

공압 제진 시스템의 해석과 설계: II. 시뮬레이션, 실험과 설계 최적화

문준희[#], 박희재^{*}

Analysis and Design of a Pneumatic Vibration Isolation System: Part II. Simulation, Experimental Verification and Design Optimization

Jun Hee Moon[#] and Heui Jae Pakh^{*}

ABSTRACT

This is the second of two companion papers concerned with the analysis and design of a pneumatic vibration isolation system. The properties of the system are clarified by observation of the transmissibility surface calculated by the models and algorithm developed in the first paper of this research. It is shown that the nonlinear model proposed in this research is more closer to experimental results than the linear model that have been used in previous studies. The design optimization of the major design variables that affect the performance of the system is achieved by using the condition for attenuation, disturbance rejection and maximum damping in resonance peak. The design space search method is adopted for the optimization of the orifice area. The models, transmissibility calculation algorithms and design optimization techniques developed in this research are shown to be greatly helpful to the optimal design of the pneumatic vibration isolation system by experiment.

Key Words : Vibration isolation (진동 절연), Design optimization (설계 최적화), Design variable (설계 변수), Simulation (시뮬레이션), Transmissibility (전달율)

1. 서론

본 연구의 선행 논문¹에서 공압 제진 시스템의 모델과 전달율 계산을 위한 알고리즘을 개발한 토대 위에, 본 논문에서는 시뮬레이션을 수행하여 공압 제진대의 특성을 파악하고, 실험 결과와의 비교를 통해 모델의 정확성을 검증하며, 최적 설계 기법을 사용하여 공압 제진 시스템의 최적 설

계를 시도하고자 한다.

2. 시제품 제작과 측정 시스템 구성

공압 제진 시스템의 성능 및 특성 평가 실험을 위해 크게 다음과 같은 장치들이 필요하다. 공압 제진대 시제품과 가진 시스템, 측정 시스템이다.

접수일: 2003년 9월 18일; 게재승인일: 2004년 8월 13일

[#] 교신저자: 서울대학교 마이크로 열 시스템 연구센터

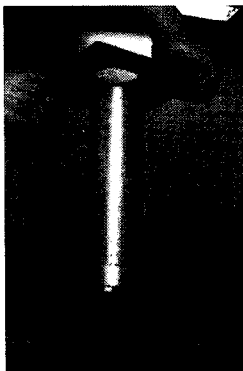
E-mail: junimoon@snu.ac.kr Tel: (02) 880-1680

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

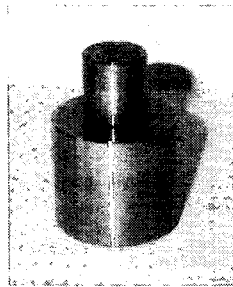
2.1 공압 제진 시스템의 제작

Table 1 Specifications for simulation and experiment

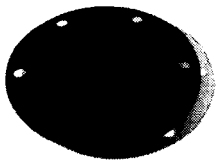
Part	Value	
	Basic	Variable
Spring chamber volume, V_s	$2.60 \times 10^{-5} m^3$	
1 st Damping chamber volume, V_1	$3.44 \times 10^{-4} m^3$	$1.96 \times 10^{-4} m^3$
2 nd Damping chamber volume, V_2	$1.75 \times 10^{-3} m^3$	
Orifice area, A_{ori}	$1.77 \times 10^{-8} m^2$	$3.85 \times 10^{-7} m^2$
Payload, M	56.3 Kg	33.5 Kg
Piston area, A_p	$1.61 \times 10^{-3} m^2$	
Damping coefficient of diaphragm, C_{dp}	$50 N \cdot s / m$	
Stiffness of diaphragm, K_{dp}	$4.52 \times 10^3 N / m$	



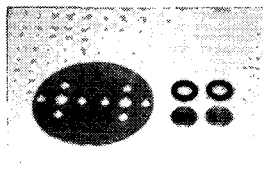
(a) Cylinder and pendulum



(b) Piston



(c) diaphragm



(d) Orifices and packings

Fig.1 Test product of the pneumatic vibration isolator

Table 1 의 사양에 따라 시제품을 제작하였다. 공압 시스템을 위한 공급 공압은 7 kg/cm^2 이고, 공압은 유효하중의 크기에 따라 자동 조절 밸브에 의해 기계적으로 조절된다. Fig.1 (a)-(d)는 각각 공기방들과 오리피스를 내장한 실린더, 피스톤, 고무막, 오리피스의 사진이다.

2.2 측정 시스템의 구성

가진과 측정을 동시에 수행할 수 있는 측정 시스템을 구성하였다. 가진기는 PZT 스택으로 구성하였으며, 4000 N의 힘으로 $25 \mu\text{m}$ 의 진폭을 구동한다. 압전 구동기와 인접 기구부의 접합부에는 원형 굴곡 힌지를 사용하였다.

많은 양의 실험을 일률적으로 수행하기 위해서 가진신호를 출력하고 센서에서 검출된 신호를 받아 전달일까지 바로 계산해서 결과를 저장까지 하는 통합 테스트 소프트웨어를 개발하였다. 실시간 운영체제 기반 위에서 개발되었으며 프로그래밍 언어로는 C 언어를 사용하였다. 전체 테스트 장치는 Fig.2 와 같다.

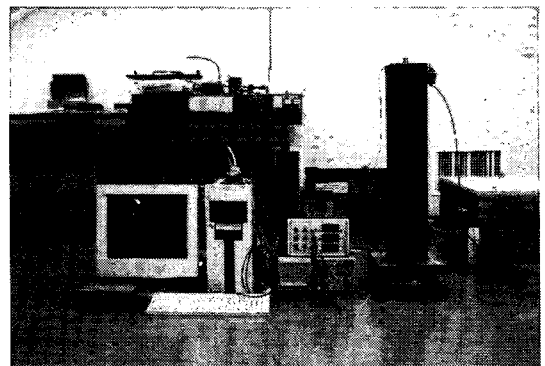


Fig.2 Test system for actuation and measurement

2.3 실험에 의한 설계 변수의 식별

시뮬레이션을 수행하기 위해 설계변수들의 값은 모두 알려져 있어야 하나, 고무막의 탄성계수와 감쇠계수는 제진대에 조립되어 있지 않은 상태에서 측정하기 어렵다. 따라서, 제진대에 조립이 되어 있는 상태에서 실험을 통해 그 값들을 구한다.

2.3.1 고무막의 탄성계수

고무막의 탄성계수는 실험적인 방법으로써 공압 제진 시스템의 공진주파수를 관찰하여 구하게 된다.

고무막의 탄성계수 K_{dp} 와 공기방의 탄성계수 K_{air} 와 하중 M 과의 관계는 본 연구의 선행 논문¹을 통해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_{dp} = 4\pi^2 f_n^2 M - K_{air} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } K_{air} = \frac{kA_p^2 P_0}{V_{air}} \quad (2)$$

공기방의 탄성계수 K_s 는, 식(2)를 이용하여 공압 제진대의 사양을 입력하면 구할 수 있으므로, 하중 M 을 변화시켜 가면서 실험을 하여 공진주파수 f_n 를 측정하는 것을 통해 고무막의 탄성계수 K_{dp} 를 구한다. 측정과 계산을 통해 얻은 K_{dp} 값은 $4.52 \times 10^3 N/m$ 이다.

2.3.2 고무막의 감쇠계수

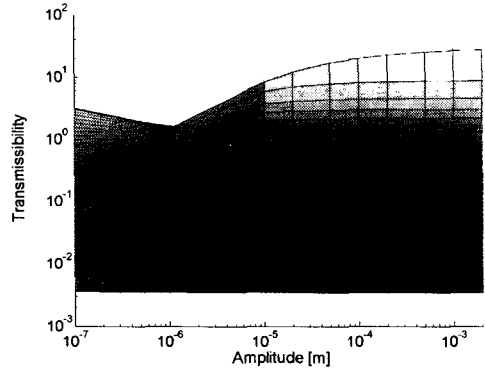
공압 제진 시스템의 감쇠는 비선형성을 포함하고 있으므로 최소 자승법 등의 적용이 곤란하여 시행착오법과 이분법에 의해 고무막의 감쇠계수를 구한다. 그 과정은 다음과 같다.

오리피스 비선형 감쇠계수를 계산식에 의해 구한 후 그 값을 시뮬레이션 식에 입력하며, 고무막의 감쇠계수는 적당한 값을 입력한 후 해당되는 전달함수의 모양과 실험결과를 비교하며 고무막의 감쇠계수를 변화시켜 가며 정한다. 얻어진 고무막의 감쇠계수 C_{dp} 는 $50 N \cdot s/m$ 이다.

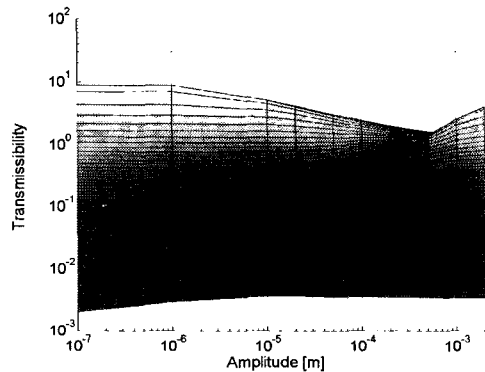
3. 시뮬레이션을 통해 관찰한 공압 제진대의 특성

다음은 설계 사양이나 하중이 제진 시스템의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해, 본 연구의 선행 논문¹에서 개발한 모델과 알고리즘으로, 다양한 조건에서 시뮬레이션한 결과를 실어 놓았다. 전달율 곡면이 입체이기 때문에 관찰하는 방향에 따라 특정한 특성이 잘 관찰되기도 하고 잘 안되기도 하므로, Fig.3 에서는 전달율 곡면을 주파수 축에서 관찰하였고, Fig.4~6 은 진폭축에서 관찰하였다.

3.1 오리피스 단면적의 영향



(a) $A_{ori} = 1.77 \times 10^{-8} m^2$



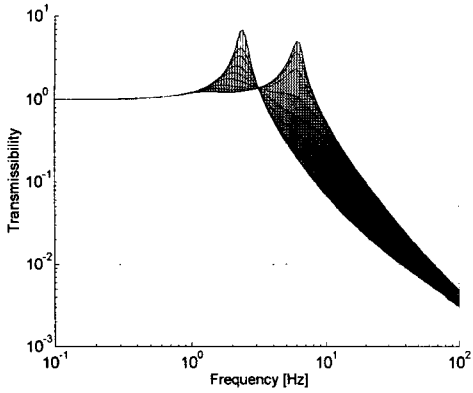
(b) $A_{ori} = 3.85 \times 10^{-7} m^2$

Fig. 3 Influence of the orifice area

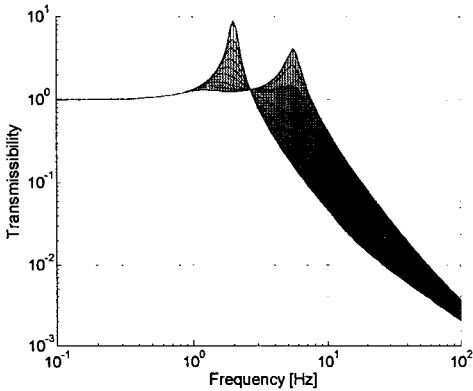
오리피스의 단면적의 변화의 영향을 살펴보기 위하여 Table 1 의 입력 값 중 오리피스의 직경만 변화를 주었다. 오리피스 단면적의 영향을 가장 잘 관찰할 수 있도록 주파수 축에서 본 전달율 곡선을 나타내었다. 관찰된 바와 같이 곡선의 전체적인 모양은 그대로이지만, 최적의 감쇠를 얻는 진폭의 범위가 달라진다는 것을 발견할 수 있다. 이는 실제 시스템의 주위 진동 환경에서 전달되는 진동의 진폭에 따라 감쇠 효과가 가장 큰 오리피스의 단면적을 정할 수 있음을 의미한다.

3.2 하중의 영향

다음은 진폭축에서 본 전달율 곡선이다. 그림에서 하중이 커지면 공진주파수가 낮아지는 것을 발견할 수 있다.



(a) $M = 33.5 \text{ Kg}$



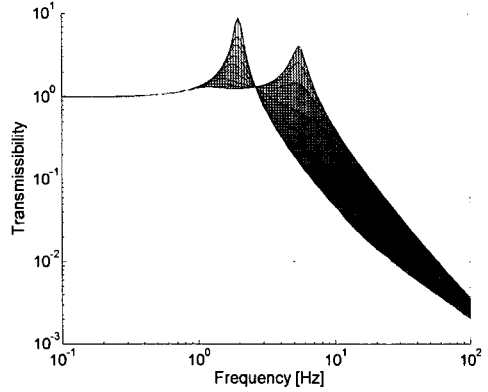
(b) $M = 56.3 \text{ Kg}$

Fig.4 Influence of the payload mass

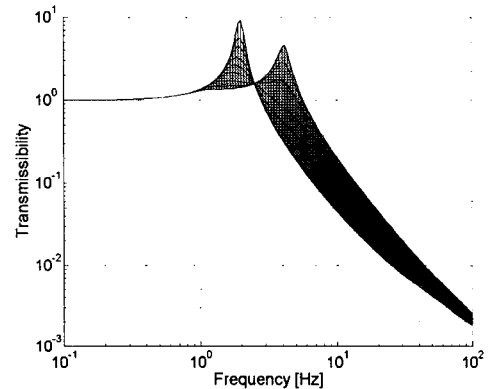
하중의 변화에 의해 공진 주파수의 변화가 있는 것은 하중에 따라 공기방의 탄성은 변화되지만 고무막의 탄성은 일정하기 때문이다. 고무막의 탄성 자체는 크지 않지만 하중이 줄어들면 공압이 낮아져 고유진동수에 미치는 영향력이 커진다. 이와 같은 현상은 본 연구의 선행 논문¹에서 등가 기계 모델의 관찰을 통해 예측한 내용과 일치한다.

3.3 공기방의 크기의 영향

우선 다음은 탄성 공기방의 크기를 변화시킨 시뮬레이션 결과이다.



(a) $V_s = 2.60 \times 10^{-5} \text{ m}^3$



(b) $V_s = 4.91 \times 10^{-5} \text{ m}^3$

Fig.5 Influence of the spring air chamber volume

Fig.6 에서는, 탄성 공기방의 크기는 기본적인 값을 쓰고, 감쇠 공기방의 크기를 변화시켜 보았다.

가장 두드러지게 발견되는 영향은, Fig.5 에서는 탄성 공기방의 영향이 강한 영역에서 공진 주파수의 크기가 달라지는데, Fig.6 에서는 탄성 공기방과 감쇠 공기방을 합친 공기방의 효과가 강한 영역에서의 공진 주파수의 크기에 변화가 있다는 것이다. 또한, 위의 두 경우에 있어서 공통적으로 발견되는 것은 두 공기방의 부피차이가 커서 오리피스 통과 유량이 커지는 경우에 감쇠 효과도 커진다는 것이다.

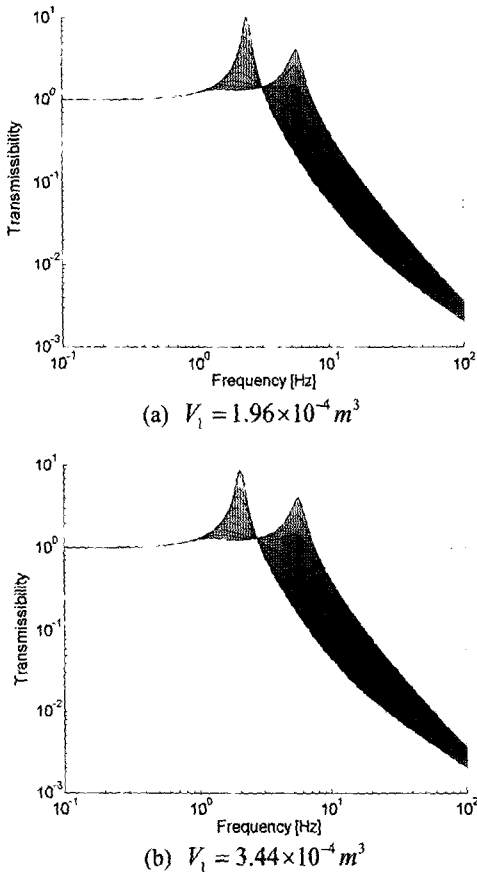


Fig.6 Influence of the damping air chamber volume

4. 실험을 통한 모델의 검증

시뮬레이션을 통한 공압 제진 시스템의 특성을 3장에서 고찰하였으나 그 신뢰성을 검증할 필요가 있다. 본 장에서는 본 연구에서 만든 모델이 기존의 모델보다 더 실제 시스템의 모사를 잘 수행하고 있음을 실험결과와의 비교를 통해 입증하였다.

4.1 선형 모델, 비선형 모델에 의한 전달율과 실험 결과의 비교

실험에 사용된 공압 제진 시스템의 사양은 Table 1의 Basic 난과 같다. 실험 결과를 이용하여, 선행 연구에서 빈번히 사용되는 선형모델을 사용하는 것이 실제 실험결과와 얼마나 다른지를 밝히

고, 이에 대해 본 연구에서 제시된 비선형 모델을 사용한 시뮬레이션 결과와 실험결과와의 일치성을 보임으로 모델의 타당성을 밝히고자 한다. 다음은 기존의 선형 모델에서 사용하는 공압제진대의 오리피스에 의한 감쇠에 사용되는 식이다.^{2,5}

$$\Delta P_{ori} = -C_i Q \tag{3}$$

여기서, ΔP_{ori} 는 오리피스 통과시의 압력 강하량이고, Q 는 오리피스 통과 유량이다

C_i 는 모델의 검증에 사용이 된 변수이다. 특정한 진폭에서의 전달율 측정 데이터로 곡선 맞춤을 하여 C_i 값을 구한 후, 다른 진폭일 때의 실험 결과와 비교하였다.

바닥에서 전달되는 진동의 진폭은 일반적으로 0.1에서 10 μm 정도로 알려져 있다.² 일반적인 공압 제진대를 0.1 μm 의 진폭으로 가진하여 측정 결과를 Fig.7에 십자표시로 도시하였으며, 본 연구에서 개발한 비선형 모델과 감쇠에 관해서는 식(3)을 사용하는 기존의 선형 모델에 의한 전달율을 각각 실선과 점선으로 도시하였다.

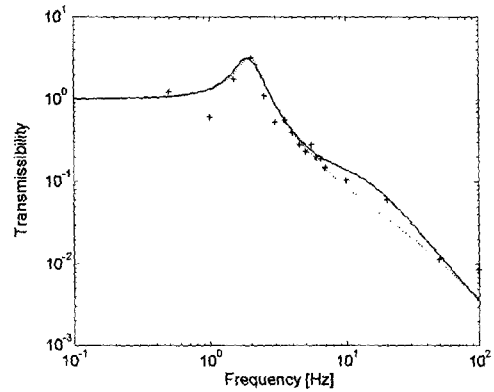


Fig.7 Transmissibility in amplitude 0.1 μm
(+:experiment, solid line: nonlinear, dotted line: linear)

Fig.7에서는 비선형 모델과 선형 모델이 거의 비슷한 전달율 곡선을 그리고 있지만, Fig.8에 10 μm 의 진폭으로 가진을 하였을 때, 비선형 모델은 실험치에 거의 접근하고 있지만, 선형 모델은 큰 편차를 보이고 있다. 이는 선형 감쇠 모델

이 실제 현상과 다른 결과를 보이고 있으며, 제안된 모델이 실제 공압 제진 시스템을 예측하고 모사하는데 탁월함을 보여주고 있다.

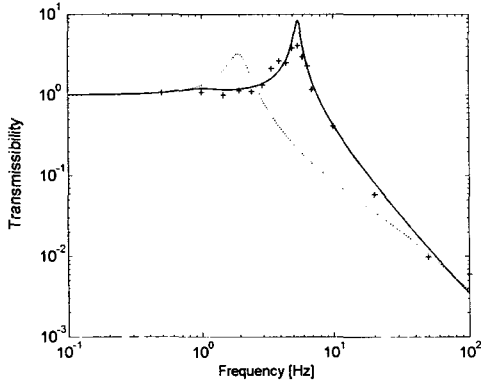


Fig.8 Transmissibility in amplitude $10 \mu\text{m}$
(+:experiment, solid line: nonlinear, dotted line: linear)

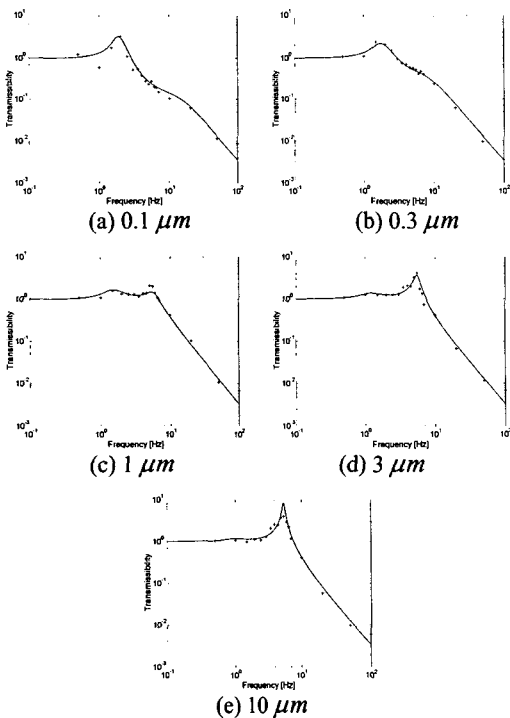


Fig.9 Transmissibility comparison between experiment and simulation

4.2 다양한 진폭에서 개발된 모델과 실험 결과의 전달을 비교

실험과 시뮬레이션 사이의 유사성을 선명하게 하기 위해서 0.1, 0.3, 1, 3 및 $10 \mu\text{m}$ 의 진폭에 대한 전달을 곡선을 Fig.9에 도시하였다. 진폭의 변화에 의한 전달을 곡선의 변화를 본 연구에서 개발한 모델이 잘 모사하고 있음을 보여준다.

5. 공압 제진 시스템 최적설계의 개요

공압 제진 시스템 최적 설계의 기초 작업으로서, 설계 변수와 제약 조건을 합리적으로 선정하고, 시스템의 성능 지표로 사용 가능한 목적 함수를 선택한다.⁶

5.1 설계 변수의 선택

제진 성능에 영향을 주는 설계 변수는 다음과 같다.

첫째는, 정격 유효 하중이다. 제진대의 정격 하중이 결정되면 피스톤의 단면적이 결정된다.

둘째는, 공기방들의 부피이다. 공기방의 부피는 하중과 함께 제진 시스템의 고유진동수를 결정하여 제진 성능을 좌우하게 된다.

셋째는, 오리피스 면적이다. 오리피스 면적은 오리피스의 통과 유량을 결정하여 공압 제진 시스템의 공진점에서의 감쇠를 좌우한다.

5.2 제약 조건

공압 제진대의 제약 조건은 조립이나 제작 가능성으로 인해 발생하는데, 공압 제진대는 비교적 넓은 공간을 이용하여 제작이 되므로 설계 공간이 제약 조건에 의해 제한을 받는 경우가 거의 없어서 공압 제진대의 설계 문제를 비제약 문제로 볼 수 있게 한다

5.3 목적 함수

공압 제진대의 최적 설계는 기본적으로 여러 가지 기능을 충족하도록 설계하여야 하는 다목적 설계 최적화 문제(multi-object design optimization problem)이다. 공압 제진대의 경우에는 유효하중과 공기방의 크기에 관한 목적함수는 서로 의존성이 강하고 각각이 단순한 형태를 가지므로 이 목적함수들을 이용하여 먼저 유효하중과 공기방의 크기를 정하고, 그 다음에 오리피스의 단면적을 구하

는 방법을 사용하고자 한다. 오리피스의 단면적을 구하는 목적함수는 비선형 미분 방정식을 포함하여 그 계산이 복잡하고, 오리피스 단면적의 최적화를 통해 구한 오리피스의 단면적의 크기가 최적 감쇠 성능을 제외한 다른 성능지표에 큰 영향을 주지 않으므로, 다른 주요 설계 변수들을 결정한 후에 적용하는 것이 바람직하다.

6. 공압 제진 시스템의 설계 최적화

6.1 유효하중 및 공기방의 크기

공압 제진대의 제진 원리는 고유진동수보다 큰 진동수의 영역에서의 감쇠(attenuation)를 이용하여 전달되는 진동을 절연하는 것이므로 고유진동수를 낮추는 것이 중요하다. 하지만, 고유진동수를 많이 낮추면 제진대의 탄성 계수값이 낮아져 제진 테이블에 가해지는 교란 힘에 강인하지 못한 성질을 갖게 된다. 따라서, 공기방의 크기는 바닥에서 올라오는 진동에 대해서는 아주 부드러운 현가 시스템처럼 거동하고, 동시에 하중 부분에 가해지는 힘에 대해서는 아주 완강한 시스템으로서 반응하도록 하는 것이 가장 이상적이다. 이러한 두 가지 요구조건은 서로 반대되는 설계 사양을 필요로 하기 때문에 이의 절충점을 찾는 것이 최적 설계 사양을 결정하는 방법이 된다.

공압 제진 시스템의 강성이 테이블 위의 교란 힘에 대해서 어느 정도의 강인성을 갖도록 하는 지에 대한 조건식은 식(4)과 같다.

$$K_s + K_{dp} \geq \frac{F_{tabletop}}{\delta_{tabletop}} \quad (4)$$

여기서 $F_{tabletop}$ 는 제진대 위에 가해지는 교란힘이고, $\delta_{tabletop}$ 는 교란힘에 의해 발생되기 원하는 테이블의 최대변위이며, K_s , K_{dp} 는 각각 공압 시스템의 등가탄성계수와 고무막에 의한 탄성계수이다. 선행 연구에서 K_s 는 다음과 같다.¹

$$K_s = \frac{kA_p^2 P_0}{V_s} \quad (5)$$

여기서 V_s 는 공기방의 부피이고, P_0 는 공압제진대가 작동하는 압력이며, A_p^2 는 피스톤의 단면

적이다.

반면, 바닥에서 전달되는 진동에 대해서 얼마나 유연하게 진동을 흡수하는가에 대한 조건식은 다음과 같다. 공압 제진 시스템에 의한 제진은 고유진동수보다 큰 영역에서의 감쇠를 이용하는데, 이 영역에서는 진동수비의 제곱에 비례하여 진동이 감쇠되므로 식(6)과 같은 조건 식을 사용한다.

$$\left(\frac{f_{target}}{f_n} \right)^{-2} \leq Tr \quad (6)$$

여기서, Tr 은 진동을 감쇠하고자 하는 목표하는 전달율이고, f_{target} , f_n 은 각각 절연을 시키고자 하는 진동수와 공압 제진 시스템의 고유진동수이다. f_n 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_s + K_{dp}}{M}} \quad (7)$$

여기서 M 은 공압제진대의 피스톤의 질량과 피스톤에 부착되는 하중의 질량을 합한 유효질량을 의미한다. 식(7)를 식(6)에 대입하면 다음과 같다.

$$K_s + K_{dp} \leq 4\pi^2 M \cdot Tr \cdot f_{target}^2 \quad (8)$$

한편, 피스톤의 단면적은 대수적으로 구한다. 유효질량 M 을 공압 제진대가 지지하고 있어서, 작동 공압 P_0 로 지지하도록 하려면 피스톤의 단면적 A_p 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_p = \frac{M \cdot g}{P_0 - P_{at}} \quad (9)$$

여기서 P_{at} 는 대기압이고, 여기서 작동 공압 P_0 와 연관한 범위에 관한 식은 다음과 같다.

$$P_{MIN} \leq P_0 \leq P_{MAX} \quad (10)$$

일반적인 작업환경에서 P_{MIN} 는 2 Kg/cm², P_{MAX} 는 5 Kg/cm² 정도의 값을 갖는다. 식(4), (8)의 두 조건을 합하고 식(5), (9)를 대입하면 다음과 같

은 결과를 얻는다.

$$\frac{k \left(\frac{M \cdot g}{P_0 - P_{at}} \right)^2 P_0}{F_{tabletop} / \delta_{tabletop} - K_{dp}} \leq V_s \leq \frac{k \left(\frac{M \cdot g}{P_0 - P_{at}} \right)^2 P_0}{4\pi^2 M f_{target}^2 Tr - K_{dp}} \quad (11)$$

식(11)은 유효질량 M 을 정하였을 때, 공기방의 부피를 정하는 식이다. 유효질량의 크기를 정하는 데에는 특별한 제한이 없지만, 식(7)와 같이 제진 시스템의 고유진동수를 낮추어 제진대의 성능을 높이는데 일반적으로 많이 쓰는 방법이 유효하중을 늘이는 것이다.

따라서, 다음과 같은 방법으로 유효질량 M 과 공기방의 부피 V_s 를 정한다. 먼저 작동압력을 식(10)의 범위 내에서 정하고, 유효질량을 정한 후 식(11)에 따라 공기방의 부피를 결정한다. 공기방의 부피를 결정할 수 없거나 현실적이지 않은 값이 발견되면 유효질량을 바꾸며 시행착오에 의해 공기방의 부피를 정한다. 최종적으로 얻은 유효질량과 공기방의 부피를 실질적인 설계를 하면서 약간의 차이가 발생하는 것은 작동압력을 조정함으로 해결한다.

6.2 오리피스 단면적

공압 제진대의 오리피스 단면적의 최적 설계를 위한 설계 조건 탐색은 다른 모든 설계 변수들이 결정이 된 이후에 수행하게 되므로, 단일 변수에 대한 최적화 문제가 된다. 오리피스의 단면적은 감쇠(damping)성능을 좌우하게 되며, 감쇠는 고유진동수에서의 전달율을 최대한 줄이려는 데 그 목적이 있다. 따라서 목적함수로서 전달율을 사용한다. 공압 제진 시스템에 오리피스의 단면적을 구하는 것은, 환경에서 전달되는 진동의 진폭에 대해서 공진주파수의 전달율을 최소화하는 오리피스 단면적을 찾는 방법을 통해 구할 수 있다.

그런데, 공진 주파수는 주변의 진동수에 비해서 최대인 점이며, 이런 최대인 점이 진폭에 대해서는 최소인 점을 찾는 방법은 안장점(saddle point)을 찾는 문제이다. 또한 선행 연구¹에서 관찰된 전달율 곡선의 특징은, Fig.10 과 같이 공진점의 크기가 최소가 될 때 2 개의 공진점을 갖게 된다는 것인데, 안장점 문제일 뿐 아니라 안장 점에서 최

대값이 2 개인 점을 찾는 문제는 일반적으로 최적 설계 기법에서 자주 채용되는 최적성 기준에 의한 간접적인 방법의 적용이 곤란하다. 왜냐하면, 이 방법은 경사도 벡터(gradient vector)를 사용하여서 목적함수가 최소값이 될 때의 설계 변수를 최적값으로 정하는 것인데, 이 방법을 이용해서 최대값이 2 개인 안장점을 찾는 것은 무척 어려운 일이기 때문이다. 따라서, 설계 공간의 특성을 이용하여서 최적 설계 변수를 찾는 직접적인 방법을 사용하기로 한다.

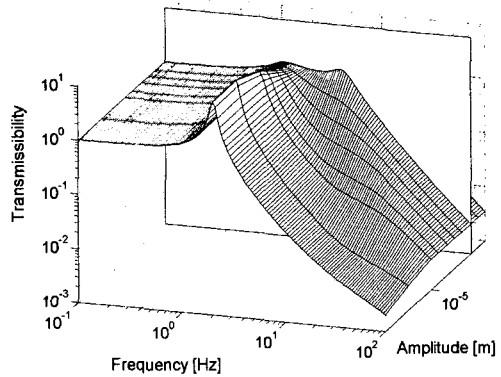


Fig.10 Location of the cutaway plane for observation of the transmissibility curve in specific vibration amplitude

설계 공간을 탐색하기 위한 탐색 조건은 일반적으로 최적성 기준을 만족시키려는 과정에서 만들어 지는 것이 아니며 설계하고자 하는 시스템에 대한 정성적인 이해 위에서 만들어진다. 따라서, 최저의 공진 전달율을 갖게 하는 오리피스 단면적을 찾기 위해, 가진 진폭에 따라 공진 전달율이 최저일 때 두개의 공진점이 발생한다는 특성을 이용하여 다음과 같은 알고리즘을 개발하였다.

우선 오리피스 면적을 제외한 공압 제진 시스템의 사양을 입력한다. 임의의 오리피스 면적을 입력한 후 감쇠가 최대가 되기를 원하는 진폭에 대한 전달율 곡선을 계산한다. 또한, 식(5)와 식(7)로부터 탄성 공기방과 하중에 의한 고유 진동수 $f_{n,h}$ 와 전체 공기방과 하중에 의한 고유 진동수 $f_{n,l}$ 을 각각 계산한다. 전달율 곡선이 두 개의 최대값을 갖는지 확인한다. 그렇지 않을 경우 공진

주파수가 $f_{n,h}$ 에 가까우면 오리피스 면적을 증가시키고, 공진 주파수가 $f_{n,l}$ 에 가까우면 오리피스 면적을 감소시킨다. 다시 위의 과정을 반복한다. 전달율이 두개의 최대값을 갖게 되면 두 값의 차이가 허용오차 이하인지 판별하고, 그렇지 않은 경우 다시 오리피스의 면적을 미세하게 조정한다. 최대값이 허용오차 이하가 될 때까지 반복한 후 프로그램을 종료하고 최적의 오리피스 면적을 얻는다. 이를 흐름도로 나타내면 Fig.11 과 같다.

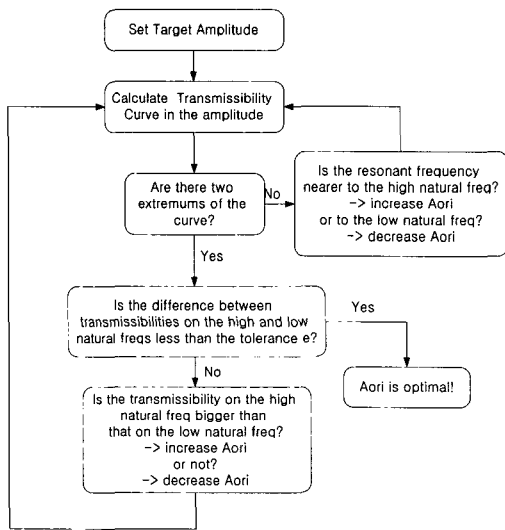


Fig.11 Design space search algorithm for optimization of pneumatic vibration isolators

이 알고리즘으로 작성된 프로그램은 Matlab 으로 작성되었으며, 선형화된 전달함수를 이용하여 전달율을 구하였다. 펜티엄 4 프로세서를 장착한 1.4 GHz PC로 연산을 수행했을 경우 6.52 초 가량의 시간이 소요된다. 계산 과정에서 두 전달율이 얼마나 같은가를 판정하기 위한 허용 상대오차 ϵ 는 10^{-4} 으로 하였다.

Table 1 에 기술된 사양을 가진 공압 제진대에 대해서, 가진 진폭 $1 \mu m$ 인 경우에 이 최적화 알고리즘에 의해 계산된 최적의 오리피스 단면적은 $1.6734 \times 10^{-8} m^2$ 이다. 최적화 알고리즘을 수행한 결과로 얻은 오리피스의 단면적으로 공압 제진대를 설계하여 성능을 점검한 결과를 Fig.12 에 실어 놓았다. 실제 공압 제진대도 2 개의 공진 주파수를 가짐을 발견할 수 있고, 최대 전달율이 1.6155 정

도로 공진을 극소화하였음을 발견할 수 있다.

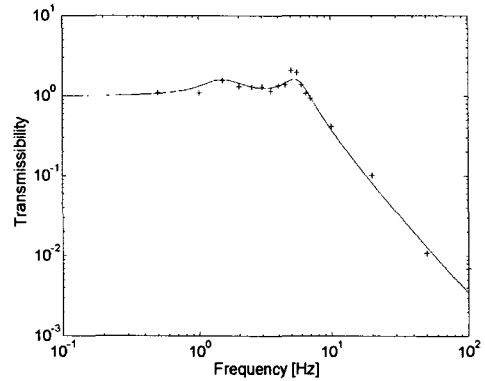


Fig.12 Transmissibility of the pneumatic vibration isolator in the optimized orifice area

7. 결론

- (1) 본 연구의 선행 논문에서 제시된 모델과 전달율 계산 알고리즘에 따라 다양한 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 공압 제진 시스템의 특성을 밝혔다.
- (2) 시제품을 제작하고 평가시스템을 구성하여 실험을 수행함으로써, 본 연구에서 제시한 모델과 전달율 계산 알고리즘이 실험 결과와 일치함을 보였고, 기존의 연구에서 사용되어온 선형 모델보다 실제 시스템을 잘 모사함을 보였다.
- (3) 공압 제진 시스템의 성능에 주요한 영향을 미치는 설계변수는 유효하중, 공기방의 부피, 오리피스의 단면적임을 밝혔다.
- (4) 유효하중과 공기방의 부피에 관한 목적함수는 상호 의존성이 강하고 식이 단순하여서 동시에 고려하여 계산함으로써 최적 설계를 이룰 수 있음을 보였다.
- (5) 공압 제진 시스템의 전달율 곡면의 특성을 이용하여 설계공간 탐색법을 통한 오리피스 단면적의 최적화를 달성하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 서울대학교 마이크로 열 시스템 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Moon, J. H., Pahk, H. J., "Analysis and Design of a Pneumatic Vibration Isolation System: Part I. Modeling and Algorithm for Transmissibility Calculation," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.21, No.10, 2004.
2. Shearer, J., "Study of pneumatic processes in continuous control of motion with compressed air," Transactions of ASME, Vol.78, pp. 233-242 , 1956.
3. Harris, C. M. and Crede, C. E., Shock and Vibration Handbook, New York: McGraw-Hill, 1961.
4. DeBra, D. B., "Design of laminar flow restrictor for damping pneumatic vibration isolators," CIRP Annals, Vol.33, No.1, pp.351-356, 1984.
5. Erin, C. and Wilson, B., "An improved model of a pneumatic vibration isolator: theory and experiment," Journal of Sound and Vibration, Vol.218, No.1, pp.81-101, 1998.
6. Arora, Jasbir S., Introduction to Optimum Design, McGraw-Hill, 1994.