

외부 가진에 따른 기체-기체 스월-제트 동축형 인젝터의 비연소/연소 동특성에 관한 실험적 연구

1. 연구 배경 및 목적

액체 로켓 엔진의 개발 및 발사에 있어서 가장 큰 문제점 중 하나는 연소불안정 현상이다. 연소 불안정 현상은 연소실 내부의 압력섭동과 열방출율 섭동의 상호작용으로 인하여 두 섭동의 보강 간섭이 발생함으로써 두 섭동이 크게 증폭되는 현상을 말한다. 이러한 연소불안정 현상이 심해지게 되면, 엔진의 폭발 등이 발생하게 된다. 이러한 연소불안정 현상을 방지하기 위한 방법으로 수동형 제어 방법과 능동형 제어 방법이 있다. 이 중 수동형 제어 방법은 별도의 장치를 부가해야하기 때문에 발사체의 질량이 증가하게 되어 성능 저하를 발생시키게 된다. 이에 반해 능동형 제어 방법은 발사체의 질량이 변화하는 것이 아니므로 성능 저하가 크게 발생하지 않기 때문에 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 능동형 제어 방법 중 가장 대표적인 것이 인젝터의 동특성을 파악하는 것이다. 인젝터 전단에서 발생한 유동 섭동은 인젝터를 지나 연소실로 유입되어 화염의 섭동을 일으키고, 이는 연소실 내부의 압력 섭동을 발생시킨다. 이렇게 발생한 압력 섭동은 다시 연소실 전단인 인젝터에 영향을 미쳐 유동 섭동을 증폭시키는 피드백 현상이 발생하게 된다. 이때, 인젝터의 동특성을 파악하여 피드백 고리를 끊게 되면, 연소실 내부 압력 섭동의 증폭을 방지하게 되어 연소불안정 현상을 예방할 수 있게 된다. 따라서 연소불안정 현상의 예방에 있어서 인젝터의 동특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 연소 특성을 파악함에 있어서 추진제 조건을 다양하게 변화시켜감에 따라 연료 과잉 조건 및 산화제 과잉 조건 모두 범위에 포함되도록 실험조건을 설정하였으며, Feed system 및 연소실의 길이 등 기하학적 조건을 변화시켜감에 따라 외부 가진에 따른 연소 동특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 인젝터 형상

Figure 1과 같은 스월/제트 동축형 인젝터를 사용하여 Cold test 및 Hot test를 진행하였으며, 자세한 기하학적 조건은 Table 1과 같다. 6개의 스월 구멍을 통해 스월 유동이 유입되며, Recess 구간을 통해 제트와 스월 유동의 혼합이 이루어진다.

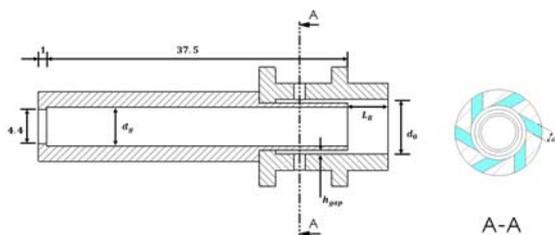


Fig. 1. Structure of Gas-Gas Swirl-Jet Coaxial Injector

Table 1. Dimensions of Experimental Apparatus

	Value	Description
n	6	Number of tangential inlet
d_{in}	1.4 mm	Tangential inlet diameter
d_0	7 mm	Injector exit diameter
d_g	5 mm	Jet orifice diameter
h_{gap}	0.5 mm	Gap thickness
L_R	5 mm	Recess length

본 연구에서 인젝터의 동특성을 파악하기 위해 사용한 Injector transfer function(ITF)는 아래 식 1과

같다. 속도는 Hot wire anemometer, 압력은 동압센서를 사용하여 측정하였다.

$$ITF_{cold} = \frac{u_{out}' / \overline{u_{out}}}{u_{in}' / \overline{u_{in}}}, \quad ITF_{hot} = \frac{p_{out}' / \overline{p_{out}}}{u_{in}' / \overline{u_{in}}} \quad (1)$$

2.2 Cold test 실험 장치 및 방법

Fig. 2와 같이 인젝터 전단에 스피커가 설치된 Feed line을 연결하여 제트 유동이 공급되도록 하였으며, 이를 통해 제트 유동에 일정한 주파수의 가진이 가해지도록 하였고, 작동 유체는 공기를 사용하였다. 자세한 실험 조건은 Table 2와 같다.

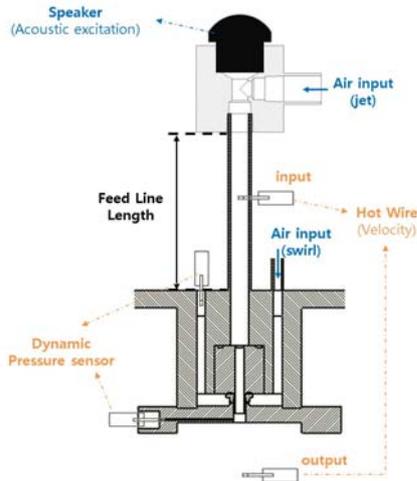


Fig. 2. Structure of Cold Test Apparatus

Table 2. Experimental Conditions of Cold Test

	Jet Air	Swirl Air
Raynolds Number	5,241 ~ 10,495	10,385
Momentum Flux Ratio	0.5, 1, 1.5, 2	
Input Frequency	100 ~ 1500 Hz at intervals of 50 Hz	
Replaceable Feed Line Length	100, 200, 300, 400 mm	
Non-replaceable Feed Line Length	64.64 mm	
$u'_{in} / \overline{u_{in}}$	0.115	
Temperature	170 °C	

2.3 Hot test 실험 장치 및 방법

Fig. 3와 같은 연소기를 사용하여 인젝터 Hot test를 진행하였다. 제트 유동에는 산소를 사용하였고, 스월 유동에는 메탄을 사용하여 연소실험을 진행하였다. 실험 조건은 Table 3와 같다.

Table 3. Experimental Conditions of Hot Test

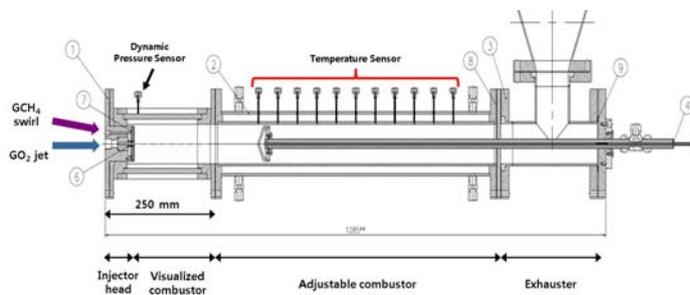


Fig. 3. Structure of Hot Test Apparatus

	Jet Oxygen	Swirl Methane
Raynolds Number	1,700 ~ 4,356	4,560
OF Ratio	1.86 ~ 4.76	
Input Frequency	100 ~ 1500 Hz at intervals of 50 Hz	
Total Feed Line Length	500 mm	
$u'_{in} / \overline{u_{in}}$	0.3	
Inlet Temperature	25 °C	

3. 실험 결과 및 분석

3.1 Cold test 결과

공기를 사용한 Cold test 실험은 Feed line의 길이 및 제트 공기의 유량을 변화시켜감에 따라 실험을 진행하였고, 그 결과는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. Fig. 4는 MR=2 조건이며, Fig. 5는 연소기 길이 400 mm 조건이다. Feed line의 길이가 증가함에 따라 ITF의 Peak가 발생하는 주파수가 감소하는 것을 확인하였으며, 제트의 유동이 증가함에 따라 ITF의 크기가 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보임을 확인하였다. 이는 식 2를 통해 계산할 수 있는 SF Ratio의 변화로 인한 것으로 Fig. 7에서 SF Ratio가 급격히 증가하는 부분과 Fig. 6에서 ITF의 값이 최소인 점이 일치한다.

$$SF\ Ratio = \frac{Second\ Mode}{First\ Mode} \quad (2)$$

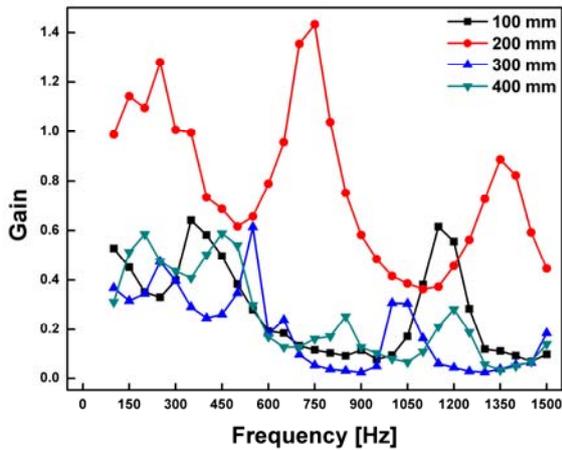


Fig. 4. ITF Varying the Feed Line Length

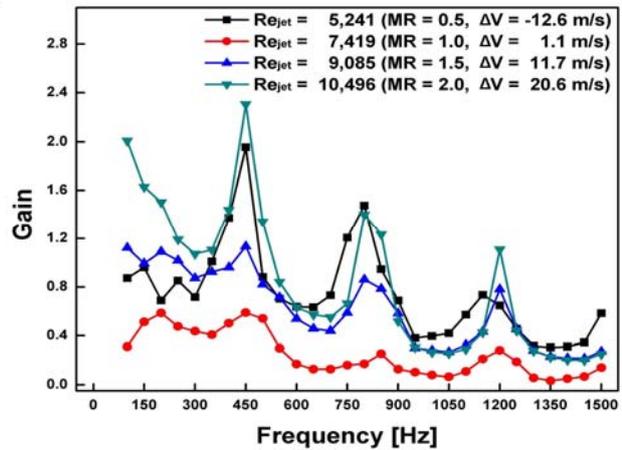


Fig. 5. ITF Varying the Momentum Flux Ratio

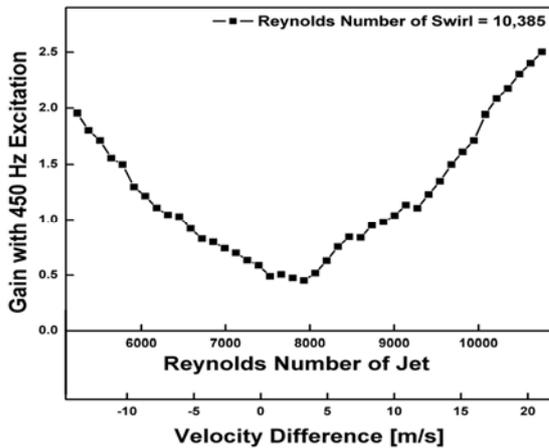


Fig. 6. ITF Varying the Reynolds Number of Jet Air

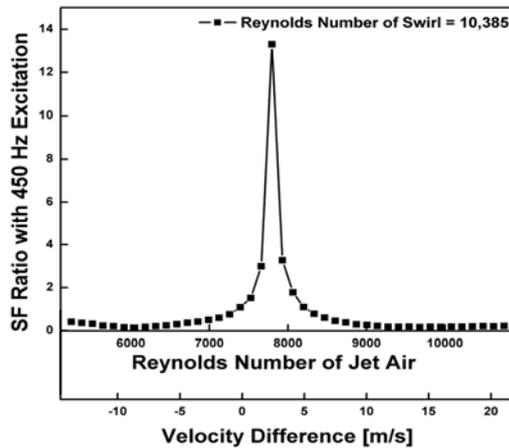


Fig. 7. SF Ratio Varying the Reynolds Number of Jet Air

3.2 Hot test 결과

메탄과 산소를 사용한 Hot test 실험에서 스피커의 가진이 없을 때는 Fig. 8과 같이 산소의 유량이 적을 때 연소실 내부에 압력섭동이 발생하였으며, 이러한 연소불안정 주파수는 연소실 길이 및 산소 유량과 무관하게 Fig. 9와 같이 약 70 Hz임을 확인하였다.

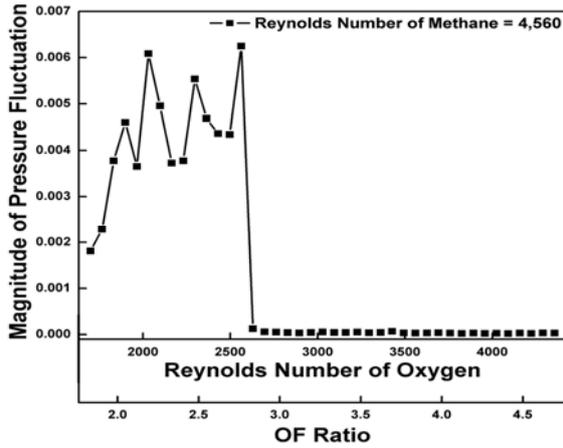


Fig. 8. Pressure Fluctuation Varying the Reynolds Number of Oxygen

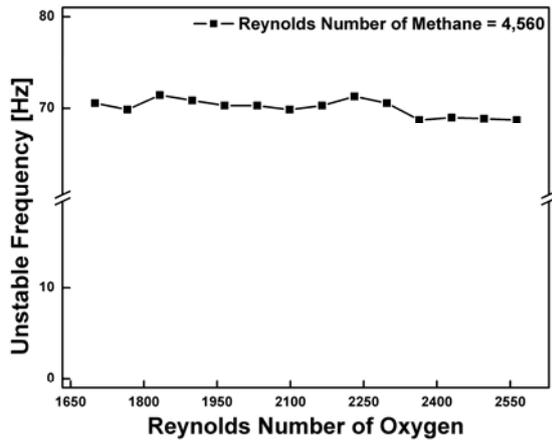


Fig. 9. Combustion Instability Frequency Varying the Reynolds Number of Oxygen

스피커를 사용하여 산소에 가진을 주어 ITF를 측정하는 결과는 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 동일한 위치에서 Peak이 발생하는 것은 Feed line의 공진주파수와 일치하므로 인젝터 전단의 Feed line에 의한 결과로 판단되며, Peak의 위치가 상이한 곳은 연소실의 종방향 공진주파수와 일치하므로 연소실의 종방향 공진에 의한 영향으로 판단된다. 또한, 산소의 유량에 의한 ITF의 변화는 Cold test와 마찬가지로 감소하였다가 산소의 유량이 일정 유량 이상이 되면 다시 증가하는 경향을 보였으며, 이는 제트와 스월의 유속차에 의한 간섭의 효과로 판단된다.

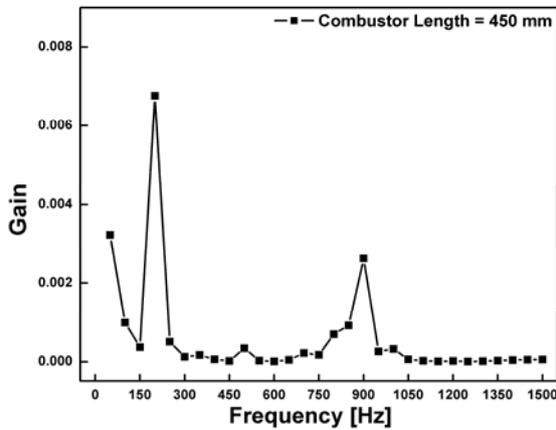


Fig. 10. ITF Varying the Excitation Frequency with 450 mm Combustor Length

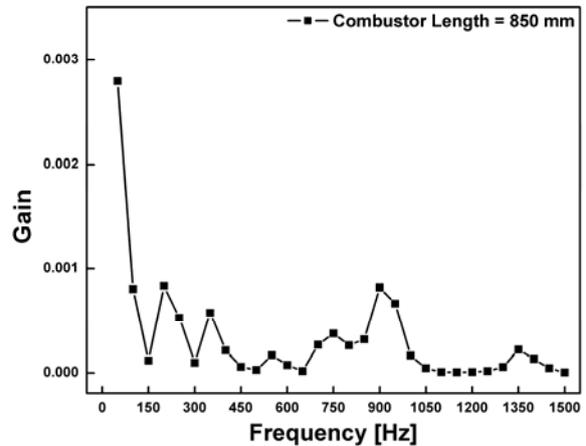


Fig. 11. ITF Varying the Excitation Frequency with 850 mm Combustor Length

4. 결론

기체/기체 스월/제트 동축형 인젝터의 연소 및 비연소 과정에서 동특성을 측정하는 결과 Feed line의 공진에 의한 ITF의 증폭은 두 과정에서 모두 발견되었으며, 연소 과정에서는 이와 더불어 연소실의 종방향 공진에 의한 ITF의 Peak도 관찰되었다. 이러한 ITF의 변화는 제트와 스월 유동의 간섭에 의한 효과로 이는 두 유동의 속도차에 의해 변화됨을 확인하였다.