

동적 감쇠자로서 백홀이 저주파 수력진동에 미치는 영향

길태옥* · 김민기* · 김성혁* · 윤영빈*

Effect of Backhole as a dynamic damper for Low Hydraulic disturbance

Taeock Khil* · Minki Kim* · Sunghyuk Kim* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

Dynamic control tests for Backhole as a dynamic damper were performed. For the forced oscillation generated by pressure drop in the feed line and internal wave analysis of swirl injector, hydrodynamic pulsator and 1D visualization model injector was produced, respectively. We focus on effect of Backhole as a dynamic damper instead of a acoustic one. So, the breakup length and film thickness of liquid sheet on the steady state and the forced oscillation state have been measured and compared.

초 록

동적 감쇠자로서 백홀에 대한 동적 제어 테스트를 수행하였다. 공급라인에서 압력 섭동에 의해 발생하는 가진과 스웰 인젝터의 내부 파동 분석을 위해 수력학적 진동발생기와 1차원 가시화 모델 인젝터가 제작되었다. 음향학적 대신에 동적 감쇠자로서 백홀의 영향에 초점을 두었기 때문에 액막의 분열길이와 액막 두께를 측정하여 정상 상태와 가진 상태의 결과를 비교하였다.

Key Words: Backhole(백홀), Breakup length(분열길이), Liquid Film thickness(액막두께), 1D visualization model injector(1차원 가시화 모델 인젝터), Forced oscillation(가진)

1. 서 론

공급라인에서 발생하는 압력 섭동에 의한 저주파 연소불안정 현상은 추진제 및 산화제의 유량에 영향을 미친다[1]. 인젝터에 의해 연소 챔버로 분무되는 추진제 유량의 불규칙적인 변화는 액막 및 액적의 미립화에 악영향을 끼쳐 불

안정한 연소 현상을 유발한다[1][2]. 연소불안정을 제어하기 위한 음향학적인 감쇠자인 백홀을 이용하는 방안이 최근에 시도되고 있다[3]. 그러나, 동적 감쇠자로서 백홀의 영향은 연구되고 있지 못하다. 이에 본 논문에서는 음향학적 뿐만 아니라 동적 감쇠자로서 백홀이 공급라인에서 발생하는 저주파 압력섭동에 의한 유량 변화를 제어할 수 있는지에 대해 알아보기 위해, 1차원 형상 인젝터 모델을 제작하여 내부형상을 관찰

* 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: lunar94@snu.ac.kr

하였고, 액막의 두께를 전압차에 의해 측정할 수 있는 모델 인젝터를 이용하여 액막의 두께와 분열 길이의 변화에 대해 측정하였다[4].

2. 파동방정식 및 실험장치

2.1 1차원 water wave equation

인젝터 내부에서 작용하는 수력학적 특성을 알아보기 위해, 1차원 파동방정식을 사용하였다. Stoker는 물에 대한 파동방정식을 유도하였고, Bland는 수심이 얇은 수로에 대해 조수작용을 강제진동으로 해석하여 진동의 진폭을 이론적으로 계산하였다[5,6].

스웰 인젝터의 탄젠트 입구 벽면을 x축으로, 탄젠트 입구에서 유동흐름 방향을 y축으로 고려한다. 탄젠트 입구에서 air core 까지의 y축 길이(h)는 섭동되는 진폭(η)보다 크지만, 파장(λ)보다는 작기 때문에($\lambda > h > \eta$), y방향 속도는 무시되었고, 표면의 x방향 파동 속도($u = u(x, t)$)와 진폭($\eta = \eta(x, t)$)은 x와 t의 함수로 표현할 수 있고, 1차원 파동 방정식은 다음과 같다[6].

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = gh \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = gh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (2)$$

ξ, η 는 각각 x방향, y방향 변위를 나타낸다.

2.2 실험장치

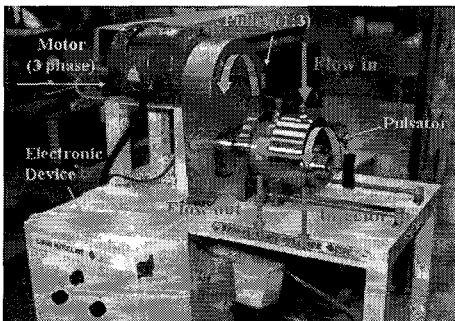


Fig. 1 Hydrodynamic Pulsator

Figure 1은 연소기 전 공급라인에서의 수력학적 진동을 인위적으로 발생시키기 위해 러시아의 Prof. Bazarov와 공동연구로 제작한 수력학적 진동발생기이다. 내부에 일정한 지름과 간격을 갖는 구멍이 뚫린 원판이 회전하여 압력에 의해 유량이 변동하는 원리를 이용하여 유동에 영향을 미치지 않도록 하였다.

회전원판은 총 4종으로 유동 홀의 지름(8, 5, 4, 2mm)과 개수(10, 16, 20, 40)를 다르게 하여 10~400Hz의 가진을 할 수 있다.

가진시 발생하는 분열길이와 오리피스내에서의 액막 두께와 분열길이를 구하기 위해 사용된 인젝터의 스웰챔버와 오리피스의 지름 및 길이는 각각 18, 20mm와 6, 30mm이고 실험조건은 Table 1과 같다[4].

Figure 2는 수력학적 진동발생기에서 발생하는 진동이 인젝터의 유동에 미치는 영향을 알아보기 위한 1차원 가시화 인젝터 모델이다. 탄젠트 입구에서 들어온 유체는 인젝터의 내부 동특성대로 진행하게 되지만, 3차원의 특성이 배제된 1차원만을 고려하면 상압의 대기로 유체가 흐르게 된다. 이때 공급라인상에 저주파 수력 진동발생기를 장착하여 원하는 주파수의 진동을 주게 되면, 라인상에서 발생하는 진동과 같은 주파수

Table 1. Experimental conditions

Variable	Range
Pressure	4, 6, 8, 10 bar
Forced oscillation frequency	0, 10, 20, 30 40 Hz
Backhole Length	0, 5, 10, 15, 20 40 mm

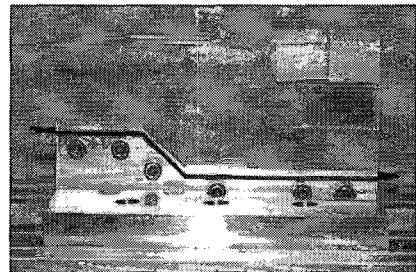


Fig. 2 1D Visualization model injector

의 진동이 1차원 인젝터 가시화장치에서도 발생하게 된다. 압력 섭동에 의한 진동이 발생되지 않았을 때에는 정상상태의 흐름을 보이지만, 진동이 발생되면 주기적인 진폭을 갖는 파동이 유체상에 발생된다. 이때 발생하는 일정한 진폭의 진동을 탄젠트 유입구와 연결된 스웰 챔버내의 벽면(백홀)길이를 변화시켜 수력학적으로 제어할 수 있는지 알아보았다.

순간 이미지를 획득하기 위해 고속카메라(photron社, FASTCAM ultima APX Imager)와 연속광원을 사용하여 초당 3000 frame의 이미지를 획득하였다.

3. 실험 결과

3.1 1차원 가시화 이미지

탄젠트 입구에서 나오는 유량이 증가하거나 압력이 높아지면, 표면에서 자체진동이 발생하기 때문에 실제 가진시 파동의 진폭에 영향을 주게 된다. 따라서, 이를 보완하기 위해 자체진동이 발생하기 직전을 기준으로 압력별 유량을 측정 한 결과 유량이 일정하게 나타났다(7g/s). 유량이 일정하기 때문에 유체의 압력이 증가함에 따라 가진시 발생하는 표면에서의 진폭도 일정하게 나타났지만, 물의 점성과 표면장력에 의해 진

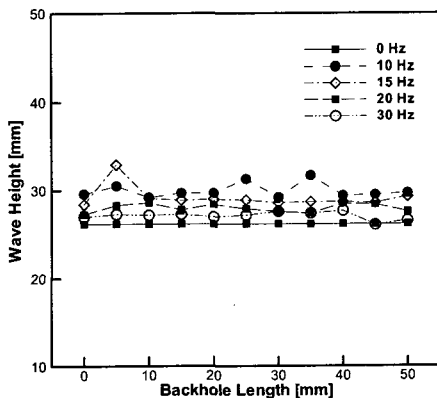


Fig. 3 Wave Height as a fuction of Backhole Length, $\Delta P=3\text{bar}$.

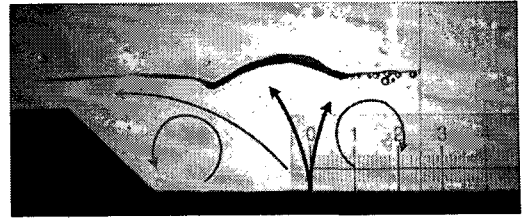


Fig. 4 Inertial Flow in 1D model injector

폭은 빠르게 감소되었다.

Figure 3은 분사압력 3 bar에서의 파동의 진폭을 나타낸 그림이다. 일정압력하에서 진동 주파수가 증가함에 따라 진폭의 크기는 감소하였는데, 이는 유량이 일정하기 때문에 진동주파수가 증가하면 한번의 진동에 의해 분사되는 유량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

백홀의 길이를 0~50mm로 증가시켜 백홀측으로 발생하는 파동을 중첩에 의해 감소시키기 위한 실험을 실시하였다. 최대 길이 50mm로 증가 시 백홀측으로 발생하는 파동을 관측할 수 있었고, 그 때 발생하는 정지점(node)를 측정하여 백홀 벽면을 위치시켰으나 이론에 의한 중첩현상이 발생하지 않았고 진폭의 크기는 일정하게 나타났다. 이는 단순 파동만으로는 이론상 가능하지만, Fig. 4와 같이 유체의 질량이 백홀측으로 계속적으로 밀려들어오고, 재순환이 이루어지기 때문에 커플링되어 표면에서의 중첩현상이 발생되지 않는 것으로 판단된다.

3.2 분열길이

가진에 의한 분열길이와 백홀길이의 영향에 대해 알아보았다.

Figure 5는 가진을 주지 않았을 때 분열길이를 나타낸다. 가진이 발생하지 않으면 압력이 증가함에 따라 분열길이는 짧아졌고, 백홀 길이의 증가에 의해 점차 증가하였다. 이는 백홀내의 유동이 정체되어 오리피스로 향하는 유동의 속도를 감소시켜 분열 길이에 영향을 주기 때문으로 판단된다[3,7].

일정한 주파수의 가진이 발생하면 압력 섭동에 의해 유체의 유량도 일정하게 증감을 보인다. 수력 진동발생기의 홀이 열렸을 경우 유량은 감

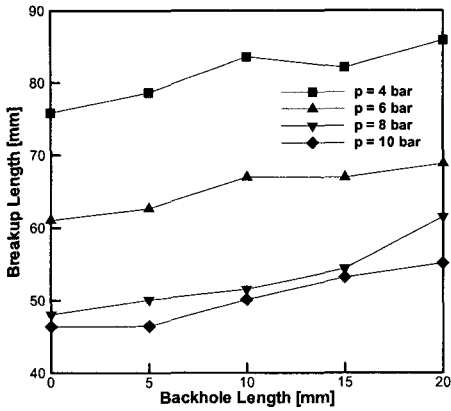


Fig. 5 Breakup Length as a function of Backhole Length, $f=0\text{Hz}$.

소하고, 홀이 막혔을 경우 유량이 증가한다. 유체의 분무시 이 경우가 적용되어, 홀이 열렸을 경우 유량의 감소로 분무가 말아올라가는 듯한 형상을 보이고, 홀이 닫혔을 경우 Fig. 6처럼 압력의 증가로 분무방향으로 펼쳐지면서 액막 두께가 얇아져 액막이 분열되는 형상을 보였다. 분열 과정이 홀이 열리는 순간부터 최대로 열렸을 때까지 이루어지기 때문에 적절한 분열길이 기준을 정하기 어려웠다. 따라서, 분열이 시작되어 안정화되는 순간을 기준으로 측정하였다.

일정한 압력하에 가진을 변화시켰을 때의 분열 길이를 Fig. 7에 나타내었다. 가진 주파수가 10 Hz 일 때 분열길이가 증가하고, 그 이후에는

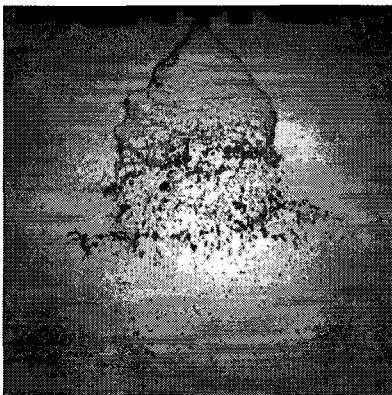


Fig. 6 Spray Breakup Image,
 $\Delta P=6\text{bar}$, $f=20\text{Hz}$, $B=0\text{mm}$

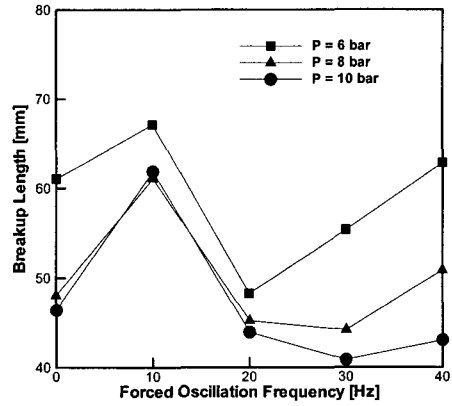


Fig. 7 Breakup Length as a function of Forced Oscillation Frequency, $B=0\text{mm}$

감소하는 현상이 나타났다. 가진 주파수 10 Hz 하에 분열 과정을 보면, 분무 압력이 감소하다 증가시 인젝터 상부에서 액막이 두꺼워지는 현상이 관측되었다. 이에 따라 분무각이 감소하여 분열길이가 증가하는 것으로 본다. 20 Hz 부터는 감소하는데 이때에도 액막이 두꺼워지기는 하지만 10 Hz에 비하여 액막의 밀도가 작고 액막이 두꺼워지는 부분 뒷단에서 분열되어 정상 상태의 분열길이와 비슷하게 나타났다.

3.3 액막 두께

전압차에 의한 액막 두께를 측정하는 방법에 의해 가진시 오리피스 내에서의 액막 두께와 백홀의 길이가 미치는 영향에 대해 알아보았다[4].

가진 주파수에 따른 액막두께의 변동을 Fig. 8에 나타내었다. 가진 주파수가 증가함에 따라 액막 두께에 발생하는 파동의 진폭은 10 Hz일 때를 최고 진폭으로 점차 감소하였는데, 이는 가진 주파수에 의한 유량의 감소로 판단된다.

가진 주파수가 백홀 길이에 따라 액막두께의 변화에 어떠한 영향을 주는지 Fig. 9에 나타내었다. 측정방식에 의해 액막 두께는 평균값을 나타낸다. 백홀 길이에 따른 액막 두께를 가진주파수에 따라 백홀 길이가 증가함에 따라 가진된 유체의 액막두께는 스웰챔버의 부피보다 작을때까

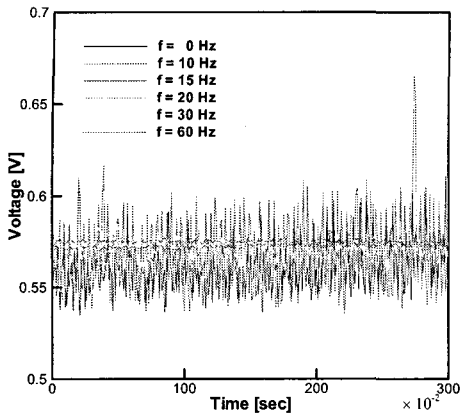


Fig. 8 Amplitude of Liquid Film Thickness,
 $\Delta P=6\text{bar}$, $B=0\text{mm}$.

지는(100%) 근소하게 증가하였지만 부피의 200%가 되는 길이에서는 가파른 증가를 보였다. 가진 주파수 10 Hz에서 액막 두께가 증가하였는데, 분열 길이가 증가한 것과 마찬가지로 판단된다.

4. 결론

수력 진동발생기를 이용하여 공급라인에서 발생하는 압력섭동에 의한 유량 변화를 백홀 감쇠자를 이용하여 동적 효과에 대해 알아보았다.

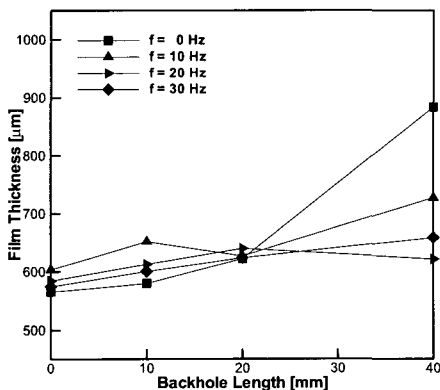


Fig. 9 Liquid Film Thickness as a function of Backhole Length ($\Delta P=10\text{bar}$)

1. 1D 가시화 모델 인젝터를 이용하여 백홀 길이가 가진 주파수의 진폭 제어에 대한 결과는 내부 유동의 정체로 인하여 영향을 끼치지 못한다.
2. 압력이 증가함에 따라 분열 길이와 액막 두께는 감소하였다.
3. 백홀의 길이가 증가함에 따라 분열 길이와 액막 두께는 증가하였다.
4. 가진 주파수가 증가함에 따라 분열 길이와 액막 두께는 10 Hz에서 최대값이 나타났는데, 이는 액막의 두께에 의해 분무각이 작아지기 때문으로 판단된다.

참고 문헌

1. Harje, D. J. and Reardon, F. H., "Liquid Propellant Rocket Instability," NASA SP-194, 1972
2. Bazarov, V. G., "Liquid Injector Dynamics," Moscow, Mashinostroenie, 1979
3. 황성하, 윤영빈, "Effect of Backhole on Spary Characteristics of Swirl Injector in Liquid Propellants Rocket Engine," Journal of KSPE 03-7-2, 2003
4. 김성혁, 김동준, 김병선, 윤영빈, "액막두께 측정방법을 이용한 스윙 인젝터의 분무특성 연구," 한국 추진공학회 추계학술대회, 2005
5. Stoker, J. J., "Water waves," Applied Mathematics, vol 4, 1957
6. Bland, D. R., "Wave Theory and Applications," Oxford Univ. Press, 1988
7. 윤웅섭, "수력파동에 의한 분무변화 및 저주파 연소불안정에의 영향 예측," 제 29회 KOSCO Symposium, 2004
8. Rizk, N. K., Lefebvre, A. H., "Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers," JPP, Vol.1, No.3, 1985