

공기스프링을 이용한 방진 테이블의 능동 제어 Active Control of Vibration Isolation Table Using Air-spring

안채현* · 임광혁** · 권혁진** · 정진훈*** · 배윤화** · 진경복*** · 임경화†
Chae-Hun An, Kwang-Hyeok Yim, Hyeok-Jin Kwon, Jin-Hoon Jung,
Yoon-Hwa Bae, Kyong-Bok Jin and Kyung-Hwa Rim

Key Words : Active Vibration Isolation (능동 방진), Air-spring(공기스프링), Pneumatic(공압), Damping(감쇠), Orifice(오리피스)

ABSTRACT

In the process of accurate manufacture and measurement, it is necessarily required to isolate external or internal vibration due to external disturbance and internal actuators. The higher vibration isolation system gets damping around resonance, the better it is generally. This paper analyzes the performance of an existing passive air-spring for vibration isolation table by using experiment and simulation. Optimal design for a passive air spring can be obtained by tuning the size of the orifice. Also design for an active isolation system is carried out by applying PID controller and considering non-linearity of pneumatic characteristics with help of look-up table. We have developed the active vibration isolation table with the better isolation performance.

기 호 설 명

A	단면적
C_r	유동 제한 상수
d	오리피스 직경
l	오리피스 길이
m_b	하단 챔버 질량 유량
m_p	페이로드 질량
m_t	상단 챔버 질량 유량
m_{tb}	오리피스 질량 유량
n	폴리트로픽 지수
P_b	하단 챔버 압력
P_t	상단 챔버 압력
Q_b	하단 챔버 공급 유량

Q_t	상단 챔버 공급 유량
R	기체 상수
V_b	아래 챔버 체적
V_t	위 챔버 체적
x_b	지반 변위
x_p	페이로드 변위
ρ	기체 밀도
μ	점도

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. 기존에 소개된 여러 방진 시스템 중에서 가장 많이 연구되는 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 방진제(vibration isolator)이다. 송진호¹⁾, 김규용²⁾ 등은 최적 제어와 피지제어 기법 등을 적용하여 방진테이블의 공기스프링에 공급되는 유량을 비례제어밸브로 능동 제어하였

† 책임저자, 한국기술교육대학교
E-mail : rim@kut.ac.kr
Tel : (041) 560-1147, Fax : (041) 560-1253

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 대학원
** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 학부생
*** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

다. 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 3자유도 방진시스템을 모델링하여 전자석을 이용하고 Mode-Based 제어를 구현하였다. 한편, 대부분의 공압 시스템은 공기의 압축성에 기인하는 비선형적인 특성으로 인하여 제어하기 어렵다. Tressler⁶⁾등은 공기의 압축성을 고려한 공압 실린더의 제어 모델을 정립하였다.

본 연구는 기존의 레벨링 밸브(leveling valve)를 이용한 수동 방진 시스템을 분석하여 이를 개선하고 능동 제어를 통해 방진 테이블 성능을 향상 시키는 데에 목적을 두었다.

2. 공기스프링의 특성 및 개선

2.1 공기스프링의 분석

(1) 공기스프링 모델 및 해석 방법

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), 고무막인 다이어프램(diaphragm), 두 개의 챔버 및 공기의 유동량을 조절하기 위한 오리피스로 구성되어 있다. 내부 공기를 이상기체, 단열, 등온 변화로 가정하면 오리피스의 질량 유량은 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. 하중 또는 지반의 가진에 의해 운동하는 하중판으로 인하여 상단 챔버의 부피가 변화하게 되고, 이 때 발생하는 오리피스 내의 유동을 층류라고 가정한다. 오리피스의 압력 손실을 식 (3)으로 가정하여 식 (4)에 대입하면, 미세 구간에서의 선형화 작업을 통하여 전체 시스템의 거동을 지배하는 운동방정식을 유도할 수 있다.⁴⁾ 식(1)~(4)에서 보는 바와 같이 오리피스에서의 공기의 유동이 시스템의 동특성에 밀접한 연관을 가지고 있음을 알 수 있다.

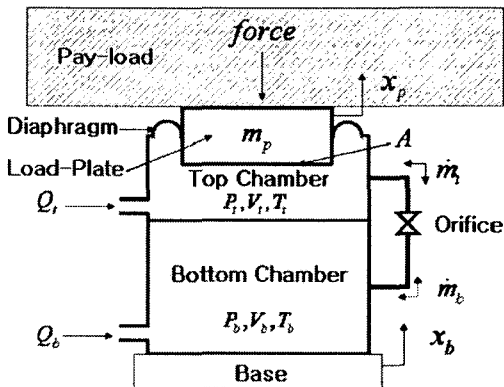


Fig. 1 Schematic diagram of air-spring

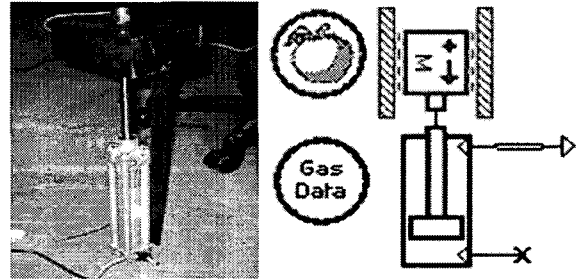
$$\dot{m}_t = \frac{1}{RT} \left[\frac{V_t}{n} \dot{P}_t + P_t \dot{V}_t \right] \quad (1)$$

$$\dot{m}_b = \frac{1}{RT} \left[\frac{V_b}{n} \dot{P}_b \right] \quad (2)$$

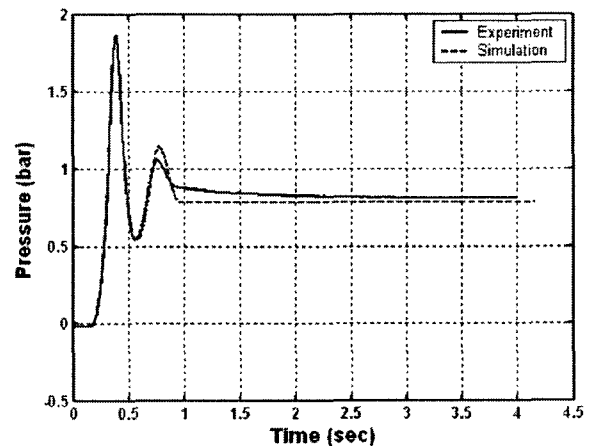
$$\dot{m}_{tb} = \rho C_r (P_t - P_b), \quad C_r = \frac{\pi d^4}{128 \mu l} \quad (3)$$

$$m_p \ddot{x}_p = F + A(P_t - P_{atm}) - m_p g \quad (4)$$

본 연구에서는 유공압 시스템의 시뮬레이션 상용 소프트웨어인 AMESim을 이용하여 시스템의 분석에 이용하였다. 프로그램을 검증하기 위해 Fig.2 (a)와 같이 일정한 질량이 부착된 공압 실린더의 하단을 막고 자중에 의한 정적 처짐을 실험하여 내부 압력의 변화를 측정하고, 같은 사양을 모델링하여 해석하고 그 결과가 거의 일치함을 확인하였다.



(a) Pneumatic cylinder and modeling with AMESim



(b) Comparison between experimental and analysis results

Fig. 2 Verification of simulation S/W

(2) 공기스프링의 민감도 분석

일반적으로 단일 챔버 공기스프링 시스템의 고유진동수는 식(5)과 같이 하중판의 면적 A의 제곱근에 비례하고 공기스프링 부피의 제곱근에 반비례하며⁷⁾, 감쇠 요소는 오리피스와 관련된 것으로 알려져 있다.³⁾

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{nAg}{V}} \quad (5)$$

방진 시스템의 일반적인 설계 기준은 고유진동수를 낮추어 방진 주파수 영역을 넓게 하고, 감쇠를 적절히 조절하여 고유진동수의 피크를 낮게 함으로써 빠른 정착시간을 갖게 함에 있다. 따라서 단면적 A는 작을수록 유리하지만 외부의 하중을 지지하기 위해서 아주 작게 설정할 수 없고, 또한 체적은 클수록 유리하지만 전체적인 크기의 증가로 한정된 공간에서 사용하기에는 무리가 있으며, 높이를 높게 할 경우 전체 시스템의 안정성을 해칠 수 있다.⁷⁾ 또한 적절한 감쇠 값을 갖게 하기 위하여 오리피스의 크기를 선정하는 것이 중요하다. 그러나 오리피스의 좁은 직경과 짧은 길이의 관로를 지나는 공기는 압축성과 챔버간의 압력차 등에 따라 큰 비선형성으로 보이기 때문에⁶⁾ 일반화된 식을 통하여 선정하기 어렵다. 따라서 오리피스와 다른 매개변수들간의 상관관계를 관찰하기 위하여 기존에 만들어진 공기스프링을 모델링하고, 오리피스의 직경을 변화시켜 가면서 시스템의 고유진동수와 감쇠의 변화를 해석적으로 구하여 민감도 분석을 수행하였다. 해석적으로 공압 시스템에는 많은 수의 고유진동수가 존재하나, 실제 시스템에 영향이 적은 공압 시스템 내부의 고유진동수는 무시하였다. 다이어그램은 하중판(load plate)의 위치와 압력에 따라 그 형상이 변화되고, 이때 격막의 강성이 비선형적으로 챔버의 압력에 영향을 줄 것으로 예

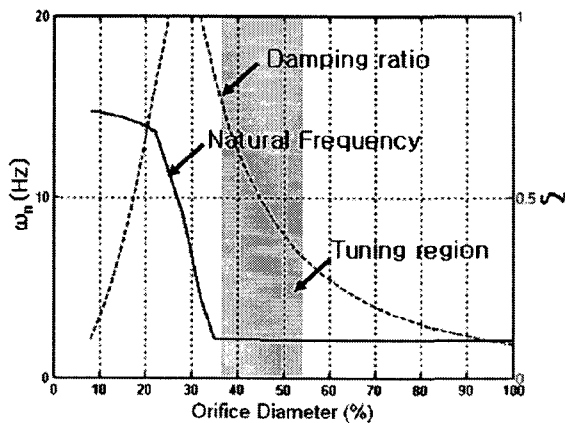


Fig. 3 Analysis of natural frequency and damping ratio

상되나, 동작점 부근의 미세한 영역에서 일정한 형상과 강성을 가지므로 고유진동수와 감쇠에 영향이 적다고 가정하여 모델링에서 제외하였다. Fig. 3에서 보이는 결과와 같이 오리피스의 직경이 작을 경우, 시스템의 전체 부피는 상단 챔버에 국한되어 고유진동수가 높게 나타나다가 오리피스가 개방됨에 따라 하단 챔버의 영향을 받아 부피가 점차 커지는 특성을 보이기 때문에, 특정한 영역에서 고유진동수가 떨어지는 현상을 보이고 있다. 또한 감쇠의 경우도 오리피스의 직경에 따라 급격히 상승했다가 다시 급격히 감소하는 성향을 관찰할 수 있다. 이는 오리피스의 직경이 작을 때는 관로내의 유속이 빠르고 큰 압력 차이를 유발하여 그 역할이 강화되다가, 특정한 천이 영역을 지나면서 압력의 차이가 급격히 감소되어 그 역할이 약화되는 것으로 예상된다. 또한 고유진동수는 낮고 감쇠비는 큰 시스템이 이상적이나 모든 조건을 만족하는 지역이 항상 존재한다는 것은 증명되지 않았다. 체적이 정해져 있는 본 시스템에서는 오리피스를 적절히 조절하여 낮은 고유진동수와 큰 감쇠를 유도할 수 있음을 알 수 있다.

2.1 공기스프링의 능동 제어 구현

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. 이에 빠른 응답속도와 정밀한 제어 성능을 가지고 있는 비례제어밸브를 부착하여 공기량을 적절히 제어함으로써 외란에 대하여 능동 방진시스템을 구현하였다. 챔버에 공기를 공급하는 경로는 상, 하단 챔버 중에 선택할 수 있지만, 하단 챔버의 경우 압력이 오리피스를 지나서 하중이 직접 작용하는 상단 챔버로 이동해야 하기 때문에 위상 지연 등 제어 특성에 나쁜 영향을 줄 것으로 예상되어 상단 챔버에 비례제어밸브를 부착하였다. 제어 목표는 페이로드의 자중에 의한 정적 처짐 위치를 유지하는 적절한 압력설정이다. 따라서 Fig. 4에 보인 바와 같이 하중판과 상단 챔버에 각각 위치센서와 압력센서를 설

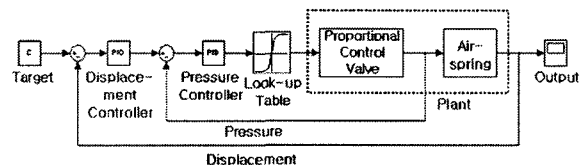


Fig. 4 Block diagram of air-spring control system

치하고, 내부 루프에는 챔버 내의 압력을 되먹임 받는 압력 제어기와 바깥 루프에는 로드플레이트의 위치를 되먹임 받는 위치 제어기로 구성된 이중 루프의 제어 구조로 구성하였다. 한편 비례제어벨브에 입력되는 전압과 측정되는 공기스프링의 압력은 공기의 압축성에 기인하여 선형성을 기대하기 어렵다. 때문에 이를 보정하도록 입력 전압과 시스템의 출력 압력 관계를 실험하여 작성한 룩업(look-up) 테이블을 적용하였다. 제어기는 보편적으로 많이 사용되는 PID제어기를 사용하였으며, 게인 튜닝은 Ziegler-Nichols 튜닝규칙을 기준으로 적절히 수행하였다.

2.3 방진 테이블 모델링 및 능동 방진의 구현

(1) 방진테이블의 모델링

방진 테이블 시스템의 동적 거동을 예측하기 위하여 상용 강체 해석 프로그램인 Visual Nastran을 사용하여 Fig. 5과 같이 z-dir과 Roll(θ_y), Pitch(θ_x)의 3자유도로 모델링 하였고, 각각의 모서리부에 구동기(actuator)로 공기스프링을 위치시켰다. 그러나 테이블을 지지하는 공기스프링은 4개이므로 과도 구속(over constrain)되어 시스템의 안정성을 해치는 것을 방지하기 위하여 공기스프링 2개에 공기를 공급하는 관로를 연결시켜 함께 동작하도록 구현한다.⁷⁾

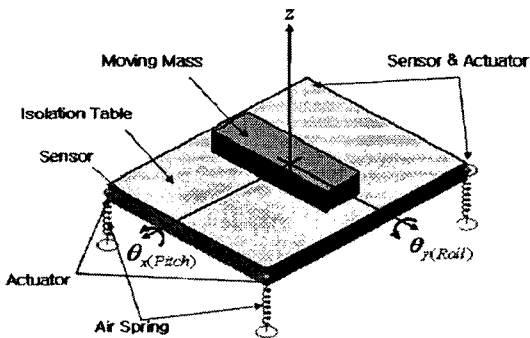


Fig. 5 Active vibration isolation system model

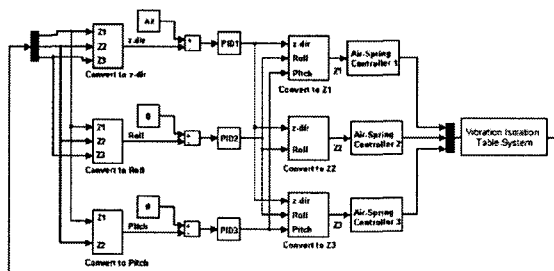
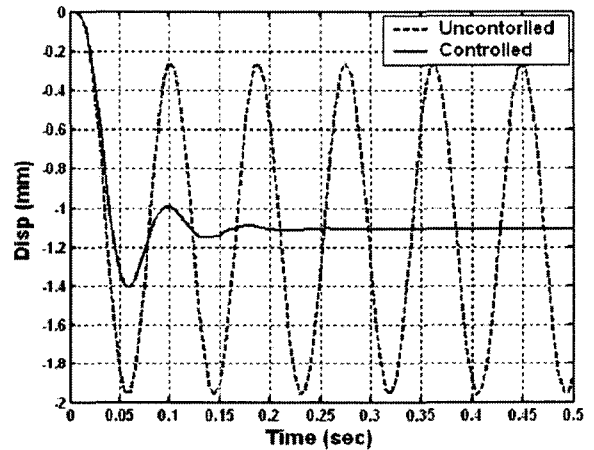


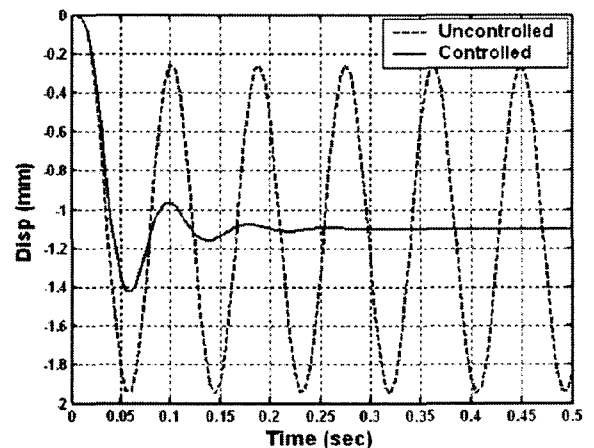
Fig. 6 Block diagram of mode-based control system

(2) 전체 제어 시스템의 구성

다자유도 시스템의 제어를 Mode-based 제어기⁵⁾로 구현하기 위하여, Fig. 6과 같이 공기스프링의 모서리부에 부착된 위치센서로부터 얻은 위치 값과 기하학적인 형상을 고려하여 무게 중심을 기준으로 각각 정해진 자유도의 변위로 분리하였다. 각각의 자유도에는 PID제어기를 부착하여 정해진 위치를 유지하도록 하게 하였으며, 생성된 제어신호는 다시 각각의 공기스프링의 운동거리로 환산된다. 설계된 제어 시스템 검증용을 위하여 작은 감쇠와 선형 스프링으로 모델링된 테이블과 Matlab으로 꾸며진 제어기를 연동하여 초기위치에 의한 해석 결과를 Fig. 7 (a)에 나타내었다. 또한 방진 테이블의 성능과 제어기의 강인성을 검증하기 위해 테이블 위에 전체 질량의 10%에 해당되는 추가질량을 부착하고 급속으로 이동하여 끝단에



(a) Impulse response



(b) Impulse response with moving mass

Fig. 7 Comparison between uncontrolled and controlled with moving mass

정지시켜 가진하였다. 그 결과 Fig. 7 (b)에 나타난 것처럼 제어를 하지 않았을 때에 비하여 제어했을 때 방진효율이 크게 향상되었음을 알 수 있었다.

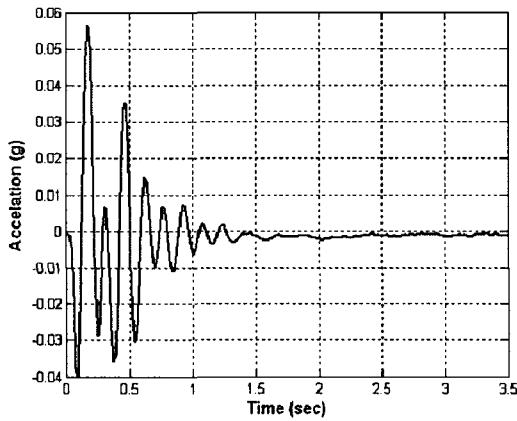
3. 실험 결과

기존의 수동형 방진 테이블을 z-dir 방향으로 임펄스를 가진하고 그 가속도를 측정하여 임펄스 응답과 그의 파워스펙트럼을 Fig. 8에 나타내었다. 임펄스 응답의 경우, 레벨링 밸브가 제어동작을 하고 있지만, 감쇠가 작아서 시스템의 정착시간이 긴 것을 알 수 있고, 고유진동수가 4 Hz와 커플링 된 것으로 보이는 6.25Hz가 나타나고 있다. Fig. 9은 설계된 능동 방진 제어기를 같은 시스템에 적용하고 유사한 조건에서 실험한 결과이다. 의도한 바와 같이 고유진동수가 2.38Hz정도로 40% 정도 낮아져 수동

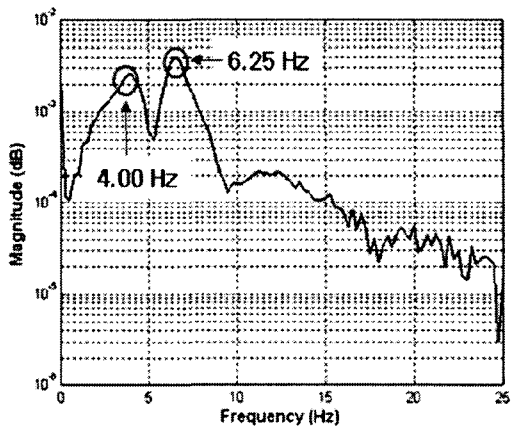
식 시스템에 비하여 방진성능이 매우 우수해졌고, 감쇠 또한 증가하여 임펄스 응답의 경우 정착시간이 단축되었다. 또한 커플링 모드의 고유진동수의 피크가 매우 낮아졌음을 알 수 있다.

4. 결론

수치해석과 실험을 이용하여 기존의 수동형 방진 스프링을 분석하여 설계방법을 제시하였다. 또한 능동 방진 테이블의 성능을 분석하여, 적절한 제어기를 설계함으로써 수동형 방진시스템보다 더 좋은 방진성능을 얻을 수 있었다. 추후 PID 제어기뿐만 아니라 다양한 제어방법을 적용하여 성능을 확인할 계획이다.

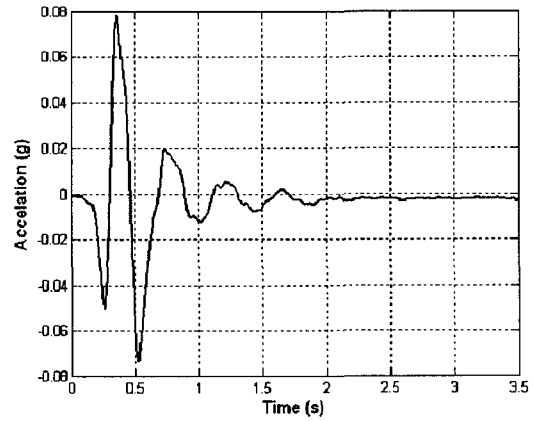


(a) Impulse Response (z-dir)

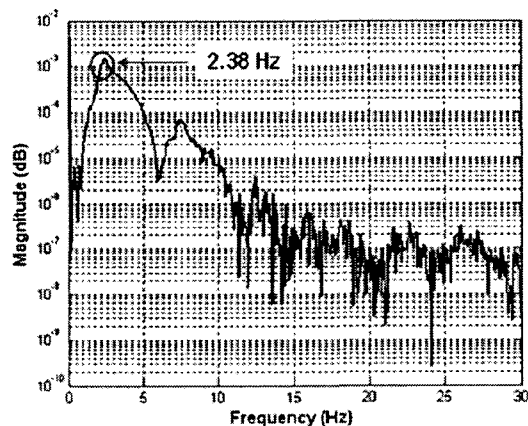


(b) Power spectrum (z-dir)

Fig. 8 Response of passive control system



(a) Impulse response (z-dir)



(b) Power spectrum (z-dir)

Fig. 9 Response of active control system

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", 소음·진동 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) Technical Background, TMC Co., USA.