

무선 센서의 데이터 통신을 위한 에너지 변환 시스템

이제운\*, 오재근\*, 최준성\*\*, 최범규\*

\* 서강대학교 기계공학과 \*\* 인덕대학교 토목건설환경학과

Energy conversion system for wireless network

Jaeyun Lee\*, Jeagun Oh\*, Junseong Choi\*\*, Bumkyu Choi\*

\* Dep. Mechanical Eng. of Sogang Univ. \*\* Dep. Civil & Environmental Design of Induk Institute of Technology

**Abstract** - 대형 구조물은 안전관리 시스템의 범재화로 스트레인 게이지, 가속도 센서 등을 이용하여 상시 관리를 의무화 하고 있다. 상시 계측을 위해 유선 센서의 경우 데이터 전송의 신뢰성은 있지만 선로 결선의 문제점 때문에 무선 센서의 적용이 요구된다. 하지만 무선 센서의 경우, 전원공급의 문제를 갖고 있어 장착이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 압전체를 이용하여 무선 센서의 전원 공급을 위한 에너지 변환 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 구조물 내부의 진동을 전기 에너지로 변환, Capacitor에 저장 후, 데이터 전송을 위해 일시에 방출하는 구조이다. 20m의 무선 데이터 통신을 위해 2.45mJ (5V\*49mA\*10ms)의 전력량이 필요한데, 모의 교각 모델에 시스템을 적용한 결과 2분 30초 동안의 진동 에너지가 2.8mJ의 전기 에너지로 저장되었다. 이 실험 결과를 토대로 무선 센서를 이용한 상시 모니터링이 가능함을 예상할 수 있다.

1. 서 론

무선 network 환경에 대한 관심이 높아져 감에 따라 많은 분야에서 무선 시스템의 응용을 구현하려는 시도를 하고 있다. 자동차의 타이어 압력, 비행기의 피로에 의한 crack의 모니터링, 위험한 화학물질의 무선 감지 그리고 일반 건물에서 에너지 절약의 형태로 건물 내 온도와 습도를 조절하기 위해 빛과 온도, 사람의 위치를 모니터링 하는 등 다양한 분야에서 구현이 가능하다. 이런 무선 network 환경과 소형화되어가는 전자제품의 요구에 따라 다양한 전원공급 장치의 개발이 필요하게 되었다. energy storage(battery, Ultracapacitors, Radioactive power sources), RF power distribution, 그리고 power scavenging(Solar cell, Human power, vibrations)으로 크게 세 가지 형태로 구분 지을 수 있다. 그 중에 power scavenging의 형태는 power density의 측면에서 다른 형태보다 우수함을 갖고 있다. 왜냐하면 가장 긴 lifetime을 보장 할 수 있기 때문이다. 하지만 정해지지 않은 에너지원으로부터 전원을 얻는 방법이기에 때문에 각각의 주어진 환경에 맞춰 적용을 해야 하는 어려움이 있다.[1]

본 연구에서는 power scavenging의 구현 방법으로 대형 구조물의 진동을 이용하여 에너지 형태를 변환시키는 방법에 대해서 제안하고자 한다. 대형 건물, 교량, 도로와 같은 사회 간접 자본 시설에 대한 안전 관리 시스템은 시설의 유지 보수 및 수명연장을 위해서 필요한 뿐만 아니라 시설의 안전성과 사용성을 확보하기 위해서 시설의 상시감시 및 이상 징후의 조기발견을 위한 장기 계측시스템을 필요로 한다. 이런 장기계측시스템에는 압력센서, 스트레인게이지, 가속도 센서, 온도 센서, 풍속계 등 20여종의 센서를 장착한다. 그런데, 센서의 데이터 전송과 전원 공급을 위해 기존에는 유선으로 사용하였지만 결선이나 설치비용의 문제점을 갖고 있다.[2] 이에 대한 대안으로 무선 network 환경을 응용하는 것에 대한 검토가 진행 중이다. 하지만 무선 network을 이용할 경우

전원 공급 장치에 대한 해결 방법이 필요하기 때문에, 압전체를 이용하여 vibration-electricity conversion을 구현해서 다른 형태의 전원 공급원 보다 lifetime을 오래 보장하는 power scavenging 방법을 택하였다.

2. 본 론

대형 구조물의 진동을 이용한 에너지 변환 시스템을 구현하기 위해 실제 교각용 모형을 제작하여 그림 1과 같은 모의 교각을 제작하였다

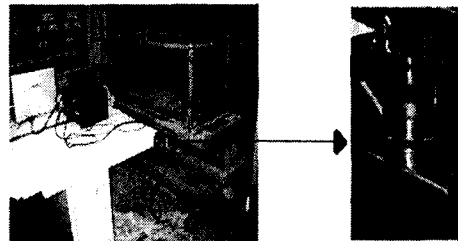


그림 1 모의 교각과 에너지변화 모듈의 적용 부분

모의 교각의 기본 개념도는 그림 2에서 볼 수 있다. 모의 교각은 스프링과 Damper, Mass 와 가진부로 구성이 되어있다. 가진부는 압전체와 mass 전체에 진동을 일으키는데, 편심추를 부착한 모터를 이용하여 50Hz까지 진동을 발생시킬 수 있도록 제작되었다.

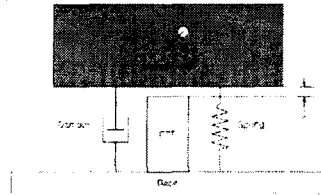


그림 2 에너지 변환 시스템의 개념도

2.1 Mechanical Model

편심추가 부착된 모터에 의해 가진이 되어 압전체에 힘을 인가하게 되는데, 그림 2의 개념도에서 보듯이 내부에 가진원을 갖고 있는 mass의 선형진동식으로 표현되고, 모의 교각의 가진 부분이 ambient energy가 된다.[3]

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m \cdot e \cdot \sin(\omega t) \quad (1)$$

M : 선체 질량 c : damping coefficient k : stiffness of spring  
m : 편심추의 질량 e : 편심거리 ω : 각속도

Matlab을 이용하여 위의 식을 해석한 결과는 그림 3으로 나타내었고, 변위는 ±0.2mm로 가진될 것이라고 예측할 수 있다.

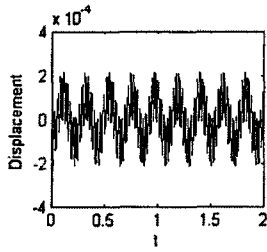


그림 3 시스템의 가진된 변위(35Hz)

Ambient energy는 시스템의 스프링에 저장되는 포텐셜 에너지로써 식으로 나타내면

$$E = \frac{1}{2} kx^2 \text{ 이 된다.}$$

그런데 스프링의 평형점과 압전체 사이의 거리(gap)가 존재하기 스프링에 저장된 모든 에너지가 압전체에 전해지지 않는다.

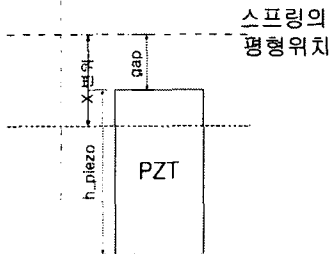


그림 4 압전체와 Mass와의 거리 압전체에 전해지는 에너지의 양은

$$W_{tra} = \frac{1}{2} k(x^2 - gap^2) \quad (2)$$

와 같은 식이 된다. 그리고 이 때 위치 에너지는 변위의 크기가 작기 때문에 무시할 수 있다고 가정을 하였다.

압전체의 관점에서 보면 임의의 인가된 힘에 따라 전해지는 mechanical energy  $W_{mech}$ 는

$$W_{mech} = Fx_{mech} = \frac{1}{2} \frac{F^2 h_{piezo}}{YA} \quad (3)$$

$h_{piezo}$  : 압전체의 높이 Y : Young's modulus A : 압전체의 단면적이 된다.[4] 식 (2)와 (3)에 의해서 압전체에 가해진 힘을 구할 수 있다.

$$F = \sqrt{\frac{YA}{h_{piezo}} k(x^2 - gap^2)} \quad (4)$$

## 2.2 Electrical Model

압전체는 일정 방향의 힘을 받을 경우 힘의 크기에 비례하여 분극 현상을 일으키며 전압을 발생시키는 재료이다. 압전체의 기본 개념도는 그림 5와 같다.

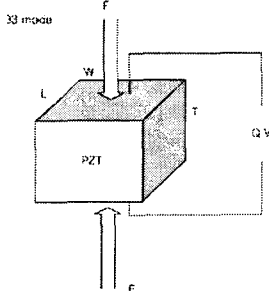


그림 5 압전체 원리 압전체에서 발생하는 전압은 압전체의 voltage

coefficient( $g_{33}$ )와 힘(F) 그리고 압전체의 전체 길이(T)와 관련이 되어있고 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$V = g_{33} \times F \times T \quad (5)$$

인가되는 힘에 의해 압전체에서 발생하는 전기장은

$$\text{open circuit일 경우 } \frac{V_3}{T} = \frac{F_3}{L} \frac{g_{33}}{W} \text{로 나타낼 수 있다. 또,}$$

압전체는 하나의 capacitor의 역할을 수행할 수 있으므로 압전체의 capacitance는  $C_3 = \epsilon_{33} \epsilon_0 WL/T$ 가 된다. 또, 압전체에 coupling factor k가 존재한다. 그래서 압전체에 저장되는 전기 에너지는

$$W_3^e = \frac{1}{2} C_3 V_3^2 = \frac{1}{2} k_{33} g_{33} d_{33} \frac{T}{WL} (F)^2 \quad (6)$$

$g_{33}$  : 압전체의 voltage coefficient  $d_{33}$  : 압전체의 charge coefficient 이 된다.[5]

그리고 압전체에서 발생한 전기 에너지를 무선 통신을 위해 필요한 양을 저장하기 위한 회로를 필요로 하는데, 그림 6은 MIT에서 선행 연구된 Shoe-powered RF tag system에 사용된 회로를 간략화 하여 그린 개념도이다.[6]

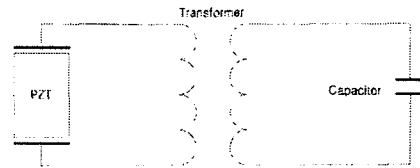


그림 6 회로의 개념도

데이터 전송을 위해서 압전체에서 발생된 전하가 transformer를 거쳐 회로의 capacitor에 저장되어야 하는데 이 때 저장된 에너지는

$$W_{cap} = \frac{1}{2} C(\Delta V)^2 \quad (7)$$

와 같이 된다.

## 2.3 실험 결과

본 연구는 모형화된 교각에서 발생된 진동을 이용하여 에너지 변환 시스템을 테스트 하였다. 실제 사용된 압전체는 SONOX P5라는 제품에 39610HCT-Type이고, 길이 15mm, 지름 6.35mm이다. 아래 그림 7은 에너지변화 시스템 모듈과 압전체의 사진이다.

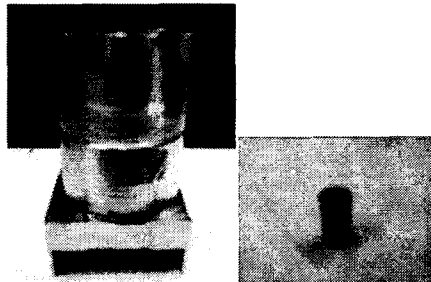


그림 7 모듈과 압전체

변위 측정을 위한 LVDT와 4개의 가속도 센서(sensing technology model:12200)를 장착하여 측정하였다. 데이터 로거는 IO Tech의 계측 장비를 사용하였고 DBK43A와 DBK4의 모듈을 이용하여 측정 값을 얻었다. 그리고 DASYLAB 7.0을 이용하여 변위의 계산과 FFT를 실행하였고, 표1을 얻게 되었다.

Frequency(Hz)	변위(mm)	가속도(g)
27	0.2	0.16

32.5	0.25	0.43
35	0.3	0.77

표 1 주파수에 따른 변위와 가속도

본 연구에서 실제 적용한 주파수는 35Hz에서 실험을 실행 하였고 그 때 가속도는 0.77g로 측정이 되었다. ±0.15mm변위에 의해 스프링에 저장된 포텐셜 에너지 (ambient energy)는 1.15mJ이 되고 압전체에 가해주는 힘은 식(4)를 이용하여 386.6N이 된다. 그 때의 압전체에 저장되는 에너지는 식(6)에 의해 0.167mJ로 계산이 되었다. 그리고 그림(5)에서의 capacitor는 220μF을 사용하여 3분 27초 동안 저장을 시켰고, 전송을 위해 저장된 에너지가 4.9mJ이 된다. 무선 network에서 센서의 구동과 데이터 전송에 필요한 에너지 2.45mJ(5V\*49mA\*10ms)를 사용할수 있을 만큼 저장되었다. 표2는 결과 데이터의 값을 비교한 것이다.

진동 Energy	압전체에서의 Energy	Capacitor에 저장된 Energy
1.15mJ	0.167mJ	0.676μJ

표 2 결과 데이터 비교(1회 진동시)

위의 데이터에서 볼 수 있듯이 진동에너지가 압전체에 저장되는 효율은 14.5%였고, 압전체에서 Capacitor에 저장되는 효율은 0.4%로 계산되었다.

### 3. 결 론

대형 구조물의 상시 모니터링을 위한 무선 network 환경 구현은 기존 유선의 결점인 결선과 비용의 문제에 대한 대안으로 제시되었다. 무선 데이터 통신의 문제점인 전원 공급 장치를 해결하기 위해 에너지 변화 시스템을 제안하였고, 교량을 모사화한 모의 교각에 적용을 시켜 그 가능성을 테스트하였다. 교각이 갖고 있는 구조물의 진동의 기계적 에너지를 전기에너지로의 변환을 위해 압전체를 사용하였다. 압전체에서 발생된 전기에너지를 shoe-powered RF tag system에 적용된 회로를 구현하여 실제 데이터 통신을 위해 필요하는 양을 저장 할 수 있었다. 향후 압전 소자의 효율 향상과 회로에서의 손실 감소, 에너지 변환 시스템의 소형화를 이룬다면 도로, 항만과 같은 대형 구조물의 상시 모니터링 시스템에 커다란 기여를 할 수 있을 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Shad Roundy 외 2명, "Energy scavenging for wireless sensor networks", KAP, 1st Ed, pp.15-21, 2004
- [2] 현대건설, 남해대교 계속보고서, pp.3, 1997
- [3] Leonard Meirovitch, "Principles and Techniques of Vibrations", PRENTICE HALL Int., pp.117, 1997
- [4] C.Keawboonchuay, "Maximum Power Generation in a Piezoelectric Pulse Generator", IEEE Transactions on plasma science, Vol.31, No.1, pp.123-127, Feb. 2003
- [5] T.Starmer, "Human Powered Wearable Computing", IBM System J., vol.35, nos 3 and 4, pp.618-629, 1996
- [6] Shenck,N.S ,Paradiso,J.A,"Energy scavenging with shoe mounted piezoelectrics", Micro, IEEE , Vol.21 , Issue 3, pp.30-42, May-June 2001