

# 평균유동이 있는 유체 공급배관내 오리피스의 압력섭동 감쇠 특성

이태영\* · 김철진\* · 손채훈\*\*

## Pressure-Oscillation Damping Characteristics of an Orifice in a Fluid Feeding Line with Mean Flow

Tae-Young Lee\* · Chul-Jin Kim\*\* · Chae Hoon Sohn\*\*

### ABSTRACT

Damping characteristics of pressure oscillation induced by an orifice in fluid feeding line for are investigated numerically and experimentally. Assuming small pressure oscillation, acoustic damping effect of orifice is confirmed experimentally, and with the mean flow, damping characteristics of an orifice are investigated numerically. When an orifice is installed at the node of pressure oscillation corresponding to the anti-node of velocity oscillation, suppression of pressure oscillation is maximized and with the mean flow, the resonant frequency is decreased. And, it is found that the optimal position of an orifice for damping should be changed.

### 초 록

유체 공급 배관 내에 오리피스를 설치하여, 압력진동의 감쇠효과를 수치해석 및 실험을 통하여 조사하였다. 압력진동이 작다는 가정에 기초하여 오리피스의 음향학적 감쇠 효과를 실험적으로 확인하였으며, 평균 유동이 있을 경우 관찰되는 감쇠 특성을 수치적으로 조사하였다. 오리피스의 위치에 따른 압력진동의 마디, 즉 속도 진동의 배가 되는 위치에 오리피스를 설치할 때 가장 효과적인 압력 진동이 감쇠 되었다. 배관 내 평균 유속이 있을 경우 공진주파수가 감소하였고, 이에 따라 최적 감쇠 효과를 갖는 오리피스의 위치도 변화함을 알 수 있었다.

Key Words: Blockage Ratio(유로 봉쇄율), Acoustic Damping(음향 감쇠), Feeding Line(공급 배관), Pressure Oscillation(압력 진동), Mean Flow(평균 유동)

### 1. 서 론

인공위성에 사용되는 추진제는 고압의 가압 기체에 의해 압출되며 연료 탱크에서 추진제 관과 밸브 등을 통하여 최종 추력기까지 이송된다. 추력기 연소실에서 연소가 발생하면서 연료는 추진제 관을 흐르게 되며 인공위성의 자세제어

\* 세종대학교 대학원 기계공학과

\*\* 세종대학교 기계공학과

연락처, E-mail: chsohn@sejong.ac.kr

및 임무에 따라서 매우 짧은 시간동안 추력기의 밸브의 여닫힘이 일어난다. 추력기 밸브의 연료 유동 차단으로 인하여 압력이 상승하게 되며 시간에 따라 변하는 비정상 유동특성을 보인다. 이때 압력변화에 의한 밀도변화가 유발되어 압력파가 발생한다.[1, 2, 3] 밸브의 닫히는 시간이 길어서 압력파가 도달시 밸브가 열려있다면 연료 공급탱크에 전달되어 충돌에너지에 의해 발생한 상승압력은 감소한다. 하지만 인공위성의 자세제어 및 임무 특성상 추력기 밸브의 여닫힘의 시간이 매우 짧으며 압력파가 연료탱크에 도달하기 전에 밸브가 닫히게 되면 관내에서 발생한 압력파가 상당한 시간동안 왕복하는 현상이 유지된다. 이와 같은 현상으로 인하여 추력기 밸브의 기계적 손상 및 추력기 연소실내의 연소불안정을 야기된다.[1, 4] 그러므로 유체 공급배관 내부에서의 압력진동을 작게 유지하는 것이 필요하며 압력진동의 감쇠를 위해 감쇠 기구를 사용하는 것이 일반적이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 여러 압력감쇠 기구중 배관내에 설치되는 오리피스에 관한 연구를 수행하였다. 다양한 설계인자에 대한 정량적인 자료를 위하여 오리피스의 설치위치의 변화에 대하여 압력 감쇠효과, 오리피스의 직경변화에 대한 감쇠효과를 수치해석 및 실험을 통하여 연구하였으며, 유체공급배관 내부에 평균 유동이 있을 경우의 감쇠특성 및 공진 주파수의 변화에 대한 수치해석을 수행하였다.

## 2. 수치해석 및 실험 방법

### 2.1 수치해석 방법

평균유동이 있는 배관내부의 압력진동을 계산하기 위하여 연속방정식과 운동량 방정식, 즉 Navier-Stokes 방정식의 풀이를 통해 음향파의 거동을 모사하였다. Navier-Stokes 방정식은 비선형성과 경계조건의 복잡성이 결부되어 정확한 해석 해를 얻기가 불가능하므로, 수치해석적인 방법으로 해를 구하였다. 해석에 적용된 난류 모델은 LES(Large Eddy Simulation)모델을 채택하

였다. 공간차분에는 3차 전방차분법(upwind scheme)을 시간적분에는 Crank-Nicolson법을 사용 하였다. 과도 해석을 위한 시간 간격은  $10 \mu\text{s}$  설정 하였다. 해석에 사용된 격자계는 정렬 격자이며 2D로 수치해석을 수행하였다. 입구와 출구의 압력조건은 대기압이며 온도는 300 K으로 설정하였다. 소음원으로는 백색잡음(white noise)을 사용하였다. 지배방정식의 풀이를 위해 CFD-ACE+[5]를 사용하여 계산을 수행하였다. 관련된 물리적 현상들의 상세한 지배방정식은 참고문헌[5]에 자세히 기술되어 있으므로 여기서는 생략한다.

### 2.2 실험 방법

수치해석 결과를 실험적으로 검증하기 위한 장치를 Fig. 1에 도시하였다. 실험에 사용한 배관은 아크릴 배관이며, 배관내부의 평균유동이 있을 경우 유동변화에 대한 노드의 이동을 실험적으로 검증하기 위해 배관의 크기는 외경 12mm, 내경 8mm로 선택하였으며 배관의 한 파장(561Hz)을 형성하도록 배관의 길이는 606mm로 정하였다. 오리피스는 길이는 10mm 외경 8mm 내경은 Blockage Ratio에 따라 30%, 50%, 80%에 해당하는 세가지 종류로 하였다. 배관내부에 음향 가진을 위하여 배관의 한쪽에 Horn driver(SU-150EF)를 설치하였으며, 마이크로폰(RG-50)은 오리피스의 이동을 고려해 가진부 반대편의 배관의 약 1/6 지점에는 장착하였다.

신호는 함수발생기를 이용하여 정현파(sine)를 발생시켜 앰프를 이용해 증폭시킨뒤 Horn driver를 이용해 가진하였다. 배관의 응답을 마이크로폰으로 측정하고, NI DAQ(NI-4472)를 이

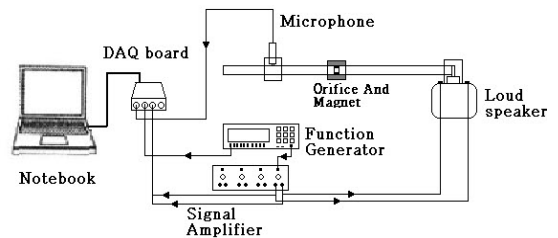


Fig. 1. Schematic Diagram of Acoustic-test apparatus

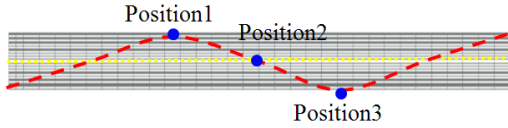


Fig. 2. Positions of orifice installation in a feeding line

용하여 FFT를 수행하였다. 가진 신호에 대한 응답신호의 동기화를 위해 함수 발생기의 트리거 신호를 이용하였고, 앰프의 전압으로 FRF(Frequency Response Function)를 구했다.

### 2.3 음향학적 고찰과 경계조건

유체 공급배관은 일반적으로 가늘고 길기 때문에, 관심있는 압력진동 모드는 종방향 모드이다. 종방향 모드의 공진주파수는 아래의 식과 같다.

$$f_o = \frac{c_{FL}}{2l_{FL}} \quad (1)$$

여기서  $f_o$  공진주파수이며,  $c_{FL}$ 은 배관내의 음속,  $l_{FL}$ 은 배관의 길이를 나타낸다. 오리피스의 직경,  $d$ 도 중요한 설계인자 중 하나이므로, 유로 봉쇄율(blockage ratio), BR을 아래와 식과 같이 정의하였다.

$$BR = 1 - \frac{d^2}{D^2} \quad (2)$$

유체공급 배관내부에 평균유동에 의한 공진주파수의 변화는 아래의 식과 같다.

$$f_{o_v} = f_o \times \sqrt{1 - M^2} \quad (3)$$

여기서  $f_{o_v}$  평균유속이 있는 배관내부의 공진주파수이며  $M$ 은 마하수를 의미한다.

## 3. 결과 및 논의

오리피스의 위치(Fig. 2 참고)에 따른 음향응답의 압력진동의 진폭 및 공진주파수의 변화를 수

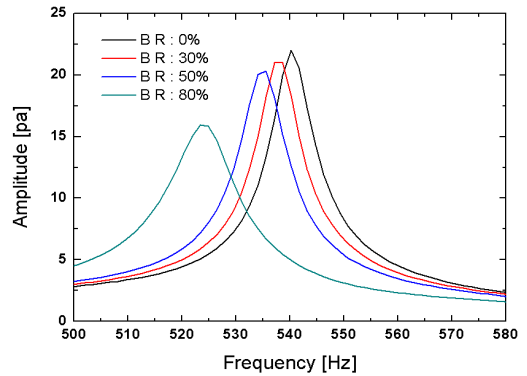


Fig. 3. Numerical results of Acoustic pressure response of orifice position 2

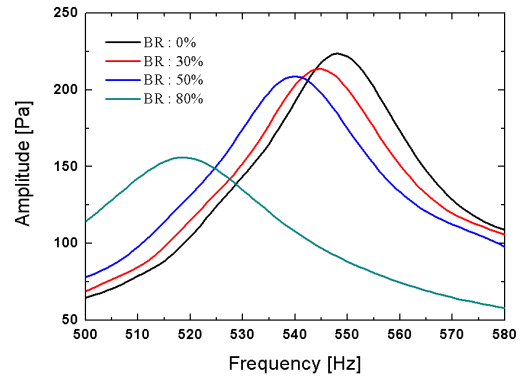


Fig. 4. Experimental results of Acoustic pressure response of orifice position 2

치해석 및 실험을 통한 해석 결과를 Figs. 3~4와 table 1에 나타내었다. 오리피스의 위치가 압력진동의 마디, 즉 position2에 위치할 경우 BR의 증가함에 따라 공진주파수의 변화 및 감쇠특성 증가하는 경향성은 수치해석과 실험의 결과에서 유사함을 알 수 있다. Position 1과 3의 위치에서는 공진주파수의 변화 및 압력감쇠의 변화가 미비하거나 거의 없었다.

Table 1. Numerical and experimental results of resonance frequency

Blockage ratio	0%	30%	50%	80%
Numerical results [Hz]	540	538	535	523
Experimental results [Hz]	548	545	540	519

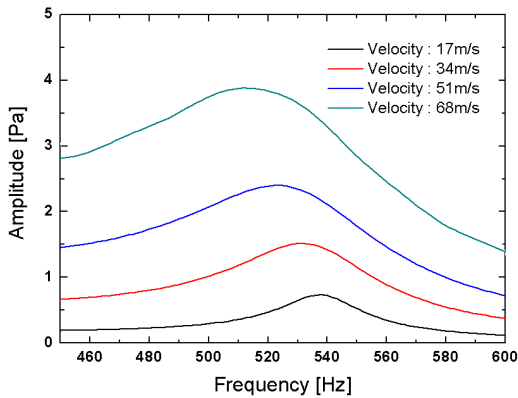


Fig. 5. Numerical results of Acoustic pressure response with mean flow

위 수치해석과 실험에서의 공진주파수 및 압력진동의 값의 차이는 수치해석의 경계조건과 실험시의 온도 및 습도에 차이로 인하여 공진주파수의 변화에 대한 차이에 의한 것으로 보이며, 압력진폭의 크기의 차이는 가진 면적의 차이로 인한 것이라고 할 수 있다.

유체 공급배관에서의 유동속도의 변화에 따른 공진주파수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 배관 내부의 유동속도가 증가함에 따라서 배관의 공진 주파수는 마하수에 따라 감소함을 알 수 있다. 또한, 압력 진동의 진폭도 증가하였다. 이로 부터 공급배관에 평균유동이 있을 경우, 배관배부의 공진주파수의 변화에 따라 최적 압력감쇠를 위한 오리피스 위치도 변화시켜야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

유체 공급배관에서의 압력진동 감쇠를 위하여 오리피스를 설치하였다. 오리피스의 위치에 따른 압력감쇠와 공진주파수의 변화를 수치해석과 실험을 통하여 알 수 있었다. 유체의 배관에 유동이 있을 경우 유동 속도가 빠를수록 공진 주파수의 변화가 증가하며 오리피스의 장착위치도 변화해야 함을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0071941).

#### 참 고 문 헌

1. Harrje, D. J. and Reardon, F. H. (eds), "Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, NASA SP-194, 1972, pp. 105-115.
2. 최진철, 김정수, "인공위성 연료배관의 유압 특성 연구". 한국우주과학회지, 제19권, 제3호, pp. 207-214.
3. 서영수, 정의봉, "유체 맥동을 고려한 압축기 토출 배관의 진동 응답 해석", 소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2002, pp. 1049-1054.
4. Shibanov, A. A., Personal Communication, 2002.
5. CFD-ACE+, V2009, User Manual.