

반능동 및 능동 진동 제어 기법

한 영 민, 최 승 복*
(인하대학교 기계공학부)

1. 머리말

지난 수 십 년간 유연구조물에서부터 이산시스템(discrete system)에 이르기까지 다양한 동적 시스템들의 성능은 비약적으로 증대되어 왔다. 하지만 고성능의 동적시스템에 대한 요구는 더욱 더 높아지고 있으며, 이러한 요구는 진동 제어를 위한 다양한 작동기의 개발과 함께 그 제어기법에 대한 활발한 연구로 이어지고 있다. 구조물이나 시스템의 진동을 억제하기 위한 가장 간단한 방법으로는 수동형 제진장치를 이용한 수동제어(passive control)가 있다. 수동형 제진장치는 크게 질량 동조형과 에너지 소산형으로 나눌 수 있다. 전자는 주로 건물과 같은 구조물의 최상부에 설치되는 것으로 부가 질량과 강성으로 고유진동수를 가진 주파수에 맞추어 진동을 탄성에너지로 흡수하는 동흡진기이다. 그리고 에너지 소산형은 점성 혹은 점탄성 재료를 이용하여 변형할 때 발생하는 열로써 진동 에너지를 소산하는 것으로, 소산되는 에너지는 속도에 비례하는 특성을 갖는다. 이와 같이 수동 제어는 구조물이나 시스템의 감쇠 성능을 바꾸어 진동을 억제함으로써 동적 응답을 향상시키는 방법으로 외부 동력을 필요로 하지 않지만 그 성능이 매우 제한적이라 할 수 있다. 따라서 고성능이 요구되는 시스템에서는 추가적인 반능동 혹은 능동 작동기를 이용하여 내부에서 발생하거나 외부에서 들어오는 진동에 대응하는 제어력을 인가함으로써 효과적으로 진동을 저감시키게 된다. 현재 이러한 반능동 제어(semi-active control) 또는 능동 제어(active control) 방법이

다양한 구조물이나 시스템의 진동 제어에 많이 이용되고 있으며, 대표적으로 스카이훅(skyhook), LQG(linear quadratic gaussian), H_{∞} , QFT(quantitative feedback theory) 등과 같은 제어 기법들이 적용되어 오고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

또한 이러한 제어 기법들의 실제 구현에 있어서 기존의 전자기 작동기는 제어 입력의 포화나 응답속도 문제 등과 같은 하드웨어적인 문제로 인해 여러 가지 어려움이 있으며, 이러한 문제들은 지능재료를 이용한 작동기의 도입으로 해결될 수 있다. 잘 알려진 바와 같이 지능재료는 감지 및 작동 분야에 있어 외부 자극에 적절히 대응할 수 있으며, 마이크로프로세서와 결합되어 지능적으로 특정한 기능을 선택하고 실행할 수 있는 능력을 가진다. 현재 이러한 지능 재료로서 전기유동(electrorheological; ER) 유체, 자기유동(magnetorheological; MR) 유체, 압전재료(piezoelectric materials), 형상기억합금(shape memory alloy; SMA) 등이 있다. 전기유동유체는 전기장의 공급으로 뉴토니안(Newtonian) 유체에서 빙햄(Bingham)유체로의 상변화가 가능하여 속압소버, 엔진마운트 등을 이용한 진동 제어에 응용되고 있다. 또한, 극전화 현상을 통해 매우 빠른 반응 속도로 비교적 작은 제어력의 범위 내에서 작동기의 기능을 발휘할 수 있는 압전 재료와, 단위 중량당 큰 힘과 변위를 발생시킬 수 있는 형상기억합금 등이 고성능 작동기로서 구조물의 각종 능동 진동 제어에 이용되고 있다.

따라서 이 글에서는 다양한 동적 구조물이나 시스템의 동특성을 향상시키고 진동을 억제하기 위한 각종 반능동 제어 기법과 능동 제어 기법들의 특징 및 장단점

* E-mail : seungbok@inha.ac.kr / (032) 860-7319

에 대해서 살펴보고, 그 설계 방법을 다루고자 한다. 또한 실제 적용에 있어 지능재료를 이용한 유연구조물, 속업소버 등 다양한 동적 시스템에 대한 적용 사례를 들고, 이를 이용하여 각종 반능동 제어 기법 및 능동 제어 기법의 제어성능과 차이점 그리고 특징 등을 설명하고자 한다.

2. 반능동 제어 기법

반능동 제어 기법에 의한 진동 제어는 감쇠장치의 감쇠특성을 구조물의 진동특성에 따라 변화시켜 진동을 억제하는 개념으로, 외부에서 공급되는 에너지는 감쇠장치의 특성 변화에만 이용된다. 이러한 반능동 제어는 능동 제어에 비해 제어성능은 다소 떨어지지만 작동 메커니즘의 설계 시 구조가 간단하고 에너지 소모도 적은 반면 수동 제어에 비해 그 제어성능이 탁월하여 각종 진동제어시스템에 다양하게 응용되고 있는 제어기법이다. 그림 1은 이러한 반능동 제어의 개념을 잘 나타내고 있다. 그림에서 x 축은 속도, y 축은 제어입력을 나타낸다. 능동 제어가 속도의 방향에 관계없이 마음대로 제어입력(u)을 인가할 수 있는 반면, 반능동 제어는 2사

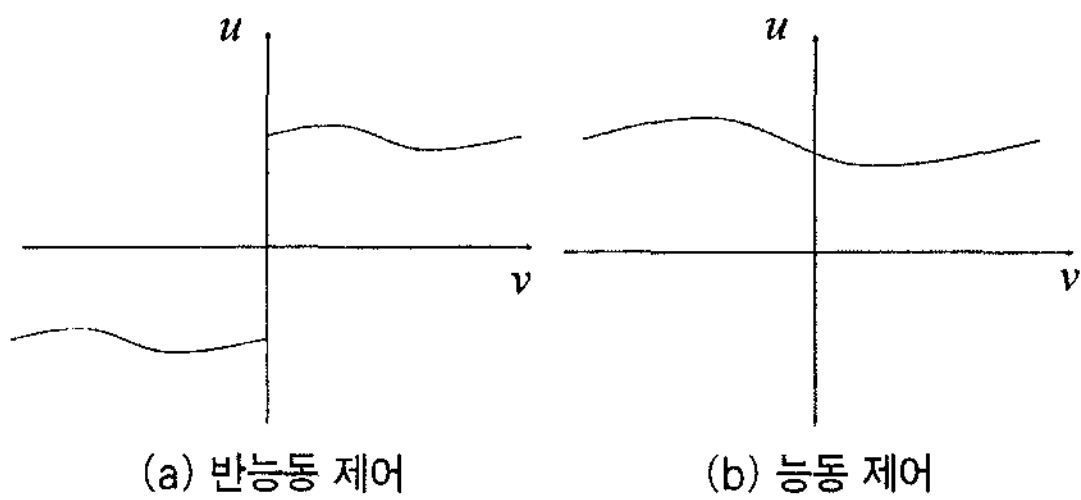


그림 1 반능동과 능동 제어의 개념도

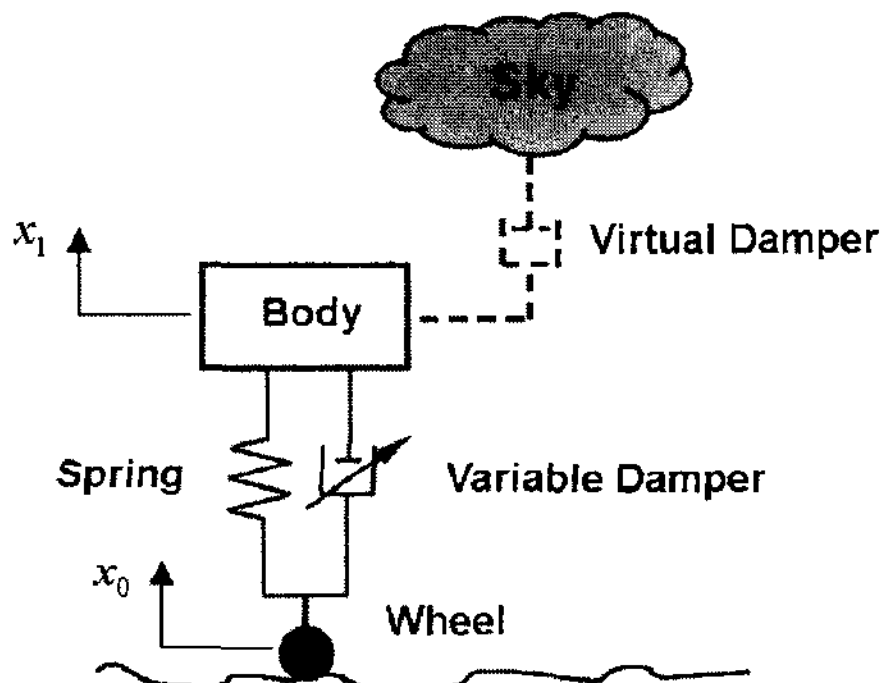


그림 2 스카이훅 제어의 개념도

분면과 4사분면에서 제어입력을 발생시키지 못하고 있다. 즉 시스템의 동적 운동의 속도 성분에 따라 한쪽 방향으로만 제어력을 발생시킬 수 있다. 예를 들어, 다음과 같이 2차의 간단한 수학적 모델로 표현되는 동적 시스템을 가정하자.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = u \quad (1)$$

여기서 m 은 질량, c 는 댐핑 계수, k 는 스프링 상수를 나타내고, u 는 제어 입력에 해당한다. 이와 같은 시스템에 대해 반능동 제어 입력은 $u = c(\dot{x})\dot{x}$ 와 같이 시스템의 댐핑 계수를 조절하는 것으로 표현할 수 있다. 현재, 시스템의 댐핑계수를 조절하는 대표적인 제어 기법으로 스카이훅(skyhook) 제어 알고리즘이 있으며, 반능동형 작동기와 함께 자동차 현가장치나 마운트 등의 제어 기법으로 널리 이용되고 있다.

스카이훅 알고리즘은 그림 2에 나타낸 것과 같이 차체 위의 공간상에 절대 고정 변위를 갖는 천정과 차체 사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상 댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용하는 것이다. 이 알고리즘은 구조가 간단하고 실제 적용이 용이하여 일반적으로 현가장치의 진동 제어 기법으로 많이 활용되고 있다. 그림에서 차체의 변위를 x_1 , 노면 가진을 x_0 라고 하면 요구 댐핑력은 $f_d = c_{sky}\dot{x}_1$ 로 정의된다. 여기서 c_{sky} 는 천정에 설치된 가상 댐퍼의 댐핑 계수이다. 따라서 적절한 제어입력을 통해 현가장치에 설치된 실제 가변댐퍼의 댐핑 계수 c_r 을 조절함으로써 요구 댐핑력과 같은 크기의 제어 댐핑력 u_{sky} 를 발생시키는 것이다. 이때 실제 시스템의 댐핑 계수는 다음과 같이 결정된다.

$$c_r = c_{sky} \frac{\dot{x}_1}{\dot{x}_1 - \dot{x}_0} \quad (2)$$

이 식에서 c_r 는 음의 값을 갖지 않으므로, 실제 적용에서 제어 입력을 결정함에 있어 요구 댐핑력을 완벽하게 추종하기 어렵다. 이는 시스템의 작동기가 반능동형이기 때문이며, 일반적으로 다음과 같은 반능동 조건을 적용하여 제어입력을 결정하게 된다.

$$u = \begin{cases} u_{sky}, & \text{for } u_{sky}(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) > 0 \\ 0, & \text{for } u_{sky}(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

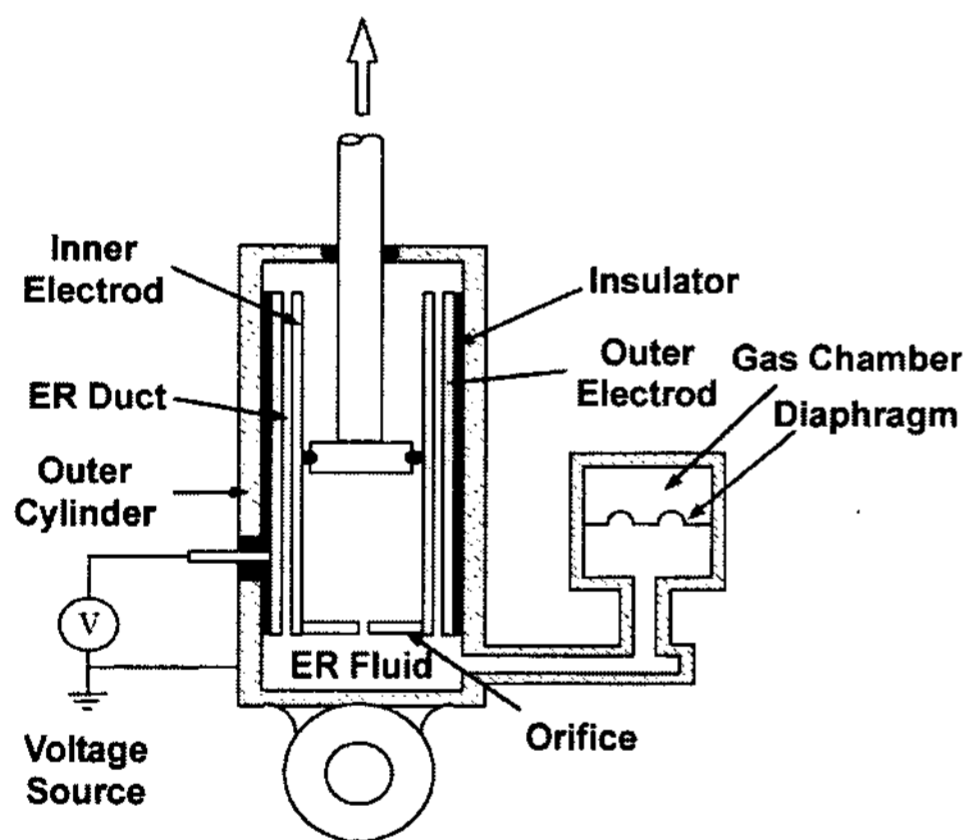
보다 나은 제어 성능을 얻기 위해 반능동 시스템에 SMC(sliding mode control)과 같은 능동 제어 기법을 적용하는 사례도 다수 찾아볼 수 있는데, 이러한 경우에는 식 (3)의 반능동 조건을 반드시 고려하여 능동 제어 알고리즘을 설계하여야만 한다.

현재 연구되고 있는 반능동형 작동기로는 가변 오리피스 감쇠기, 가변 마찰 감쇠기, ER 또는 MR 유체를 이용한 작동기 등이 있다. 특히, 최근 들어 ER 또는 MR 유체와 같은 지능재료를 이용한 속업소버와 마운트 등의 반능동형 작동기가 활발하게 연구되고 있다. 이러한 ER 유체(또는 MR 유체)는 전기장(또는 자기장) 무부하시에는 비전도성(또는 저투자율) 용매에 분산된 전도성(또는 상자성) 입자가 자유로이 운동을 하는 뉴토니안(newtonian) 유체와 같은 거동을 나타내지만 전기장(또는 자기장) 부하시에는 항복응력을 갖는 빙햄(bingham) 거동을 나타내게 된다⁽¹⁾. 즉, 입자들이 체인 구

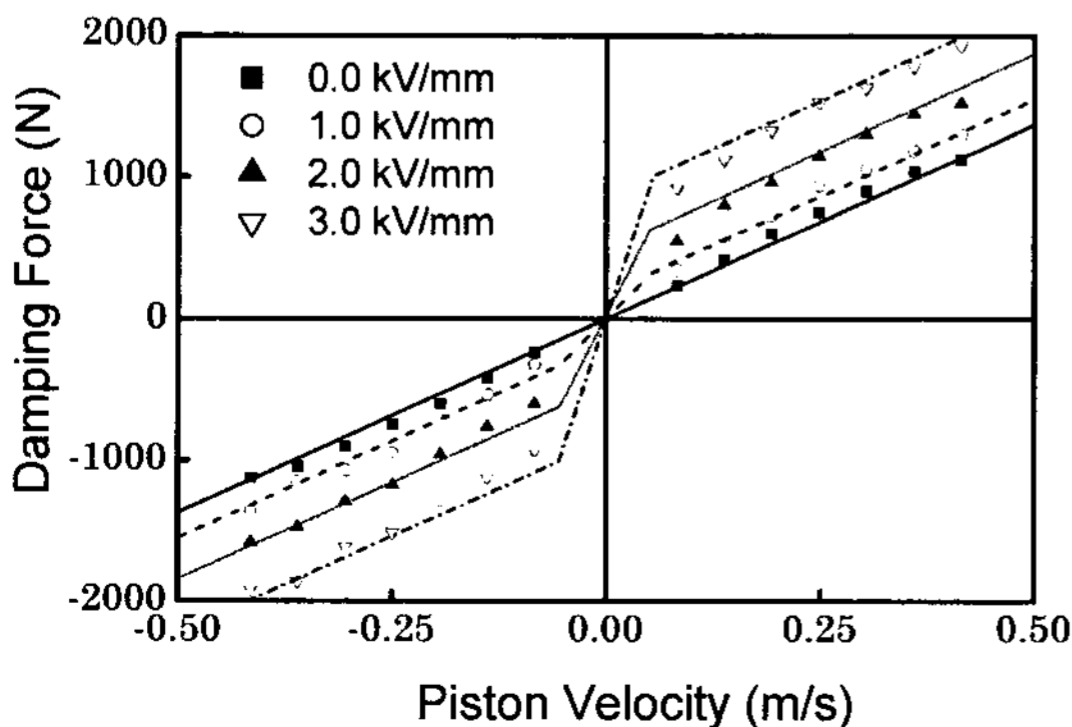
조를 형성하여 외부에 가해지는 전단력에 대한 저항력을 갖게 되고, 전기장(또는 자기장)의 세기에 따라 연속적인 제어가 가능하게 된다. 이러한 ER 또는 MR 유체는 현가장치의 가변 댐퍼나 엔진 마운트에 적용되거나 또는 구조물에 직접 삽입되어 반능동 진동 제어를 수행하게 된다.

그림 3(a)는 차량의 현가장치에 적용될 수 있는 ER 속업소버이다⁽¹⁾. 그림에서 보는 바와 같이 전원이 연결되어 있는 내측 실린더와 외측 실린더 그리고 가스 챔버와 피스톤으로 구성되어 있다. 내·외측 실린더 사이에는 ER 유체가 유동하도록 원형의 덕트가 구성되어 있으며, 피스톤의 운동에 따라 유체가 덕트를 따라 상하로 유동하게 되고, 이때 인가되는 전기장의 세기에 따라 그림 3(b)와 같이 댐핑력이 연속적으로 변하게 된다. 그리고 그림 4는 ER 속업소버를 적용한 차량 반능동 현가장치의 구성을 보여주고 있다. 이 때 스카이훅 제어 알고리즘에 의한 ER 댐퍼의 제어 댐핑력은 차륜이 연결된 차체 부분의 절대속도 \dot{z}_s 을 고려하여 $F_{ER} = c_{sky}\dot{z}_s$ 로 결정된다. 여기서 c_{sky} 는 스카이훅 제어 이득치이며, 물리적으로 댐핑계수를 의미한다. 그리고 ER 현가장치가 반능동형이므로 식 (3)에 의한 반능동 조건이 부여된다.

그림 5는 차량이 범퍼를 넘어갈 때와 포장 도로를 주행할 때의 응답특성을 보여주고 있다. 그림 5(a)의 과도 응답은 높이가 7 cm, 폭이 80 cm인 범퍼를 3.08 km/h로 주행할 때의 제어결과이다. 그리고 포장도로의 노면거칠기 상수는 0.45 m¹이고, 상호분산은 300 mm²이고 차량의 주행속도는 72 km/h 이다. 결과에서 보는 바와 같



(a) 구성도



(b) 전기장에 따른 댐핑력

그림 3 ER 속업소버

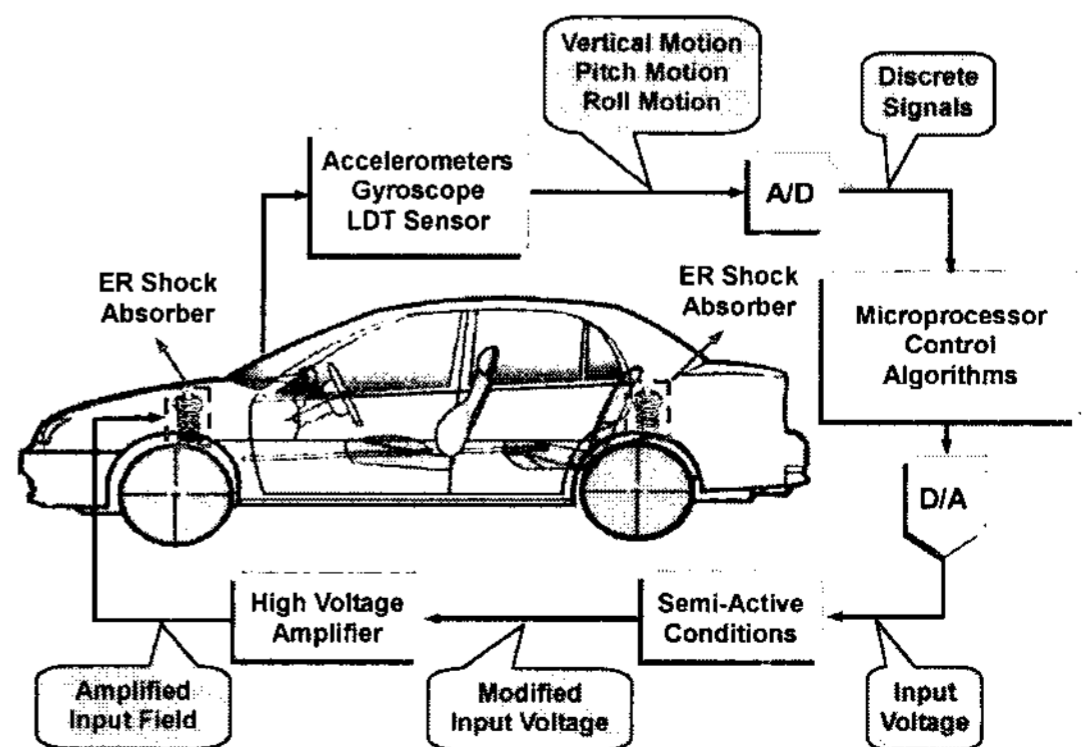
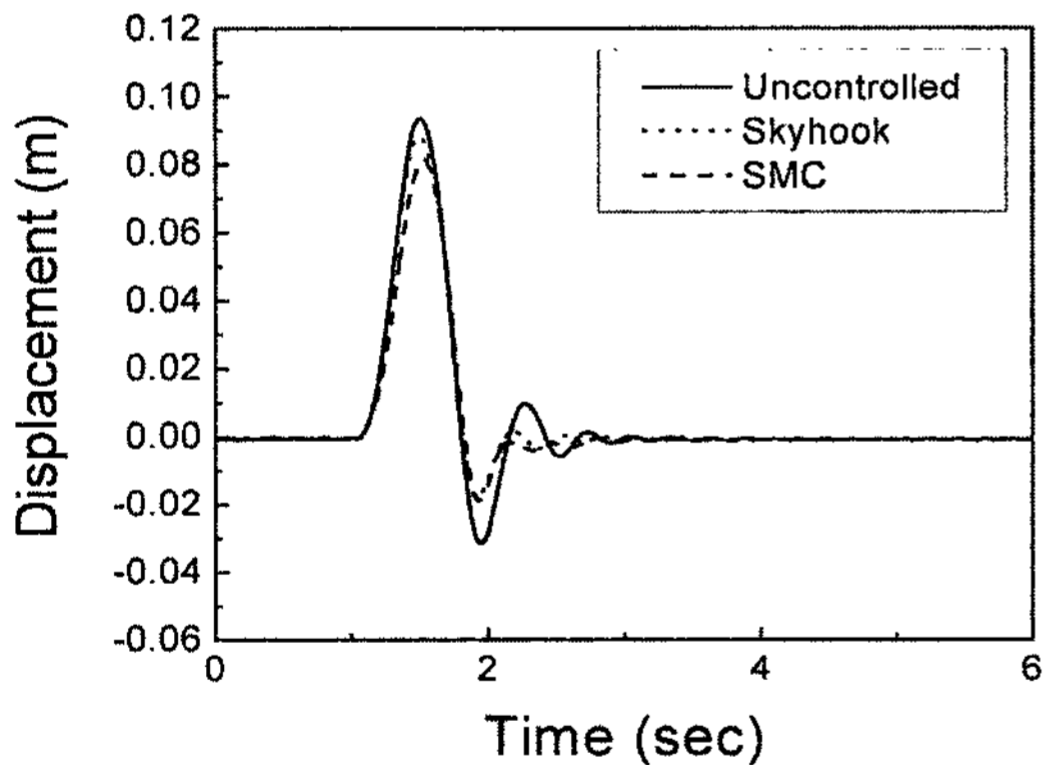


그림 4 반능동 현가장치 제어의 구성

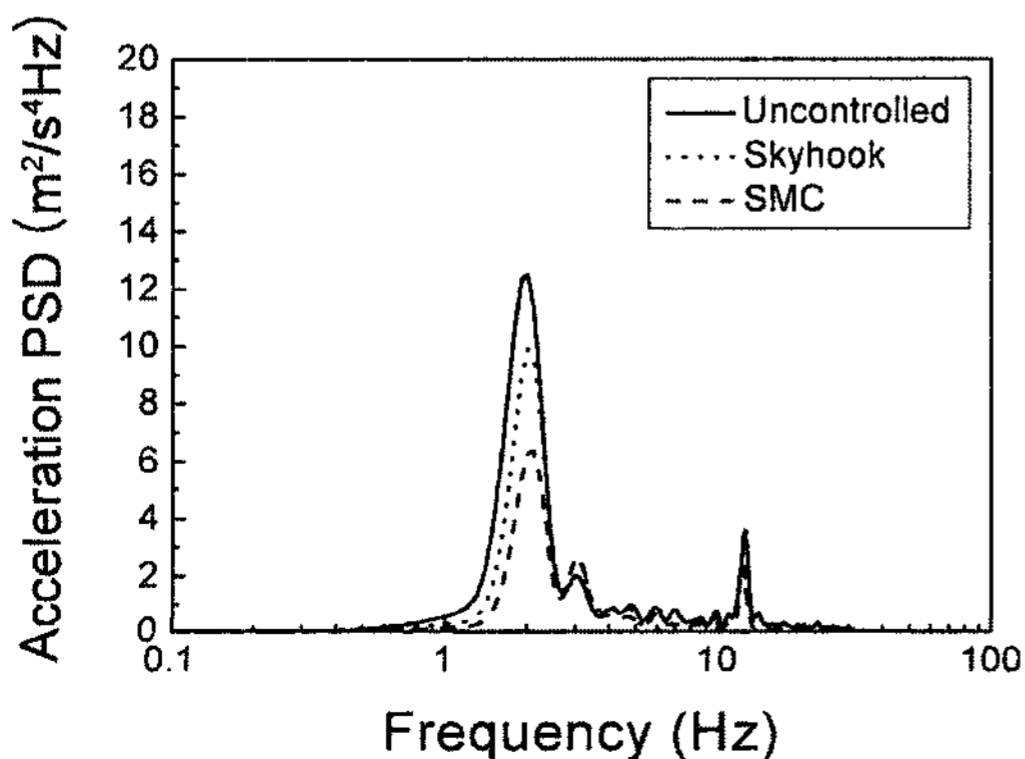
이 슬라이딩모드 제어기와 같은 강건 제어기에 비해 다소 성능이 떨어지기는 하지만 스카이훅 제어 수행 시 진동이 최대 30%까지 저감되어 차량의 승차감과 안정성이 증대됨을 알 수 있다.

이상과 같은 반능동 제어 기법 이외에도 ER 유체의 반능동적인 특성을 이용하여 제어로직을 구성할 수 있는데, 대표적으로 그림 6과 같이 ER 유체를 유연구조물의 내부에 삽입하여 진동을 저감하고자 하는 경우이다⁽⁴⁾. 즉 ER 유체에 인가되는 전기장의 세기에 따라 구조물의 댐핑과 강성 등 동적 특성이 변하고, 이에 따라 진동이 억제된다. 이때 요구 전기장은 그림 7의 입력 전기장에 따른 주파수 응답에 따라 퍼지로직을 응용하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{if } 0 \leq \omega < \omega_1 \text{ or } \omega_3 \leq \omega < \omega_4 \text{ then } E_d = E_2 \\ &\text{if } \omega_1 \leq \omega < \omega_2 \text{ or } \omega_4 \leq \omega < \omega_5 \text{ then } E_d = 0 \quad (4) \\ &\text{if } \omega_2 \leq \omega < \omega_3 \text{ or } \omega_5 \leq \omega < \omega_6 \text{ then } E_d = E_1 \end{aligned}$$



(a) 범프 통과 시



(b) 포장도로 주행 시

그림 5 스카이훅 제어기를 이용한 진동 제어

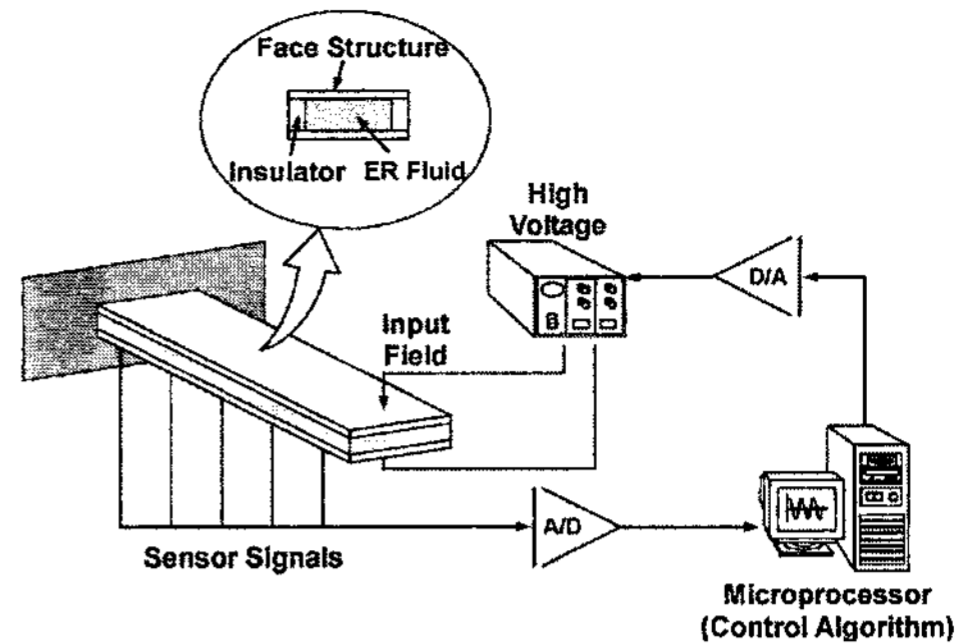


그림 6 ER 외팔보의 진동 제어 구성

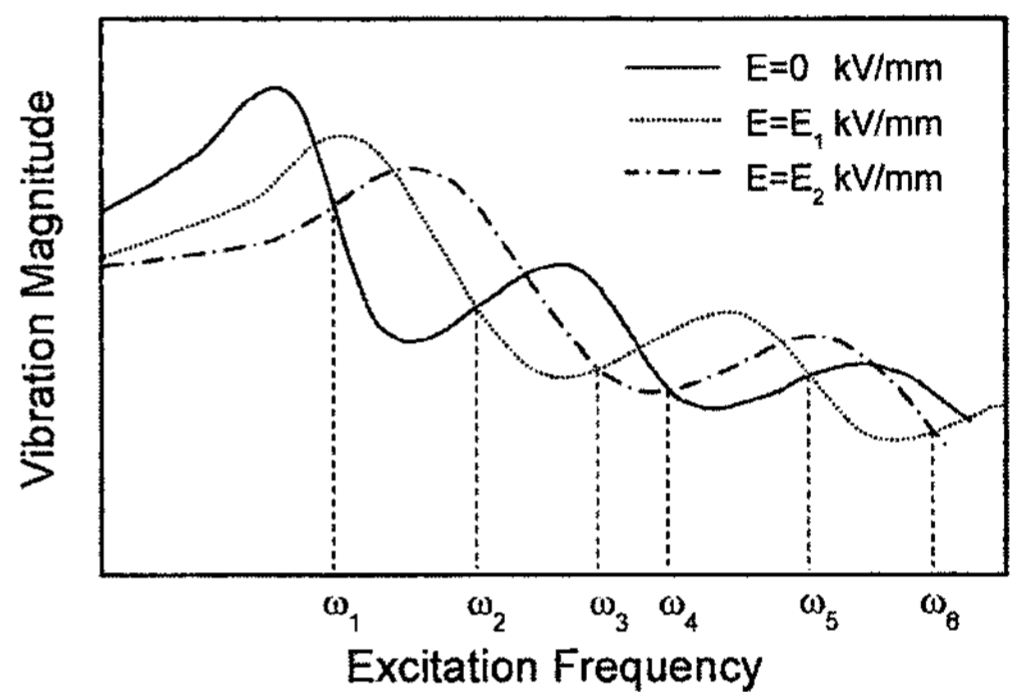
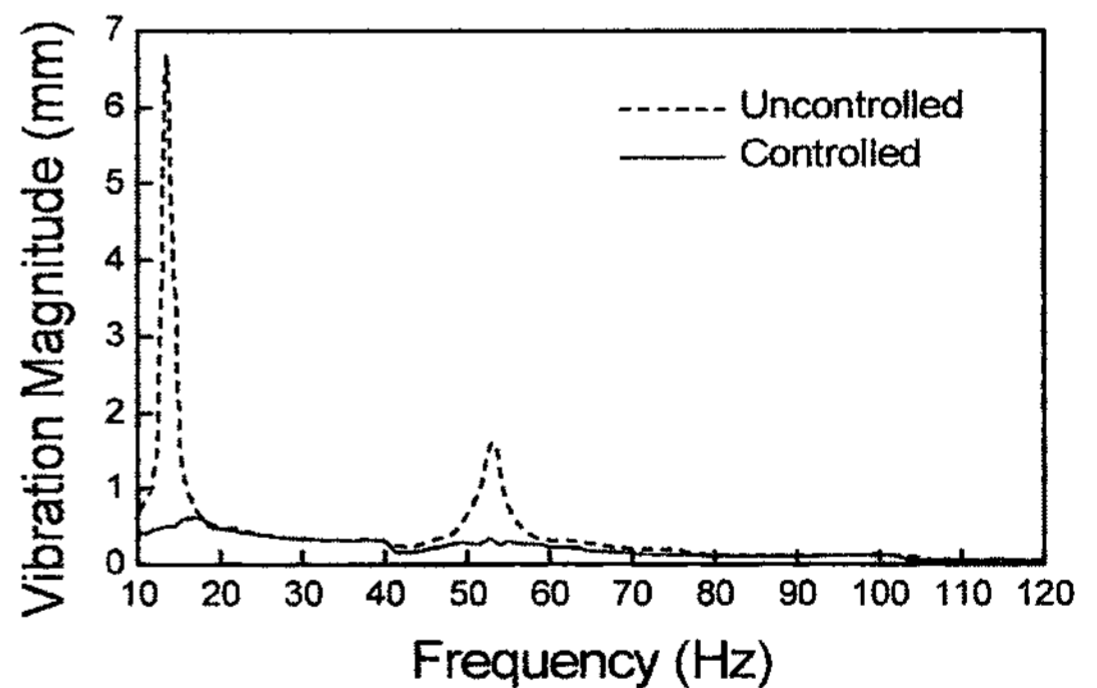
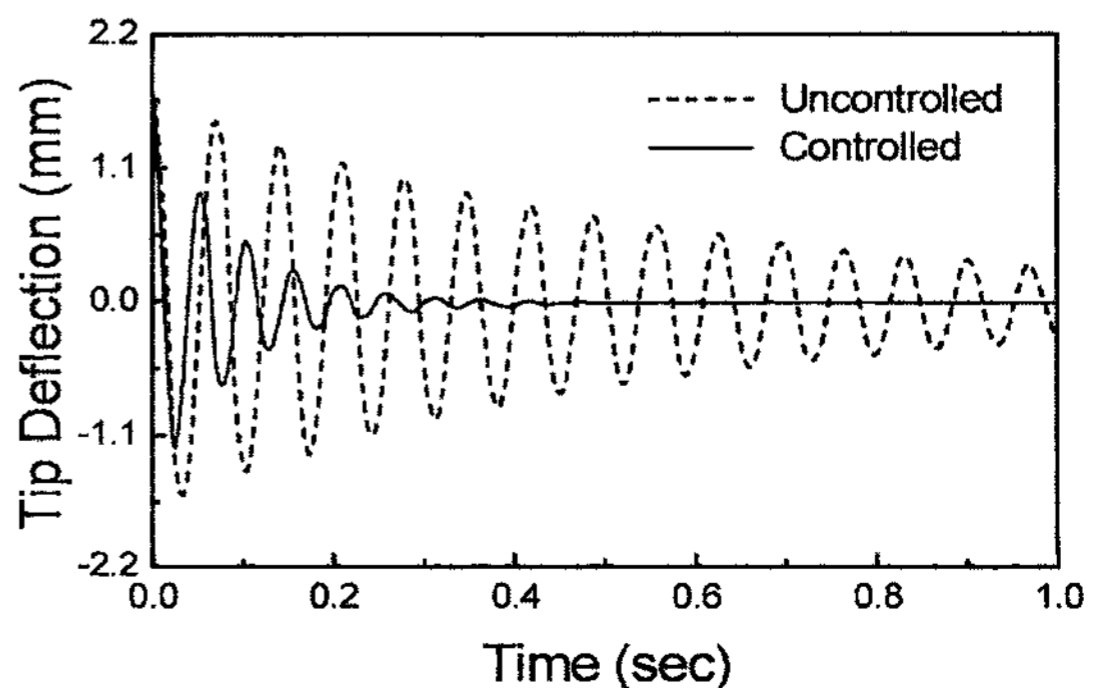


그림 7 전기장에 따른 주파수 응답함수



(a) 주파수 영역



(b) 시간 영역

그림 8 반능동 제어기를 이용한 진동 제어

여기서 ω_i 는 외란의 주파수이며, E_i 는 요구 전기장이다. 그림 8의 결과에서 보는 바와 같이 전기장 인가에 따라 시스템의 동적 특성이 변화하여 진동이 효과적으로 감소됨을 알 수 있다. 이러한 제어기법은 평판 구조물에도 확대 적용될 수 있다.

3. 능동 제어 기법

능동 진동 제어는 외부에서 별도의 에너지를 공급받아 진동 제어를 수행하는 것으로 동적 상태를 감지하는 센서, 제어력을 산출하는 제어기, 제어력을 발휘하는 작동기 등으로 구성되며, 일반적으로 되먹임(feedback) 제어구조를 갖게 된다. 따라서 최소한의 성능과 안전성 확보에 국한되는 기존의 수동 제어의 단점을 극복하여 탁월한 진동저감 효과와 안전성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 그림 1에서 살펴본 바와 같이 능동 제어 개념은 시스템의 강성과 댐핑을 마음대로 조절하여 양방향으로 제어력을 인가할 수 있다는 점에서 반능동 제어와 확연하게 구분된다. 식 (1)에 주어진 시스템에 대한 능동 제어 입력은 $u = f(x, \dot{x})$ 로 표현될 수 있다. 이와 같은 능동 제어의 구현에 있어 가장 중요한 부분 중의 하나는 능동형 작동기의 성능이라 할 수 있다. 따라서 더 높은 정밀도, 더 빠른 응답, 더 적은 에너지 소모를 위한 작동기의 개발이 요구되고 있으며, 최근 압전재료나 형상기억합금을 이용한 고성능의 능동형 작동기의 개발과 함께 그 제어 기법에 대한 활발한 연구가 이루어지고 있다.

능동 제어를 위해 다양한 제어이론들이 개발되어 왔지만, 가장 대표적인 제어이론으로는 최적제어와 강건제어 등이 있다. LQ(linear quadratic)제어는 제어 시스템의 설계를 위해 1960년 이후에 개발된 최적제어 기법이다. LQ문제 자체는 최적제어의 강력한 기법들의 중요한 부분집합이라 할 수 있으며, 수많은 변형과 확장이 존재하는데 대표적으로 LQG(linear quadratic Gaussian)가 있다. LQ로 문제를 정형화하는 가장 큰 이점은 분석하기 쉽고 간단하게 구현할 수 있는 선형 제어 법칙을 사용할 수 있다는 장점을 가진다. 일반적으로 상태공간의 선형시스템에 대한 목적함수는 다음과 같이 시스템의 상태와 제어입력의 2차 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{Cx} \\ J &= \frac{1}{2} \int_0^T \mathbf{x}^T \mathbf{Qx} + \mathbf{u}^T \mathbf{Ru} dt \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, \mathbf{x} 는 시스템의 상태, \mathbf{y} 는 시스템의 출력이고, \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} 는 각각 시스템 행렬, 입력 행렬, 출력 행렬이다. \mathbf{Q} 는 양반한정이고 \mathbf{R} 은 대칭적인 양한정 행렬이다. 식 (5)와 같은 제어 문제는 LQ regulator(LQR) 문제로 알려져 있다. LQR은 좋은 안정성 여유와 민감도 특성을 가진다. 목적함수는 시스템의 상태 및 제어입력의 가중치가 적용된 에너지의 합으로 표현된다. \mathbf{R} 이 \mathbf{Q} 에 비하여 상대적으로 크다면 제어 에너지가 비중있게 다루어진다는 것을 의미한다. 이는 물리적으로 작은 모터 및 작동기 등으로 표현될 수 있을 것이다. 만약 \mathbf{Q} 가 \mathbf{R} 보다 크다면 시스템의 상태가 더 큰 비중으로 다루어져 시스템의 상태에 있어서 과도한 흔들림과 오버슈트를 피하기 위해서 매우 감쇄가 큰 시스템을 만들게 될 것이다. 최적제어 문제의 해로부터 다음과 같은 제어기를 구할 수 있다.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{Kx}, \quad \mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{P} 는 Riccati 방정식의 해이다.

LQR 문제에서는 시스템의 모든 상태들이 측정이 가능하다고 가정한다. 그러나 실제로 시스템의 모든 상태를 측정하는 것은 불가능하므로 Kalman-Bucy 필터 등의 추정기를 사용하게 된다. 최적 추정 문제는 잡음이 포함된 측정값으로부터 최상의 상태를 추정하는 것이다. 시스템과 잡음의 통계적 특성에 대한 특정한 가정 하에 최적 추정기는 표준 관측기와 같은 구조를 가지는 선형시스템으로 표현될 수 있다. 예를 들어, 잡음이 있는 시스템과 2차의 목적함수를 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{\Gamma w}, \quad \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{v} \\ J &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E \left[\int_{-T}^T \mathbf{x}^T \mathbf{Qx} + \mathbf{u}^T \mathbf{Ru} dt \right] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 \mathbf{w} 는 임의의 시스템 외란이고, \mathbf{v} 는 임의의 측정 잡음을 나타낸다. 외란과 잡음은 모두 백색 Gaussian이며 영의 평균을 가진다고 가정한다. 백색 Gaussian 잡음에 영향을 받은 불완전한 측정 하에서 2차의 목적함수에 대한 선형시스템의 최적제어는 LQ Gaussian(LQG) 문제로 정의되며 제어블록 다이어그램은 그림 9와 같

다. 이때 추정된 시스템의 상태는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \\ L &= A\Sigma C^T (C\Sigma C^T + V)^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

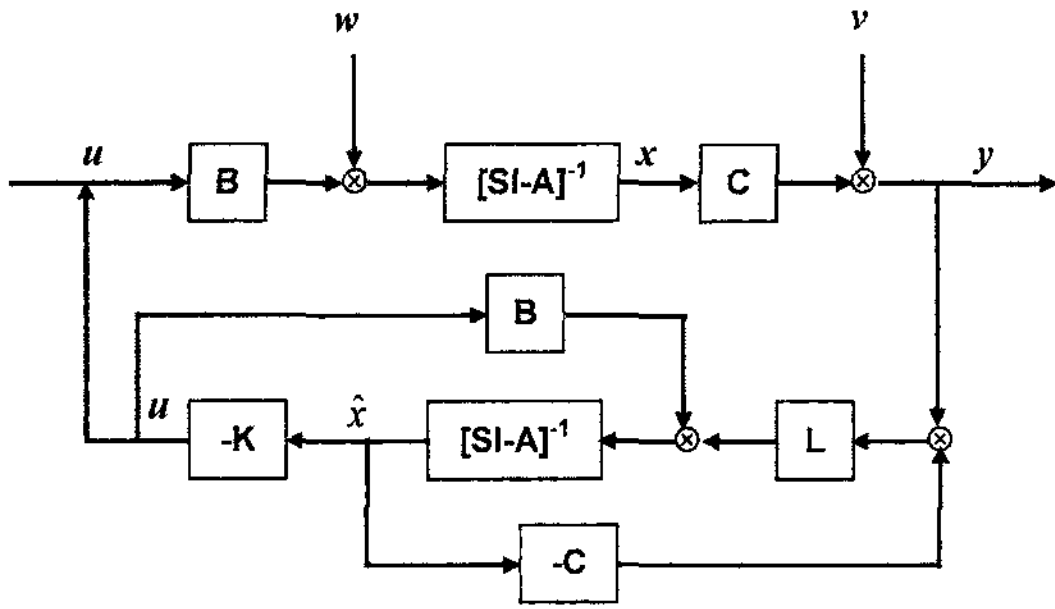


그림 9 LQG 제어의 블록다이어그램

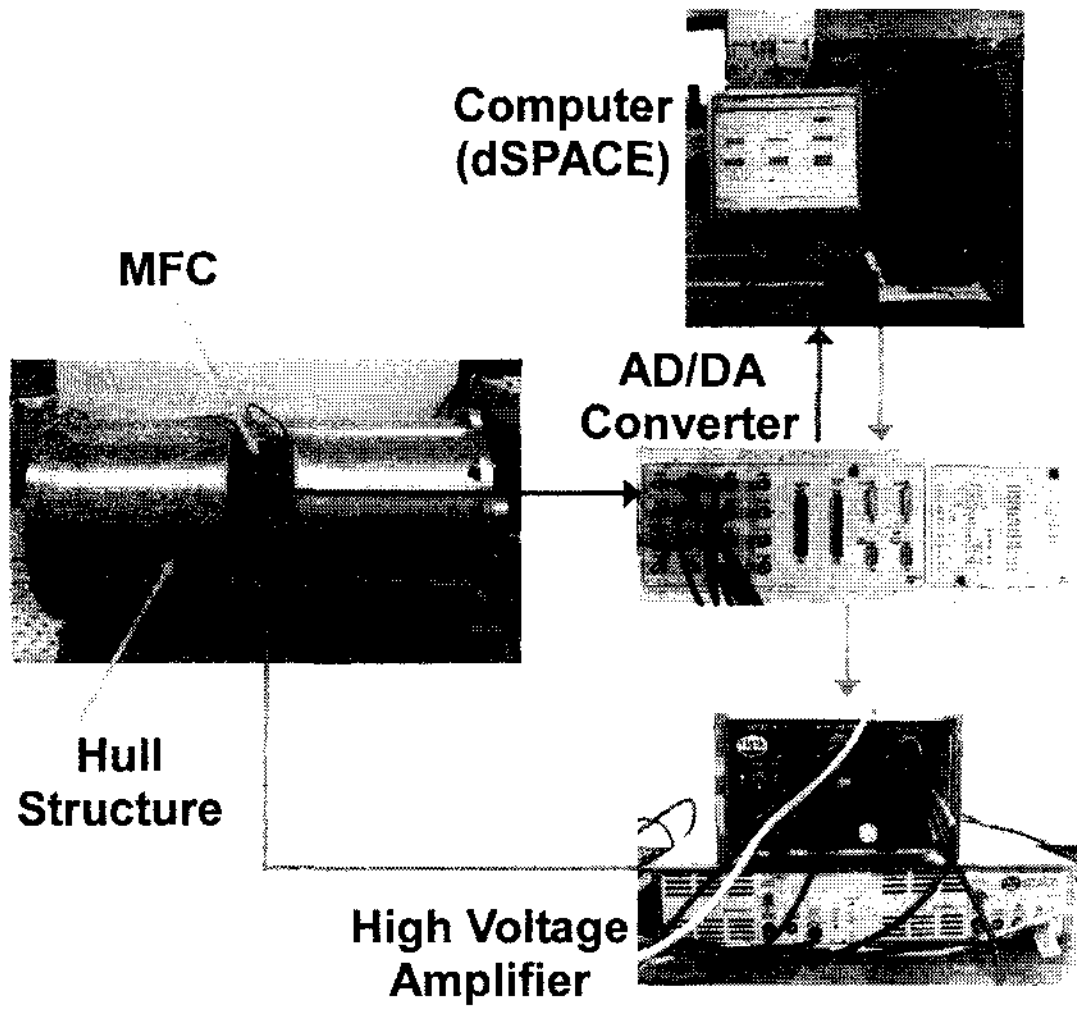


그림 10 Hull 구조물 진동 제어를 위한 구조도

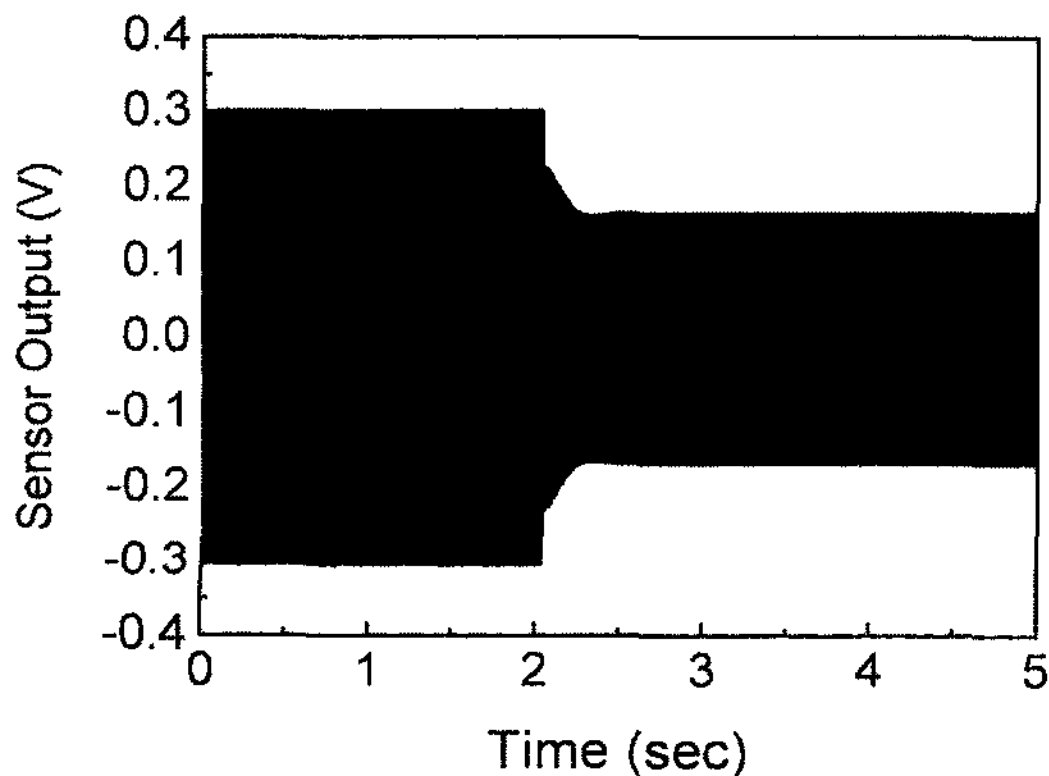


그림 11 LQG 제어기를 이용한 진동 제어

여기서 L 은 관측기 이득이며, Σ 는 Riccati 방정식의 해이다. 이때, 제어가 $u = -K\hat{x}$ 이다.

그림 10은 hull 구조물의 LQG진동 제어 구성을 보여주고 있다⁽²⁾. 적용된 작동기는 유연하면서도 큰 힘을 발휘할 수 있는 압전 MFC(macrofiber composite)이며, 그림 11은 475 Hz의 사인파로 가진된 강제진동 시 (3,1)모드에서 최대 40%의 진동 감쇄 효과를 보여주고 있다. 결과에서 나타난 바와 같이 노이즈의 영향이 큰 고주파 영역에서도 LQG제어가 진동을 잘 억제하고 있음을 알 수 있다.

최적제어 기법은 시스템이 정확히 모델링 될 경우 성능면에서는 어느 정도 목적을 달성할 수 있지만, 다변수 시스템으로의 확장에 대한 어려움과 실제 시스템에 적용하였을 경우 안정성이 큰 문제가 될 수 있다. 그리하여, 1980년대 이후 전실안정성이 제어의 주된 관심사가 되면서 QFT, H_∞ , SMC등의 강건 제어 이론이 활발히 연구되고 왔다. 그 중에서 H_∞ 는 영국의 수학자 Hardy가 제안한 수학적 개념으로서 Hardy space라고도 불리는 모든 안정한 전달함수의 집합을 의미한다. 이러한 수학적 개념을 바탕으로 1981년 G. Zames에 의하여 처음 주파수 영역에서의 최대-최소 문제(min-max problem)으로 성립되었다. 수학적으로 어려운 개념과 복잡한 계산으로 인해 많은 어려움이 있었지만, 1988년 Glover, Doyle 등에 의해 상태공간 해법이 제시되면서 활발한 연구가 시작되었다.

H_∞ 설계기법은 제어문제를 정량적으로 다루기 위해 시스템의 크기를 나타내는 놈(norm)을 이용하는데, 그 중에서도 H_∞ -놈을 사용하여 Hardy space에 포함되는 안정한 페루프 전달함수를 갖는 시스템을 대상으로 한다. H_∞ -놈을 수학적으로 정의하면 다음과 같다.

$$\|T(j\omega)\|_\infty = \sup_{\omega} \sigma_{\max} [T(j\omega)] = \sup_{u \neq 0} \frac{\|y\|_2}{\|u\|_2} \quad (9)$$

여기서, T 는 페루프 전달함수이며, σ_{\max} 는 페루프 전달함수의 어느 한 주파수에서 최대 특이치(maximum singular value)를 의미한다. 이는 물리적으로 시스템의 이득을 의미하며, SISO(single input single output)에서의 시스템 이득(gain)을 MIMO(multi input multi output)로 확장시킨 개념이다. 또한, 식 (9)에서 보는 바와 같이 유한한 에너지를 갖는 입력신호에 대한 최대 출력에

너지를 의미한다. 따라서, $u(t)$ 가 외란입력이라면 $T(j\omega)$ 은 외란에 의해서 발생할 수 있는 출력 중 최대 값을 의미하므로 최악의 경우(worst case)의 시스템 이득이라고 할 수 있으며, 이러한 H_∞ -norm을 최소화 시킬 수 있는 제어기를 찾는다면, 외란에 의한 영향을 최소화시킬 수 있는 제어기를 설계할 수 있다. 그리고, $u(t)$ 가 시스템의 불확실성에 의한 가상적인 입력이라 가정하면 불확실성에 대하여 강건한 제어기의 설계가 가능해진다.

그림 12는 H_∞ 제어 시스템의 기본적인 구성도를 나타내고 있으며, 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\underset{K(S) \text{ stabilizing}}{\text{Find}} \|F_L(P, K)\|_\infty \leq \gamma \quad (10)$$

여기서, P 는 확장 플랜트(augmented plant)를 나타내며, $F_L(P, K)$ 는 선형 분수 변환(linear fractional transformation)으로 w 에서 z 로의 페루프 전달함수를 의미하며, 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F_L(P, K) &= T_{zw} \\ &= P_{zw} + P_{zu}K(I - P_{yu}K)^{-1}P_{yw} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 P_{ij} 는 P 의 요소로써 입력 i 에서 출력 j 로 가는 전달함수이다.

페루프 전달함수는 설계목적에 따라 다양하게 선택할 수 있으며, 가장 일반적인 것으로는 감도 함수(S), 상보 감도 함수(T) 등이 있고, 여기에 적절한 가중함수를 도입하여 주파수 영역에서 성능과 안정성을 조정한다. 가장 잘 알려진 혼합감도함수 문제는 이러한 S 와 T 를 동시에 고려한 것이다. 그리고 H_∞ 제어기에 의한 전실 안정성은 다음 식과 같이 정의되는 안정여유값(stability margin)으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} 1 - \frac{1}{\|T\|_\infty} &\leq \text{guaranteed GM} \leq 1 + \frac{1}{\|T\|_\infty} \\ \text{guaranteed PM} &= \pm 2 \sin^{-1} \left(\frac{1}{2\|T\|_\infty} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

이와 같은 H_∞ 제어는 진동 제어 뿐만 아니라 형상기억 합금을 이용한 HDD(hard disk drive) 서스펜션 제어 등에도 다양하게 활용되고 있다.

현대 강건제어 이론은 주로 norm을 이용하여 제어기를 설계하는데 반하여, QFT(quantitative feedback theory) 제어이론은 고전제어 이론을 근거로 한 주파수 영역에 기초를 두고 제어기 설계가 이루어진다. 따라서 구조적 불확실성(structural uncertainty)과 비구조적 불확실성(unstructural uncertainty)을 동시에 다룰 수 있고, 외란 제거 문제도 함께 다룰 수 있는 장점을 갖고 있다. 특히 이 이론은 측정된 주파수 응답으로도 제어기 설계를 할 수 있어 제어기 설계자로 하여금 쉽고 효과적으로 제어기 설계와 제어기 구현을 가능하게 한다. 이러한 분야에 있어 일찍이 Bode는 루프 이득 설계(loop-gain shaping)를 생각했으며, 후에 Horowitz에 의해 루프 가중치 설계에 기초한 QFT 제어이론으로 구체화되었다.

QFT는 그림 13의 Nichols chart(NC)를 이용하여 변수 불확실성을 갖는 플랜트(P)에 요구되는 강건 제어기(G) 설계를 이룰 수 있다. 안정여유값은 이득여유(g_m), 위상여유(γ), 또는 이에 따른 M_L 궤적으로 대표될 수 있다. NC상의 M_L 궤적은 제어시스템에 대한 개루프 전달함수의 Nichols선도가 넘어서는 안되는 경계를 형성한다. 따라서 페루프 전달함수의 크기가 시스템의 대

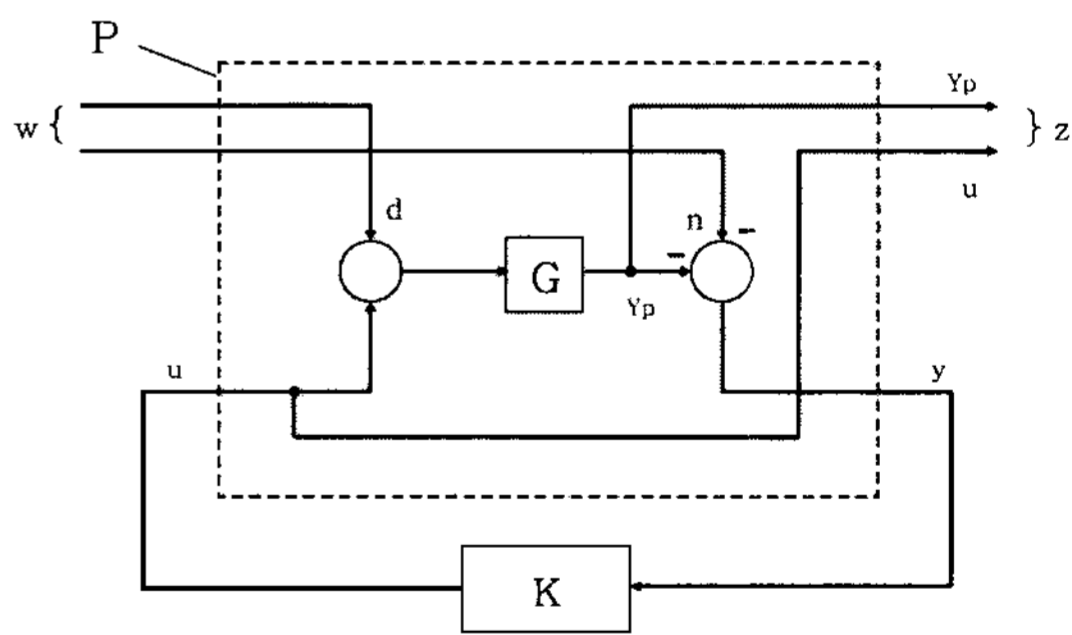


그림 12 H_∞ 제어기의 개념도

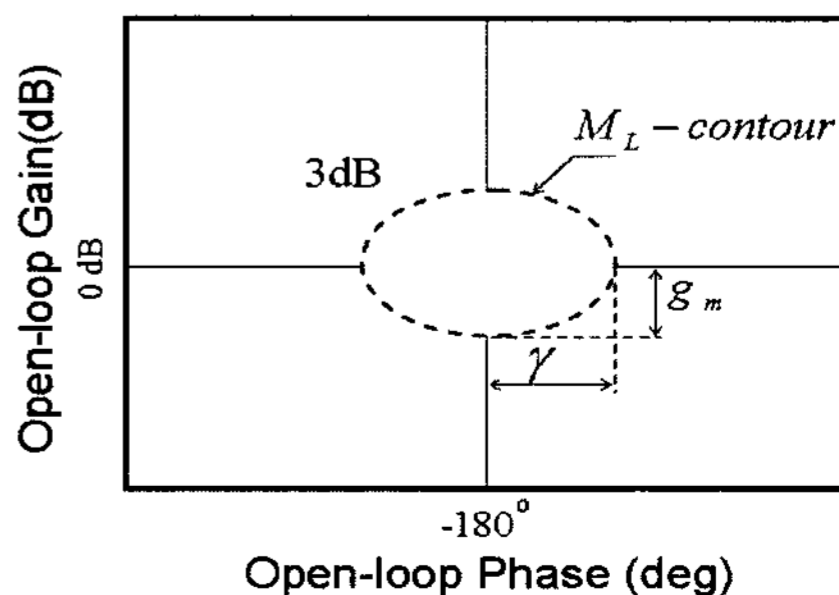


그림 13 Nichols chart의 안정여유

역폭내에서 시스템의 전 불확실성에 걸쳐 주어진 값 보다 작아지는 것이 요구된다.

안정기준 또는 M_L 궤적밖에 있는 대표유리함수 (representative rational function)는 극점과 영점을 공칭루프 가중치에 곱함으로써 얻을 수 있다. P_0 가 공칭플랜트라면 공칭 루프 가중치는 $L_0 = GP_0$ 이다. 따라서 안정기준과 외란제거 기준을 몇 개의 주파수에 대해 NC 상에 경계로 표시한 후 각 주파수에 대해 공칭루프 가중치 L_0 가 임계 구역 밖에 위치하도록 제어기를 설계한다.

그림 14는 QFT 제어를 복합재료 외팔보에 적용한 사례를 보여주고 있다⁽³⁾. 여기에 적용된 압전재료 작동기는 재료의 극 전화 현상을 통해 기계적 변형을 일으키면 전압이 발생하고, 역으로 전기장이 부가되면 기계

적 변형을 발생시키는 압전효과(piezoelectric effect)를 가진 재료로써 미소변위 분해능이 우수하고 응답속도가 매우 빠르며 넓은 주파수 대역을 갖는 장점이 있다. 그림 15는 공칭 플랜트에 대한 응답곡선을 NC 상에 도시한 것이다. 플랜트의 불확실성으로 M_L 궤적은 고주파수 영역에서 U-궤적으로 나타나고 있다. NC 상에서 응답곡선은 U-궤적 안에 있는 두 임계구역을 볼 수 있는데 이 부분은 스마트 구조물의 고유진동수 부근임을 알 수 있다. 안정여유값은 3 dB이며, 이는 약 40°의 위상여유 또는 5 dB의 이득여유를 뜻한다. 그림 16은 설계된 QFT제어기를 적용한 진동 제어 결과를 보여주고 있다. 결과로부터 선단질량의 유무에 따른 불확실성에도 불구하고 우수한 진동 억제 효과가 나타남을 알 수 있다.

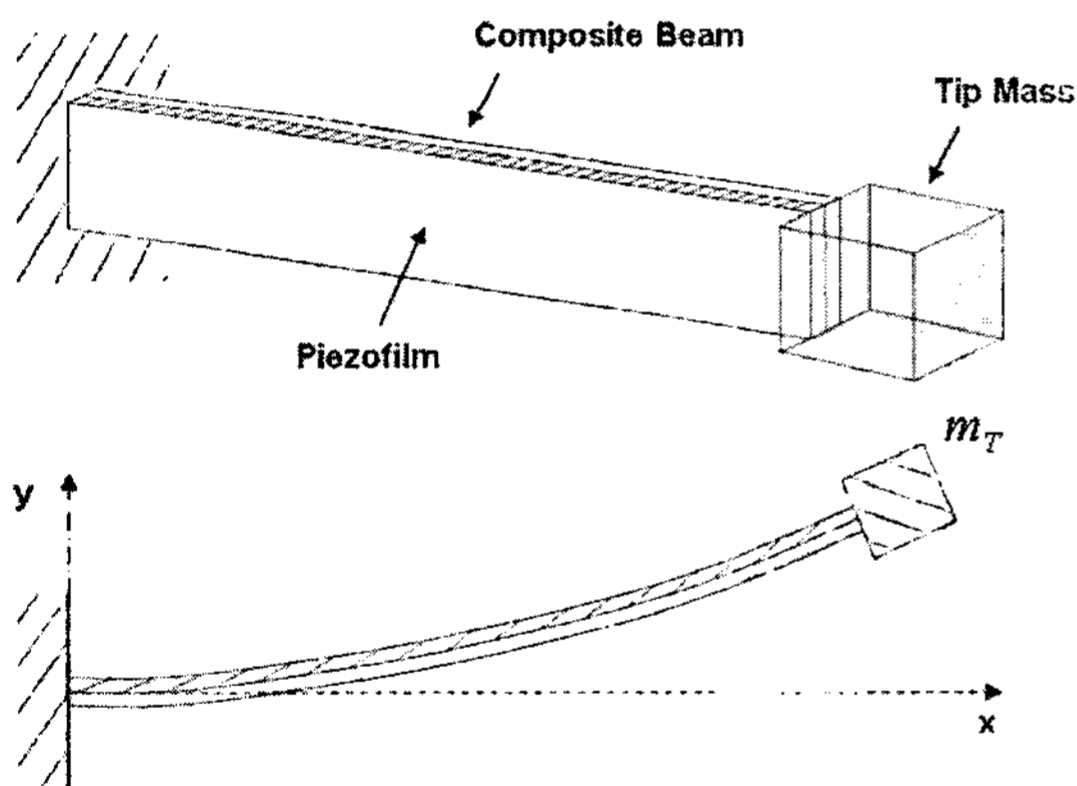
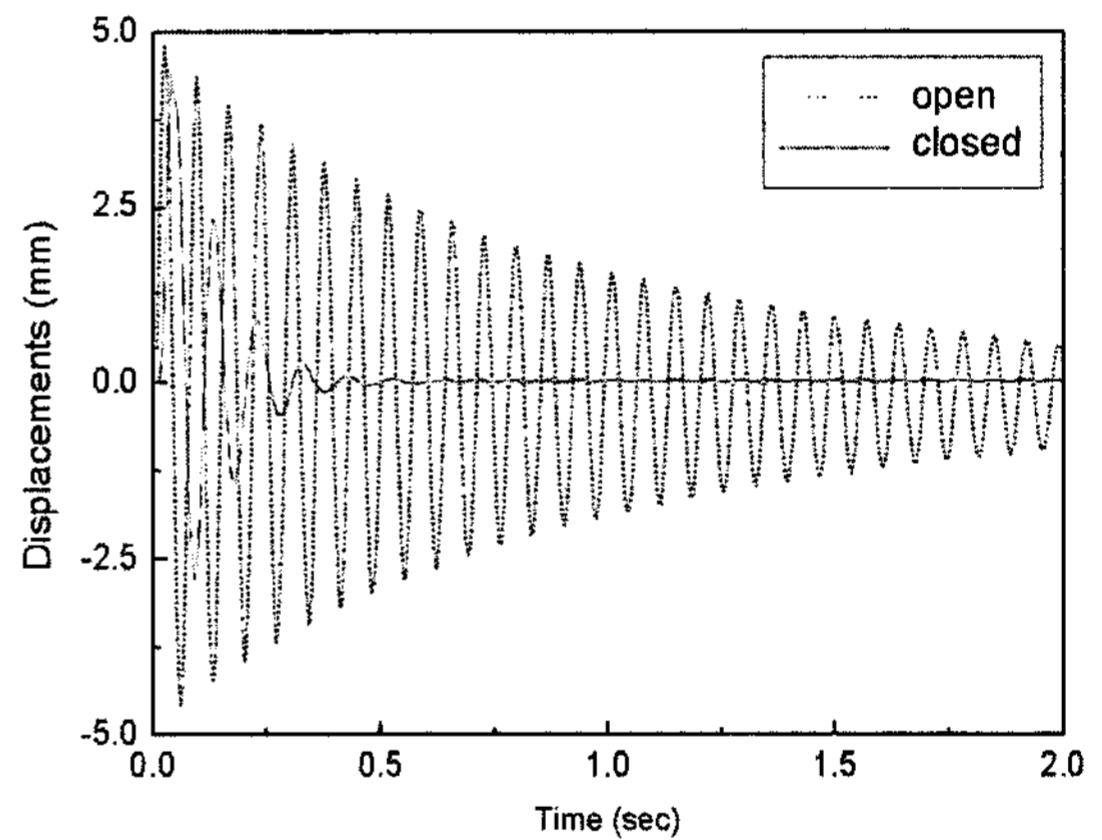
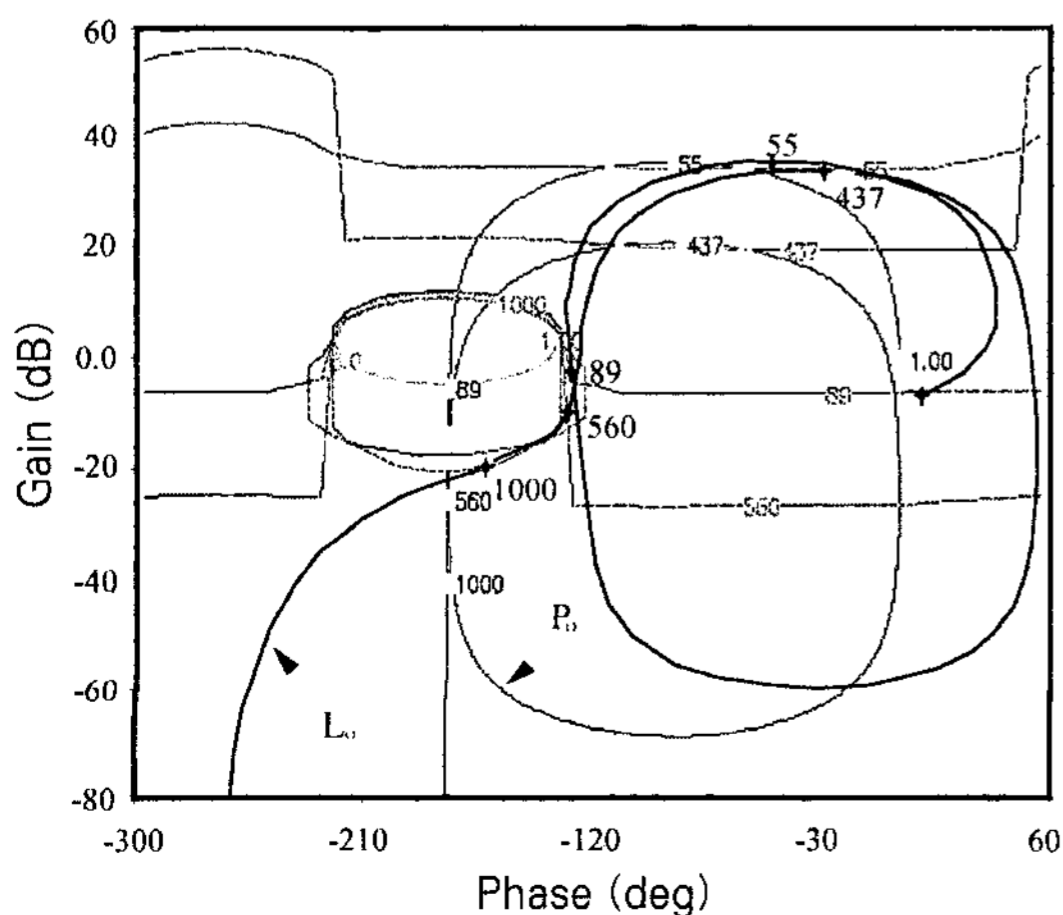


그림 14 복합재료 외팔보의 구조도



(a) 선단 질량이 없는 경우



(b) 선단 질량이 있는 경우

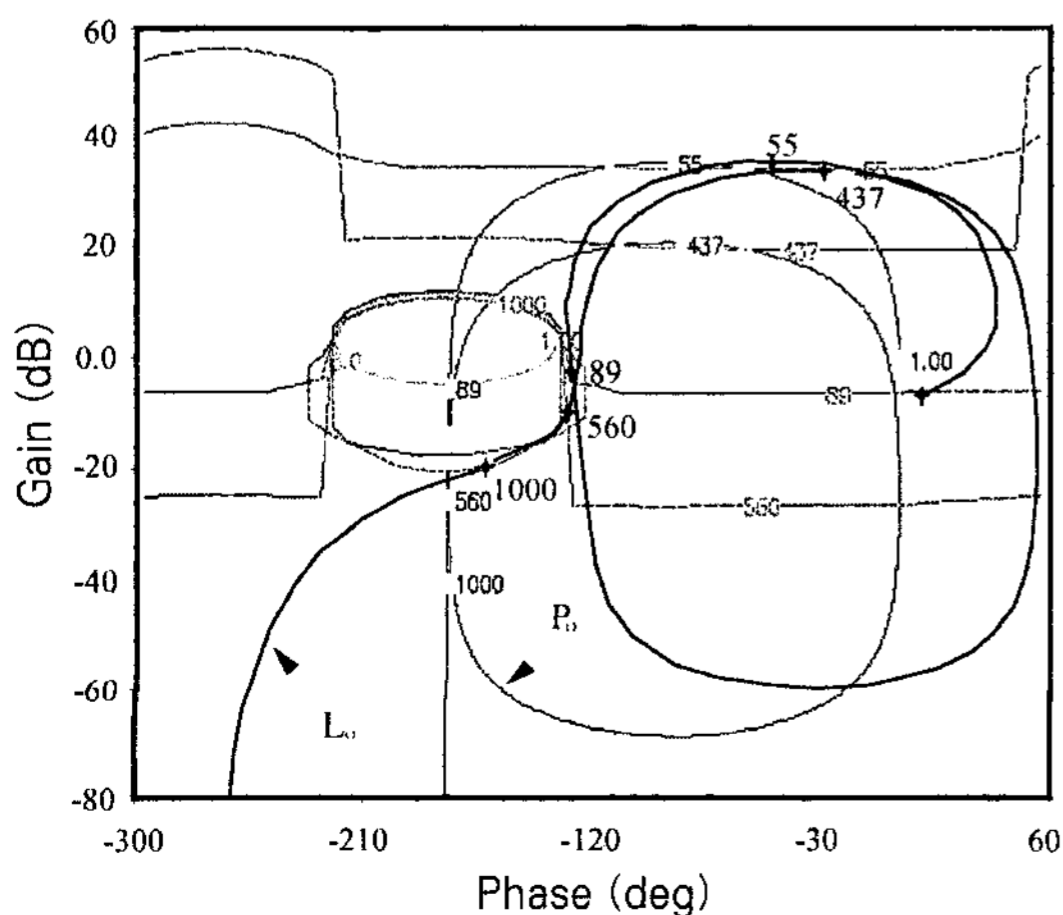


그림 15 QFT 제어기의 설계

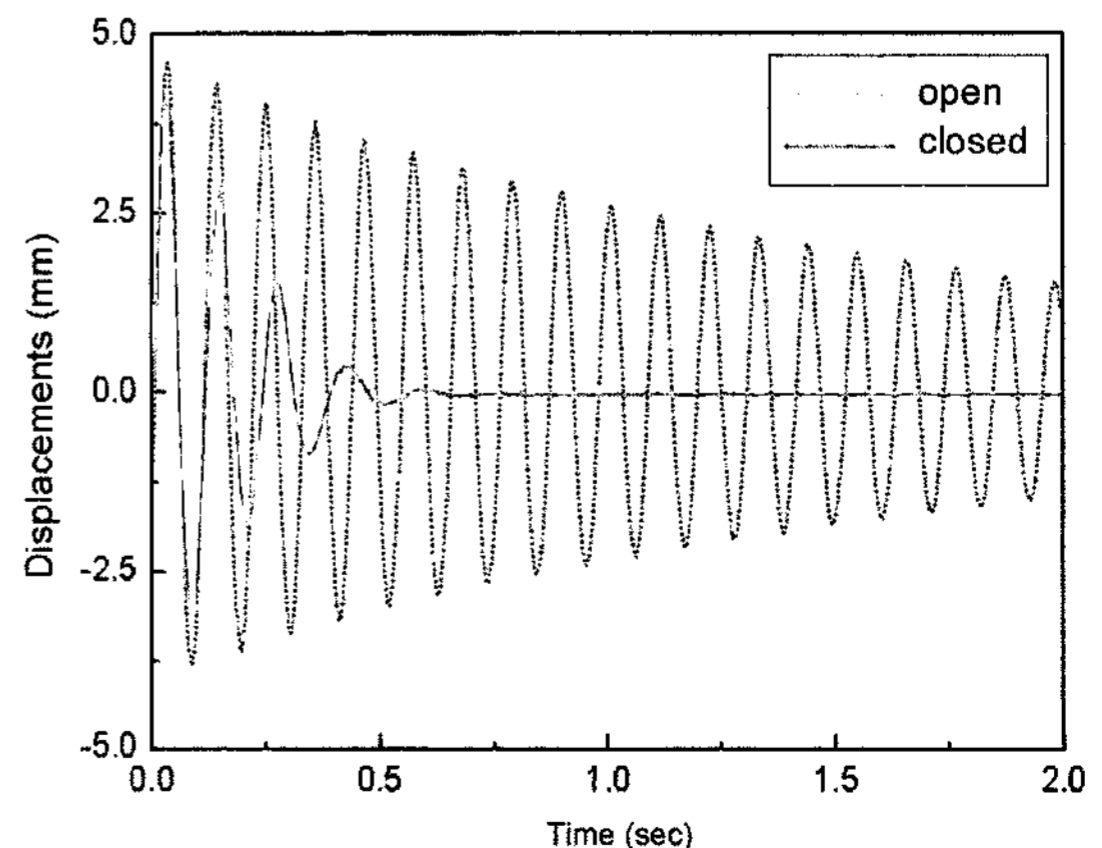



그림 16 QFT 제어기를 이용한 진동제어

4. 맺음말

최근 동력학 및 진동 제어 분야의 연구에서는 에너지를 적게 소모하면서도 빠른응답과 고정밀도를 얻을 수 있는 고성능의 새로운 작동기의 개발과 함께 그 제어기법에 대해 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히, 교량이나 건물 등의 구조물, 자동차나 선박 및 반도체 장비들을 위한 현가장치나 마운트 시스템등에 ER/MR 유체와 같은 반능동형 작동기의 도입이 적극적으로 이루어짐에 따라 실제 적용이 용이하면서도 효과적인 반능동 제어 알고리즘에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 뿐만 아니라 압전재료, 형상기억합금 등을 이용한 고성능의 능동형 작동기들의 개발로 인해 구조물이나 응용시스템의 능동 진동 제어를 위한 적절한 제어 알고리즘의 선택이 더욱 중요해 지고 있다. 이로 인해 LQG/LTR, H2/H ∞ , MSMC(moving sliding mode control) 등과 같이 기존 제어이론에 새로운 이론의 접목으로 끊임없이 발전하고 있다. 나아가 최근에는 퍼지, 유전자, 신경망 등과 같은 적응 제어기법을 결합하는 방법으로 발전해가고 있다. 

참고문헌

- (1) Choi, S. B., Lee, H. K. and Chang, E. G., 2001, "Field Test Results of a Semi-active ER Suspension System Associated with Skyhook Controller", *Mechatronics*, Vol. 11, No. 3, pp. 345~353.
- (2) 손정우, 김홍수, 최승복, 2007, "MFC 작동기를 이용한 Hull 구조물의 진동저감", *한국소음진동공학회논문집*, 제17권, 제7호, pp. 587~595.
- (3) Choi, S. B., Cho, S. S. and Park, Y. P., 1999, "Vibration and Position Tracking Control of Piezoceramic-based Smart Structures via QFT", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 121, No. 1, pp. 27~33.
- (4) Choi, S. B., Park, Y. K. and Kim, J. D., 1993, "Vibration Characteristics of Hollow Cantilevered Beams Containing an Electro-rheological Fluid", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 35, No. 9, pp. 757~768.