

멀티 오리피스를 이용한 에어스프링 동특성 개선에 관한 연구

The Study on the improvement of dynamic characteristics with multi-orifice in airspring

0 김인수*, 황성호*, 한문성*, 고철수*

Insoo Kim, Seongho Hwang, Munseong Han, Cheolsoo Koh

Key word : Air Spring(공기스프링), Vibration isolation table(제진 테이블), Orifice(오리피스)

Abstract

Vibration isolation technology using an air spring and laminated rubber bearing is widely used because it has excellent vibration isolation characteristics. In the part of that, we usually make use of the self-damped air spring. It is occupied two chambers, restrictor, diaphragm and load plate. Two chambers contain compressed air and the volume of chambers and the area of load plate give a definition of stiffness and load. The restrictor and the volume ratio of two chambers give a definition of damping ratio. The conventional model of restrictor is made of one orifice and it causes turbulent flow in the orifice at the region of large deflection. The stiffness of air spring is larger and the damping is lower in the region of large deflection. In the multi-orifice case, the stiffness is similar to air spring with one orifice but damping ratio is larger than conventional air spring. And damping ratio is smaller than conventional air spring in small deflection region. Deflection is small in the region of high frequency so small damping is better than large damping.

As a result, we can reduce the storage stiffness of air spring in the wide region of deflection and increase the damping ratio in the region of large deflection. After this, we will try to find the relation of Reynolds Number and Flow Resistance then we are going to make another restrictor for air spring to improve damping ratio and stiffness.

1. 서 론

정밀 측정 및 가공산업 그리고 반도체 산업의 추세는 급속하게 발달해 가고 있으며, 이로 인하여 장비의 설치조건 또한 무진동의 세계로 접어들고 있다. 이러한 현실에 부응하기 위해 서는 정밀제진대의 기본 요소로 사용되는 에어스프링의 성능 개선이 우선적으로 이루어져야 한다. 에어스프링의 성능 개선은 우선 보다 낮

은 고유진동수를 유지할 수 있어야 하며, 낮은 고유진동수 영역에서 진폭이 증대되지 않도록 충분한 댐핑 성능 또한 확보하여야 한다.

에어스프링은 적용 분야로 구분하여 방진, 제진 그리고 가진기 등으로 구분하여 볼 수 있다. 일반적으로 차량에 적용되는 에어스프링은 국내에서는 전동차 및 객차 그리고 버스등에 사용되며 그 형상은 사용분야 특성에 맞도록 다양하게 생산되고 있다. 방진 및 가진기로 사

* (주)유일산업 기술연구소

용되는 에어스프링은 벨로우즈 형식으로 고무판 사이에 강화섬유 코드를 적용하여 형상을 이루어 적정의 공간을 확보한다. 그리고 압축된 공기를 확보된 공간에 불어넣어 공기가 압축될 수 있는 체적과 압력을 유지하며 상부 장비를 지지하는 면적에 의해 지지할 수 있는 지지하중과 스프링 상수가 결정되는 특징을 가진다. 그리고 에어스프링의 높이에 따라 유효수압면적이 변경되므로 스프링상수와 지지하중이 변하는 비선형적 특성을 보인다. 반면 미진동제어에 사용되는 **Diaphragm** 형식의 에어스프링은 앞서 살펴본 벨로우즈 형식의 에어스프링에 비해 작동 변위가 작으며 기준이 되는 설치 높이가 변하여도 유효수압면적의 변화가 없는 것이 특징이다. 또한 벨로우즈 타입의 에어스프링은 자체 댐핑이 재료의 특성으로 결정되므로 급속형 코일스프링에 비해서는 댐핑이 크나 충분하지는 않으므로 적용되는 조건에 따라 추가적인 댐핑요소를 적용하여야 한다. 반면에 **Diaphragm** 형식의 에어스프링은 체적이 변경될 수 있는 주챔버와 체적의 변경이 없는 보조탱크로 구성되고 그 사이에 오리피스가 설치되어 자체댐핑을 크게 만들 수 있는 장점이 있어 부가적인 댐핑요소가 필요하지 않는 경우가 많다.

본 연구에서는 **Diaphragm** 형식의 에어스프링에서 자체댐핑을 만드는 주 요소인 오리피스의 형상을 개선하여 작동 변위가 작은 영역에서부터 큰 영역까지 특성을 유지할 수 있고 예측할 수 있는 오리피스를 설계하여 에어스프링의 성능을 개선하는데 목적이 있다.

2. 에어스프링 일반 특성

에어스프링은 공기가 압축되는 성질을 이용하여 서어짐 현상이 거의 없는 스프링으로 일정 설치 높이를 유지하며 지지할 수 있는 하중

의 범위를 충진하는 공기의 압력으로 조절하므로 매우 폭넓게 이용할 수 있는 스프링 요소로 자체 댐핑을 갖는다. 자체 댐핑은 Fig.1과 같이 주챔버, 보조챔버, 오리피스, 다이어프램, 로드플레이트로 구성되어있다.

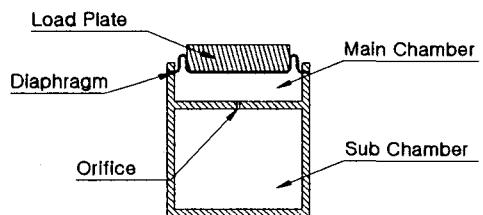


Fig.1 Schematic diagram of Air Spring

Fig.1에서 **Diaphragm**은 고무와 섬유의 복합재질로 재료자체가 인장하중 상태에서 비선형거동을 보인다. 따라서, 이를 운동방정식 유도에 적용하기 곤란하므로 방정식유도에서 제외하고 에어스프링의 움직임을 표현하면 메인챔버 총 에너지로부터 유도할 수 있다. 에어스프링 메인 챔버의 에너지 변동은 \dot{H} 이고, 이는 특정온도에서 기체의 내부에너지와 압축과 팽창에서 얻어지거나 손실되는 에너지의 합과 같으며, 기체의 단위중량 당 에너지와 변동 중량의 곱과 같으며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{H} = \dot{U} + \dot{E} = \dot{W}_m \cdot C_p \cdot T \quad (1)$$

여기서, 챔버 내부의 내부에너지 변동률과 압축팽창에서 변화하는 에너지는 식(2), 식(3)과 같다.

$$\dot{U} = \dot{W}_m \cdot C_v \cdot T = \frac{g \cdot C_v}{R} \frac{d}{dt} (P_m V_m) \quad (2)$$

$$\dot{E} = g \cdot P_m \cdot \dot{V}_m \quad (3)$$

위 식으로부터 메인 햄버의 질량변동률을 나타내면 식(4)와 같다.

$$\dot{m}_m = \frac{1}{RT} \left(\frac{V_m}{n} \dot{P}_m + P_m \cdot \dot{V}_m \right) \quad (4)$$

메인 햄버의 질량변동률에 따라 보조 햄버의 질량변동률도 결정되므로 식(4)를 변경하여 보조 햄버의 질량변동률을 나타내면 식(5)와 같다.

$$\dot{m}_b = \frac{1}{RT} \frac{V_s}{n} \cdot \dot{P}_b \quad (5)$$

식(4)와 식(5)는 각 햄버의 질량변동률을 나타내고 질량변동률은 상호 역방향의 관계를 갖는다. 따라서, 각 햄버에 추가로 공급되는 공기가 없을 때 햄버의 질량변동률과 주햄버의 체적은 식(6), 식(7)과 같다.

$$\dot{m}_m = -\dot{m}_{m \rightarrow s}, \quad \dot{m}_s = \dot{m}_{m \rightarrow s} \quad (6)$$

$$V_m = A_l \cdot x_l + V_{m0} - A_l \cdot x_{base} \quad (7)$$

여기서, A_l : 유효수압면적
 x_l : 로드플레이트 변위
 V_{m0} : 정적상태의 메인햄버 체적
 x_{base} : 에어스프링 지지면 변위

오리피스를 통해 메인햄버로부터 서브햄버로 이동하는 질량유동률은 식(8)으로 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_{m \rightarrow s} = \rho \cdot C_r \cdot (P_m - P_s) \quad (8)$$

여기서, C_r 은 $\pi \cdot d^4 / 128 \cdot \mu \cdot l$ 이다.
 상기 식들로부터 최종적으로 에어스프링의 로

드 플레이트의 운동방적식은 뉴톤제 2법칙을 이용하여 식(9)로 표현할 수 있다.

$$m_l \cdot \ddot{v}_l = F_d + A_l (P_m - P_{atm}) - m_l \cdot g \quad (9)$$

식(9)에는 기체의 압축에 관한 비선형성과 오리피스를 통과하는 유체의 비선형성을 내포하고 있어 직접적으로 계산하기는 곤란하므로 몇 가지 선형화 과정을 통하여 계산할 수 있다.

3. 에어스프링 동적 특성 실험

본 연구에서는 오리피스의 특성에 관한 것을 다루고 있으며, 선형화를 위한 실험을 위해서는 에어스프링의 지지면 가진을 약 10μm 수준으로 가진 할 필요가 있으며, 그 이상이라도 정상 상태의 햄버내부의 압력과 변동이 발생했을 때의 압력변동의 차가 극히 미소하도록 유지하여야 하나 유압식 가진기로는 그 조건을 유지하기가 곤란하므로 유압식 UTM을 이용하여 100 μm 수준 이상의 변위로 변위제어 실험을 하였다.

Table. 1 Air Spring Dimension used in Experiment

항 목	값
Main Chamber Diameter	219 (mm)
Main Chamber Height	57 (mm)
Sub Chamber Diameter	370 (mm)
Sub Chamber Height	67 (mm)
Orifice Diameter	1, 1.2, 1.4 (mm)
Orifice Length	22 (mm)
Volume Ratio	3.36 (-)
Load	1000 (kgf)

Table 1과 같은 에어스프링을 UTM을 이용하여 (+/-) 0.1 mm ~ (+/-) 1 mm 까지 0.1mm 씩 증가하며 변위제어실험을 수행하였다. 이때 로드 플레이트의 변위로부터 최대 속도로 환산하면 0.6336mm/s 부터 6.336mm/s이며, Main Chamber

에서 공기가 압축은 되더라도 외부로의 유출이 없이 오리피스를 통해 보조탱크로 공기가 유동한다고 가정하였을 때 각 오리피스별 변위에 따라 Reynolds number를 계산할 수 있다.

Reynolds number에 따른 에어스프링의 강성계수는 Fig. 2와 같다.

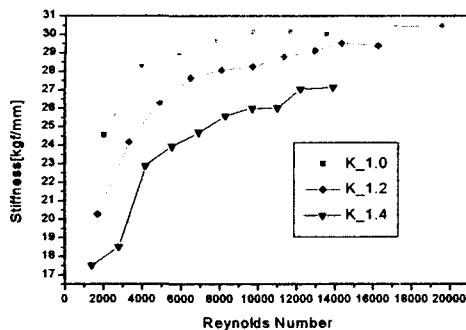


Fig.2 Diagram of Stiffness

식(8)에서 오리피스를 통과하는 유량은 두챔버의 압력차와 밀도 그리고 C_r 에 의해 결정된다. 이 3가지 중 형상에 의해 결정되는 것은 C_r 로 오리피스의 직경과 길이에 의해 결정된다. 여기서, C_r 값을 결정하는 요소 중 길이를 고정하고 직경의 변화에 따른 강성변화를 살펴본다. 스프링의 직경이 1mm 일때 로드플레이트와 오리피스의 면적비는 47961, 직경이 1.2mm는 면적비가 33306이며 직경이 1.4mm는 면적비가 24470이다. 각각의 경우에 Reynolds Number에 따른 스프링 강성은 식(10), 식(11), 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$k = 30.27842 - 5.68886e^{\left(\frac{-Re-1950}{2223.1809}\right)} \quad (10)$$

$$k = 29.3234 - 8.98295e^{\left(\frac{-Re-1620}{3047.99904}\right)} \quad (11)$$

$$k = 27.68016 - 10.64924e^{\left(\frac{-Re-1390}{4316.6848}\right)} \quad (12)$$

강성계수를 저장 강성계수와 손실 강성계수로 나누면 저장강성계수는 Fig.3과 같으며, 식(13), 식(14), 식(15)과 같이 Reynolds Number에 따른 강성계수와 같은 경향을 보인다.

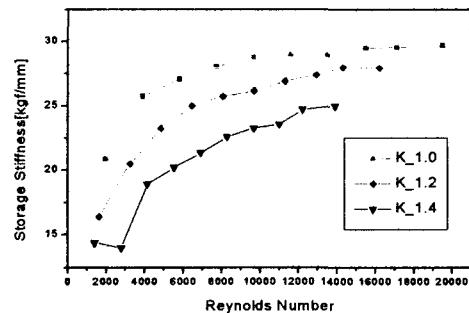


Fig.3 Diagram of Storage Stiffness

$$k = 29.37813 - 8.33512e^{\left(\frac{-Re-1950}{2841.66547}\right)} \quad (13)$$

$$k = 28.06395 - 11.57757e^{\left(\frac{-Re-1620}{3867.85528}\right)} \quad (14)$$

$$k = 27.12544 - 13.63909e^{\left(\frac{-Re-1390}{6561.336}\right)} \quad (15)$$

반면 손실강성계수는 Reynolds Number에 따라 계속 증가하는 경향을 보이다 어느 지점에서 일정한 값을 유지하는 것이 아니라 Fig.4와 같은 경향을 보인다. Fig.4로 부터 Air Spring과 Sub Chamber의 체적비가 결정되어져 있는 상황에서 오리피스의 길이가 동일할 때 오리피스의 직경이 변화하여도 손실 강성 계수는 최대값이 어느 정도 일정 값을 유지한다고 유추할 수 있으며 최대값을 나타내는 Reynolds Number

는 로드플레이트와 오리피스의 면적비에 따라 면적비가 큰 경우 손실강성의 최대값을 나타내는 **Reynolds Number**는 작아진다.

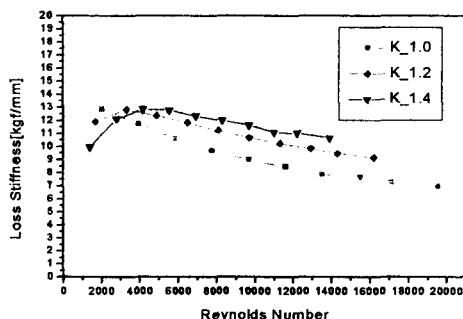


Fig.4 Diagram of Loss Stiffness

손실강성계수가 증가하는 영역에서는 로드플레이트 대 오리피스의 면적비가 큰 쪽이 손실강성계수가 크게 나타나고 손실강성계수가 감소하는 영역에서는 로드플레이트 대 오리피스의 면적비가 작은 쪽이 손실계수가 크게 나타났다. 그러므로 에어스프링에 작용되는 변위가 증가할 경우는 에어스프링으로부터 Sub Chamber로 이동하는 유량이 큰 쪽 즉, 오리피스 직경이 큰 쪽이 손실강성계수 증대면에서 유리하고 에어스프링에 작용되는 변위가 작은 경우에는 오리피스의 직경이 작은 쪽이 손실강성계수를 크게하는 면에서 유리하다 할 수 있다.

4. 멀티 오리피스 적용 에어스프링 동적 특성 실험

앞서 단일홀을 갖는 에어스프링의 동적 특성을 살펴보았다. 그 결과 에어스프링에 가해지는 변위진폭이 커지면 저장 강성계수가 커지나

일정 변위진폭 이상에서는 저장강성계수의 증가폭이 둔해지며 일정해지려는 경향을 보인다는 것을 알았다. 또한 오리피스가 큰 쪽이 작은 쪽 보다 변위진폭이 증가하여도 저장 강성계수는 작게 나타났다. 에어스프링 본래의 목적이나 낮은 스프링 상수를 갖도록 고안된 것으로 스프링 상수는 작고 고유진동수 영역에서 크게 증폭되지 않도록 적정한 댐핑을 유지하여야 한다. 따라서, 단일홀을 갖는 에어스프링의 특성으로부터 오리피스의 면적은 동등하게 유지시키고 단일오리피스를 여러 개로 분할하여 각각이 작은 **Reynolds Number**를 갖도록 하였다.

실험에 사용한 사양은 오리피스의 직경을 0.5mm로 하고 길이를 6mm로 하여 길이 대직경비를 10 이상으로 함으로 완전성장유체 조건을 유지하였으며 각각의 시편에 4, 6, 8 개를 적용하였다. 이경우 오리피스에 대한 로드플레이트의 면적비는 Table.2 와 같다.

Table. 2 Compare two ratio of area(Loadplate/Orifice)

항 목	Single Orifice	Multi Orifice
Orifice 4	47961	47961
Orifice 6	33306	31974
Orifice 8	24470	23981

Fig.5는 멀티 오리피스의 변위진폭에 따른 저장강성계수를 나타내고 Fig.6은 손실강성계수를 나타낸다. 진폭이 증가하면 오리피스를 통과하는 유속은 빨라지고 **Reynolds Number**는 증가한다. 단일 오리피스는 로드플레이트와 오리피스의 면적비에 따라 그 값은 다르지만 일정 지점으로부터 저장강성계수의 기울기가 급격히 변경되는 것을 볼 수 있으나 멀티오리피스 적용 에어스프링에서는 그 기울기가 완만하게 변경됨을 볼 수 있다. 이는 멀티오리피스에서 단일오리피스의 단면적을 거의 유지하며 여

러 개로 분할함에 따라 각각의 출입구의 직경이 작아져 Reynolds Number가 작아졌으며, 오리피스 대 로드플레이트의 면적비가 약 20000 영역에서는 (+/-)1mm 변위에서도 Reynolds Number가 40000 영역에 있으므로 어느 정도 총류영역을 유지하고 천이점을 통과하지 않고 있음을 알 수 있다.

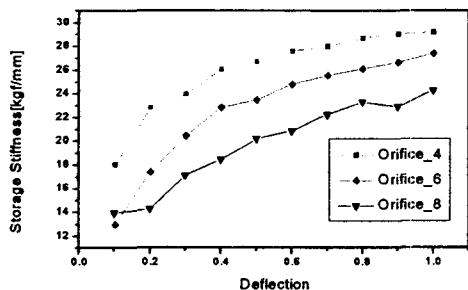


Fig 5. Diagram of Storage Stiffness

Fig.6은 변위 진폭에 대한 손실강성계수를 나타낸다. 로드플레이트 대 오리피스의 면적비가 33000 이하의 영역에서 변위진폭이 약 (+/-)3mm 를 기준으로 작을 때는 손실강성계수가 증가하는 경향을 보이고 클 때는 어느정도 일정한 값을 유지한 후 작아지는 경향을 보인다.

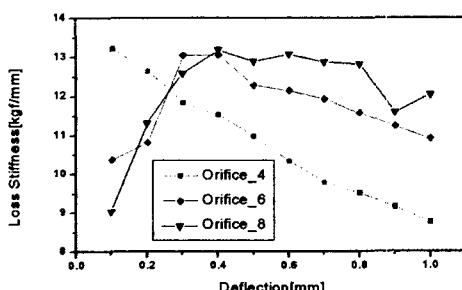


Fig. 6 Diagram of Loss Stiffness

단일 오리피스와 비교하면 변위진폭이 미소한 영역에서는 손실강성계수가 작고 변위 진폭이 증가하면 손실강성계수가 증가함을 나타낸다.

실험으로부터 얻은 저장강성계수와 손실강성계수의 특성으로부터 단일오리피스에 대한 멀티오리피스 적용 에어스프링의 개선점을 살펴보면 다음과 같다. 저장강성계수가 작아짐에 따라 에어스프링이 제진시스템에 적용될 때 고유진동수 저감효과를 갖을 수 있으며, 폭넓은 변위진폭에서 손실강성계수가 증가하였으므로 공진영역에서 변위진폭의 증가폭을 줄일 수 있고 레벨을 조절하기 위한 벨브의 민감도를 정밀하게 할 수 있으므로 수준 조절능력을 향상시킬 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 단일오리피스와 멀티오리피스를 같은 에어 스프링의 변위진폭에 따른 동특성을 살펴보았으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 로드플레이트 면적 대 오리피스 면적의 값이 작아지면 저장강성계수가 감소한다.
- 손실 강성계수는 일정영역의 변위진폭에서 최대값을 보이고 그 값보다 작거나 큰 변위진폭에서는 감소하는 경향을 보인다.
- 손실 강성계수는 2 차함수와 같이 변위진폭에 대해 최대점을 갖는 특징을 보이므로 로드플레이트 면적 대 오리피스의 면적비를 고려하면 요구되는 변위진폭에 최대의 댐핑값을 부여할 수 있다.
- 멀티오리피스를 적용함으로 저장강성계수는 단일 오리피스를 적용할 때 보다 낮게 유지할 수 있었으며, 손실강성계수는 폭넓은 변위진폭 영역에서 크게 할 수 있었다.

참고문헌

1. C. Erin. et al., 1998, "An improved of a pneumatic vibration isolator : Theory and experiment", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 218, No.1, pp. 81 ~ 101.
2. Cyril M. Harris, SHOCK & VIBRATION HANDBOOK(1ed), Chapter. 33, McGraw-Hill 1961.
3. Cyril M. Harris, SHOCK & VIBRATION HANDBOOK(3ed), Chapter. 33, McGraw-Hill 1988.
4. Rolf H. Sabersky, Allan J. Acosta, Edward G. Hauptmann, Fluid Flow, Chapter.7, Macmillan Publishing, 1971.
5. 김인수, 김종연, 한문성, 김영중, 2001, "정밀 제진대 개발 및 동특성에 관한 실험적 연구", 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술 대회논문집, pp.329 ~ 334.