

방진설계에 있어서 능동제어기법의 활용

박 영 필

Application of Active Control Schemes to Vibration Isolator Design

Young-Pil Park



- 박영필(연세대학교 기계공학과)
- 1948년생
- 탄성구조물의 안정성 및 진동제어를 전공하였으며, 미사일이나 로켓 등의 동적 안정성, 진동의 능동제어, 로봇이나 고속용 압축기의 진동해석 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

진동제어분야에 있어서 방진문제는 종래부터 그 중요성이 강조되어 왔으며 주요 관심분야 중의 하나였다. 중요성의 인식은 문제의 해결을 위한 노력을 수반하였고, 따라서 방진에 필요한 재료의 개발뿐만 아니라 능동제어 기법이 도입되어 괄목할 만한 발전을 이루어왔다. 방진기술의 필요성은 근년에 이르러 초정밀을 필요로 하는 측정분야, 생산기술의 발달과 더불어 이를 뒷받침하는 필수적인 기술로서 자리잡게 되었다.

방진설계는 진동원으로부터 차단시키기 위한 재료의 선정에서부터 비롯된다. 또한 방진재료 자체의 단점을 보완하기 위한 기술도 고려하게 되었다.

생산설비에 있어서 각종 기계장비는 그 특성상 진동 가진원으로서 작용한다. 그러므로 그 영향에 의하여 제품의 정밀도 저하, 더 나아가 생산성의 저하를 초래할 수 있다. 특

히 반도체 제조공정과같이 종래에는 진동에 의한 영향 고려가 미진하였던 분야에 있어서 방진기술은 새로운 문제점으로 부각되고 있다.

방진은 일반적으로 스프링, 감쇠기와 같은 수동요소를 이용하여 설계단계에서 적절히 선정하여 계를 구성하는 수동방진(passive vibration isolation), 계의 상태에 따라 감쇠기 등이 적절히 변화할 수 있도록 하는 반능동방진(semi-active vibration isolation) 그리고 부가적인 작동기를 이용하여 진동계에 외력을 가함으로써 적극적으로 진동을 억제하는 능동방진(active vibration isolation)으로 분류할 수 있다. 수동방진의 경우 비용면에서 큰 장점을 갖고 있지만, 방진성능이 진동계의 변수에 의해 한정되므로 방진효과는 제한적일 수 밖에 없다. 따라서 방진재료의 개발만이 수동방진 성능향상에 기여할 수 있다. 반능동방진은 에너지의 소모 및 안정성에 있어서 장점은 있지만 성능향상에는 제한이 따른다. 한편 작동기력을 이용하는 능동

방진은 제어기의 설계에 따라 높은 방진성능을 얻을 수 있다. 이에 대한 연구는 철도차량과 자동차의 주행 안정성과 승차감을 높이는 분야를 중심으로 연구되어 왔으며, 최근에는 초정밀 측정 및 가공 특히 반도체 제조 공정 그리고 광학, 레이저 같은 분야에서도 방진의 중요성이 크게 대두되어 활발히 연구되어 왔다. 이와 같은 방진분야의 대표적인 연구결과를 살펴보면 다음과 같다. 1969년 Schubert⁽¹⁾는 유압장치를 이용한 1자유도 진동계의 능동제진에 대한 이론을 확립하고 실험을 통하여 제진효과를 확인하였다. 1974년 Karnopp⁽²⁾는 반능동식 제진이론을 제시하여, 바다가진을 받는 1자유도 진동계에 적용하여 능동제진과 유사한 제어성능을 얻었다. 또한 1990년 Hong Su⁽³⁾는 전자기력 작동기를 1자유도 진동계에 적용, 수치해석을 통하여 연구하였다.

방진 재료에 대한 연구결과로서 공기스프링이 개발되어, 코일스프링, 방진고무 등을 대신하게 됨으로써 방진재료는 이 분야에 있어서 큰 발전을 이루었다. 공기스프링을 이용한 방진대의 장점으로 진동계의 고유진동수를 대폭 낮출 수 있으므로 진동전달률 측면에서 성능향상을 가져온다. 그러나 단점으로 지적되는 사항으로서, 강성이 작은 관계로 외란에 대해서 쉽게 진동할 소지가 있다. 그러므로 공기스프링 방진대에 대한 능동제어 연구결과가 많이 발표되었다. 1972년 이후 巖田義明⁽⁴⁻⁷⁾은 압력제어밸브를 작동기로 사용하여 최적제어 알고리즘을 통한 공기스프링 방진대의 능동제어를 수행한 다수의 연구논문을 발표하였고, 1985년 Takagami⁽⁸⁾은 공압실린더를 작동기로 사용하여 1자유도 능동형 방진시스템을 구성하였다. 1922년 鎌田 澈⁽⁹⁾은 보이스코일모터(voice coil motor)를 작동기로서의 능동제어를 연구하였고, 또한 Ohshio⁽¹⁰⁾은 서보밸브를 이용한 능동제어시스템을 개발하였다. 1994년 박영필⁽¹¹⁾은 바다가진을 받는 1자유도

진동계에 대하여 최적제어, 피드포워드제어, 적응제어, 퍼지제어를 적용하여 능동제진에 대한 연구결과를 발표하였고, 또한 박영필⁽¹²⁾은 공기스프링 방진대의 공기압제어를 통한 능동방진 연구결과를 발표하였다.

2. 능동제어기법

동역학을 포함하는 운동계에 있어서 능동제어기법의 도입을 대상으로 하는 계가 원하는 운동특성을 갖기에는 부족함이 있고 또한 그 자체의 특성으로 인하여 도저히 이를 수 없는 동작을 원할 때, 제어기를 포함한 수정된 계를 구성하여 다양한 목적을 수행하고자 함에서 비롯되었다.

일반적으로 제어에는 귀환(feed back)제어와 피드포워드(feed forward)제어로 구분되는데, 후자의 경우 특수한 경우를 제외하면, 제어계의 상태에 대한 정보가 없이는 제어가 이루어지지 않으므로 독립적으로 사용되기 어려운 점이 있다. 그러므로 피드포워드제어는 귀환제어와 혼합되어 사용되며 따라서 귀환제어의 한 종류로 축소시켜 생각할 수 있다.

능동제어의 초기단계로는 단일입출력계의 전달함수를 대상으로 한 고전제어(classical control)를 기초로 제어이론은 지속적인 발달을 거듭하여, 1950년대에 이르러 체계화되었다. 이러한 고전제어 기법은 계의 주파수 영역에서의 입출력에 의해서 그 관계가 명확히 기술되므로 제어대상을 다루는데 있어서 잘 정형된 제어이론을 구축할 수 있었다. 즉 근궤적 선도(root locus), 나이퀴스트 선도(nyquist chart), 보데 선도(bode diagram) 등의 방법을 통하여 어느 방법이든 제어기의 성능을 평가하고 제어된 계에 있어서의 동특성 또한 평가가 가능하다. 그러나 제어대상이 다변화되어 더 이상 단일입출력 관계로는 제어대상을 묘사함에 있어서 부족함이 생기게 되어, 1960년대 이후 다입

력-다출력관계에 대한 상태공간론에 기초를 둔 현대제어이론(modern control theory)이 등장하였다. 이러한 현대제어이론에서는 다변수를 고려한 제어기의 설계가 가능하므로 제어대상이 이전에 비하여 펍 넓어졌다. 그러나 제어대상에 대해 시간역에서의 제어기 설계가 이루어지므로 고전제어이론에서 정립된 제어대상 및 제어기의 주파수대역 특성은 직접적으로 제어기 설계에 이용되지 못하고, 결과론적인 해석만이 가능한 단점도 가지게 되었다. 현대제어이론의 발달과 더불어 주파수영역에서의 특성을 관련시키는 것이 제어 성능 평가에 있어서 중요한 척도가 되었다. 현대제어이론의 대표적인 예로서 최적제어(optimal control)를 들 수 있다. 행렬이론에 기초한 최적제어이론은 제어대상의 조건과 제어기의 설계과정에 따라 LQR, LQG, LQG/LTR 등 몇 가지로 분류된다. 이러한 제어이론의 도출과정에 있어서 중요시되는 사항으로서 제어계에 대한 가제어성(controlability), 가관측성(observability)을 판별하게 되는데 일반적인 제어대상의 경우 이러한 조건을 만족하기 어려우므로 이를 보다 완화시킨 가안정성(stabilizability), 가검출설(detectability) 조건으로서 대체하고, 제어기를 포함한 전체 계에 대한 내부안정성(internal stability)을 만족하도록 하는 제어이론이 확립되었다. 그러나 이전까지의 제어이론은 제어기를 설계함에 있어서 수학적 모델이 제어대상을 적절히 표현하고 있음을 가정하고 이루어지므로, 이러한 가정이 만족되지 않을 경우에는 제어성능은 기대할 수 없다. 또한 모델링이 비교적 정확하더라도 외란 및 잡음에 의해서도 제어성능은 저하된다. 이와 같은 이유로 인하여 제어기 설계에 있어서 한계점에 이르러, 이를 극복할 수 있는 제어이론이 필요하게 되었다. 1980년대 선형제어이론 분야에 있어서 H_{∞} 제어라는 새로운 이론이 출현하였다. 1981년, H_{∞} 제어의 시초가 되는 Zames의 논문과, 주파수 영역

에 있어서 루프 성형(loop shaping)의 중요성을 지적한 Doyle의 연구결과가 잇달아 발표되었다. 처음에는 이의 정식화나 해법이 곤란하다고 생각되었지만, 연구를 통하여 1984년 Zames의 감도최적화가 H_{∞} 제어로서 정식화되고 상태공간론에 기초한 계산 알고리즘이 제안되었다. 이후 1988년, 현저히 간략화되고 체계화된 알고리즘이 확립되었다. H_{∞} 제어이론의 특징으로서 다음과 같은 사항을 제어기설계에 고려할 수 있다.

- (1) 제어모델에 포함된 모델링 오차(modeling error)를 고려한 설계가 가능하다.
- (2) 주파수 특성 평가에 근거한 설계가 다입출력계로 확장되었다.
- (3) 폭넓은 제어문제를 다룰 수 있는 제어이론이다.

이와 같은 이유로 인하여 H_{∞} 제어이론은 이전의 제어이론들이 고려하지 못하였던 사항들을 포함하여 제어기의 설계가 체계적으로 이루어지므로, 능동제어에 있어서 큰 힘을 발휘할 것으로 기대되고 있으며 또한 이를 적용한 실험예가 발표되고 있다. 그러나 H_{∞} 제어 이론의 적용에 있어서 단점으로 지적되는 사항으로서 설계이론의 도출과정에서 여러가지 조건들이 도입되는데, 이를 충족하여야 하므로 제어이론을 자유로이 적용하는데 있어서 제약이 따른다. 즉 최초 모델링이 제어기가 존재하기 위한 조건을 만족하지 않을 경우에는 모델링을 수정해야 한다. 그러므로 이부분을 해결해야 하는 문제점도 안고 있다.

선형제어이론과는 별도로 비선형특성을 가지고 있는 제어대상에 대하여 계의 파라미터 동정(parameter identification)에 의한 적응제어(adaptive control)를 적용하여 능동제어를 수행하는 방법도 사용되고 있고, 제어대상의 모델링에 관계없이 설계자의 제어에 대한 지식만으로 능동제어를 하는 퍼지제어(fuzzy control)를 응용하기도 한다.

2.1 최적제어 (Optimal Control)

주어진 시스템과 성능지수함수에 대하여 최선의 제어법칙을 찾는 문제로서, 최적제어 이론은 변분학(calculus of variations)을 이용한 Pontryagin의 최소원리에 기초를 두고 있다. 최적제어는 LQR인 경우 제어대상의 가제어성이 성립하여야 하며, 이를 기초로 제어대수 리카티식의 해를 이용하여 귀환제어 이득을 계산하는 과정으로 이루어지며, LQG의 경우 제어대상의 가제어성과 가관측성을 기초로, LQR이론과 Kalman Filter이론을 이용하여 제어기 및 관측기의 이득을 계산하여 능동제어기를 구성한다. 그림 1은 귀환제어계의 블록선도를 나타낸다.

2.2 피드포워드 제어 (Feedforward Control)

진동계 자체의 능동제어기가 적절히 구성되었다 할지라도 외란이 작용하는 경우 특히 외란의 주파수대역이 계의 고유진동수 부근이라면 진동발생은 필연적이며 귀환제어기에

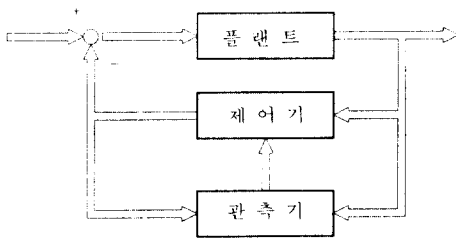


그림 1 귀환제어계의 블록선도

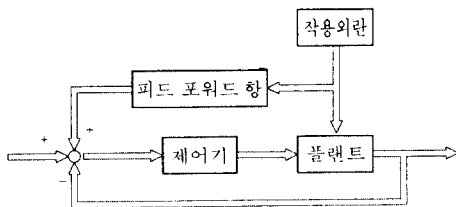


그림 2 피드포워드계의 블록선도

의해서는 방진성능에 한계가 있다. 그러므로 제어기가 가져야 할 요구조건 중 외란의 측정이 필요하다. 그림 2는 피드포워드 블록선도를 나타낸다.

2.3 적응제어 (Adaptive Control)

일반적으로 진동계의 파라미터는 비선형특성을 가지고 있으므로, 이를 선형시불변(linear time-invariant)계로 가정한 모델은 어느 정도 오차를 포함하고 있다고 볼 수 있다. 적응제어의 기초개념은 이러한 파라미터의 변동을 매순간 추정해나가도록 적응기를 구성하고 이를 모델로 하여 제어기를 구성한다. 본 연구에서 사용한 적응제어기는 적응신호처리(adaptive signal processing)중 계의 동정(system identification)을 대상계에 적용하여 외란에 대하여 진동계와 동일한 출력 값을 갖도록 적응시켜 나아가는 디지털 필터를 구성한다.

2.4 퍼지제어 (Fuzzy Control)

퍼지제어는 퍼지논리를 기초로 하고 있으며 기존의 제어이론보다는 훨씬 더 인간의 사고방식과 언어체계에 근접한 논리로서 불확실성과 대략적인 사실을 표현하는 효과적인 수단을 제공한다. 그러므로 제어에 있어서 대상계에 대한 정보가 수학적인 연산표현이 불가능하고 단지 언어적이 표현만이 가능한 경우 퍼지논리를 이용한 제어기가 유용하게 사용될 수 있다. 대상계가 기존의 제어이론과 같이 선형 또는 비선형 방정식의 표현이 불가능한 경우 즉 모델링자체가 불가능한 경우, 퍼지제어는 모델링을 필요로 하지 않는 장점을 지니고 있다. 그러나 단점으로는 제어기 설계자의 광범위한 지식을 기초로 대상계의 거동에 대하여 잘 알고 있어야 하며, 시행착오를 거듭하여 제어기의 설계가 이뤄진다. 또한 제어계의 직접적인 성능평가

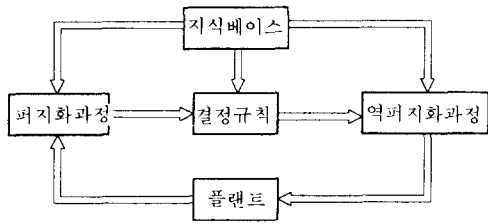


그림 3 퍼지제어계의 구성도

가 곤란하다.

퍼지논리 제어기의 구조는 그림 3에 나타난 바와 같이 퍼지화(fuzzification)과정, 결정규칙(decision making logic), 역퍼지화(defuzzification)과정으로 이루어진다.

3. 능동제어의 응용

본 연구에서 사용한 제어대상은 코일스프링에 의해 지지되는 1자유도 진동계와 공기스프링을 사용한 공기스프링 방진대 두 종류이다.

3.1 전자석 작동기를 이용한 능동제어

대상 진동계는 베이스의 진동에 의해 가진되는 스프링과 본체로 이루어진 1자유도 진동계이며 진동을 능동적으로 제어하기 위한 작동기는 영구자석과 전자석을 조합하여 제작한 전자석 작동기로서 본체와 베이스 사이에 설치하였다. 작동기는 동일한 극이 서로 마주보는 2개의 영구자석과 그 사이에 전자석이 설치된 구조를 가지고 있으며, 전자석의 작동여부에 따라 인력과 척력이 마주한 영구자석과의 사이에 발생하므로 작동기로서 작동한다. 계의 구성은 그림 4와 같다. 이와 같은 계는 방진대뿐만 아니라 현가장치를 필요로 하는 모든 계에 대하여 적용 가능한 구조를 지니고 있다.

베이스에서 가진되는 1자유도 진동계에서, 본체의 변위, 베이스의 변위, 작동기에서 발

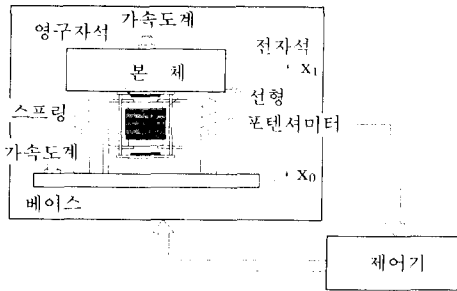


그림 4 전자석 작동기를 이용한 제어계의 구조

생되는 힘을 각각 진동계의 상태변수로 하고, 진동계의 질량, 감쇠, 강성을 고려하여 진동계에 대한 운동방정식을 얻는다. 작동기에서 발생하는 힘은 작동기의 임계주파수 이하에서는 선형이라 가정하여 단순화하면 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= AX + BU + D_D W_D \\ Y &= CX + D_N W_N \end{aligned} \quad (1)$$

또는 전달함수행렬 (transfer function matrix)로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} Y(s) &= C\Phi(s)BU(s) \\ &\quad + C\Phi(s)D_D W_D(s) + D_N W_N(s) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\Phi(s) \equiv (sI - A)^{-1}$

적용제어이론에 따라, 제어기 설계에 외란 $[W_D(s)]$ 과 잡음 $[W_N(s)]$ 항을 선택적으로 고려하였다.

제어기설계의 순서는 다음과 같다.

- (1) 최적제어
 - 디지털제어를 위한 제어기의 이산화
 - 성능지수의 선정 : 상태변수와 입력의 제곱으로 이루어진 2차 성능지수
 - 최적 최소차 관측기의 설계 : 칼만 필터 (kalman filter)
 - 제어기와 관측기에 대한 정상상태 리카티 방정식의 해
- (2) 피드포워드제어

- 작용 외란의 측정
- 극점/영점 상쇄에 대한 고려
- (3) 퍼지제어
 - 퍼지화 : 정규화(normalize)된 퍼지집합 구성, 멤버쉽함수는 이등변삼각형을 이용
 - 결정규칙 : 정규화된 퍼지집합내에서 등간격의 7개요소로 분할, 오차와 오차의 변화량에 대한 2차원 퍼지규칙 설계
 - 역퍼지화 : 최대내적방법(maximum product method)사용
- (4) 적응제어
 - 유한 충격응답 필터(finite impulse response filter, FIR filter)
 - 최소 평균 제곱법(least mean square method)

3.2 공기스프링 제진대의 능동제어

공기스프링 제진대(air-spring isolation table)는 공기스프링 4개로 지지되는 4점지방식이며, 작동기는 공기스프링의 압력조절을 위해 비례제어밸브를 각각의 공기스프링에 부착하여 사용하였다. 제어대상의 구성은 그림 5과 같다. 공기스프링은 스프링성분과 감쇠성분 그리고 작동기성분의 복합체로서 작용하며 이 경우 공기스프링과 비례제어밸브의 동특성은 공기유량과 압력 사이의 비

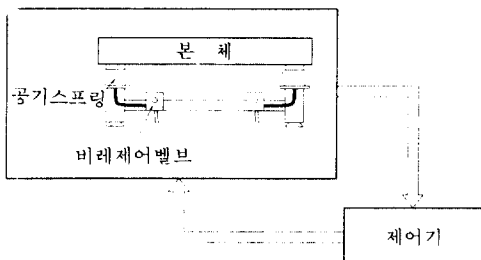


그림 5 공기스프링 제진대의 능동제어계 구성도

선형식으로 주어지므로 앞절에서와 같이 동특성을 무시할 수 없다. 본 실험에서는 밸브의 인가전압과 공기스프링의 압력을 2차 선형계로 모델링하고, 사인스위프(sine sweep) 방법을 이용하여 전달함수를 실험적으로 추정하였다. 이와 같은 근사화를 통하여 계의 운동방정식을 구하면 앞절에서와 같은 상태방정식[식 (1)]으로 표현할 수 있다. 4점지방식의 제진대의 이론적으로 6자유도 운동계나 작동기를 2개씩 동기화시켜 수직방향변위와 롤링(rolling)만을 고려한 2자유도 진동계로 모델링하였다.

4. 능동제어 실험

4.1 전자석 작동기를 이용한 능동제어 결과

전자석 작동기를 이용한 최적제어, 피드포워드제어, 퍼지제어의 능동제어실험 결과가 그림 6과 같다. 제어하지 않을 때 진동계의 파라미터는 고유진동수가 약 8 Hz이고 감쇠비는 매우 작은 것을 알 수 있다. 능동제어를 실시한 경우 공진봉의 크기는 약 10 dB 이상 감소하는 성능을 얻을 수 있었고, 고유진동수가 전반적으로 2 Hz 정도 감소하였다.

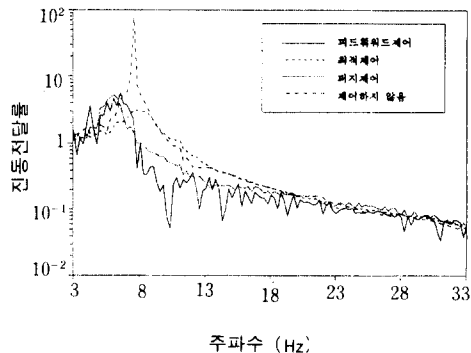
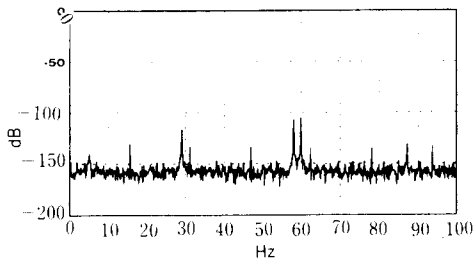
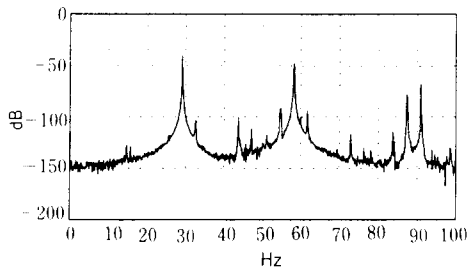


그림 6 제어기에 따른 제진성능의 비교

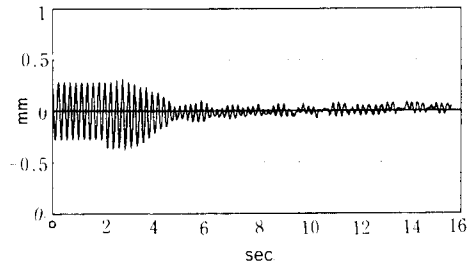


방진대의 가속도 파워스펙트럼

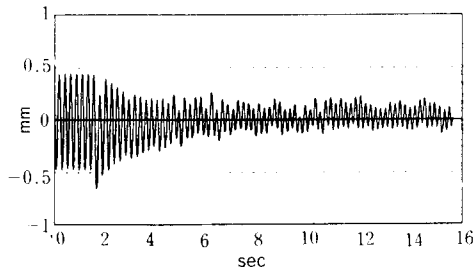


바닥면의 가속도 파워스펙트럼

그림 7 공기스프링 방진대의 제진성능



최적제어



과지제어

그림 8 최적제어/과지제어를 적용한 변위 응답

4.2 공기스프링 방진대의 능동제어 결과

공기스프링 방진대를 설치한 바닥면과 방진대에서의 가속도 파워스펙트럼을 측정하여 제어하지 않을 때의 제진성능을 검토하였다 (그림 7). 바닥면에서 공기압축기를 가동시켰을 때, 방진대로 전달되는 진동으로 주파수 성분에 따라 최대 60 dB까지 감소하였다. 또한 시간영역에서의 제어성능을 평가하기 위해, 계의 고유진동수(4.75 Hz)로 가진하였을 때의 변위응답을 측정하였다. (그림 8)

전달함수에 의한 방진성능 평가는 충격망치 (impact hammer)를 이용한 구동점 악셀러런스 (accelerance)를 측정하였다. 제어기의 성능을 표 1과 같이 정리하였다. 또한 전달함수 측정결과는 그림 9와 같다.

표 1 공기스프링 방진대의 능동제어 성능

	고유진동수	공진봉의 크기	감쇠비
제어하지 않음	4.8 Hz	-3.4 dB	0.02
	5.7 Hz	-2.1 dB	
최적 제어	4.9 Hz	-13.1 dB	0.12
	5.9 Hz	-7.9 dB	
과지 제어	4.9 Hz	-15.9 dB	0.16
	6.0 Hz	-10.1 dB	

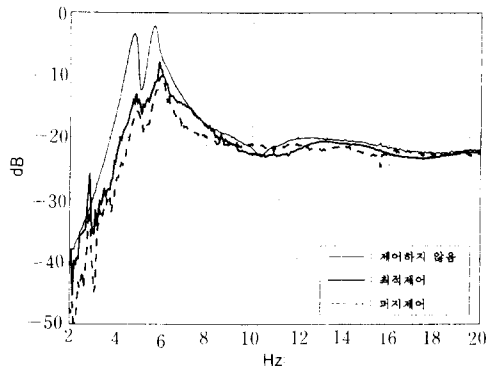


그림 9 방진대의 악셀러런스측정에 의한 제어 성능 평가

5. 맺음말

방진설계에 있어서 능동제어의 활용은 다음과 같은 사항을 염두에 두어야 한다.

1) 제어대상에 대한 이해

대상계에 대한 실험 및 이론적 수식화과정을 통합하여 대상계를 적절히 묘사할 수 있는 모델을 수립하고, 이를 근거로 능동제어를 위한 기초를 마련한다.

2) 제어목적의 선정

일반적으로 기계계는 저주파필터의 기능을 하므로 기본적으로 저주파대역에서 공진현상의 회피가 주목적이며, 더 나아가 각종 외란에 대하여 강건(robust)한 제어성능을 갖는 것이다.

3) 제어이론의 선정

작동기의 선정과 아울러 제어대상에 맞는 적절한 제어이론의 적용이 필요하다. 최신 제어이론이라 하여 모든 방진설계에 있어서 만족할 만한 성능을 얻을 수는 없는 만큼 제어이론의 선정은 설계자의 공학적 지식을 기초로 이루어진다.

4) 능동작동기의 선정 및 개발

가용한 작동기로서 대용량의 유압, 공압 작동기와 전자석을 이용한 작동기 그리고 압전소자(piezo material) 등이 있다. 각 작동기는 작용힘의 크기와 사용 주파수대역에 차이가 있으므로 제어대상의 성격에 따라 적절히 선정하여야 하며, 필요에 따라서는 제어대에 맞도록 작동기를 개발하여야 한다.

5) 능동제어계의 구성

이상과 같은 과정을 통하여 능동제어계를 구성함으로써, 방진설계에 대한 능동제어를 실현하게 된다. 이 단계에서는 실상황에서의 적용 또한 아울러 검토되어야 한다.

참고문헌

- (1) Schubert, D. W., 1969, "Theoretical and Experimental Investigation of Electro-Hydraulic Vibration Isolation Systems," *J. of Engineering for Industry*, pp. 981~990.
- (2) Karnopp, D., 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators," *J. of Engineering for Industry*, pp. 619~626.
- (3) Hong Su, 1990, "Vibration Isolation Characteristics of an Active Electromagnetic Forces Generator and the Influence of Generator Dynamics," *Trans. of ASME, J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 112 pp. 8~15.
- (4) 岩田義明ら, 1972, "空気ばねな有する吸振器の最適設計," 日本機械學會 講演論文集.
- (5) 岩田義明ら, 1973, "最適フィードバック制御理論による吸振器の設計と實驗," 日本機械學會論文集 第39巻 第327號.
- (6) 岩田義明ら, 1984, "4點支持絶縁装置最適振動制御," 日本機械學會論文集 第50巻 第458號.
- (7) 岩田義明ら, 1991, "精密制振装置のアクティブゴントロール," 日本機械學會論文集 第57巻 第534號.
- (8) Takagami, T. and Jimbo, Y., 1985, "Study of an Active Vibration Isolation System", *J. of Low Frequency Noise and Vibration*, Vol. 4, No. 3.
- (9) 鎌田 澈ら, 1992, "能動制振機構を備えた制振台の開発," 日本精密工學會誌, 第58巻 第7號.
- (10) Ohshio, M., et al., 1992, "Active Control for Precision Vibration Isolation System," *The 1st Int'l Conf. on MOVIC*.
- (11) 박영필, 손태규, 김규용, 유원희, 1994, "전자기력을 이용한 능동제진에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제18권 제5호, pp. 1169~1181.
- (12) 박영필, 김규용, 송진호, 1994, "공기 스프링 방진대의 능동제어," 대한기계학회 논문집, 제18권 제7호, pp. 1605~1617.
- (1) Schubert, D. W., 1969, "Theoretical and