

축방향 압력섭동에 의해 발생하는 저주파 수력학적 교란이 단일 스월 인젝터에 미치는 영향 분석

길태옥* · 김성혁* · 김현성* · 윤영빈†

Spray Characteristics of Simplex Swirl Injector with Low Hydrodynamic Disturbance Generated by Pressure Fluctuation in Feed Line

Taeock Khil, Sunghyuk Kim, Hyeonsung Kim and Youngbin Yoon

Key Words: Spray Characteristics(분무특성), Liquid Film Thickness(액막 두께), Spray Cone Angle (분무각), Pressure Fluctuation(압력섭동)

Abstract

The low frequency combustion instability phenomena generated by pressure drop oscillation such as propellant shake in feed line are studied. To generate the flowrate oscillation by the pressure pulsation up to 400Hz without flow discontinuities and cavitations, a hydrodynamic mechanical pulsator of rotating disk type was produced. Injection pressure conditions are 5, 7 and 9 bar and pressure fluctuation frequency conditions are 0, 4, 6 and 8 Hz. When the injection pressure was oscillated by a mechanical pulsator, the spray shape was pulsated regularly. During the pulsated state of the spray with a mechanical pulsator, the spray characteristics, such as spray angle and liquid film thickness in orifice exit, were measured and compared with those in steady state without a mechanical pulsator. Though the mean injection pressure was fixed in the steady and fluctuating state, there were some differences in all measured values, i.e. liquid film thickness and spray cone angle, between both states.

기호설명

	ω	각 주파수 ($=2\pi f$)	[Hz]
	t	시간	[sec]
P	K, S_0	인젝터 전단에서 발생한 압력섭동 스월인젝터의 기하학적 상수	
P_0	A_p	평균 공급압력 유입구 면적	[m ²]
P'	D_s	공급압력 섭동 진폭 스월챔버 직경	[m]
Y	d_0	각 측정위치에서 측정된 섭동 오리피스 직경	[m]
Y_0	h	각 측정위치에서 측정된 평균 측정값 액막 두께	[m]
Y'	α	각 측정위치에서 측정된 섭동 진폭 분무각	[degree]
	\dot{m}_l	액체의 질량유량	[kg/s]
	μ_l	액체의 동점성계수	[Ns/m ²]
	ρ_l	액체의 밀도	[kg/m ³]
	\dot{D}_a	오리피스에서 출구방향 각운동량 플럭스	
	\dot{D}_e	오리피스에서 입구방향 각운동량 플럭스	

(2006년 9월 8일 접수 ~ 2006년 9월 19일 심사완료)

*서울대학교 기계항공공학부

†윤영빈, 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부

서울대학교 항공우주신기술연구소

E-mail : ybyoon@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1904 FAX : (02)887-2662

1. 개요

저주파 연소불안정 현상은 연소챔버와 연소 챔버에서의 압력변화에 의한 추진제 유량 섭동과의 상호작용에 의해 발생된다. Chug라고 불리는 이 저주파 연소불안정 현상은 수백 Hz이하에서 발생되는데 추진제 및 산화제 유량에 영향을 미치게 되고, 이로 인해 인젝터 내에서의 유동도 불규칙하게 변화한다. 또한 인젝터를 통해 분사되는 추진제의 분무과정과 액적 형성에 악영향을 끼쳐 불안정한 연소 현상을 유발한다. 따라서, 인젝터의 압력차(ΔP)를 증가시키거나, 유체 공급관의 길이 대 직경비(L/D)를 증가시켜 교란을 억제시키거나, 연소 챔버의 부피를 감소시키는 등의 방법을 통해 제어하고 있다^(1,2,3). POGO 연소불안정 현상은 저주파 연소불안정 현상의 일부로서, 추진제의 흔들림 등에 의해 공급라인에서 발생하는 압력 섭동에 의한 추진제 유량 섭동에 의해 발생되는데, 매우 작은 주파수 범위($\leq 35\text{Hz}$)를 가지며 축방향의 섭동을 발생시킨다. 이를 제어하기 위해 공급라인에 억제기를 설치하여 사용되고 있다⁽³⁾.

러시아의 Bazarov는 고주파 영역에서 압력과 유량과의 관계를 표현하는 전달함수와 위상각을 제트 오리피스와 스웰 인젝터에 대해 이론적으로 유도하였으며, 인위적인 섭동발생장치를 제작하여 실험을 통해 이를 입증하였다⁽⁴⁾. 그러나, POGO 연소불안정과 같이 매우 작은 주파수에서 발생하는 현상에 대해서는 지금까지 주로 분석적인 방법이나 제어적인 방법에 대해서만 연구가 진행되고 있을 뿐, 수력학적 분무 특성에 대한 연구는 보고되고 있지 않다. 만일, 수력학적 분무 특성에 대한 이해가 선행된다면 이를 제어하는 과정에도 큰 어려움이 없으리라 판단된다.

따라서 본 연구에서는 압력섭동에 의해 유량변동이 발생하는 인위적인 섭동발생장치를 제작하여 매우 작은 주파수의 섭동이 발생되었을 때의 분열 과정, 액막 두께 및 분무각의 변화와 같은 수력학적 분무 특성에 대해 알아보았다. 또한, 이를 통하여 인젝터 동특성을 파악하는데 중요한 인자인 위상각과 진폭 분석을 통해 압력섭동이 액막두께 및 분무각에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

2. 이론 연구

Figure 1처럼, 로켓 구조물에서 섭동이 발생하게 되면

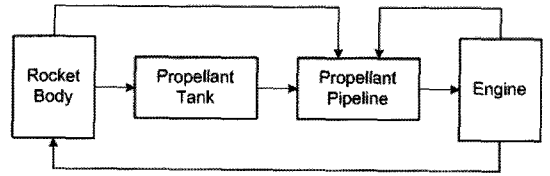


Fig. 1 Block diagram of pogo instability in rocket propulsion system

, 이는 추진제 탱크에 영향을 발생시키고, 추진제 탱크에서 발생된 섭동은 다시 인젝터까지의 공급라인에 축방향 섭동과 인젝터 내부에서의 축방향 섭동을 유발시킨다. 인젝터 내부에서 섭동이 발생되면 분무특성이 변하게 되고, 이는 연소챔버에서의 연소불안정 현상을 유발하게 되는 것이다. 이를 POGO 연소불안정이라 부르는데, 이때의 섭동 주파수는 매우 낮은 범위이고, 주로 로켓 구조물과 추진 시스템과의 고유주파수를 비교함으로써 연소불안정 현상을 예측할 수 있다.

그러나 이를 수력학적 관점에서 분석해보면, 다음과 같은 형태를 지니게 된다.

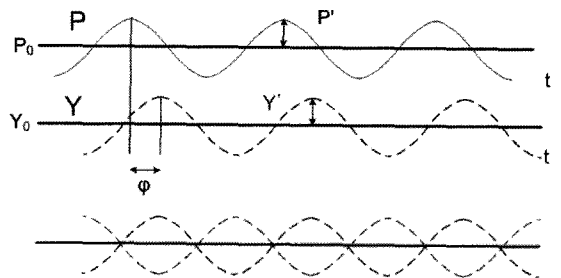
$$P = P_0 + P' \cos \omega t \quad (1)$$

이때, P는 인젝터 전단에서 발생한 압력섭동을 의미하고, P_0 는 평균 압력, P' 은 섭동 진폭을 의미한다.

인젝터 전단에서 발생한 압력 섭동은 분사특성에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 압력섭동과 같은 주파수로 인젝터를 통해 스프레이로 전파하게 된다. 따라서, 인젝터 내부의 탄젠트 유입구, 스웰챔버, 오리피스에서도 같은 주파수가 측정 될 것이다.

압력섭동 발생 후, 일정거리가 지난 지점, 인젝터 오리피스나 오리피스 하단 스프레이에서 섭동을 측정할 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y = Y_0 + Y' \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$



Out of phase state

Fig. 2 Phase difference at measuring point

여기서 Y 는 각 측정지점에서 측정된 섭동을 의미한다. 예를 들면, 인젝터 오리피스에서의 유량이나 액막 두께, 스프레이에서의 분무각도 등을 의미한다. Y_0 는 평균 측정치를 Y 은 섭동 진폭을 나타낸다.

식 (1)과 (2) 사이에 ϕ 만큼의 차이가 발생하는데, 이는 특정 거리를 통과하면서 발생하는 현상으로서 위상차라고 부르며 Fig. 2에 나타내었다.

만일 각 측정위치에서 위상각을 알 수 있으면, 인젝터 전단에서 섭동이 발생되었을 때, 각 측정위치에서 이 섭동을 out-of-phase로 제어하여 연소불안정이 발생하는 것을 제어할 수 있을 것이다.

3. 실험 장치

3.1 수력학적 진동발생기

공급라인에서 압력 섭동을 발생시키기 위한 수력학적 진동발생기를 Fig. 3처럼 제작하였다. 진동발생기의 내부는 회전 원판과 연결관의 두 부분으로 구성되어 있다.

Figure 4는 진동 발생기 내부의 진동발생 메커니즘을 보여준다. 연결관의 홀과 회전 원판의 홀이 만나지 않으면, 진동발생기 내부의 모든 액체는 인젝터로 향하게

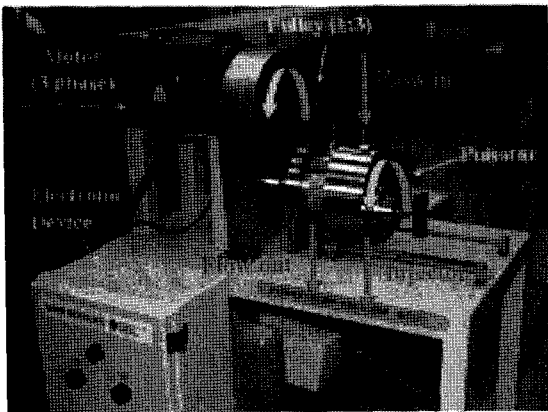


Fig. 3 Hydrodynamic mechanical pulsator

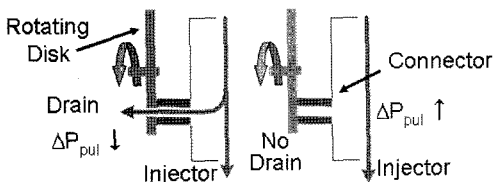


Fig. 4 Working process of hydrodynamic mechanical pulsator

Table 1 Frequency Range of Pulsator

Type (Hole #)	Frequency Range (Hz)
A (40)	40~400
B (20)	20~200
C (16)	16~160
D (10)	10~100(3~8)

되어 초기 압력을 유지하게 된다. 하지만, 연결관의 홀과 회전 원판의 홀이 만나게 되면 일부는 회전 원판을 통하여 외부로 유출되고, 일부는 인젝터로 향하게 된다. 따라서 외부로 유출되는 액체에 의해 압력의 감압이 발생하는 것이다. 이런 방식에 의해 압력섭동에 의한 액체 유량의 섭동이 발생된다.

Table 1은 회전 원판과 연결관의 종류와 발생 주파수 범위를 보여준다. 회전 원판과 연결관은 직경과 개수가 다른 4가지 타입으로 구성되어 있어서 10~400 Hz의 범위의 압력섭동 주파수를 구현할 수 있다. 또한, 회전 원판을 회전시키기 위해 사용된 모터(3상, 2000W)와 풀리의 교체에 의해 10 Hz 이하의 주파수도 발생시킬 수 있다. 본 실험에서는 매우 낮은 주파수의 분무특성을 파악하기 위해 D형의 회전 원판과 연결관을 사용하였다. 실험에 사용된 수력학적 진동발생기는 러시아의 Bazarov 교수와 공동으로 제작하였다⁽⁴⁾.

3.2 액막 두께 측정

공급라인에서 압력 섭동이 발생하였을 때, 오리피스 내에서 액막 두께의 변화를 알아보기 위해 액막 두께 측정장치가 부착된 인젝터를 제작하였다. 스웰 인젝터의 액막 두께 측정은 분사 각도, 분열 길이 및 액적 크기 등의 분무 특성을 이해하기 위해 꼭 필요한 측정값이다. 지금까지 액막 두께를 측정하기 위해 많은 방법들이 제안되었지만 정확한 측정값과 측정방법의 어려움 등으로 인하여 현재까지는 수치적 방법과 이론적 접근에 의존하고 있다.

Kutty 등은 압력에 대한 분사 각도와 air core의 직경의 변화를 알아보기 위해 사진 기법을 사용하였고⁽⁵⁾, Jeng 등은 large-scale의 투명한 인젝터를 사용하여 사진 기법에 의해 액막 두께를 측정하였다⁽⁶⁾. Suyari와 Lefebvre는 오리피스 끝단에 위치한 두 개의 전극사이의 전기 전도도의 변화를 이용하여 액막 두께를 측정하였다⁽⁷⁾.

Figure 5는 본 실험에서 사용된 인젝터와 액막 두께 측정장치에 대한 개략도를 보여준다. 인젝터는 단일 스

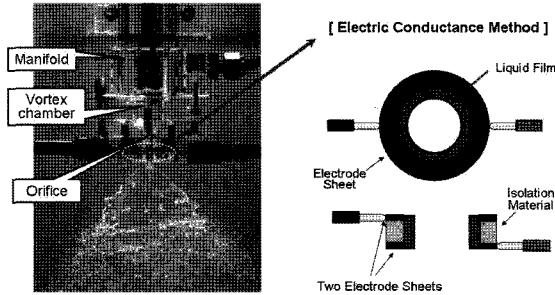


Fig. 5 Schematics of a simplex swirl injector & electric conductance method

월 인젝터로서 3개의 탄젠트 유입구를 가진다. 액막 두께는 Lefebvre의 방법처럼 오리피스에 장착된 두 개의 전극 사이의 전기 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⁽⁸⁾.

3.3 실험 조건

Figure 6은 스프레이 이미지, 공급 압력, 액막 두께 등의 데이터를 얻기 위해 구성한 시스템을 보여준다. 스프레이의 순간 이미지를 얻기 위해 고속카메라를 이용하였고, 인젝터의 탄젠트 유입구 전단의 매니폴드에서 압

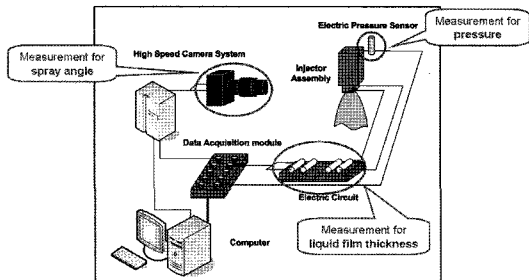


Fig. 6 DaTa Acquisition System

Table 2 Experimental Conditions

Geometric Conditions [mm]	Diameter	Length
Tangential Entry	1	
Vortex Chamber	18	19
Orifice	6	30

Flow Conditions		
Injection Pressure [bar]	5, 7, 9	
Pressure Frequency [Hz]	0, 4, 6, 8	

력센서를 이용하여 공급압력을 측정하였으며, 오리피스 내에 설치된 전극에 의해 얻어지는 전압을 얻기 위해 전기회로를 사용하였다. 3가지 데이터는 모두 동기화하여 획득되었다.

Table 2는 실험 조건을 보여주는데, 공급압력은 5, 7, 9 bar이고 압력 섭동의 주파수는 0, 4, 6, 8 Hz로 실험하였다. 스프레이의 순간 이미지를 얻기 위해 고속카메라 (Photron, FASTCAM Ultima APX Imager)를 이용하여 초당 6000장의 이미지를 획득하였으며, 모의 추진제로서 물을 사용하였다.

4. 실험결과

4.1 정상상태 분무특성

일반적으로, Fig. 7과 같이 정상상태에서 스월 인젝터에서 탄젠트 유입구를 통해 들어온 액체는 스월 챔버를 통과하면서 스월 특성을 지니고 오리피스를 통해 인젝터 외부로 배출된다. 오리피스를 통해 배출된 액체는 탄젠트 방향의 속도에 의해 스월 형태를 유지하면서 액막을 형성하고, 천공에 의해 액막이 얇아지거나 원주형태의 액주로 분열되고 난 뒤, 액적으로 분열이 이루어진다. 이 때, 분열 길이, 분사 각도, 액막 두께, 액적 크기 등은 시간에 따라 변화하지 않는다.

액막 두께는 인젝터에서 배출될 때 오리피스에서의 오리피스의 액막의 두께로서 정의하고, 분무각도는 오리피스로부터 오리피스 끝단에서 일정길이에 위치한 스프레이의 외형에 직선으로 그은 양 방향 두 선의 사이 각도로 정의한다^(9,10).

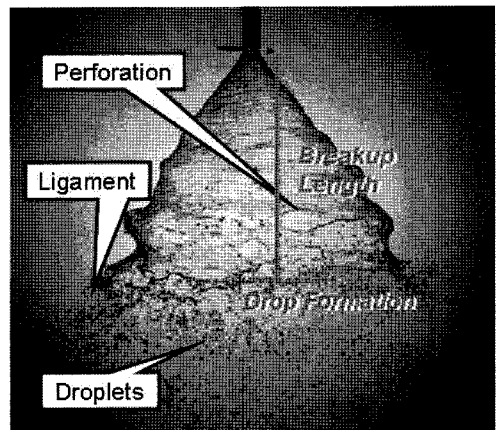


Fig. 7 Breakup process of swirl injector on steady state

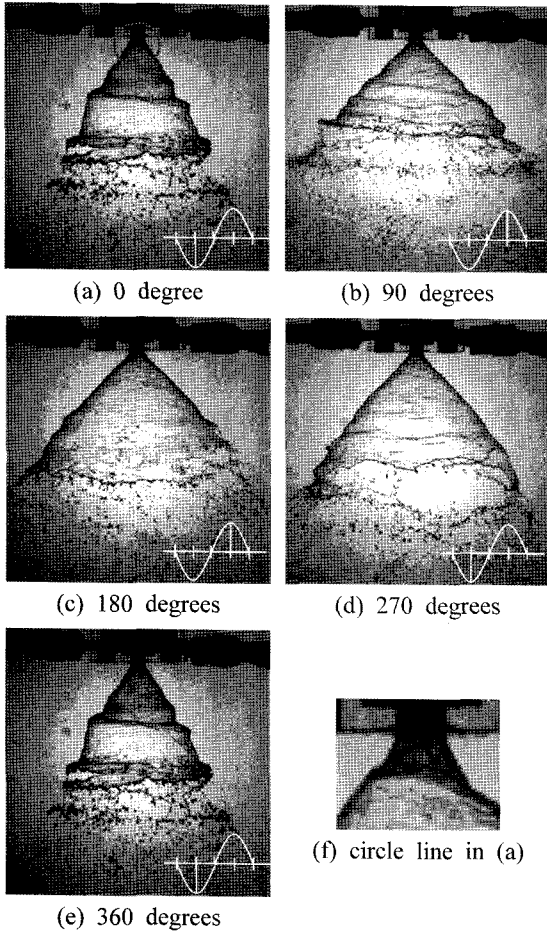


Fig. 8 Spray patterns by pressure fluctuation

4.2 압력섭동에 따른 분무특성

공급라인에서 압력 섭동에 의해 수력학적 교란이 발생되었을 때, 분무특성은 압력 섭동 주파수에 따라 주기적으로 변화한다. Fig. 8은 압력 섭동이 발생되었을 때의 한 주기 동안의 스프레이 형상을 보여주는데 이때의 평균 공급압력과 압력섭동 주파수는 각각 7 bar, 4 Hz이다.

공급압력이 증가함에 따라 스프레이는 충만한 콘 형태를 보였으나, 공급압력이 감소함에 따라 수축되어 얇은 액막의 형태를 보였다. Fig. 8의 하단에 위치한 파동 그래프는 각 이미지별 압력의 위치를 보여준다. 예를 들면, Fig. 8(a)는 0° 나타내는데 공급압력이 가장 작을 때를 의미하고, Fig. 8(c)는 180°로써 공급압력이 가장 클 때를 의미한다. Fig. 8(b)와 (d)는 각각 90°와 270°로써 압력이 증가하고 감소되는 구간을 보여주고, Fig. 8(e)는 다시 원점으로 돌아와 0°와 같은 형상이 된다. 다른 실험

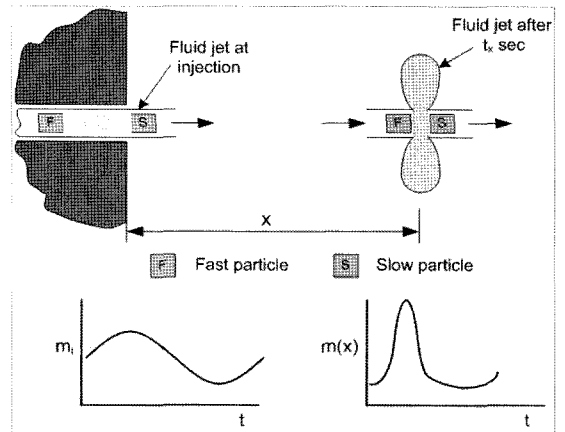


Fig. 9 Klystron effect

힘 조건인 5 bar와 9 bar의 경우도 공급압력의 최대와 최소치의 차이에 의해 분무 형상이 약간의 차이를 보이는 했지만 분무 패턴의 차이는 보이지 않았다.

Figure 8(a), (f)의 경우, 가장 작은 분무 형상을 보이지만, 오리피스 출구에서의 두께는 어두운 색으로 두껍게 나타났다. 공급압력이 가장 작을 경우, 유량 또한 가장 적지만, 공급압력이 증가함에 따라 추진제의 유량 또한 증가하기 시작한다. 이 때, 증가된 속도를 지닌 액체가 그 전의 작은 속도를 지닌 액체를 따라 잡으면서 두 액체가 서로 중첩되어 유량의 증첩 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 이를 Klystron Effect이라 부르며 Fig. 9에 표현하였다. 이 Klystron Effect는 ‘Christmas tree’나 ‘Pagoda’ Effect로 불리며 주로 충돌형 인젝터에서 많이 관측되어 저주파나 중주파 연소불안정 현상을 유발한다^(1,11).

4.3 압력섭동에 의한 액막 두께

4.3.1 전기 전도도 방법의 정확성

압력섭동이 오리피스에서의 액막 두께 변화에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 액막 두께는 전기전도도 측정에 의해 이루어졌기 때문에, 우선 전기전도도 측정법의 정확도에 대해 점검하였다. 전기전도도는 두 전극사이로 유입된 물의 두께에 따라 변화하기 때문에, 일정한 두께를 지닌 아크릴 재질의 삽입봉을 다양한 직경으로 제작하여 오리피스 내에 삽입하고, 오리피스와 아크릴 삽입봉 사이에 물을 채워 그때의 전압을 측정하여 calibration을 수행하였다. Fig. 10은 calibration을 수행한 후, 정상상태에서 공급압력에 따른 액막 두께를 보여준다.

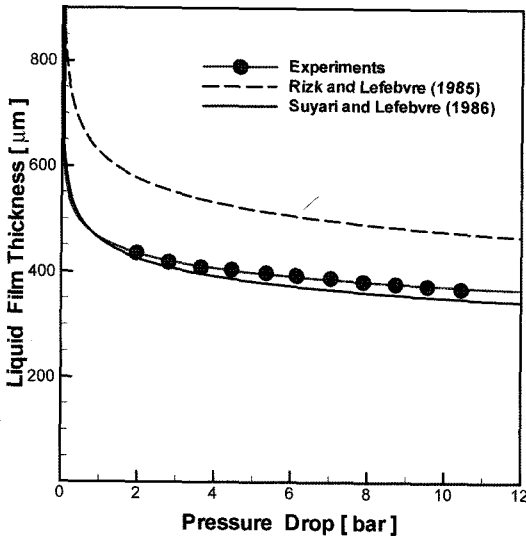


Fig. 10 Influence of water injection pressure

Calibration 결과는 Rizk & Lefebvre의 결과와는 큰 차이를 보이지만^(12,13), 이를 수정하여 현재까지 어느 정도 신뢰성을 가진 Suyari 등의 결과와는 거의 비슷한 결과를 보여주었다⁽⁷⁾. 따라서, 전기전도도 측정장치에 대한 신뢰를 갖고 실험에 사용할 수 있었다.

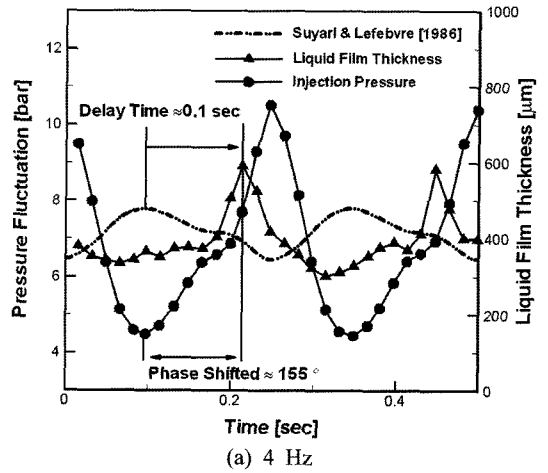
4.3.2 압력섭동 주파수 영향

압력섭동이 발생하였을 때, 공급압력의 섭동주파수에 대한 액막 두께의 영향에 대해 알아보았다. Simmons 등은 액막 두께가 $P^{-0.5}$ 에 비례한다고 하였으며⁽¹⁴⁾, Rizk 등과 Suyari 등은 $P^{-0.25}$ 에 비례한다고 하였다^(7,12,13). 따라서, 공급압력이 증가하면 액막 두께는 감소하고, 공급압력이 감소하면 액막 두께는 증가하게 된다.

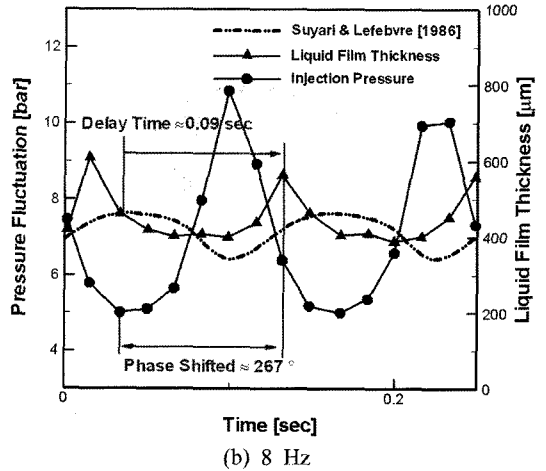
Fig. 11은 압력섭동에 대한 실험결과를 보여준다. 둥근 기호(●)는 매니폴드에서 측정된 공급압력을 나타내고, 세모 기호(▲)는 오리피스에서 측정된 액막 두께를 의미하며 점선(---)은 아래와 같이 Suyari 등의 경험식에 매니폴드에서 측정된 공급압력을 대입하여 얻은 결과를 보여준다.

$$h = 2.7[(d_0 \dot{m}_l \mu_l) / (\rho_l \Delta P_l)]^{0.25} \quad (3)$$

Suyari 등의 결과는 기존 연구자들의 연구결과와 마찬가지로 압력에 반비례하는 결과를 보였다. 즉, 공급압력(●)이 증가하면 액막 두께는 감소하고(---), 공급압력이 감소하면 액막 두께는 증가하는 현상을 보였다. 그러나 Suyari 등의 결과(---)와 실제 측정된 오리피스에서



(a) 4 Hz



(b) 8 Hz

Fig. 11 Frequency effect on film thickness, $\Delta P_{ave} = 7$ bar

의 액막 두께(▲)를 비교해보면 진폭에 있어서 큰 차이를 보이고 있다. 위에서 언급한 Suyari의 경험식을 보면, 정상상태에서의 질량 유량이 포함되어 있다. 이곳에 측정된 유량을 대입하여 액막 두께를 계산해야 하지만, 오리피스에서의 섭동하는 유량을 직접적으로 측정하기 어렵기 때문에 탄젠트 유입구에서 측정된 공급압력으로 유량을 계산하여 대입하였기 때문에, 직접적으로 측정된 액막 두께(▲)와 큰 차이를 보이는 것으로 판단된다.

또한, 측정된 액막 두께(▲)의 변화는 공급압력에 직접적으로 반비례하게 나타나지 않고, 일정한 시간 차이를 보이면서 반비례하게 나타났다. Fig. 11에서 알 수 있듯이, 우측으로 측정위치에 따른 지연시간(delay time)이 발생된 것이다. 공급압력과 액막 두께를 측정된 탄젠트 유입구와 오리피스 사이에 측방향으로 길이차가 발생하기 때문에 지연시간이 발생된 것이다. 평균 공급압력이

7 bar의 경우, 지연시간(delay time)은 미소한 차이는 있었지만 대략 0.1 sec로 나타났다.

발생된 지연시간을 환산하여 위상 차이를 분석해보면, 4 Hz의 경우, 위상변화각은 155°이고, 8 Hz의 경우 267°였다.

4.4 압력섭동에 따른 분무각

압력섭동이 스프레이에서 분무각 변화에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 시간에 따른 분무각 변화를 필요로 하기 때문에, 고속카메라를 사용하여 획득된 모든 순간 이미지에 대해 분석을 수행하였다. 한 장의 이미지에 대해 포토샵 프로그램을 이용하여 edge detection을 통해 테두리를 설정하였고, Matlab 프로그램을 사용하여 오리피스 출구로부터 3.5 cm 하방에서 양방향의 테두리를 획득하였다.

Taylor는 분무각은 오로지 스웰 챔버 형상에 의해서

결정되기 때문에 추진제 유입 직경과 스웰챔버와 오리피스의 직경의 비, $K=A_p/D_s d_o$ 에 의한 함수로 제안하였다⁽¹⁵⁾. Giffen 등은 비점성 가정하에 이론적으로 분사 반각을 유도하였으며⁽¹⁶⁾, Horvay 등은 실험을 통해 Reynolds 수에 의한 각운동량 플럭스를 구하여 마찰을 고려한 경험식 제안하였다⁽¹⁷⁾. 또한, Rizk 등은 Taylor의 이론과 추진제 특성을 고려하여 분무각을 유도하였다⁽¹³⁾.

Figure 12는 압력섭동 주파수에 대한 분무각 변화를 보여준다. 앞서 보인 액막 두께 결과와 달리 측정된 분무각의 결과가 공급압력에 따라 정현파의 모습을 보이지 않고 있는데, 이는 측정위치에 따라 분무각의 변화가 다르기 때문으로 판단된다. 따라서, 측정위치를 다양하게 하여 분석을 해야 하지만, 본 논문은 정확한 분무각 변화값을 분석하는 것이 아니라 위치에 따른 위상각 변화를 분석하는 것이기 때문에 측정위치에 대한 변화를 수행하지 않았다. Fig. 12에서 둥근 기호(○)는 매니폴드에서 측정된 공급압력을 나타내고, 세모 기호(△)는 오리피스 출구 하단에서 측정된 분무각을 의미하며, 점선(- · -)은 아래와 같이 Horvay 등의 경험식에 매니폴드에서 측정된 공급압력을 대입한 결과를 보여준다. 지금까지 가장 널리 사용하고 있는 Rizk 등의 경험식을 사용하지 않은 이유는 Horvay 등의 경험식이 각운동량 모멘텀을 통하여 점선방향 속도를 보다 사실적으로 표현하고 있기 때문이다.

$$\tan \alpha = 1.3 S_0 [D_a / D_e] (1 - m^*) = \frac{w_a}{u_a} \quad (4)$$

Horvay 등의 결과는 압력에 비례하는 결과를 보였다. 공급압력(○)이 증가하면 분무각도는 증가하고(- · -), 공급압력이 감소하면 분무각도 또한 감소하였다. 그러나 Horvay 등의 결과(- · -)와 측정된 분무각(△)을 비교해보면 액막 두께와 마찬가지로 진폭에 있어서 차이를 보이고 있다. Horvay의 경험식을 보면 오리피스에서의 air-core의 직경이 포함된다. 이곳에 앞서 측정된 오리피스에서의 액막 두께를 이용하여 air-core의 직경을 대입하였다. 액막 두께에서도 유량에 의해 큰 차이를 보였기 때문에 이 값을 그대로 사용한 Horvay 등의 식에서도 마찬가지로의 결과가 나타난 것으로 생각된다.

Figure 12에 보인 것처럼 분무각 결과에 있어서, 우측으로 측정위치에 따른 지연시간(delay time)이 발생하였다. 액막 두께 결과와 마찬가지로의 이유로 지연시간이 발생된 것이다. 평균 공급압력이 7 bar의 경우, 4, 6, 8 Hz 모두 지연시간(delay time)은 대략 0.11 sec로 나타났다.

발생된 지연시간을 환산하여 위상 차이를 분석해보면,

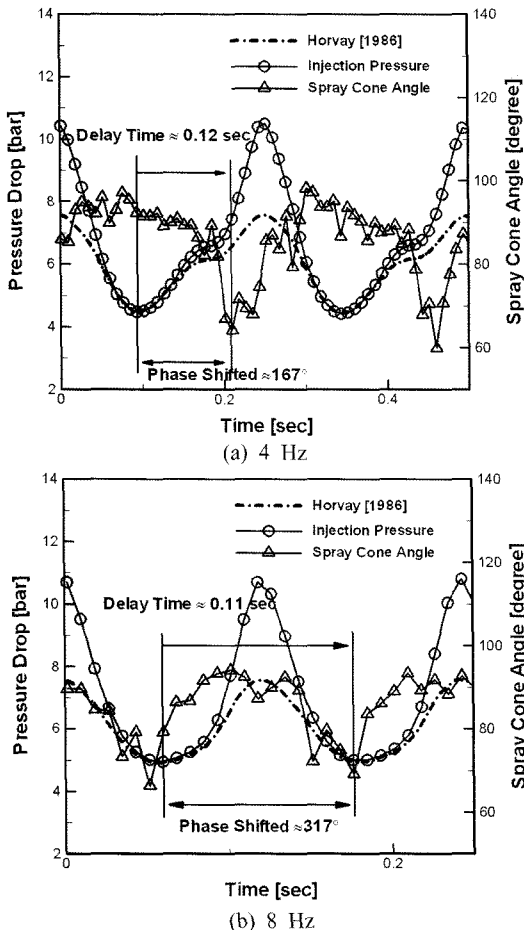


Fig. 12 Frequency effect on spray cone angle, $P_{ave} = 7$ bar

Fig. 12에 나타난 것처럼 4 Hz의 경우, 위상변화각은 167°이고, 8 Hz의 경우 317°였다.

4.5 압력섭동에 따른 위상각 변화

앞서 획득한 액막 두께와 분무각에 대해 위상각 변화를 분석하였다. Fig. 13은 압력섭동 주파수에 대한 위상각 변화를 보여준다. Fig. 13(a)는 액막 두께에 대한 결과이고, (b)는 분무각에 대한 결과이다. 액막 두께와 분무각 모두 주파수가 증가함에 따라 위상각 변화가 증가하였는데, 각 측정위치에서 일정 압력에 대해 8 Hz가 4 Hz에 비해 주기가 두 번 반복되기 때문에 위상각은 약 2배 정도 증가한 것으로 판단된다. 또한, 5 bar 8 Hz의 조건을 제외하고는 평균 공급압력이 증가함에 따라 위상각의 차이

는 감소하였다. 공급압력에 대한 경향성이 모두 일치하는 것으로 보아 주파수에 따른 위상각 변화는 그대로 유지되지만 공급압력이 증가함에 따라 유체의 속도가 증가하기 때문에 위상각이 감소한 것으로 판단된다.

액막 두께에 대한 위상각의 변화 범위는 $100^{\circ} \leq \phi \leq 250^{\circ}$ 로서 분무각에 대한 위상각의 범위 $150^{\circ} \leq \phi \leq 300^{\circ}$ 보다 작게 나타났다. 위상각의 측정은 인젝터로 공급되는 탄젠트 유입구에서의 압력을 기준으로 각 측정위치에서의 섭동을 측정하기 때문에 액막 두께를 측정하는 오리피스보다 분무각을 측정하는 스프레이에서의 거리가 더 멀기 때문에 당연히 분무각에 대한 위상각이 액막 두께에 대한 위상각보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

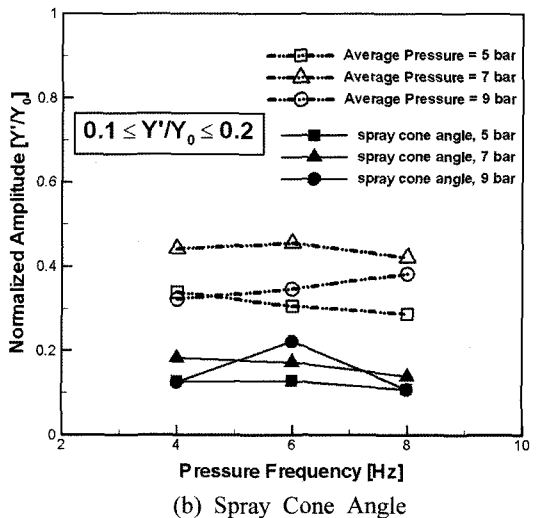
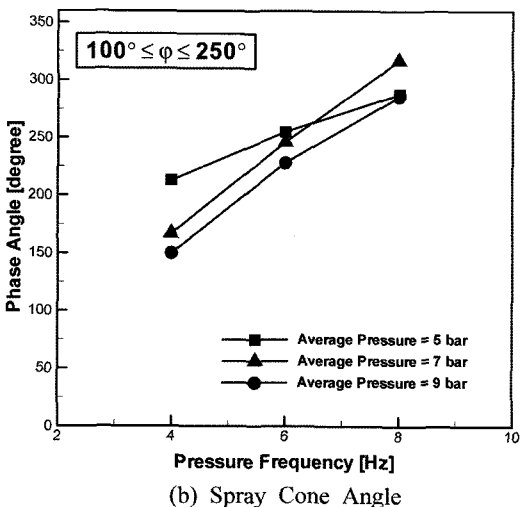
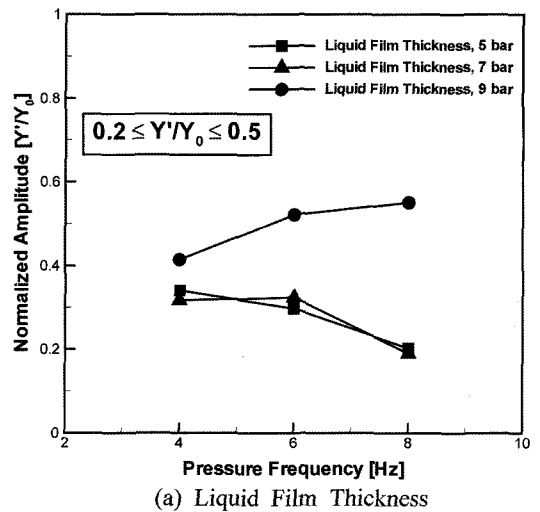
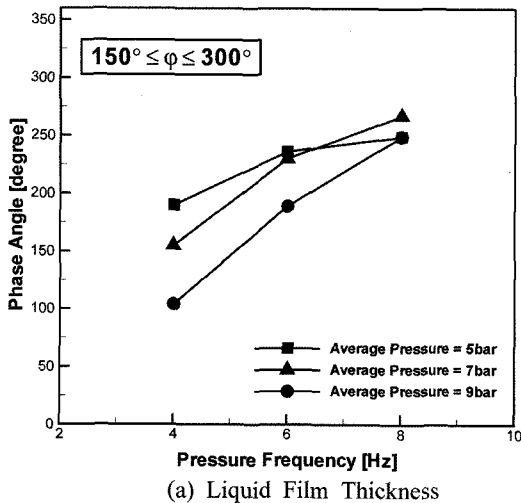


Fig. 13 Frequency effect on phase shift angle

Fig. 14 Frequency effect on amplitude

4.6 입력섭동에 따른 진폭 변화

액막 두께와 분무각에 대해 진폭 변화를 분석하였다. Fig. 14는 섭동 진폭을 평균 측정값으로 일반화시킨 그래프를 보여준다. Fig. 14 (a)는 액막 두께에 대한 결과이고, (b)는 분무각에 대한 결과이다. 점선(-·-)은 공급압력을, 실선(—)은 각각 액막 두께와 분무각을 나타낸다.

실험 전 압력조건에 대해 주파수가 변화하더라도 인젝터에 흐르는 유량을 일정하게 유지시켰기 때문에, 5→7→9 bar의 공급압력 증가에 따라 일정한 경향성은 보이지 않지만 주파수 변화에 상관없이 압력섭동의 진폭은 일정하게 나타났다. 주파수 변화에 따라 공급압력의 진폭이 일정하기 때문에 공급압력의 함수로서 표현되는 액막 두께나 분무각의 진폭 또한 일정하게 나타나야 한다. 따라서 Fig. 14에 표현되었듯이 다소 차이는 보이지만 액막 두께나 분무각 모두 주파수 변화에 따라 일정한 진폭을 보였고, 차이가 발생한 이유는 실험방법의 오류로 판단된다.

주파수 변화에 따라 일정한 압력섭동 진폭의 크기가 평균치의 약 40 %의 변화를 보이는 것에 대해 액막 두께의 경우 $20\% \leq 50\%$ 의 변화를 보이고, 분무각의 경우 $10\% \leq 20\%$ 의 변화를 나타내었다. 액막 두께와 분무각 모두 공급압력의 함수로서 표현되는데, 위의 결과에 의하면 압력섭동에 대해 분무각보다 액막 두께가 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

5. 결 론

인위적인 압력섭동 발생장치를 제작하여 공급라인에서 발생된 압력섭동이 단일 스월인젝터에서 스프레이의 분열과정과 오리피스에서의 액막 두께, 스프레이에서의 분무각에 미치는 영향에 대해 알아보았고, 이를 통해 인젝터 동특성의 가장 중요한 특성치인 위상각과 진폭 변화에 대해 분석하였다.

1) 압력섭동이 발생하면 분무 특성 또한 압력섭동의 주파수와 마찬가지로 같은 주파수를 가지며 주기적으로 변화하였다. 공급압력이 증가함에 따라 스프레이는 층만한 콘 형태를 보였으나, 공급압력이 감소함에 따라 수축되어 얇은 액막의 형태를 보였다.

2) 동특성으로서 위상각은 액막 두께와 분무각 모두 주파수 증가에 따라 증가하는 경향성을 보였다. 액막 두께와 분무각의 위상각을 비교한 결과, 분무각의 위상각

이 액막 두께보다 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

3) 진폭변화에 대한 결과로서 일정 압력하에서 주파수 변화에 따라 유입되는 액체의 유량을 일정하게 유지시킨 결과, 압력섭동의 진폭 및 액막 두께와 분무각의 진폭 모두 일정하게 유지되었다. 액막 두께와 분무각의 진폭변화는 액막 두께의 진폭변화의 크기가 분무각의 진폭변화보다 크게 나타났고, 이를 통해 압력의 영향은 분무각보다 액막 두께에 더 크게 작용한다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업(MI-0104-0058)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) D. J. Harrje and F. H. Reardon, "Liquid Propellant Rocket Instability", NASA SP-194, 1972.
- (2) D. K. Huzel and D. H. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 147, 1992.
- (3) H.S. Jang, "A Study on the Analysis of Pogo and Its Suppression", M.S. Thesis, KAIST, 2002.
- (4) V. G. Bazarov, "Liquid Injector Dynamics", Moscow, Mashinostroenie, 1979.
- (5) S. Kutty, "Design and Prediction of Discharge Coefficient, Cone Angle and Air Core Diameter of Swirl Atomizers", 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Tokyo, Japan, Aug, 1978, pp. 93-100.
- (6) S. M. Jeng, M. A. Jog and M. A. Benjamin, "Computational and Experimental Study of Liquid Sheet Emanating from Simplex Fuel Nozzle", AIAA Journal, Vol. 36, No. 2, 1998.
- (7) M. Suyari and A. H. Lefebvre, "Film Thickness Measurements in a Simplex Swirl Atomizer", Journal of Propulsion and Power, Vol. 2, No. 6, 1986, pp. 528-533.
- (8) S. Kim, D. Kim and Y. Yoon, "Liquid Film Thickness Measurement for a Swirl Injector", Journal of KSPE, Vol. 10, No. 2, 2006.

- (9) A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- (10) L. Bayvel and Z. Orzechowski, "Liquid Atomization", Taylor & Francis, 1993.
- (11) F. E. Fenwick and G. J. Bugler, "Oscillatory Flame Front Flow Rate Amplification through Propellant Injection Ballistics (The Klystron Effect)", 3rd ICRPG Combustion Conference, CPIA Pub., No. 138, Vol. 1, 1967.
- (12) N. K. Rizk and A. H. Lefebvre, "Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers", Journal of Propulsion and Power, Vol. 1, No. 3, 1985, pp. 193-199.
- (13) N. K. Rizk and A. H. Lefebvre, "Prediction of Velocity Coefficient and Spray Cone Angle for Simplex Swirl Atomizer", Proceedings of International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 1985.
- (14) H. C. Simmons and C. F. Harding, "Some Effects of using water as a Test Fluid in Fuel Nozzle Spray Analysis", ASME paper 80-GT-90, New Orleans, 1980.
- (15) G. I. Taylor, "The Mechanics of Swirl Atomizers", 7th International Congress of Applied Mechanics, Vol. 2, No. 1, 1948, pp. 280-285.
- (16) E. Giffen and A. Murszew, "Atomization of Liquid Fuels", Chapman and Hall, 1953.
- (17) M. Horvay and W. Leuckel, "Experimental and Theoretical Investigation of Swirl Nozzles for Pressure Jet Atomization", German Chem. Eng. Vol. 9, pp. 276-283, 1986.