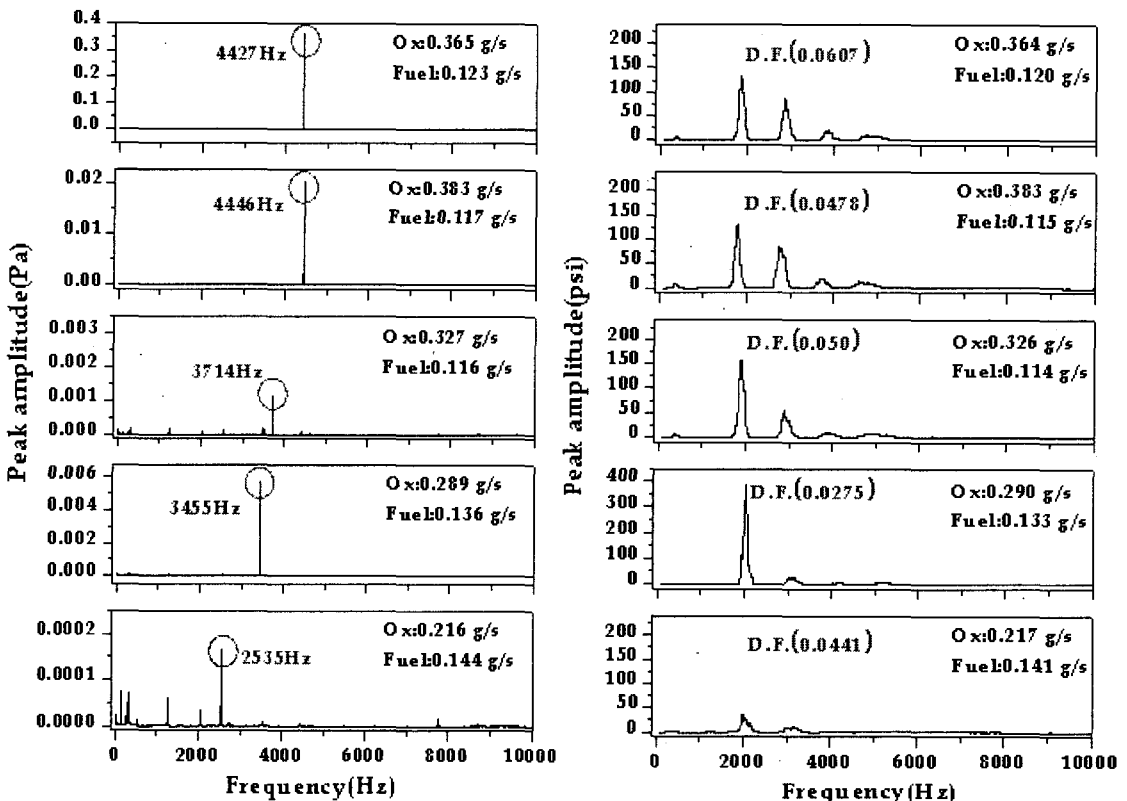


Fig. 6 Comparison frequency analysis of N₂purge cold test(Left) and ambient hot fire test(Right)

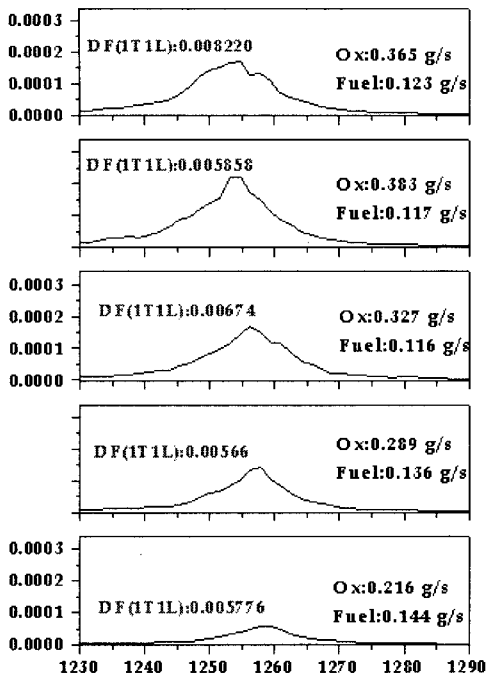
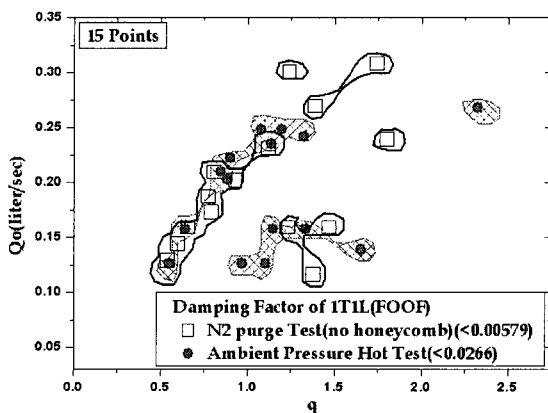


Fig. 7 Damping factor(1T1L mode) of cold test

으므로 전체 실험조건에서 가장 작은 값을 가지는 값을 기준으로 하여 순서대로 5, 15 point에 대해 질소분사 음향시험과 상압기상 연소시험에서의 불안정 영역을 비교하였다. Damping factor의 상대적인 비교를 통해 상압기상 연소시험과 질소분사 음향시험간의 불안정 영역을 표시하면 Fig. 8과 같다. 모든 조건에서 일치하지는 않지만 Pikalov V. P[5]의 실험에서와 같이



비슷한 영역을 가진다.

이러한 결과는 혼합(mixing)을 연소불안정을 야기시키는 주요한 인자라 가정하는 상압기상 연소시험과 유동의 충돌 또는 혼합으로 발생하는 유동 불안정에 의한 연소실내의 불안정성을 판단하는 질소분사 음향시험간의 유사성이 존재함을 의미한다.

4. 결론 및 고찰

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 액체로켓 엔진 충돌형(FOOF) 분사기의 산화제 오리피스에서 일정속도 이상에서 whistling이 발생한다. 이러한 whistling 주파수는 유동속도에 비례하고 산화제 오리피스 내부의 파이프와 오리피스 형상의 고유진동수와 유체의 진동이 coupling되어 비정상적으로 jumping하는 현상을 보여준다.
2. 연소시험에서는 산화제 오리피스에서 발생하는 whistling 현상에 의해 발생하는 주파수와는 상관없이 1T1L mode에 해당하는 주파수에서의 peak가 가장 크게 나타나므로 whistling 현상은 연소불안정에는 영향을 주지 않는다.
3. 연소실내에서 질소분사의 음향 가진을 통해

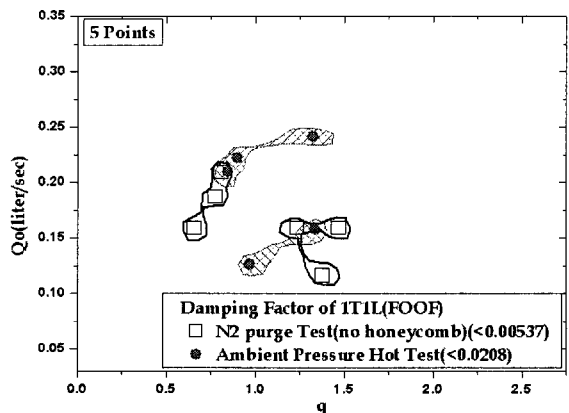


Fig. 8 Comparison of instability region between N2 purge test and ambient hot fire test

발생하는 1T1L mode와 모사추진제를 사용하는 연소시험에서 발생하는 1T1L mode의 damping factor를 비교해보면 불안정 영역은 서로 비슷한 조건에서 발생한다. 이것은 유동의 충돌 또는 혼합에 의한 유동불안정 현상이 모사추진제를 사용하는 연소시험에서 연소불안정을 야기시키는 주요한 인자임을 의미한다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회의 기본연구과제인 "로켓엔진 연소기 고성능화 기술개발" 연구의 일부분으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Steven C. Fisher, Fred E. Dodd and Robert J. Jensen, "Scaling Techniques for Liquid Rocket Combustion Stability Test" Liquid Rocket Engine Combustion Instability, AIAA, Vol 169, Ch 21, 1995
2. Chae Hoon Sohn, Woo-Seok Seol, "On the Method for Hot-fire Modeling of High Frequency Combustion Instability in Liquid Rocket Engines", KSME International Journal , Vol 18, No.6, 2004, pp. 1010-1018
3. 서성현, 이광진, "분사기의 연소 안정성 평가를 위한 실험적 방법 연구", 한국항공우주학회지, Vol 32, No.4, 2004, pp. 61-66
4. Kwang-jin Lee, Seonghyeon Seo, Joo-Young Song, Yeoung-Min Han, Hwan-Seok Choi, Woo-Seok Seol, "Combustion Stability Assessment of Double Swirl Coaxial Injectors using Simulant Propellants", AIAA Paper 2005-4443,
5. Pikalov, V. P. et al, 2000-2001, "Studied of the Combustion Stability to Acoustic Oscillation using KARI Injectors of basic configuration under Model Operation Conditions", Progress Report of KARI-00-14, Phase I & II, Part C
6. A. B. C. Anderson, "Dependence of Pfeifenton(Pipe tone) frequency on pipe length, orifice diameter, and gas discharge pressure", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol 24, No.6, 1952, pp. 675-681
7. A. B. C. Anderson, "Dependence of the primary Pfeifenton(Pipe tone) Frequency on Pipe- Orifice Geometry", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol 25, No. 3, 1953, pp. 541-545