

방진용 공기 스프링의 진동 특성 분석

Analysis on the Vibrational Characteristics of an Air Spring for Vibration Isolation

*이주홍¹, 김필기¹, #석종원²

*J. Lee¹, P. Kim¹, #J. Seok(seokj@cau.ac.kr)²

¹ 중앙대학교 기계공학부 대학원, ² 중앙대학교 기계공학부

Key words : Vibration Isolation System, Rubber Air Spring

1. 서론

현대 각종 산업의 기계장치들은 소형 경량화, 고 정밀화, 고속 자동화 되어가고 있는 추세이며 특히, 국내 산업의 큰 비중을 차지하고 있는 IT 관련 장비의 경우에는 고도의 정밀도가 요구되는 분야 중 하나이다. 이에 따라 요구되는 공정의 허용 진동 규제치 또한 점점 더 엄격해지고 있기 때문에 이를 위해서 정밀 공정 장비에는 고성능의 방진(제진) 시스템을 구축하는 것이 필수적이다.

방진 시스템은 크게 수동적 진동절연 시스템(Passive Vibration Isolation System)과 능동적 진동절연 시스템(Active Vibration Isolation System)으로 나눌 수 있다¹⁾. 수동적 진동절연 시스템은 수동적 제진 시스템을 이용한 방진 대책에 대한 고전적인 접근방법으로서 대표적으로 스프링과 댐퍼로 이루어진 시스템을 구성하는 방법이 있다. R.A. Ibrahim은 수동적 진동 절연 시스템에 대한 최근 연구 동향을 정리하였다²⁾. 그는 특히 쇼크나 임팩트 하중 등 작동환경이 열악한 환경 속에서의 안전성 확보를 위해 비선형 방진 모델의 필요성을 언급하였다.

능동적 진동절연 시스템은 반드시 센서, 컨트롤러, 액추에이터의 세 가지 구성 요소를 필요로 한다¹⁾. 이 방법은 방진대상 시스템의 진동을 센서를 이용하여 실시간으로 모니터링하여 피드백 해주는 시스템을 기초로 하고 있다. 피드백 받은 신호는 시스템의 진동이 발생하지 않도록 하는 방향으로 액추에이터를 작동시켜 제진을 수행한다. 이 방법은 외부에서 직접 시스템에 힘을 가하여 진동을 제어하는 방법이므로 감쇠기를 이용하여 시스템의 진동을 제어하는 수동적 제진 방법에 비해 진동 절연 성능이 훨씬 뛰어나다. 하지만 능동적 제진 방법은 진동을 제어하기 위한 힘을 외부에서 가해주어야 하기 때문에 큰 에너지를 필요로 하고 성능을 지속적으로 발휘하기 위해서는 고성능의 센서와 액추에이터를 필요로 하며 유지보수가 필수적이므로 비용이 높아지는 단점이 있다³⁾. 또한 센서나 액추에이터 등의 구성요소가 시스템에 부가되면서 시스템 자체의 특성이 변하게 되는 경우가 발생하게 되면 제진성능이 떨어지는 단점이 있다.

능동적 진동절연 시스템에 비하여 간단하고 경제적이며 안정적이고 예상치 못한 외부 가진에 대하여 효과적인 수동적 진동절연 시스템은 현재에도 가장 많이 쓰이는 제진 방식이며⁴⁾ 이의 마운트로서 코일스프링, 방진 고무, 공기 스프링, 포뮬 고무 등이 있다. 본 연구에서는 상기 열거한 마운트의 종류 중 고유 진동수가 낮고 내압에 따른 강성의 변화가 작기 때문에 방진 효과가 뛰어나며 내구성이 우수한 편으로 1 차 진동절연 마운트로 널리 쓰이는 공기 스프링의 비연성 동적 파라미터들을 도출하는 연구를 수행하였다.

2. 공기 스프링의 작동 특성 규명

공기 스프링은 내부 압력에 따라 시스템의 특성이 변화하는 특징을 가지고 있다. 따라서 작동 영역에 대한 공기 스프링의 내압을 결정하기 위해 MTS(810 Material Test System) 장비를 이용하여 공기 스프링의 내부 압력과 지지 하중과의 관계를 구하였다. 이 때 공기 스프링의 높이는

Design Variable 인 120mm 로 고정하였으며, 공기 스프링의 압력은 컴프레서에 부착한 Regulator(SMC, IR-1020)로 조절하였다. 마운트의 상·하면 체결 부위는 완전 평면이 아닌 약간 볼록한 형태의 곡면인 관계로 전체적인 면적에 골고루 힘을 분산시키기 위하여 제작한 테스트 장치와 마운트 사이에 매우 연한 고무패드를 삽입하였다. 실험은 0.5bar(0.05MPa)씩 압력을 증가시키면서 MTS 장비에 의해 측정된 힘을 기록하는 방식으로 진행하였다. Fig 1.은 본 실험에 사용된 MTS 장비이며 오른쪽 그래프는 내압에 따른 공기 스프링의 지지하중 곡선이다. 실험 결과 압력에 따른 하중 값이 매우 일정한 선형직선을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

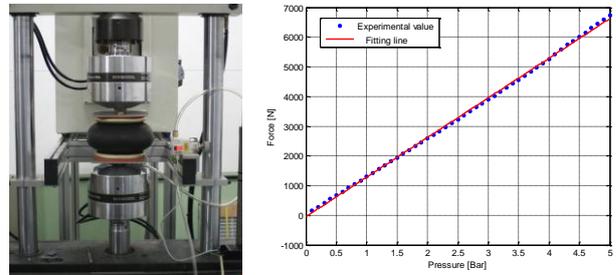


Fig. 1 MTS(810 Material Test System) and Curve of load for internal pressure of air spring

3. 공기 스프링의 비연성 동적 인자규명

방진 마운트의 동적 파라미터들을 구하기 위한 실험은 Vertical, Lateral, Torsional 총 3 방향의 자유도에 대해 진행하였다. 압력은 1bar 에서 3bar 까지 0.1bar 간격으로 변화시켜 가면서 각 방향에 대해 센서를 부착하고 임팩트 해머로 가진하여 주파수 응답 함수를 얻었다.

Vertical 방향의 자유도에 대한 실험 장치 및 개략도는 Fig 2. 와 같다. 방진 마운트의 높이는 이전 실험과 마찬가지로 120mm 로 고정하고 Lateral 및 Torsional 방향의 자유도를 배제한 채 Vertical 방향의 자유도만 독립적으로 존재할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 또한 바닥 진동이 시스템에 영향을 주지 않도록 하기 위해 질량이 큰 테이블 위에 실험장치를 강건히 체결하였다. 0.1Hz~200Hz 대역의 저주파용 가속도계를 사용하여 임팩트 해머 가진 신호와 가속도계의 응답 신호를 바탕으로 주파수 응답 함수를 공기 스프링의 내압의 함수로 구한 후 이를 이용하여 해당 압력에서

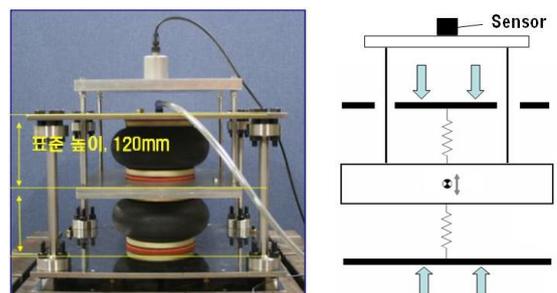


Fig. 2 Experimental system and its schematic diagram

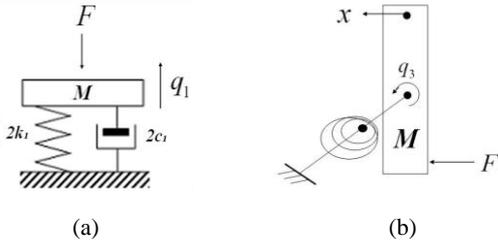
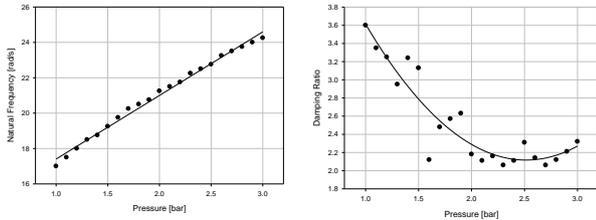


Fig. 3 Mathematical modeling of the system for (a) vertical or lateral and (b) torsional mode

의 공진 주파수(ω_n)와 감쇠비(ζ)를 구하였다. Vertical 자유도에 대한 실험 장치는 Fig. 3의 (a)와 같이 단순한 1 자유도계 시스템으로 모델링 할 수 있다. 상기 시스템의 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\ddot{q}_1 + 2c_1\dot{q}_1 + 2k_1q_1 = F \quad (1)$$

상기 운동 방정식을 이용하여 수직 방향의 스프링 상수 k_1 과 댐핑 계수 c_1 을 얻을 수 있다. 여기서 M 은 공기 스프링에 체결되어 가진된 실험장치 구성 요소의 총 질량에 해당하는 값으로 본 실험에서는 12.7kg 이다. 본 실험을 통하여 구한 결과값을 그래프로 정리하면 다음과 같다.



(a) Natural frequency and damping ratio for vertical mode
(b) Spring constant and damping coefficient for vertical mode

Fig 4. Parameters of system for vertical mode

Lateral 방향의 자유도와 Torsional 방향의 자유도에 대한 실험은 Fig. 2에 나와있는 실험장치를 수직으로 구성한 후 임팩트 해머 가진 실험을 실시하였다. Lateral 모드의 수학적 모델링은 Vertical 모드에 대한 실험 시스템과 동일하며 Torsional 모드에 대한 실험 시스템의 수학적 모델링을 위한 개략도는 Fig. 3의 (b)와 같이 표현할 수 있으며 이의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J\ddot{q}_3 + 2c_3\dot{q}_3 + 2k_3q_3 = Fl^2 \quad (2)$$

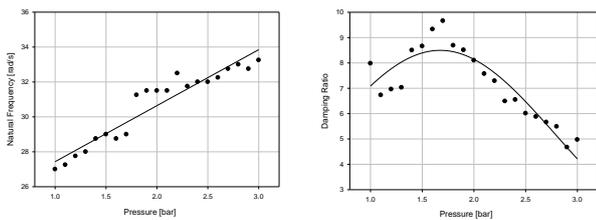


Fig. 5 Natural frequency and damping ratio for lateral mode

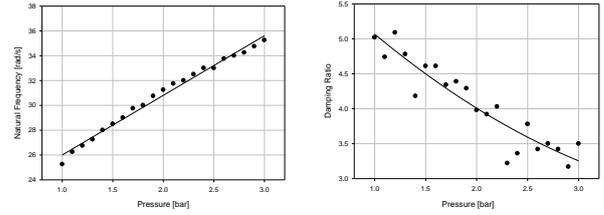


Fig. 6 Natural frequency and damping ratio for torsional mode

여기서 J 는 알루미늄 플레이트의 질량관성 모멘트 ($=0.058\text{kg}\cdot\text{m}^2$)이며 l 은 플레이트의 중심에서 가속도계 혹은 가진 점까지의 거리($=15.5\text{cm}$)이다.

상기 과정을 통하여 도출한 공기 스프링의 Lateral 및 Torsional 모드에 대한 파라미터는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타나 있었다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같이 각 자유도에 상관 없이 고유진동수는 압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있고 감쇠비는 압력이 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 각 자유도에 대한 파라미터를 구하기 위하여 한 자유도에 대한 다른 방향의 자유도를 상쇄시켜 각 방향 진동이 독립적으로 발생할 수 있도록 실험장치를 구성하여 공기 스프링에 대한 비연성 동적 파라미터들을 도출하였다. 실험 결과 내압에 따른 스프링 상수는 자유도에 관계없이 선형성을 가지고 있다는 사실을 알 수 있다. 또한 도출된 감쇠비의 값이 0.02~0.1 수준의 아주 낮은 값을 가지며 공기 스프링의 내압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 공기 스프링이 댐퍼의 역할을 하기 보다는 순수 스프링의 특성만을 가짐으로써 지지부에서 전달되는 진동의 차단에는 효과적이지만 감쇠비가 작기 때문에 공기 스프링에 의해 지지된 시스템 자체의 강제진동의 감쇠 효과는 크지 않음을 나타낸다.

후기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 청정기술기반 산업원천 기술개발사업의 지원으로 수행되었음(과제번호: 10024121-2008-21).

참고문헌

- Christine, C., "Vibration Isolation Theory and Practice", Assemble Automation, **29**(1), 8-13, 2009
- Ibrahim, R.A., "Recent Advances in Nonlinear Passive Vibration Isolators", Journal of Sound and Vibration, **314**(3/5), 371-452, 2008
- Mizuno, T., Toumiya, T., Takasaki, M., "Vibration Isolation System Using Negative Stiffness", JSME international journal. Series C, Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, **46**(3), 807-812, 2003
- Flint, E., Evert, M., Anderson, E., Flannery, P., "Active/Passive Counter-Force Vibration Control and Isolation Systems", Aerospace Conference Proceedings, 2000 IEEE, **4**, 285-298, 2000