펌프 가압식 추진제 공급유로에서의 오리피스 개도에 따른 동적 수력특성 변화

김형민* · 고태호* · 김상민* · 윤웅섭*

The Dynamic Characteristics of Pump-fed Hydraulics due to Different Diameter Ratios of the Plate Orifice

Hyungmin Kim* · Taeho Ko* · Sangmin Kim* · Woongsup Yoon*

ABSTRACT

The orifice in the propellent feeding pipe line of a Liquid Rocket Engine(LRE) is used to balance the pressure of the pipe line. When a LRE starts up, pressure at the upstream of the orifice rapidly increases. In this case, pressure waves occuring by resistance of the orifice may induce low frequency instability in the pipe line. For this reason the study of dynamic characteristics of orifices is needed to prevent the instability. A pump is used to build up the pressure, and the pressure is measured upstream and downstream of the orifice when the orifice diameter is changed. With the increase of orifice diameter, water hammer decreases, but the effect of resistance downstream is increases.

초 록

액체추진제로켓엔진의 추진제 공급유로 내 압력보정을 목적으로 설치된 오리피스는 엔진의 시동 및 정지시, 압력파를 발생시키는 원인이 되며 압력파로 인한 저주파 불안정을 막기 위해서는 오리피스의 개도에 따른 동특성의 변화를 살펴볼 필요가 있다. 오리피스의 동특성 변화를 확인하기 위해 오리피스 공급 압력을 급격하게 증가하도록 하였고 오리피스의 개도를 바꿔가며 동적인 압력변화를 측정하였다. 오리피스의 개도가 증가함에 따라 오리피스에 의한 수격현상은 감소하였으며 오리피스 하류의 수력학적 영향이 지배적으로 나타나는 것을 확인하였다.

Key Words: Orifice(오리피스), Dynamic Characteristic(동특성), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Water hammer(수격현상)

1. 서 론

액체추진제로켓엔진 내 추진제가 흐르는 관로에서 압력과 유량을 보정하는 부품인 오리피스

* 연세대학교 기계공학과
연락저자, E-mail: wsyoon@yonsei.ac.kr

는 상류의 압력이 급격하게 변하는 경우 오리피스에 의해 압력파가 발생한다. 이러한 파동은 관로에서 불안정이 형성되지 않는 한 정상상태의 압력으로 수렴하게 되지만, 그렇지 않을 경우 압력파 때문에 관로 내 저주파 불안정을 야기할 수 있다. 따라서 시동, 정지 그리고 추력제어 등과 같은 천이구간에서의 오리피스의 직경비에 따른 동특성 변화 연구가 필요하다[1].

오리피스가 설치된 관로에서 동특성과 관련된 국내의 연구는 원자력 발전소의 유출계통에서 유압 액추에이터 제어특성을 중심으로 이뤄져 왔으며, 실험적으로 유압계통의 액추에이터 작동 응답시간 및 급정지시 충격치에 오리피스가 미치는 영향에 대한 연구가 진행되었다[2, 3]. 국외의 경우 Moody[4]의 특성곡선법을 이용한 해석적 연구와 Hayase[5] 등의 급격한 압력변화에 의한 오리피스 관로에서의 시간에 따른 유동특성 전산유체해석이 이뤄졌고 Kim[6] 등은 탱크, 유압계통, 밸브 시스템에서의 정상상태에서의 압력 요동에 관한 오리피스에 따른 압력파 영향의 수치해석적 및 실험적 연구를 하였다.

그러나 이러한 연구들에서는 액체추진제로켓엔진에서와 같은 펌프 가압방식이 아닌 피스톤에 의한 가압방식이나 압력용기를 사용한 가압방식을 사용하였기 때문에 펌프가압에 의한 오리피스의 동특성 변화를 확인하기 어렵다.

본 연구에서는 펌프 시동시 오리피스 직경비를 바꿔가며 오리피스 상하류에서의 압력변화를 측정하여 펌프를 사용한 급격한 압력 상승시 오리피스의 저항과 동특성 변화 사이의 관계와 그 경향성을 파악하였다.

2. 실험 장치의 구성 및 실험 조건

펌프를 시동하였을 때 오리피스와 밸브가 설치된 관로에서 압력 변화를 알아보기 위해 Fig. 1과 같이 물을 작동 유체로 한 원심형 펌프와 오리피스, 밸브로 구성된 실험 장치를 구축하였다.

실제 로켓엔진시스템의 펌프에 비해 낮은 양정을 가진 수류 펌프이지만, 동일한 원심형 펌프를 사용하여 내부에서 일어나는 물리적 현상은

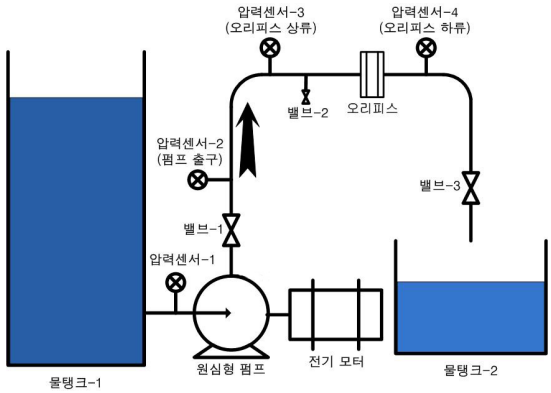

Fig. 1. A Schematic of Experimental Set-up

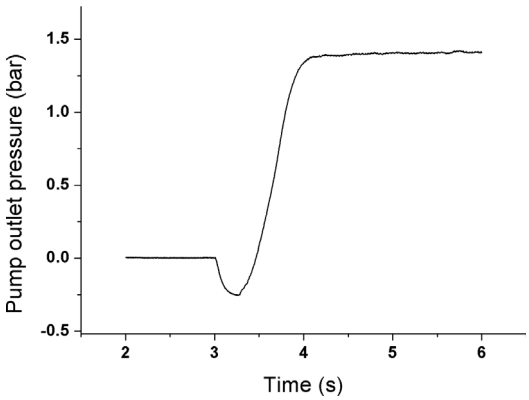

Fig. 2. History of the Pump Exit Pressure During the Duration of Pump Start-up (Orifice and Valve-3 of Fig. 1 are excluded)

실제 로켓엔진시스템의 고양정 원심형 펌프와 유사하도록 구성했다[7, 8, 9]. 실험에 사용된 펌프는 Fig. 1의 실험장치에서 저항요소인 오리피스와 밸브-3이 없을 때 Fig. 2와 같은 가압 천이를 보였다. 펌프의 시동구간인 3 초부터 4 초 사이에 펌프 임펠러에 의해 발생되는 압력섭동이 충분히 작음을 확인하였다.

Figure 1에서와 같이 오리피스는 원심형 펌프 하류에 설치되었고 오리피스와 펌프 사이의 관로에는 유로의 방향을 바꿔주기 위한 곡관이 사용되었으며, 이때 압력 손실을 최소화하기 위하여 200 mm의 곡률 반지름을 가진 곡관을 제작하여 장착하였다[10].

관로 끝에는 일정개도의 밸브를 설치하여 오

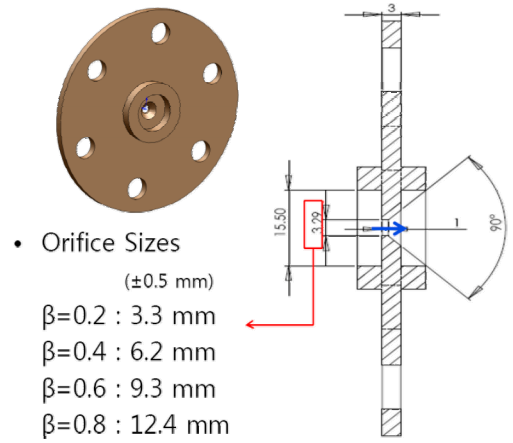

Fig. 3. Configuration and Sizes of Thin Plate Orifice $\left(\beta = \frac{\text{오리피스직경}}{\text{관로의직경}}\right)$

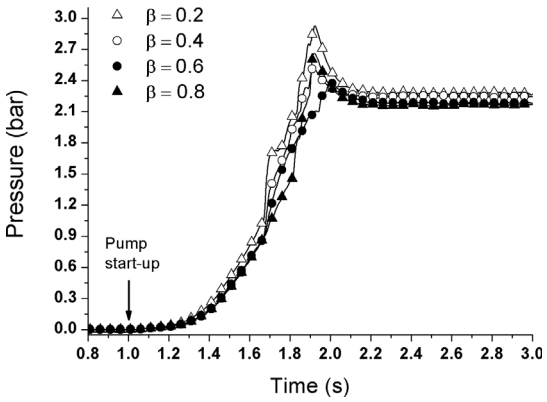

Fig. 4. Pump Exit Pressure with respect to Orifice Diameter Ratio

리피스 하류의 압력이 대기압보다 높게 형성될 수 있는 조건을 부여하였다. 실제 로켓엔진시스템과 비교할 때 오리피스 하류의 관로 및 분기관, 재생냉각채널, 인젝터 등의 저항을 일정개도의 밸브를 사용하여 발생하도록 한 것이다[11].

오리피스의 직경비에 따른 펌프 하류 관로에서의 압력 변화를 알아보기 위해, Fig. 3에서와 같이 오리피스 직경을 관로의 직경으로 나눈 직경비(β)가 0.2, 0.4, 0.6 그리고 0.8인 얇은 판형 오리피스를 제작하여 오리피스 테스트 프레임에 조립, 교체하며 실험을 수행하였다.

실제 로켓엔진시스템의 시동 특성을 모사하기 위해 오리피스 관로는 초기에 유체가 채워지지 않은 상태에서 펌프에 의해 가압된 유체가 충진되고, 관로의 압력이 정상상태에 이르는 동안의 압력 변화를 측정하였다. 동특성의 경우 짧은 시간 동안 일어나는 변화를 측정해야 하므로 높은 샘플링 속도의 고정밀 압력트랜스미터를 사용하였다.

각각의 오리피스 직경비에 대해 4회의 반복 실험을 수행하였고 이를 통해 실험 결과의 재현성을 확인하였다.

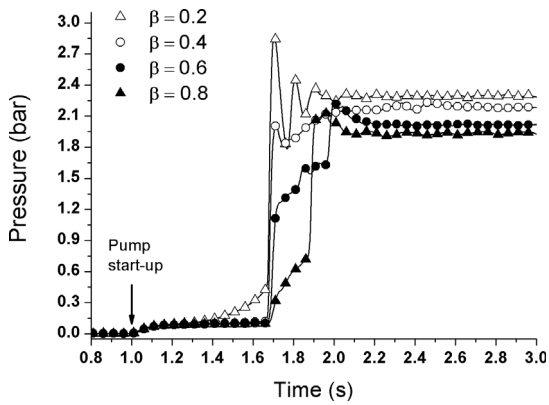

Fig. 5. Orifice Upstream Pressure with respect to Orifice Diameter Ratio

3. 개도에 따른 오리피스 동특성 변화

Figure 4로부터 오리피스에 의한 유량변화로 인해 정상상태 도달 양정이 오리피스 직경비가 커질수록 낮아짐을 알 수 있으나, 그 차이는 0.13 bar 정도로 충분히 작아 일정하다고 볼 수 있다. 1차적으로 1.7 초에 이르렀을 때 오리피스의 직경비가 작아지는 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 직경비 순으로 펌프 출구의 압력이 갑작스럽게 높아지는 현상이 두드러졌는데 이는 오리피스에 의한 수격현상이다[12]. 1.9 초에는 오리피스 하류의 일정개도 밸브에 의한 2차 수격현상이 나타났다. 이는 Fig. 5를 통해 보다 확실히 알 수 있었다.

Figure 5는 오리피스 상류에서의 압력변화로 1.0 초부터 1.7 초 구간에서는 펌프로부터 직접 가압된 유체에 의해 빈 관로를 채우고 있던 공기가 오리피스의 저항을 받으며 밀려나가면서

낮은 압력의 상승을 보이고, 1.7 초에는 가압된 유체에 의해 압력이 급격히 상승한다.

오리피스 직경비 0.2와 0.4에서는 유량이 적어 일정개도 밸브에 의한 수격현상을 거의 관찰할 수 없었으나 0.6과 0.8의 경우 유량이 커서 1.7 초 경, 오리피스에 의해 1차적으로 압력이 상승하고, 2차적으로 오리피스 하류의 밸브에 의해서도 압력이 상승하였다.

오리피스 직경비 0.8일 때는 0.6에 비해 유량이 커서 2차 압력상승 시점이 1.86 초로 0.6일 때의 1.96 초보다 0.1 초 정도 먼저 일어났다. 이러한 경향은 Fig. 4에서도 관찰할 수 있는데, 오리피스 직경비 0.8일 때 1.9 초에 최대치에 이르고 0.6일 때는 2.0 초에 최대치에 이르렀다. 따라서 오리피스 직경비 0.6과 0.8의 최대 압력상승은 일정개도 밸브에 의한 것임을 알 수 있었다.

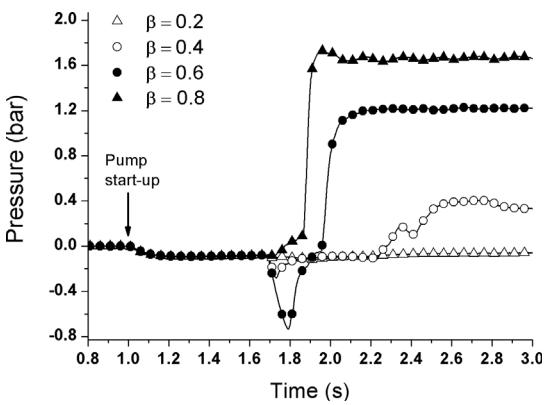

Fig. 6. Orifice Downstream Pressure with respect to Orifice Diameter Ratio

Figure 6은 오리피스 하류에서의 압력 변화로서 오리피스의 직경비가 커서 유량이 많을수록 높은 압력이 형성되는 것을 볼 수 있었다.

1.0 초부터 1.7 초 구간에서는 관을 채우고 있던 공기가 오리피스를 통해 가속되어 배출되면서 동압이 상승하여 대기압보다 약간 낮은 압력이 형성됐다. 이후 펌프에 의해 가압된 유체가 오리피스에 이르렀을 때, 급격히 압력이 하강하였다. 그리고 유체만으로 관로가 채워지면서 압력이 대기압까지 회복되다가 곧이어 하류 밸브에 의해 급격히 압력이 상승하는 수격현상을 관찰할 수 있었다. Fig. 5에서 오리피스 직경비 0.6, 0.8의 2차 압력상승 시점과 Fig. 6에서 오리피스 직경비 0.6, 0.8의 압력상승 시점은 1.96 초, 1.86 초로 일치하는 것을 볼 수 있었다.

오리피스 직경비 0.2의 경우 대기압보다 낮은 압력이 지속적으로 형성되다 대기압으로 회복되는 것을 관찰할 수 있었다. 오리피스 직경비 0.8의 경우에는 압력이 급격히 떨어지는 영역이 거의 없음을 확인할 수 있었다.

Figure 5, 6의 비교를 통해 오리피스의 직경비가 커질수록 오리피스에 의한 압력 손실이 작아짐을 확인할 수 있었다. 또한 오리피스의 직경비가 증가함에 따라 오리피스에 의한 수격현상은 감소하고 오리피스 하류의 일정개도 밸브에 의한 영향이 지배적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 0.2 직경비의 경우 오리피스에 의한 수격현상이 심각하여 시스템에 저주파 불안정을 발생시킬 수 있음을 알 수 있고, 오리피스 직경비 0.4이나 0.6은 상대적으로 오리피스에 의한 수격현상이 작을 뿐만 아니라, 하류 밸브의 영향으로 인한 압력 상승도 작음을 알 수 있다.

오리피스 직경비 0.8은 압력 손실이 적으나 Fig. 4, 5의 압력 변화에서 보이듯 하류에서 발생한 수격현상이 상부로 전달되어 시스템에 저주파 불안정을 발생시킬 수 있다. 따라서 압력손실과 상류로의 수격현상으로 인한 압력파 전달의 측면에서 본 실험 장치와 조건에 한해서는 0.4 이상 0.6 이하의 직경비 오리피스를 선정해 사용하는 것이 적합할 것이다.

4. 결 론

액체추진제로켓엔진에서 압력 보정을 위하여 장착된 오리피스에 의해, 시동 및 정지, 추력제어와 같은 천이작동 상태에서 발생된 압력파는 추진제 공급유로의 저주파 불안정을 야기할 수 있다. 따라서 천이작동 상태에서의 오리피스 동특성 연구가 필요하며, 기존의 연구들과 달리 본 논문에서는 펌프 가압식 오리피스 관로에서의

시동시 급격한 압력 변화 특성을 고찰하였다.

오리피스의 직경비가 증가함에 따라 오리피스에 의한 수격현상은 감소하고 오리피스 하류의 수력학적 영향이 지배적으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 높은 양정의 원심형 펌프를 사용하는 실제 로켓엔진시스템의 연구에 있어 시동시 부품들의 수력학적 영향으로 인한 관로내 저주파 불안정 문제를 방지하기 위해서는 이러한 동특성을 고려하여 적합한 오리피스 직경비를 선정하는 것이 중요함을 알 수 있다.

향후 로켓엔진시스템에 적용되는 제어밸브 및 곡관, 분기관, 재생냉각채널, 인젝터에 대한 추가적인 실험을 통해 추진제 공급시스템에 대한 실험적 데이터를 획득하고 이로써 시스템 동특성을 모델링하여 동적 압력 변화를 예측하는 동특성 프로그램을 작성할 것이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (2009-0082434).

참 고 문 헌

1. E. Benjamin Wylie, Victor L. Streeter, “Fluid transients in system,” Prentice-Hall, 1993
2. 김민, 정장규, 김은기, 노태선, 이성노, 유성현 “원자력발전소 유출계통의 과도현상에 대한 연구,” 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 2002. 12, pp.493-498,
3. 이주성, 이계복, “오리피스를 이용한 유압 액추에이터의 충격치 제어특성에 관한 실험적 연구,” 대한기계학회논문집 B권, 제24권 제11호 2000, pp.1506~1512
4. Moody, F. J. "Time-Dependent Pipe Forces Caused by Blowdown and Flow Stoppage," J. Fluid Engineering, ASME Transactions, Vol 95, 1973, pp.422-428
5. Toshiyuki Hayase, Cheng Ping, Satoru Hayashi, "Numerical Analysis of Transient Flow Through a Pipe Orifice Starting from Initial Steady Flow," Fluids Engineering Conference, July, 1994 pp.277-282
6. Y. Kim, A. R. Simpson, M. F. Lambert, "The Effect of Orifices and Blockages on Unsteady Pipe Flows," The World Environmental and Water Resources Congress, 2007.
7. 김영수, 윤웅섭, “로켓공학,” 경문사, 2004
8. P. Thanapandi and Rama Prasad, "Centrifugal Pump Transient Charateristics and Analysis Using The Method of Characteristics," Int. J. Mech. Sei. Vol. 37, No. 1, pp. 77 89, 1995
9. 박한영, 김경엽, “펌프 핸드북,” 동명사, 2002
10. Frank M. White., “Fluid Mechanics, 2nd ed.,” McGraw-Hill, 1986
11. Erwin Fried. and I. E. Idelchik., “Flow Resistence: A Design Guide for Engineers,” HemispheispPublishing Corporation., 1989
12. 김경엽, 김점배, “원심펌프의 시동 및 정지에 따른 수격현상,” 유체기계저널, 제7권, 제1호, 2004, pp.51-57