

충돌형 분사기의 동특성 실험연구

김지욱^a · 정연재^a · 이인규^a · 윤영빈^{a,*}

Experimental Study on Dynamic Characteristics of an Impinging Jet Injector

Jiwook Kim^a · Yunjae Chung^a · Ingyu Lee^a · Youngbin Yoon^{a,*}^aSchool of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

ABSTRACT

Research on dynamic characteristics of injectors gives us insight for preventing combustion instability in a rocket engine. While lots of studies have been done about swirl injectors' dynamic characteristics, little is known about impinging jet injectors' dynamic characteristics. For this reason, this study was aimed to reveal the dynamic characteristics of an impinging jet injector based on experiment using a hydraulic mechanical pulsator. Gain, which is the relationship between input pressure and output value (pressure or velocity) was analyzed with the frequency and manifold pressure change. Pulsating frequency was chosen in the low range: 5, 10, 15 Hz. As a background work, Methods to determine the jet velocity were discussed. Klystron effect was also considered as a factor of this experiment.

초 록

로켓의 연소불안정과 관련되어 분사기의 동특성을 연구하는 일은 중요하다. 와류형 분사기의 동특성에 대해서는 많은 연구가 이루어졌지만 충돌형 분사기의 동특성에 대해서는 알려진 바가 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 충돌형 분사기의 동특성을 규명하기 위해 이에 관한 실험을 수행하였으며 동적 거동을 생성시키기 위해 특별히 제작된 압력섭동기(mechanical pulsator)가 사용되었다. 가진주파수와 매니폴드 압력의 여러 조건 하에서 게인(gain)과 위상차(phase difference)를 분석하였고 주파수는 5, 10, 15 Hz의 낮은 영역에 맞춰졌다. 제트 속도를 결정하기 위한 방법에 대해 논의하였으며 실험과정 중에 나타난 특정현상이 클라이스트론(Klystron) 효과와 관련이 있는 것으로 판단되어 이에 대해 고려하였다.

Key Words: Impinging Jet Injector(충돌형 분사기), Dynamic Characteristics(동특성), Mechanical Pulsator(압력섭동기), Gain(게인), Klystron Effect(클라이스트론 효과)

Received 29 November 2012 / Revised 10 August 2013 / Accepted 17 August 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 22-23, 여수 디오션리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

로켓의 연소불안정은 다양한 원인에 의해 일

어날 수 있다. 연료 공급부의 오작동이나 구조물의 진동으로 인한 기계적인 결합, 연료 공급부와 연소실 사이의 상호작용에 의해 발생하는 압력 섭동, 또는 연소실에서의 음향학적인 공진에 따른 불안정 등이 그 원인이다.

그리고 이러한 연소불안정 현상은 다양한 주파수 범위에서 일어나는데 작게는 수 Hz에서 크게는 수천 Hz까지 이른다. 10~400 Hz 정도의 범위에서 일어나는 불안정은 낮은 주파수 영역으로 분류되는데 주된 원인은 연료공급시스템과 연소실 사이의 압력차에 의한 상호작용 때문이다. 400~1000 Hz까지는 중간 영역으로 구분되고 분사기나 추진기관의 기계적인 진동이나 추진계 공급부의 공진현상에서 원인을 찾을 수 있다. 1000 Hz 이상의 주파수는 고주파 불안정으로 분류하고 연소과정에서 일어나는 연소실의 음향학적인 공진특성에 기인한다[1].

로켓을 이루는 구성품들은 서로 유기적으로 작동하기 때문에 한 곳에서 발생한 문제는 다른 부품에까지 영향을 미치게 된다. 특히, 연료공급 라인에서 발생한 압력섭동은 연료의 불균일한 분사를 초래하고 이에 따라 연소실에서 비효율적이고 불안정한 연소를 일으킨다. 이 때 연소에 의해 발생한 불안정 주파수가 연소실의 고유주파수와 일치하게 되면 공진이 일어나게 되고 불안정현상은 증폭된다. 또 연소실 압력의 변화는 반대로 연료공급부의 압력에 영향을 미치게 되고 이는 분사기의 불균일한 연료분사를 심화시킬 수 있다. 따라서 연소불안정을 억제하기 위해서는 각 부품간의 상호작용 특성을 잘 파악하여 한쪽의 압력섭동이 더 증가되지 않는 쪽으로 설계해야 한다.

그 중에서 가장 중요한 부분이 로켓의 연료분사기이다. 연료분사기는 연료를 미립화하여 연소실로 분사할 뿐만 아니라 연료공급시스템과 연소실 사이에 위치해 각각의 압력섭동을 서로에게 전달해주는 구실을 하고 있다. 한 쪽에서 일어난 교란을 다른 쪽으로 전달하는 과정에서 진동의 감쇠가 잘 일어날수록 보다 안정적인 연소가 일어날 수 있다. 이런 이유로 로켓연료분사기의 동특성에 대한 연구가 주목받고 있다. 러시아

에서는 Bazarov 연구진을 필두로 하여 활발히 연구가 진행되고 있고 이에 영향을 받아 전 세계적으로도 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 연구실에서도 압력섭동기(mechanical pulsator)를 이용하여 압력가진을 주었을 때의 분사기 동특성을 연구하고 있다[2, 3, 4]. 하지만 지금까지 압력섭동기를 통해 분석이 이루어진 분사기의 종류가 와류형 분사기(swirl injector)에만 한정되어 있고 충돌형 분사기에 대한 동특성 연구는 이루어진 것이 많지 않다. 충돌형 분사기는 와류형 분사기와 함께 로켓분사기에 주로 쓰이는 분사기이기 때문에 그 중요성이 와류형 분사기 못지 않다. 따라서 충돌형 분사기의 동특성에 대한 연구 또한 필요하다. 이러한 배경 아래, 본 연구에서는 이원 동종 충돌형 분사기(like-doublet injector)를 이용하여 압력 가진주파수와 분사압에 따른 분사특성을 알아보고자 하였다. 정상상태에서의 유량계수와 압력에 따른 분사속도 등을 바탕으로 가진상태에서의 분무이미지, 분사속도의 변화, 입력 대 출력 비 등에 대해 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 제트 분사기는 Fig. 1처럼 동특성 분석을 위해 매니폴드, 노즐 시작부분, 끝부분에 각각 압력 탭을 뚫어 압력을 측정할 수 있도록 제작하였다.

매니폴드에서 노즐로 유체가 흘러들어가는 부분에서 급격한 유로 변화에 의한 압력손실을 막

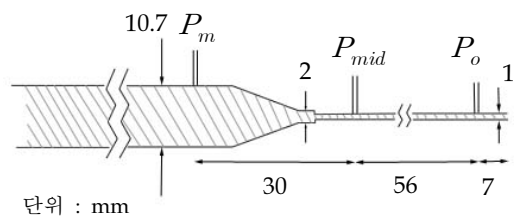


Fig. 1 Cross section of jet injector.

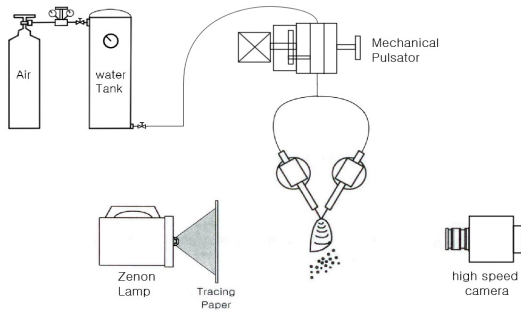


Fig. 2 Experimental setup.

기 위해 점진적인 직경변화를 주었고 처음에 10.7 mm(≒1/2")이던 직경에서 2 mm로 유로가 좁아지고 최종적으로 직경 1 mm인 노즐 안으로 유체가 흘러들어간다.

실험장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 앞서 언급한 제트 분사기 두 개를 비스듬히 마주 보도록 설치하고 물탱크와 분사기 사이에 압력센동기를 설치하여 압력가진이 전달되도록 한다. 분무형상은 초고속 카메라를 이용하여 촬영하였다.

2.2 실험조건

정상상태에서 분사압에 대한 유량을 측정하여 분사속도를 구하였다. 그리고 압력센동기를 통해 가진을 준 상태에서는 분사압을 2 bar 에서 5 bar까지 변화시키면서 각 지점에서의 압력을 측정하였다. 가진 주파수는 5, 10, 15 Hz의 세 가지 경우에 대해 실험을 하였고 분사각은 30도, 충돌전 거리는 1.8 cm로 하였다. 분사액체는 물로 하였다. 이를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.3 압력데이터 처리방법

분사기 세 지점에서의 압력을 샘플링속도 200 kHz로 1초 동안 기록하였다. 데이터 10개씩 평균을 내어 노이즈를 감소시켰고 FFT를 통해 각 지점의 압력섭동의 진폭과 위상을 구하였다. 이와 함께, 다음 장에 기술하는 속도 계산방식으로 속도섭동을 계산하여 매니폴드 압력섭동에 대한 게인(gain)과 위상차(phase difference)를 산출해냈다.

Table 1. Experimental condition.

Steady Condition	
injection pressure	1 ~ 8 bar
Unsteady Condition	
parameter	value
average injection pressure	2 ~ 5 bar
excitation frequency	5, 10, 15 Hz
impinging angle (θ)	30°
pre-impinging length	1.8cm
simulant	water

3. 실험결과 및 토의

3.1 정상상태에서의 압력과 속도 관계

본 실험에 쓰인 제트 분사기는 일반적인 충돌형 분사기에 비해 노즐 길이가 긴 편이다. 그 이유는 압력측정을 노즐 끝에서 뿐만 아니라 중간에서도 행함으로써 압력 간의 관계를 보기 위함 이었는데, 노즐길이가 길어지면 노즐구간에서의 압력손실이 증가하게 된다. 특히 지름이 작은 구간에서는 마찰에 의한 영향을 고려해야 하는데, 이는 덕트(duct)에서의 점성유동과 같다고 할 수 있다.

덕트에서의 유체역학에 따르면 지름이 같은 두 지점 간의 압력 차이로부터 속도를 구할 수 있다. 다음은 이와 관련된 관계식이다.

$$\zeta = \frac{gd^3 h_f}{Lv^2}, \text{ where } h_f = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (1)$$

$$Re_d = -(8\zeta)^{1/2} \log_{10} \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{1.775}{\sqrt{\zeta}} \right) \quad (2)$$

(h_f : 마찰수두손실, ζ : 무차원화된 수두손실,
 d : 관의 내부지름, L : 두 지점의 간격,
 ΔP : 두 지점의 압력차, ϵ : 관 내부 거칠기,
 ν : 유체의 동점도)

무차원수 ζ 를 도입하여 덕트에서의 난류유동의 레이놀즈 수를 Eq. 2와 같이 나타낼 수 있는데, ζ 가 주어지면 레이놀즈 수를 구할 수 있고, 따라서 속도를 구할 수 있다[5].

여기서 압력차이 ΔP 는 노즐상단과 노즐하단의 압력차이로부터 구해지고 길이 L 은 마찬가지로 노즐상단과 하단의 거리 56 mm이다. ν 는 물의 동점도($1 \times 10^{-6} m^2/s$)이고 ϵ 는 관 내부의 거칠기를 나타낸다. 아크릴 재질의 ϵ 는 plastic의 거칠기를 참고하여 0.0015 mm로 계산하였다. 이렇게 덕트유동 이론식에 따라 구한 속도값과 질량 측정을 통하여 구한 속도값을 비교해보았다. Fig. 3는 이 두 가지 방법에 의한 속도결과를 보

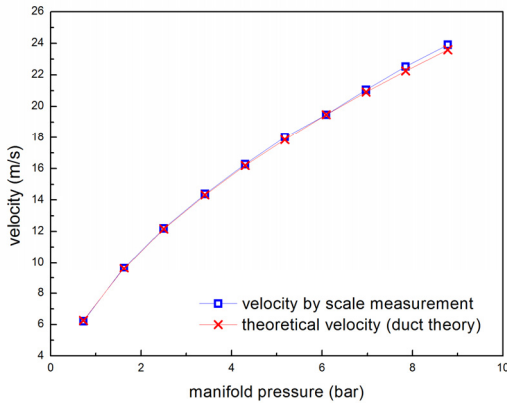


Fig. 3 Comparison between theoretical velocity and velocity calculated by using scale.

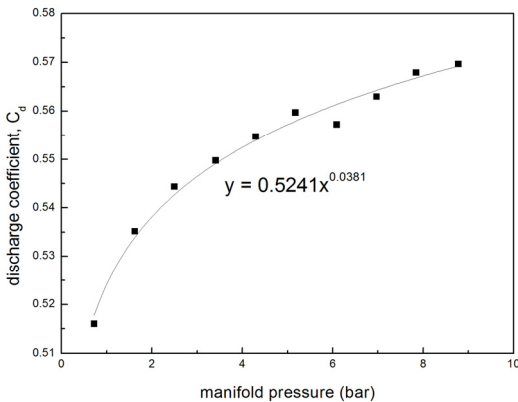


Fig. 4 Discharge coefficient with manifold pressure.

여준다.

한편, 일반적으로 노즐에서의 압력을 측정하지는 않기 때문에 분사압이라 함은 매니폴드에서의 압력을 말하는데, 분사압과 분사속도의 관계를 고려하여 유량계수를 구한다. 유량계수를 분사압에 대해 도표화하면 Fig. 4와 같다. 따라서 분사압을 알면 분사속도를 계산할 수 있다.

정상상태에서는 덕트 이론을 이용해 두 지점의 노즐 압력으로부터 속도를 구하는 방법과 분사압에 유량계수를 곱해 구하는 방식이나 모두 성립한다. 하지만 비정상상태에서도 이 두 가지 방법으로 속도를 구하는 방식이 적용되는지는 알아 보아야한다.

3.2 비정상상태에서의 진동현상

압력섭동기를 통해 압력가진이 주어지면 매니폴드에서의 압력이 진동하게 되고 압력진동은

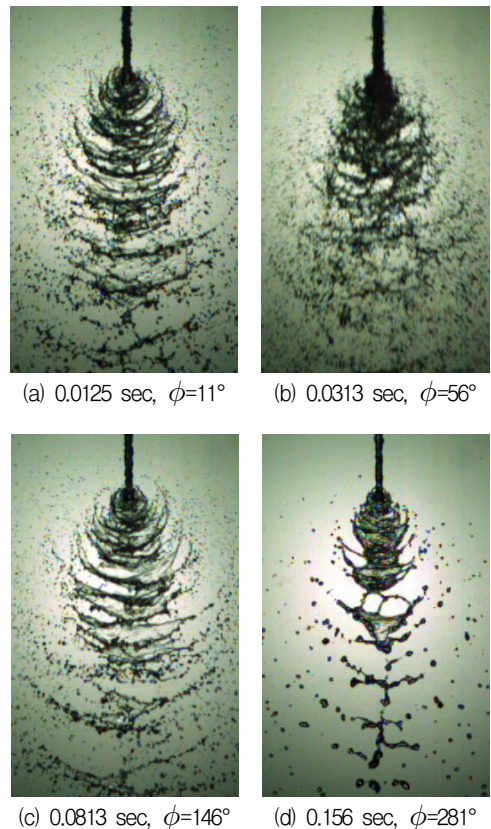


Fig. 5 Spray image of varying impinging jets.

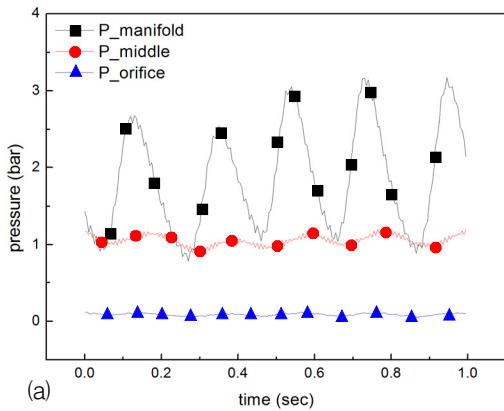
노즐의 상단을 거쳐 하단에게까지 전달된다. 동시에 노즐을 통해 분사되는 제트의 속도 역시 진동하게 되는데 이는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 분무사진에서 분열의 세기가 시간에 따라 바뀌는 것을 통해서 확연히 드러난다.

한편, 매니폴드와 노즐에서의 압력 진동과 제트 속도의 진동 주파수는 가진 주파수와 일치한다. 5 Hz 진동에서는 압력과 속도 모두 1초에 다섯 번의 진동을 하게 된다. Fig. 6는 5 Hz 가진에서 1초 동안 매니폴드와 노즐 상, 하단의 압력이 어떻게 변화하는지 보여준다. 또한 Fig. 5는 Fig. 6(b)의 그래프와 대응되어 촬영한 것으로서 압력변화에 따른 분무형상의 변화를 각 위상별로 확인할 수 있다.

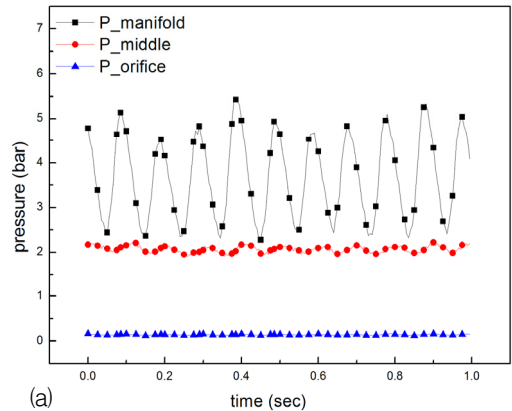
흥미로운 현상 중 하나는 일정한 가진주파수

에서 평균 매니폴드 압력을 높여갈 때, 특정 지점에서 매니폴드 압력의 최고점이 갑자기 치솟는다는 것이다. Fig. 6에서 보는 것처럼, 평균 매니폴드 압력이 1.87 bar일 때는 매니폴드 압력이 사인파의 부드러운 곡선 형태를 띠는 것을 알 수 있다. 하지만 평균 매니폴드 압력이 4.28 bar가 됐을 때는 매니폴드 압력의 최고점이 뾰족하게 치솟는 형태를 띠는 것을 알 수 있다.

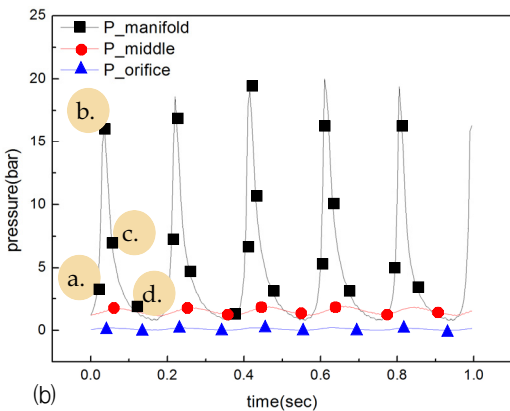
이러한 현상의 원인으로는 Klystron 효과를 생각해볼 수 있다. Klystron 효과는 제트 분사기에 주로 보고되었으며 압력이 커지고 작아지는 과정에서 액체의 속도가 빨라졌다 느려지는 과정이 반복되는 것이다. 앞서서 흐르는 느린 속도 부분을 빠른 속도 부분이 밀게 되면 둘이 서로 압착하려는 힘이 작용하면서 압력이 급격히 상



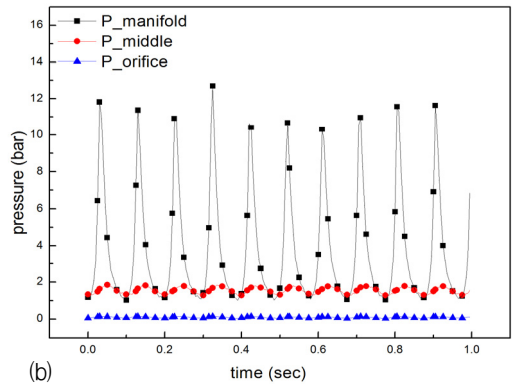
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 6 Pressure oscillation for $f=5$ Hz.

(a) $\overline{P}_m = 1.87$ bar; (b) $\overline{P}_m = 4.28$ bar

Fig. 7 Pressure oscillation at the onset of Klystron effect. ($f=10$ Hz, $\overline{P}_m \cong 3.6$ bar)

(a) without Klystron; (b) with Klystron

승하고 압력이 줄어들면서 속도가 느려지게 되면 앞선 부분의 빠른 속도와 뒷부분의 느린 속도 사이에 공백이 생기면서 압력이 급강하하는 것이다[6]. 가진주파수마다 이 Klystron 효과가 극명히 나타나는 분사압이 조금씩 다른데 5에서 15 Hz로 갈수록 더 높은 분사압에서 Klystron 효과가 나타났다.

특정지점에서 발달하는 Klystron 효과를 입증하기 위해 Fig. 7에 가진주파수 10 Hz 조건에서 Klystron 효과가 발달했을 때와 발달하지 않았을 때의 모습을 나타내었다. 이 경우, 평균 매니폴드 압력 3.6 bar 근처에서 압력이 크게 치솟는 것을 알 수 있다. 즉, 매니폴드 압력의 평균은 같지만 Klystron 효과가 한번 발달하게 되면 압력섭동의 진폭이 급격히 커지는 것을 알 수 있다.

3.3 비정상상태에서의 분사속도

비정상상태에서는 정상상태와는 달리 속도가 시간에 따라 변하기 때문에 유량의 평균값으로 속도를 산출할 수 없으며 압력과 속도관계에 대한 검토가 필요하다. 앞서 정상상태에서 두 가지 방법으로 속도를 구했는데 첫 번째는 덕트이론을 이용한 것이었으며 두 번째는 유량계수를 이용한 것이었다. 비정상상태에서는 이와 더불어 초고속 카메라 측정을 통해 실시간으로 변하는 실제속도를 측정함으로써 비정상상태에서도 이 두 방식의 적용가능성을 살펴보았다.

Fig. 8은 앞선 Fig. 6의 실험조건과 같은 상황에서 초고속카메라를 이용한 속도와 압력을 통해 구한 이론적인 속도값을 나타내었다.

그래프 상에서 V_{manifold} 는 분사압과 유량계수를 이용하여 구한 속도이고 $V_{\Delta P}$ 는 노즐 상단과 하단의 압력차를 이용해 덕트이론으로 구한 속도이다. 일정 부분에서 초고속카메라를 통해 구한 속도값을 도시해봤을 때 실제 속도값에 가까운 속도는 V_{manifold} 임을 알 수 있다. 따라서 계인과 위상차를 구할 때 대입하는 속도로 V_{manifold} 방식을 사용하였다.

3.4 계인(gain)과 위상차(phase difference)

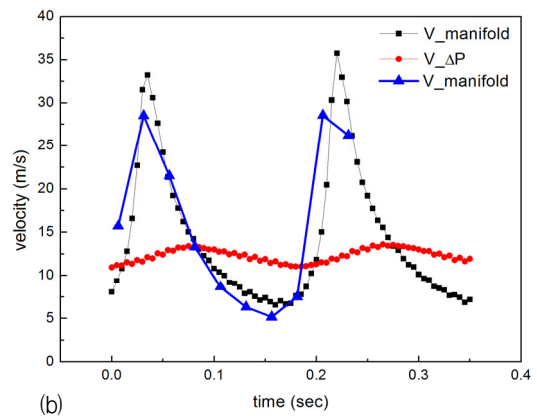
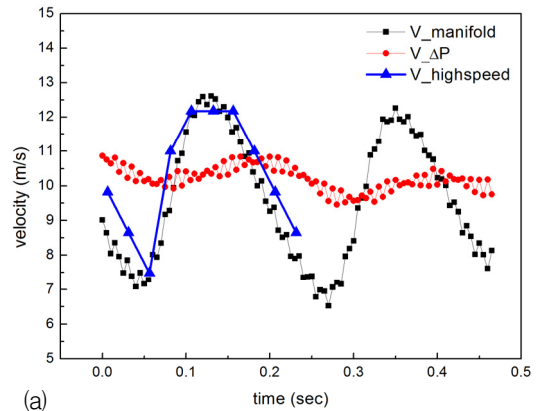


Fig. 8 Velocity oscillation calculation at $f = 5$ Hz.

(a) $\overline{P}_m = 1.87$ bar; (b) $\overline{P}_m = 4.28$ bar

앞선 결과들을 바탕으로 가진 주파수 5, 10, 15Hz에 대해서 분사압에 따른 계인과 위상차를 구하였다.

우선, Klystron 효과에 의해 매니폴드 압력이 뾰족하게 형성되는 경우, 그렇지 않은 경우에 비해서 계인값에서 큰 차이가 난다. 물탱크압력을 올려주면 처음에는 매니폴드 압력이 점점 올라가지만 어느 시점에서 매니폴드 평균 압력이 갑자기 떨어지면서 압력 섭동의 진폭이 급격히 증가할 때가 있다. 이 현상은 Fig. 9에서처럼 주파수 5 Hz일 때는 매니폴드 압력 2.5 bar 부근, 주파수 10 Hz에서는 3.5~3.8 bar 부근, 주파수 15 Hz에서는 4.4~4.5 bar 부근에서 확인할 수 있다. 이 때 노즐 하단 압력 P_0 의 계인 변화를 살펴보면 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다.

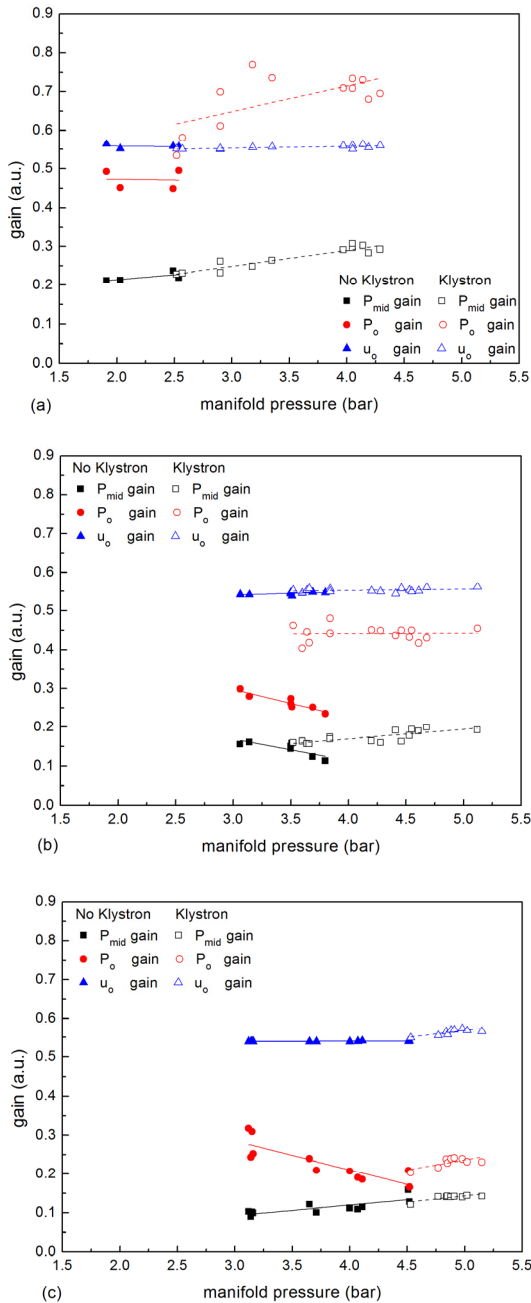


Fig. 9 Gain vs P_m trend. : (a) 5 Hz; (b) 10 Hz; (c) 15 Hz

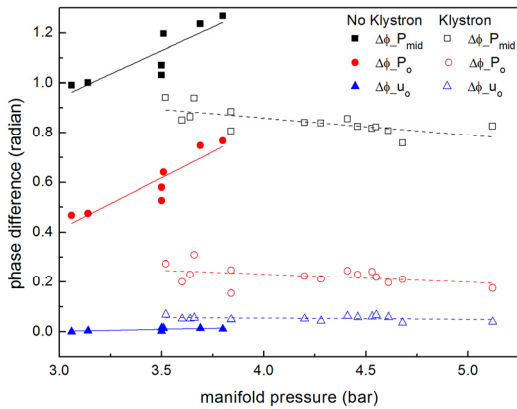
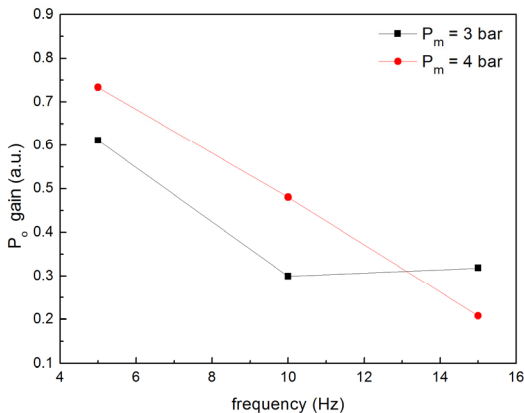
5 Hz의 가진 조건에서는 0.5 정도를 유지하던 게인이 매니폴드 압력 2.5 bar를 기준으로 상승하기 시작하여 0.75 까지의 수치를 보였고 그 후로는 0.65~0.7 정도의 수준을 유지하였다. 10 Hz

가진에서는 낮은 매니폴드 압력에서 점점 감소하는 추세를 보이던 게인값이 갑자기 수직상승하여 0.45 정도의 수치를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 15 Hz의 경우에는 급격한 변화폭을 보이지는 않았지만 감소하던 게인이 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이런 현상의 이유로는 Klystron 효과가 일어나기 전에는 오리피스(노즐 하단)의 압력 진동이 거의 미미하지만 Klystron 효과가 일단 발생하게 되면 오리피스에서의 압력진동이 뚜렷이 발달하기 때문인 것으로 보인다.

한편, 중간지점의 압력게인 P_{mid} 은 모든 주파수에서 거의 일정한 값을 보이거나 매니폴드 압력 증가에 따라 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 중간지점의 압력게인은 오리피스 압력게인과 달리 Klystron 효과가 발달하기 시작하는 구간에서 크게 불연속적이지 않다. 압력진동이 발달함과 동시에 평균압력도 같이 증가하기 때문으로 여겨지는데 근본적인 이유에 대해서는 자세한 검토가 필요하다.

FFT 처리코드의 타당성을 확인하기 위해 Matlab의 curve fitting tool로 FFT fitting을 해본 결과, Klystron 효과에 의해 매니폴드 압력이 뾰족해지면 사인파를 fitting하는 과정에서 진폭이 실제보다 감소하는 것을 확인하였다. 전달함수의 입력항인 매니폴드의 진폭이 실제보다 낮게 잡힐 경우 게인이 상대적으로 증가하기 때문에 이 부분도 게인의 불연속적인 변화에 기여하는 것으로 판단된다.

이론에 의하면 분사속도의 게인은 분사압이 증가할수록 점점 증가해서 최대값이 0.5로 수렴하게 된다[7]. 본 실험에서는 유량계수를 이용해 구한 근사 속도인 관계로 0.5 보다 조금 큰 값이 나온 것을 확인하였고 주파수가 낮은 영역(수~수십 Hz)에서는 분사압에 따른 게인의 변화가 미미하기 때문에 거의 일정한 값을 유지한 것을 확인할 수 있었다. 비압축성, 비점성인 가정 하에서 속도게인은 노즐의 길이에 영향을 받을 뿐, 노즐의 지름과는 상관이 없는데[7] 실제조건에서는 좁은 유로에서의 압력 손실 등이 발생하므로 노즐지름과도 연관이 있을 수 있다. 와류형 분사

Fig. 10 Phase difference vs P_m for $f = 10$ Hz.Fig. 11 P_o gain vs frequency.

기에서는 기하학적 형상이 속도계인에 미치는 영향이 분석된 적 있는 바[8], 충돌형 분사기에서도 이와 같은 추가연구가 필요할 것으로 보인다.

Fig. 10은 가진주파수 10 Hz의 조건에서 매니폴드 압력섭동에 대한 노즐 상, 하단의 압력섭동, 그리고 속도섭동의 위상차를 나타낸다. 그래프를 살펴보면 Klystron 효과가 발달하는 지점에서 위상차가 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다. 주파수 5, 15 Hz의 조건에서도 비슷한 경향을 나타냈다. 분사기의 노즐길이가 압력파동의 파장 길이보다 훨씬 작기 때문에 위상차를 크게 고려하지 않았는데 실제로 위상차가 $\pi/2$ 이상 나지 않는 것을 확인하였다.

한편, 분사압에 대해 도시화했던 데이터들을 주파수에 대해 나타내보았다. Fig. 11은 주파수에 대한 오리피스 압력계인의 경향을 보여준다.

매니폴드 평균압력이 3, 4 bar인 경우를 함께 놓고 봤을 때 주파수 증가에 따라 오리피스 압력계인이 전체적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 부분적으로 봤을 때 매니폴드 압력이 3 bar인 경우, 10 Hz에서의 압력계인이 15 Hz에서보다 작게 나오기도 한다. 오리피스에서의 압력계인은 Klystron 효과에 영향을 받기 때문에 각 지점에서의 Klystron 효과의 발달여부를 살펴볼 필요가 있다. 각 데이터를 살펴본 결과, 3 bar 조건에서는 5 Hz만 Klystron 현상을 나타내며 4 bar 조건에서는 5와 10 Hz에서 Klystron 현상이 나타났다. 즉, 3 bar에서 Klystron 현상을 나타내지 않던 10 Hz에서의 계인이 4 bar에서는 그 현상이 나타나면서 계인이 증가하게 된다. 이에 따라 매니폴드 압력 3 bar에서 주출하는 감소경향이 4 bar에서 확실히 드러남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 압력섭동기를 이용한 가진상태에서의 충돌형 분사기의 동특성을 살펴보았으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 압력변화에 따라 속도가 변할 경우 속도의 크기를 추정할 수 있는 방법이 필요한데, 초고속카메라 촬영을 통해 직접적인 속도를 계산한 결과, 매니폴드의 압력(분사압)을 이용해 계산하는 방법이 가장 유력함을 확인하였다.
2. 매니폴드 압력을 점점 높여가다보면 사인파의 압력곡선이 뾰족한 형태로 바뀌게 되는 현상이 관찰되었는데 이는 압력변화가 있을 때 생기는 Klystron 효과에 의한 것으로 생각된다.
3. 분사압에 따라 계인과 위상차를 구하여 그래프로 나타낸 결과, Klystron 효과가 나타나는 지점에서 불연속적인 계인이 형성됨을 알 수 있었다. 특히 오리피스 압력에서 Klystron 효

과에 따른 계인 증가 현상이 두드러졌다. 중간지점 압력계인 P_{mid} 은 Klystron 효과에 크게 영향을 받지 않은 채 서서히 증가하는 경향을 보여주었고 속도계인 역시 0.5보다 조금 큰 정도의 일정한 값을 유지하였다.

4. 주파수에 따른 계인 분석 결과, 주파수 증가에 따라 계인이 줄어들음을 확인하였다. 매니폴드 압력 3 bar 조건에서는 10 Hz의 오리피스 압력계인이 제일 작았지만 매니폴드 압력 4 bar 조건에서는 10 Hz에서도 Klystron 현상이 발달하면서 감소추세가 뚜렷하게 형성되는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원을 통한 한국연구재단의 지원(NRF - 2011 - 220 - D00023) 및 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. Sutton, Biblarz, *Rocket Propulsion Elements*, Wiley-Interscience, 7th ed, pp. 348-349, 2001.
2. 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, pp. 1-9, 2009.
3. Khil, T., Chung, Y., Bazarov, V., Yoon, Y., "Dynamic Characteristics of Simplex Swirl Injector in Low Frequency Range," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 28, No. 2, pp. 323-333, 2012.
4. Khil, T., Chung, Y., Yoon, Y., "Study on Phase-Amplitude Characteristics in a Simplex Swirl Injector with Low Frequency Range," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 2, pp. 19-28, 2010.
5. Frank M. White, *Fluid Mechanics*, McGrawHill, 6th ed, p. 368, 2008.
6. Harrje, D.T., Reardon, F.H., "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability," NASA SP-194, pp. 117-118, 1972.
7. Bazarov, V., "Liquid Injector Dynamics," *Mashinostroenie*, Moscow, 1979.
8. Chung, Y., Khil, T., Yoon, J., Yoon, Y., "Experimental Study on Simplex Swirl Injector Dynamics with Varying Geometry," *Int'l J. of Aeronautical & Space Science*, Vol. 12, No. 1, pp. 57-62, 2011.