

보조용기의 열전달특성이 공기스프링의 성능에 미치는 영향

Effectiveness of a Heat Transfer Characteristics of an Auxiliary Chamber for Performance of an Air Spring

장 지 성
Ji-Seong Jang

(접수일 : 2012년 07월 24일, 수정일 : 2012년 12월 04일, 채택확정 : 2013년 02월 24일)

Abstract: The air spring is used widely because of the easy change of spring constant, and, a superior vibration and shock insulation performance. Among the apparatus using the merits of that, the air spring connected an auxiliary chamber has been developed and used as a component of suspension system for an automobile and a railroad car. The purpose of this study is to suggest a design method reflecting heat transfer effect for an air spring system connected auxiliary chamber. In order to do so, this study investigates change of reaction force along with variations in heat transfer coefficient, and, analyzes an effectiveness of a heat transfer characteristics of an auxiliary chamber for external force attenuation characteristics and impedance characteristics of an air spring connected an auxiliary chamber.

Key Words : Air Spring, Auxiliary Chamber, External Force Attenuation Characteristics, Heat Transfer Characteristics

1. 서 론

공기스프링은 스프링 상수의 변경이 용이하며, 충격 및 진동절연 성능이 우수하므로 다양한 분야에 사용되고 있다. 그 중 보조용기를 연결하고 공기스프링과 보조용기 사이에 오리피스를 삽입함으로써 부하변동 상태에 따라 스프링상수가 조절되는 공기스프링이 개발되어 자동차 현가장치, 철도차량 현가장치 등에 폭넓게 사용되고 있다¹⁻²⁾. 보조용기가 연결된 공기스프링의 성능 향상을 위한 연구로는 보조용기와 공기스프링을 연결하는 오리피스의 크기가 공기스프링의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석한 연구³⁻⁴⁾, 보조용기와 공

기스프링을 연결하는 접속관의

영향과 전달특성을 분석한 연구⁵⁾, 구동압력이 미치는 영향에 대한 연구⁶⁾, 공기스프링 구성요소의 최적설계⁷⁾ 등 다양한 요소에 대한 연구, 분석이 진행되어 왔다. 공기스프링이 외부 충격 및 진동절연을 목적으로 사용된다는 사실을 감안한다면 전술한 연구들은 결국 보조용기와 연결된 공기스프링의 임피던스 특성을 원하는 형태로 조절하여 공기스프링에 가해지는 특정주파수 대역의 외부 부하력을 보다 신속하게 감쇠시킬 수 있는 방안을 모색한 연구임을 알 수 있다.

공기스프링의 외부 부하력 감쇠특성은 보조용기와 공기스프링을 연결하는 접속관 또는 오리피

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

스의 크기, 접속관의 길이, 보조용기의 체적, 공기스프링 내부 초기압력 등의 물리적 요소 이외에도 공기의 압축성에 기인하는 열전달효과에 의해서도 변화 한다. 그러나, 열전달효과가 공기스프링의 히스테리시스 특성에 미치는 영향을 분석한 연구⁸⁾는 보조용기가 없는 공기스프링만을 대상으로 수행한 연구이고, 또한, 해석적 방법에 의하여 공기스프링의 특성변화를 유추하므로 파라미터 변화에 따른 공기스프링의 정성적 특성변화 파악이 용이하지 않다.

본 연구에서는 보조용기가 연결된 공기스프링을 대상으로 보조용기의 열전달계수 변화에 따른 공기스프링의 반력 변화를 고찰하여 보조용기의 열전달특성이 공기스프링의 외부 부하력 감쇠 특성 및 임피던스 특성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통하여 보조용기를 포함한 공기스프링 시스템 설계에 열전달효과를 반영할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 기초방정식

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하는 공기스프링 시스템의 개략도를 나타낸다. Fig. 1에서 $d[m]$ 는 에어스프링 직경, $F[N]$ 는 외력, $G[kg/s]$ 는 $S_e[m^2]$ 를 통과하는 공기의 질량유량, $P_1[Pa]$, $P_2[Pa]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부 압력, $T_1[K]$, $T_2[K]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부 온도, $V_1[m^3]$, $V_2[m^3]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부 체적, $x[m]$ 는 외력의 작용에 의한 에어스프링의 길이 변화, $L[m]$ 은 에어스프링의 자유길이를 나타낸다.

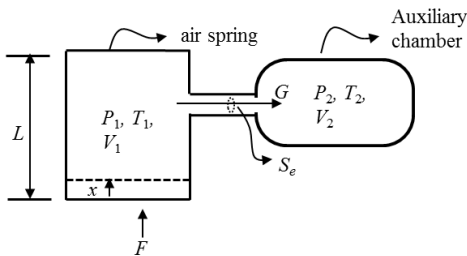


Fig. 1 Schematic diagram of an air damping connected auxiliary chamber

해석을 단순하게 하기 위하여 에어스프링의 단면적이 일정하고 에어스프링과 보조용기는 접속관이 아닌 단순한 오리피스에 의하여 연결되어 있으며 또한 보조용기의 격벽을 강체로 가정한다. 이러한 가정 하에 Fig. 1에 나타난 보조용기가 연결된 에어스프링의 수확모델을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

2.1 유량방정식

에어스프링과 보조용기를 연결하는 접속관을 단면적 S_e 인 이상적인 오리피스로 가정하면 에어스프링과 보조용기 사이를 이동하는 질량유량 G 는 다음 식으로 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$\textcircled{1} \quad G, P_1 \geq P_2$$

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

$$S_e P_1 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_1} \left(\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} - \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right)}$$

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

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

$$\textcircled{2} \quad G, P_1 < P_2$$

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

$$-S_e P_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_2} \left(\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} - \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right)}$$

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

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

식 (1), (2)에서 k 는 비열비, $R[J/(kgK)]$ 은 기체상수를 나타낸다.

2.2 상태방정식

Fig. 1에 나타낸바와 같이 에어스프링의 체적이 x 에 비례하여 축소되면 에어스프링 및 보조용기 내부 공기의 상태방정식을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_1 \frac{dP_1}{dt} = P_1 A_1 \frac{dx}{dt} - GRT_1 + W_1 R \frac{dT_1}{dt},$$

$$V_1 = A_1(L - x_1) \quad (3)$$

$$V_2 \frac{dP_2}{dt} = GRT_2 + W_2 R \frac{dT_2}{dt} \quad (4)$$

식 (3)에서 $A_1[\text{m}^2]$ 은 에어스프링의 x 방향 단면적을 나타낸다.

2.3 에너지방정식

에어스프링과 보조용기 내부의 온도변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

① 에어스프링 내부 온도변화

$$P_1 > P_2$$

$$\frac{d(C_v W_1 T_1)}{dt} = P_1 A_1 \frac{dx}{dt} - \frac{P_1}{\rho_1} G - C_v G T_1 + Q_1$$

$$P_1 \leq P_2$$

$$\frac{d(C_v W_1 T_1)}{dt} = P_1 A_1 \frac{dx}{dt} + \frac{P_2}{\rho_2} G + C_v G T_2 + Q_1$$

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

② 보조용기 내부 온도변화

$$P_1 > P_2$$

$$\frac{d(C_v W_2 T_2)}{dt} = \frac{P_1}{\rho_1} G + C_v G T_1 + Q_2$$

$$P_1 \leq P_2$$

$$\frac{d(C_v W_2 T_2)}{dt} = -\frac{P_2}{\rho_2} G - C_v G T_2 + Q_2$$

$$Q_2 = h_2 \cdot s_{h2}(T_a - T_2) \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 $W_1[\text{kg}]$, $W_2[\text{kg}]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부 공기질량, $C_v[\text{J}/(\text{kgK})]$ 는 정적비열, $Q_1[\text{W}]$, $Q_2[\text{W}]$ 는 에어스프링 및 보조용기 내부 공기와 대기와의 열전달동력, $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$ 는 공기의 밀도를 나타낸다.

3. 성능분석 및 고찰

본 논문에서 적용한 공기스프링 시스템의 기본적인 물리 파라미터를 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Physical parameters of the air spring system

A_1 [m ²]	$\pi d^2/4$	L [m]	0.25
C_v [J/(kgK)]	718	R [J/(kgK)]	287
C_p [J/(kgK)]	1005	S_e [m ²]	$5 \cdot 10^{-4}$
d [m]	0.5	S_{h1} [m ²]	$\pi d(L - x) + 2A_1$
h_1 [W/(m ² K)]	120	T_a [K]	293
P_{10} [kPa]	300	T_{10} [K]	293
P_{20} [kPa]	300	T_{20} [K]	293
k [m]	1.4	V_{10}	$A_1 L$

Table 1에서 P_{10} , P_{20} 및 T_{10} , T_{20} 는 각각 에어스프링과 보조용기 내부 압력과 온도의 초기치를 나타낸다.

Table 2는 Fig. 2~6의 case1~4에 제시한 결과 도출에 사용된 에어스프링과 보조용기의 체적 및 보조용기의 열전달계수를 나타낸다.

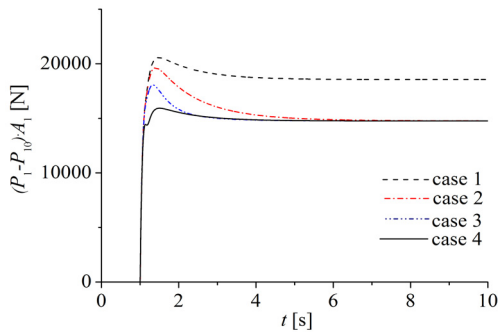
Fig. 2는 Fig. 1에 나타낸 방향으로 외력이 작용하여 에어스프링이 x 방향으로 0.1[m] 변형되었을 때 발생하는 에어스프링의 반력을 계산한 결과를 나타낸다. Fig. 2에서 case1은 V_2 를 V_1 의 초기치인 V_{10} (x 가 0일 때의 V_1 의 체적)와 같은 값으로 설정하고, S_e 는 $5 \cdot 10^{-4}[\text{m}^2]$, 그리고 h_2 는 0으로 하여 보조용기 내부 공기를 단열상태로 가정하였을 때의 결과를 나타낸다. case2~4는 case1과 동일한 조건에서 V_2 의 열전달계수 h_2 만을 증가시킨 결과를 나타낸다.

case1~case4를 비교해 보면 보조용기를 포함한

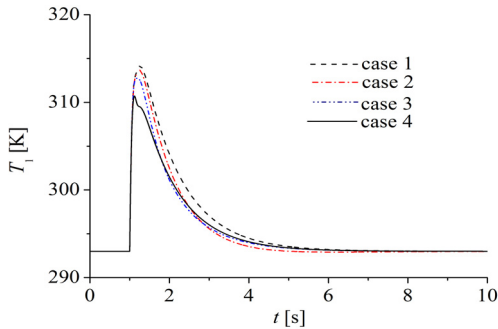
에어스프링 시스템의 체적이 증가할수록, 또한, 보조용기의 열전달계수가 증가하여 에어스프링 내부 공기의 온도변화가 작아질수록 에어스프링의 반력이 감소함을 알 수 있다.

Table 2 Physical parameters used in the Fig. 2~6

	V_1	V_2	h_2
case1	eq.(3)	V_{10}	0
case2	eq.(3)	V_{10}	h_1
case3	eq.(3)	V_{10}	500
case4	eq.(3)	V_{10}	∞



(a) Reaction Force

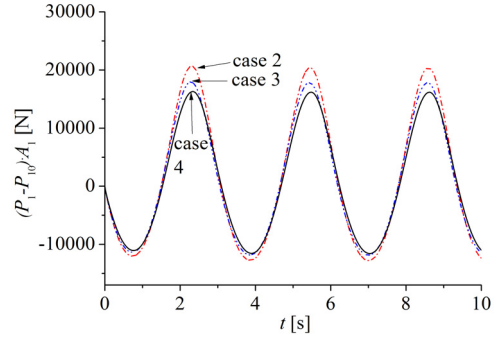


(b) Temperature

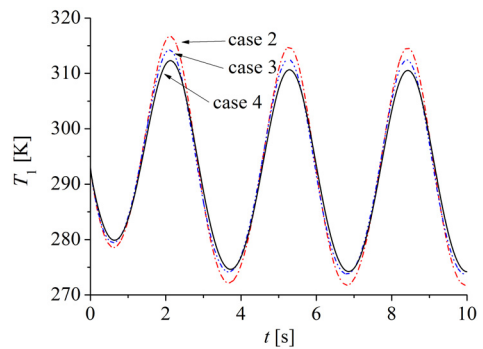
Fig. 2 Response of air spring for a step input

Fig. 3과 4는 정현파형태로 에어스프링이 변형 되었을 때 발생하는 에어스프링의 반력에 대한 계산결과를 나타낸다. 이 때 에어스프링이 변형하는 진폭은 $\pm 0.1[m]$ 로 설정하였다. Fig. 3과 4에서 보조용기 내부가 단열상태인 경우에 에어스프링

을 정현파로 가진하게 되면 에어스프링 내부 공기의 온도 및 압력이 지속적으로 증가하므로 case1은 비교대상에서 제외하였다.



(a) Reaction Force



(b) Temperature

Fig. 3 Response of air spring for a sinusoidal input (2[rad/s])

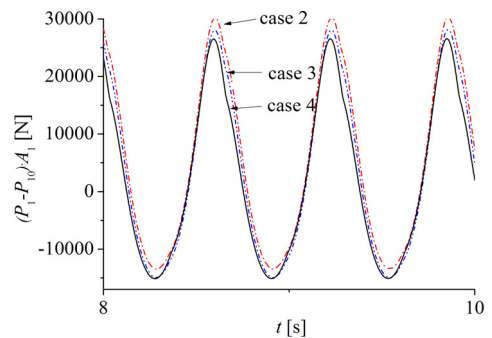
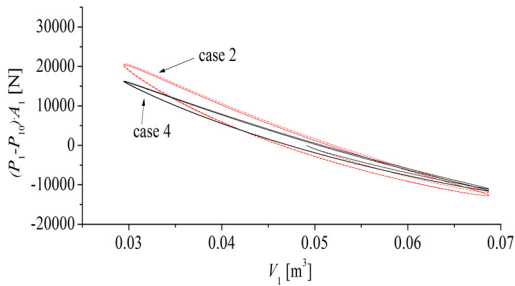


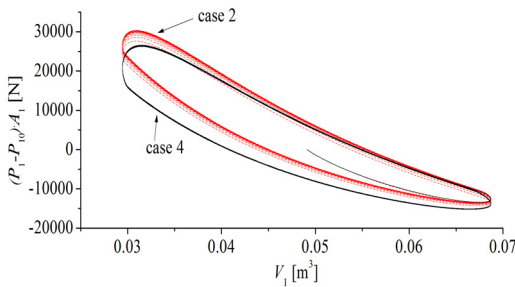
Fig. 4 Reaction force of air spring for a sinusoidal input(10[rad/s])

Fig. 3, 4에서 가진 주파수는 2[rad/s] 및 10[rad/s]로 설정하였다. 이 결과 역시 Fig. 2와 동일한 경향을 나타내고, 에어스프링에 정현파 입력이 가해질 때에도 보조용기의 에어스프링 내부 공기의 상태변화가 등온변화에 가까울수록 에어스프링의 반력이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 3(a)와 4에 나타난 결과를 정리하여 열전달특성과 가진 주파수의 변화에 의한 에어스프링 반력의 크기 변화를 비교한 결과이고, 비교를 간단히 하기 위하여 열전달특성은 case2와 case4에서 지정한 값을 대상으로 하였다. Fig. 5로부터 가진 주기가 증가하면 보조용기의 열전달특성에 관계없이 진폭이 커지지만, 가진 주기가 증가함에 따라 case2와 case4의 진폭의 차이가 감소함을 알 수 있다.



(a) frequency 2 [rad/s]



(b) frequency 10 [rad/s]

Fig. 5 Comparison of reaction forces due to excitation frequency

Fig. 3~5에 나타난 결과를 정성적으로 분석하기 위한 모델은 다음과 같이 도출할 수 있다.

에어스프링과 보조용기 내부 공기의 상태변화를 단일변화로 가정하면 에어스프링과 보조용기 내부 공기의 압력변화를 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$V_1 \frac{dP_1}{dt} = -\kappa P_1 \frac{dV_1}{dt} - \kappa G R T_1 \quad (7)$$

$$V_2 \frac{dP_2}{dt} = \kappa G R T_2 \quad (8)$$

식 (7)에서 k 는 비열비를 나타낸다. 식 (7), (8)을 선형화하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_1 s = \frac{1}{V_{10}} (\kappa P_{10} A_1 \Delta x s - \kappa \Delta G R T_{10}) \quad (9)$$

$$\Delta P_2 s = \frac{\kappa \Delta G R T_{20}}{V_{20}} \quad (10)$$

P_1 과 P_2 의 차가 작다고 가정하면 오리피스를 통과하는 유량과 오리피스 양단 압력차와의 관계를 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta G = k_p \cdot \Delta (P_1 - P_2) \quad (11)$$

식 (11)에서 k_p [kg/s/Pa]는 압력유량계수를 나타낸다.

식 (9)~(11)을 이용하면 보조용기 내부 공기의 상태변화를 단일변화로 가정했을 때의 에어스프링의 임피던스를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta F(s)}{\Delta x(s)} = \frac{K_{E1} \tau_1 s + K_{E2}}{\tau_1 s + 1},$$

$$\tau_1 = \frac{V_{10} V_{20}}{V_{10} + V_{20}} \frac{1}{\kappa k_p R T_{20}},$$

$$K_{E1} = \frac{\kappa P_{10} A_1^2}{V_{10}}, K_{E2} = \frac{\kappa P_{10} A_1^2}{V_{10} + V_{20}} \quad (12)$$

식 (12)에서 K_{E1} 은 에어스프링 시스템의 최대 스프링상수인 고주파수 대역에서의 스프링상수, K_{E2} 는 최소스프링 상수인 저주파수 대역에서의 스프링상수를 각각 나타낸다.

다음으로 보조용기 내부 공기의 상태변화를 등온변화로 가정하면 식 (8)을 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$V_2 \frac{dP_2}{dt} = GRT_2 \quad (13)$$

식 (9)~(11)과 (13)을 이용하여 에어스프링 내부 공기의 상태변화는 단열변화로, 보조용기 내부 공기의 상태변화는 등온변화로 가정한 경우의 에어스프링의 임피던스를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta F(s)}{\Delta x(s)} = \frac{K_{E3}\tau_2 s + K_{E1}}{\tau_2 s + 1},$$

$$\tau_2 = \frac{V_{10} V_{20}}{V_{10} + \kappa V_{20}} \frac{1}{\kappa k_p R T_{20}},$$

$$K_{E3} = \frac{\kappa P_{10} A_1^2}{V_{10}}, K_{E1} = \frac{\kappa P_{10} A_1^2}{V_{10} + \kappa V_{20}} \quad (14)$$

식 (14)에서 K_{E3} 는 고주파수 대역에서의 스프링상수, K_{E1} 는 저주파수 대역에서의 스프링상수를 각각 나타낸다.

식 (12)와 (14)를 비교해보면 고주파수 대역에서의 스프링상수 K_{E1} 과 K_{E3} 은 에어스프링만을 이용한 스프링상수로 표현되므로 보조용기의 열전달계수의 크기에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 반면 저주파수 대역에서의 스프링상수 K_{E2} 와 K_{E4} 는 에어스프링과 보조용기가 결합된 스프링상수로 표현되므로 보조용기의 열전달계수가 증가하면 스프링상수가 작아지고, 그 결과 에어스프링의 저주파수 대역 반력이 감소함을 알 수 있다.

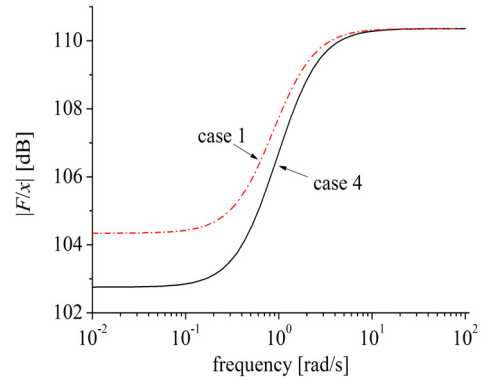
Table 3은 Table 1에 나타난 파라미터와 Table 2에 나타난 V_2 , h_2 를 이용하여 정리한 $K_{E1} \sim K_{E4}$ 를 나타낸다.

Fig. 6은 식 (12), (14)와 Table 3의 파라미터를 이용한 에어스프링 시스템의 주파수응답을 나타낸다. Fig. 6으로부터 보조용기의 열전달특성이 변하여도 최소 스프링상수와 최대 스프링상수에 도달하는 주파수는 거의 일치하지만, 열전달계수가 증가하면 저주파수 대역 스프링상수가 현저하게 감소하고 이로 인하여 고주파수 대역의 일부 영역을 제외한 전 주파수 대역에서 에어스프링 시

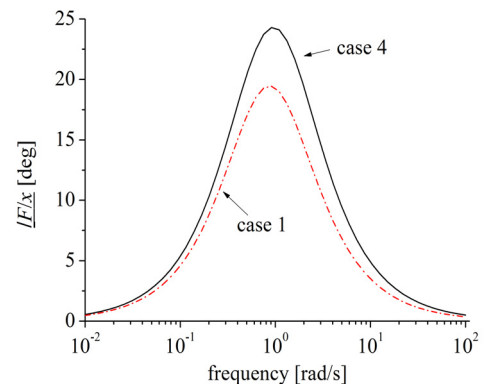
스템의 임피던스가 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 보조용기의 열전달계수를 증가시켜서 용기내부 공기의 온도변화를 가능한 작게 유지한다면 공기스프링의 반력을 최소한으로 억제할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3 Change of spring constant according to the heat transfer characteristics of the auxiliary chamber

	Max. spring constant		Min. spring constant	
case1	K_{E1} [N/m]	327984	K_{E2} [N/m]	164892
case4	K_{E3} [N/m]	327984	K_{E4} [N/m]	137410



(a) Magnitude



(b) Degree

Fig. 6 Frequency responses of air spring system

4. 결 론

본 연구에서는 보조용기가 연결된 공기스프링 시스템을 대상으로 열전달특성을 포함한 수확모델을 도출하고 보조용기의 열전달특성 변화가 공기스프링의 반력 변화와 임피던스 특성에 미치는 영향을 다양한 조건에 의한 모의시험을 통하여 분석하였다.

본 연구에서 얻어진 성과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 유량방정식과 상태방정식 및 에너지방정식을 이용하여 보조용기와 연결된 에어스프링 시스템의 수확모델을 도출하였다.

(2) 보조용기 내부의 상태변화를 등온 및 단열로 가정하여 열전달효과에 따른 에어스프링 시스템의 특성변화를 정성적으로 분석할 수 있는 선형화모델을 도출하였다.

(3) 보조용기의 열전달특성을 향상시키면 에어스프링 시스템의 저주파수 대역 스프링 상수가 감소함을 확인하였고, 이를 통하여 고주파수의 일부 대역을 제외한 전 주파수 영역에서 에어스프링의 반력이 감소하므로 외부 부하력 감쇠효과를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. N. Docquier, P. Fisetle 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. A. Alonso, J. G. Gimenez, J. Nietoc and J. Vinolasa, 2010, "Air suspension characterization and effectiveness of a variable area orifice", Vehicle System Dynamics, Vol. 48, Supplement, pp. 271-286.
4. H. J. Yang et al., 2009, "A Study for damping performance of vibration of the railway vehicle by the orifice", The Korean Society for Railway,

- Proceedings of 2009 Autumn Conference, pp. 166-171.
5. T. Fujita et al., 1997, "Affection of connecting Conduit to Characteristics of Air Spring with Subtank", Trans. of the JSME, Vol. 63, No. 610, pp. 1920-1926.
6. 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.
7. C. H. An et al., 2006, "Optimal design of air-spring and active control of vibration isolation table", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Proceedings of 2006 Spring Conference, pp. 909-914.
8. S. J. Lee, 2010, "Development and Analysis of An Air Spring Model", Int. J. of Automotive Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 471-479.
9. J. S. Jang and S. W. Ji, 2011, "Evaluation of Energy Transfer Efficiency of Pneumatic Driving Apparatus", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 95-100.