

외부 챔버와 연결된 공기 스프링의 감쇠 특성 분석

Analysis on the Damping Characteristics of an Air Spring Connected with an External Chamber

*이주홍¹, 김필기², #석종원³

*J. Lee¹, P. Kim², #J. Seok(seokj@cau.ac..com)³

^{1, 2} 중앙대학교 기계공학부 대학원, ³ 중앙대학교 기계공학부,

Key words : Rubber air spring, Loss Factor

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 경우는 고도의 정밀도가 요구되는 분야 중 하나이다. 이에 따라 요구되는 공정의 허용 진동 규제치 또한 점점 더 엄격해 지고 있으며, 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. 또한 이 방법은 외부에서 직접 시스템에 힘을 가하여 진동을 제어하는 방법이므로 감쇠기를 이용하여 시스템의 진동을 제어하는 수동적 제진 방법에 비해 진동 절연 성능이 훨씬 뛰어난 장점이 있다. 그러나, 능동적 제진 방법은 진동을 제어하기 위한 힘을 외부에서 가해주어야 하기 때문에 큰 에너지를 필요로 하고 지속적인 성능을 발휘하기 위해서는 고성능의 센서와 액추에이터를 필요로 하며 유지보수가 필수적이므로 비용이 높아지는 단점이 있다³⁾. 또한 센서나 액추에이터 등의 구성요소가 시스템에 추가되면서 시스템 자체의 특성이 변하게 되는 경우가 발생하게 되면 제진 성능이 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 마운트로는 코일스프링, 방진 고무, 공기 스프링, 포움 고무 등을 사용하고 있다. 이 중 고무 스프링은 고유 진동수가 낮고 내압에 따른 강성의 변화가 작으며 내구성이 우수한 장점에 기인하여 1 차 진동절연 마운트로 널리 쓰인다. 이러한 공기 스프링은 바닥으로부터 전달되는 외부 가진 요소에 대하여 우수한 진동 절연특성을 가지지만 공기 스프링으로 지지된 시스템의 강제 진동에 의한 감쇠 특성은 좋지 않은 특징을 가지고 있다⁵⁾. 그러나 공기 스프링은 공기 흐름을 제어하여 시스템의 특성을 변화시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 공기 스프링이 보다 우수한 감쇠 성능을 갖도록 하기 위하여 공기 스프링에 외부 공기 탱크를 연결하고 상기 시스템의 동적 특성을 분석하였다.

2. 공기스프링의 작동원리

공기 스프링이 외부 가진을 받고 있을 때의 이 시스템의 FBD를 다음과 같이 그릴 수 있다.

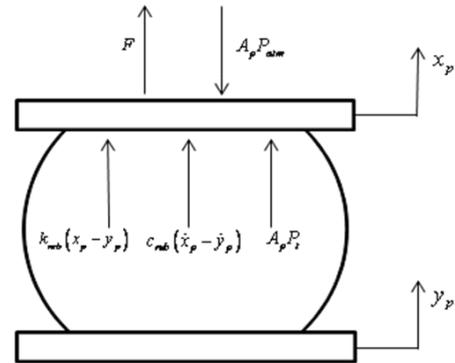


Fig. 1 Free body diagram of air spring

이를 바탕으로 공기 스프링과 호스, 외부 챔버로 이루어진 시스템의 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다

$$m_p \ddot{x}_p = F + A_p (P_t - P_{atm}) - m_p g - k_{rub} (x_p - y_p) - c_{rub} (\dot{x}_p - \dot{y}_p) \quad (1)$$

$$\frac{1}{RT_t} \left(\frac{V_t}{n} \dot{P}_t + P_t V_t \right) + \rho C_r (P_t - P_b) = Q_t \quad (2)$$

$$\frac{1}{RT_b} \left(\frac{V_b}{n} \dot{P}_b \right) - \rho C_r (P_t - P_b) = Q_b \quad (3)$$

여기서 하첨자 p 는 공기스프링의 체결되는 플레이트를 뜻하며 t 는 공기 스프링을, b 는 외부 탱크를 의미한다. 또한 k_{rub} 와 c_{rub} 는 고무가 가지고 있는 강성과 감쇠계수이며 Q 는 외부와 시스템 사이에서 유·출입되는 되는 공기 유량을 의미한다. P, V, T, ρ, R 는 공기스프링 내압, 체적, 온도, 밀도 및 공기의 기체상수이며 C_r 은 튜브 내에서 발생하는 손실을, n 은 비열비를 의미한다.

3. 실험장치 구성

공기 스프링에 외부 챔버를 연결했을 때의 특성을 알아보기 위하여 꾸민 실험 장치의 개략도는 Fig. 2 와 같다. 공기 스프링과 제작한 압력 용기를 유연한 튜브로 연결하고 중간에 밸브를 취부하여 추가 외부 챔버의 유무에 따른 동적 특성을 비교할 수 있도록 하였다. 또한 컴프레서에 공압 레귤레이터(SMC, IR-1020)를 취부하고 이를 이용하여 일정한 압력이 공기 스프링에 공급될 수 있도록 하였다.

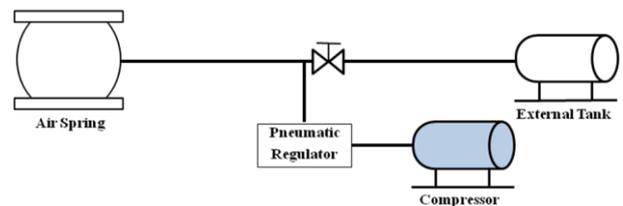


Fig. 2 The Schematic diagram of system

동특성을 얻기 위한 실험으로, MTS(810 Material Test System)를 이용하여 상기 공기 스프링의 하부 마운트를 조화 함수 형태의 변위로 가진하고 상부 마운트에 걸리는 반력을 구하였다. 본 실험은 사용조건에 대한 매뉴얼을 참조하여 공기 스프링의 내압을 3ba 로, 공기 스프링의 높이를 Design Variable 인 120mm 로 고정시킨 후 수행하였다. 한편, 가진 시킨 변위의 크기는 0.05mm 와 0.25mm 두 경우로 나누어 주파수를 변화시켜 가면서 변위에 따른 반력을 측정하였다.

4. 실험결과

상기 실험에서 얻은 결과값을 Fast Fourier Transform 을 사용하여 복소 동강성계수(Complex Dynamic Stiffness)를 구하였다. 복소 동강성계수는 다음과 같은 형태로 표시된다.

$$k = \frac{F(j\omega)}{Y(j\omega)} = \text{Re}[k](1 + j\eta) \tag{4}$$

여기서 $\text{Re}[k]$ 는 복소 동강성계수의 실수부분이며, η 는 Loss Factor 로서 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{Im}[k]}{\text{Re}[k]} \tag{5}$$

$\text{Re}[k]$ 와 Loss Factor 를 주파수 대역으로 표시하면 Fig. 3 의 그래프와 같다.

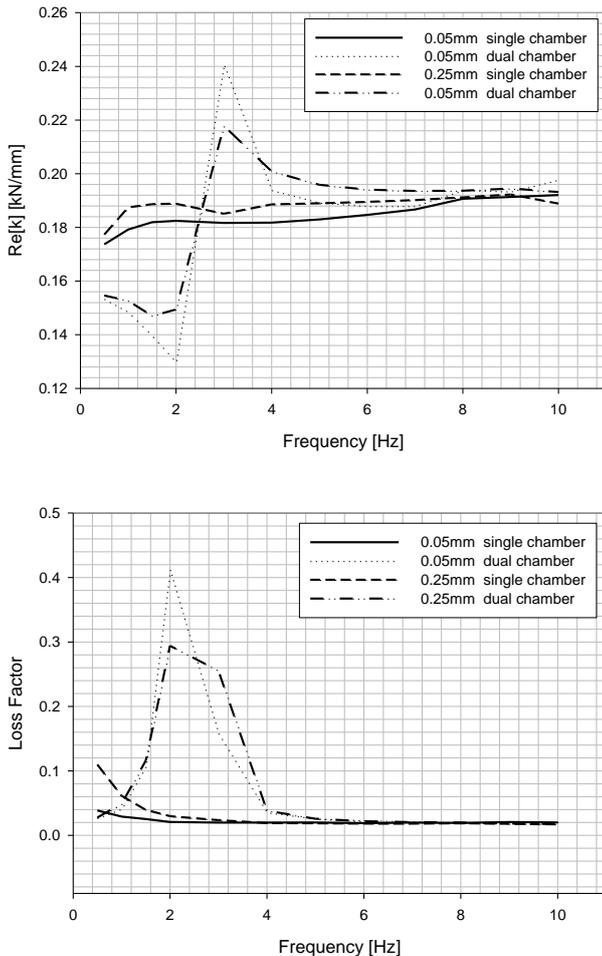


Fig. 3 Measured complex stiffness of air spring

상기 그래프를 살펴보면 공기 스프링이 Dual Chamber 로 구성된 시스템의 경우 저주파 대역에서 시스템의 특성이 가진 주파수에 대단히 의존적임을 알 수 있다. 주파수가 높아질수록 하나의 챔버로 이루어진 시스템과 두 개의 챔버로 이루어진 시스템의

특성이 거의 동일하게 되는데 이는 주파수가 높아질수록 연결튜브를 통과하게 되는 공기가 평면파 형태로 전달되지 못함에 따라 외부 공기 탱크까지 공기가 Net 로 유·출입 되지 않아 마치 하나의 챔버로 이루어진 시스템처럼 동작하는 것으로 판단된다.

저주파 영역에서는 동적 특성이 외부 챔버의 유무에 따라 일정한 경향성을 보이며 확연한 차이를 보인다. 외부 챔버가 없는 경우 공기 스프링의 동강성 계수는 거의 일정하며 조금씩 증가하는 양상을 띠지만 외부 챔버가 있을 경우 주파수가 낮은 영역에서는 강성의 크기가 아주 작지만, 주파수가 증가할수록 공기 스프링만 있는 경우와 특성이 유사해 지는 특성을 가진다. Loss Factor 의 경우 공기 스프링만 있는 시스템은 변화 없이 거의 0 에 가깝지만 외부 공기 탱크를 추가하는 경우 일정 범위의 저주파 영역에서 증가함을 알 수 있다. 이는 이 영역에서 Dual Chamber 로 시스템을 구성할 경우 감쇠 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

5. 결론

공기 스프링의 감쇠 성능을 증가시키기 위하여 외부 챔버를 공기 스프링에 연결하여 외부 챔버의 유무에 따른 동적 특성을 고찰하였다. 공기 스프링에 외부 공기 탱크를 연결시킨 경우 주파수가 높을 경우에는 시스템의 특성에 거의 변화가 없지만 일정 영역의 저주파 대역에서는 감쇠 특성이 향상됨을 확인할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 공기 스프링의 방진 특성을 제어함으로써 원하는 사양의 방진 시스템을 구축할 수 있다.

후기

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

참고문헌

1. Christine, C., "Vibration Isolation Theory and Practice", Assemble Automation, **29**(1), 8-13, 2009
2. Ibrahim, R.A., "Recent Advances in Nonlinear Passive Vibration Isolators", Journal of Sound and Vibration, **314**(3/5), 371-452, 2008
3. 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
4. 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
5. 이주홍, 김필기, 석종원, "방진용 공기 스프링의 진동 특성 분석", 한국정밀공학회 2009 년도 추계학술대회논문집, 1047-1048, 2009