

컨베이어 진동을 이용한 IDE 적층 압전 캔틸레버 발전 소자의 무선 센서 응용 연구

김창일¹, 이민선¹, 조정호¹, 백종후¹, 장용호², 최범진², 손천명³, 서덕기³, 정영훈^{1,a}

¹ 한국세라믹기술원 전자소재부품센터

² (주)센볼 기술연구소

³ 한전KDN(주) 발송전IT연구팀

A Study on the Characteristics of Wireless Sensor Powered by IDE Embedded Piezoelectric Cantilever Generators Using Conveyor Vibration

Chang-il Kim¹, Min-seon Lee¹, Jung-ho Cho¹, Jong-hoo Paik¹, Yong-ho Jang², Beom-jin Choi²,
 Cheon-myung Son³, Duk-gi Seo³, and Young-hun Jeong^{1,a}

¹ Electronic Materials & Component Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

² Technology & Research Center, Senbool Corporation, Incheon 21639, Korea

³ Power Transmission and Substation IT Research Group, KEPCO KDN, Naju 58217, Korea

(Received September 27, 2016; Revised October 21, 2016; Accepted October 25, 2016)

Abstract: Characteristics of a wireless sensor powered by the IDE (interdigitated electrode) embedded piezoelectric cantilever generator were analyzed in order to evaluate its potential for use in wireless sensor applications. The IDE embedded piezoelectric cantilever was designed and fabricated to have a self-resonance frequency of 126 Hz and acceleration of 1.57 G, respectively, for the mechanical resonance with a practical conveyor system in a thermal-power plant. It produced maximum output power of 2.81 mW under the resistive load of 160 Ω at 126 Hz. The wireless sensor module is electrically connected to a rectifier capacitor with capacity of 0.68 farad and 3.8 V for power supply by the piezoelectric cantilever generator. The unloaded capacitor could be charged as a rate of approximately 365 $\mu\text{V}/\text{s}$ while the capacitor exhibited that of 0.997 mV/min. during communication under low duty cycle of 0.2%. Therefore, it is considered that the fabricated IDE embedded piezoelectric cantilever generator can be used for wireless sensor applications.

Keywords: Piezoelectrics, IDE, Generator, Actuator, Wireless sensor, Vibration, Conveyor

1. 서론

사물인터넷(internet of things, IoT) 시대가 성큼

다가오면서 생활 주변의 정보를 감지하고 감지정보를 처리 및 송·수신하는 기능의 스마트 무선 센서 수요가 급증하고 있다 [1,2]. 스마트 홈, 스마트 빌딩 등과 IoT 시스템으로 운영되는 공간은 센서의 전원 공급 기술이 주요한 이슈가 되고 있다. 즉, 배터리나 유선으로 전력을 공급하는 데 소요되는 비용과 위치 제약 등의 문제는 스마트 IoT 시스템의 활성화에 걸림돌로 인식되었다. 하지만, 에너지 하베스팅 기술은 배터리나 배

a. Corresponding author; ykjeong@kicet.re.kr

Copyright ©2016 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

선 문제를 해결할 수 있는 스마트 무선 센서의 전력 공급원으로서 중요한 솔루션이 되고 있다 [3-8]. 기존 배터리와 비교하여 태양광, 압전, 열전 등의 여러 가지 에너지 하베스팅 기술이 효율과 내구성 측면에서 다소 부족하지만 주기적 충전과 짧은 수명을 가지는 배터리의 단점을 보완하기 위하여 에너지 하베스팅 기술은 여전히 스마트 센서의 보조전원으로 활발히 검토되고 있다.

이들 중, 압전 에너지 하베스팅 기술은 진동 구조물 안전 상태 관리용 모니터링 시스템에 응용하기 위한 연구가 최근 많이 이루어지고 있다 [9-12]. 교류 전원으로 동작하는 전기 모터, 발전기, 변압기 등 다양한 진동 구조물에서 발생하는 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 모니터링 센서의 전원으로 활용하는 것이다. 일반적으로 무작위 방향을 가지는 진동체의 진동 성분을 3D 방향별로 가속도와 주파수 성분을 추출한 후 특정 방향의 진동 성분을 이용하는 캔틸레버 구조의 압전 소자를 활용하여 변환된 전력으로 무선 센서의 전원으로 활용하게 된다. 이 때, 압전 캔틸레버 발전 소자는 전력 출력 성능을 극대화하기 위하여 진동 구조물의 주파수와 공진(resonance)이 발생하도록 최적 구조로 설계하게 된다 [13-15].

본 연구그룹은 IDE (interdigitated electrode) 패턴 임베디드 압전 캔틸레버 발전 소자를 제작한 후 전력 출력의 주파수 특성 평가에 관한 연구를 보고하였다 [16]. IDE 구조의 캔틸레버 하베스터의 경우 진동 환경에서 33 모드로 구동이 가능하여 보다 높은 에너지 변환 효율(k^2)을 가질 수 있다. 공진 환경에서 에너지 변환 효율은 $3k_{31}^2 \leq k_{33}^2 \leq 5k_{31}^2$ 의 특성을 가지므로, 일반적인 cantilever에서 채용하는 전면 구조는 31 모드로 동작을 하지만 IDE 구조는 33 모드로 동작을 하기 때문에 보다 높은 에너지 변환 효율을 나타낼 수 있어 본 연구에서 IDE 구조를 사용하였다. 제작한 압전 발전 소자는 IDE 임베디드 적층형 압전 소자로 1,150°C에서 동시 소성된 후 캔틸레버 구조로 제작되었으며, 실험실 환경에서 100 kΩ의 부하 저항 인가 시 120 Hz에서 최대 3.64 mW의 높은 출력 전력 특성을 나타내었다 [16]. 이를 이용하여 본 연구에서는 진동 구조물에서 발생하는 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 무선 센서의 전원으로 응용가능한지를 평가하고자 하였다. 진동 구조물로는 화력발전소에서 사용되는 석탄 원료를 이송하는 운반 컨베이어(conveyor) 시스템을 활용하였으며 저전력 무선 통신(LoRa) 칩셋을 탑재하여 자체 제작한 무선 센서 모듈을 적용하였다.

2. 실험 방법

2.1 IDE 적층 압전 캔틸레버 발전 소자 제작

100 μm의 선폭과 500 μm의 선 간격을 가지는 IDE 패턴을 설계한 후 스크린 프린팅용 마스크(스크린 제조사, Korea)를 제작하였다. 이를 이용하여 Ag-Pd (7:3) 페이스트(WT-SPD30-A, Winner Technology, Korea)를 사용하여 25 μm 두께의 압전 시트 표면에 IDE 패턴을 인쇄한 후 총 10장의 압전 시트를 라미네이터(Woori system, Korea)로 60°C에서 적층하고 3,000 psi, 65°C에서 10분 동안 WIP (warm isostatic press) 처리한 후 다이싱(dicing) 하여 30 mm (가로) × 30 mm (세로)의 크기를 갖는 IDE 적층 압전 소자를 제조하였다. 이를 1,150°C에서 1시간 동안 동시 열처리 공정을 수행하여 안정적으로 소결한 후, 소결체의 두께를 고려하여 2.5 V/μm의 전계 조건에서 30분 동안 분극(polarization)을 실시하였다. 분극된 시편은 500 μm 두께와 37 mm (너비) × 61 mm (길이)의 크기를 가지는 SUS (stainless steel) 재질의 metal shim의 한쪽 면에 에폭시로 상온에서 완전히 부착하였으며, 반대쪽 측면 끝단에 부착되는 proof mass의 질량을 조절하여 공진주파수의 위치를 조절할 수 있도록 제작하였다. 본 연구에서는 사용된 압전 물질은 Pb(Zr,Ti)O₃계 상용 압전 파우더(S55, Sunnytec, Taiwan)로 표 1과 같은 압전물성을 가지고 있다.

Table 1. Piezoelectric properties of commercial piezoelectric material (S55) from Sunnytec Electronics, Taiwan.

Piezoelectric properties	Values
Curie temperature (T_c)	170°C
Coupling coefficient (k_{33})	65%
Mechanical quality factor (Q_m)	55
Piezoelectric charge constant (d_{33})	750×10^{-12} C/N
Piezoelectric voltage constant (g_{33})	18.4×10^{-3} Vm/N
Elastic constant (S_{33}^E)	32.7×10^{-12} m ² /N

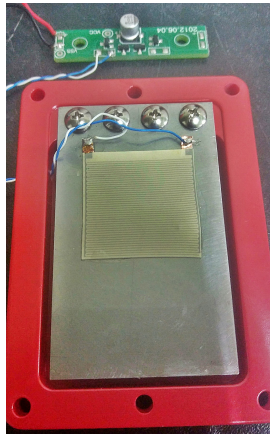


Fig. 1. Fabricated IDE embedded piezoelectric cantilever generator.

2.2 무선 센서 모듈 제조

제작한 압전 캔틸레버 발전 소자의 활용성을 검증하기 위해 발전 소자의 발전에너지를 이용하여 구동하는 무선센서 모듈을 설계 및 제작하였다. 무선 센서 모듈은 대기온도와 캔틸레버 진동의 크기와 주파수를 계측하는 센서를 내장하고 있으며 주기적으로 계측한 센서 정보를 생성하고 LoRa (long-trange sub-Ghz module) 무선 통신으로 전송하도록 구성하였다 [17]. 또한 무선 센서 모듈은 전원회로에 대용량 캐패시터(capacitor)를 추가하여 압전 에너지 캔틸레버 발전 소자의 발전력을 저장과 방전이 용이 하도록 구성하였다.

그림 2는 무선 센서 모듈의 하드웨어 구성도이다. 컨베이어 상태 감시용 센서로 온도센서를 구비하고 있으며 또한 캔틸레버의 진동을 센서 정보로 활용하기 위해 발전 전압을 계측하고 주파수와 크기를 계산하는 회로를 포함하고 있으며, 충전에 의한 기동 시 안정적인 하드웨어 초기화를 위해 추가의 리셋 회로를 갖는 것이 특징이다. LOM100A 모듈은 Semtech사 LoRa SX1276 칩셋과 ST사의 마이컴 Cortex-M3 (32 MHz)를 내장하고 있다.

본 연구에서 개발한 무선 센서 모듈은 열악한 전원 환경에서 구동할 수 있도록 하드웨어를 저전력으로 설계하였으며 효율적인 에너지 사용을 위해 캐패시터의 전압 조건에 따라 계측/통신 주기를 가변하여 운용되도록 펌웨어를 최적화하였다. 또한 개발한 무선 센서 모듈은 화력발전소 저탄장의 운탄용 컨베이어의 측면에 설치하여 약 700 m 지점의 제어센터의 데이터 수집용 게이트웨이와의 안정적인 통신능을 검증하였다. 그림 3은 제작한 무선센서 모듈의 시작품 사진이다.

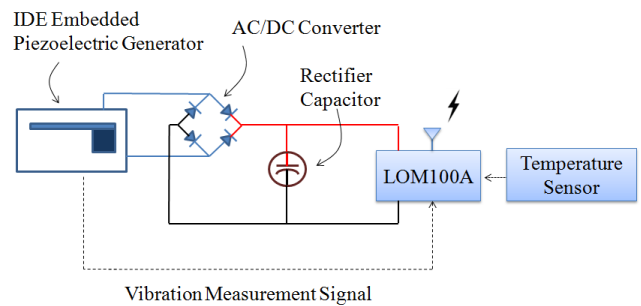
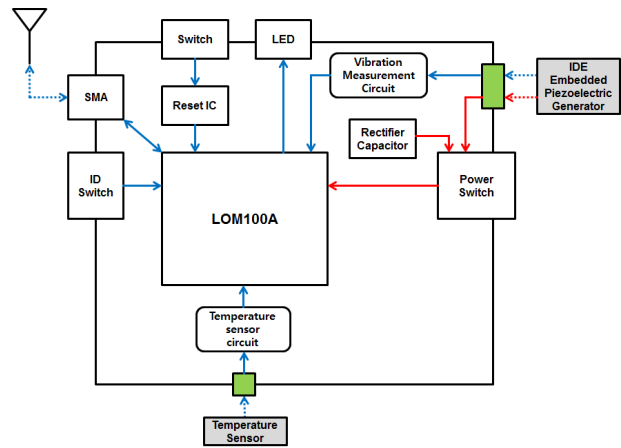


Fig. 2. Block diagram of the wireless sensor module.

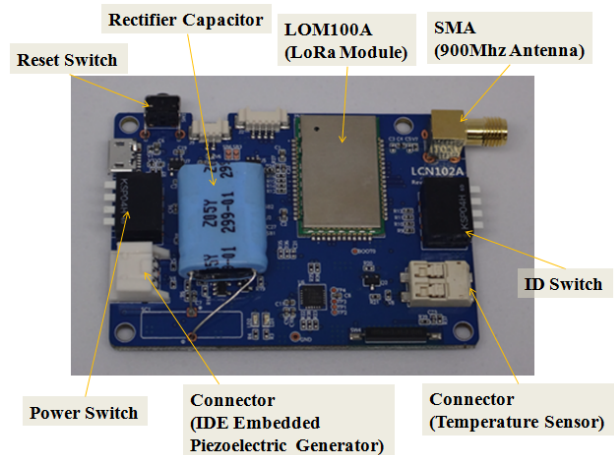


Fig. 3. Fabricated prototype wireless sensor module.

그림 4는 무선 센서 모듈을 이용한 통신 시험 결과에 대한 측정 데이터로서 무선 센서 모듈에서 전류가 흐른 시간과 전류가 흐르지 않은 시간의 합을 한 주기로 하는 시간 경과에 대하여 무선 센서 모듈에서 소비하는 전류의 크기의 상대적 비를 나타내는 사용률

(duty cycle)을 보여주고 있다. 제작한 무선 센서 모듈은 슬립 모드(sleep mode)에서 소비 전류는 약 4 μ A이며, 통신을 위한 연산 수행 시 약 42.46 mA, 통신 시 약 40.56 mA의 전류를 소비하는 것으로 예측되었다. 센서로부터 계측된 정보를 전송하는 송신 주기는 5분으로 0.2%의 duty cycle을 가지도록 펌웨어를 설계하였으며, 연산 시간과 송신 시간은 각각 0.2초, 0.4초로 구성하였다.

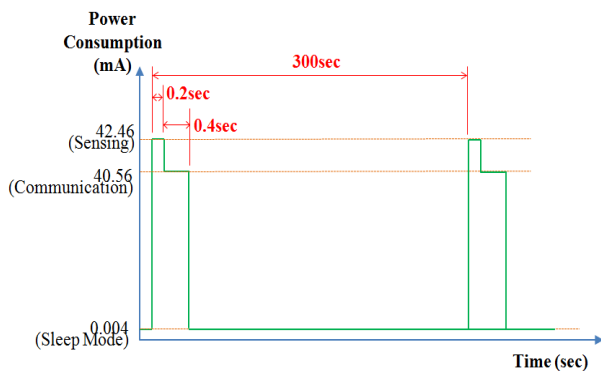


Fig. 4. Duty cycle of the wireless sensor module powered from the fabricated IDE embedded piezoelectric cantilever generator.

3. 결과 및 고찰

그림 5는 화력 발전의 원료인 석탄을 이송하는 컨베이어 시스템의 단면 구조 모식도를 보여주고 있다. 컨베이어 시스템은 컨베이어 벨트(conveyor belt) 이외에 아이들러(idler)라고 하는 석탄 운반용 벨트 컨베이어를 받치고 있는 롤러와 아이들러의 회전의 중심축 기능을 하는 샤프트(shaft), 아이들러를 지지해 주는 서포터(supporter) 등으로 개략 구성되어 있다. 본 연구에서 컨베이어 벨트의 운반 동작 시 발생하는 진동의 주파수 및 가속도 성분을 직교좌표계의 각 방향 성분으로 추출하기 위하여 그림 5의 단면도를 투영하는 방향을 X축으로 가정하고, 이와 공간상으로 서로 90도 직교하는 Y축과 Z축 방향을 각각 그림 5의 오른쪽에 표시하였다. Z축의 경우, 컨베이어 벨트의 일측면과 접촉되어 회전하는 아이들러의 샤프트 방향과 동일한 방향을 의미한다. 컨베이어 벨트의 운반 동작 시 이를 구성하는 위치별로 다양하게 진동 성분을 측정하였으나 가장 외곽에 놓인 아이들러 서포터의 최상단에 위

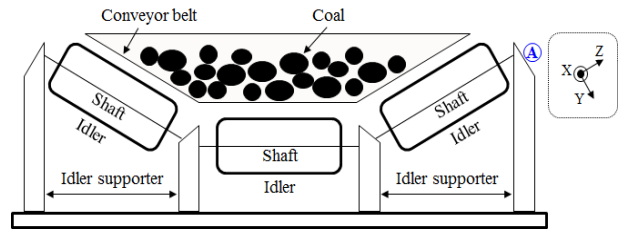


Fig. 5. Schematic of conveyor belt system carrying coals for thermal power plant.

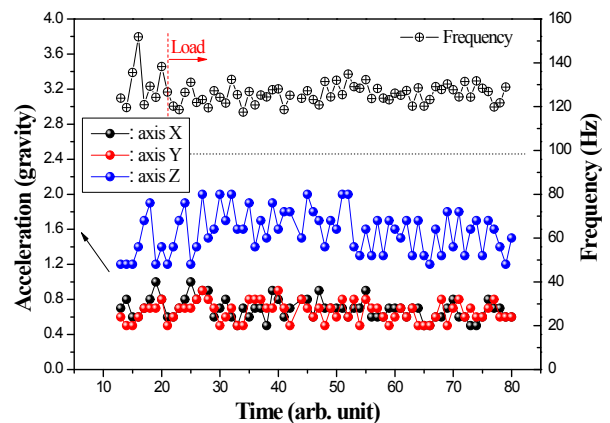


Fig. 6. Time dependant acceleration in 3D space (x, y, z coordinates) and vibration frequency along z axis measured at A site of the belt conveyor system.

치한 A site가 가장 우수한 진동 에너지를 가지는 것으로 측정되었다. A 지점에서 3축 가속도 측정계로 측정된 진동 성분을 그림 6에 나타내었다.

그림 6은 화력발전소의 실제 운탄용 컨베이어 시스템의 A 지점에서 측정된 진동 성분의 X, Y, Z축 방향별 가속도의 크기와 Z축 방향의 컨베이어 벨트의 진동 주파수 크기를 측정한 그래프이다. 컨베이어 시스템이 동작하는 경우 불균일한 운탄량으로 인하여 시간 경과에 따른 축 방향별 가속도와 주파수 크기 또한 일정하지 않고 지속적으로 변동하는 결과를 나타내었다. 본 연구에서 측정된 시간 범위에서 X, Y축 방향으로의 평균 가속도 크기는 각각 0.69 G와 0.66 G로 서로 유사한 크기를 나타내었으며, 시간에 따른 변동 경향도 유사하였다. 그러나 Z축 방향으로의 평균 가속도는 1.57 G로 X, Y축 보다 2배 이상의 크기를 나타내었으며, 가속도의 변화폭도 최소 1.2 G에서 최대 2 G까지 약 0.8 G로 X, Y축의 가속도 변화폭이 약 0.4 G인 것과

비교하여 약 2배에 가까운 큰 변화폭을 나타내었다. Z축 방향으로의 주파수 변환 경향은 석탄 하중이 인가된 load 이후 시점부터 평균 126 Hz를 나타내었으며 최소 117 Hz에서부터 최대 135 Hz까지 변화하였다. 이러한 진동 환경에 최적화 설계 제작된 IDE 적층 압전 캔틸레버 소자의 발전 성능을 측정하기 위하여 측정 시스템을 설치하였다.

화력발전소 운탄 컨베이어 시스템의 평균 동작 주파수인 126 Hz를 공진 주파수로 매칭한 IDE 적층 압전 캔틸레버 소자와 정류회로(rectifier)가 연결된 압전 발전 모듈은 가진기(vibrator)에 장착되어 파형 발생기(signal generator)로부터 생성되어 증폭기(amplifier)를 거쳐 증폭된 진동 신호를 인가받게 된다. 운탄 컨베이어 시스템의 Z축 평균 가속도와 동일한 1.57 G로 가진기의 가속도를 제어하기 위하여 증폭기 전압을 조절한 후 진동계(vibration meter)를 이용하여 동작 가속도가 1.57 G가 됨을 확인하였다.

이러한 진동 환경 조건에서 인가된 신호로부터 압전 발전 모듈에서 발생하는 전기 신호는 가변 저항을 거쳐 전력계에 전압과 전류를 출력하게 된다. 이들 측정 시스템의 설치 이미지를 그림 7에 나타내었다.

그림 8은 화력발전소 운탄 컨베이어 시스템의 진동 환경과 유사하게 실험실에서 정현파, 126 Hz, 1.57 g로 진동 환경을 구현한 뒤, IDE (interdigitated electrode) 패턴 임베디드 압전 캔틸레버 발전 소자를 부하 저항의 크기에 따라 측정된 전력 특성과 전압, 전류(삽화) 특성을 그래프를 보여주고 있다. 부하 저항을 10 Ω (ohm)에서 300 Ω까지 증가시키면 발전소자의 출력 전압(V_{output})은 2.7 V에서 25.4 V까지 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 출력 전류(I_{output})는 전압의 변화 경향과는 달리 0.27 mA에서 감소하기 시작하여 300 Ω에서 0.096 mA에 이르렀다. 아래 식(1)로부터 계산한 발전 소자의 출력 전력(P_{output}) 특성은 70 Ω까지는 급격하게 증가하였으나 80 Ω부터 160 Ω까지는 꾸준히 완만하게 증가하여 160 Ω에서 최대 2.81 mW를 나타내었다.

$$P_{output} = V_{output} \times I_{output} \quad (1)$$

부하저항을 더욱 증가시켜 300 Ω까지 이를 때까지 출력 전력은 완만하게 감소하여 약 2.44 mA까지 감소하는 경향을 나타내었다.

컨베이어 운탄 시 진동환경과 유사한 조건인 126 Hz, 1.57 G의 평균 주파수와 가속도의 진동 환경으로부터

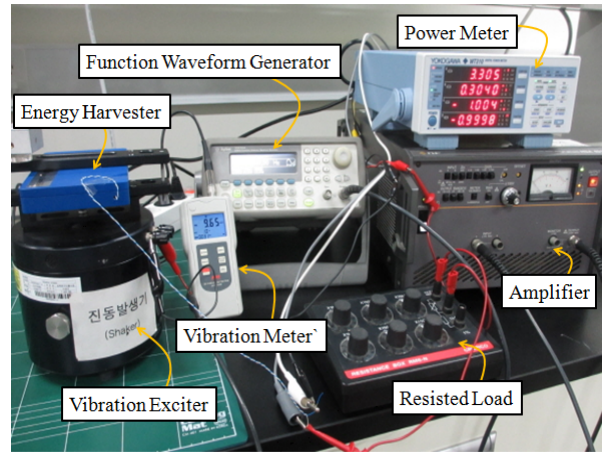


Fig. 7. Experimental setup for measurement of power output for the IDE embedded piezoelectric cantilever generator.

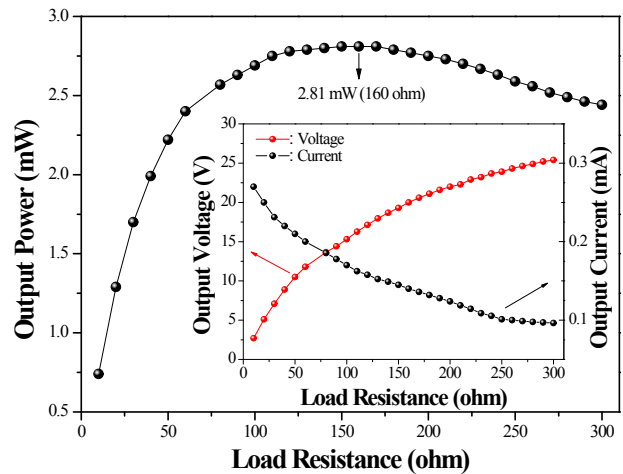


Fig. 8. Output voltage, current (inset) and output power of the fabricated IDE embedded piezoelectric cantilever generator with a variation of resistive load.

압전 캔틸레버 발전 소자에서 생성된 교류 전기 신호는 정류 회로를 거쳐 직류 전기신호로 변환되고 전기 용량 0.68 패럿(farad), 3.8 V의 에너지 저장용 캐패시터에 충전된다. 저장된 에너지는 스위치 동작 상황에 따라 무선 센서 모듈의 동작 전력을 공급하게 된다.

그림 9(a)에서는 IDE (interdigitated electrode) 패턴 임베디드 압전 캔틸레버 발전 소자로 126 Hz, 1.57 G의 진동 환경에서 생성된 발전 전력을 이용하여 무부하(unloaded) 상태에서 캐패시터에서 충전되는 그래프를 나타내었고 그림 9(b)에서는 무선 센서 모듈의 통신

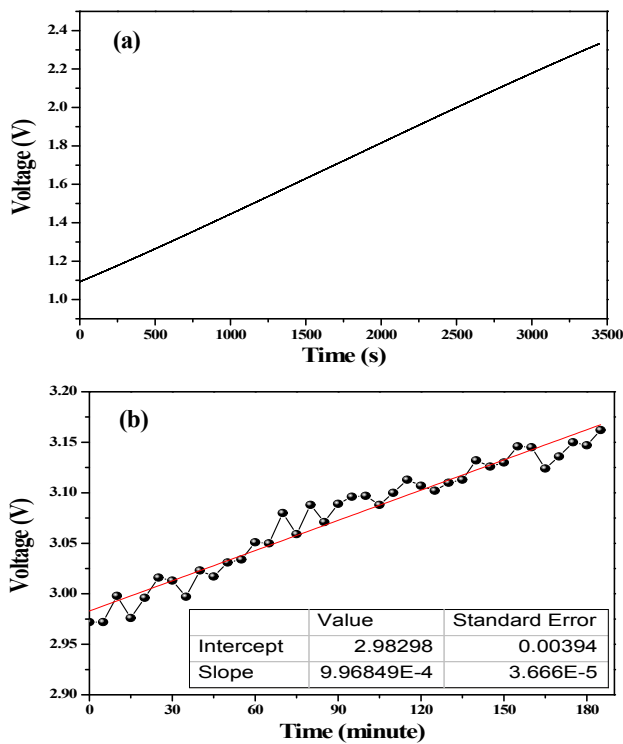


Fig. 9. (a) Unloaded capacitor voltage and (b) variation of capacitor voltage during communication for the wireless sensor module powered by the IDE embedded piezoelectric cantilever generator.

동작 시 3시간 동안 5분 간격으로 측정한 캐패시터에서의 전압 변화를 나타내었다. 그림 9(a)에서 보듯이 최초 충전 시 1.092 V에서 충전되기 시작하여 3,448초 동안 선형적으로 충전되면서 캐패시터 전압은 2.332 V에 도달하였다. 캐패시터 충전 속도는 초당 약 365 μV 를 나타내었다. 이를 이용하여 무선 센서 모듈의 통신 동작 시 측정된 캐패시터 전압의 변화는 그림 9(b)에서 보듯이 뚜렷하게 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 그림 4의 듀티 사이클에서 나타난 것처럼 5분 간격으로 송신 주기를 설정하였기 때문에 동일한 시간 간격을 두고 큰 전력 소비가 발생할 것으로 예측하였다. 그럼에도 불구하고 캐패시터의 전압은 부하로서 무선 센서 모듈의 통신 동작 시에도 방전 속도보다 충전 속도가 우위를 가지면서 무선 통신이 지속 가능하였다. 통신 동작 시에 캐패시터의 전압 변화를 최소자승법 (least square method)을 이용하여 선형적인 근사치로 피팅(linear fitting)하여 그림 9(b)의 붉은 색 선으로 나타내었다. 이로부터 무선 센서 모듈의 통신 시

캐패시터의 충전 속도는 분당 약 0.997 mV 정도로 확인되며 표준 오차는 36.66 μV 수준으로 나타났다. 이는 IDE 패턴 임베디드 압전 캔틸레버 발전 소자를 이용하여 저전력 무선 통신 모듈의 전원으로서 충분히 활용 가능함을 의미한다.

4. 결론

IDE (interdigitated electrode) 패턴 임베디드 압전 캔틸레버 발전 소자를 제작한 후, 이를 이용하여 진동 구조물에서 발생하는 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 무선 센서의 전원으로서 응용가능성을 평가하고자 하였다. 진동 구조물로는 화력발전소에서 사용되는 석탄 원료를 이송하는 운탄 컨베이어(conveyor) 시스템을 활용하였으며 저전력 무선 통신(LoRa) 칩셋을 탑재하여 자체 제작한 무선 센서 모듈을 적용하였다. 제작한 무선 센서 모듈은 슬립 모드(sleep mode)에서 소비 전류는 약 4 μA 이며, 통신을 위한 연산 수행 시 0.2초 동안 약 42.46 mA, 통신 시 0.4초 동안 약 40.56 mA의 전류를 주기적으로 소비하도록 설계되었다. 화력 발전의 운탄 컨베이어의 진동 환경은 아이들러 서포터의 최상단 부분에서 Z축 방향으로 126 Hz, 1.57 G의 평균 주파수와 가속도를 각각 나타내었다. 이러한 진동 조건에서 본 연구에서 제작한 IDE (interdigitated electrode) 패턴 임베디드 압전 캔틸레버 발전 소자는 160 Ω 의 부하 저항에서 최대 2.81 mW를 나타내었다. 이렇게 생성된 전력은 전기용량 0.68 패럿(farad), 3.8 V의 에너지 저장용 캐패시터에 초 동안 시간이 경과한 후 완전히 충전됨을 확인하였고, 5분 단위로 센서 신호를 송신하도록 설계 및 제작한 무선 센서 모듈의 통신 동작 시 캐패시터에서 나타나는 전압 변화로부터 통신이 가능함을 확인하였다. 이로부터 본 연구에서 제작한 IDE 임베디드 압전 캔틸레버 발전 소자는 화력발전 컨베이어의 운탄 시 진동 에너지를 변환하여 IoT 무선 센서의 전원으로 응용이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20151120100260)

REFERENCES

- [1] D. Culler, D. Estrin, and M. Srivastava, *IEEE Computer Society*, **37**, 41 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/MC.2004.93>]
- [2] E. M. Yeatman, *Proc. Int'l Workshop Wearable and Implantable Body Sensor Networks* (London, England, 2004) p. 20.
- [3] S. W. Arms, C. P. Townsend, D. L. Churchill, J. H. Galbreath, and S. W. Mundell, *Proc. SPIE Int'l Symposium on Smart Structures & Smart Materials*, (San Diego, USA, 2005) p. 267.
- [4] S. Priya and D. J. Inman, *Energy Harvesting Technologies* (Springer, New York, 2009) p. 195. [DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76464-1>]
- [5] J. M. Gilbert and F. Balouchi, *International Journal of Automation and Computing*, **5**, 334 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11633-008-0334-2>]
- [6] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, *Computer Communications*, **26**, 1131 (2003). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7)]
- [7] D. L. Churchill, M. J. Hamel, C. P. Townsend and S. W. Arms, *Proc. SPIE 5055, Smart Structures and Materials 2003: Smart Electronics, MEMS, BioMEMS, and Nanotechnology* (San Diego, USA, 2003). [DOI: <https://doi.org/10.1117/12.483591>]
- [8] J. A. Paradiso and M. Feldmeier, *Ubiquitous 2001: Ubiquitous Computing* (Springer, New York, 2001) p. 299. [DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-45427-6_25]
- [9] R. D. Kornbluh, R. Pelrine, Q. Pei, R. Heydt, S. Stanford, S. Oh, and J. Eckerle, *Proc. SPIE 4698, Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies* (San Diego, USA, 2002) p. 254.
- [10] Y. Zou, L. Tong, and G. P. Steven, *Journal of Sound and Vibration*, **230**, 357 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2624>]
- [11] S. B. Park, D. H. Han, and L. H. Kang, *Composites Research*, **27**, 141 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.7234/composres.2014.27.4.141>]
- [12] D. H. Han, L. H. Kang, J. Thayer, and C. Farrar, *Composites Research*, **28**, 155 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.7234/composres.2015.28.4.155>]
- [13] S. Meninger, J.O.M. Miranda, R. Amirtharajah, A. P. Chandrakasan, and J. H. Lang, *IEEE Trans. Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, **9**, 64 (2001).
- [14] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, *J. Microelectromechanical Systems*, **13**, 429 (2004).
- [15] A. Erturk and D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting* (John Wiley & Sons, United Kingdom, 2011) p. 301. [DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119991151.ch10>]
- [16] M. S. Lee, C. I. Kim, J. S. Yun, W. I. Park, Y. W. Hong, J. H. Paik, J. H. Cho, Y. H. Park, Y. H. Jang, B. J. Choi, and Y. H. Jeong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 581 (2016) [DOI: <http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.9.581>]
- [17] <http://lora-alliance.org/>