

공기스프링을 이용한 방진테이블의 능동 제어[#]

Active Control of Vibration Isolation Table Using Air-spring

안 채 현* · 임 광 혁** · 진 경 복*** · 임 경 화†

Chae-Hun An, Kwang-Hyeok Yim, Kyong-Bok Jin and Kyung-Hwa Rim

(2006년 6월 19일 접수 ; 2007년 6월 21일 심사완료)

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_p : 하중판 질량
 \dot{m}_b : 하단 챔버 질량 유량
 \dot{m}_t : 상단 챔버 질량 유량
 \dot{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 : 하중판 변위
 ρ : 기체 밀도
 μ : 점도

† 교신저자 : 정회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부
E-mail : rim@kut.ac.kr

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

* 정회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부대학원

** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

*** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

이 논문은 2006 춘계학술대회에서 우수논문으로 추천 되었음.

1. 서 론

최근 반도체 및 디스플레이 산업 등에서 초정밀 가공, 측정 등이 필요함에 따라, 외란과 내부 진동을 차단하는 방진시스템(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 방진재(vibration isolator)이다. 송진호⁽¹⁾, 김규용⁽²⁾ 등은 최적 제어와 퍼지제어 기법 등을 적용하여 방진테이블의 공기스프링에 공급되는 유량을 비례제어밸브로 능동 제어하였다. 김인수⁽³⁾ 등은 공기스프링의 오리피스 특성을 분석하여 동특성 개선을 연구하는 한편, Erin⁽⁴⁾은 공기스프링을 수학적으로 모델링하여 그 특성을 분석하고 실험 결과로써 모델링을 개선하였다. 또한 Hoque⁽⁵⁾ 등은 3자유도 방진시스템을 모델링하여 전자석을 이용하고 mode-based 제어를 구현하였다. 한편, 대부분의 공압 시스템은 공기의 압축성에 기인하는 비선형적인 특성으로 인하여 제어하기 어렵다. Tressler⁽⁶⁾ 등은 공기의 압축성을 고려한 공압 실린더의 제어 모델을 정립하였다.

이 연구는 기존의 레벨링 밸브(leveling valve)를 이용한 수동 방진시스템을 분석하여 이를 개선하고 능동 제어를 통해 방진테이블 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 충

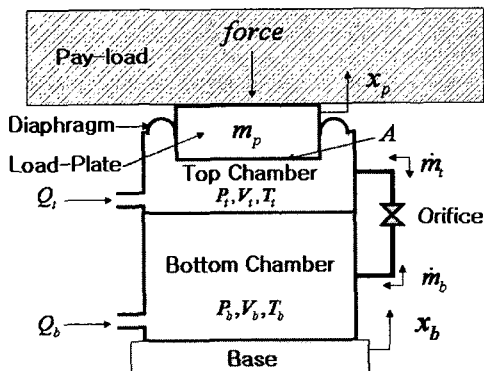


Fig. 1 Schematic diagram of air-spring

진된 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. 내부 공기를 이상기체, 단열 등은 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, 이때 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.

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

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

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

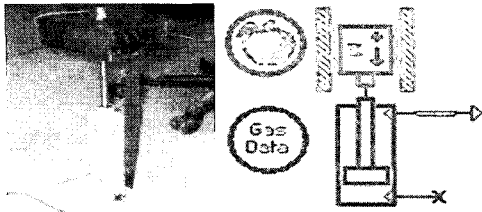
$$m_p \ddot{x}_p = F + (P_t - P_{atm})A - m_p g \quad (4)$$

이 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.

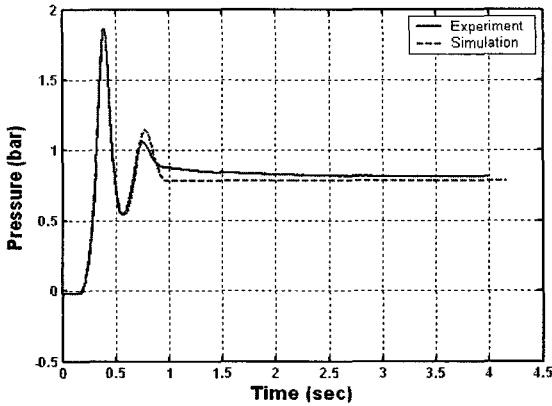
(2) 공기스프링의 민감도 분석

일반적으로 단일 챔버 공기스프링 시스템의 고유진동수는 식 (5)와 같이 하중판의 면적 A의 제곱근에 비례하고 공기스프링 부피의 제곱근에 반비례하며⁽⁷⁾, 감쇠 요소는 오리피스와 관련된 것으로 알려져 있다⁽³⁾.

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



(a) Pneumatic cylinder and modeling with AMESim



(b) Comparison between experimental and analysis results

Fig. 2 Verification of simulation S/W

방진시스템의 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 오리피스 크기를 선정하는 것이 중요하다. 그러나 오리피스의 좁은 직경과 짧은 길이의 관로를 지나는 공기는 압축성과 챔버간의 압력차 등에 따라 큰 비선형성으로 보이기 때문에⁽⁶⁾ 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 공압시스템에는 많은 수의 고유진동수가 존재하나, 실제 시스템에 영향이 적은 공압시스템 내부의 고

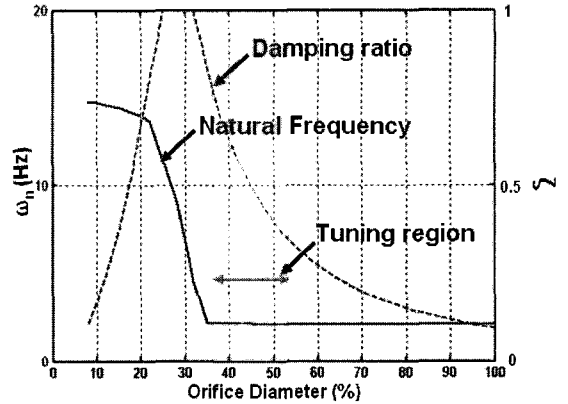


Fig. 3 Analysis of natural frequency and damping ratio with variation of orifice diameter

유진동수는 무시하였다. 다이어그램은 하중판(load plate)의 위치와 압력에 따라 그 형상이 변화되고, 이때 격막의 강성이 비선형적으로 챔버의 압력에 영향을 줄 것으로 예상되나, 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 이 시스템에서는 오리피스를 적절히 조절하여 낮은 고유진동수와 큰 감쇠를 유도할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 공기스프링의 능동 제어 구현

기존의 수동형 방진테이블의 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 설치하고, 내부 루프에는 챔버 내의 압력을 되먹임 받는 압력 제어기와 바깥 루프에는 하중판의 위치를 되먹임 받는 위치 제어기로 구성된 이중 루프의 제어 구조로 구성하였다. 한편 비례제어밸브에 입력되는 전압과 측정되는 공기스프링의 압력은 공기의 압축성에 기인하여 선형성을 기대하기 어렵다. 때문에 이를 보정하도록

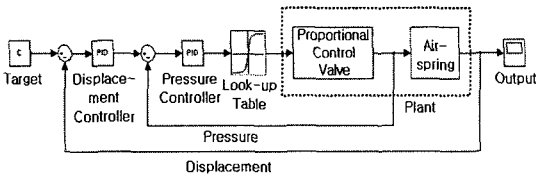


Fig. 4 Block diagram of air-spring control system

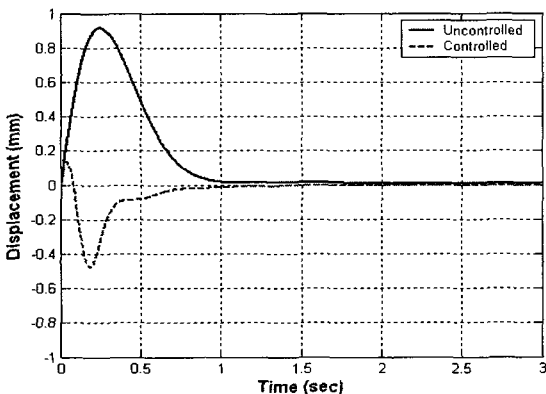


Fig. 5 Comparison between uncontrolled and controlled air-spring system with impulse response

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. Fig. 5는 튜닝된 공기스프링과 이에 제어기를 적용한 시스템의 충격 응답을 나타내었다. 튜닝된 공기스프링이 높은 감쇠비를 가짐과 이에 설계된 제어기를 적용하여 능동제어 함으로써 작은 응답 크기와 짧은 정착시간을 보임으로 우수한 방진효과가 구현되었음을 알 수 있다.

2.3 방진테이블 모델링 및 능동 방진의 구현

(1) 방진테이블의 모델링

방진테이블 시스템의 동적 거동을 예측하기 위하여 테이블을 상용 강체 해석 프로그램인 Visual Nastran을 사용하여 Fig. 6과 같이 z-dir과 Roll(θ_y), Pitch(θ_x)의 3자유도로 모델링 하였고, 각각의 모서리부에 공기스프링을 위치시켰다. AMESim으로 모델링된 공기스프링 시스템은 실린더, 챔버, 오리피스, 비례제어밸브로 구성되어 있으며 강체 해석 프로그램과 연성시켜 각각의 지지점에서 변위와 속도 값을 입력 받아 공기스프링 내의 압력을 해석하고, 이때 구해진 힘을 다시 테이블의 거동 해석에 적용되는 구조로 구성하였다. 이때 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⁾.

(2) 전체 제어 시스템의 구성

다자유도 시스템의 제어를 mode-based 제어기⁽⁵⁾로 구현하기 위하여, Figs. 6, 7과 같이 공기스프링의 모서리부에 부착된 위치센서로부터 얻은 위치 값과

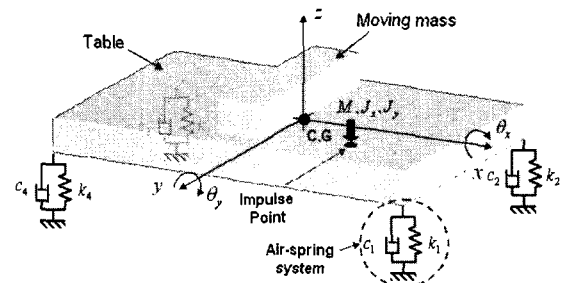


Fig. 6 Active vibration isolation system model

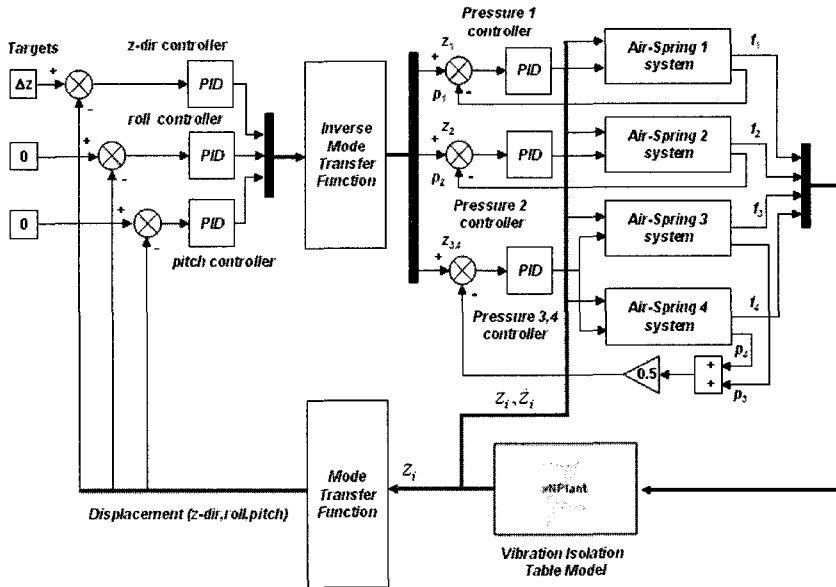


Fig. 7 Block diagram of mode-based control system

기하학적인 형상을 고려하여 무게 중심을 기준으로 각각 정해진 자유도의 변위로 분리하는 모드 변환 함수를 구성하였다. 각각의 자유도에는 PID제어기를 부착하였고 각각의 자유도에 대한 목표값은 제어하지 않았을 때 안정한 정적 처짐 상태에서의 값으로 설정함으로써 외란에 대하여 원래 상태의 위치를 유지하도록 하게 하였으며, 생성된 제어신호는 다시 역모드 변환 함수를 이용하여 각각의 공기스프링의 운동거리로 환산되어 각각의 공기스프링에 부착된 압력 제어기로 전달된다. 설계된 제어 시스템 검증 을 위하여 튜닝된 공기스프링 모델이 적용된 테이블 과 Matlab으로 꾸며진 제어기를 연동하여 정상상태 에서 테이블의 x, y방향으로 각각 1/4선의 교차점에 테이블 하중의 1/10에 해당하는 충격을 가하고 그 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 시스템은 큰 감쇠와 짧은 정착시간을 가짐으로 방진에 매우 효율 적임을 알 수 있다. 또한 z-dir 방향 제어기의 P계 인을 조절하여 그 결과를 비교하였다. P계인이 클수 록 피크가 작아지지만 시스템의 진동이 커지는 경향 을 보인다. 이는 P계인이 클수록 진동에 대한 제어 력이 커져서 피크가 줄고 고유진동수를 올리는 효과 를 보이지만 이에 따라 공기스프링에 급격한 공기 유동의 변화를 유발하므로 비선형적인 영향이 커지 는 것으로 예상된다. D계인 또한 피크의 높이와 시 스템의 안정성, 정착시간에 많은 영향을 미친다.

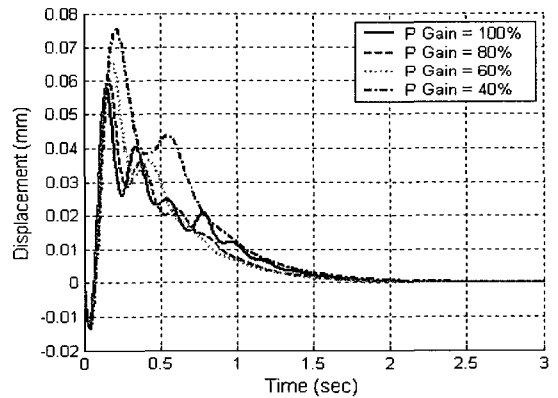


Fig. 8 Impulse response of active vibration isolation system

따라서 이 시스템은 제어기 게인값의 튜닝에 따라 고유진동수와 정착시간, 시스템 안정성에 많은 영향 을 받음을 알 수 있다.

3. 실험방법 및 결과

3.1 실험장치의 구성

실험 장치는 Fig. 9와 같이 공기스프링 4개로 지 지된 테이블은 이송이 가능한 추가질량이 부착되어 있으며 공기스프링에는 각각의 압력 센서와 변위 센 서가 부착되어 있고 컨트롤 박스내의 비례제어밸브 로부터 제어된 압축공기를 공급받아 동작하게 된다.

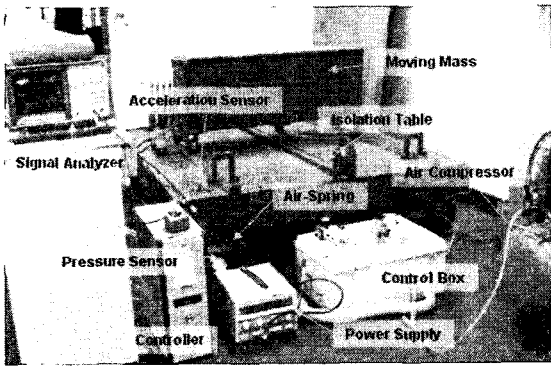


Fig. 9 Experimental setup for active vibration isolation table using air-spring

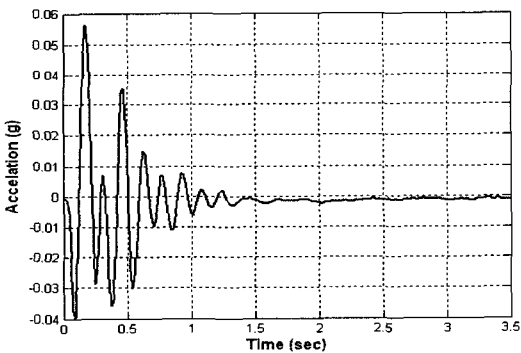
Table 1 Result of experiments

Control method	Natural frequency		Settling time	
	(Hz)	Effect	(sec)	Effect
Passive	4.00	0 %	1.7	0 %
Active (tuning 1)	2.38	-40.5 %	2.0	+17.6 %
Active (tuning 2)	3.10	-25.5 %	0.9	-47.5 %

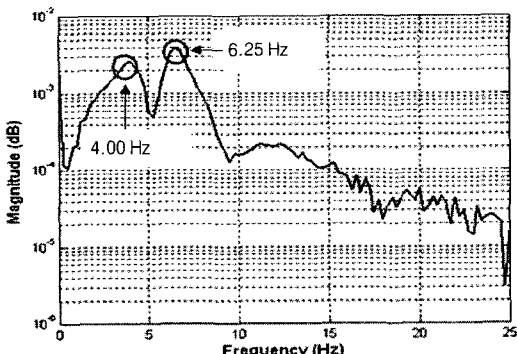
컨트롤러는 PC와 DAQ 보드로 구성된 시스템으로 제어 알고리즘은 Matlab을 이용하여 구현되었다. 또한 z-dir 방향으로 가속도 센서를 부착하고 신호분석기를 통하여 그 결과를 측정하여 게인 튜닝에 이용하였다.

3.2 실험 결과 및 분석

기존의 수동형 방진 테이블을 z-dir 방향으로 충격을 가진하고 그 가속도를 측정하여 충격 응답과 그의 파워스펙트럼을 Fig. 10에 나타내었다. 충격 응답의 경우, 레벨링 밸브가 제어동작을 하고 있지만, 감쇠가 작아서 시스템의 정착시간이 긴 것을 알 수 있다. 또한 고유진동수가 z-dir 모드의 4.00 Hz가 나타나고 있으며, 수동식 제어기는 각각의 공기스프링 하나에 대해서만 동작하므로 전체 시스템의 연성 관계를 고려하지 못하여 커플링 된 Roll 모드의 6.25 Hz가 크게 나타나고 있다. 설계된 능동 방진 제어를 적용하여 실험을 수행함에 있어 고유진동수의 감소(tuning 1)와 정착시간의 감소(tuning 2)라는

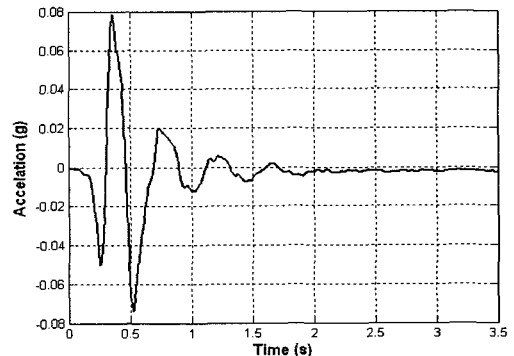


(a) Impulse response(z-dir)

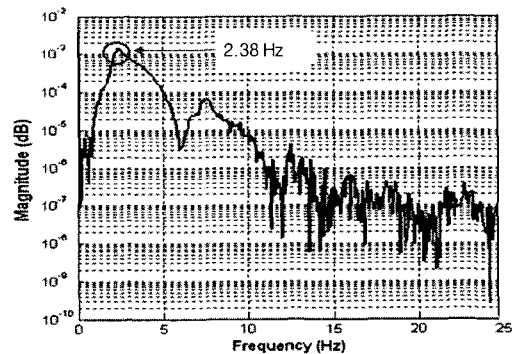


(b) Power spectrum(z-dir)

Fig. 10 Response of passive control system

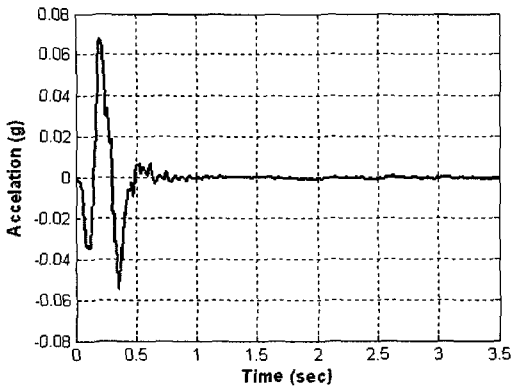


(a) Impulse response(z-dir)

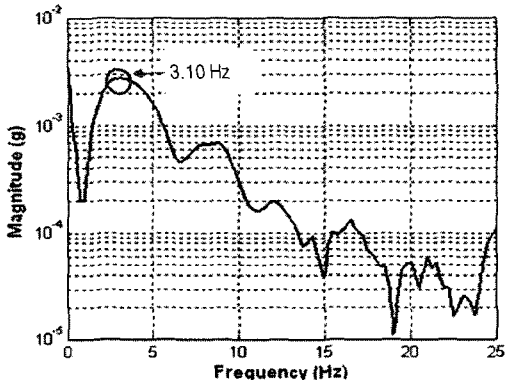


(b) Power spectrum(z-dir)

Fig. 11 Response of active control system(tuning 1)



(a) Impulse response(z-dir)



(b) Power spectrum(z-dir)

Fig. 12 Response of active control system(tuning 2)

두 가지 측면에서 실험적인 방법으로 게인 튜닝을 실시하였다. 또한 수동식 제어기 시스템과 유사한 조건에서 실험하여 그 결과를 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었고, Table 1에 결과를 정리하였다. 해석 결과와 다소 차이를 보이는 이유는 제어기 게인 값의 차이와 미세한 차이에 큰 특성 변화를 보이는 오리피스 튜닝의 어려움, 공기스프링이 가지고 있는 다이어프램의 비선형적 거동 등을 들 수 있다. 튜닝 1의 경우 Fig. 11에서 보는바와 같이 고유진동수가 2.38 Hz로 약 40.5% 감소하고 커플링 모드가 크게 줄어드는 우수한 효과를 보였으나, 정착시간은 약 17.6% 증가하였다. 이는 넓은 방진영역을 가짐으로써, 일정한 주기로 진동하는 시스템의 방진에 유리할 것으로 예상된다. 튜닝 2의 경우는 Fig. 12에서 정착시간이 47.5% 감소하는 우수한 성능을 보이고 고유진동수는 25.5% 감소하는 효과를 보였다. 따라서 이송과 정지를 반복하는 시스템의 방진에 유리할 것으로 예상된다.

4. 결 론

수치해석과 실험을 이용하여 기존의 수동형 방진 스프링을 분석하여 설계방법을 제시하였다. 또한 능동 방진 테이블의 성능을 분석하여, 적절한 제어를 설계함으로써 수동형 방진시스템보다 더 좋은 방진성능을 얻을 수 있었다. 추후 공기스프링의 다이어프램을 모델링에 포함하여 해석의 정확도를 높이고, PID 제어기뿐만 아니라 다양한 제어방법을 적용하여 성능을 확인할 계획이다.

참 고 문 헌

- (1) Song, J.-H., Kim, K.-Y. and Park, Y.-P., 1994, "Active Control of Air-spring Vibration Isolator", Transactions of KSME Vol. 18, No. 6, pp. 1605~1617.
- (2) Kim, K. Y., Yang, H. S. and Park, Y. P., 1996, "Active Control of Isolation Table Using H ∞ Control", Transactions of KSME, Vol. A20, No. 10, pp. 3079~3094.
- (3) Kim, I. S., Hwang, S. H., Han, M. S. and Koh, C. S. 2002, "The Study on the Improvement of Dynamic Characteristics with Multi-orifice in Airspring", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference. pp. 97~103.
- (4) Erin, C., Wilson, B., 1998, "AN Improved Model of a Pnuematic Vibration Isolator: Theory and Experiment", Journal of Sound and Vibration Vol. 218, No. 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) Tressler, J. M., Clement, T., Kazerooni, H., Lim, M., 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.