

에어스프링 시스템의 성능 개선에 관한 연구

A Study on the Performance Improvement of an Air Spring System

장 지 성^{1*}

J. S. Jang

Receid: 04 Feb. 2013, Accepted: 21 Feb. 2013

Key Words : Air Spring(에어스프링), Auxiliary Chamber(보조용기), Reaction Force(반력), Heat Transfer Characteristics(열전달특성)

Abstract: This study describes a method which can attenuate reaction force effectively for an air spring system composed of an air spring and auxiliary chamber. For the analysis, the nonlinear governing equation of the air spring system is derived. For a performance improvement of the system, change of the heat transfer effect and the mass flow rates is included in the analysis of the air spring system. The simulation study is presented to show the reaction force is changed by variations in heat transfer characteristics and the air spring system of isothermal process has the best performance. As a result, to improve attenuation characteristics of reaction force, a process in the air spring system should be maintained near isothermal process.

1. 서 론

에어스프링과 보조용기로 구성된 에어스프링 시스템은 스프링 상수의 변경이 용이하며 충격 및 진동 절연 성능이 우수하므로 다양한 분야에 사용되고 있다^{1,2)}.

이러한 에어스프링 시스템의 성능을 개선하기 위한 연구로는 에어스프링과 보조용기를 연결하는 배관 및 오리피스에 대한 연구³⁾, 에어스프링 내부 압력 변화가 미치는 영향에 대한 분석⁴⁾, 에어스프링의 최적설계⁵⁾ 등이 진행되어 왔다.

그 결과 에어스프링의 반력은 보조용기와 공기스프링을 연결하는 접속관 또는 오리피스의 크기, 접속관의 길이, 보조용기의 체적, 공기스프링 내부 초기압력 등의 요소에 영향을 받는다는 사실이 알려져 있

다. 이러한 요소 이외에도 에어스프링의 반력은 공기의 열전달효과에 의해서도 변화함이 알려져 있고, 열전달효과가 에어스프링의 성능에 미치는 영향을 분석한 연구⁶⁾에서는 실험적 방법에 의하여 보조용기가 없는 에어스프링을 대상으로 에어스프링의 특성변화를 유추하였다.

본 연구에서는 에어스프링과 보조용기로 구성된 에어스프링 시스템을 대상으로 에어스프링 시스템에 가해지는 다양한 형태의 외력에 대한 에어스프링의 반력 변화를 고찰하고, 이러한 반력 변화를 저감시킬 수 있는 요인을 에어스프링 및 보조용기의 열전달효과를 중심으로 분석하여 에어스프링 시스템의 성능 개선에 효과적인 방안을 제시하고자 한다.

2. 에어스프링 시스템 비선형 모델

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하는 에어스프링 시스템의 개략도이고, 에어스프링, 보조용기, 제어밸브 및 에어스프링과 보조용기를 연결하는 배관으로 구성되어 있다. Fig. 1에서 $F[N]$ 는 에어스프링의 반력, $G[kg/s]$ 는 공기의 질량유량, P 는 에어스프링 및 보조용기 내부의 압력, $S_e[m^2]$ 는 배관과 제어밸브의

* Corresponding author: jangjs@pknu.ac.kr

¹ Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Copyright © 2013, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

합성 유효 단면적, $T[K]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부의 온도, $V[m^3]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부의 체적, $W[kg]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부 공기 질량, $x[m]$ 는 에어스프링의 길이 변화, $L[m]$ 은 에어스프링의 자유길이를 나타낸다. 이하에서 아래첨자 1은 에어스프링, 아래첨자 2는 보조용기를 각각 나타낸다.

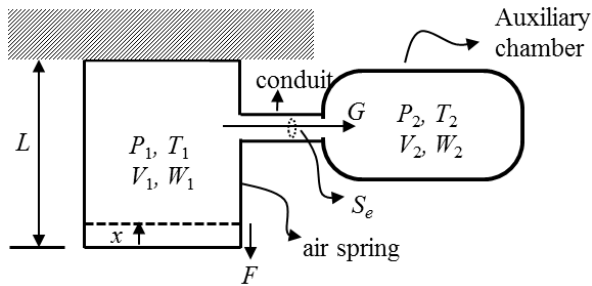


Fig. 1 Schematic diagram of the air spring system

에어스프링의 체적이 에어스프링의 길이변화에 비례한다고 가정하면 Fig. 1에 나타난 에어스프링의 수학적모델은 다음과 같이 기술할 수 있다.

에어스프링 및 보조용기 내부의 압력변화는 식 (1), (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left\{ -P_1 \frac{dV_1}{dt} - GRT_1 + W_1 R \frac{dT_1}{dt} \right\},$$

$$V_1 = AL(1-y) \quad (1)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \left\{ GRT_2 + W_2 R \frac{dT_2}{dt} \right\} \quad (2)$$

식 (1)에서 $A[m^2]$ 는 에어스프링의 x 방향 단면적, $R[J/kgK]$ 은 기체상수, y 는 x/L 로써 에어스프링의 수축률을 나타낸다.

에어스프링 내부의 온도변화 및 보조용기 내부의 온도변화는 각각 식 (3)과 (4)로 나타낼 수 있다.

$$P_1 > P_2$$

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{C_v W_1} \left\{ -P_1 \frac{dV_1}{dt} - \frac{P_1}{\rho_1} G + Q_1 \right\}$$

$$P_1 \leq P_2$$

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{C_v W_1} \left\{ -P_1 \frac{dV_1}{dt} - C_v G T_1 + \frac{P_2}{\rho_2} G + C_v G T_2 + Q_1 \right\}$$

$$Q_1 = h_1 \cdot s_{h1}(T_a - T_1),$$

$$s_{h1} = 2A + \pi dL(1-y) \quad (3)$$

$$P_1 > P_2$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{C_v W_2} \left\{ -C_v G T_2 + \frac{P_1}{\rho_1} G + C_v G T_1 + Q_2 \right\}$$

$$P_1 \leq P_2$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{C_v W_2} \left\{ -\frac{P_2}{\rho_2} G + Q_2 \right\}$$

$$Q_2 = h_2 \cdot s_{h2}(T_a - T_2) \quad (4)$$

식 (3), (4)에서 $C_v[J/(kgK)]$ 는 정적비열, $d[m]$ 는 에어스프링의 x 방향 지름, $h[W/m^2K]$ 는 열전달계수, $s_h[m^2]$ 는 전열면적, $Q[W]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부 공기와 대기와의 열전달동력, $\rho[kg/m^3]$ 는 공기의 밀도를 나타낸다.

배관과 제어밸브를 이상적인 오리피스로 가정하면 에어스프링과 보조용기 내부 압력의 크기에 따라 에어스프링과 보조용기 사이를 이동하는 공기의 질량유량을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_1 \geq P_2$$

$$\frac{P_2}{P_1} \leq 0.528$$

$$G = S_c P_1 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_1} \left(\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} - \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right)},$$

$$\frac{P_2}{P_1} > 0.528$$

$$G = S_c P_1 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad (5)$$

$$P_1 < P_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} \leq 0.528$$

$$G = -S_c P_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_2} \left(\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} - \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right)},$$

$$\frac{P_1}{P_2} > 0.528$$

$$G = -S_c P_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_2} \left(\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 k 는 비열비를 나타낸다. 에어스프링의 반력은 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$F = A \cdot P_1 \tag{7}$$

3. 분석 및 고찰

식 (1)~(7)을 살펴보면 에어스프링의 반력에 어떠한 요소가 영향을 미치는지 파악할 수 있다. 이러한 요소를 명확히 하기 위하여 식 (3)과 (4)를 식 (1)과 (2)에 각각 대입하여 정리하면 에어스프링 및 보조용기 내부의 압력변화를 식 (8)과 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &P_1 > P_2 \\
 &\frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left\{ -kP_1 \frac{dV_1}{dt} - kGRT_1 + (k-1)Q_1 \right\} \\
 &P_1 \leq P_2 \\
 &\frac{dP_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left\{ -kP_1 \frac{dV_1}{dt} + kGRT_2 + (k-1)Q_1 \right\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 &P_1 > P_2 \\
 &\frac{dP_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \{ kGRT_1 + (k-1)Q_2 \} \\
 &P_1 \leq P_2 \\
 &\frac{dP_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \{ -kGRT_2 + (k-1)Q_2 \}
 \end{aligned} \tag{9}$$

식 (8), (9) 및 (10)으로부터 에어스프링의 반력은 에어스프링 및 보조용기 내부 공기의 열전달효과를 포함한 온도변화, 에어스프링과 보조용기를 출입하는 질량유량의 변화 및 에어스프링의 체적변화에 의하여 변화함을 알 수 있다. 이 중 에어스프링의 체적 변화가 식 (10)과 같이 수축을 y 에 비례한다고 가정하여 에어스프링 자체의 재질에 기인하는 비선형특성을 무시하면 에어스프링의 반력이 에어스프링의 변형에 기인하는 에어스프링 및 보조용기 내부 공기의 온도변화와 에어스프링과 보조용기를 출입하는 질량유량의 변화에 의하여 변화함을 유추할 수 있다.

$$V_1 = V_{10} - LAy \tag{10}$$

식 (10)에서 V_{10} 는 에어스프링의 초기체적을 나타낸다.

에어스프링 시스템의 반력변화에 영향을 미치는 요소 중, 우선 에어스프링 내부 공기의 온도변화가

미치는 영향을 명확히 하기 위하여 Fig. 1에 나타난 에어스프링 시스템에서 S_e 가 0인 경우, 즉, 보조용기가 없는 경우에 대하여 고찰해 본다.

본 논문에서 이용한 에어스프링의 기본적인 물리 파라미터를 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Physical parameters of the air spring

A [m ²]	0.19625	P_{10} [kPa]	300
C_v [J/(kgK)]	718	R [J/(kgK)]	287
k [m]	1.4	T_a [K]	293
L [m]	0.25	T_{10} [K]	293

Table 1에서 P_{10} , T_{10} 및 V_{10} 는 각각 에어스프링 내부의 압력, 온도 및 체적의 초기치를 나타내고, T_a 는 대기온도를 나타낸다.

Fig. 2는 에어스프링에 외력이 작용하여 Fig. 1에 나타난 x 방향으로 0.1[m] 변형되었을 때 발생하는 에어스프링의 반력에 대한 계산 결과를 나타낸다. Fig. 2에 나타난 결과는 상태변화를 등온변화로 가정한 경우와 단일변화로 가정한 경우 및 열전달계수 h_1 을 100으로 설정한 결과이다.

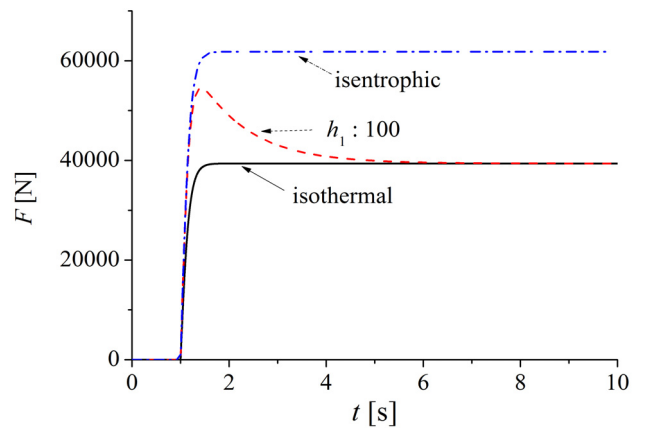


Fig. 2 Reaction Forces for a step input according to the change of heat transfer characteristics in the air spring

Fig. 2로부터 에어스프링에 스텝형 외력이 가해질 때, 에어스프링의 열전달 효과가 커질수록 반력의 크기가 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 3은 정현파 외력이 작용하여 에어스프링이 변형되었을 때 발생하는 반력에 대한 계산결과를 나타

낸다. Fig. 3에서 에어스프링이 변형하는 진폭은 $\pm 0.1[m]$, 진동 주기는 $1[rad/s]$ 로 설정하였다. Fig. 3을 살펴보면 정현파 입력이 가해질 때에도 에어스프링의 열전달 효과가 커질수록 반력의 크기가 감소함을 알 수 있다.

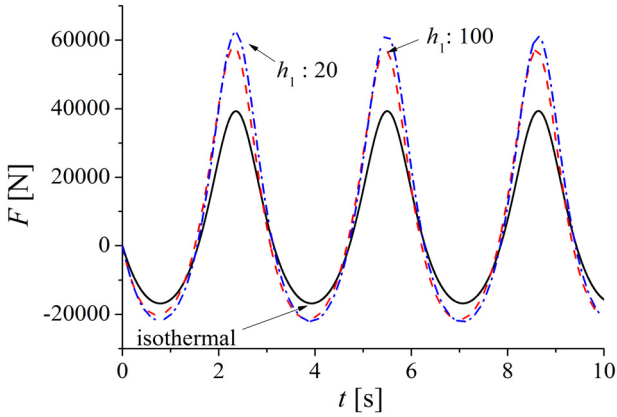


Fig. 3 Reaction Force for a sinusoidal input according to the change of heat transfer characteristics in the air spring(frequency: $1[rad/s]$, $x: \pm 0.1[m]$)

Fig. 4는 Fig. 3의 결과를 $F-V$ 선도로 나타낸 그림이고, 상태변화가 등온과정일 때, 즉, 열전달효과가 가장 활발할 때 에어스프링의 스프링 상수가 가장 작아짐을 확인할 수 있다.

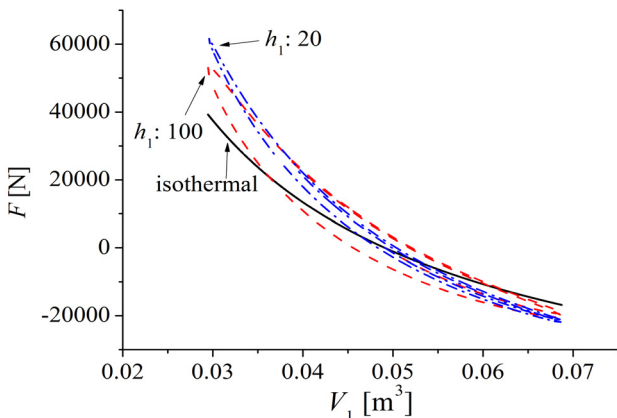


Fig. 4 $F-V$ diagram according to the change of heat transfer characteristics in the air spring(frequency: $1[rad/s]$, $x: \pm 0.1[m]$)

또한, Fig. 4로부터 열전달계수가 증가하면 히스테리시스가 증가하면서 압력변화의 진폭이 감소함을 알 수 있다. $F-V$ 선도의 히스테리시스는 에어스프링의

열손실에너지를 나타내므로 이 결과로부터 에어스프링의 열전달효과가 증가하면 열손실에너지의 증가에 의하여 에어스프링의 반력이 감소하므로 충돌에너지를 보다 많이 흡수하게 됨을 유추할 수 있다.

Fig. 5는 진폭 $\pm 0.1[m]$, 주기 $2[rad/s]$ 의 정현파 외력이 작용할 때 발생하는 에어스프링 반력의 $F-V$ 선도를 나타낸다. Fig. 5와 4를 비교해 보면 정현파 외력의 진동 주기가 증가하여도 히스테리시스가 감소하는 것 이외에는 Fig. 4에서와 동일한 경향의 결과가 얻어짐을 알 수 있다.

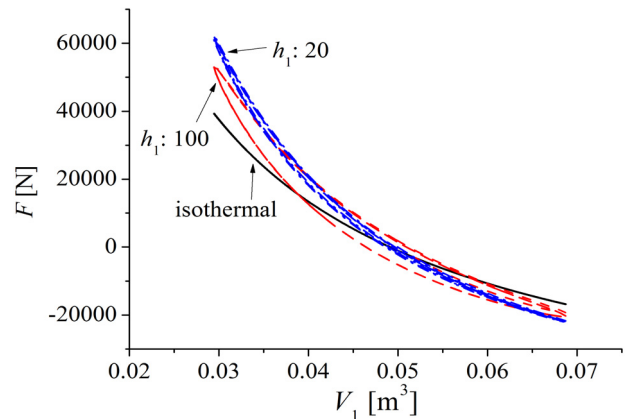


Fig. 5 $F-V$ diagram according to the change of heat transfer characteristics in the air spring(frequency: $2[rad/s]$, $x: \pm 0.1[m]$)

이상의 결과로부터 에어스프링을 단독으로 사용하는 경우에는 에어스프링의 열전달 효과를 증가시켜서 에어스프링 내부 공기의 온도변화를 가능한 억제하는 것이 에어스프링의 반력 감소에 효과적임을 알 수 있다.

다음으로 에어스프링과 보조용기를 출입하는 질량 유량의 변화가 에어스프링의 반력변화에 미치는 영향에 대하여 고찰해 본다.

Table 2는 Table 1에 나타난 에어스프링의 물리파라미터를 제외한 에어스프링 시스템의 물리파라미터를 나타낸다.

Table 2 Physical parameters of the air spring system except the parameters described in Table 1

P_{20} [kPa]	300	T_{20} [K]	293
S_e [m^2]	$5 \cdot 10^{-4}$	V_2 [m^3]	0.05

Fig. 6은 Fig. 1에 나타난 에어스프링 시스템의 물리 파라미터를 Table 1, 2의 값으로 설정하고 에어스프링을 진폭 $\pm 0.1[m]$, 주기 $5[rad/s]$ 및 $10[rad/s]$ 로 변형시켰을 때 에어스프링과 보조용기를 출입하는 질량유량을 나타낸다. Fig. 6에서 에어스프링과 보조용기의 열전달계수 h_1 과 h_2 는 각각 $100[W/m^2K]$ 로 설정하였다.

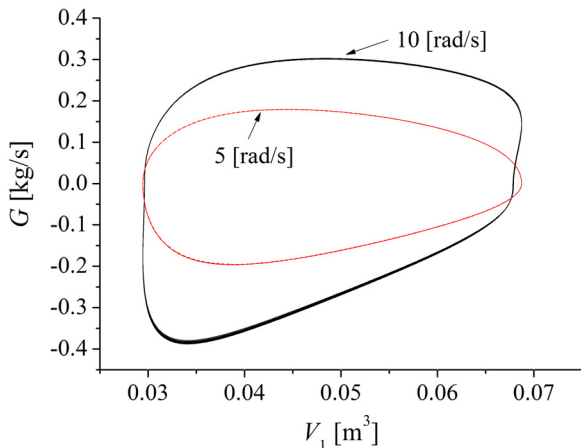


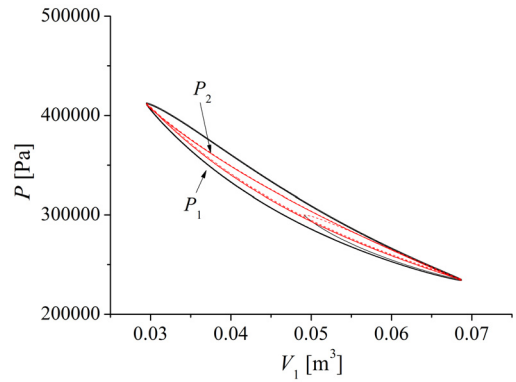
Fig. 6 Change of mass flow rates according to the variation of excitation frequency(h_1 : $100[w/m^2K]$, h_2 : $100[w/m^2K]$)

Fig. 6으로부터 에어스프링의 진동 주기가 증가하면 에어스프링으로부터 보조용기로 이동하는 유량과 보조용기로부터 에어스프링으로 이동하는 유량의 히스테리시스가 점점 커짐을 알 수 있다.

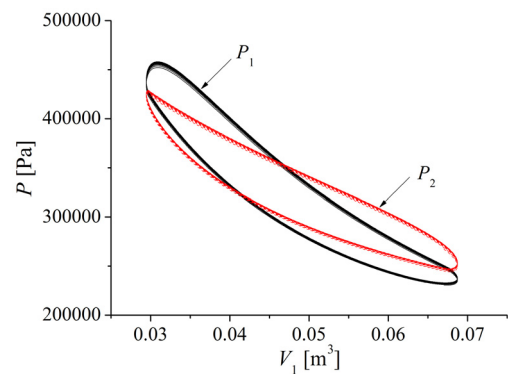
이러한 결과는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 에어스프링의 진동주기가 증가함에 따라 에어스프링과 보조용기 내부 압력의 진폭, 위상차 및 히스테리시스 증가하는 것을 원인으로 제시할 수 있다.

또한, 식 (7)에 나타난 바와 같이 Fig. 7에 나타난 P_1 과 에어스프링 단면적과의 곱이 에어스프링의 반력을 나타내므로 에어스프링의 진동 주기가 증가하면 에어스프링 반력의 히스테리시스와 강성이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 식 (5), (6)을 살펴보면 에어스프링과 보조용기 내부 온도 역시 에어스프링과 보조용기를 출입하는 질량유량에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6, 7과 동일한 조건에서 계산한 에어스프링 내부의 온도 변화를 나타내고, 에어스프링의 진동주기가 증가함에 따라 에어스프링 내부 온도 변화의 진폭 및 히스테리시스 증가함을 알 수 있다.



(a) Excitation frequency: $5[rad/s]$



(b) Excitation frequency: $10[rad/s]$

Fig. 7 Pressure responses in the air spring system(h_1 : $100[w/m^2K]$, h_2 : $100[w/m^2K]$)

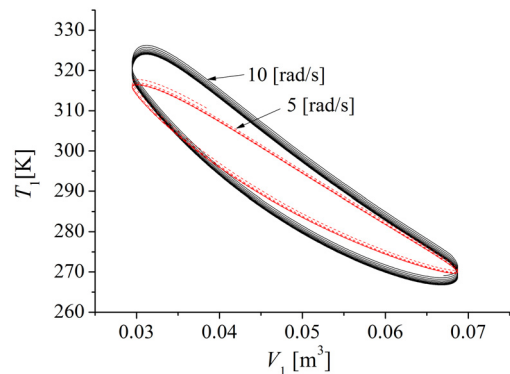


Fig. 8 Temperature responses in the air spring (h_1 : $100[w/m^2K]$, h_2 : $100[w/m^2K]$)

Fig. 9는 에어스프링 시스템의 열전달 효과에 따른 질량유량의 변화를 나타낸다. Fig. 9에서 에어스프링은 진폭 $\pm 0.1[m]$, 주기 $10[rad/s]$ 로 가진하였다. Fig. 9를 살펴보면 에어스프링 시스템의 열전달 효과가 커질수록 질량유량의 히스테리시스 감소함을 알 수 있다. 또한, 질량유량의 히스테리시스 감소효과는 에어스프링을 등온상태로 유지할 때 가장 크지만 보조용기 내부를 등온상태로 유지하는 경우에도 질량유량

에 대한 히스테리시스 감소효과가 발생함을 확인할 수 있다.

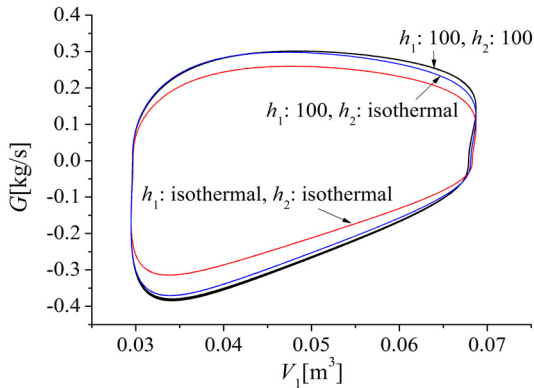


Fig. 9 Change of mass flow rates according to the variation of heat transfer characteristics in the air spring (frequency: 10[rad/s], $x: \pm 0.1[m]$)

Fig. 10은 Fig. 9의 조건에서 계산한 에어스프링 시스템의 반력을 나타낸다.

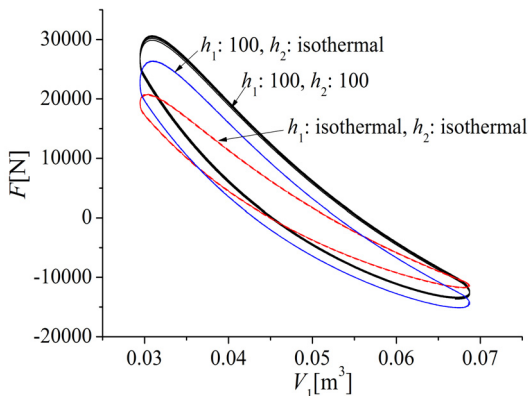


Fig. 10 F-V diagram according to the change of heat transfer characteristics in the air spring (frequency: 10[rad/s], $x: \pm 0.1[m]$)

Fig. 9, 10으로부터 에어스프링 시스템의 열전달효과가 향상될수록 유량의 히스테리시스가 감소하고 그 결과 에어스프링 반력의 진폭 및 스프링 상수가 작아짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 에어스프링 시스템의 성능 향상을 목적으로 다양한 조건에 의한 모의시험을 실시하고

그 결과를 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 성과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 상태방정식 및 에너지방정식을 이용하여 체적 변화와 열전달 효과를 반영한 에어스프링 시스템의 수학적 모델을 도출하였다.

(2) 에어스프링으로 가해지는 외력의 형태에 관계없이 에어스프링의 열전달효과가 증가하면 에어스프링 반력의 크기와 스프링 상수가 감소함을 확인하였다.

(3) 에어스프링 시스템의 열전달효과가 증가하면 에어스프링과 보조용기를 출입하는 질량유량의 히스테리시스가 감소하여 에어스프링 반력의 진폭, 스프링 상수 및 히스테리시스가 작아짐을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- 1) N. Docquier, P. Fiset and H. Jeanmart, "Model-based evaluation of railway pneumatic suspensions", Vehicle System Dynamics, Vol. 46, Supplement, pp. 481~493. 2008.
- 2) Kayaba Co., 1991, "Automotive Suspension", Sangaitou, pp. 362~365. 1991.
- 3) A. Alonso, J. G. Gimenez, J. Nietoc and J. Vinolasa, "Air suspension characterization and effectiveness of a variable area orifice", Vehicle system dynamics, Vol. 48, Supplement, pp. 271~286, 2010.
- 4) T. Fujita et al., "Affection of connecting Conduit to Characteristics of Air Spring with Subtank", Trans. of the JSME, Vol. 63, No. 610, pp. 1920~1926. 1997.
- 5) C. Erin and B. Wilson, "An Improved Model of a Pneumatic Vibration Isolator: Theory and Experiment", Journal of Sound and Vibration, Vol. 218, No. 1, pp. 81~101, 1998.
- 6) J. C. Lee and H. Liu, "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, 2011.