

공기스프링의 최적설계 및 방진 테이블의 능동 제어

Optimal Design of Air-spring and Active Control of Vibration Isolation Table

안채현* · 김호성** · 임광혁** · 진경복*** · 임경화†

Chae-Hun An, Ho-Sung Kim, Kwang-Hyeok Yim,

Kyong-Bok Jin and Kyung-Hwa Rim

Key Words : Active Vibration Isolation (능동 방진), Air-spring(공기스프링), AMFC(적응 모델 추종 제어), Damping(감쇠), Orifice(오리피스)

ABSTRACT

Vibration isolation tables are mostly required in precise measurement and manufacturing system. Among the vibration isolation tables, an air spring is the most favorable equipment because of low resonant frequency and high damping ratio. However, it is difficult to design the air spring with the required stiffness and damping ratio. Futhermore, whenever conventional active control methods are applied to the air spring, it may be difficult to obtain effective control performance due to high nonlinearity of air spring.

In this paper, the optimal design of the air spring is performed using genetic algorithm to bring out low resonant frequency and high damping ratio. Also, active control of the vibration isolation table with 3-DOF model is proposed using the adaptive control method. Through experiments, optimal design is shown to be effective. And performance of the proposed control method is verified to be better than those of the passive control method and the conventional active control methods.

기 호 설 명			
A_M, B_M, C_M, D_M	참조 모델의 상태방정식 매개변수	u_{P1}	플랜트의 선형 입력값
A_P, B_P, C_P, D_P	플랜트의 상태방정식 매개변수	u_{P2}	플랜트의 가변 입력값
$D_{effective}$	공기스프링의 유효 지름	α_1, α_2	AMFC의 적분 게인
D_{rod}	공기스프링의 하중판 지름	β_1, β_2	AMFC의 비례 게인
D	앞턱임 선형 보상기	ω_{target}	목표 고유 진동수
K_p, K_U, K_M	AMFC의 선형 게인	ω_{now}	현재의 고유 진동수
$\Delta K_p, \Delta K_U$	AMFC의 가변 게인	ζ_{target}	목표 감쇠비
P_{atm}	대기압	ζ_{now}	현재의 감쇠비
P_{spring}	공기스프링 내부의 압력		

1. 서 론

최근 반도체 및 디스플레이 산업 등에서 초정밀 가공, 측정 등이 필요함에 따라, 외란과 내부 진동을 차단하는 방진 시스템(vibration isolation system)에 대한 연구가 활성화 되고 있다. 이중 공기스프링은 압축 공기를 이용하여 큰 하중을 지지할 수 있으면서 상대적으로 낮은 강성으로 낮은 고유진동수를 유지할 수 있고, 오리피스(orifice)를 이용하여 감쇠를 조절할 수 있는 유리한 방진

† 책임저자, 한국기술교육대학교

E-mail : rim@kut.ac.kr

Tel : (041)560-1147, Fax : (041)560-1253

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 대학원

** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 학부생

*** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

재(vibration isolator)이다. 공기 스프링을 이용한 방진 테이블은 크게 공기스프링의 특성 분석 및 설계 기법과 제어 기법으로 나뉘어 연구되고 있다. 송진호¹⁾, 김규용²⁾ 등은 최적 제어와 피지제어 기법 등을 적용하여 방진테이블의 공기스프링에 공급되는 유량을 비례제어밸브로 능동 제어하였다. 김인수³⁾ 등은 공기스프링의 오리피스 특성을 분석하여 동특성 개선을 연구하는 한편, Erin⁴⁾은 공기스프링을 수학적으로 모델링하여 그 특성을 분석하고 실험 결과로써 모델링을 개선하였다. 또한 Hoque⁵⁾ 등은 3 자유도 방진시스템을 모델링하여 전자석을 이용하고 mode-based controller를 구현하였다. 한편, 대부분의 공압 시스템은 공기의 압축성에 기인하는 비선형적인 특성으로 인하여 제어하기 어렵다. Tressler⁶⁾ 등은 공기의 압축성을 고려한 공압 실린더의 제어 모델을 정립하였다. 또한 Painton⁷⁾은 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 비선형성이 강한 컴퓨터 제작의 최적설계 문제에 적용하였으며, Dimou⁸⁾ 등은 유전 알고리즘의 여러 매개변수를 변경시켜 가면서 트러스 구조물에 적용시켜 결과를 비교 검토하였다.

본 논문에서는 공기스프링을 모델링하여 해석적인 모델을 구성하고, 유전알고리즘을 이용하여 최적설계를 시도하였고, 또한 적응제어기법을 적용하여 방진테이블의 능동제어를 수행하였다.

2. 공기스프링의 특성 및 최적설계

2.1 공기스프링의 분석 및 모델링

(1) 공기스프링 모델

공기스프링의 구조는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 상단에서 가해지는 하중을 챔버(chamber) 안에 충전된 내부 공기 압력으로 상쇄시켜 일정한 위치를 유지할 수 있는 구조이다. 하중을 직접 받는 하중판(load-plate), 고무격막인 다이어프램(diaphragm), 두 개의 챔버 및 공기의 유동량을 조절하기 위한 오리피스로 구성되어 있다.

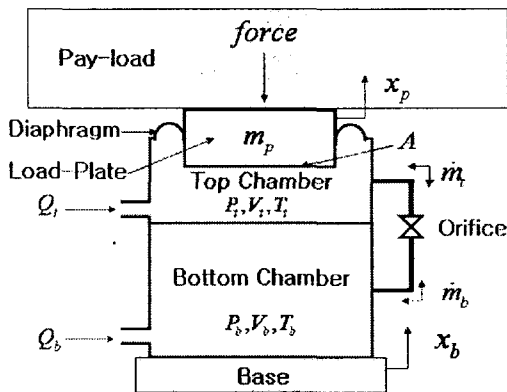


Fig. 1 Schematic diagram of air-spring

(2) 다이어프램 모델링

Fig. 1에서 나타낸 다이어프램은 압축된 공기의 유출을 차단하며 하중판의 거동을 유지하는 고무격막으로 반드시 필요한 부품이지만, 위치에 따라 형상과 강성이 변화함으로 공기 스프링의 비선형성을 가중시킨다. Fig. 2에서 다이어프램의 유효 지름(effective diameter)은 동작압력에서 하중판의 위치에 따라 비선형적으로 변화하는 특성을 가지며 그 크기는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

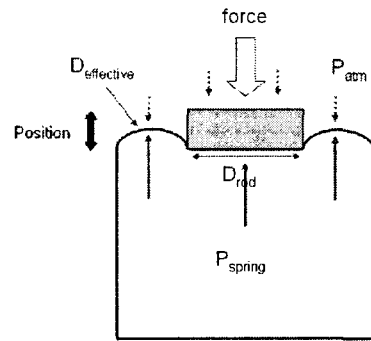


Fig. 2 Free body diagram of air-spring

$$D_{effective} = \sqrt{\frac{force - P_{atm} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{rod}^2}{\frac{\pi}{4} \cdot (P_{spring} - P_{atm})}} \quad (1)$$

따라서 공기스프링에 동작 압력을 가하고 인장압축 시험기를 이용하여, 위치를 미소하게 변화시켜 가면서 이때의 하중을 측정하고 식(1)에 의한 유효지름을 Fig. 3에 나타내었다. 유효지름은 공기스프링이 상승할수록 비선형적으로 작아지는 경향을 보임을 알 수 있다.

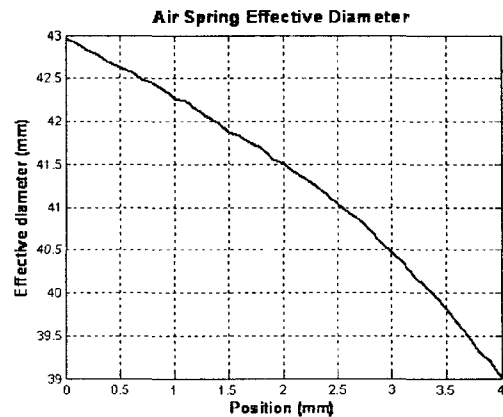


Fig. 3 Effective diameter of an air-spring

본 연구에서는 유공압 시스템의 시뮬레이션 상용 소프트웨어인 AMESim을 이용하여 시스템의 분석에 이용하였다. 해석 시 하중판의 거동이 측정된 다이어프램의 유효지름 범위를 벗어날 경우, 공기의 압축성만 고려하게 되므로 결과에 오차를 지니게 되므로 주의할 필요가 있다.

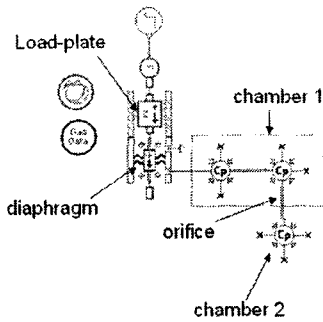


Fig. 4 Modeling of an air-spring

2.2 공기스프링의 최적설계

공기 스프링은 기본적으로 압축된 공기의 힘으로 하중을 지지하는 구조로써 공기의 압축성에 기인하는 비선형적인 영향을 받게 되므로 비선형성이 큰 시스템이 된다. 따라서 비선형시스템의 최적화에 효과적이라고 알려진 유전 알고리즘을 이용하여 공기스프링의 최적화를 시도하였다. 유전자 알고리즘은 1960년대 Holland가 제안한 최적화 방법으로 생물진화의 원리와 유전학에 바탕을 두고 있으며 Goldberg⁹⁾에 의해 구조물의 설계에 처음 적용되었다. 유전자 알고리즘은 기술기 정보를 이용하지 않으므로, 초기 값의 선정에 영향을 적게 받으므로, 전역적인 최적점(global optimum point)을 잘 구하는 것으로 알려져 있다. 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 과정은 다음과 같다. 먼저 집단수와 최대 세대수, 교배 및 돌연변이 확률을 선택하고, 초기 집단을 임의로 선택한다. 그리고 각 개체에 대해 목적함수를 평가하고, 선택, 교배, 돌연변이의 3가지 연산자를 이용하여 후손 세대를 생성한다. 이러한 과정을 해가 수렴될 때까지 반복하게 된다.

공기스프링 매개변수와 유전알고리즘의 실행 순서는 Fig. 5와 같이 공기 스프링에서 튜닝 가능한 변수는 챔버 1,2 (top, bottom chamber)의 체적, 오리피스스의 직경으로 고유진동수와 감쇠비에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 유전알고리즘의 목적함수는 식 (2)와 같이 정의 할 수 있다.

$$f(\omega, \zeta) = -(w_1(\omega_{target} - \omega_{nom})^2 + w_2(\zeta_{target} - \zeta_{nom})^2) \quad (2)$$

여기서 w_1, w_2 는 가중치이다.

유전자 알고리즘을 이용한 최적설계에 있어서 초기 설계치는 Table 1과 같이 설정하였고, 본 연구에서는 고무의 유효지름은 고정되어 있다고 가정하였으며 향후 유효지름을 고려할 예정이다. 설계변수의 범위는 민감도 분석을 통해서 얻은 값을 참조하여 고유진동수가 0.5Hz 이상이고 감쇠비가 0.001이상인 되는 범위에서 적절히 제한하였다. 집단수와 세대수가 증가할수록 최적해를 구할 확률이 증가하지만, 수치비용이 증가하므로 적절한 조절이 필요하다. 본 연구에서는 수치해석 비용을 감안하여 집단수와 세대수를 각각 500개와 200세대로 선정하여 수행하였고, 그 결과는 Table 2에 정리 하였다.

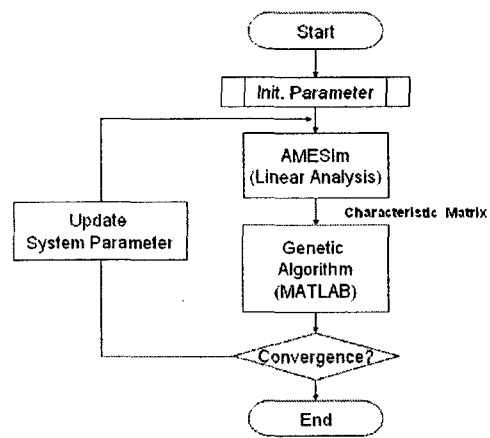


Fig. 5 Flow chart of optimization using genetic algorithm

Table 1 Initial design values for genetic algorithm

Properties	Value	Units
Mass	15	Kg
Pressure	3	bar
Rod diameter	15	mm
Effective diameter	26	mm

Table 2 Results of optimal design

Weight factor		Volume of chamber 1 (ℓ)	Volume of chamber 2 (ℓ)	Orifice diameter (mm)	Natural frequency (Hz)	Damping ratio
w_1	w_2					
1000	200	0.15	0.52	0.56	1.11	0.217
1000	500	0.17	0.62	0.53	1.09	0.162
1000	2000	0.09	0.07	0.52	0.89	0.274

결과적으로 제한된 범위 내에서 유효한 결과를 가지는 설계변수를 도출함으로써 공기 스프링의 설계에 이용 할 수 있다는 것을 확인 하였다.

3. 적응제어 기법을 이용한 방진테이블의 능동제어

3.1 제어 시스템 모델링 및 설계

기존의 수동형 방진 테이블의 제어방식은 공기스프링의 하중판에 연동하는 레벨링 밸브를 부착하여 위치에 따라 하단 챔버에 공급되는 유량을 제어하는 방식으로 일정한 위치를 유지하게 되어 있다. 이는 레벨링 밸브의 기계적인 특성에 의존하는 것으로 공기의 비선형적인 특성과 다양한 주파수로 가진되는 외란에 대응하기에는 부족한 구조이다. 본 연구에서는 빠른 응답속도와 정밀한 제어 성능을 가지고 있는 비례제어밸브를 부착하여 공기량을 적절히 제어함으로써 외란에 대하여 능동 방진시스템을 구현하였다. 방진 테이블을 Fig. 6과 같이 $z-dir, \theta_x, \theta_y$ 로 3 자유도 모델링하여 얻은 질량, 감쇠, 강성 행렬을 이용하면 식 (3),(4)와 같은 시스템을 지배하는 상태 방정식을 얻을 수 있다.

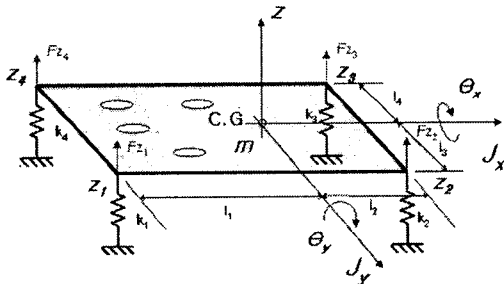


Fig. 6 Free body diagram of 3-DOF system

$$\dot{x} = A_p x + B_p u_p \quad (3)$$

$$y = C_p x + D_p u_p \quad (4)$$

방진테이블은 다자유도계 시스템이며 공기 스프링은 비선형성이 매우 크기 때문에 SISO, 선형, 시불변에 한정된 PID제어기로는 제어가 매우 어렵다. 따라서 비선형, 시변 특성에 강인한 특성을 가지는 적응제어(adaptive control)의 한 종류인 parallel AMFC (adaptive model following control) 시스템¹⁰⁾을 적용하였다. AMFC은 기준 모델(reference model)과 실제 플랜트(plant)와의 출력 차이로 오차를 정의하고, 실시간으로 게인이 조절되어 비선형 시변 시스템을 선형 시불변 시스템에 추종시켜 제어하는 특징을 가지고 있으며 그 구성은 Fig. 7과 같다.

제어 시스템의 각 요소를 상태 방정식으로 나타내면 기준 모델, 플랜트, 오차를 식(5)~(7)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\dot{x} = A_M x + B_M u_M \quad (5)$$

$$\dot{y} = A_p y + B_p u_{p1} + B_p u_{p2} \quad (6)$$

$$e = r - y \quad (7)$$

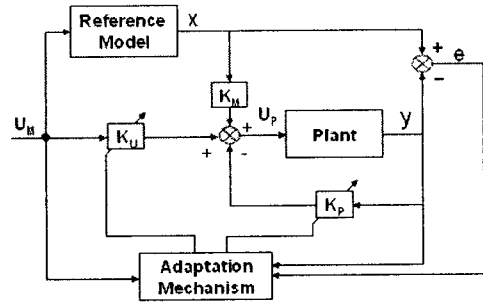


Fig. 7 AMFC block diagram

이때 플랜트의 입력을 선형 입력 u_{p1} 과 비선형 입력 u_{p2} 로 구분하면 식(8),(9)로 나타낼 수 있다.

$$u_{p1} = -K_p y + K_M x + K_U u_M \quad (8)$$

$$u_{p2} = \Delta K_p(e, t) y + \Delta K_U(e, t) u_M \quad (9)$$

따라서 제어 알고리즘은 상수 게인인 K_p, K_M, K_U 를 선정 하고, 시변 특성을 갖는 $\Delta K_p(e, t), \Delta K_M(e, t)$ 을 적절히 조절 하여 오차를 최소화 하는 것이라 할 수 있다. 전체 시스템을 출력 y 에 관하여 정리하면 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{y} = & [A_p - B_p K_p + B_p K_M + B_p \Delta K_p(e, t)] y \\ & + B_p [K_U + \Delta K_U(e, t)] u + B_p K_M e \end{aligned} \quad (10)$$

또한 전체 시스템을 오차에 관하여 정리하면 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e} = & (A_M - B_p K_M) e + [A_M - A_p + B_p (K_p - K_M) \\ & - B_p (\Delta K_p(e, t))] y + [B_M - B_p K_U - B_p \Delta K_U(v, t)] u_M \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 시스템은 완전모델 추종조건(perfect model following conditions)를 만족해야 하므로, 전체 시스템에서 식(12), (13)이 성립되어야 한다.

$$A_M - A_p + B_p (K_p - K_M) = 0 \quad (12)$$

$$B_M - B_p K_U = 0 \quad (13)$$

적용 메카니즘 (adaptation mechanism)은 Popov 적분

부등식을 이용한 초안정 이론(hyperstability theory)을 이용한다. 따라서 오차 함수를 다시 정리하여, 앞먹임(feed-forward)과 되먹임(feed-back)으로 구성되는 식(14),(15)로 나타 낼 수 있다.

$$\dot{e} = (A_M - B_p K_M)e + B_p w \quad (14)$$

$$v = De \quad (15)$$

이때, w 은 적응 메카니즘으로써 적분항과 비례항을 가지는 식(16)와 같이 정의 한다.

$$w = -wI = \left[\int \Phi_1(v, t, \tau) d\tau + \Phi_2(v, t) + \Delta K_p(0) \right] y + \left[\int \Psi_1(v, t, \tau) d\tau + \Psi_2(v, t) + \Delta K_U(0) \right] u_M \quad (16)$$

알려진 Popov 적분 부등식의 해¹⁰⁾는 각각 식(17),(18)이다.

$$\Delta K_p(e, t) = \int Fv(Gy)^T d\tau + F'v(Gy)^T + \Delta K_p(0) \quad (17)$$

$$\Delta K_U(e, t) = \int Mv(Nu)^T d\tau + M'v(Nu)^T + \Delta K_U(0) \quad (18)$$

여기에 제어기의 가중치를 조절하기 위하여 적분게인(α_1, α_2)과 비례게인(β_1, β_2)을 추가하면 적응 메카니즘은 식(19),(20)과 같이 정해진다.

$$\Delta K_p(e, t) = \int \alpha_1 Fv(Gy)^T d\tau + \beta_1 F'v(Gy)^T + \Delta K_p(0) \quad (19)$$

$$\Delta K_U(e, t) = \int \alpha_2 Mv(Nu)^T d\tau + \beta_2 M'v(Nu)^T + \Delta K_U(0) \quad (20)$$

D 는 선형 보상기로, 앞먹임 시스템을 양의 전달행렬로 유지시키는 역할을 하므로, $D = B_p^T P$ 로 정의 되며 이때 P 는 식(21)을 만족 하여야 한다.

$$(A_M - B_p K_M)^T P + A_M^T P + P A_M = -Q, Q: \text{양의 한정 행렬} \quad (21)$$

3.2 방진 테이블에 적용 및 결과

Fig. 8은 위에서 주어진 조건으로 구성된 AMFC 시스템을 나타낸 것으로, 플랜트의 입력에는 비례제어 밸브가 연결되어 있으며, 출력에는 변위센서가 부착되어 있다. 플랜트의 속도 출력을 얻기 위해서 변위 값에 LSF 관측기를 적용하였다. 향후 지반 가진에 대한 응답성을 높이기 위하여 가속도 센서를 부착할 예정이다.

플랜트의 모델은 실험적으로 얻어진 방진테이블의 고유진동수와 감쇠비를 이용하였으며, 기준모델은 시스템의 응답성을 고려하여 방진테이블보다 낮은 고유진동수와 큰 감쇠

비를 갖도록 설정하였다.

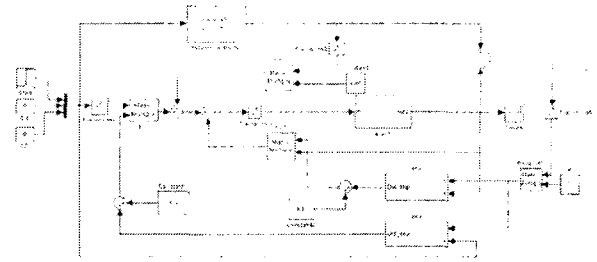
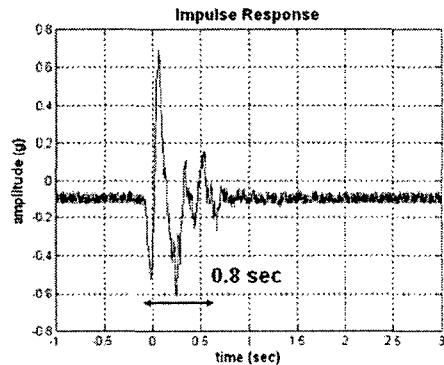
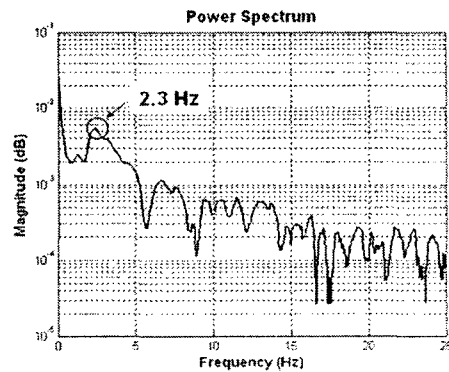


Fig. 8 Implementation of AMFC with isolation table

Fig. 9은 AMFC를 적용한 방진테이블의 충격응답과 파워스펙트럼을 보이고 있다. 또한 Table 3에서 기존에 같은 방진 테이블 시스템에 적용된 여러 제어 방법¹¹⁾과 비교하여 고유진동수와 정착시간(settling time)을 나타내었다. 본 AMFC 능동제어 방법이 수동제어(passive control) 방법 뿐만 아니라 다른 능동제어 방법에 비하여 더 낮은 고유진동수와 더 빠른 정착시간을 가져오으로써, 가장 우수한 방진 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) Impulse response



(b) Power spectrum

Fig. 9 Response of vibration isolation table with AMFC

Table 3 Results of vibration isolation table

Control method	Natural frequency		Settling time	
	(Hz)	effect (%)	(sec)	effect (%)
Passive control	4.00	0.0	1.7	0.0
Mode based control (tuning 1)	2.38	-40.5	2.0	+17.6
Mode based control (tuning 2)	3.10	-25.5	0.9	-47.5
Adaptive control (AMFC)	2.30	-42.5	0.8	-52.9

4. 결 론

다이어그램을 포함한 공기 스프링의 모델링을 수행하였으며, 비선형성이 강한 공기 스프링 시스템의 성능 향상을 위해 유전알고리즘을 이용하여 최적 설계를 수행하여 그 결과를 해석적으로 확인하였다. 그리고 비선형성이 큰 다자유도계 시스템인 방진테이블을 능동제어하기 위하여 적응제어 기법의 일종인 AMFC를 적용하였으며, 기존의 방법보다 우수한 성능을 가져옴을 실험적으로 입증하였다.

참 고 문 헌

(1) 송진호, 김규용, 박영필, 1994, "공기스프링 방진대의 능동제어", 대한기계학회논문집, 제18권 제7호 pp. 1605~1617.
 (2) 김규용, 양현석, 박영필, 1996, "H_∞ 제어를 이용한 방진대의 능동제어", 대한기계학회논문집, 제20권 제10호, pp. 3079~3094.
 (3) 김인수, 황성호, 한문성, 고철수, 2002, "멀티 오리피스를 이용한 에어스프링 동특성 개선에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회.
 (4) C. Erin, B. Wilson, 1998, "AN Improved Model of a Pnuematic Vibration Isolator: Theory and Experiment", Journal of Sound and Vibration 218(1), pp. 81~101.
 (5) Emdadul Hoque, Masaya Takasaki, Yuji Ishino, Takeshi Mizuno, 2004, "Design of a Mode-Based Controller for 3-DOF Vibration Isolation System",

Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, pp. 478~483.

(6) J. M. Tressler, T. Clement, H. Kazerooni, M. Lim, 2002, "Dynamic Behavior of Pneumatic Systems for Lower Extremity Extenders", Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 3248~3253.

(7) L. Painton, J. Campbell, 1995, "Genetic Algorithms in Optimization of System Reliability", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, No. 2, pp. 172~178.

(8) C. K. Dimou, V. K. Koumouisis, 2003, "Competitive genetic algorithms with application to reliability optimal design", Advances in Engineering Software, Vol. 34, pp. 773~785.

(9) D. E. Goldberg, 1989, "Genetic Algorithms in Search, Operation, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

(10) Landau, YoPan D, 1979, "Adaptive Control", 1979, MARCEL DEKKER, Inc.

(11) 안채현, 임광혁, 권혁진, 정진훈, 배윤화, 진경복, 임경화, 2006, "공기스프링을 이용한 방진 테이블의 능동제어", 한국소음진동공학회 춘계학술대회.