

외부 챔버를 포함한 방진용 공기스프링의 진동 특성 분석 Analysis on the Vibrational Characteristics of an Air Spring with an External Chamber

*김필기¹, #석종원², 오병준³

*P. Kim¹, #J. Seok(seokj@cau.ac.kr)², B. Oh³

¹ 중앙대학교 기계공학부 대학원, ² 중앙대학교 기계공학부, ³ ANI

Key words : Rubber air spring, External chamber, Loss factor

1. 서론

현대 각종 산업의 기계장치들은 소형 경량화, 고 정밀화, 고속 자동화 되어 가고 있는 추세이다. 특히, 국내 산업의 큰 비중을 차지하고 있는 IT 관련 장비의 경우 고도의 정밀도가 요구되는 분야 중 하나이다. 그에 따라 요구되는 공정의 허용 진동 규제치 또한 점점 더 엄격해지고 있으며¹⁾ 이에 따라 외란과 내부 진동을 차단하는 방진 시스템(Vibration isolation system)에 대한 연구가 많이 활성화되고 있다. 또한 방진 시스템의 성능 개선에 대한 요구도 증가되고 있는 상황이다.

기존에 소개된 여러 방진 시스템 중에서 공기 스프링은 가장 많이 연구되고 있는 시스템의 핵심 부품 중 하나이다. 이 공기 스프링은 압축 공기를 이용하여 큰 하중을 지지할 수 있으면서 상대적으로 낮은 강성으로 낮은 고유진동수를 유지할 수 있고, 오리피스(Orifice)를 이용하여 감쇠 성능을 조절할 수 있으며, 요구에 따라 Leveling valve 등을 이용하여 Self-leveling 등이 가능한 방진 마운트(Vibration isolator)를 구성할 수 있는 장점이 있다²⁾. 한편, 요구되는 성능의 방진 시스템을 구축하기 위해서는 방진 마운트의 동적 거동을 예측하는 것이 무엇보다 선행되어야 한다. 그러나 공기 스프링은 구조와 유체가 연성된 성격에 기인하여 동적 거동의 예측이 쉽지 않은 문제가 있다. 따라서 현재까지도 공기 스프링의 특성을 규명하기 위하여 다양한 이론 및 실험적 모델들이 제안되고 있으며 특히 실험적으로 그 특성을 분석·예측하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

공기 스프링은 시스템의 진동을 최소화 하는데 그 목적을 두고 있기 때문에 원하는 방진 성능을 내기 위해서는 공기 스프링의 진동 특성을 예측하는 것은 매우 중요하다. 공기 스프링의 이론적 모델은 Shearer로부터 시작되었다³⁾. Shearer는 챔버와 모세관(Capillary tube)에서의 공기 흐름에 대해서 열역학적 관계를 이용하여 공압 실린더에 대한 비선형 모델을 제안하였다. 그러나 이 모델은 설계나 제어 목적으로 다루기에는 수학적으로 난해한 단점이 있다. Harris et al. 과 DeBra는 공압 스프링의 강성을 열역학적인 해석에 기초하여 공압에 의한 강성을 묘사하였다^{4,5)}. 이들은 피스톤의 움직임을 아주 작게 가정하여 공압 스프링에 대한 선형 모델을 제시하였다. 그러나 이들이 제시한 모델은 모세관에서의 유체의 속도와 튜브 내 압력 구배(Pressure gradient)의 효과를 고려하지 않았기 때문에 모델과 실제 실험 결과와는 많은 차이가 있었다. Erin 과 Wilson은 공압 스프링의 모델링을 획기적으로 발전시켰다⁶⁾. 이들은 공압 스프링을 모델링하는 과정에서 다이어프램의 영향을 고려하기 위하여 점성 감쇠(Viscous-damper), 이력 감쇠(Hysteretic-damper) 그리고 다이어프램의 강성을 추가하였고 이 모델을 실험결과와 비교함으로써 모델의 타당성을 입증하였다. J.-H.Lee와 K.-J.Kim은 이중 챔버형 공기 스프링을 이용하여 단일 챔버의 공기 스프링 시스템과 이중 챔버형 공기 스프링 시스템의 감쇠 성능을 복소 동강성 계수를 이용하여 기술하였다⁷⁾. 또한 이들은 복소 강성계수를 유도함에 있어 모세관 내 비선형 공기 유동을 고려하였다.

본 논문에서는 1 차 진동 절연 마운트로 널리 쓰이는 공기 스프링의 동적 특성을 연구하였다. 그 결과로 공기 스프링의 동적 특성을 분석하고 공기 스프링의 동적 거동을 예측함으로써 원하는 성능의 방진 마운트의 설계 방향을 제시하고자 하였다.

2. 실험장치 구성

공기 스프링에 외부 챔버를 연결하였을 때 일정 주파수 대역에서 시스템의 감쇠 성능이 증가한다는 사실은 이전의 연구에서 입증하였다⁸⁾. 본 연구에서는 외부 챔버의 조건에 따라 시스템의 감쇠 성능이 어떤 경향을 보이는지를 알기 위하여 Figure 1 과 같은 실험 장치를 구성하였다. 공기 스프링과 외부 챔버를 유연한 튜브로 서로 연결하였고, 공압 레귤레이터(SMC, IR-1020)를 이용하여 시스템에 일정한 압력이 공급되도록 하였다.

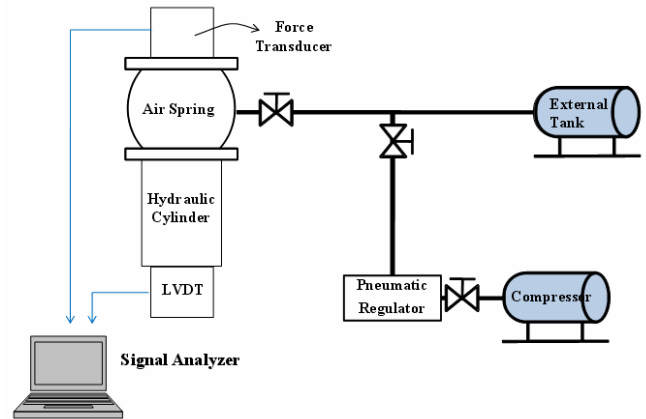


Fig. 1 A schematic diagram of experimental setup for displacement vs. reaction force

시스템은 만능재료시험기(810 MTS; Material Test System)를 이용하여 공기 스프링의 하부 마운트를 조화 함수 형태의 변위로 가진하고 상부 마운트에 걸리는 반력을 측정하였다. 공기 스프링에는 3bar의 일정한 압력으로 공급하였고 공기 스프링의 높이는 Design Variable인 120mm로 고정시켰다. 가진 변위는 0.5mm이며 0.25Hz에서 10Hz까지 주파수를 변화시켜가며 가진하였다. 본 실험에서는 공기 스프링의 동적 거동 및 외부 챔버와 연결한 튜브의 길이에 대한 영향을 알아보기 위해서 튜브의 길이를 2, 3, 4, 5m인 경우에 대해 각각 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과

시스템의 특성을 평가하기 위하여 복소 동강성계수(Complex Dynamic Stiffness)를 도입하였다. 복소 동강성계수는 다음과 같이 정의된다⁹⁾.

$$k = \frac{F(j\omega)}{Y(j\omega)} = \text{Re}[k](1 + j\eta) \quad (1)$$

여기서 $\text{Re}[k]$ 는 복소 동강성계수의 실수부분이며, η

는 Loss Factor로서 시스템의 감쇠 성능을 평가하는 지표로 사용되며 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{Im}[k]}{\text{Re}[k]} \quad (2)$$

상기 실험에서 얻은 데이터는 차원이 서로 같아 다루기 쉬운 Real part 와 Imaginary part 를 이용하였으며 Fast Fourier Transform 을 이용하여 주파수에 따른 시스템의 복소 동강성계수를 구하였다.

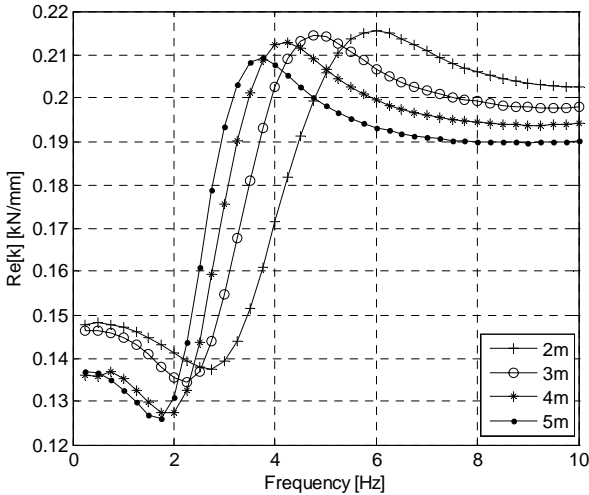


Fig. 2 Measured complex stiffness of air spring - Re[k]

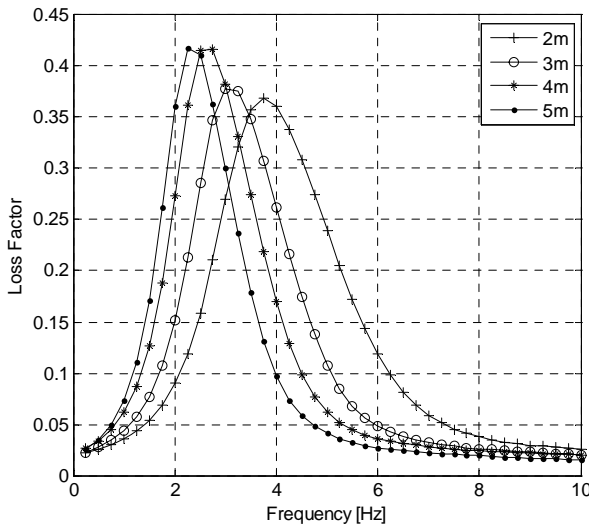


Fig. 3 Measured complex stiffness of air spring - Loss factor

복소 동강성계수의 실수부분은 튜브의 길이에 상관 없이 주파수가 낮은 영역에서는 상대적으로 낮은 값을 보이다가 일정 주파수 대역에서 천이구간을 거쳐 대체적으로 4Hz 이상의 주파수에서 비교적 높은 값을 보여줌을 알 수 있다. 튜브의 길이가 길어질수록 천이구간을 제외한 복소 동강성 계수 실수부분은 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 천이구간에서는 튜브의 길이가 길어질수록 Re[k]의 기울기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

감쇠 특성을 나타내는 손실계수(Loss Factor)는 전체 주파수 영역에서 임의의 축에 대한 가우시안 분포함수의 형태를 띠고 있다. 이 축은 복소동강성계수 실수부의 천이구간에 해당되며 연결 튜브의 길이가 길어질수록 축이 왼쪽으로 이동하며 폭이 좁아진다. 주파수가 높아짐에 따라 손실 계수는 0 에 가까운 값을 가짐으로서 감쇠 효과가 매우 작아

짐을 알 수 있다. 또한 튜브의 길이가 길어질수록 손실 계수는 낮은 주파수에서 최대값을 갖고 감쇠성능 또한 증가하지만 그 범위는 감소한다. 즉, 튜브의 길이가 길어질수록 감쇠 성능은 증가하지만 그 주파수 범위가 낮아지면서 좁아지는 경향을 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 공기 스프링과 외부 챔버를 연결하는 튜브의 길이에 따른 시스템의 동적 특성을 알아보았다. 튜브의 길이를 변화시켜 가며 각 경우에 따른 복소 동강성 계수를 실험적으로 확인할 수 있었다. 공기 스프링에 외부 챔버를 연결한 시스템의 특성은 튜브의 길이에 따라 달라진다. 복소 동강성 계수 실수부는 저주파에서 낮은 값을 보이다가 일정 영역에서 천이구간을 거쳐 고주파에서는 비교적 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 줄의 길이가 길어질수록 비교적 저주파에서 천이구간이 발생하며 그 크기 또한 작아지는 경향을 볼 수 있다. 이러한 시스템은 천이구간이 발생하는 주파수 영역에서 감쇠 성능이 증가하게 되며 연결 튜브의 길이가 길어질수록 감쇠 성능의 최대값은 증가하게 되며 그에 따른 주파수 범위는 줄어드는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 연결 튜브의 길이에 따라 특정 주파수에서 감쇠 성능을 조절할 수 있음을 암시한다. 이러한 특성은 공기 스프링을 이용한 시스템에 원하는 성능의 방진 시스템을 설계하는데 기여할 수 있다.

후기

본 논문은 지식경제부에서 시행한 청정기술기반 산업원천 기술개발사업의 지원으로 수행되었음(10024121-2009-22).

참고문헌

1. C.G. Gordon, "Generic criteria for vibration-sensitive equipment", Proceedings of SPIE, San Jose, CA, 1991.
2. 안채현, 임광혁, 진경복, 임경화, "공기 스프링을 이용한 방진 테이블의 능동 제어", 한국소음진동공학회논문집, **17**(7), 565-571, 2007.
3. J.L. Shearer, "Study of pneumatic processes in continuous control of motion with compressed air", Transactions of ASME **78**, 233-242, 1956.
4. C.M. Harris, C.E. Crede, "Shock and Vibration Handbook", McGraw-Hill, New York, 1961.
5. D.B. DeBra, "Design of laminar flow restrictors for damping pneumatic vibration isolators", CIRP annals... manufacturing technology, **33**(1), 351-356, 1984.
6. C. Erin, B. Wilson, J. Zapfe, "An improved model of a pneumatic vibration isolators: theory and experiment", Journal of sound and vibration, **218**(1), 81-101, 1998.
7. J.-H. Lee, K.-J. Kim, "Modeling of nonlinear complex stiffness of dual-chamber pneumatic spring for precision vibration isolations", Journal of sound and vibration, **301**(3/5), 909-926, 2007.
8. 이주홍, 석종원, 김필기, "외부 챔버와 연결된 공기 스프링의 감쇠 특성 분석, 2009 년도 한국정밀공학회 춘계학술대회는문집, 715-716, 2009.
9. E.I. Rivin, "Passive Vibration Isolation", ASME Press, New York, 2003.