

研究論文

저주파 압력섭동 범위 내에서의 단일 스윙 인젝터의
진폭-위상 특성 연구

길태옥* · 정연재** · 윤영빈***†

Study on Phase-Amplitude Characteristics in a Simplex
Swirl Injector with Low Frequency Range

Taeock Khil* · Yunjae Chung** · Youngbin Yoon***†

ABSTRACT

Generally, combustion instability is generated by the mutual coupling between the heat release and the acoustic pressure in the combustor. On the occasion, the acoustic pressure generates the oscillation of the mass flow rate of propellant injected from injector, and this oscillation again affects combustion in the combustor. So, the dynamic characteristics of the injector have been studied to control combustion instability using injector itself in Russia from 1970's. In order to study injector dynamics, a mechanical pulsator for forced pressure pulsation is produced and the method to quantify the mass flow rate of the propellant that is oscillating at the exit of the injector is developed. With the pulsator and the method, pulsating values of the mass flow rate, pressure, liquid film thickness, and axial velocity generated at the exit of the simplex swirl injector are measured in real time. And phase-amplitude characteristics of each parameter are analyzed using these pulsating values acquired at the exit of the simplex swirl injector.

초 록

연소불안정 현상은 연소기 내에서 발생하는 열해리와 음압간의 상호 커플링에 의해 발생된다. 이 때, 음압은 인젝터에서 분무되는 추진제 유량에 섭동을 발생시키고, 섭동된 유량은 다시 연소에 영향을 주게 된다. 따라서, 연소에 큰 영향을 미치는 인젝터를 이용하여 연소불안정 현상을 제어하기 위한 인젝터 동특성 연구가 1970년대부터 러시아에서 시작되었다. 인젝터의 동특성 연구를 위해 인위적인 압력 섭동을 주기 위한 장치를 제작하였고, 인젝터 출구에서 발생하는 유량 섭동을 측정하기 위한 기법을 개발하였다. 압력섭동 발생장치와 유량섭동 측정방법을 이용하여 압력섭동에 의해 단일 스윙 인젝터 출구에서 발생하는 유량 및 압력, 액막두께, 축방향 속도 등의 섭동 값을 실시간으로 획득하였고, 이를 통해 각 변수들의 위상-진폭 특성을 파악하였다.

Key Words: Injector dynamics(인젝터 동특성), Mass flow rate(질량 유량), Amplitude(진폭), Phase(위상), Input gain effect(입력 진폭 특성), Phase-amplitude diagram(위상-진폭 선도)

접수일 2009. 9. 16, 수정완료일 2010. 2. 8, 게재확정일 2010. 2. 17

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부

*** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

Nomenclature

P_m	매니폴드 압력
P_o	오리피스 압력
u, w	축방향, 탄젠트 방향 속도 성분
\dot{m}	질량 유량
ρ_L	유체 밀도
A	유체 면적
o	오리피스
th	이론 유도값
re	실제 실험값
C_{do}	실험 유량 계수
C_P	실험 압력 계수
C_A	실험 분사각 계수
$\tan\theta$	분사 반각
t	액막 두께
ave	평균

1. 서 론

1930년대에 발견된 연소불안정 현상은 안정적인 에너지 공급을 방해하고, 불완전한 연소를 발생시키며, 더 나아가 연소기관의 파괴를 유도한다[1-3]. 이를 제어하기 위해 1940년대부터 각국에서는 인적, 물적, 시간적 투자를 아낌없이 쏟아 붓고 있지만, 매우 복잡한 현상이기 때문에 수십 년 동안의 연구를 통해서도 아직 해결하지 못하고 있다. 충돌형 인젝터를 사용했던 미국은 연소실 내에 baffle을 설치하여 이를 제어하여왔고, 유럽의 경우 baffle을 장착한 인젝터와 helmholtz 공명기를 장착한 연소실을 사용하여 제어하고 있다. 그러나, 스윙형 인젝터를 사용하는 러시아의 경우 연소기내에 인위적인 장치를 설치하지 않고 인젝터의 동특성을 파악하여 인젝터 자체의 변형을 통해 연소불안정 현상을 제어하고 있다[3-7].

인젝터 동특성이란 외부에서의 교란이 인젝터에 미치는 영향을 연구하는 분야를 말한다[6-7]. 특히 액체로켓엔진에서는 이 특성이 매우 중요하게 받아들여질 수 있는데 Fig. 1은 액체로켓엔진의 구성을 간략하게 도식화한 그림이다. 연소

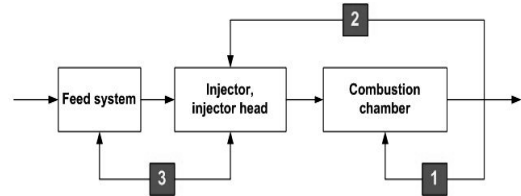


Fig. 1 Dynamic process interaction in the combustor, injector and feed system

실에서 발생한 국부적인 연소는 불균형한 열해리와 압력섭동을 발생시켜 불안정한 연소를 유발시키고, 이때 발생된 압력섭동은 인젝터에 영향을 미쳐 분무되는 추진제의 속도와 유량에 섭동을 발생시킨다. 이 압력섭동은 다시 추진제 공급라인에 영향을 미치게 되고, 추진제 공급라인에서 엔진의 구조적인 섭동과 중첩되어 인젝터로 전달이 된다. 인젝터로 전달된 섭동은 다시 연소실에서의 연소환경에 영향을 주게 되어 불안정한 연소가 발생하는 원인을 제공하게 된다.

그러므로, 인젝터는 하나의 구조적인 장치가 아닌 동적인 환경에 민감하게 반응하는 다리의 역할로 볼 수 있다. 따라서, 적절한 인젝터 설계를 통해 추진제의 동적인 특성을 제어하게 되면 연소실에서 발생된 열해리와 압력변동에 의한 섭동이 전달되는 것을 막을 수 있기 때문에 연소를 안정화시킬 수 있다는 이론이다. 러시아에서는 이를 토대로 인젝터의 동특성 분석에 의해 연료분무에서 발생하는 압력섭동을 감소시키기 위해 탄젠트 유입구의 길이를 증가시킨 인젝터가 프리버너에서 사용되고 있고, Fig. 2(b, c)처럼 phase shift를 이용하여 특정 주파수를 감소시키기 위한 인젝터 연구가 진행 중에 있다[7].

충돌형 인젝터를 사용했던 미국에서도 미립화 특성이 좋고 공기역학적인 항력을 적게 받아 안정적으로 추진제를 분무하는 스윙형 인젝터를 받아들여 연구 중에 있으며, 최근 인젝터 동특성의 중요성을 인지하여 연구 중에 있다. UAH의 Moser 연구팀은 러시아의 Bazarov 교수를 초청하여 인젝터 동특성에 대한 개념을 습득하였고, 실험적 연구를 위해 압력섭동 발생장치를 제작하여 테스트 중에 있으며[8], Purdue Univ.의

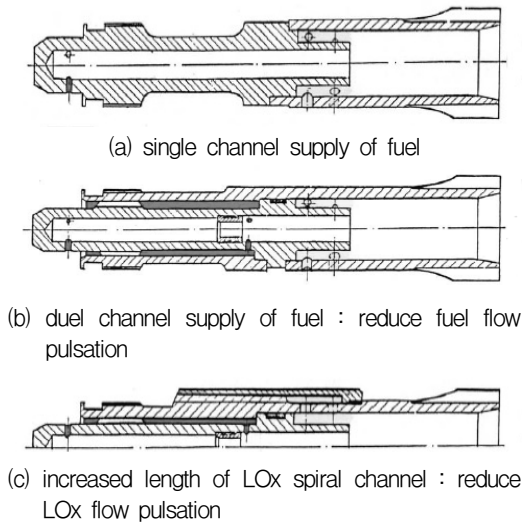


Fig. 2 Pre-burner bi-propellant swirl injector

Heister 연구팀은 러시아에서 개발된 장치와는 다른 형태인 압력섭동 발생장치를 제작하여 압력섭동에 의해 발생된 스프레이의 섭동을 고속 카메라를 통해 스프레이 특성을 밝혀내고 있다 [9-10]. 또한, 중국의 Beijing Univ.의 Li-Jun Yang 등은 인젝터 동특성을 이론적으로 연구 중에 있다[11]. 그러나, 위의 연구팀들은 인젝터 출구에서 압력섭동에 의해 섭동된 유량을 직접적으로 측정하지 못하여 동특성 연구에 깊게 들어가지 못하고 있다.

본 연구실은 2002년부터 러시아의 Bazarov 교수와의 긴밀한 연구협조를 통해 이론적, 실험적 연구를 수행하고 있으며[12], 압력섭동을 발생시키는 장치를 제작하였고, 최근 섭동된 유량을 직접적으로 측정할 수 있는 기법을 개발하였다 [13]. 따라서, 본 논문에서는 제작된 압력섭동 발생장치를 통해 공급라인에 특정 주파수 범위의 인위적인 압력섭동을 주었고, 개발된 유량측정 기법을 통해 섭동된 유량을 측정하여 단일 스윙 인젝터 입구에서의 섭동 압력과 출구에서의 유량 및 압력, 액막두께, 축방향 유체속도 등을 측정하여 그 변화 및 위상-진폭 특성을 알아보았다.

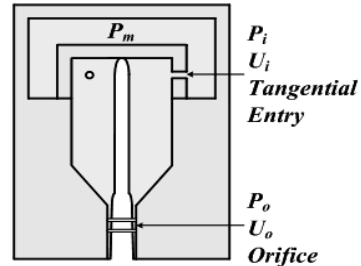


Fig. 3 Definition for injector part

2. 유량 진동의 이론적 접근

실제 로켓엔진에서는 연소실 내의 압력섭동에 의해 연소실로 분무되는 추진제의 유량에 압력과 속도의 섭동이 발생되고, 이 때 발생된 유량의 변동은 불규칙한 연소를 발생시키기 때문에 압력섭동에 의한 유량 변동을 알아보는 것은 매우 중요하다 할 수 있다. D'Souza 등은 Navier-Stoke 방정식을 이용하여 한 지점에서의 속도와 압력을 알면 특정 지점에서의 속도와 압력을 예측할 수 있는 transfer matrix를 유도하였고[14], Yokota 등은 두 지점의 압력을 측정하여 이를 통해 비정상적인 유량을 파악할 수 있는 방법을 제안하였지만[15], 두 방법 모두 내부가 팽 차있는 원형 파이프를 이용하였기 때문에 내부에 air-core가 형성되는 스윙형 인젝터에는 직접적으로 적용시키기에는 매우 어렵다. 따라서, 단일 스윙 인젝터에서의 유량을 측정하기 위해 오리피스에서 압력과 액막 두께를 직접적으로 측정하여 유량을 측정하는 방법을 고안하게 되었고, 이론 및 실험적 방법을 통해 접근해 보았다[13].

Figure 3은 인젝터의 단면도를 나타낸다. 이를 통해 각 부분에서의 압력과 속도에 대한 명칭을 정의하였다. 오리피스에서 유량을 측정하기 위해서는 유체의 축방향 속도항(u)과 유체의 단면적(A)이 필요하다. 이를 위해 이론적인 베르누이 방정식과 스프레이 분사각도식을 이용하여 오리피스에서의 속도항을 구하였다.

$$P_m = P_o + \frac{\rho w_{o,th}^2}{2} + \frac{\rho w_{o,th}^2}{2} \quad (1)$$

$$\tan\theta = \frac{w_o}{u_o} \quad (2)$$

이 식에 실험계수를 포함시키고 유량식에 대입하면

$$\dot{m}_{o,rc} = \rho_L u_{o,rc} A_o = \rho_L C_{do} \sqrt{\frac{2(P_m - P_o)}{\rho(1 + \tan^2\theta)}} A_o \quad (3)$$

이 된다.

Equation 3을 보면 유량을 얻기 위해서는 매니폴드에서의 압력과 오리피스에서의 압력치가 필요하다. 하지만, 압력섭동이 발생되었을 경우 매니폴드와 오리피스에서의 압력을 동시에 측정한다고 해도 탄젠트 유입구를 통과해 스윙운동에 의해 오리피스까지 이동하는 유체의 이동거리와 속도에 의해 시간차가 발생되어 두 위치 사이에 위상차가 발생하게 된다. 따라서, 이를 보정해주기 위해 매니폴드에서의 압력 P_m 을 정상상태에서의 실험값을 이용하여 오리피스에서의 압력 P_o 으로 변환시켜주는 작업을 수행하였고, 그 관계는 Eq. 4와 같다.

$$P_m = C_P P_o \quad (4)$$

여기서 C_P 는 실험에 의해 획득된 압력 계수를 의미한다.

$$\dot{m}_{o,rc} = \rho_L C_{do} \sqrt{\frac{2(C_P - 1)P_o}{\rho(1 + \tan^2\theta)}} A_o \quad (5)$$

마지막으로, Eq. 3의 우변 분모의 $\tan^2\theta$ 또한 순간적으로 동시에 측정하기 어려운 변수이기 때문에 이 또한 Lefebvre의 이론식을 이용하여 오리피스의 압력 P_o 로 변환시켜주는 작업을 수행하였다[16].

$$\tan^2\theta = C_A \tan^2(P_m^{0.11}) \quad (6)$$

따라서, 최종적으로 위의 Eq. 5를 Eq. 3에 포함시키면 오리피스의 압력변수로 통일된 오리피스에서의 측방향 속도항을 구할 수 있고, 액막 두께 측정방법에 의해 획득한 면적항(A)을 이용하면 압력과 액막두께를 이용한 유량정량화 식을 표현할 수 있다. 이 방법에 의해 유량을 획득하는 방법을 DPMM(Direct Pressure Measuring Method)라 명명하였다.

$$\dot{m}_{o,rc} = \rho_L C_{do} \sqrt{\frac{2(C_P - 1)P_o}{\rho(1 + C_A \tan^2((C_P P_o)^{0.11})}} A_o \quad (7)$$

본 연구에 사용된 인젝터는 단일 스윙인젝터로서, 실험 계수인 C_P , C_A 는 각각 6.348, 163.631이다.

3. 실험 방법

3.1 수력학적 압력 섭동 장치

수력학적 압력섭동을 발생시키기 위해 회전원판형 압력섭동 발생장치를 제작하였다. 압력섭동 발생장치는 내부에 장착된 회전원판과 connector에 의해 유체를 외부로 배출시켜 압력섭동을 발생시키기 때문에 섭동이 발생되었을 때 유체의 흐름이 끊기지 않고, 회전원판과 connector의 접촉에 의해 발생하는 기포가 외부로 배출되기 때문에 인젝터로 유입되는 유체에 밀도와 같은 물성치가 변화되지 않고 압력 섭동을 발생시킬 수 있으며 가능한 압력섭동 범위는 5~300 Hz이다 [13].

3.2 액막두께 측정 장치

Figure 5는 본 실험에서 사용된 인젝터와 액막 두께 측정장치에 대한 개략도를 보여준다. 인젝터는 단일 스윙 인젝터로서 3개의 탄젠트 유입구를 가진다. 액막 두께는 Lefebvre의 방법처럼 오리피스에 장착된 두 개의 전극 사이의 전기

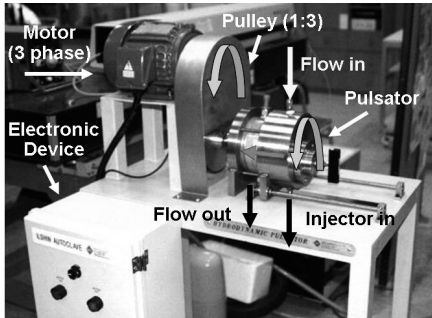


Fig. 4 Mechanical pulsator

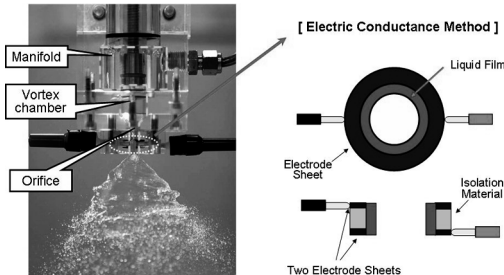


Fig. 5 Schematics of a Simplex Swirl Injector & Electric Conductance Method

전도도에 의해 측정된다. 일정한 간격으로 고정된 두 전극 사이로 유입되는 물의 전기 전도도는 오직 물의 두께에 의해 변화하기 때문에, 액막 두께는 두 전극 사이의 전압 변화에 의해 측정될 수 있다[17-18].

또한, 오리피스 내에서의 압력을 측정하기 위해 오리피스 내에 삽입된 두 전극 사이에 직경 1.4mm의 홈을 뚫어 이곳에서 센서에 의해 오리피스내의 압력을 측정하였고, 탄젠트 유입구는 직경 2mm로 유량 흐름에 영향이 없도록 하였다.

실험조건으로서 분무 압력은 정상상태에서는 1-8bar, 섭동상태에서는 4, 5, 6 bar이고, 섭동주파수는 5~250 Hz이다. 모사유체로서 물을 사용하였다.

4. 실험 결과

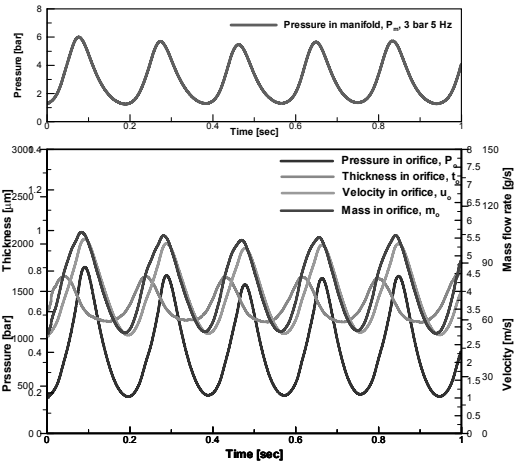


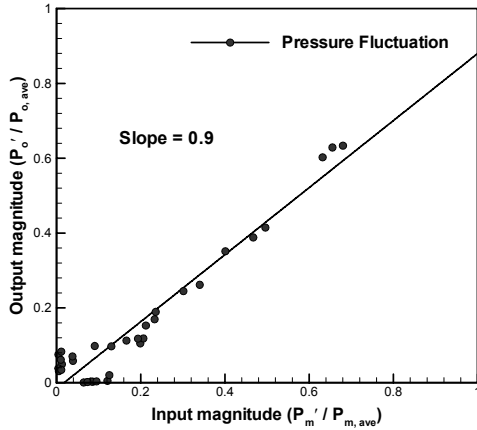
Fig. 6 Waves with time in the manifold and in the orifice

4.1 변수별 출구파형 분석

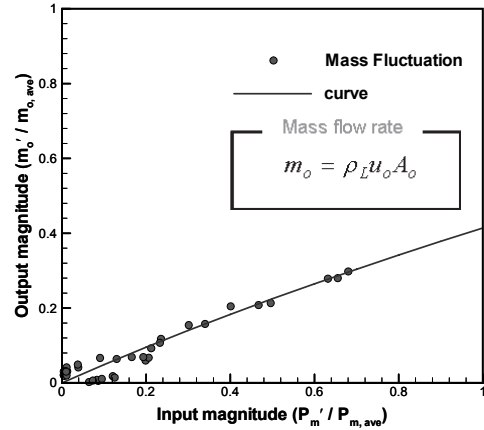
Figure 6은 인젝터의 입구와 출구에서 측정된 각 변수들을 보여주는데, 분무압력은 3 bar이고 섭동주파수는 5 Hz이다. Fig. 6의 상단은 인젝터 입구인 매니폴드에서 측정된 압력파형을, Fig. 6의 하단은 인젝터 출구인 오리피스에서 측정된 각 변수들인 압력, 액막두께, 축방향 속도, 유량을 나타낸다. 입력과 비교하여 출구에서의 각 파형들은 특정 섭동에 대해 각기 다른 진폭과 위상이 발생되기 때문에, 압력섭동이 발생되었을 때 출구에서의 변화를 예측할 수 있다면 섭동을 제어할 수 있으므로 인젝터의 동적 특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다.

4.2 입력 진폭 효과

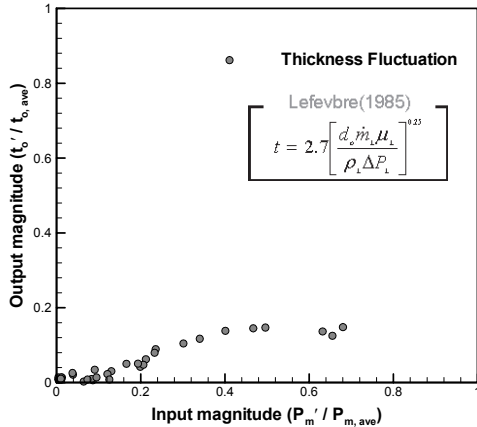
Figure 7은 압력 섭동 입력값의 진폭에 대한 오리피스에서 측정된 각 변수들의 진폭 변화를 보여준다. 각 그래프의 x축은 압력 섭동의 진폭을 평균 압력으로 표준화한 결과로서 입력 압력 섭동의 평균대비 0~80% 범위내의 진폭변화를 보여준다. Y축은 각각 오리피스에서 측정한 (a) 압력, (b)액막두께, (c)축방향 속도, (d)유량으로 x축과 마찬가지로 섭동의 진폭을 평균으로 표준화한 결과이다. 압력섭동 발생장치의 특성상 섭동 압력이 낮고, 섭동 주파수가 낮을수록 발생되



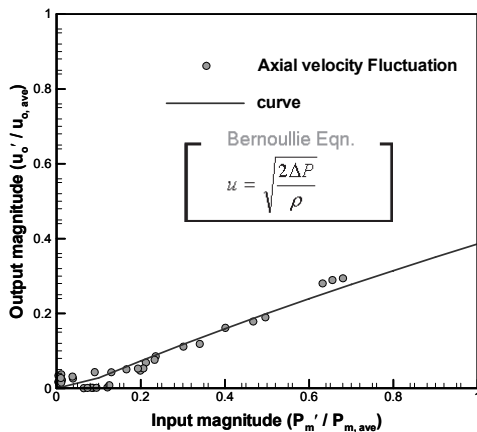
(a) Pressure in the orifice



(d) Mass flow rate through the orifice



(b) Liquid film thickness in the orifice



(c) Axial velocity in the orifice

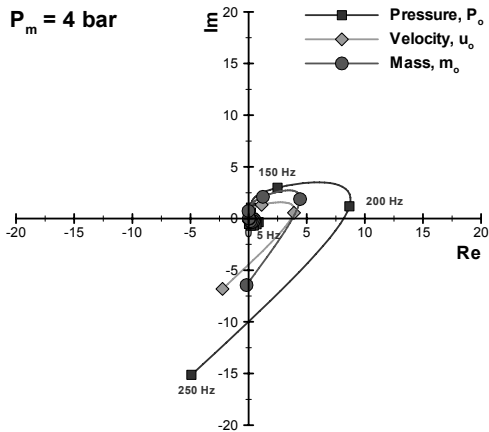
Fig. 7 Input gain effect for parameters obtained in the orifice

는 섭동의 진폭이 커지고 섭동 압력과 주파수가 증가할수록 섭동의 진폭이 감소하기 때문에 본 연구의 실험조건에서는 평균대비 진폭의 크기를 0~80%의 범위 내에서 발생시킬 수 있었다.

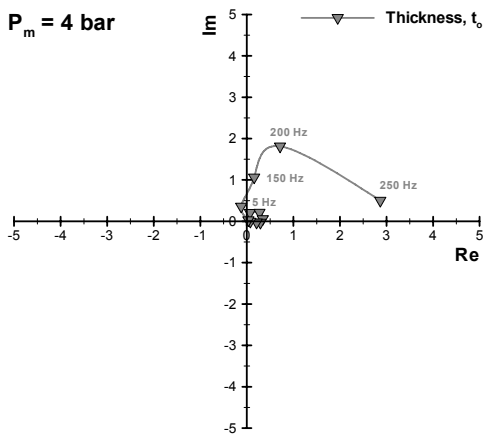
압력(Fig. 7(a))의 경우 매니폴드에서의 압력 진폭에 대해 오리피스에서의 압력 진폭이 0.9의 기울기를 보여주는데, 매니폴드로 들어온 섭동 압력이 탄젠트 유입구, 스웰 챔버, 오리피스를 거치면서 벽면의 저항에 의한 유체의 속도 감소에 의해 약 10%의 압력 감소가 발생하여 입력 대비 90%의 진폭 감소가 발생됨을 알 수 있었다.

액막 두께의 경우(Fig. 7(b)), 평균에 대한 입력 진폭이 80~100%의 결과를 얻지 못해 데이터에 대한 정확한 파형을 얻지 못하였다. Lefevbre에 의하면 액막 두께는 분사압력의 -1/8에 비례하지만, 오리피스를 통과하는 유체의 단면적의 1/4에 비례하기 때문에 Lefevbre에 의해 제안된 식을 Fig. 8 (b)의 결과에 직접적으로 대입할 수 없었기 때문에 아래와 같이 결과에 의한 경험식을 도출하였다[16].

$$\frac{t'_o}{t_{o,ave}} = \left[\frac{P'_m}{P_{m,ave}} + 1 \right]^{0.31} - 1 \quad (8)$$



(a) Pressure, axial velocity and mass flow rate in the orifice



(b) Liquid film thickness in the orifice

Fig. 8 Phase-amplitude diagram for fluctuation frequency increase

축방향 속도의 경우(Fig. 7(c)), 입력진폭이 증가할수록 분사압력의 지수의 1/2배에 비례하게 나타났는데, 이는 베르누이의 법칙에 나타나듯이 속도는 ΔP 의 지수의 1/2배에 비례하기 때문인 것으로 판단된다.

유량의 경우(Fig. 7(d))도 축방향 속도와 마찬가지로 유량은 ΔP 의 지수의 1/2배에 비례하기 때문에 같은 결과를 보여주고 있다.

4.3 위상-진폭 선도

인젝터의 동적 특성을 파악하기 위해 인젝터의 입력과 출력에서 측정된 각 변수들을 FFT를 이용하여 time domain에서 frequency domain으로 변환하여 Fig. 8과 같이 복소평면에 Real 값과 Imaginary 값으로 위상-진폭 선도를 표현하였다. 위상-진폭 선도는 입력과 비교한 출력의 위상과 진폭의 차이를 의미하는데, 원점에서 데이터까지의 거리는 그 섭동주파수에서의 진폭을 나타내고, Real 축과 원점에서 데이터까지 그은 선 사이의 각도는 위상차를 의미한다. 따라서, 이 선도를 획득한다면 특정 주파수에서 발생하는 인젝터 출구에서의 진폭과 위상차를 예측할 수 있다.

Figure 8은 섭동 주파수의 증가에 따른 각 변수들의 선도를 보여주는데 파랑색, 초록색, 회색의 기호는 각각 압력, 축방향 속도, 유량을 나타내고, 적색 기호는 액막두께를 의미하며, 매니폴드에서의 평균 섭동 압력은 4 bar이다. Fig. 8(a)의 경우, 섭동 주파수가 증가함에 따라 선도는 4/4분면에서 시작되어 3→2→1→4/4분면으로 시계방향으로 이동하는 현상이 모든 변수들에서 나타났는데, 입력 섭동을 기준으로 출력이 앞선 섭동을 (-)로 뒤진 섭동을 (+)로 정의하였기 때문에 시계방향으로 이동한 것으로 판단된다. Fig. 8(b)의 경우, 앞의 변수들보다 하나 앞선 1/4분면에서 시작되어 4→3→2→1/4분면으로 시계방향으로 이동하는 같은 현상이 발견되었지만, 시작되는 위치가 앞선 다른 변수들과 다른 이유는 Lefebvre에 의하면 액막두께는 압력에 -1/8의 지수에 비례하지만 오리피스를 통과하는 유체의 면적에도 1/4의 지수에 비례하기 때문에 압력의 영향을 받는 다른 변수들과 달리 180°의 위상차가 아닌 약 90°의 위상차를 보이면서 1/4분면에서 시작되는 것으로 판단된다.

섭동 주파수가 낮은 5~75 Hz의 범위에서는 주파수가 증가함에 따라 모든 변수(p, t, u, m)의 진폭이 점점 감소하였고, 그 이후 250 Hz까지는 점점 증가하게 나타났다. 충돌형 인젝터의 경우 이와 같은 압력섭동이 발생되면 속도가 느린 앞

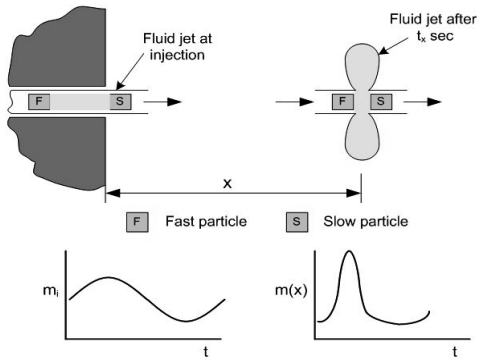
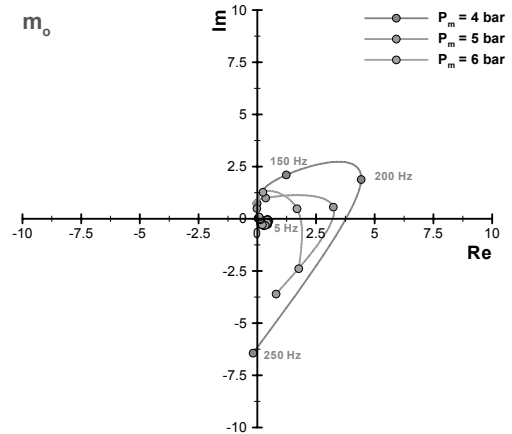
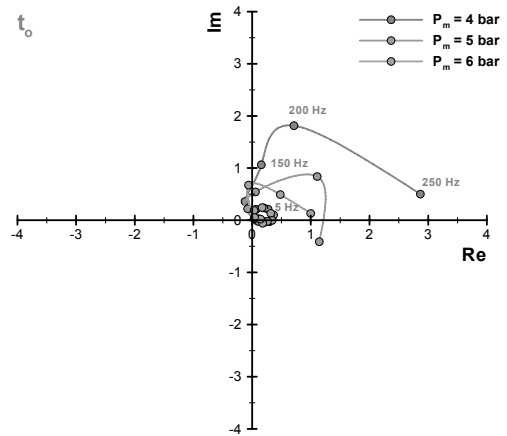


Fig. 9 Klystron effect

선 유체를 속도가 느린 뒤집 유체들이 따라잡아 유량이 급격히 증가하고 감소되는 Fig. 9처럼 klystron effect가 발생된다[2]. 본 스윙형 인젝터에서도 섭동 주파수 75 Hz를 기준으로 그 전의 낮은 주파수에서는 공급되는 압력 섭동에 의한 진폭이 섭동 주파수가 증가함에 따라 감소되는 현상이 그대로 유지되어 인젝터 출구에서의 변수들의 진폭 또한 점점 작아졌지만, 그 이후의 높은 주파수에서 이 현상이 발생되어 인젝터 입구에서 공급되는 섭동 압력에 의한 변수들의 진폭이 인젝터 출구에서 중첩에 의한 증가가 발생되어 섭동 주파수가 증가함에 따라 진폭의 증가가 발생되는 것으로 판단된다. 섭동주파수가 증가할 경우 오리피스에서 측정된 각 변수들의 파형에 의해서도 Fig. 9의 유량 그래프처럼 같은 형상의 파형이 관찰되었고, 고속카메라에 의해 분무된 스프레이를 촬영한 Heister 등의 연구결과에 의하면 이러한 klystron effect가 이미지상에서도 확인되었다고 보고되었다[10]. 또한, 기체-액체 인젝터를 사용하여 동특성 연구를 진행했던 O.V. Arkadyevich의 결과에 의하면 섭동 주파수가 증가함에 따라 내부의 액체 모의추진체의 진폭은 증가했지만, 외부의 기체 모의추진체의 효과에 의해 증가하던 액체 모의추진체의 진폭이 특정주파수 이상에서는 감소하게 나타났다고 보고되었다[19]. 그러나, Bazarov 교수의 이론 연구 결과에서는 초기 저주파 영역에서는 진폭이 증가하지만, 특정 주파수 이상에서는 다시 감



(a) Mass flow rate through the orifice



(b) Liquid film thickness in the orifice

Fig. 10 Phase-amplitude diagram for injection pressure increase

소하는 결과를 보이고 있다[7].

Figure 10은 분무 압력 증가에 따른 액막두께와 유량의 선도를 보여주는데 적색, 녹색, 주황색은 각각 4, 5, 6 bar을 의미한다. 분무압력이 증가함에 따라 압력섭동 발생장치에서 발생하는 평균압력에 대한 섭동의 진폭이 감소하기 때문에 선도상에서도 점차 감소하는 결과를 보였지만, 위상차는 큰 변화를 보이지 않았다. 오리피스에서의 측정된 다른 변수들인 압력, 축방향 속도는 Fig. 10(a)의 유량선도와 섭동 진폭에서만

차이가 날뿐 같은 형태를 보였고, Fig. 10(b)에 나타낸 것처럼 액막두께의 경우도 마찬가지로 분무압력이 증가함에 따라 진폭이 감소하는 현상이 발생되었지만 다른 변수들처럼 4/4분면에서 시작하지 않고 위상앞섬 현상으로 인해 1/4분면에서 시작되었다.

5. 결 론

연소불안정 현상을 인젝터를 이용하여 제어할 수 있다는 개념 하에 단일 스윙 인젝터의 동적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 특정 범위의 압력섭동을 인젝터에 공급하기 위해 기계적 압력 섭동 발생장치와 인젝터 출구에서의 유량 섭동 값을 얻기 위해 실시간으로 변동하는 유량을 측정할 수 있는 기법이 선행 연구에 의해 개발되었고, 본 연구에서는 이를 이용하여 압력 섭동이 인젝터에 공급되었을 때, 인젝터 출구에서 발생하는 유량 및 압력, 액막두께, 축방향 속도에 대한 섭동 값들을 획득하여 각 변수들에 대한 위상-진폭 특성을 알아보았다.

섭동 주파수 증가에 따른 위상-진폭 특성으로써, 위상의 경우 오리피스에서 각 변수들의 섭동이 매니폴드에서의 압력 섭동보다 위상뒤짐 현상이 발생하여 4/4분면을 기준으로 시계방향으로 이동하는 현상이 발생되었고, 액막두께의 경우만 압력과 유체면적의 영향으로 인하여 1/4분면에서 시작되는 것으로 분석되었다. 진폭의 경우 특정 섭동 주파수인 75 Hz까지는 섭동 압력의 진폭감소로 인하여 모든 변수들에서 점점 감소하는 현상이 발생되었지만, 그 이후의 섭동 주파수 범위에서는 klystron effect의 영향으로 인하여 점차 증가되는 것으로 판단된다.

섭동 평균 압력 증가에 따른 위상-진폭 특성으로써, 위상의 경우 공급되는 섭동 평균 압력에 큰 영향을 받지 않아 섭동 주파수에 따라 큰차이를 보이지 않았지만, 진폭의 경우 압력섭동 발생장치에서 공급되는 섭동 평균 압력이 증가함에 따라 평균압력 대비 진폭의 크기가 감소하기

때문에 이 현상이 그대로 전달되어 감소하는 현상이 관찰되었다.

이상과 같이, 압력 섭동이 발생되었을 경우 인젝터의 출구에서의 변수들이 섭동 주파수에 따라 각기 다른 변화를 보이기 때문에 인젝터를 이용하여 연소불안정 현상을 제어하는 연구를 위해서는 인젝터의 동특성 연구가 반드시 필요함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 소형위성 발사체(KSLV-1) 개발사업과 교육과학기술부의 특정기초사업(R01-2007-000-11071-0) 및 우주기초원천기술개발사업(0498-20080028), 항공우주신기술연구소의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Culick, F.E.C. and Yang, V., "Overview of Combustion Instabilities in Liquid-Propellant Rocket Engine," AIAA progresses in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, 1995, pp.3-38
2. Harrje, D. J. and Reardon, F. H., "Liquid Propellant Rocket Instability," NASA SP-194, 1972
3. Rubinsky, V.R., "Combustion Instability in the RD-0110 Engine," AIAA progresses in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, 1995, pp.89-112
4. Bazarov, V., "Self-Pulsations in Coaxial Injectors with Central Swirl Liquid Stage," 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, CA, July 10-12, 1995
5. Bazarov, V., "Influence of Propellant Injector Stationary and Dynamic Parameters on

- High Frequency Combustion Stability," 32nd AIAA/ASME./SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Lake Buena Vista, FL, July 1-3, 1996
6. Bazarov, V. and Yang, V., "Liquid-Propellant Rocket Engine Injector Dynamics," Journal of Propulsion and Power, Vol. 13, No. 5, 1998
 7. Bazarov, V., "Liquid Injector Dynamics," Mashinostroenie, Moscow, 1979
 8. Wilson, M., Lineberry, D.M. and Moser, M.D., "Experimental Pulsator Characterization for Liquid Injector Research," 45th AIAA/ASME./SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Denver, Co, August 2-5, 2009
 9. Bazarov, V., Lee, E., Lineberry, D., Swanner, B. and Frederick, R.A., Jr., "Pulsator Designs for Liquid Rocket Injector Research," 43rd AIAA/ASME./SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Cincinnati, OH, July 8-11, 2007
 10. Ahn, B., Ismailov M. and Heister, S.D., "Forced Excitation of Swirl Injectors using a Hydro-Mechanical Pulsator," 45th AIAA/ASME./SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Denver, Co, August 2-5, 2009
 11. Yang, Li-jun, and Fu, Qing-fei, "Theoretical Study of Dynamic Characteristic of Open-End Liquid Swirl Injector," IAC-06-C4.P.3.09, 2006
 12. Im, J., Kim, D., Han, P., Yoon, Y. and Bazarov, V., "Self-Pulsation Characteristics of Gas/Liquid Swirl Coaxial Injector," Atomization and Sprays, Vol. 19, No. 1, 2009, pp.57-74
 13. Khil, T., Kim, S., Cho, S. and Yoon, Y., "Quantification of the Transient Mass Flow Rate in a Simplex Swirl Injector," Measurement Science and Technology, Vol. 20, No. 7, 2009
 14. D'souza, A.F. and Oldenburger, R., "Dynamic response of fluid lines," Journal of Basic Engineering, Vol. 86, 1964, pp. 589-598
 15. Yokota, S., Kim, D.T. and Nakano, K., "An approach to unsteady flow rate measurement utilizing dynamic characteristics between pressure and flow rate along a pipeline," JSME International Journal, Vol. 35, Ser C, 1992, pp.591-597
 16. Lefebvre, A.H., "Atomization and Sprays," Hemisphere Publishing Corporation, 1989
 17. Suyari, M. and Lefebvre, A.H., "Film Thickness Measurements in a Simplex Swirl Atomizer," Journal of Propulsion and Power, Vol. 2, No. 6, 1986, pp.528-533
 18. 김성혁, 김동준, 윤영빈, "스윙 인젝터에서의 액막두께 측정에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제10권, 제2호, 2006, pp.70-77
 19. Orlov Vladimir Arkadyevich. , "Stationary and Dynamic Characteristics of the Carburetion of Gas-Liquid Injectors in Liquid Propellant Rocket Engine, Thesis of the scientific degree, Mowcow, 2001, Russia