

구조물의 능동 진동제어

임 승 철

(명지대학교 기계공학과)

1. 머리 말

현, 판, 막의 진동을 이용하는 피아노, 실로폰, 드럼, 북 등의 악기류를 제외하고는 일반적으로 구조물의 진동은 억제 대상이며 최근에 와서는 이에 관련된 환경 소음 및 진동에 대한 규제가 더욱 강화되는 추세이다. 그러나 자원 및 에너지 소비의 절감을 통한 제품단가의 인하 뿐만 아니라 폐기물의 감소등 환경오염의 예방차원에서도 제품의 경량화가 지속적으로 추진되고 있고, 또한 제품성능에 대한 소비자의 기대는 상대적으로 저렴한 가격에 동일하거나 더 높아 지므로써 진동제어 문제가 더욱 부각되고 있다.

한편, 구조의 경량화에 따른 강성의 감소는 일반적으로 질량의 감소비보다 크기 차수로 0 내지 2 정도가 크며 이로 인하여 경량화 시 쉽게 유연구조화되며 저주파 대역에서의 진동발생의 개연성도 그만큼 증대된다. 여기서 유연구조란, 대부분의 재료가 탄성영역을 갖고 있으므로 크게 보면 모든 구조가 그에 속한다고 볼 수 있지만, 그중에서도 그러한 탄성에 의하여 관심 주파수대역에서의 진동이 발생하는 부류로만 국한하여 정의하고자 한다. 따라서 반드시 얇거나 가늘고 긴 물체의 경우뿐만 아니라 빌딩과 같이 외견상 강체처럼 보이더라도 고속 운동시 유연구조의 범주에 속할 수 있음을 인식해야 할 것이다.

진동을 억제하기 위하여는 그것을 야기시키는 원인과 경로를 분석하여 그 중 원인 즉, 가진원 자체를 소멸시키거나 그것이 여의치 않은 경우 전달 경로에 대한 고찰을 통하여

문제를 해결하여야 할 것이다. 주로 기계의 경우 내/외연기관, 전기 모터 등 동력원이 가진원이 되며 그들의 진동은 밸런싱이나 전자기 구동 토크의 균일화등의 방법으로 해결책을 찾는다. 그 밖에 바람이나 지진, 불규칙 노면 등도 가진원이 될 수 있다. 본 글에서는 가진원 자체에 대한 논의는 제외하고 진동의 전달 경로를 차단하여 문제를 해결하는 방법을 중심으로 서술하고자 한다.

유연 구조의 진동제어 방법에는, 그 중간에 별도의 작동기를 사용하지 않음으로써 제어에 필요한 입력 에너지가 거의 영에 가까운 능동적 방법도 존재하지만 크게 수동과 능동적 방법이 있다.

수동적 방법은 오랜 역사와 많은 실 적용례를 갖고 있으며 현재도 조선분야 등에서는 거의 독점적으로 사용되고 있다. 간단히 설명하면 수동적 방법은 작동점에서의 가진 주파수를 파악하고 그 영역에서의 구조의 진동 크기가 작아지도록 구조의 강성이나 감쇠를 미리 결정하여 고정해 두는 것이다. 이 방식에서는 복잡한 분리장치가 필요 없기 때문에 경제적이며 신뢰성이 높은 장점이 있으나 실제 구조가 설계시와 달라지거나 작동점 혹은 환경이 변화하여 가진주파수가 가변적인 경우에는 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 이에 반해 능동적 방법은 장치가 비교적 복잡하고 비용이 많이 소요되는 단점은 있지만 수동적 방법의 문제점을 보완할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그 이유는 구조진동을 연속적으로 감지하여 그 때 그 때 제어기를 통하여 필요한 만큼 작동기 힘을 가하므로써 전체 진동을 억제하는 방식이기 때문이다.

2. 능동 진동제어의 요소기술

능동제어기술은 그 속성상 진동 측정 및 해석 그리고 자동제어 기술과 많은 부분을 공유하고 있어서 이 기술전반을 다 설명하기 어렵다. 따라서 본 글에서는 진동제어에 밀접하게 관련된 주요 능동제어 요소기술들만을 간추려 보고자 한다.

2.1 진동 모델링

진동제어를 위해서는 이론적 방법이나 실험적 방법을 적용하여 대상구조의 고유진동수와 고유모드 등과 같은 그것의 진동특성에 대한 어느 정도의 이해가 필수적이다. 이것은 곧 감지기와 작동기의 유형, 개수, 설치 위치 등의 선정에서부터 제어사양, 제어방식의 결정에 이르기까지의 기본 자료가 되기 때문이다.

진동제어는 일반적으로 재료의 탄성변위 한계내에서 이루어지므로 구조물의 미소 진동변위와 입력 힘/토크와의 관계는 선형이다. 한편, 그들의 동적 관계를 묘사하는 운동방정식은 균일 보, 균일 판 등 단순 부재의 경우 Hamilton원리⁽¹⁾와 같은 에너지 방법에 의하여 해석적으로 얻어질 수 있다. 이 때 얻어지는 운동방정식은 진동변위에 대한 시간 및 공간에 대한 선형 편미방의 형태가 된다. 여기에 경계조건을 적용하게 되면 미분형 고유치 문제를 도출해 낼 수 있게 된다. 이렇게 얻은 고유치 문제는 공간에 관한 상미분 방정식으로 일반적인 미방의 해법을 적용하고 영이 아닌 해의 조건을 적용하면 고유해 즉 고유진동수와 고유 모드형상을 얻을 수 있다. 이 때 해결되는 해는 무한 개로서 물리적으로는 구조의 진동 모드가 무한 개임을 의미한다. 다만 일상에서는 가진의 주파수 특성에 따라 그 횟수개의 특정 모드만이 우세하게 나타나 관측되는데, 이것은 운동방정식으로부터 주어진 초기조건 혹은 가진함수 항에 따라 중첩시의 가중치를 구하므로써 예측할 수 있다.

그러나, 여러 부재의 결합으로 이루어진 구조물의 경우 상기와 같은 엄밀해석은 불가능하다. 따라서 어느 정도의 근사적 방법을 필요로 하는데 그 경우 고유모드 형상을 미리 가정하는 방법이 많이 사용된다. 그 중 각 부재를

하나의 부분구조로 다루는 것이 Rayleigh-Ritz방법이고 그 부재를 다시 더 작은 요소의 집합으로 다루는 것이 유한요소법이다. 이 두 방법은 공히 각 부재 혹은 요소의 운동방정식을 유도한 후 물리적 경계조건을 적용하여 이웃 요소들을 결합하고 전체 운동방정식을 얻는다. 이와 같이 얻어진 운동방정식은 시간에 관한 상미분 방정식으로서 다음과 같은 일반적인 형태를 갖게된다.

$$M \ddot{q} + (C + G) \dot{q} + (K_S + K_C) q = Q(t) \quad (1)$$

여기서 M, C, G, K_S, K_C 는 각각 질량, 감쇠, 자이로, 일반 강성, 기하적 강성 행렬들을 뜻하며 q 와 $Q(t)$ 는 각각 일반화 좌표, 제어 입력과 외란을 포함한 외력 벡터이다.

그러므로 식 (1)로부터 제어입력이나 기타 가진력에 대한 시간영역 해석과 푸리에 변환의 약식인 라플라스 변환을 통하여 입출력간 전달함수를 구하고 주파수 영역해석을 할 수 있다. 한편, 이 단계에서 고유치 해석도 가능한데 일반 구조진동의 경우는 질량, 감쇠, 일반 강성행렬만으로부터, 회전체 구조진동의 경우는 자이로 행렬, 기하적 강성행렬 등을 추가로 고려하여 전체 계의 고유진동수와 모드형상등을 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 모드벡터들을 이용하면 일반화 좌표 q 를 모드 좌표 η 로 선형변환할 수 있고 이 경우 식 (1)은 모드공간에서 다음 식과 같이 재표현된다.

$$M^* \ddot{\eta} + (C^* + G^*) \dot{\eta} + (K_S^* + K_C^*) \eta = Q^*(t) \quad (2)$$

2.2 모드공간 제어

전술한 바와 같이 진동계는 무한개의 진동 모드가 중첩되어 응답하므로 진동제어시 그러한 모드 개념을 이용하는 것은 매우 자연스럽고 효과적인 일이다. 따라서 모델을 기본으로 하던 아니면 지능제어 방식이던 간에 출력변수나 다른 상태변수를 이용하는 기타 수 많은 제어 방법보다 모드공간 제어는 특기할 만하다.

모드 공간제어는 독립 모드공간 제어와 결합 모드 제어방법으로 대별될 수 있다⁽²⁾. 그 중 전자는 식 (2)의 계수행렬들이 완전히 혹은

은 거의 대각행렬에 가까울 때 적용가능하며 이 경우 각 모드는 분리된 2차계가 되므로 PID, LQ, 혹은 H^∞ 등 어떠한 제어이론을 동원하든 적절한 제어이득을 구한 후 속도와 변위를 귀환하여 그에 비례하는 작동기 힘을 가하므로써 각각 해당모드의 점성과 강성을 증가시킬 수 있다. 이 경우의 기술적 어려움은 각 모드변수를 넘침효과 없이 관측하지 못하면 전체 제어계의 불안정성이 야기될 수 있다는 점과 원칙적으로 억제 대상 모드의 개수만큼의 작동기가 필요하다는 사실이다.

그러한 단점을 보상할 수 있는 방법이 바로 결합모드 제어방법으로서 시스템의 모드가 완전 분리되지 않을 때, 소수의 작동기를 사용하여 구조적으로 결합된 다수의 진동 모드를 억제할 수 있는 장점을 갖는다⁽³⁾. 다만 제어 효과면에서는 독립모드공간 제어보다 열등할 수도 있다.

2.3 제어 및 관측 넘침효과

제어기 설계시 실제적으로 진동모드의 수만큼 무한대 차원을 갖는 모델을 사용할 수는 없다. 다시 말하면 제어 대상 플랜트의 차수 축소의 필요성이 대두되는 데 식 (1)을 유도하는 공간 이산화과정에서 뿐만아니라 통상 식 (1)로 부터 식 (2)를 유도하는 과정중 이러한 작업이 수행될 수 있다. 이 때 사용되는 가장 일반적인 방법은 진동제어 시스템의 경우 가진이 가장 쉽게 되는 저차 모드만을 남기고 그 이상의 모드는 절단해 버리는 것이며 이는 가능한 경우의 입력에 대하여 강제 시간응답등을 살펴보면 물리적으로 충분한 설득력을 지닌다.

그러나, 그와 같이 축소된 모델을 기본으로 제어기를 설계하여 실험에 적용하여 보면 시뮬레이션 상에서는 나타나지 않던 현상들이 출현한다. 그 중 가장 특기할 만 한 것이 제어넘침과 관측넘침 효과이다. 이것은 각각 목표로 하지 않았던 외의 고차 모드가 가진되거나, 예상치 못했던 고차 모드 진동이 귀환 신호에 흡입되는 현상이다. 특히 관측넘침이 발생하면 엉뚱한 정보를 기초로 목표 모드를 제어하므로써 제어 성능이 예측치보다 저하되거나 심지어는 제어넘침과 결합하여 전체 시스템이 불안정해지기도 한다. 이와 같은 경우

는 특히 복잡한 형상의 구조물에서 잘 나타나는 데 그 이유는 각 모드들의 고유 진동수가 매우 근접하게 존재할 수 있기 때문이다.

이와 같은 제어넘침 문제에 대한 대책으로서 제어기 설계시 주요 모드들을 모두 제어 대상으로 포함시키되 페루프 시스템의 대역폭을 지나치게 높지 않도록 제한하고 고주파 영역에서의 이득 감소율을 크게 하는 방법이 있다. 한편 관측넘침 효과의 경우, 간단히 제어 모드들의 고유 진동수 바로 위에 차단주파수를 갖는 저대역 통과 필터를 감지기 출력에 사용하거나 감지기의 수를 늘리므로써 관측오차를 최소화시키는 방법이 있다.

2.4 강인 제어기의 필요성

일반적인 제어시스템에서와 마찬가지로 진동제어의 경우 성능과 함께 안정성에 관한 사양도 매우 중요하다. 먼저 성능에 관한 사양 중 강제운동에 의한 관성력 등 비교적 저주파 대역인 외란이 작용하는 동안에는 성능이 크게 저하될 수 있으므로 그 외란을 수용할 수도 있어야 한다. 외란에 대한 강인 성능을 확보하기 위하여는 이를 상쇄시킬 수 있는 순역임 제어기를 추가로 사용하거나, 저주파 대역에서 큰 제어 이득 혹은 빠른 속도를 갖는 귀환제어기를 설계하여야 한다. 전자의 방법은 어느 정도 외란에 관한 주파수 혹은 크기 정보를 알거나 추정할 수 있어야 하며 후자와 같이 일반적인 경우는 제어기 출력이 포화되거나 대역폭이 지나치게 높아 지지 않도록 주의하여야 한다. 참고로 LQR 형태의 귀환제어기를 사용하는 경우 귀환이득을 크게 얻기 위하여 상태변수의 이차항 가중치를 크게 하여도 페루프 극점중 일부가 허수축 가까운 위치에 항상 잔류하는 경향이 있다. 이것은 유연 구조계의 전달영점의 영향으로, 이러한 경우 처방된 상대 안정도를 갖는 변형된 형태의 이차 성능지수를 적용하면 모든 극점을 그 상대 안정도 이상의 음의 실수값을 갖도록 배치하여 빠른 제어기를 설계할 수 있다⁽⁴⁾.

한편, 진동시스템의 경우 차수축소 등으로 인하여 고주파 대역에서의 모델 오차가 필연적으로 커져 시스템의 불안정성을 야기시킬 수 있다. 이에 대비한 강인 안정성을 확보하기 위하여는 페루프 시스템의 대역폭이 지나

치게 높지 않도록 설계되어야 하며 차단주파수 이상에서의 제어이득도 가능하면 급격한 강사를 갖고 감소하도록 하는 것이 중요하다.

2.5 작동기 및 감지기 동역학

전통적으로 사용되어 온 작동기나 감지기의 경우, 그것의 입출력관계에 대한 선형 정적 모델은 잘 알려져 있다. 그러나 제어시스템의 속도가 작동기나 감지기의 속도에 비하여 무시할 수 없을 정도로 고속화되면 그들의 동특성은 전체 시스템에 영향을 미치며, 따라서 그들의 동역학을 고려하여야만 시뮬레이션 결과를 신뢰할 수 있다. 또한 작동기나 감지기의 입력이 커서 어떤 한계를 초과할 시는 출력의 포화등 비선형성을 반드시 고려하여야 한다.

이 절에서는 이러한 관점을 떠나서, 종래에도 타 용도로 사용되기는 했지만 최근 구조제어용 작동기나 감지기로서 각광받기 시작한 지능 재료들에 대하여 간단히 소개하고자 한다

(1) 압전 재료

변위가 발생하면 그에 비례하는 전하를 발생시키는 압전효과를 이용하면 압전체를 탄성 변위 혹은 그의 시간변화율 등을 감지하는 감지기로 사용할 수 있으며, 동시에 그의 가역 현상을 이용하면 전압을 가하여 힘 혹은 토크 발생 작동기로서도 사용할 수 있다.

다만, 사용시의 물리적 구속조건과 주변회로의 구성에 따라 입출력의 물리적 관계가 달리 결정되며, 일반적으로 현재 개발된 압전체 자체의 취성이나 변위 대 전압값인 압전상수 값등의 물성에 따라 세라믹 계통의 PZT압전체는 작동기로서, 폴리머 계통의 PVDF는 감지기로써 적합하다.

압전체는 가볍고 가공 및 설치가 용이할 뿐만 아니라, 동작이 빠르며 작동기로 사용할 때 고전압이 필요하지만 소비전력이 작고 에너지 효율이 큰 장점을 가지고 있어 다수개를 분포시켜 사용할 수 있는 장점이 있다.

(2) 형상기억합금

형상기억합금은 어느 온도에 도달하면 상변화를 일으켜 자기의 원형으로 회귀하는 특성을 갖고 있다. 따라서 상온보다 높은 상변화 온도를 갖는 경우 전류를 가하여 재료의 높은

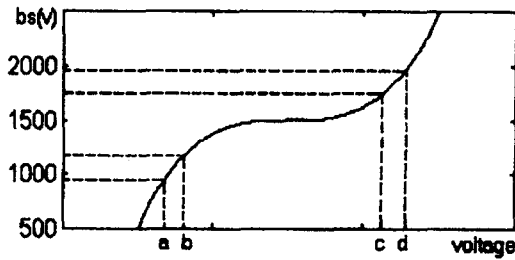


그림 1 ER유체의 전압 대 점성 특성

내부저항에 의해 열을 발생시키게 되면, 원형상에 복귀하려는 매우 큰 힘을 발생시키므로 이를 능동제어에 필요한 힘 작동기로 이용할 수 있다. 다만, 이 재료의 경우 가열과 냉각이라는 열적 메카니즘에 의존하고 있으므로 비교적 응답속도가 느린 것이 현재로서는 단점이다.

(3) 전기 유동(ER)/자성 유동(MR) 유체

이 들 유체는 마이크로 미터 크기의 입자와 오일로 구성되어 있고 각각 전기장과 자기장에 반응하며, 매우 낮은 전력에도 빠르게 액상에서 고상으로 상변화하여 점성, 탄성등 유동학적 특성이 가역적으로 변화하는 특성을 가지고 있다(그림 1 참조). 따라서 능동보다는 관심 주파수대역에서의 전기장 혹은 자기장의 크기를 조절하는 방식의 반능동제어에 적합한 작동기 재료이다.

(4) 광 섬유

광섬유는 신호의 전달수단으로서 뿐만 아니라, 미세하며 유해환경에 대한 저항성과 전기 혹은 자기적 외란에 대하여 강인한 장점 때문에 센서로서의 사용가치가 크다. 이는 변형되거나 운동하는 경우의 광섬유는 빛 전달 특성이 변화하기 때문이며, 이를 이용하면 구조의 변형 및 진동 감지기, 가속도계, 회전 각을 측정하는 자이로 등으로 사용 가능하다.

2.6 작동기 및 감지기의 위치선정

일반적인 lumped 즉 비분포계를 제어하는 경우에는, 제어 방향만 일치 한다면 제어위치와 관계없이 감지기와 작동기를 설치하여도 단순한 대수식 관계로부터 제어위치에서의 등가치로 그들의 입력과 출력을 환산하여 고려할 수 있다. 그러나 유연 구조의 경우 특히 진동억제를 목적으로 하는 경우에는 운동자유도 방향이 일치한다고 하더라도 이격 위치에

소특집 : 진동 제어

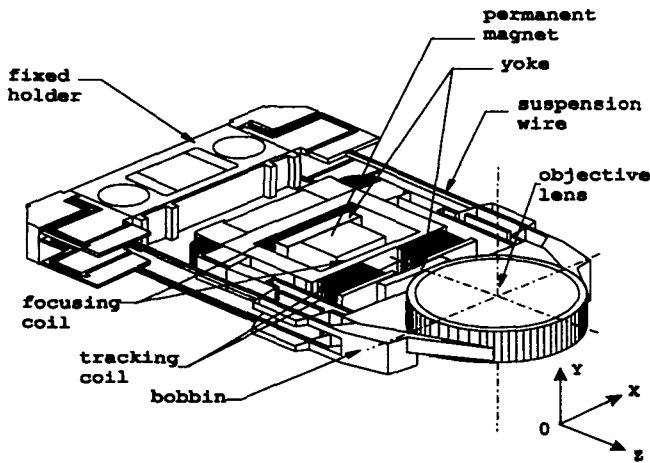


그림 2 광 픽업의 개략도

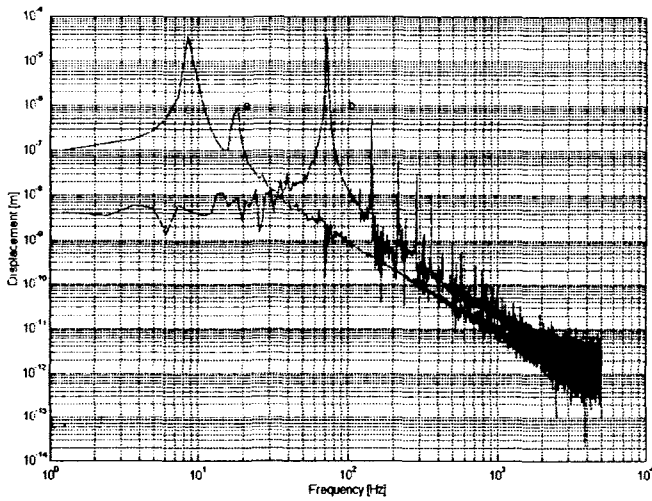


그림 3 디스크 진동 (a) 1x, (b) 8x

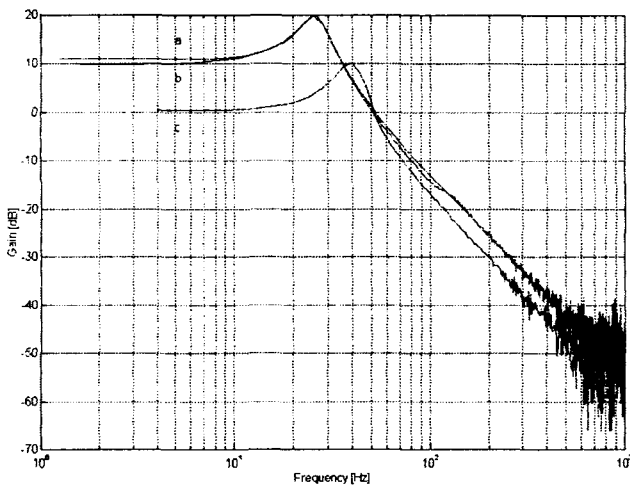


그림 4 주파수 응답함수 :
(a) AF, (b) AF 추정치, (c) AT

작동기와 센서를 설치하면 가제어성 혹은 가 관측성 자체가 아예 성립되지 않을 수 있으므로 주의해야 한다.

따라서 굽힘진동의 경우를 예로 든다면, 위치선정은 억제 대상인 진동 모드들의 형상을 고려하여 결정하되 작동기와 감지기가 병진형인 경우는 가능한한 모든 절점을 피해야 하며, 회전형의 경우는 기울기가 영인 모든 절점을 피해야 한다.

한편, 구조의 제어시 감지기와 작동기를 가능하면 동일한 위치에 설치하는 것이 제어성능의 향상에 유리하다. 그 이유는 동일 위치의 경우 시스템의 입출력간 주파수 응답함수로부터 알 수 있듯이, 주파수 영역에서 극점과 영점이 번갈아 존재하므로써 최소위상 시스템이 되기 때문이며 따라서 비동일 위치 시스템의 경우보다 안정여유가 상대적으로 크고 큰 제어이득값이 허용되기 때문이다⁽⁵⁾.

3. 적용 사례

진술한 능동 진동제어 관련 요소 기술은 원칙적으로 구체적 제어대상이 무엇이든 상관없이 적용가능하다. 그러나 경우마다 최적의 방법은 달라 질 수 있으므로 적용례에 따라서 사용하는 감지기, 작동기, 그리고 제어기의 유형에 차이가 있다.

3.1 항공기

항공기의 경우 점차 동체가 길어지며 특히 큰 양력을 얻기 위하여 주 날개의 면적 그리고 길이 대 폭의 비가 커지고 있다. 따라서 주 날개는 매우 유연한 구조가 되며 대략 10 Hz전후에 연성된 비틀림 및 굽힘의 1, 2차 진동모드 등을 갖는다. 따라서 비행시 날개의 탄성변형과 비정상 공기력이 상호 작용하여 플러터(flutter)라고 하는 공탄성적 불안정 진동 현상이 발생하게 되면 1, 2차 고유 진동수가 점차 접근하여 비감쇠 비틀림과 굽힘 모드가 발생하게 되고 승객의 승차감 손상은 물론 날개가 파손될 수도 있다.

비행시 이러한 치명적 플러터 문제를 극복하기 위하여 과거에는 날개구조의 보강등 수동적 진동제어 방법과 함께, 도움날개(aileron)라고 불리는 주 날개 뒷전의 조종면을 유압작동

기로 능동 위치제어하여 양력을 변화시키므로써 감쇠시키는 방법을 사용하였다. 그러나 최근, 복수개의 보조 조종면을 추가 사용하던지 혹은 큰 무게 증가없이 다수의 PZT 압전체를 날개에 부착시키고 이들을 분포 작동기로 사용하여 다변수 LQG제어하므로써 원래 플러터 속도를 높이는 데 성공하고 있다.⁶⁾

3.2 정보저장 장치

컴퓨터 사용의 증대가 점차 더 많은 양의 정보를 더 빨리 읽거나 쓸 수 있는 보조 기억 장치를 필요로 하게 되었다. 따라서 CD 플레이어 등을 발전시킨 CD-ROM 드라이브는 국제 규격화된 플라스틱제 광 디스크에 수록된 데이터를 데이터를 얼마나 빨리 읽을 것인가 하는 속도 경쟁을 계속해 왔고, HDD의 경우는 제조사 고유의 자기식 하드 디스크를 여러장 사용하여 더 큰 기억용량의 장치를 더 빨리 데이터 처리하는 경쟁을 벌이고 있다. 그 밖에도 디지털 비디오 디스크 광자기 디스크 드라이브 등 여러 가지 변형된 형태의 정보저장 장치가 있으나 그 기술적 추구내용에 있어서는 유사하다.

CD-ROM 드라이브내의 능동식 진동제어 시스템으로는 자동초점(AF) 서보와 자동 트래킹(AT) 서보가 있다. 그 두 서보는 얇은 착탈식 원판인 CD-ROM의 변형, 편심, 착탈 및 조립시 공차 등으로 인한 회전시 레이저 센서와 디스크간의 초점변화 그리고 반경방향의 트랙 오차에 대응하는 시스템으로서, 공회전사석을 이용하여 광 픽업이라고 불리는 유 연구조물의 끝점 즉 대물렌즈의 위치를 독립적으로 제어한다. 따라서 두 서보는 진동 억제보다는 형상제어에 가까우며, 단일 센서와 작동기로 제어하기 위하여 가능하면 픽업이 집중질량과 스프링으로 구성되는 단일자유계 처럼 거동하도록 할 필요가 있다⁷⁾. 참고로 국산 8배속 CD-ROM 드라이브내의 광 픽업, 초점방향의 디스크 진동, 광픽업의 주파수 응답함수, 그리고 이를 H^∞ 제어한 AF시스템의 성능을 각각 그림 2에서 5까지에 제시하였다⁸⁾.

한편, HDD의 경우는 디스크의 회전시 양력으로 부상하는 자기 헤드와 디스크간의 상대변위가 거의 일정하여 AF 해당 기능은 존

재하지 않으며, 목표 트랙으로 헤드를 이동시키고 회전 디스크의 진동에도 불구하고 헤드 위치가 그 트랙을 유지하도록 하는 AT 해당

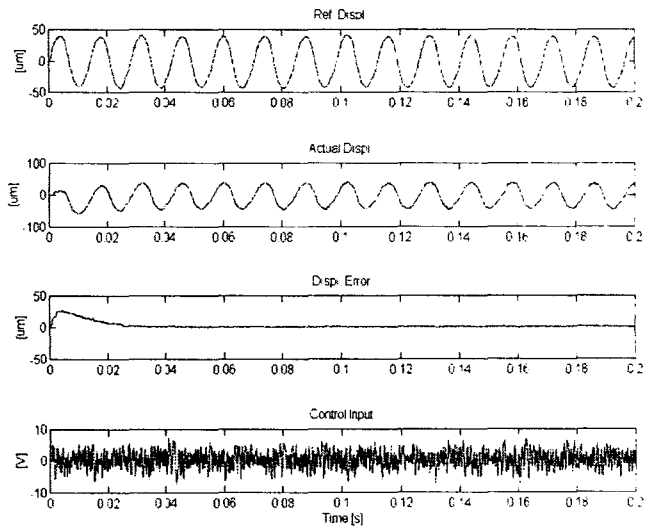


그림 5 AF 제어성능

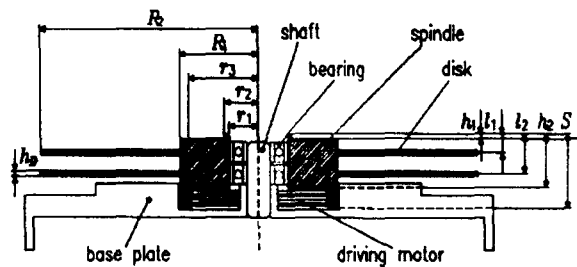


그림 6 HDD 원판-스핀들 계

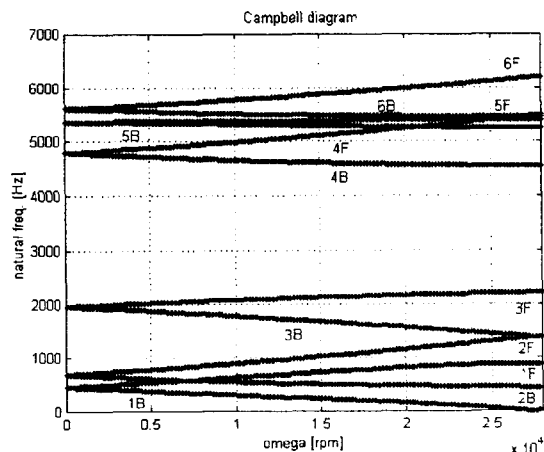


그림 7 Campbell 선도

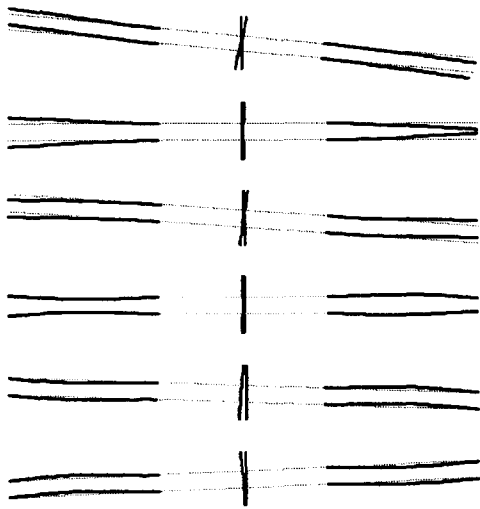


그림 8 진동 모드 (위로부터 1~6차)

기능만이 요구된다. 현재 상품화된 HDD는 CD-ROM 드라이브에 비해 훨씬 고속으로 회전하며 따라서 비교적 견실한 구조인 헤드의 암과 서스펜션은 물론 하드 디스크 자체도 스피들 축과 함께 유연 구조로 해석할 필요가 있다. 이에 관련된 연구로서 그림 6과 같은 디스크 2장 짜리 HDD 원판-스피들 계의 엄밀한 진동해석을 유한요소법으로 수행한 결과, 스피들 축 굽힘과 연성된 원판 면의 진동의 Campbell 고유진동수 선도와 진동모드를 각각 그림 7, 8과 같이 얻었다.

여기서 원판의 진동 해석이 중요한 이유는, 주어진 제어입력의 범위내에서 헤드위치 제어계의 성능에는 한계가 있으며, 현재까지 HDD 스피들계 자체의 진동이 자기베어링이나 기타 수단을 통하여 능동 제어되지 않기 때문이다. 따라서 헤드의 위치제어시 볼베어링의 결함이나 편심 등에 의하여 공진이 발생하지 않도록 회전계가 수동제어방식으로 설계되어야 하며 그 진동의 크기와 주파수가 주요 외란인 런아웃에 관한 정보로 활용될 수 있기 때문이다⁽⁹⁾.

3.3 토목 구조물

일반기계의 토대에서조차 마찬가지로 지진 등이 발생하여 교량, 건물 등의 공진주파수 대역에 주파수 스펙트럼을 갖는 경우, 그 에너지는 마치 소리굽쇠가 공명하는 경우와 같이 구조물에 대부분 전달되어 정적변위에

비하여 지나친 진동을 야기시키게 되며 이는 곧 구조물을 손상 내지 붕괴시킬 수 있다. 따라서 그러한 지진이나 강풍 등의 동하중에 대비한 진동 해석을 바탕으로 공진 주파수의 조정 등을 통한 토목구조물의 구조설계가 미국이나 일본과 같은 국가에서는 상당히 이루어져 오고 있다.

한편, 그 보다 좀 더 적극적인 제진 방법 중 대표적인 것으로는 진동학에서 소개되는 흡진기의 원리를 이용한 동조형 질량 감쇠기(TMD, 그림 9 참조)를 건물의 옥상등 평면상에 설치함으로써 건물의 공진대역에서의 진동 에너지를 감쇠기가 최대로 흡수하여 건물 자체의 진동을 완화시키는 방법과, 건물 내 탱크에 담긴 유체의 반작용을 이용하는 동조 유체 감쇠기(그림 10 참조), 점탄성 재료를 이용한 부재를 건물골조 요소요소에 설치하여 진폭을 감소시키는 분포형 점탄성 감쇠기 방법, 그리고 건물하부에 수직방향에 비해 수평방향으로의 유연성을 높인 고무 패드 베어링, 히스테리틱 댐퍼, 또는 미끄럼 베어링 등을 사용하는 base 절연방법 등이 있다⁽¹⁰⁾. 그러나 이들 방법은 공히 수동적 방법으로서, 그

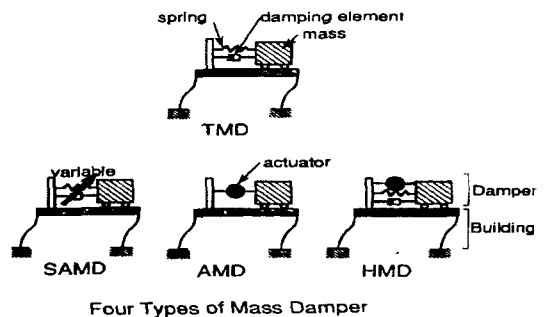


그림 9 질량 감쇠기의 종류

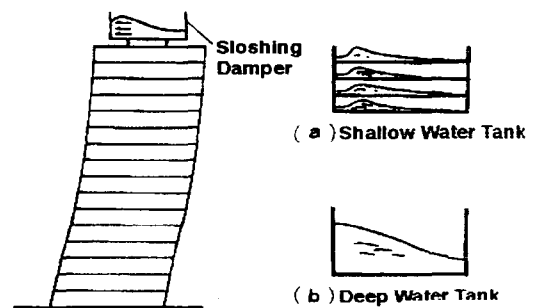


그림 10 동조 유체 감쇠기

지역에서 통계적으로 얻은 주파수 대역이외의 외란이 가해지는 경우 속수무책이 될 수 있다

따라서 능동적 진동제어방식이 요구되는 때 이 때 주로 사용되고 있는 방식은 요구 힘의 크기와 속응성으로 인하여 accumulator가 있는 전기유압식이 작동기로서 사용되고 건물의 지하, 중간, 옥상층 등에 진동 감지기등을 설치하고 컴퓨터등을 강인성이 보장되는 LQR 제이기로 사용하는 능동 브레이싱 시스템(A3S)이나 능동 질량 감쇠기(AMD)가 주류를 이루고 있다⁽¹¹⁾. 그 중, ABS는 그림 11에서와 같이 대각선 형태로 각 층 사이에 설치되는 건물의 브레이싱 중간에 작동기를 설치하고 그것을 제어법칙에 따라 근육처럼 길이 방향으로 신장 또는 수축시키는 방식이며, AMD는 옥상에 설치한 큰 질량체를 작동기에 의하여 적절히 고무 베어링위로 병진운동 시킴으로써 반작용 제어힘을 건물에 가하는 방식이다(그림 9 참조). 이 때 건물의 질량증가를 최소화하기 위하여 질량체로써 기존 탱

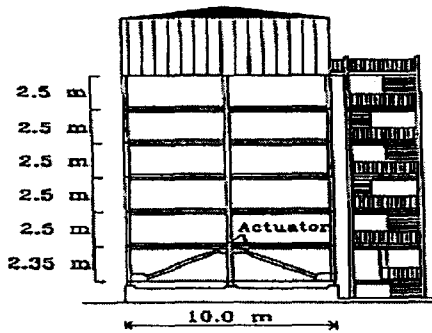


그림 11 ABS 시스템

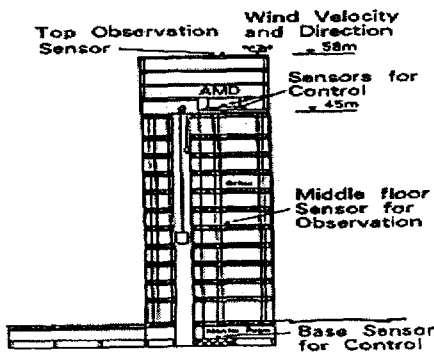


그림 12 INTES빌딩의 단면

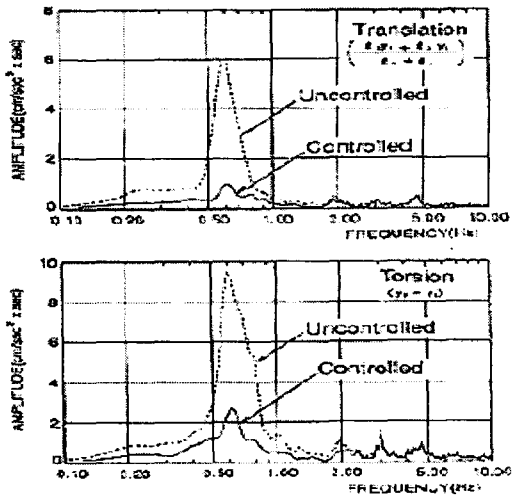


그림 13 AMD의 제진효과

크나 heliport 등을 사용하는 것이 일반적이다. 일본 동경의 Sendagaya INTES 빌딩(그림 12 참조)에 실제로 설치되어 있는 AMD는 얼음탱크를 질량 블록으로 사용하였으며 1993년에 불었던 강풍의 경우 그림 13에서와 같이 큰 댐핑효과를 보인 바 있다.

그러나 여기서 한가지 주목하여야 할 것은 토목구조물이 외란에 의해 가진되는 경우 초기에 가진 에너지가 크게 작용되어 정전사태가 발생할 수 있고 이 경우 능동제어 시스템은 동작불능 상태에 빠질 수 있다는 점이다. 그러한 경우에 대비하여 능동제어의 경우 안전시스템이 꼭 필요하며 그 대안으로 반능동 제어 방식 혹은 수동, 반능동, 능동 제어가 결합된 혼합제어 방식이 사용될 수도 있다.

3.4 우주 구조물 및 우주 로봇

현재 운용되고 있는 우주구조물이나 우주선에 설치된 로봇 혹은 매니플레이터의 경우 아직도 저속 동작하여 강체구조인 것이 사실이지만 향후에는 점차 유연구조화 될 전망이다. 이에 대비한 연구가 미국등 선진국에서는 이미 수행된 바 있으며⁽¹²⁾, 대체로 안테나 등 부가물을 강체 회전시키거나 구조물의 자세를 바꿀 때 혹은 로봇이 관절을 움직이며 작업을 할 때 수반되는 구조의 진동을 억제하는 최선의 방법을 모색하는 데 목적이 있다.

그러한 연구 중 흥미로운 것은 무엇보다도 구조물이 기본적으로 무중력 상태인 허공에

며 있다는 사실일 것이다. 따라서 제어용 작동기로서 관절 이외의 부분에는 힘발생의 경우 압축공기를 내뿜는 기체 분사기(thruster), 토크 발생의 경우 모터축에 관성이 큰 회전 원판을 붙여 그것의 반작용을 이용하는 반작용륜등의 외부 작동기가 사용된다. 또한 자세 제어를 위하여는 서틀 본체에, 자이로 센서와는 반대의 원리로 자이로의 짐벌을 운동시켜 로터의 방향을 변화시키고 요구 토크를 얻는 CMG (control moment gyro)을 쌍으로 사용하기도 한다.

3.5 공작기계 및 산업용 로봇

공작기계는 가공시 높은 요구 정밀도로 인하여 강제화되도록 상당히 육중한 구조로 제작된다. 그러나 간혹 작업물에 채터 마크와 같은 거친 표면이 발생하게 되는 데 이와 같은 현상은 고속 이송시 급격한 부하변동과 공작기계가 갖는 내재적 유연성의 영향이며 이에 대한 대책으로서 능동 진동제어를 적용할 수 있다.

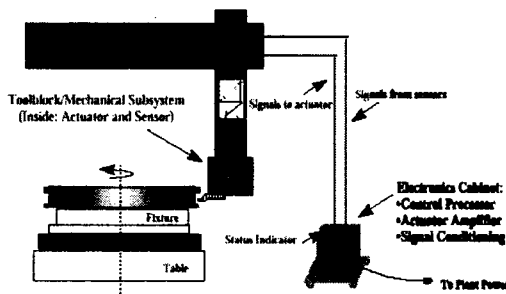


그림 14 수직 선반의 진동제어계

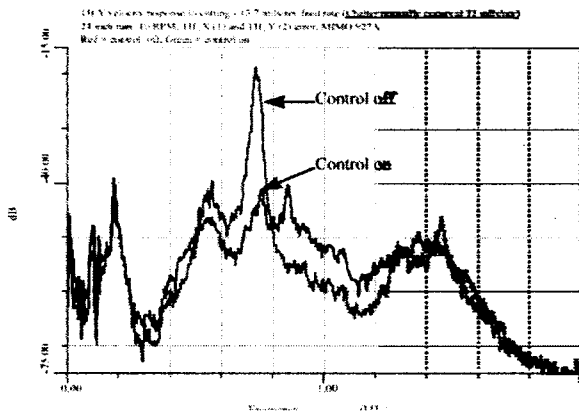


그림 15 수직 선반의 제진 효과

그 중의 한 예로서 그림 14에서와 같은 수직 선반의 경우를 들 수 있는데 공구를 장착하고 상하로 이송하는 램은 비교적 낮은 주파수의 급힘 진동 모드를 갖고 있다. 이들의 중 100 Hz~1 kHz 사이에 존재하는 세 저차 모드는 자유단인 램 하부에 큰 변위를 갖고 있어 채터에 지대한 영향을 미친다. 따라서 3축 가속도계를 공구홀더, 램의 X(반경방향), Y(접선방향) 방향 측면 등에 설치하고 이들로 부터의 진동신호를 이용하여 H^∞ 다변수 제어한 제어입력을 적층한 압전체 작동기에 가함으로써, 그림 15에서와 같이 피크치인 특히 3번째 모드의 큰 감쇠효과를 얻을 수 있었다.

한편, 산업용 로봇의 경우는 자중대 가반중량의 비가 10% 이하인 종래의 육중한 구조로 부터 점차 경량화 되고는 있으나 아직도 현장에서는 위치제어시 오차를 염려하여 유연 구조화 되지 못한 실정이다. 그러나 다양한 가반중량과 동작 속도, 자세에 대응할 수 있는 능동 진동제어 기술의 신뢰도가 제고된다면, 로봇의 링크를 적극적으로 유연화 하여^(5,13) 로봇 제작 단가 및 에너지 절감효과를 볼 수 있고 나아가 조립작업에서 RCC(remote center compliance)⁽¹⁴⁾를 증가하는 그 유연성을 활용하여 적용대상을 크게 확대할 수 있을 것이다.

3.6 기타 엘리베이터, 현가장치 등

엘리베이터가 점차 경량화, 고속화하고 고층용화 됨으로써 승강차와 균형질량을 연결한 채 쉬브(sheave)에 감기거나 풀리는 유연구조 즉 로프의 유연성이 특히 가감속시 진동이 야기되어 승차감 문제를 일으킬 수 있다. 이것은 쉬브축에 연결된 권양기의 토크와 쉬브의 각속도 혹은 승강차 변위간의 주파수 응답 함수로부터 알 수 있는데 대체로 비교적 낮은 10 Hz이하에 1, 2차 공진 모드를 갖고 있다⁽¹⁵⁾.

따라서 고속운전시 승차감을 향상시키기 위하여는 그러한 주파수 대역내의 수직방향의 진동을 제어하여야 하며 총 탑승 부하가 변동하며 승강차의 위치가 저층에서 최고층까지 변화할 때 로프의 길이 즉 강성 또한 변화함을 감안하면, 능동제어 기법이 역시 요구됨을

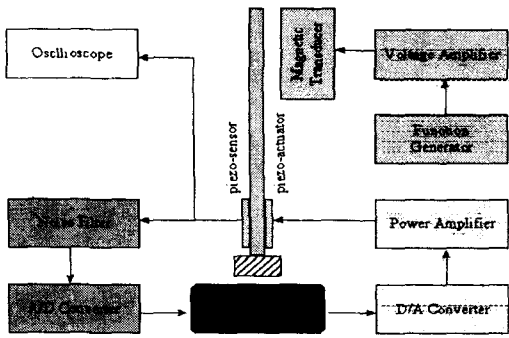


그림 16 외팔보의 진동제어계

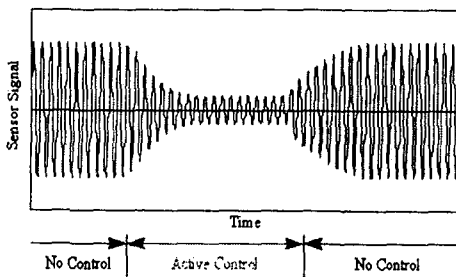


그림 17 외팔보의 제진효과

할 수 있다.

한편 펜 플로터의 경우 승강차 대신 펜 홀더, 로프 대신 와이어나 타이밍 벨트가 기능하는 것을 제외하면 전술한 엘리베이터와 거의 동일한 진동 문제가 존재한다. 다만 이 경우는 플로팅 질이 문제가 되며 고속화를 위하여 능동 제어시 소요되는 비용을 감수할 수 있느냐 여부만이 관건이다.

또한 불규칙 노면에 대비한 차량의 현가장치 중 충격 흡수기로서 현재 ER유체등을 이용한 반능동 제어 시스템이 고급 차종위주로 실용화되고 있다⁽¹⁶⁾. 또한 그림 16에서와 같이 GFRP로 만들어진 복합재료 외팔보의 진동을 압전 센서와 작동기로 제어한 결과 그림 17에서와 같이 1차모드가 70% 정도 감소되었음이 보고되었다.

4. 맺음말

구조 경량화와 제품의 고성능화 추세 그리고 환경 소음 및 진동에 관한 규제가 더욱 가속화됨에 따라 능동제어 기술은 현재의 항공/우주분야 뿐만 아니라 산업용 기계, 토목 구

조에 이르기까지 그 적용범위가 대폭 확대될 것이며, 기존의 작동기 및 센서도 이에 부응하여 점차 다양화 될 것이다.

그 중 많은 부분이 전술한 경량의 지능재료들로 대체될 것으로 보이며 구조물 외부에 부착하는 방식이 아닌 구조물 내부에 심어지는 나이가 분자수준까지로 결합된 형태의 복합재료의 형태를 취할 것으로 보인다. 또한 현재 갖고 있는 지능재료의 제한점을 감안하여 조합하여 사용하거나⁽¹⁷⁾, 그 점을 극복하여 쉽게 사용될 수 있고 강인한 물성을 가진 지능재료들이 더욱 개발될 것이다.

따라서, 제어방식에 있어서도 수개의 독립된 이산형태의 제어방식이 아니라 다수의 센서와 작동기를 구조물에 분포시킨후 그들을 좀 더 지능화한 제어 알고리즘을 통하여 연계하고 통합하는 형태의 제어가 출현할 것으로 보인다.

이와 함께 능동제어의 적용분야를 확대시키기 위하여는 시스템의 저가화와 신뢰성 제고에도 노력이 경주되어야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) L. Meirovitch, 1980, Computational Methods in Structural Dynamics, Sijthoff & Noordhoff.
- (2) L. Meirovitch, 1990, Dynamics and Control of Structures, John Wiley and Sons, Inc..
- (3) 임승철, 1995, "유연한 안테나 구조물의 진동 및 제어", 대한기계학회논문집, 제 9 권, 제 10 호.
- (4) L. Meirovitch, S. Lim, 1994, "Maneuvering and Control of Flexible Space Robots", AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 17, No. 3, May-June.
- (5) R.H. Cannon, Jr. and E. Schmitz, 1984, "Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot", International Journal of Robotics Research, Vol. 3, No. 3.
- (6) 남창호, 이근명, 1996, "항공기의 공탄성 제어를 위한 압전재료의 응용", 한국소음진

- 동공학회지, 제 6 권, 제 1 호.
- (7) S. Lim, Y.Y. Kim, 1996, " H^∞ Servo Control of Optical Pick-Ups", IASTED International Conference on Robotics and Manufacturing, Honolulu, Hawaii, Aug.19-22.
- (8) S. Lim and T.Y. Jung, 1998, "Robust Servo Control of High Speed Optical Pickups", IFAC Conference on System Structure and Control, Nantes, France, July 8-10.
- (9) 이호성, 1997, "하드 디스크 드라이브 개발에 관련된 기계기술의 현황", 한국소음진동공학회 지, 제 7 권, 제 3 호.
- (10) 민경원, 이영욱, 1995, "감쇠기가 설치된 비틀림형 건물의 자유진동", 대한건축학회 논문집, 제 11 권, 제 12 호.
- (11) Soong, T.T., 1990, Active Structural Control: Theory and Practice, Longman, London and Wiley.
- (12) S. Lim, L. Meirovitch, 1991, "Control of the Maneuvering SCOPE Structure", Proc. of the Eighth VPI&SU/AIAA Symposium on Dynamics and Control of Large Structures, Blacksburg, VA, June.
- (13) 임승철, 용대중, 1997, "유연한 수평 다관절 로봇의 진동제어", 한국소음진동공학회지, 제 7 권, 제 3 호.
- (14) G.M. Mair, 1988, *Industrial Robotics*, Prentice-Hall.
- (15) 정해준, 박진현, 최영규, 1998, "Long stroke 엘리베이터의 수직진동 억제를 위한 제어기 설계", 제 13 차 한국자동제어학술회의 논문집, 제 2 권.
- (16) 김학균, 허 훈, 1996, "FLC를 이용한 전기유전유체를 사용한 차량현가장치의 제어에 관한 연구", 한국소음진동공학회 추계 학술대회 논문집.
- (17) 박동원, 박용균, 박노준, 최승복, 1996, "하이브리드 스마트 구조물의 진동 제어", 한국소음진동공학회 추계 학술대회 논문집.