# 철도차량 무선 센서 모니터링 시스템 개발을 위한 기초연구

# A study on the basic test for the development of the wireless sensor monitoring system of the railroad vehicle

김재훈†* 오재근** 박준서* 김형진*

Kim, Jaehoon Oh, Jae-Geun Park, Jun-Seo Kim, Hyung-Jin

**ABSTRACT**

We did the blooth module test as a pre-test of wireless sensor monitoring system, which for the improving of on-condition maintenance reliability, on the train. In this test, we examined the communication environment of wireless sensor monitoring system by the acceleration date and frequency date in the real train structure during the operation. Also based on this results, we did the experimental verification of the sensor power system which use piezoelectric energy conversion technology by the theoretical modeling for the applying on the train on-condition maintenance.

## 1. 서 론

철도시스템 계측 분야에서 차량 유지, 관리를 위해 사용하는 여러 가지 센서는 실시간 계측이 필수 조건이며 현재 배터리 혹은 전선을 통한 전원 공급 방식으로 전력 공급을 하고 있다. 그러나 이러한 방법은 설치 장소의 제한과 아울러 장기적인 유지 관리비 차원에서 불편함 점이 있다. 아울러 차량 유지 관리 시스템 개발을 위해서는 센서의 크기는 더욱 작아져야 함과 동시에 설치 장소의 제한 없이 쉬운 "Plug and play"를 이루기 위해서는 현재 기술의 개량이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 철도시스템 "Plug and play" 기술을 적용하여 온-컨디션 유지보수 업무 효율화 및 신뢰성 확보를 위한 상태 모니터링 유지보수 (CBM, Condition-Based Maintenance) 기술 개발의 기초연구로서 무선 센서 시스템의 pre-test로 블루투스 모듈을 사용한 시험을 수행하였다. 그리고 이 실험 결과를 통하여 실제 열차 환경에서의 가속도 및 주파수 조건을 계측하여 열차 구조에서 무선 통신 환경을 점검하고 이를 바탕으로 이론적 모델링을 통한 압전 에너지 변환기 센서 전원 시스템의 적용성에 대한 실험적 검증을 수행하였다.

## 2. 열차 가진 환경 테스트 및 결과

최근에 국내외적으로 활발히 연구되고 있는 통신/기계/철도/자동차/인체 및 환경과 관련한 원격 계측 분야는 크기의 제약에 의해서 기존의 외부 동력이나 자체 동력원 이외의 새로운 형태의 초소형 동력원이 필요하다. 전력을 발생시키는 기존의 초소형 장치는 마이크로 터빈이나 연료 전지와 같은 화학적인 에너지 변환을 이용하는데 집중되어 왔다. 그러나 이러한 전력 발생기는 크기 제약으로 인해 초소형 시스템 사양에 적당하지 않으며, 저장 수명과 교체 접근성에서 제한요소를 가지고 있다. 따라서 배터리와

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
E-mail : lapin95@krri.re.kr
TEL : (031)460-5248 FAX : (031)460-5279
* 정회원, 한국철도기술연구원
** 정회원, 호서대학교 자동차공학과

같이 에너지를 저장하여 사용치 않고 시스템의 구동에 의해 발생하는 에너지를 뜻하는 여유 에너지(ambient energy)를 이용할 경우, 배터리 교체가 어렵고 오래 사용되는 시스템에서 잠재적으로 반영구적인 작동 수명을 가지며 사용할 수 있기 때문에 추가 비용이 들지 않는 장점이 있다.

따라서 열차의 주행 중 발생하는 진동에너지를 변환하여 마이크로 시스템이나 저전력을 구동할 수 있는 초소형 동력원을 개발하고 이때 발생한 전기 에너지를 이용하여 차량 상태를 감지하고 무선을 통하여 데이터를 전송시키는 『무전원/무선 계측 시스템 개발』을 위해 열차의 주행 중 발생하는 가속도의 변화와 주파수의 분석을 수행하고자 한다. 열차 주행에 따라 열차의 각 부위(대차와 차체, 실내 등) 별 데이터를 통해 주변 환경 분석을 수행함으로써 초소형 동력원의 적합한 형태와 설계 인자를 추출할 수 있기에 무전원/무선 계측 시스템 개발에 앞서 환경 분석 테스트가 기초 연구로 반드시 수행되어야 한다.

무선 센서 시스템의 pre-test로 블루투스 모듈을 사용하여 안정된 전원 공급 상태에서 열차의 진동 특성을 파악해야 하며, 또한 열차 구조에서 무선 통신 환경을 점검하고, 센서의 소비 전력 및 기타 발생할 수 있는 변수의 점검을 병행할 필요성이 있다.

## 2.1 DAQ 시스템의 구조

### 2.1.1 센서 모듈 구조

앞서 설명한 압전 에너지 변환 이론에 대한 실제 열차 환경에서의 적용성 검증과 아울러 최적화 된 에너지 변환기 설계를 위하여 열차 각 위치(대차, 차체 및 실내)에 대한 가진 환경에 대한 계측을 수행하였다. 계측 대상은 틸팅 열차이며 센서와 데이터 수집 장치와의 연결은 2.45GHz ISM(Industrial Science and Medical) 대역 블루투스(Bluetooth) 모듈을 이용한 무선통신을 수행하였다. Bluetooth는 일반적으로 사용이 허가되어 있으며 Line of sight 기준 전파거리가 약 100m에 이르며 다중 접속이 가능한 장점이 있어 많은 휴대용 무선 장치에서 적용되고 있는 통신 기술이다. 본 연구를 위해 센서 모듈은 자체 전원, Micro-controller, 가속도 센서 및 A/D 변환기를 내장한 소형 모듈로 제작하였다. 자체 전원을 사용하여 장시간 계측을 하기 위해 소비 전력을 최대한 낮출 수 있도록 설계하였으며, 열차 부착 용이성, 악천후에 대비한 방수 대책도 고려하였다.

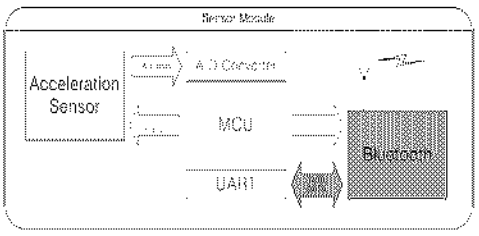


그림 1 센서모듈 개념도

표 1 MMA7260Q 가속도 센서 특징

| | |
|---|---|
| 동작전압 | DC 2.2~3.6 V |
| 소비전류 | 500㎂ |
| Sleep mode 소비전류 | 3㎂ |
| 선택 가능한 가속도 범위 | 1.5g (800㎷/g)<br>2g (600㎷/g)<br>4g (300㎷/g)<br>6g (200㎷/g) |

### 2.1.2 가속도 센서

열차의 진동을 계측하기 위한 센서는 진동의 크기와 주파수를 구하기 위해 3축 가속도센서를 적용하였다. 사용된 가속도센서는 Free-scale의 MMA7260Q이다. MMA7260Q는 낮은 소비 전력과 저전력 슬립 모드, 4개의 가속도 감지 모드, 저역 통과 Bessel 필터를 통한 전대역 신호 조절 기능, 선형 출력, 온도 보상 및 비율 측정(Ratio-metric) 기능을 내장하고 있다.

### 2.1.3 G-Cell 작동 원리

G-cell은 XYZ축 방향 감지를 위해 X-Y축에 교차 연결된(inter-digitated) 핑거 형태의 단일 질량 변환기와 축에 장착되어 Z축 가속이 감지되면 비틀림 효과를 제공하는 Teeter Totter(시소) 중량을 사용한다. 가속력이 진자를 움직이면 그 결과로 정전용량이 변화하게 된다. X축 및 Y축 방향의 가속력은 이동

경로에 따라 이동하는 감지 핑거를 통해 감지되며, Z축 가속력은 시험 대상의 중력방향 수직 거동에 의해 감지된다. G-cell은 금형 단계에서 밀봉되므로 먼지가 유입되지 않으며, 기계적 충격으로부터 보호할 수 있는 댐퍼와 측정 한계 초과 방지 장치가 내장되어 있다. 계측에 사용된 가속도 센서 모듈은 X, Y, Z 3축을 모두 계측할 수 있도록 설계 되었으며 초당 데이터의 전송률을 높이기 위해 1개의 축 방향을 프로그램상에서 선택하여 전송할 수 있도록 MCU와 PC 사이의 통신 제어 기능을 내장하도록 설계하였다. Gravity Sensitive 또한 4가지 모드 중 선택 가능하도록 설계 하였다.

#### 2.1.4 무선통신 모듈

사용된 Bluetooth module은 Firmtech사의 FB755AS 제품을 이용하였으며, 1:7 통신을 지원하며, 낮은 소비전력과 최대 통신 거리 100m, 최대 통신 속도 230,400bps 의 특징을 가지고 있다.

기본적으로 1:N 통신에서 1은 Slave 이며, N은 Master가 되어서 다수의 Master가 1대의 Slave에 연결하여 데이터 통신을 할 수 있다. 1:N 통신에서 송수신된 데이터를 처리 할 수 있는 능력을 1이라고 하였을 때 1(Slave) : 5(Master) 통신을 한다고 가정하면 Slave가 처리 할 수 있는 데이터는 1인데 각각의 Master에서 데이터를 동시에 보내면 5배가 많은 데이터가 들어오기 때문에 Slave에서는 처리하지 못하거나 panic 상태에 빠지게 된다. Slave의 원활한 데이터(Stream) 처리를 위해서 일부 Master의 데이터(Stream) 송신 간격을 제한하거나 데이터(Stream) 송수신 방식을 제어하게 된다. 본 계측에서는 1:1 통신을 사용함으로써 데이터의 누락과 Jamming에 의한 간섭을 최대한 배제하여 송수신을 원활하게 하였다.

### 2.2 데이터 수집부

통신 신뢰성과 데이터 전송률을 높이기 위해 Bluetooth module간의 통신은 1:1통신 모드로 설정하였으며, Master와 Slave 간의 통신이 끊기게 되면 Search Mode 로 들어가서 Pair 된 PIN code를 계속 Search 하도록 하여 연결이 끊기게 되더라도 빠르게 자동으로 재접속이 이루어지도록 프로그래밍 하였다. 본 계측에 사용된 수신부 Bluetooth module은 기본적으로 RS232 방식을 이용하여 통신하며, USB to Serial converter 를 거쳐 USB포트를 이용하여 PC와 연결된다. 전송된 Data는 8bit 단위로 저장이 되며, Excel 파일과 Binary 파일로 저장되도록 설정하였으며, PC 모니터에서 모니터링을 함과 동시에 저장이 된다. Excel 파일에 타임라인이 표시가 되고, 데이터당 10ms의 속도로 계측을 한다. 분석에 사용한 Binary 파일은 Matlab을 이용하여 분석되었으며, 파일 크기가 너무 커지게 되면 matlab 분석에 소요시간이 길어지는 관계로 너무 커지지 않도록 각 계측 이벤트 상황에 따라 Segment 단위로 저장하였다.

### 2.3 계측 위치 및 계측 결과

#### 2.3.1 센서모듈 위치

본 연구는 틸팅열차를 대상으로을 수행하였으며, 틸팅열차 외부 차체 및 대차에 각 한 개씩 그리고 열차 실내에 한 개 총 3개 위치에 대하여 계측을 수행하였다. 그리고 기본 설정으로 Gravity sensitivity는 1.5g (800mV/g), 측정축은 z-axis (g-axis), Sampling time은 10ms 정하여 조치원 - 회덕 구간(열차 속도 80km/h 이하)에 대하여 계측을 하였다.

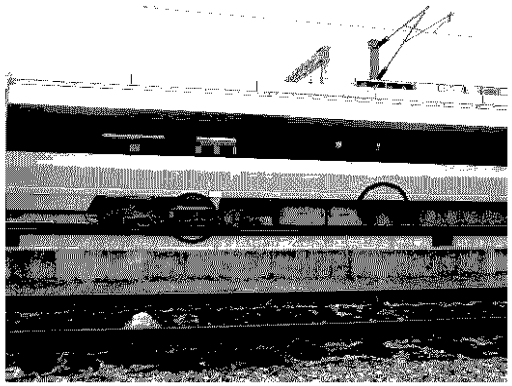

그림 2 외부 계측 위치

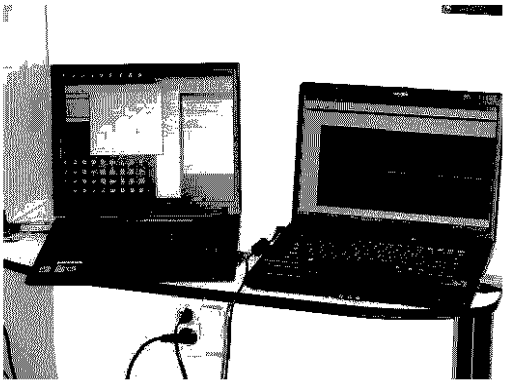

그림 3 데이터 수집 화면

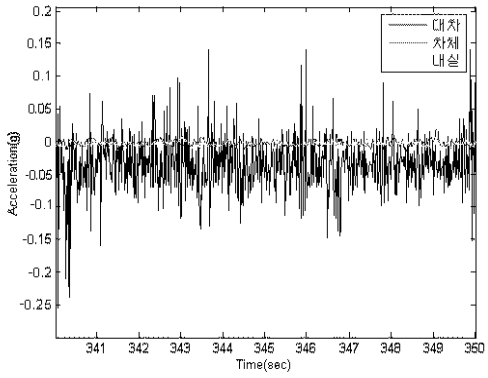


그림 5 전체 가속도 데이터

표 6 전체 가속도 계측 결과

| Acc. | 대 차 | | 차 체 | | 내 실 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | g | $m/s^2$ | g | $m/s^2$ | g | $m/s^2$ |
| Min. | −0.453 | −4.439 | −0.039 | −0.382 | −0.043 | −0.421 |
| Max. | 0.250 | 2.450 | 0.059 | 0.578 | 0.047 | 0.461 |
| RMS | 0.045 | 0.441 | 0.005 | 0.049 | 0.011 | 0.108 |

먼저 대차에서 계측한 가속도 데이터는 전체적으로 가속도가 크고 주파수 대역이 넓게 분포하는 것을 확인하였다. 또한 철로 레일간의 이격으로 인한 진동으로 판단되는 가속도의 주파수가 1 Hz미만(0.6 Hz)에서 가장 큰 가속도로 계측되며 이어서 8.8 Hz에서 주파수가 분포하고 있다. 그리고 약 17 Hz 근처의 Spectrum은 8.8 Hz 대역 주파수 Spectrum의 Harmonic 성분으로 보이고 있다. 따라서 계측결과 대차의 Natural frequency는 8~9 Hz로 판단된다. 하지만이 계측결과에서는 다음의 차체와 실내 결과에서 알 수 있듯이 가속도이 0.5g 정도로 차체와 실내에 비교하여 약 10배 정도 큰 값임을 확인하였다.

차체에서 계측한 가속도 데이터는 대차와 비교하여 전체적으로 진동이 작고 주파수 대역이 비교적 뚜렷하게 분포하는 것을 알 수 있다. 그리고 차체의 경우에도 대차와 마찬가지로 철로 레일간 이격으로 인한 진동으로 판단되는 주파수가 2 Hz미만(1.6 Hz)에서 계측이 되며, 7.8Hz 와 20.3Hz에서 진동 주파수가 분포하고 있다. 또한 최대 가속도는 0.06(g)가 넘지 않고 대차에 비하여 진동이 크게 감소는 것을 알 수 있다.

마지막으로 실내에서 측정한 가속도 데이터의 경우 전체적으로 진동이 작고 협대역 가진 주파수가 비교적 뚜렷하게 분포하는 것을 알 수 있다. 또한 철로 레일간 이격으로 인한 진동이 2 Hz미만(1.6 Hz)에서 계측되며 7.5 Hz, 및 12.5 Hz에서 이어지는 주파수가 분포하고 있다. 하지만 전체적으로는 차체와 비슷한 진동 주파수 특성을 보이고 있는 것으로 확인되었다.

그리고 이러한 대차와 차체, 실내의 계측결과를 종합할 때, 대차, 차체 및 실내의 경우 특징적인 진동 주파수 대역은 1 Hz 근처 및 8 Hz 근처인 것을 확인하였다. 그리고 이 값들 중 1Hz 근처의 진동 주파수는 열차 레일과 레일 사이의 연결부를 차량이 진행하면서 레일 연결부의 변형에 의한 충격파 영향으로 분석되며 8 Hz 근처의 진동 주파수 특성은 열차의 Natural frequency로 판단된다. 그리고 계측 결과는 향후 열차 상시 모니터링을 위한 기초 자료로 서 충분한 가지가 있다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 철도시스템 "Plug and play" 기술을 적용하여 온-컨디션 유지보수 업무 효율화 및 신뢰성 확보를 위한 상태 모니터링 유지보수 (CBM, Condition-Based Maintenance) 기술 개발의 기초연구로서 무선 센서 시스템의 pre-test로 블루투스 모듈을 사용하여 열차 주행에 따른 진동 특성에 대한 계측을 수행하였다. 본 연구는 향후 심화 연구를 통해 개발하게 될 압전 에너지 변환기 설계를 위한 기초자료로써 활용하게 되며 연구를 위한 열차 계측 결과 에너지 변환기 설계를 위한 매우 중요한 데이터와 결과를 얻게 되었다.

압전체를 이용한 에너지 변환기는 주로 협대역 가진 시스템을 활용하는데, 만약 열차의 진동 주파수가 열차의 운행상태에 따라 다르게 나타나거나 열차의 고유진동수가 고주파 대역에 형성되어 있다면 실제 에너지 변환기 설계에 애로사항으로 존재하게 된다. 그러나 계측 결과 열차에서 발생한 진동 주파수는 열차 거동에 따른 성분과 주변 환경 성분의 두 가지 성분으로 나타나고 있다. 즉, 1Hz 근처의 진동 주파수 성분은 레일과 레일 사이의 연결부를 열차가 통과할 때 발생하는 충격파에 의한 영향(환경 성분)이었으며 약 8Hz 근처에서 발생한 진동 주파수는 열차 구조물의 고유진동수에 해당하는 성분이다. 또한 이 주파수 성분들은 비교적 낮은 주파수 대역에서 형성되어 있으므로 향후 에너지 변환기를 설계할 때 비교적 수월한 설계가 가능하다. 또한, 대차에서 발생한 가속도는 0.5g 정도의 값을 나타내고 있으며 이 값은 에너지 변환기 개발에 충분한 가속도 값을 의미한다.

본 연구를 통해 계측된 값은 향후 에너지 변환기 개발에 있어 중요한 기초자료가 될 것이며, 본 연구 추진을 위한 계측 수행시 도출된 문제점을 보완한 추가 계측을 통하여 보다 정밀한 열차 계측 정보를 취득한다면 향후 보다 최적화 된 압전 에너지 변환기 개발이 가능하다.

### 참고문헌


Arunraj,

(1) 오재근,"표면탄성파를 이용한 에너지 포집형 무전원/무선 센서",서강대학교 공학박사,2004

(2) H.A.Sodano, D.J.Inman and G. Park, 2005, "Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16,pp.799-807

(3) S.Horowitz, K.A.Kasyap, F,Liu, D.Johnson, T.Nishida, K. Ngo, M.Sheplak, and L.Cattafesta, 2002, "Technology Development for Self-Powered Sensors", Proc. of 1st Flow Control Conference, AIAA-2022-2702

(4) S.Roundy, 2005,"On the Effectiveness of Vibration-based Energy Harvesting",Journal of Intelligent Material Systems and Structures,16,pp09-824