



압전소자를 이용한

진동 제어 및 응용 기술

곽 문 규*

(동국대학교 기계공학과)

1. 머리말

압전효과란 압전소자에 압력이 가해졌을 경우 기계적 변형이 일어나 압전소자에 전하(charge)가 발생하는 것을 말한다. 이를 반대로 이용하면 전압을 걸었을 경우 압전소자의 형상이 변화되어 작동기로서 사용될 수 있다. 전자의 응용 예로는 마이크와 진동 센서 등을 들 수 있고 후자의 응용 예로는 스피커, 부저 등 작동기로서의 예를 들 수 있다. 이와 같은 성질을 이용하여 구조물의 진동을 제어하려는 노력이 계속되고 있다. 또한 최근에 압전소자를 이용해 주변의 진동 에너지를 전기에너지로 바꾸어 무선 센서 노드(wireless sensor node)를 위한 에너지원으로 활용하려고 시도하고 있다.

2. 압전작동기의 종류

압전세라믹 웨이퍼는 그림 1과 같이 사각형 판으로 이루어져 있으며 취성이 매우 높아 잘 깨진다. 이런 압

전세라믹 웨이퍼는 d31을 이용하는데, 판의 아래 위면에 전압을 가해 양 옆으로 변화하는 특성을 가지고 있다.

압전세라믹의 취성을 보완하기 위해 Mide 사에서는 압전세라믹에 보호막을 입히고 전극을 붙여 연결을 용이하게 만든 Quickpack을 판매하고 있다.

압전세라믹 웨이퍼의 취성을 보완하고 성능을 개선하고자 노력의 결과 최근에 다양한 형태의 압전세라믹 작동기가 개발되어 시판 중이다. 그림 3은 MFC(macro

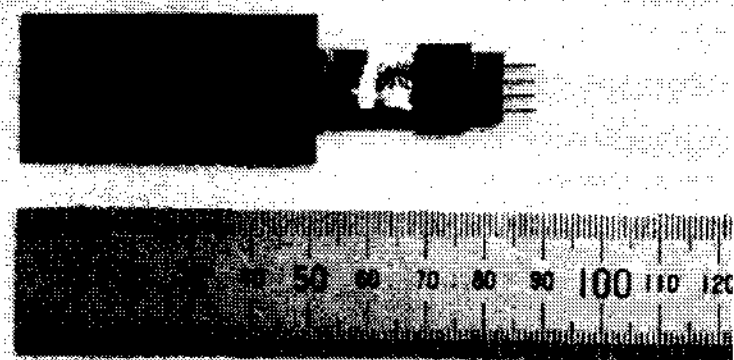


그림 2 Mide사의 Quickpack

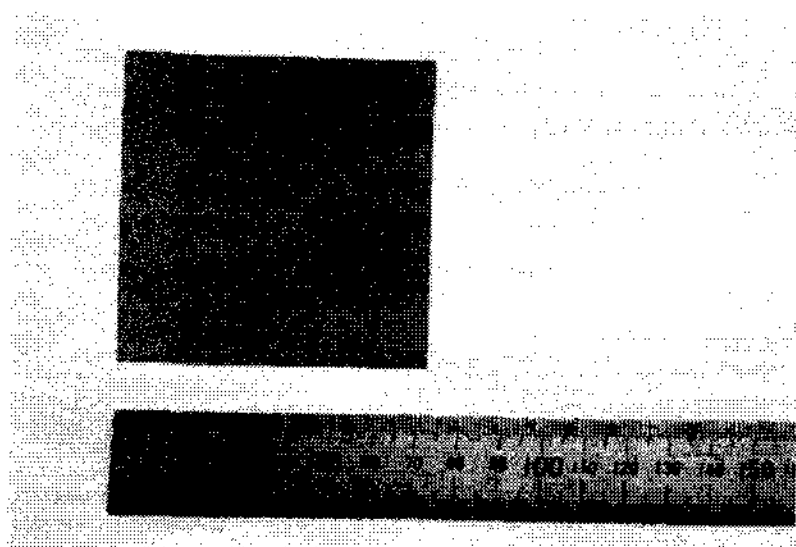


그림 1 압전세라믹 웨이퍼

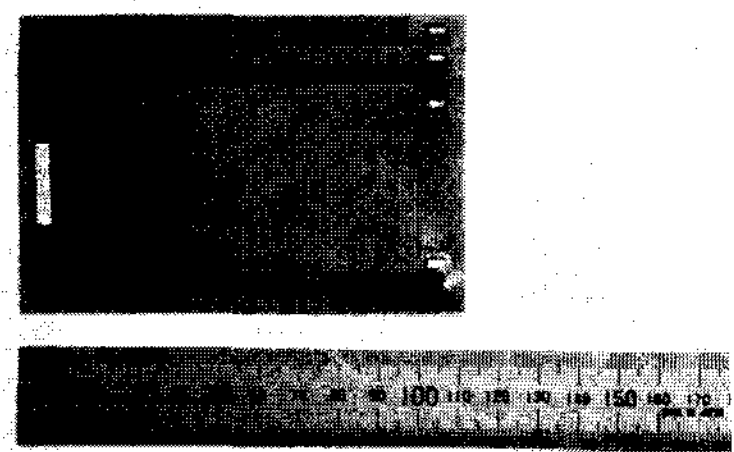


그림 3 MFC 작동기

* E-mail : kwakm@dongguk.edu / (02) 2260-3705

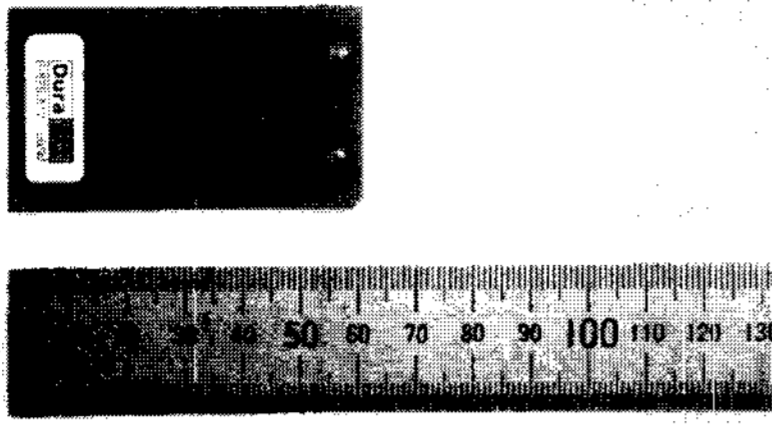


그림 4 PIsa의 DuraAct 작동기

fiber composite) 작동기로서 d33 효과를 이용하기 위해 전극을 빗살 모양으로 배치하여 작동력을 증가시킨 작동기이다. 또한 자체가 유연하여 곡률을 가지는 표면에 부착할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 모델은 윗부분에 센서를 가지고 있어 하나의 패치로 피드백 제어를 구성할 수 있다.

그림 4는 PIsa에서 최근 개발한 DuraAct 패치를 보여 준다. 이 작동기도 MFC와 같이 유연하여 곡률을 가지는 표면에 부착할 수 있다.

이와 같이 압전작동기들은 실제 구조물에 적용할 수 있도록 진화하고 있다. 그렇지만 아직 고가로 실용성의 문제가 해결되지 않고 있다.

3. 압전재료를 이용한 진동 제어

앞에서 소개한 압전작동기들을 이용하면 구조물의 진동을 준능동 또는 능동적으로 제어할 수 있다. 제어 방법에 대해 간략하게 소개한다.

3.1 션트(shunt) 감쇠

앞에서 설명한 것처럼 구조물에 압전체를 부착하면 진동에 의해 발생하는 힘이 압전세라믹을 변형하고 이로 인해 전압차가 발생한다. 이 전압, 즉 전기적인 에너지는 션트 전자회로를 이용해 발산시킬 수 있으며 에너지를 발산하기 때문에 구조물의 감쇠와 같은 효과를 얻을 수 있다. 션트 감쇠의 장점은 전원이 별도로 필요로 하지 않는다는 것인데 이로 인해 준능동 제어(semi-active control)로 불린다. 그림 5는 구조물에 부착된 압전 세라믹에 간단한 전기 회로를 연결하여 션트에 의한 능동감쇠를 얻는 흐름도를 보여주고 있다. 션트회로는 일

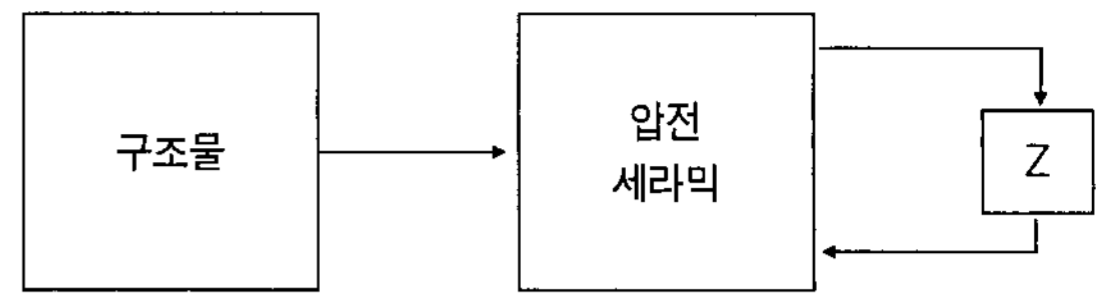


그림 5 션트 회로를 이용한 준능동 진동 제어

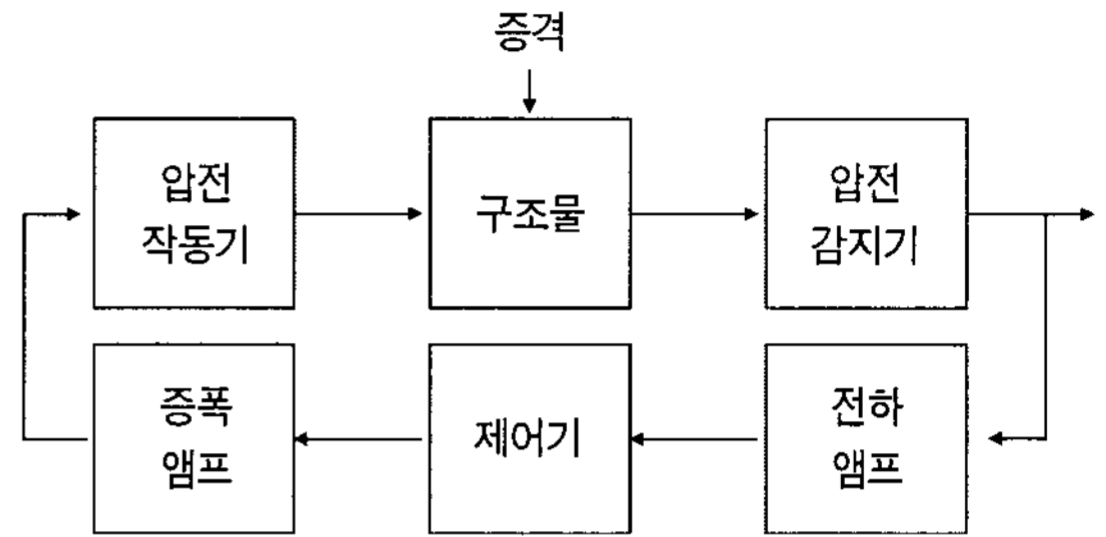


그림 6 능동 진동 제어 루프

반적으로 저항(resistor), 유도코일(inductive element), 축전기(capacitive element), 스위칭 레กติ파이어(switching rectifier)로 구성될 수 있다. 션트회로에 있어 저항은 열에 의해 에너지를 발산하여 감쇠 효과를 주며, 유도코일은 기계적인 진동흡수장치와 같은 효과를 내고, 축전기는 압전요소의 강성을 바꾸는 효과를 준다. 스위치를 사용하는 경우 에너지 변환을 주파수와 무관하게 수행할 수 있다.

3.2 PPF(positive position feedback) 제어

전원을 이용해 좀더 능동적으로 제어력을 높이면 션트회로에 의한 감쇠에 비해 보다 효과적인 능동 감쇠를 얻을 수 있고 보다 지능적인 제어기를 적용할 수도 있다. 이 경우 압전감지기와 작동기를 사용한 피드백 제어 시스템이 그림 6과 같이 구성된다. 그림 6를 살펴보면 구조물에 부착된 압전감지기로부터 구조물의 변형을 감지하고 이를 제어로직을 통해 적절한 제어력을 계산하여 압전작동기에 제공하면 능동제어가 실현된다. 지능 구조물의 능동 제어에 있어 그림 6의 피드백 제어 시스템에 근거하여 다양한 제어기가 설계되어 활용되고 있지만 그 중 실용성과 효과면에서 인정을 받고 있는 제어기가 PPF 제어기이다. PPF 제어기는 아날로그 회로로도 구성이 가능할 정도로 그 구조가 단순하며, 강인성이 보장되고 목표로 하는 진동모드를 확실하게 제어할 수 있다는 이점이 있다.

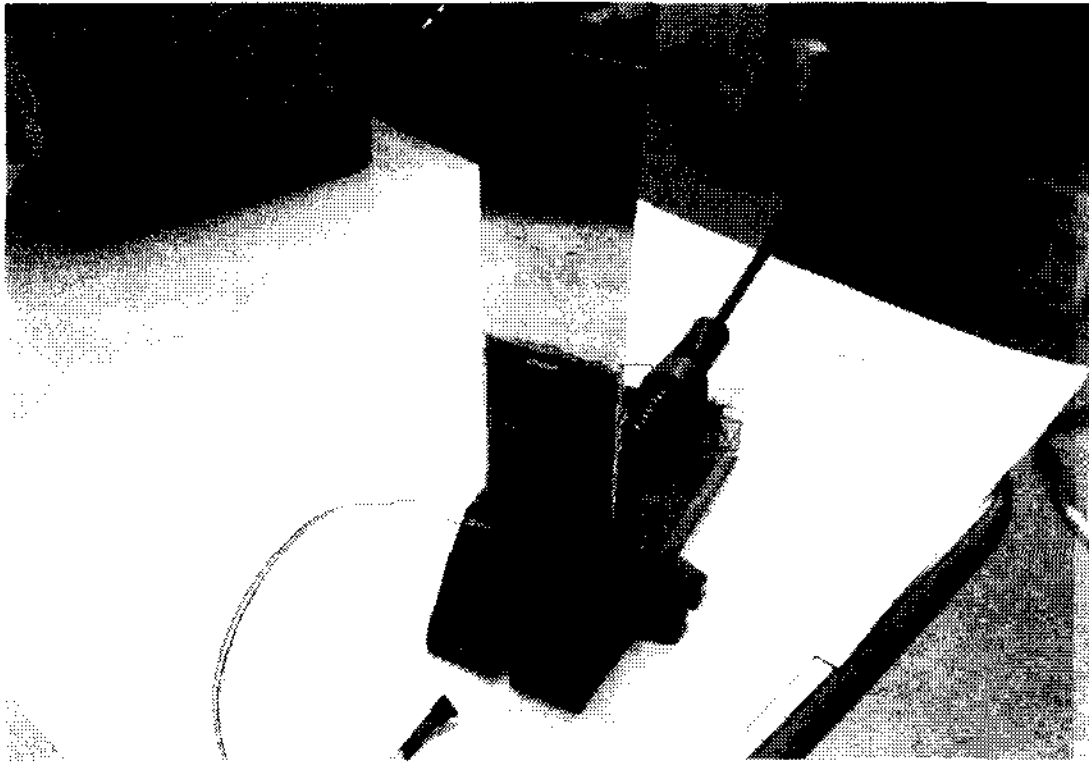


그림 7 MFC 작동기를 부착한 알루미늄 외팔보

PPF 제어기는 다음과 같이 단순한 전달함수를 가진다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (1)$$

여기서 ω_f 는 PPF 제어기의 필터주파수로서 일반적으로 제어하고자 하는 진동모드의 고유진동수에 맞추어 사용한다. ζ_f 는 PPF 제어기의 감쇠계수로서 PPF 제어기의 강인성을 결정한다. 일반적으로 0.3이 사용된다.

PPF 제어기의 장점은 다음과 같다. 특정 주파수대역의 감쇠를 확실하게 증가시킬 수 있어 고유진동모드들이 밀집되어 있더라도 개개의 고유모드들을 독립적으로 제어할 수 있다. 또한 설치가 간단하며 spillover 현상에 덜 민감하고 작동기의 동적 거동에 의해 불안정해지지 않는다. 그리고 일반 변위를 사용하기 때문에 변형률을 계측하는 경우에 합당하다. 식 (1)은 필터이론에서 사용하는 기본적인 저주파 통과 필터(low-pass filter)와 동일한 형태이며 코너주파수에서 90도의 위상차를 갖는다. 이를 이용해서 감쇠를 구현한다. PPF 회로는 Op Amp를 사용하여 간단하게 회로를 구성할 수 있다.

그림 7은 PPF 제어기의 성능을 시험하기 위해 제작된 MFC 작동기를 부착한 알루미늄 보를 보여준다.

이 알루미늄 보에 전하앰프, 파워앰프, 그리고 dSpace 제어 보드를 연결하여 PPF 제어기를 수행하면 그림 8, 9와 같은 결과를 얻을 수 있다.

3.3 기타 제어 기법

압전작동기를 이용하여 능동 진동 제어를 수행함에

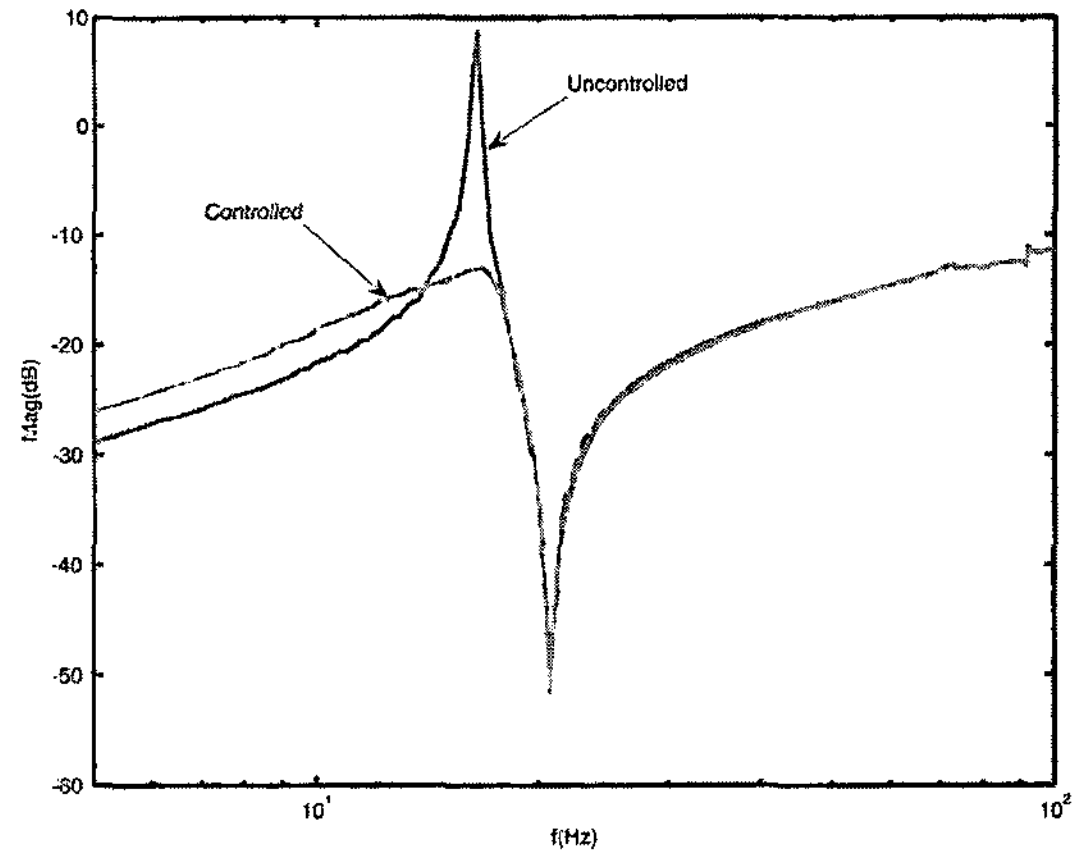


그림 8 제어를 하지 않을 경우와 할 경우의 주파수 응답 곡선

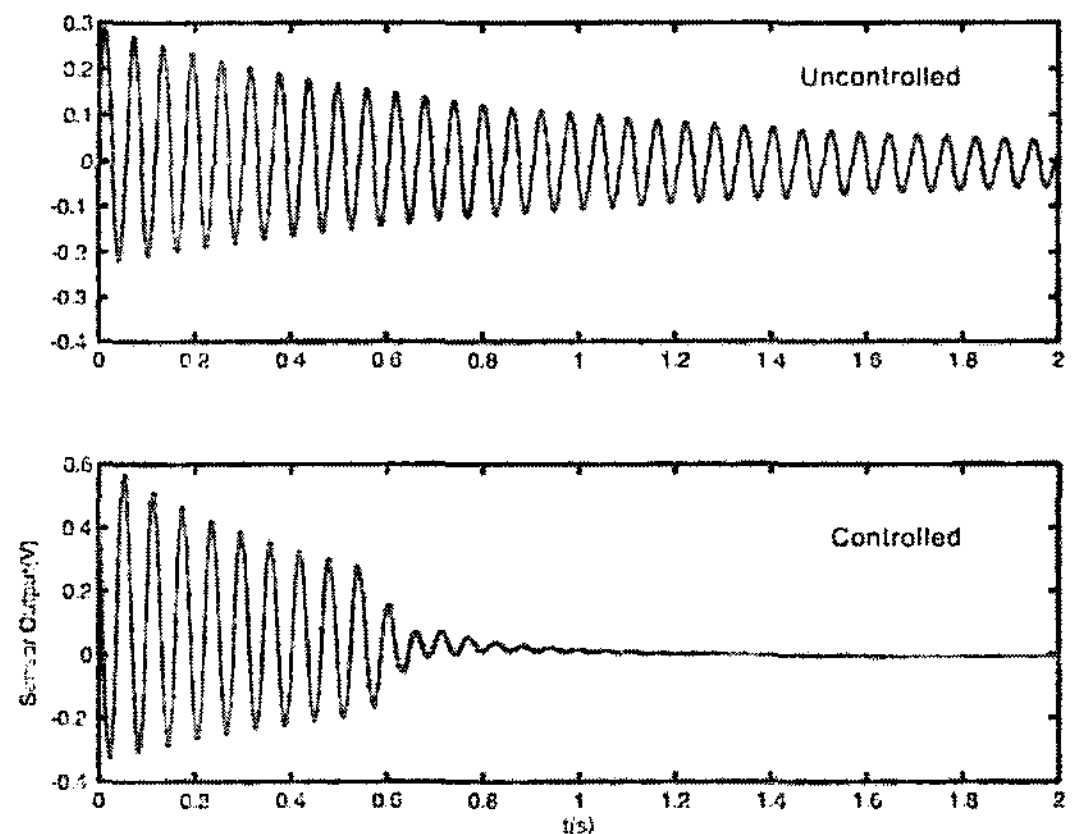


그림 9 제어를 하지 않을 경우와 할 경우의 시간 응답 곡선

있어 PPF 제어기 이외에도 다양한 제어 기법이 적용되었다. 열거하면 SRF(strain rate feedback), IM(impedance matching), LQR/LQG(linear quadratic regulator/linear quadratic Gaussian), μ synthesis 기법을 이용 robust 제어기, H_∞ 제어 기법, 스카이훅, 퍼지 로직, 신경망 이론 등이다. 이 이론들 모두 지능구조물의 제어기로 사용되어 그 타당성이 입증되었다.

위에서 언급한 보다 복잡한 디지털 제어 기법을 사용하기 위해서는 DSP 칩과 같이 빠른 연산을 할 수 있는 제어기의 사용이 필수적이다. 그러나 대상 구조물의 고유진동수가 낮다면(수 Hz), 범용 마이크로프로세서를 이용하여 제어 실험을 할 수 있다. 이 경우 A/D, D/A converter에서 발생하는 time-delay, anti-aliasing filter에서 발생하는 위상 각의 변화 등 아날로그 제어에서 볼 수

없었던 현상들이 나타나게 된다. 그리고 A/D, D/A의 sampling speed 는 제한이 있어 많은 수의 고차 진동모드를 제어할 수 없다. Adaptive Control, 퍼지 로직 제어, 신경망제어 등은 Parallel Processing 이 요구되는 회로라 데이터 처리를 빨리 할 수 있는 마이크로프로세서를 이용해야 한다.

4. 압전에너지 수집 장치

최근에 무선 센서 노드에 대한 관심이 높아지고 있다. 무선 센서 노드는 구조물의 안전진단, 무기체계, 방재 시스템, 동물의 이동 등에 사용될 수 있는 초소형 데이터 수집 및 발송 장치를 가리킨다. 무선 센서 노드(USN)는 서로 데이터의 교환이 가능하고 대량의 무선 센서 노드를 살포하여 근거리 무선 통신을 구현하기 때문에 무선 통신으로 인한 전력소모를 극소화할 수 있다. 그러나 전력 소모를 극소화한다고 해도 전지 소모 자체를 없앨 수 없기 때문에 태양광, 열 변화, 인간의 동작, 신체의 열, 진동, RF 에너지 등과 같은 주위 에너지원들로부터 에너지를 수집하여 전지의 수명을 연장하는 방법에 대한 연구 결과들이 많이 있다.

압전소자를 이용한 에너지 수집 개념에 대해서는 과거 수십 년간 많은 연구가 진행되어왔다. 압전소자는 기계적인 운동이나 힘을 전기적인 에너지로 또는 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 교환할 수 있는 변환기이다. 이 재료를 이용하면 기계적 진동을 다른 장비의 전원으로 사용되거나 저장할 수 있는 전기적인 에너지로 변환하는 메커니즘으로써 사용할 수 있다.

압전에너지 수집 장치의 기본 형태는 끝단에 집중 질량을 갖는 외팔보와 외팔보에 부착된 압전소자로 이루어진다. 따라서 에너지 수집 효율을 높이기 위해서는 외팔보 형태의 압전에너지 수집 장치의 고유진동수를 외부 가진 진동수와 일치시킬 필요가 있다.

4.1 압전에너지 수집 회로

압전에너지 수집 장치는 그림 10에 보이는 바와 같이 기본적으로 렉티파이어, 단기 저장 캐패시터, 부하로서 구성된다. 보의 진동으로 야기되는 압전 웨이퍼의 진동은 AC 신호를 산출한다. AC 신호가 렉티파이어 회로를 거치면 신호가 반파의 DC 신호로 변환된다. 단기 저장

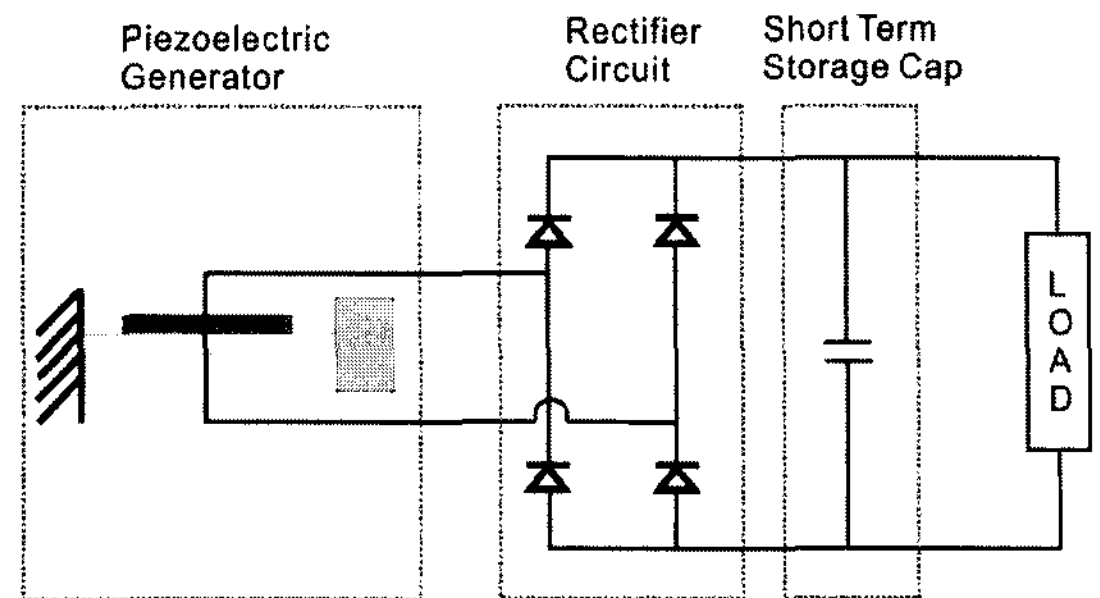


그림 10 압전에너지 수집 장치를 위한 전자 회로

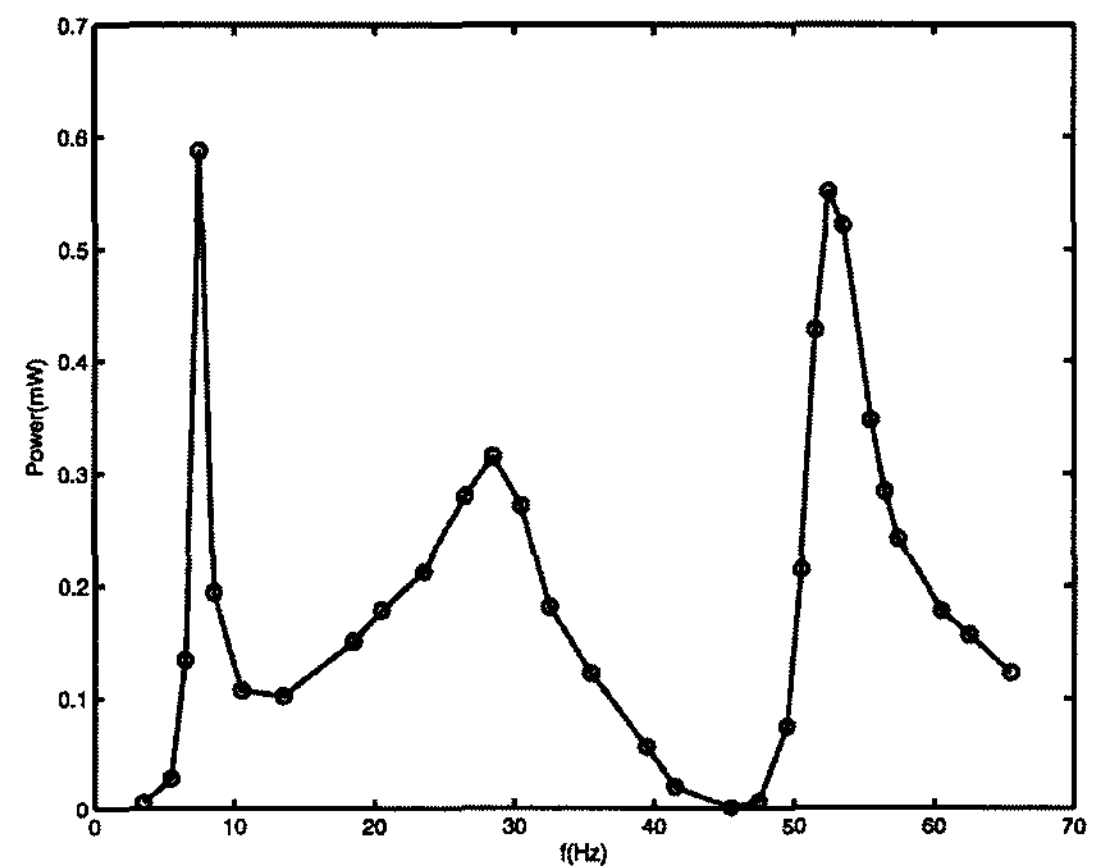


그림 11 주파수 대비 전력

캐패시터는 렉티파이어 신호를 매끄럽게 만드는 역할을 담당한다.

4.2 압전에너지 수집 성능

압전에너지 수집 장치의 전력 출력은 효율성에 대한 중요한 지표이다. 전력 측정을 위해 LED의 전류와 전압을 측정하고 이를 이용해 전력을 계산하였다. 그림 11은 기저부의 가진 주파수에 대한 전력을 보여준다. 최대 전력은 기본 진동수에서 얻어짐을 쉽게 알 수 있다.

단기 저장 캐패시터는 건전지를 충전하는데 있어 중요한 역할을 한다. 단기 저장 캐패시터로 슈퍼 캐패시터를 사용하는 경우 시간별 충전 전압은 그림 12와 같다.

3.3V 4mAh Li-Ion battery (Seiko Model MS621)에 대해 220 μ F 캐패시터를 단기 저장 캐패시터로 사용해 충전을 시도하였다. 그림 13은 건전지의 충전 전압 선도를 보여준다. 첫 번째 모드를 가진해 이 건전지를 충전

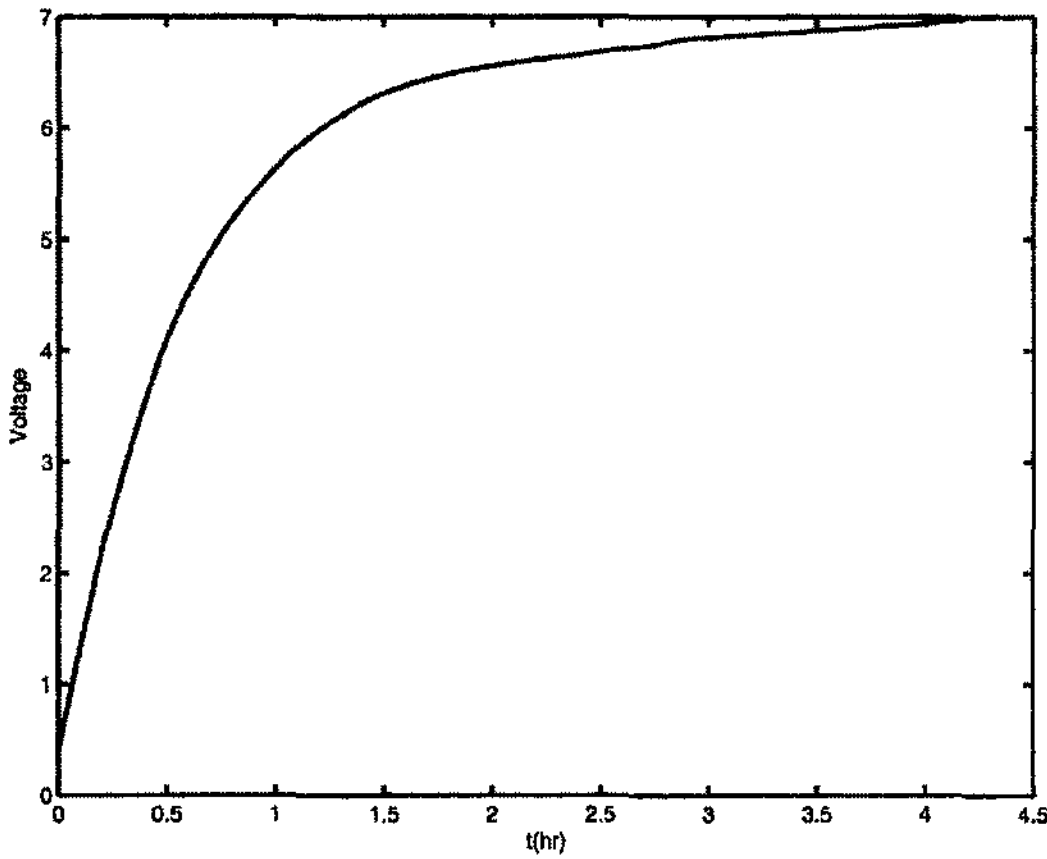


그림 12 0.1F 슈퍼 캐패시터의 시간대비 전압 충전 선도

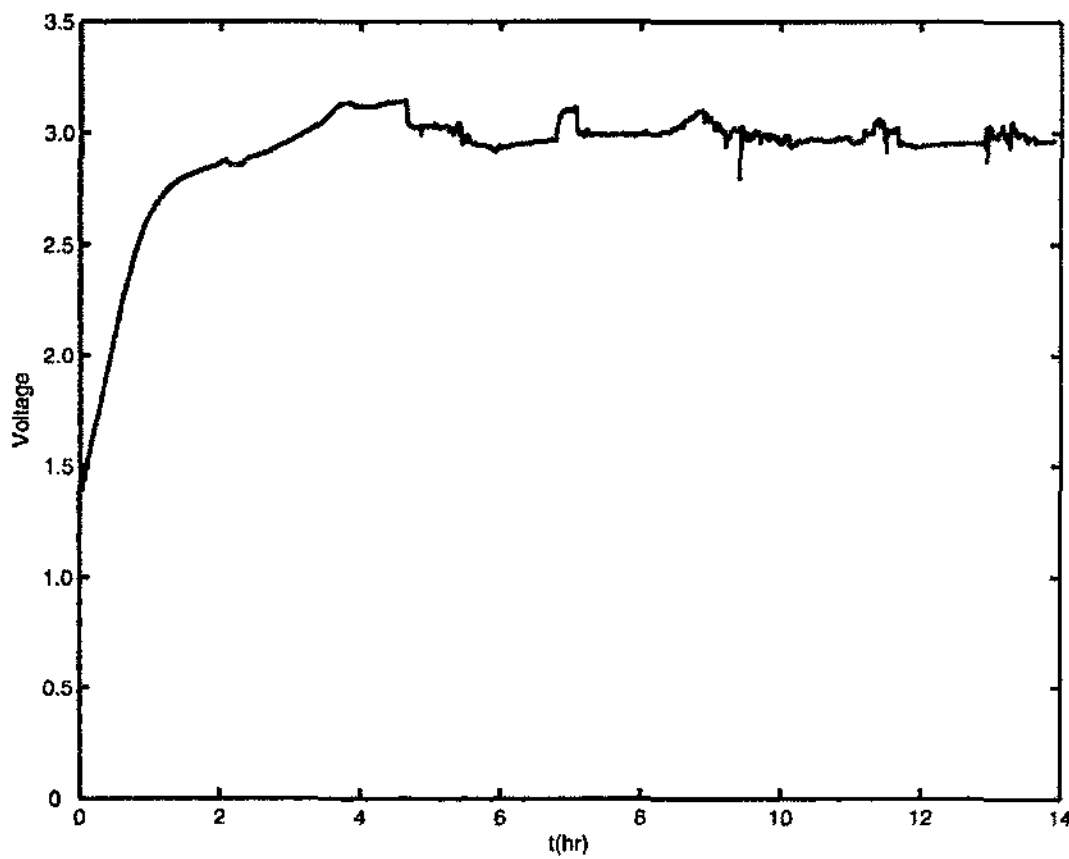


그림 13 Li-Ion 배터리 충전 선도

하는데 약 4시간이 소요되었다. 최대 전압이 도달한 후에는 건전지가 비정상적인 요동을 보여준다. 따라서 충전이 된 후에는 스위치를 이용해 충전을 더 이상 하지 않는 것이 바람직하지 않을 것으로 예상된다. 스위치는 USN에 장착된 마이크로프로세서를 이용해 건전지에 흘러 들어가는 전류를 관찰해 작동시킬 수 있을 것으로

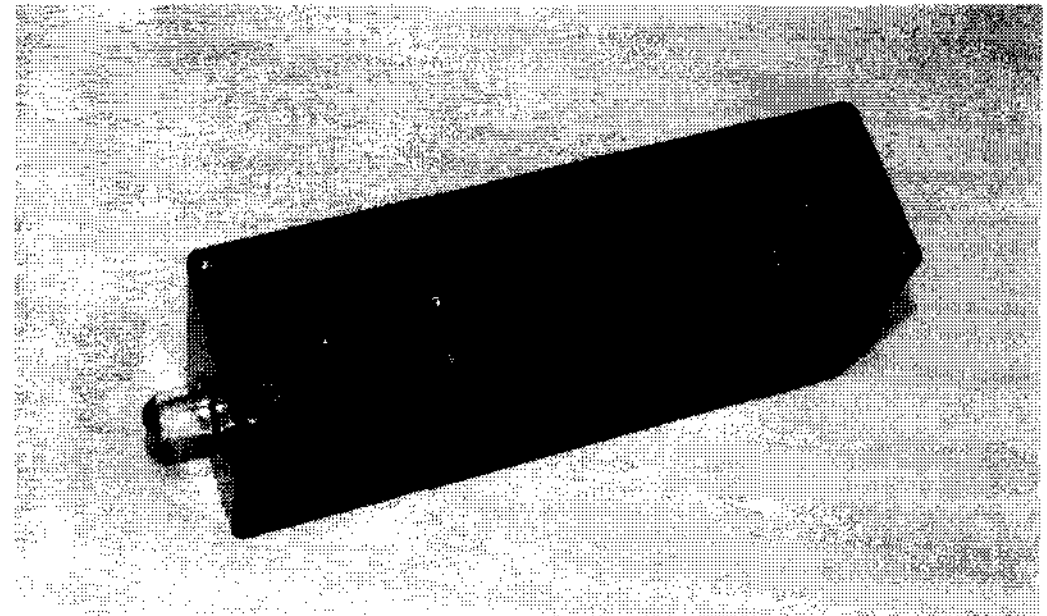


그림 14 압전에너지 수집장치 데모 모델

생각된다. 또한 마이크로프로세서는 단기 저장 캐패시터의 상태를 점검해 캐패시터의 연결도 제어해야 할 것으로 생각된다.

4.3 압전에너지 수집 장치

그림 14는 외팔보와 에너지 수집 회로, 그리고 고휘도 LED로 구성된 압전에너지 수집 장치 시연 모델을 보여주고 있다.

5. 맺음말

압전소자는 구조물의 능동진동제어에 효과적으로 사용되는 재료로서 그 성능을 극대화하기 위한 노력이 경주되고 있다. 불행히도 국내에서는 아직 외국의 압전 작동기에 비견될 작동기가 개발되지 못하고 있어 고가의 압전작동기를 구입해 실험이 수행되고 있다. 압전소자를 이용한 능동 진동 제어는 분명히 효과적이며 다양한 기계시스템의 진동문제를 해결할 수 있는 방안이다. 또한 압전소자를 이용한 에너지 수집장치는 에너지원으로 역할을 감당할 수 있음을 보여준다. 진동을 억제하는 것 뿐만 아니라 진동을 이용하는 면도 살펴보아야 함을 깨우치는 사실이다. ▲