

스월 동축형 인젝터의 분사조건에 따른 Self-Pulsation의 특성 연구

임지혁* · 김동준* · 윤영빈**

Experimental Study on Self-Pulsation Characteristics of Swirl Coaxial Injector with Various Injection Conditions

Ji-Hyuk, Im* · Dongjun Kim* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

The spray and acoustic characteristics of a swirl coaxial injector are studied experimentally. The spray and acoustic characteristics of a swirl coaxial injector are investigated according to the injection conditions, such as the pressure drop of the liquid and gas phase, and injector geometries, such as recess length and gap size between the inner and outer injector.

초 록

본 논문에서는 기체/액체 스월 동축형 인젝터에서 발생하는 self-pulsation 현상을 분사 조건을 변화시켜주며 분무 특성 및 음향학적 특성을 살펴보았다. 액체 및 기체 압력의 변화시키며 분사 조건을 결정하였고, 인젝터의 기하학적 변수로 리세스와 갭 크기를 선정하여 이에 따른 self-pulsation 특성을 조사하였다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Self-Pulsation(셀프 펄세이션), Swirl Coaxial Injector(스월 동축형 인젝터)

1. 서 론

동축형 인젝터는 충돌형 인젝터와 함께 가장 널리 이용되는 형태의 인젝터로 내부 산화제의 분사형태에 따라 스월 동축형 인젝터와 전단 동축형 인젝터로 나뉜다. 특히, 스월 동축형 인젝터는 산화제에 접선 방향의 속도 성분을 주어 얇은 액막 형태로 분사되기 때문에 미립화 및 혼합 효율이 뛰어나 설계 및 제작이 어려운 단점에도 불구하고 많이 사용된다[1].

스월 동축형 인젝터는 내부 산화제가 얇은 액막의 형태로 분사되기 때문에 액막의 운동량이 작아, 속도가 빠른 동축 기체의 큰 운동량에 의해 간섭을 받아 액체와 기체 사이의 압력 및 유량 진동 현상이 발생하여 self-pulsation이 나타

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 기계항공공학부 부교수
연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

난다.

인젝터의 분무특성은 엔진의 성능을 결정짓는 중요한 요소로 지난 수십 년간 많은 연구가 수행되어 왔으나 대부분의 연구는 미립화와 공간 분포에 집중되어 있으며 인젝터의 음향학적 특성에 관한 연구는 거의 없었다[2]. Self-pulsation 현상은 러시아에서 1970년대 LOX/H₂ 엔진의 성능 시험 중 발견되었으며 Bazarov는 분사 조건과 설계 변수에 따른 실험적 연구를 수행하여 이로부터 리세스가 self-pulsation의 특성을 결정짓는 중요한 요소라 하였다[3].

본 연구에서는 스윙 동축형 인젝터의 self-pulsation 현상의 특징을 알아보고 이를 통해 self-pulsation의 기본 메커니즘을 규명하고자 한다.

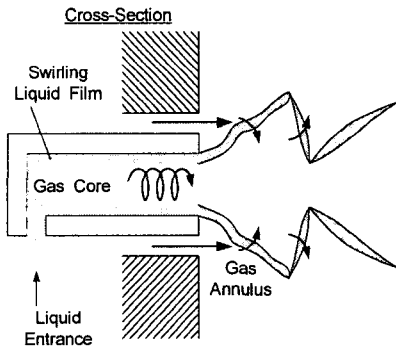


Fig. 1 Schematics of self-pulsation

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 조건

본 실험에 사용된 인젝터는 Fig. 2와 같다. 내부 인젝터를 통해 산화제의 유사 추진제인 물을 분사하고 외부 인젝터를 통해 연료의 유사 추진제인 기체 질소를 분사하였다.

내부 산화제 인젝터에는 90°마다 4개의 탄젠트 유입구를 두어 스윙 모션이 생기도록 설계하였으며 내경을 2.5 mm, 외경을 4 mm로 하였다. 리세스가 self-pulsation에 미치는 영향을 살펴보기 위해 내부 인젝터의 오리피스의 길이를 외부

인젝터 끝단으로부터 2.5, 5, 7.5 mm만큼 안쪽으로 들어가도록 총 4개의 내부 인젝터를 제작하였다.

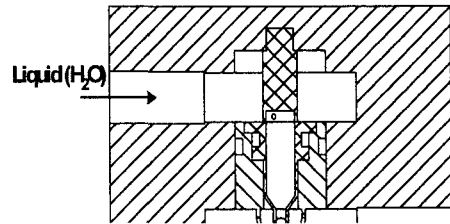


Fig. 2 Schematics of a swirl coaxial injector

외부 연료 인젝터에는 $\Phi 6 \times 5$ mm의 유입구 4개를 통하여 기체 질소를 분사시켰으며 내경은 갭 크기의 영향을 관찰하기 위해 5~8 mm까지 1 mm 단위로 설계·제작하였다.

본 연구의 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental Conditions

	Oxidizer	Fuel
Simulant	Water	Nitrogen Gas
Pressure drop	0.1~0.5 MPa	0.6~1.6 MPa
Mass flow rate	14.7~27.0 g/s	1.2~7.6 g/s
Velocity ratio	9.1~46.3	

2.2 분무 특성

스윙 동축형 분무는 내부의 얇은 액막이 작은 운동량을 가지고 분사되는 반면 외부 기체는 빠른 속도로 분사되어 운동량이 매우 크기 때문에 내부 액체가 외부 기체에 쉽게 영향을 받으면서 self-pulsation 현상이 발생한다. Fig. 3은 외부 기체의 분사 속도를 166.64 m/s로 고정하고 내부 액체의 분사 압력을 0.1 MPa에서 0.5 MPa까지 증가시키며 촬영한 분무 사진이다. 내부 액체의 분사 압력이 낮아 유량이 작을 때는 쉽게 self-pulsation 현상이 발생하지만 분사 압력이 높아 유량이 많아지면 self-pulsation 현상이 사라지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 내부 액체의 유량이 증가하면 액체의 운동량이 증가하여 외부 기체의 간섭에 저항할 수 있기 때문이라 판

단된다. 또한, 액체의 유량이 증가함에 따라 분무의 주기성이 증가하는 것도 관찰할 수 있었다.

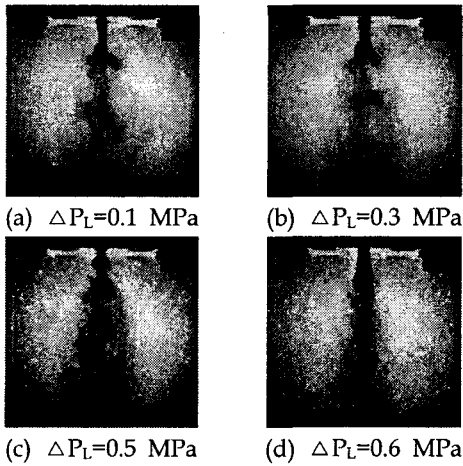


Fig. 3 Spray pattern according to pressure drop of liquid phase

리세스는 일반적으로 혼합 효율을 증대시키고 화염을 안정화시키는 장점을 가지지만 리세스가 증가함에 따라 self-pulsation이 더 잘 발생된다고 알려져 있다. Fig. 4는 분사 조건을 고정하고 갭 크기를 1.5 mm로 하였을 때 리세스에 따른 분무 형상을 나타내고 있다. 리세스가 작을 때(0, 0.5 d₀)에서는 self-pulsation이 발생하지 않지만 리세스가 증가하면(1.0 d₀, 1.5 d₀) self-pulsation이 발생하였다. 이는 리세스가 증가함에 따라 내부 액체와 동축 기체가 외부 인젝터의 벽면에 의해 구속되어 리세스가 작을 때보다 심한 간섭을 일으켜 self-pulsation이 발생하는 것으로 보인다.

Fig. 5는 일정한 분사 조건에서 리세스가 없을 때, 갭 크기의 변화에 따른 분무 형상을 보여준다. 갭 크기가 작으면 액막이 좁은 영역을 통과한 동축 기체의 경로를 막아 간섭이 심해져서 self-pulsation이 쉽게 발생하리라 예상할 수 있으며 Fig. 5에서 이를 확인할 수 있다. 갭 크기가 작을 때는 self-pulsation이 발생하지만 갭 크기가 증가하여 2.0 mm에서는 self-pulsation이

발생하지 않는 것을 관찰할 수 있었다.

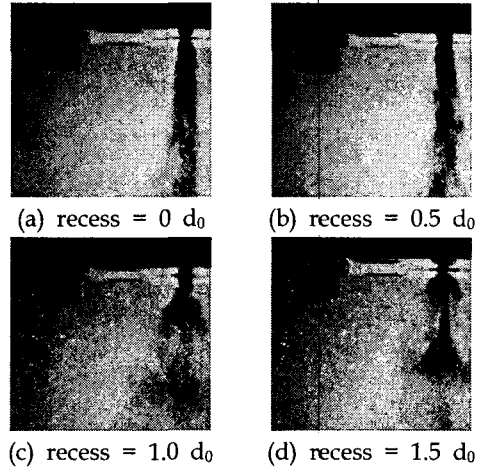


Fig. 4 Spray pattern according to recess

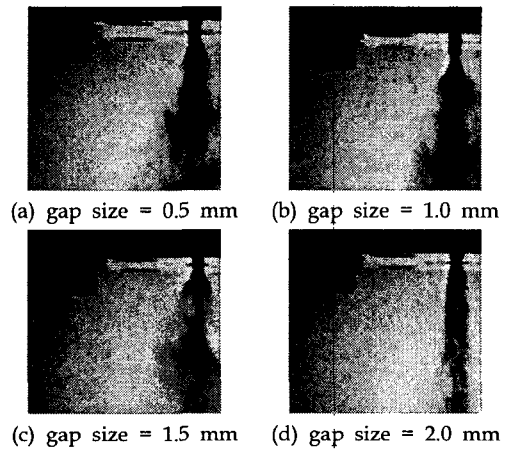


Fig. 5 Spray pattern according to gap size

2.3 음향학적 특성

Self-pulsation 현상이 발생하면 일반적으로 매우 큰 소음을 동반하게 되며 Zhou 등은 self-pulsation의 이러한 음향학적 특성이 연소장에 교란을 주어 연소 불안정 현상에 영향을 미칠 수 있다고 제시하였다[2].

스윙 동축형 인젝터에서 self-pulsation 현상이 발생하였을 때의 음향학적 특성을 B&K의

PULSE System(3560C Type)을 이용하여 알아보았다. self-pulsation이 발생하게 되면 특정 주파수에서 급격한 음압 상승이 발견되며 이를 통해 self-pulsation의 발생 여부를 확인할 수 있다.

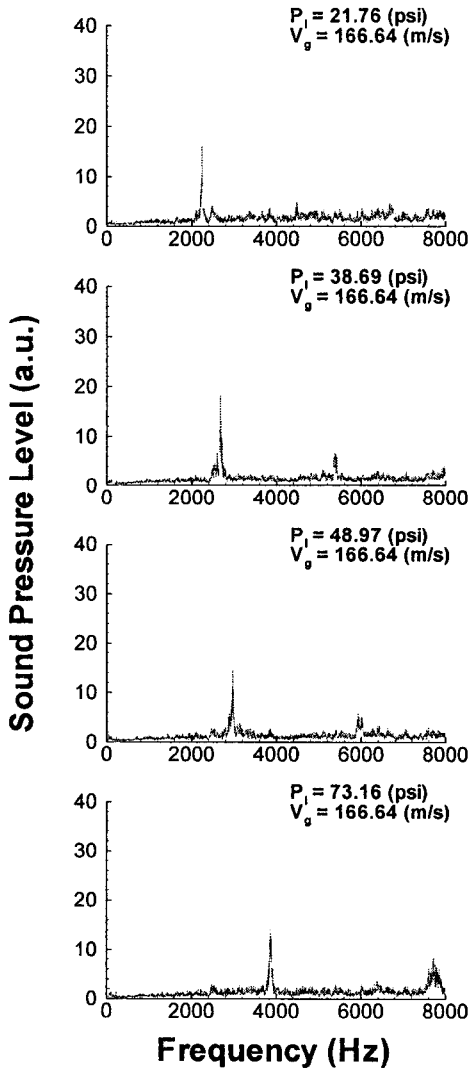


Fig. 6 Frequency spectrum according to pressure drop of liquid phase

Figure 6은 액체의 압력 강하가 일정할 때, 기체 속도에 따른 주파수 특성을 나타낸다. 기체의 분사 속도가 증가함에 따라 self-pulsation의 특성 주파수가 약 2~4 kHz로 증가하는 것을 확인할 수

있다. 액체의 분사 압력에 따른 self-pulsation의 특성 주파수의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 이는 Zhou 등이 제시했던 것과 같이 연소 불안정 현상에서 가장 중요시되는 1T 모드와 비슷한 대역으로 이러한 주파수 대역의 음향학적 특성이 연소장에 교란을 주어 연소 불안정 현상과 연관이 있을 것이라 판단된다[2]. 그러나 Bazarov는 self-pulsation의 음향학적 특성과 연소실의 음향학적 특성은 크게 다르기 때문에 self-pulsation에 의한 음향학적 특성이 연소 불안정 현상에는 큰 영향을 미치지 않는다고 하였다[3]. 따라서 이에 대한 더 많은 연구가 필요할 것이다.

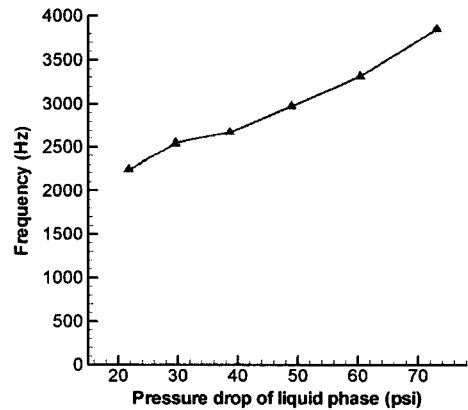


Fig. 7 Peak frequency variation according to pressure drop of liquid phase

인젝터의 기하학적 형상 변수로 리세스를 선정하여 리세스에 따른 self-pulsation의 음향학적 특성 변화를 살펴보았다. 리세스가 증가함에 따라 액체와 기체간의 간섭이 심해져 self-pulsation 현상이 심화된다는 것을 위에서 설명하였다. Fig. 8은 갭 크기가 2 mm일 때 리세스에 따른 self-pulsation의 주파수 특성을 나타낸 그래프이다. 리세스가 작을 때는 self-pulsation 현상이 발생하지 않지만 리세스가 증가함에 따라 약 2.4 kHz에서 음압이 상승하는 현상이 관찰되었다. 리세스가 변하여도 리세스가 1.0 d₀ 이상에서는 약 2.4 kHz의 특성 주파수는

변하지 않지만 리세스가 증가함에 따라 음압은 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

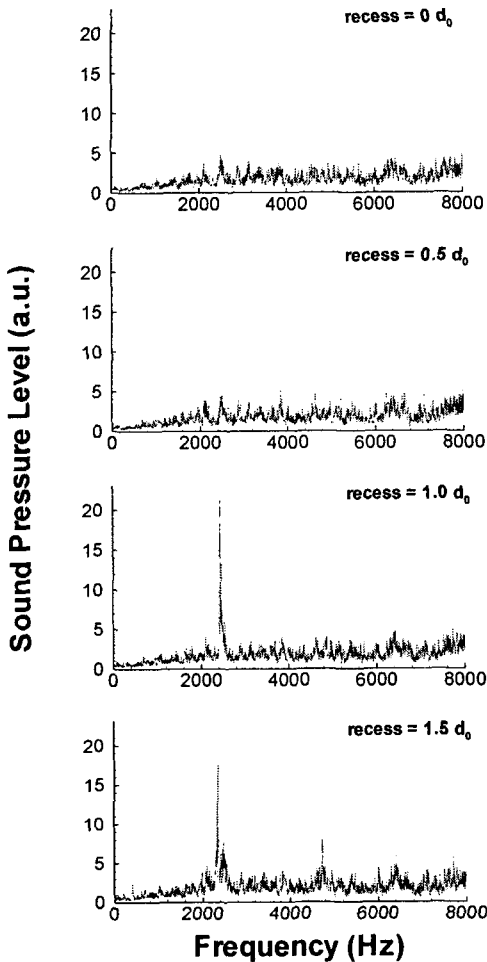


Fig. 8 Frequency spectrum according to recess length

3. 결 론

스윙 동축형 인젝터의 self-pulsation의 특징을 알아보기 위해 shadowgraphy 기법과 음향 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 리세스가 증가함에 따라 self-pulsation이 더 쉽게 발생함을 관찰할 수 있었다. 이는 리세스

안에서 기체 유동이 액체와 인젝터 벽면에 의해 구속되어 액체와 기체 사이의 간섭이 심해지기 때문이다.

2. 갭 크기가 작아짐에 따라 self-pulsation이 더 쉽게 발생하였다. 갭 크기가 좁아짐에 따라 액막에 의해 기체의 유동이 더 쉽게 방해 받기 때문이라 판단된다.

3. self-pulsation이 발생하면 큰 소음을 동반하며, 액체의 분사 압력이 증가함에 따라 self-pulsation의 특성 주파수가 고주파 영역으로 이동하였다.

4. 리세스가 증가함에 따라 self-pulsation의 특성 주파수는 변하지 않았으나 특성 주파수에서의 음압은 증가하였다.

참 고 문 헌

1. Bayvel, L. and Orzechowski, Z., Liquid Atomization, Talyor & Fransis, 1993
2. Zhou, J., Hu, X., Huang, Y. and Wang, Z., "Flowrate and Acoustic Characteristics of Coaxial Swirling Injector of Hydrogen/Oxygen Rocket Engine," AIAA-96-3135, 1996
3. Bazarov, V., "Self-Pulsations in Coaxial Injectors with Central Swirl Liquid Stage," AIAA-95-2358, 1995
4. Huang, Y., Zhou, J., Hu, X. and Wang, Z., "Acoustic Model for the Self-oscillation of Coaxial Swirl Injector," AIAA-97-3328., 1997
5. Bazarov, V. and Yang, V., "Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, 1998, pp. 797-806
6. 정원호, "전단 및 스윙 동축형 인젝터의 분무특성에 관한 연구," 공학석사학위논문, 서울대학교, 2004