

공기스프링의 파라미터 변화가 특성 변화에 미치는 영향

The Effects of Parameter Changes on the Properties of an Air Spring

장지성*†

Ji-Seong Jang

(접수일 : 2013년 08월 22일, 수정일 : 2013년 10월 18일, 채택확정 : 2013년 10월 19일)

Abstract: The air spring is widely used in various fields such as a suspension system and an anti-vibration system because the natural frequency is kept constant regardless of the change in the load, spring constant is easy to change, and, vibration and shock isolation performance are excellent. The purpose of this study is to derive a nonlinear governing equation of an air spring, to analyze the effect of the various parameters on the dynamic stiffness of the air spring, and, to suggest a more efficient design method of an air spring system. In order to do so, this study investigates the impact of all the parameters that could affect the dynamic stiffness of the air spring while changing the excitation amplitude and the frequency with a developed governing equation.

Key Words : Air Spring, Parameter Changes, Stiffness, Heat Transfer Characteristics, Nonlinear Mathematical Model

1. 서 론

공기스프링은 하중의 변화에 관계없이 고유진동수가 일정하게 유지되고, 압력 변화 등에 의하여 스프링 상수의 변경이 용이하며, 충격 및 진동절연 성능이 우수하므로 현가장치 등의 다양한 분야에 폭넓게 사용되고 있다¹⁻³⁾.

공기스프링의 성능 분석 및 개선에 관한 연구로는 비선형모델 개발 및 개발한 모델을 이용하여 공기스프링의 가진 주파수와 열전달효과가 공기스프링의 히스테리시스 특성에 미치는 영향을 분석한 연구⁴⁻⁵⁾, 공기스프링의 유효단면적 변화가 스프링-부하 구동계의 주파수 응답에 미치는 영향을 분석한 연구⁶⁾, 공기스프링 내부 초기압력이 스

프링 상수에 미치는 영향을 실험적으로 분석한 연구⁷⁾, 공기스프링을 이용한 현가장치의 비선형 모델을 도출하고 공기스프링 특성 변화에 의한 현가장치 시스템의 특성변화를 분석한 연구⁸⁾, 공기스프링의 최적설계⁹⁾ 등 다양한 요소에 대한 연구, 분석이 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 공기스프링이 스프링 외부에서 가해지는 불규칙적인 충격 및 진동절연을 목적으로 주로 사용된다는 사실을 감안하여 공기스프링을 구성하는 파라미터의 변화가 공기스프링의 동적인 강성에 미치는 영향을 분석하고 이를 개선하고자 하는 연구였다. 그 결과 공기스프링의 동적인 강성은 스프링의 유효단면적과 초기압력에 비례하고, 공기스프링의 히스테리시스 특성은 가진 주파수가 증가하면 감소한다는 사실이 알려져 있다. 이러한 요소 이외

*† 장지성(교신저자) : 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : jangjs@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6196

*† Ji-Seong Jang(corresponding author) : Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
E-mail : jangjs@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6196

에도 공기스프링의 특성에 영향을 미치는 파라미터로는 공기스프링의 길이, 가진 진폭, 공기의 압축성에 기인하는 열전달효과 등을 들 수 있지만, 이러한 요소들이 공기스프링의 동적인 강성에 미치는 영향을 분석한 연구는 아직 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 공기스프링의 동적인 강성에 영향을 미칠 수 있는 파라미터 전부를 대상으로 가진 진폭과 주파수를 변경하여 공기스프링을 가진 할 때 공기스프링의 파라미터 변화가 공기스프링의 동적인 강성에 미치는 영향을 분석하여 공기스프링 시스템을 보다 효율적으로 설계할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 비선형 모델

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하는 공기스프링의 개략도를 나타낸다. Fig. 1에서 $\delta F[N]$ 는 공기스프링 반력의 변화량, $P_1[Pa]$ 은 공기스프링 내부 압력, $T_1[K]$ 은 공기스프링 내부 온도, $V_1[m^3]$ 은 공기스프링 내부 체적, $W_1[kg]$ 은 공기스프링 내부 공기질량, $\delta x[m]$ 는 공기스프링의 길이 변화량, $L[m]$ 은 공기스프링의 자유길이를 나타낸다.

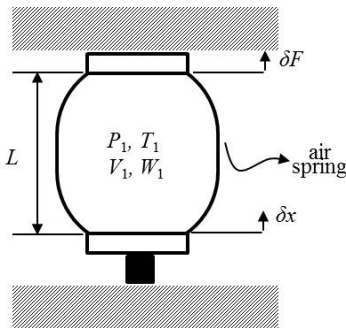


Fig. 1 Schematic diagram of an air spring

Fig. 1에 나타난 공기스프링의 반력 $F[N]$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F = A_1 P_1 \quad (1)$$

식 (1)에서 $A_1[m]$ 은 공기스프링의 δx 방향 단면

적을 나타낸다. 공기스프링의 강성은 식 (1)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta F}{\delta x} = A_1 \frac{\delta P_1}{\delta x} + P_1 \frac{\delta A_1}{\delta x} \quad (2)$$

식 (2)에서 $A_1[m^2]$ 은 공기스프링의 단면적을 나타낸다. 식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 공기스프링의 단면적이 공기스프링의 길이변화에 관계없이 일정하다고 가정하면 공기스프링의 강성은 압력변화에 비례하는 값으로 도출할 수 있다. 이하에서는 해석을 단순하게 하기 위하여 공기스프링의 단면적이 공기스프링의 길이변화에 관계없이 일정한 값 $A_1[m^2]$ 을 가지는 것으로 가정하고 해석을 진행한다.

공기스프링 내부 압력 P_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_1 \frac{\delta P_1}{\delta t} = -P_1 \frac{\delta V_1}{\delta t} + W_1 R \frac{\delta T_1}{\delta t},$$

$$V_1 = A_1 X \quad (3)$$

식 (3)에서 $R[J/(kgK)]$ 은 공기의 기체상수를 나타낸다. 식 (3)에 나타난 공기스프링의 길이 $X[m]$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = L - \delta x \quad (4)$$

공기스프링 내부의 온도변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_v W_1 \frac{\delta T_1}{\delta t} = -P_1 \frac{\delta V_1}{\delta t} + Q_1,$$

$$Q_1 = h_1 \cdot S_{h1} (T_a - T_1) \quad (5)$$

식 (5)에서 $C_v[J/(kgK)]$ 는 정적비열, $Q_1[W]$ 은 공기스프링 내부 공기와 대기와의 열전달동력, $h_1[J/(kgK)]$ 은 열전달계수, $S_{h1}[m^2]$ 은 전열면적, $T_a[K]$ 은 대기온도를 나타낸다.

공기스프링의 강성 변화에 미치는 파라미터를 명확히 하기 위하여 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta P_1}{\delta t} = -\frac{\kappa P_1}{V_1} \frac{\delta V_1}{\delta t} + \frac{(\kappa-1)}{V_1} Q_1 \quad (6)$$

식 (6)에서 χ 는 비열비를 나타낸다. 식 (6)을 공기스프링을 δx 만큼 가진 시켰을 때의 압력 변화를 나타내는 압력 변화율의 형태로 정리내면 다음 식과 같이 기술할 수 있다.

$$\frac{\delta P_1}{\delta x} = -\frac{\kappa P_1}{X} + \frac{(\kappa-1)}{\delta x / \delta t} Q_1 \quad (7)$$

식 (7)은 공기스프링 내부 공기의 열전달특성을 고려한 모델이고, 공기스프링 내부 공기의 상태변화를 단열 및 등온으로 가정하는 경우에는 각각 식 (8)과 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta P_1}{\delta x} = -\frac{\kappa P_1}{X} \quad (8)$$

$$\frac{\delta P_1}{\delta x} = -\frac{P_1}{X} \quad (9)$$

공기스프링의 강성은 식 (2)와 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

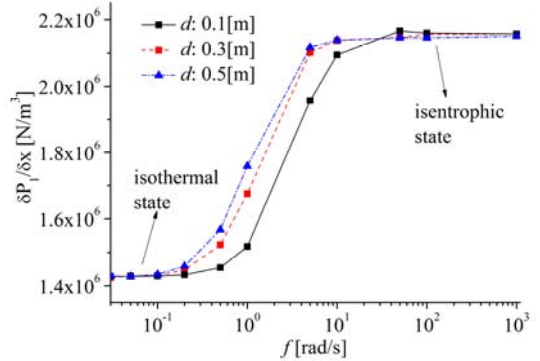
3. 특성 변화 분석 및 고찰

식 (2), (7)로부터 공기스프링의 강성 변화에 영향을 미치는 파라미터는 공기스프링의 단면적, 길이, 내부 압력, 열전달동력, 가진 진폭, 가진 주파수임을 알 수 있다. 이하에서는 이러한 파라미터가 공기스프링의 강성 변화에 미치는 영향을 식 (1)~(9)에 나타난 비선형 모델을 이용하여 분석한다.

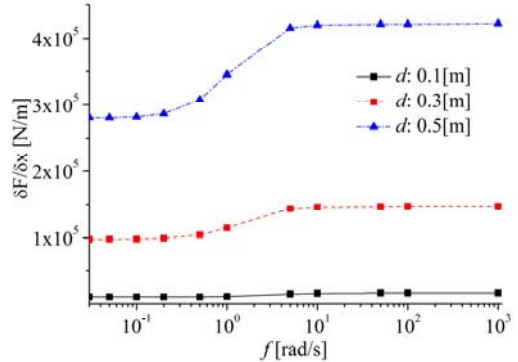
Table 1 Physical parameters of the air spring

C_v [J/(kgK)]	718	R [J/(kgK)]	287
C_p [J/(kgK)]	1005	T_a [K]	293
κ	1.4	T_{10} [K]	293

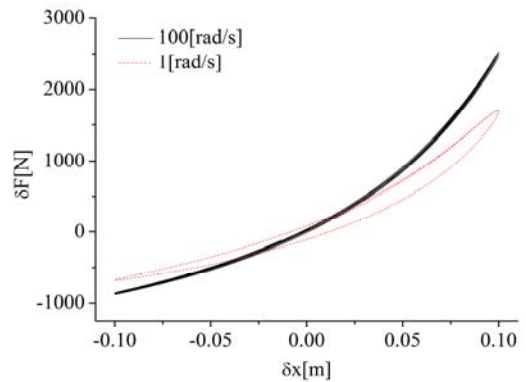
Table 1은 전술한 공기스프링의 강성변화에 영향을 미치는 파라미터 이외에 본 논문에서 적용한 공기스프링의 기본적인 물리 파라미터를 나타낸다. Table 1에서 T_{10} [K]는 평형상태에서의 공기스프링 내부 온도를 나타낸다.



(a) pressure change ratio



(b) dynamic stiffness



(c) δF - δx diagram

Fig. 2 Frequency response of an air spring according to the change of area

Fig. 2는 단면적 변화에 따른 공기스프링의 특성 변화를 나타낸다. Fig. 2(a)와 (b)의 종축은 각각 압력변화율과 강성을 나타내고, 횡축의 f [rad/s]는 가진주파수를 나타낸다. Fig. 2(c)는 가진주파수 변화에 따른 공기스프링의 위치 변화와 반력 변화와의 관계를 나타낸다. Fig. 2에서 d [m]는 공기스프링의 직경을 나타낸다. Fig. 2의 결과에서 L 은 0.25[m], h 는 200[W/(m² K)], 초기상태에서의 평형압력 P_{10} [Pa]는 300[kPa]로 설정하였다. 가진 진폭은 0.1[m]이다.

Fig. 2를 살펴보면 가진 주파수가 증가함에 따라 공기스프링의 압력 변화율과 강성이 증가함을 알 수 있다. 이러한 변화는 가진 주파수의 증가에 따라 공기스프링 내부 공기의 상태변화가 등온에서 단열 상태로 변화하기 때문이다⁷⁾.

Fig. 2(a)로부터 직경이 작아질수록 압력변화율이 등온상태 값에서 단열상태 값으로 증가하기 시작하는 주파수가 고주파수 대역으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 살펴보면 단면적의 변화는 식 (8)과 같은 형태로 식 (7)에 나타난 압력 변화율에 영향을 미침을 알 수 있다.

$$\frac{Q_1}{V_1} = \frac{h_1 \cdot S_{h1}(T_a - T_1)}{V_1} \propto \frac{S_{h1}}{V_1},$$

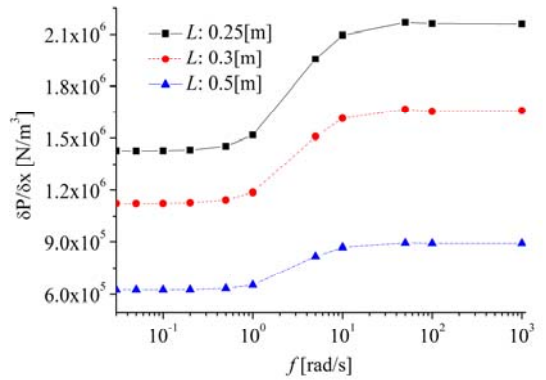
$$S_{h1} = 2A_1 + \pi dX \quad (8)$$

식 (8)에서 직경이 작아질수록 S_{h1}/V_1 이 점점 커지므로 Q_1/V_1 에 의한 열전달 효과가 더욱 활발하게 되어 단면적이 작아질수록 압력 변화율이 등온상태 값으로 유지되는 주파수 대역이 넓어짐을 알 수 있다.

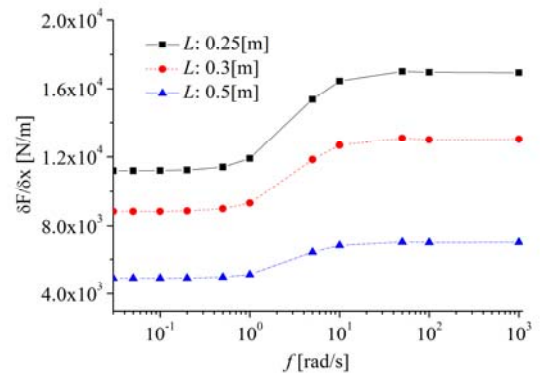
Fig. 2(b)는 단면적 변화와 식 (2)에 나타난 강성변화와의 관계를 나타내고, 단면적이 증가하면 공기스프링의 강성이 비례하여 증가함을 알 수 있다.

Fig. 2(c)는 Fig. 2(a)의 결과 중, 직경이 0.1[m]이고 가진주파수 100[rad/s] 및 1[rad/s]에서 얻어진 데이터를 정리한 결과이다. 이 결과로부터 가진 주파수가 증가하면 히스테리시스 감소하는 것을 알 수 있고, 이 결과는 Lee⁴⁾의 연구 결과와 일치한다.

Fig. 3은 공기스프링의 길이 변화와 압력 변화율의 관계를 나타낸다.



(a) pressure change ratio



(b) stiffness

Fig. 3 Frequency response of an air spring according to the change of area

Fig. 3에서 L [m]는 공기스프링 자유길이의 설정치를 나타낸다. Fig. 3에서 d 는 0.1[m], h 는 200[W/(m²K)], P_{10} [Pa]는 300[kPa]로 설정하였다. 가진 진폭은 0.1[m]이다.

Fig. 3(a)를 살펴보면 압력변화율은 공기스프링의 자유길이에 반비례하는 것을 알 수 있고, 이러한 결과는 식 (7)로부터 쉽게 유추할 수 있다. Fig. 3(b)는 길이 변화와 식 (2)에 나타난 강성변화와의 관계를 나타내고, 길이가 증가하면 공기스프링의 강성이 비례하여 감소함을 알 수 있다. 공기스프링의 강성은 압력변화율과 단면적의 곱으로 표현

되므로 Fig. 3(b)와 같이 단면적이 변하지 않는 경우의 강성변화는 압력변화율과 동일한 형태의 결과로 도출된다. 그러므로 이하에서는 단면적이 동일한 경우의 공기스프링의 특성으로 압력변화율을 제시한다.

Fig. 4는 공기스프링의 내부 평형 압력 P_{10} 를 변화시켰을 때의 압력 변화율의 변화를 나타낸다. Fig. 4에서 d 는 0.1[m], L 은 0.25[m], h 는 200[W/(m²K)]로 설정하였다. 가진 진폭은 0.1[m]이다. Fig. 4에서 압력변화율은 공기스프링 내부의 평형 압력에 비례하는 것을 알 수 있고, 이러한 결과는 Fig. 3에서와 같이 식 (7)로부터 유추할 수 있다.

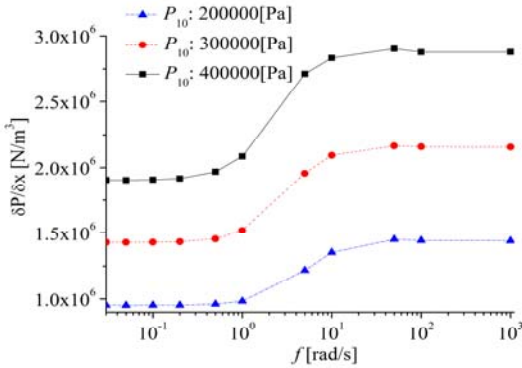


Fig. 4 Frequency response of an air spring according to the change of equilibrium pressure

Fig. 5는 공기스프링의 열전달계수 h 와 압력 변화율의 관계를 나타낸다. Fig. 5에서 d 는 0.1[m], L 은 0.25[m], P_{10} [Pa]는 300[kPa]로 설정하였다. 가진 진폭은 0.1[m]이다.

Fig. 5를 살펴보면 Fig. 2(a)와 같이 가진 주파수가 증가함에 따라 공기스프링의 압력 변화율이 등온상태에서 단열상태로 증가하기 시작하는 주파수가 고주파수 대역으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 식 (7)에 나타난 바와 같이 열전달계수가 증가하면 열전달동력 Q_1 이 비례하여 증가하기 때문에 동일한 가진주파수 하에서는 열전달계수가 큰 공기스프링의 압력변화율이 상

대적으로 작아지게 된다.

Fig. 6은 가진 진폭 변화에 따른 압력 변화율의 변화를 나타낸다.

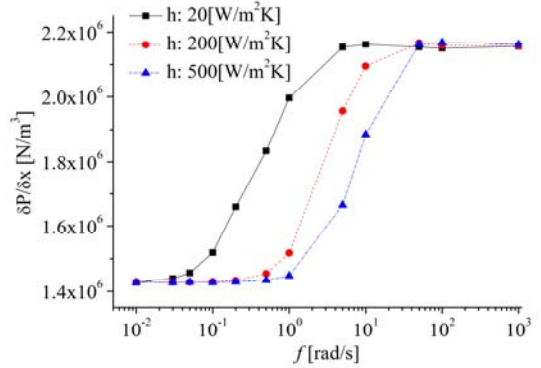


Fig. 5 Frequency response of an air spring according to the change of heat transfer coefficient

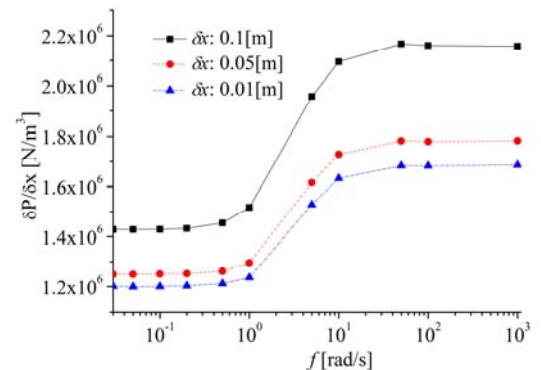


Fig. 6 Frequency response of an air spring according to the change of excitation amplitude

Fig. 6에서 d 는 0.1[m], L 은 0.25[m], h 는 200[W/(m²K)], P_{10} [Pa]는 300[kPa]로 설정하였다. Fig. 6에서 압력변화율은 공기스프링의 가진 진폭에 비례하는 것을 알 수 있고, 식 (7)로부터 이러한 결과가 타당함을 유추할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기스프링을 대상으로 열전달 특성을 포함한 수확모델을 도출하고 공기스프링

의 파라미터 변화가 공기스프링의 압력변화율과 강성 변화에 미치는 영향을 다양한 조건에 의한 모의시험을 통하여 분석하였다.

본 연구에서 얻어진 성과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 상태방정식 및 에너지방정식을 이용하여 공기스프링의 수학모델을 도출하였다.

(2) 공기스프링의 가진 주파수가 증가하면 공기스프링 내부 공기의 상태가 등온 상태에서 단열 상태로 변화하면서 압력 변화율과 강성이 증가한다. 이 때, 등온 상태에서 단열 상태로 변화하는 가진 주파수는 공기스프링의 단면적 또는 전열 면적이 증가할수록 고 주파수 대역으로 이동한다.

(3) 공기스프링의 자유 길이와 내부 압력의 평형상태 값 또는 가진 진폭을 변경하면서 가진 주파수를 증가시키면 자유 길이 및 내부 압력의 평형상태 값, 가진 진폭에 비례하여 압력 변화율과 강성이 증가하지만, 등온 상태에서 단열 상태로 변화하는 가진 주파수는 변화하지 않는다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2014년)에 의하여 연구되었음

Reference

1. N. Docquier, P. Fisette and H. Jeanmart, 2008, "Model-based evaluation of railway pneumatic suspensions", Vehicle System Dynamics, Vol. 46, Supplement, pp. 481-493.
2. Kayaba Co., 1991, "Automotive Suspension", Sangaitou, pp. 362-365.
3. J. S. Jang, 2013, "Effectiveness of a Heat Transfer Characteristics of an Auxiliary Chamber for Performance of an Air Spring", The Korean Society for Power System Engineerinbg, Vol. 17, No. 4, pp. 121-127.
4. S. J. Lee, 2010, "Development and Analysis of An Air Spring Model", Int. J. of Automotive Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 471-479.
5. J. S. Jang, 2013, "A Study on the Performance Improvement of an Air Spring System", Journal of the Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments, Vol. 10, No. 2, pp. 1-6.
6. B. Zargar, A. Fahim and A. Jnifene, 2011, "Development, validation, and parameter sensitivity analyses of a nonlinear mathematical model of air springs", Journal of Vibration and Control, Vol. 18, No. 2, pp. 1777-1787.
7. J. C. Lee and H. Liu, 2011, "An experimental investigation on the characteristics of an automotive air spring", J. of the Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments, Vol. 8, No. 2, pp. 17-22.
8. R. A. Williams, 1997, "Automotive active suspensions Part2: Practical considerations", Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Vol. 211, No. 6, pp. 427-444.
9. C. Erin and B. Wilson, 1998, "An Improved Model of a Pneumatic Vibration Isolator: Theory and Experiment", Journal of Sound and Vibration, Vol. 128, No. 1, pp. 81-101.