

論文

유체 공급 배관내 압력진동 감쇠에 미치는
오리피스의 음향학적 효과

손채훈*, 김철희**

Acoustic Effect of an Orifice on Suppression
of Pressure Oscillation in a Fluid Feeding Line

Chae-Hoon Sohn* and Chul-Hee Kim**

ABSTRACT

Effects of an orifice on suppression of pressure oscillation in a fluid feeding line are investigated numerically through the installation of an orifice inside the feeding line. Based on linear acoustic theory, acoustic-damping effect of an orifice is emphasized in this study. When an orifice is installed at the node of pressure oscillation corresponding to the anti-node of velocity oscillation, damping capacity is maximized. On the other hand, the orifice installed at the anti-node of pressure oscillation has little damping capacity. As the blockage ratio and thickness of an orifice increase in the feeding line, damping factor increases. The feeding line with smaller diameter has more damping capacity, but damping factor increases more appreciably with blockage ratio in the feeding line with larger diameter.

초 록

유체 공급배관내의 압력진동을 감쇠할 수 있는 방법으로 배관내에 오리피스를 설치하는 방법을 채택하여, 그 압력진동 감쇠효과를 수치해석을 통해 조사하였다. 본 연구에서는, 압력진동의 진폭이 작다는 가정에 기초하여 오리피스의 음향학적 감쇠효과에 초점을 맞추었다. 오리피스의 위치에 따른 계산 결과로부터 압력진동의 마디, 즉 속도진동의 배가 되는 위치에 오리피스를 설치할 때 가장 효과적으로 압력 진동이 감쇠되었다. 이에 반해서, 오리피스를 압력진동의 배에 설치한 경우에는 오리피스의 설치 효과가 아주 미약하였다. 오리피스의 유로 봉쇄율이 증가함에 따라 감쇠효과는 단조적으로 증가하였고, 오리피스의 두께가 증가할수록 공진성을 약화시켜 감쇠효과가 크게 나타났다. 또한, 직경이 작은 배관에서 감쇠 효과가 더 크게 나타났다.

Key Words : Pressure Oscillation(압력 진동), Harmonic Analysis(조화 해석), Acoustic Damping(음향 감쇠), Feeding Line(공급 배관), Blockage Ratio(유로 봉쇄율)

I. 서 론

† 2006년 1월 2일 접수 ~ 2006년 3월 13일 심사완료

* 정희원, 조선대학교 항공우주공학과
연락처자, E-mail : chsohn@chosun.ac.kr
광주광역시 동구 서석동 375번지

** 정희원, 조선대학교 대학원 항공우주공학과

일반적으로 인공위성의 연료저장용 탱크의 연료는 고압의 가압기체에 의해 압출되며 탱크에서부터 최종 추력기까지 이송된다. 추력기 연소실에서 연소가 발생되면서 연료는 추진제 관의 내

부를 흐르게 되며 위성의 임무에 따라서 추력기 밸브의 여단힘이 일어난다. 이때 추력기밸브의 갑작스런 연료유동 차단에 의해 유동의 운동에너지는 충돌에너지로 바뀌게 되며, 결국 연료압이 상승한다[1,2]. 또한, 추진제관은 탄성을 갖는 재질로 되어 있고, 공급계통의 연료압이 시간에 따라 변하는 비정상 유동특성을 보인다. 이때 압력 변화에 의한 밀도변화가 유발되며 압력파가 발생하게 된다[3]. 이 압력파는 음속으로 연료 공급탱크쪽으로 전달되어 유동이 역으로 흐르게 되며 탱크에 도착한 후, 다시 추력기 밸브 쪽으로 이동하며 반향하게 된다. 다행히 밸브의 닫히는 시간이 상당히 길어서 파가 도달하기 전에 밸브가 열려 있다면 압력파는 연료를 따라 흘러나가게 되어 충돌에너지에 의해 발생한 상승압력은 감소한다. 만약 위성의 임무특성상 추력기 밸브의 닫히는 시간이 상당히 짧다면(수 msec), 탱크에 전파되어 진행한 압력파가 다시 추력기에 도달하였을 때 밸브가 닫혀있기 때문에 관내의 연료 유동력에 의해 발생한 압력값은 소멸되지 않고, 연속적인 압력파의 왕복현상이 상당시간 유지된다.

이와 같은 현상으로 인해, 연소실내로 유입되는 연료의 압력이 일정치 않음으로써 연소기(추력기) 운용상 바람직하지 않은 결과를 초래할 수 있다. 또한, 전자장비의 동작 및 압력 감지특성에 손상을 초래하기도 한다. 특히 추력기 밸브의 기계적 손상을 가져올 수 있으며, 추진제의 분해 및 연소실 내 초음속 연소현상(detonation)으로 진행될 수도 있다. 이 외에, 공급 배관내의 압력 진동이 연소실내의 연소 과정과 연계(couple)되어 공진(resonance)이 일어난다면 동적 불안정성이 야기될 수도 있다[1,4]. 따라서, 유체 공급 배관내에서의 압력 진동의 진폭은 가급적 낮게 유지되는 것이 바람직하다.

유체 배관내의 압력 진동을 감쇠하는 여러 가지 방법 중 감쇠 기구(damping device)를 사용하는 방법이 보편적이며, 각 감쇠 기구의 기본적인 설계 기준이 보고되었다[1]. 그러나, 기존의 설계 기준은 고전적인 이론 해를 토대로 구성되어 있어, 폭넓은 정량적 설계 자료를 제시하지 못하는 한계와 여러 가지 제한성을 가지고 있다.

본 연구에서는, 여러 가지 감쇠 기구 중 배관내에 설치되는 오리피스(orifice)를 채택하였다. 다양한 설계 인자에 대한 정량적인 자료를 얻기 위해, 오리피스 설치 위치에 따른 압력섭동 감쇠 효과, 배관과 오리피스의 직경 변화에 따른 효과 및 오리피스의 두께 변화에 따른 효과를 수치해석적으로 조사하였다.

II. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

공급 배관내에는 유체의 유동이 존재하므로, 유체의 압력 진동과 속도 진동은 서로 밀접하게 연계(couple)되어 있다[5]. 그리고, 일반적으로 압력과 속도 진동의 진폭은 유한한 크기를 갖게 될 것이다. 본 연구에서는, 이처럼 유한한 크기의 압력 섭동 감쇠를 연구하기 위한 일차적인 연구로서, 미소 진폭을 갖는 선형 범위내의 압력 진동 감쇠를 연구 대상으로 삼았다. 결과적으로, 배관내 유동을 지배하는 Navier-Stokes 방정식은 파동 방정식(wave equation)으로 단순화되며, 이의 풀이를 통해 배관 내 압력파 거동을 모사하였다. 따라서, 본 연구의 결과로부터는 오리피스의 음향학적 감쇠 효과를 파악할 수 있게 될 것이다.

파동방정식은, 배관 내 유체의 평균 유동을 무시하고, 압력 섭동이 매우 작으며, 매질이 압축되는 과정은 등엔트로피 과정(isentropic process)이고, 속도 섭동과 그 구배(gradient)가 매질의 음속보다 매우 작다는 등의 가정을 도입하여 연속방정식, 운동량 방정식, 음속방정식으로부터 유도되며, 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다[6,7].

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (1)$$

여기서 p 는 음향파에 의한 압력 섭동값, t 는 시간, c 는 음속, ∇^2 는 Laplacian 연산자를 나타낸다.

파동방정식의 풀이를 위해 유한요소법(finite element method ; FEM)의 하나인 Galerkin 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 선형 음향해석(acoustic analysis)에 대해 이미 신뢰성이 검증된 수치해석 코드[8,9]를 이용하여 파동방정식의 해를 구하였다.

2.2 해석대상 배관

음향해석을 수행할 배관의 기하학적 형상과 격자계, 그리고 음향가진 위치를 Fig. 1에 나타내었다. 배관의 전체 길이는 909 mm이며, 직경은 작은 경우와 큰 경우의 두가지로 변화시켰고, 각각 14 mm 와 70 mm 로 설정하였다. 배관 내에서 유체에 의한 압력 진동을 유발하기 위해 배관 입구의 가장자리에 임의의 10 Pa의 진폭을 갖는 정현파(sine wave) 형태의 압력을 가진하였다. 오리피스의 설치 위치는, 참고문헌[1]의 결과를 토대로 압력 진동의 배(anti-node) 또는 마디(node)로 설정하였다. 예를 들어, 공급 배관내에서 Fig. 2에 나타난

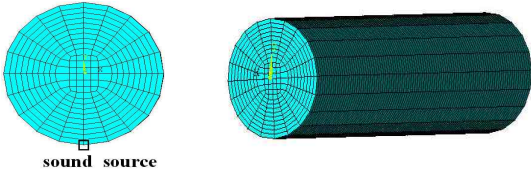


Fig. 1. Geometry and Computational grids of a fluid feeding line

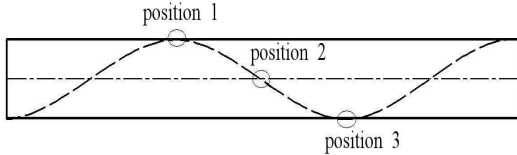


Fig. 2. Positions of orifice installation in a feeding line

것과 같은 종방향(축방향)의 압력 진동이 존재한다면, position 1~3가 오리피스의 후보 설치위치가 될 것이다.

가진 주파수의 증분은 1.0 Hz로 하였고, 이 값은 계산 결과에 영향을 주지 않는 충분히 작은 값을 확인하였다. 배관의 직경, D 의 변화에 따른 압력 감쇠효과를 파악하기 위해 14 mm와 70 mm 직경의 배관을 비교하였으며, 오리피스의 두께효과를 파악하기 위해 오리피스의 두께를 1.8 ~ 20 mm로 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 음향 해석의 방법으로는 조화해석(harmonic analysis)을 채택하였고[8], 계산에 사용된 요소(element)의 수는 약 112,000개이다.

2.3 음향학적 고찰과 경계조건

공급 배관은 일반적으로 가늘고 길기 때문에, 관심있는 압력진동 모드는 종방향 모드이다. 배관내에서, 예를 들어 종방향으로 완전한 한 파장(λ)의 길이를 갖는 음향파를 감쇠대상으로 선택한다면 Fig. 3에 나타난 바와 같은 파동이 형성될 것이다. 즉, 배관의 입구와 출구에서 압력진동 마디(node)가 형성되어 음향학적으로 열린 조건(open condition)이 적용된다. 수치해석적으로 열린 조건을 구현하는 데에는 어려움이 없으나, 실험적으로는 열린 조건보다 닫힌 조건(closed condition)을 구현하는 것이 더 용이하다. 향후, 실험 결과와의 비교를 위해 본 연구에서는, Fig. 3b와 같이 배관 입구와 출구로부터 각각 길이를 1/4파장씩 증가시켜 3/2파장의 길이를 가지며 닫힌 조건이 적용되는 배관을 선택하였다. 한 예로, Fig. 3b에 압력진동의 마디 위치에 설치되어 있는 오리피스의 모습을 나타내었다. 기존의 연구

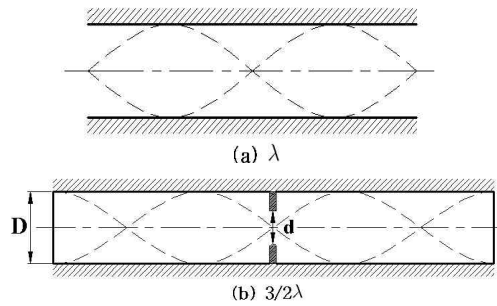


Fig. 3. Wave patterns of pressure oscillations with the wave lengths of λ and $3/2\lambda$ in a feeding line

결과[1]에서, 이와 같은 경계조건과, 압력진동과 유속진동의 위상(phase)은 서로 1/4파장만큼의 차이를 보인다는 사실에 기인하여 유속진동 값이 가장 큰 곳에 오리피스를 두어 배관내의 유속진동을 억제하여 압력진동을 효과적으로 감쇠시킬 수 있음이 보고되었다.

채택된 배관의 길이가 3/2파장에 해당하는 경우, 해당 음향 모드의 공진 주파수를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$f_0 = \frac{c_{FL}}{(2/3)l_{FL}} \quad (2)$$

여기서, f_0 는 공진 주파수(즉, 배관 내에서 압력 섭동을 보이는 유해 주파수), c_{FL} 은 배관 내 유체의 음속, l_{FL} 은 배관의 길이를 나타낸다.

오리피스의 직경, d 도 중요한 설계 인자 중 하나이므로, 유로 봉쇄율(blockage ratio), BR을 아래와 같이 정의하였다.

$$BR = 1 - \frac{d^2}{D^2} \quad (3)$$

오리피스에 의한 음향 감쇠의 정도를 나타내는 정량적 인자로서 감쇠인자(damping factor), η 를 사용하였으며, 이는 bandwidth 방법[10]을 토대로 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_{peak}} \quad (4)$$

여기서 f_{peak} 은 가진에 따른 최대응답(p_{peak})이 나타나는 주파수이고, f_1 과 f_2 는 $p_{peak}/\sqrt{2}$ 값의 응답(압력진동 진폭)을 보이는 주파수들이다. 감쇠인자를 구하기 위해서 필요한, 경계면의 물성치인 경계흡수계수, β 의 값은 0.001로 임의로 설정

하였다. 경계흡수계수는 압력진동 진폭의 크기에 영향을 끼치지 않지만, 본질적으로 계산 결과에 영향을 주지 않는 인자이다.

III. 계산 결과 및 논의

3.1 기본 음향응답

배관내 유체를 상온의 공기로 가정하여, 그 음속과 밀도를 각각 340 m/s, 1.2 kg/m³으로 설정하였다. 오리피스가 설치되지 않은 배관에 대해서 식 (2)에 따라 Fig. 3b에 나타낸 종방향 음향모드의 공진 주파수를 구하면, 561.45 Hz임을 알 수 있다. 다음으로, 압력 섭동을 가진하여 조화해석을 수행하였고, Fig. 4에 음향응답을 나타내었다. 음향응답을 구하는 관찰점으로 여러 지점을 채택하였으나, 서로 유사한 응답이 관찰되어 대표 관찰점을 배관 입구로부터 606 mm 떨어진 점으로 선정하였다. 이 지점은 압력 진동의 진폭이 상대적으로 큰 곳에 위치한다. Fig. 4에서 보듯이 공진 주파수가 590.72 Hz로서 이론 값보다 약간 증가하였는데, 이는 인위적인 압력 가진에 의한 효과이다.

3.2 오리피스의 설치위치에 따른 감쇠효과

배관의 직경과 오리피스의 두께를 각각 14 mm와 5.5 mm로 설정하고, 오리피스의 위치에 따른 음향응답을 구하여 압력진동 진폭의 변화와 공진 주파수의 변화 및 그에 따른 감쇠인자 값을 Figs. 5~8에 나타내었다. 가진 주파수 범위는 감쇠인자를 구할 수 있도록 충분히 넓게 설정하였다. 오리피스가 압력진동의 마디, 즉 position 2에 설치된 경우, 유로 봉쇄율, BR의 증가에 따라 공진 주파수가 감소하였고, 590.7 Hz로부터 560.9 Hz (BR = 87.2%) 범위에서 변화하여 가장

큰 공진 주파수의 변화와 진폭의 변화를 나타냈다. 반면, position 1과 3에서는 각각 590.7 Hz로부터 594.2 Hz로, 590.72Hz로부터 594.4 Hz로 오

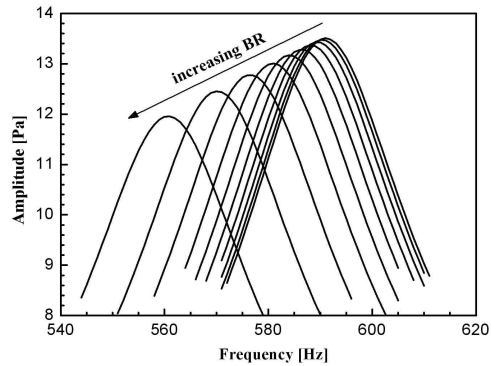


Fig. 5. Variation of acoustic-pressure responses as a function of blockage ratio in case of orifice position 2

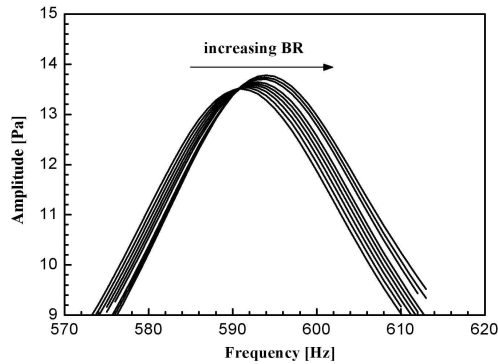


Fig. 6. Variation of acoustic-pressure responses as a function of blockage ratio in case of orifice position 1

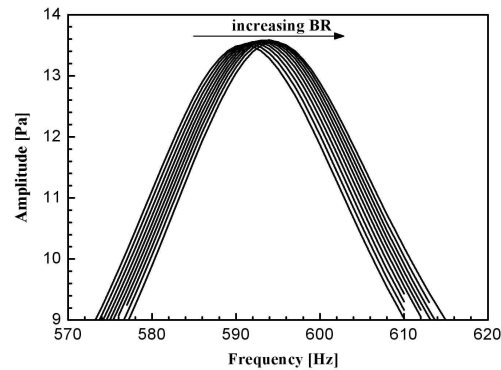


Fig. 7. Variation of acoustic-pressure responses as a function of blockage ratio in case of orifice position 3

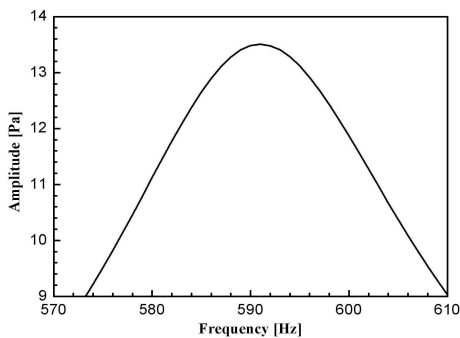


Fig. 4. Acoustic-pressure response at 1.5λ longitudinal mode

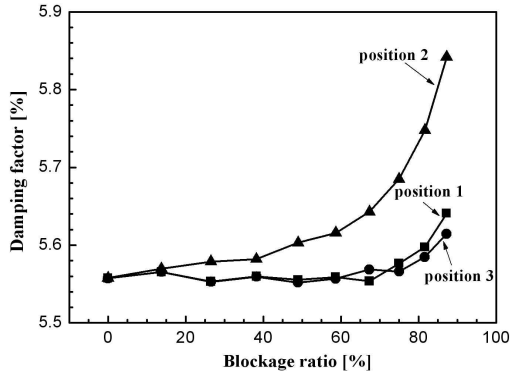


Fig. 8. Damping factors as a function of blockage ratio at several orifice positions

히려 증가하였으나 그 변화의 폭은 미미하였다. 이러한 결과는, 오리피스스의 설치로 인해 유속진동이 억제되고, 후속적으로 이에 연계된 압력진동이 억제되는 감쇠 메카니즘을 뒷받침한다.

Fig. 8에 나타낸 바와 같이, 감쇠인자는, position 2에서는 BR이 0%일때 $\eta = 5.26\%$ 로부터 BR이 증가할수록 완만히 증가하다가 90% 근처의 큰 BR을 가질 때 5.86%의 값을 나타내었다. Position 1과 3(압력진동의 배에 해당하는 지점)에서는 BR의 증가에 따라 감쇠인자가 거의 변화 없이 일정한 값을 보이다가 BR이 90% 근처에 이르러서야 소폭의 증가를 보였다. 이러한 결과는, 오리피스스가 압력진동 마다에 설치될 때 압력진동 감쇠의 효과가 가장 우수하다는 사실을 보여준다. 그러나, BR이 상당히 크더라도 감쇠인자의 증가는 오리피스스가 없을 때에 비해 불과 11% 증가하는 데 그쳤다.

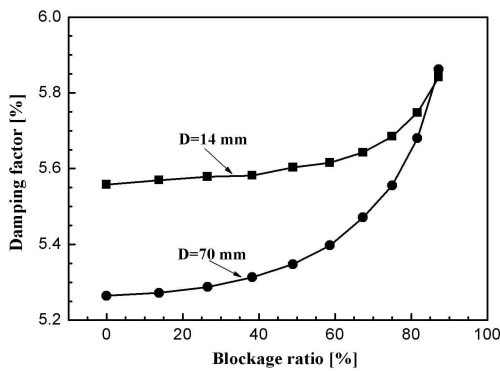


Fig. 9. Damping factors as a function of blockage ratio in feeding lines with small and large diameters

3.3 배관의 직경변화에 따른 감쇠효과

배관의 직경변화에 따른 감쇠인자 값을 Fig. 9에 나타내었다. 직경, D 의 크기는 각각 14 mm와 70 mm이며, 오리피스스의 위치는 앞절의 결과를 바탕으로 압력 진동 감쇠효과가 최대인 지점인, position 2로 설정하였다. 오리피스스의 두께는 5.5 mm로 설정하였다. Fig. 9로부터 배관 직경이 작을수록 오리피스 설치에 의한 감쇠효과는 더 크게 나타나지만, BR의 효과는 배관 직경이 큰 경우 더 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

3.4 오리피스스의 두께변화에 따른 감쇠효과

오리피스스의 두께 변화가 감쇠효과에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해서 직경 14 mm의 배관에서 약 50%의 BR을 갖는 오리피스스를 position 2에 설치하여 오리피스스의 두께를 변화시켜가며 계산을 수행하였다. Fig. 10에 나타낸

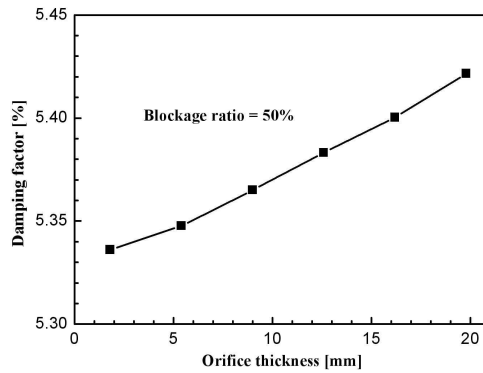


Fig. 10. Damping factors as a function of orifice thickness

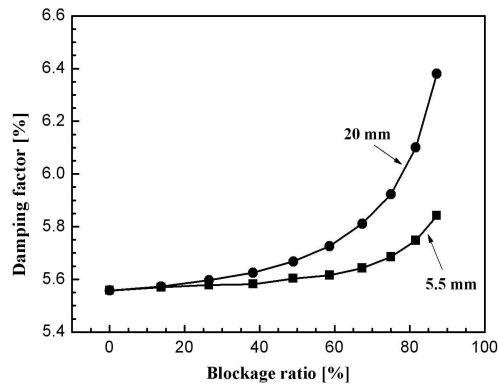


Fig. 11. Damping factors as a function of blockage ratio of orifices with thickness of 5.5 and 20 mm

바와 같이, 오리피스스의 두께가 증가할수록 감쇠 인자 값은 완만히 증가하였다. 직경 14 mm의 배관에 오리피스를 position 2에 설치하고, 오리피스 두께를 5.5 mm와 20 mm로 변화시키며 BR에 따른 감쇠인자를 계산하여 Fig. 11에 나타내었다. 이로부터 오리피스가 두꺼울수록 감쇠효과가 크며 BR의 증가에 따른 감쇠효과의 증가도 현저함을 알 수 있다. 이는 오리피스스의 두께가 증가함에 따라 속도진동이 크게 억제되어 음향파의 공진성이 약화되기 때문으로 판단된다. 또한, 오리피스스의 두께가 5 mm이하로 얇은 경우에는, 유로 봉쇄율에 따른 감쇠인자의 변화가 거의 없음이 관찰되었다. 이는, 오리피스가 감쇠 기구로 작용하기 위해서는 임계 두께가 존재함을 의미한다.

IV. 결 론

유체 공급배관내의 압력진동을 감쇠할 수 있는 방법으로 배관내에 오리피스를 설치하는 방법을 채택하여, 그 음향학적 감쇠효과를 수치해석을 통해 조사하였다. 다양한 오리피스 설계 인자로서, 오리피스 설치 위치, 배관과 오리피스의 직경, 오리피스스의 두께를 선정하여, 각각의 인자가 압력 진동 감쇠에 미치는 효과를 선형해석을 통해 파악하였다.

오리피스스의 위치에 따른 계산 결과로부터, 압력진동의 마디, 즉 속도진동의 배가 되는 위치에 오리피스를 설치할 때 가장 효과적으로 압력진동이 감쇠되는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 오리피스를 압력진동의 배에 설치한 경우에는 오리피스스의 설치 효과가 아주 미약하였다. 오리피스스의 유로 봉쇄율이 증가함에 따라 감쇠효과는 단조적으로 증가하였다. 그러나, 봉쇄율의 증가는 유동저항의 증가를 의미하므로 상충되는 두가지 효과의 적절한 타협이 필요할 것이다. 또한, 직경이 더 작은 배관에서 감쇠 효과가 더 크게 나타났다. 그리고, 오리피스스의 두께가 증가할수록 공진성을 약화시켜 감쇠효과가 크게 나타남을 알 수 있었다.

본 연구에서는, 압력진동의 진폭이 작다는 가정에 기초하여 오리피스스의 음향학적 감쇠효과를

연구하였고, 그 결과로부터 배관내에 설치될 수 있는 오리피스스의 설계 자료를 얻었다. 앞서 언급하였듯이, 본 연구는 배관내 압력진동 감쇠 기구인 오리피스 설계를 위한 기초적인 연구로서 가치가 있다. 향후의 발전적인 연구로서 배관내 평균 유동효과, 비선형 진동 효과, 액체상 유체의 진동감쇠에 관한 연구를 고려해 볼 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) Harje, 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, 2002, pp. 207-214.
- 3) 서영수, 정의봉, "유체 맥동을 고려한 압축기 토출 배관의 진동 응답 해석", 한국소음진동 공학회 춘계학술대회논문집, 2002, pp. 1049-1054.
- 4) Shibanov, A. A., Personal Communication, 2002.
- 5) Williams, F. A., *Combustion Theory*, 2nd ed., Addison-Wesley, Menlo Park, CA, 1985, Ch. 9.
- 6) Zucrow, M. J. and Hoffman, J. D., *Gas Dynamics*, Vol. II, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1977.
- 7) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000, Ch. 5.
- 8) 김성구, 김홍집, 손채훈, "로켓엔진 연소기 설계의 음향안정성 평가를 위한 해석코드 개발", 한국항공우주학회지, 제32권, 제6호, 2004, pp. 110-116.
- 9) 박이선, 손채훈, "액체 로켓엔진 분사기의 음향감쇠 효과에 관한 수치적 연구", 한국항공우주학회지, 제33권, 제5호 2005, pp. 79-86.
- 10) Yang, V. and Anderson, W. E. (eds.), *Liquid Rocket Engine Combustion Instability*, Vol. 169, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA, Washington, DC, 1995, pp. 377-399.