

철도차량 모니터링 시스템 개발을 위한 자가발전 기술 연구

김재훈^{*†}, 이재윤^{**}

* 한국철도기술연구원, ** 서강대학교 대학원 기계공학과

A Feasibility Study on the Energy Harvesting Technology for the Real-Time Monitoring System of Intelligent Railroad Vehicles

Jaehoon Kim^{*†} and Jae-Youn Lee^{**}

* Korea Railroad Research Institute,

** Dept. Mechanical Engineering, Graduate School of Sogang Univ.

(Received April 20, 2011 ; Revised June 28, 2011 ; Accepted June 29, 2011)

Key Words : Energy harvesting(자가발전), Monitoring(모니터링), Railroad Vehicle (철도 차량)

초록: 본 연구에서는 실시간 무선 철도시스템 모니터링을 위하여 열차 주행에 따라 발생하는 열 및 진동 에너지를 전기자원화 하는 신재생 에너지 개념의 전력원인 자가발전 구동 기술에 대한 철도시스템 적용 가능성을 확인하였다. 이를 위해 실제 주행 중인 고속열차를 이용하여 철도차량의 운행환경 하에서 발생하는 열에너지와 진동에너지를 실측하여, 주행 중 이들 에너지 발생량 및 변화를 분석하고 이를 통해 진동 및 열 에너지를 이용하는 자가발전 모듈의 예측 전력량을 계산하고, 이 전력량에 대한 이 모니터링 시스템 적용 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

Abstract: This study was aimed at investigating the applicability of energy harvesting technologies, which are regarded as new and renewable energy sources for real-time/wireless monitoring of intelligent railroad vehicles. The surrounding energy generated in a normal operating environment was monitored using a high-speed railroad vehicle in operation. This monitoring was performed in an attempt to evaluate the effectiveness of energy harvesting and the applicability of energy-harvesting-monitoring technologies under the conditions in which thermal energy and vibration energy are generated.

1. 서론

철도시스템에 있어 시스템의 고속화는 승객과 열차의 신뢰성과 안전성에 대한 절대적인 향상을 요구하며, 이를 위한 시스템 유지보수 비용의 증가는 또 다른 문제점으로 대두되고 있다. 따라서 시스템 고속화에 따른 신뢰성 및 안전성과 유지보수 비용이라는 두 가지 측면을 모두 충족시키기 위한 새로운 기술개발 노력이 필요하며, 이를 위해서는 철도차량 등의 철도시스템의 지능화가 선결 되어야 한다. 그리고 철도시스템 지능화의 기본은 지속적인 실시간 감지기술 개발에 있으며, 이를 위해 IT 기술이 융합된 지능형 모니터링 시

스템 구축이 필요하다. 일반적으로 모니터링 시스템은 대상 시스템의 이상 징후를 조기 발견하여 위험 상황에 처하기 이전에 예방 및 대응 조치를 취할 수 있도록 지속적인 감시를 하기 위해 필요하다. 그리고 이러한 지속적인 감시를 위해서는 모니터링 대상 시스템의 물리적 변화현상을 전기적인 신호로 변환하는 센서를 이용하여 정보의 분석을 통해 현상에 대한 파악이 가능해진다.

하지만 현재까지 철도시스템의 모니터링 시스템은 유선(wire) 센서의 사용이 일반적이며, 최근 들어 철도차량 대차 및 주행 장치 등에서 동작을 하는 부품이나 접근이 어려운 장소 등의 설치와 장소의 제약에 따라 점차 무선(wireless) 센서를 이용한 모니터링 시스템에 대한 요구가 확대되고 있다. 특히 무선 센서와 IT 기술을 이용하여 철도차량의 모니터링 시스템에 적용을 할 때 기존 주기적인 분해 및 검사 등의 유지보수 관리에서 사용하던

† Corresponding Author, lapin95@krti.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

방식과는 차별화된 주행 중 실시간 상태 모니터링 기반의 유지보수가 가능해지고, 이에 따라 철도차량 운행에 신뢰성과 안정성을 높일 수 있다.⁽¹⁾ 하지만 설치와 장소의 제약이 적은 무선 센서의 경우에도 모니터링 시스템으로 사용하기 위해서는 전원에 대한 문제를 해결해야 한다. 현재의 기술상 배터리의 에너지 밀도 증가율은 실제 사용하고 자 하는 분야의 요구를 충족하지 못하기 때문에, 철도시스템에 대한 실시간 혹은 장기간의 모니터링의 경우에는 주기적인 배터리 교환이 필요하다. 따라서 한정된 자원에서 지속적인 에너지 소모가 이루어지는 배터리 교환은 비환경 친화적이며, 배터리 교환에 따른 추가적인 유지보수 업무 등을 발생시킨다. 따라서 철도시스템의 지능형 모니터링을 위해서는 철도차량 운행 시 발생하는 주변에너지의 재활용을 통해 친환경적이며, 반영구적인 작동성능의 '자가발전 (Energy Harvesting)' 구동 모니터링 기술 개발이 필요하다.⁽²⁾

따라서 본 연구에서는 지능형 철도시스템 모니터링을 위하여 열차 주행에 따른 새로운 에너지원을 전기자원화 하는 신재생 에너지 개념의 전력원인 자가발전 구동 기술에 대한 적용 가능성을 확인하기 위하여, 실제 주행 중인 고속열차를 이용하여 철도차량의 정확한 운행환경 하에서 발생하는 주변에너지를 실측 하여, 자가발전 구동 모니터링 적용 가능성에 대하여 연구하였다.

2. 철도차량 주행 중 발생하는 주변에너지 측정

2.1 주변에너지 측정 위치 및 센서

본 연구에서는 300km/h 로 주행하는 고속열차를 대상으로 왕복 586.2km (서울 - 동대구 왕복)에 대한 주행 시험을 통해 주변에너지원을 측정하였다. 이때 측정 위치는 열차 주행시 진동이 가장 크며, 주행관련 여러 중요장치들이 설치되어 있는 대차 (bogie)에서 주변에너지원을 측정하였다.

먼저 Fig. 1 과 같이 '① 차축,' '② 대차 프레임 중앙'에 주행 중 발생하는 진동 가속도를 측정하기 위하여 MEMS 형 dual axis 가속도 센서(Model: ADXL278, 5 mm x 5 mm x 2 mm ceramic LCC package, g-ranges of $\pm 50g/\pm 50g$)와 블루투스 모듈 (블루투스 프로파일: GAP, SPP, 블루투스 버전: V2.0, 통신거리: 100m)을 설치하여 실시간 측정하였다. 설치 위치 '① 차축'의 진동 가속도 센서는 주행 중 레일과 차륜의 접촉에 의해 발생한 진동 가속도

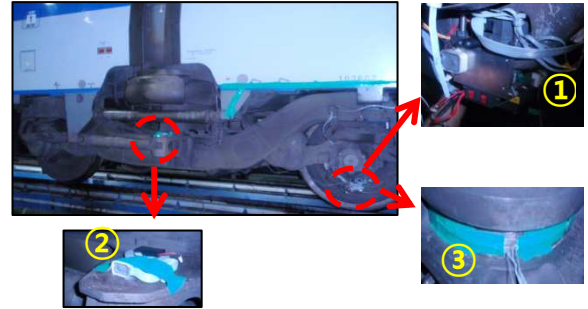


Fig. 1 The sensors on the bogie of high speed train

값을 감쇠 없이 측정하기 위해 설치하였으며, 설치 위치 '② 대차 프레임 중앙'의 진동 가속도 센서는 대차와 차축의 여러 현가장치 및 대차 프레임 자체에 의해 감쇠된 진동 가속도 값을 측정하기 위하여 설치하였다. 그리고 300km/h 로 주행하는 고속열차 주행시 발생하는 열에너지에 대한 온도변화를 측정하기 위하여 열차 주행시 온도 변화가 많은 대표적 부품인 차축베어링에 Fig. 1의 ③와 같이 온도 센서(Model: TC1047AVNB, 2.64 mm x 3.05 mm x 1.02 mm, temperature-ranges of $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$)를 설치하여 주행 중 차축베어링의 온도변화를 실시간 무선으로 측정하였다.

2.1 열차 주행 중 주변에너지 측정 결과

먼저 본 연구에서는 앞서 설명한 방법을 통해 측정한 주변에너지원 결과들을 분석하였다. 진동 가속도의 경우 300km/h 의 고속으로 주행하는 고속열차 대차의 '① 차축' 및 '② 대차 프레임 중앙' 모두에서 상당히 큰 진동 가속도 값이 발생하는 것으로 측정되었다. Fig. 2 와 같이 300km/h 고속 주행중인 열차의 레일과 차륜의 접촉에 의해 발생한 진동 가속도 값을 감쇠 영향 없이 차축에서 측정한 결과 순간 최대값을 기준으로 약 $\pm 40g$ 로 매우 큰 값이 발생하는 것으로 확인되었다. 또한 Fig. 3 과 같이 대차 프레임 중앙에서 측정되어 대차와 차축의 여러 현가장치 및 대차 프레임 자체에 의해 감쇠된 진동 가속도 측정결과의 경우에도 차축에서의 진동 가속도 값 보다는 많이 감쇠되었지만 순간 최대값 기준으로 약 $\pm 8g$ 로 상당히 큰 진동 가속도가 발생하는 것을 확인하였다. 특히 본 연구에서 측정 대상으로 선정한 고속열차의 경우 정기적인 유지보수 업무가 끝난 후 첫 주행 동안 주변에너지 측정시험을 하였기 때문에 열차의 운행 중 발생한 찰상과 박리 같은 차륜의 손상을 삭정을 통해 제거한 상태 이므로 차륜 손상으로

인한 이상 진동발생이 최대한 억제된 진동 가속도 결과이다.

또한 300km/h 로 주행하는 고속열차 레일의 경우에는 특수 용접 작업을 통해 전 구간의 레일과 레일 사이의 연결부위를 모두 매끄럽게 메웠기 때문에 지하철 및 일반 중속도 철도차량에서 발생하는 레일 연결부위 통과로 인한 진동은 발생하지 않는다. 따라서 이러한 운행 조건에서도 Fig. 2-3 과 같이 주행 중 매우 큰 진동 가속도가 측정된 결과로 볼 때, 경우에 따라 지하철, 일반 철도차량, 화차 등에는 본 연구에서 측정한 진동 가속도 결과보다도 더 큰 값이 발생할 수도 있을 것이라 판단된다.

그리고 300km/h 로 주행하는 고속열차 주행 중 발생하는 차축베어링 온도 변화를 분석하였다. 그 결과 Fig. 4 와 같이 열차 주행 중 차축베어링의 온도 변화는 터널 통과, 역 정차 등 운행 조건 변화에 따라 상승과 하강을 반복하는 것으로 확인되었다. 예로 상온 6℃에서 주행한 열차가 터널을 진입한 후에는 차축베어링의 온도가 상승하고, 터널 통과 후에는 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 터널 내부 온도와 외기 온도 차이에 의한 공냉 효과 영향인 것으로 판단되며, 열차의 역 정차 및 통과, 신호 제어 등으로 인한 제동 영향도 차축베어링의 온도 변화에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 그리고 본 연구에서 측정한 주행의 경우 온도 변화가 6℃ ~ 37℃ 로 20℃이상의 온도 차이가 발생하는 것으로 확인되었다. 특히 본 연구에서는 계절의 영향으로 외기 온도가 낮은 상태에서 측정을 수행하였지만, 외기온도가 높은 여름철의 경우에는 열차의 고속주행으로 인해 차축베어링의 온도가 보다 높게 나타날 것으로 예측된다.

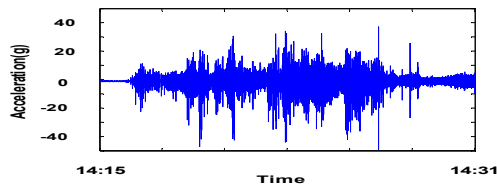


Fig. 2 The vibration acceleration on the axle bearing

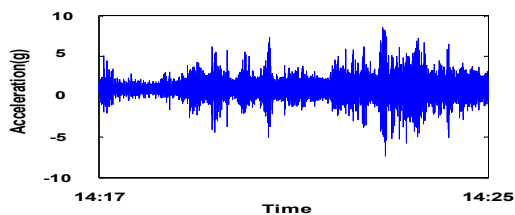


Fig. 3 The vibration acceleration on the bogie center

또한 Fig. 4 의 구간별 차축베어링 평균온도와 외기온도에 대한 온도차이를 분석하였다. 하행 (서울 출발 - 동대구 도착) 구간의 경우에는 차축베어링의 평균온도는 약 22.65℃로 외기온도 6℃와 16.65℃ 의 온도 차이가 발생하는 것으로 측정 되었으며, 이 중 하행 구간에서 차축베어링의 온도가 평균 온도인 22.65℃ 이상이 되는 구간은 전체 주행 중에서 절반 이상인 1 시간 이상인 것으로 측정되었다. 그리고 상행 (동대구 출발 - 서울 도착) 구간의 경우에는 차축베어링의 평균온도가 약 23.15℃로 외기온도 6℃ 와 17.15℃ 의 온도 차이가 발생하는 것으로 측정되었으며, 이 중 상행 구간에서 차축베어링의 온도가 평균 온도 이상이 되는 구간은 약 1 시간으로 측정되었다.

3. 열차 주행 중 주변에너지에 대한 자가발전 구동 모니터링 적용 가능성 연구

3.1 열차 주행 중 진동에너지를 이용한 자가발전 검토

열차 주행 중 발생하는 진동 가속도와 같은 운동 에너지를 이용한 자가발전은 상대적으로 타 에너지 원 보다 적용 가능성이 높다. 일반적으로 운동에너지를 이용한 자가발전은 구조물의 기계적인 변형 또는 진동 의해 운동에너지를 전기에너지로 변환시켜 주는 원리를 이용하며, 그 전환 매체로 piezoelectric material, magnetic induction 을 이용한 Electromagnetic 등의 기술을 이용한다. 일반적으로 공진점에서 발생 가능한 전력은 식 (1)로 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$P = \frac{ma^2}{4\xi\omega} \quad (1)$$

m is the mass, a is the acceleration, ξ is the damping coefficient, ω is the resonant frequency

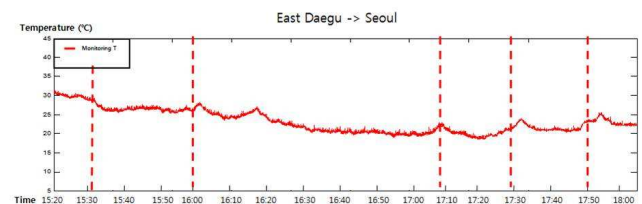
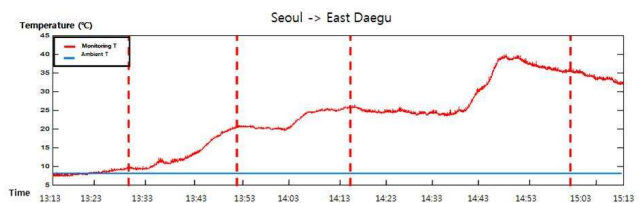


Fig. 4 The temperature change on the axle bearing

식 (1)에서 전력은 가속도의 제곱에 비례하고, 주파수에 반비례한다. 따라서 가속도가 높은 환경에서는 큰 전력을 발생시킬 수 있다. Cian 등⁽⁴⁾에 따르면 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하기 위하여 실험한 결과, 1cm³ 크기와 1m/s² 가속도에서 piezoelectric 을 이용하여 자가발전을 했을 경우 약 200uW 의 에너지를 생성할 수 있는 것으로 보고 되고 있으며, 동일 크기 electromagnetic 전환매체를 이용했을 경우 1m/s² 가속도에 대해 약 880uW 까지 전력 생성이 가능한 것으로 보고되고 있다. 하지만 이때 piezoelectric 과 electromagnetic 의 선택은 단순히 발생 전력량만을 가지고 결정할 문제는 아니며, 일반적으로 적용 환경과 주파수에 따라 달라진다. 실제로 많은 연구결과 수십 Hz 이상의 진동수가 발생하는 환경에서 작은 볼륨이 필요할 경우 piezoelectric 를 사용하는 것이 전력 발생에 보다 우수하며, 10Hz 이하의 저주파 환경에서 큰 볼륨이 가능할 경우 electromagnetic 를 사용하는 것이 전력 발생에 더 좋은 결과를 보여준다고 알려져 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 그리고 본 연구에서는 이러한 결과들을 바탕으로 주행 중인 열차에서 발생하는 진동 에너지에 대한 자가발전 전력을 예측하였다.

먼저 Fig. 5 와 같이 Fig. 1 의 '① 차축' 에서 측정된 주행 중 진동 가속도 데이터의 경우, rms 값은 1.334g 으로 확인되었으며, FFT 분석 결과 약 63Hz 에서 2.6m/s² 의 크기를 갖는 것으로 확인되었다. 또한 Fig. 6 과 같이 열차 주행 중 댐퍼 및 대차 자체에 의해 감쇄된 Fig. 1 의 '② 대차 프레임 중앙' 에서 측정된 진동 가속도 데이터의 경우,

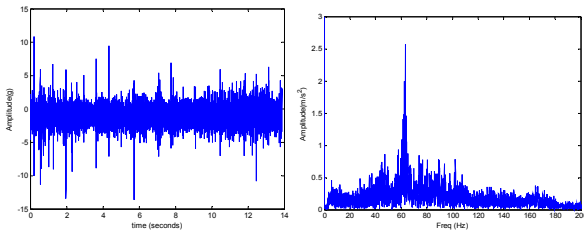


Fig. 5 The acceleration data and FFT result of acceleration on the axle

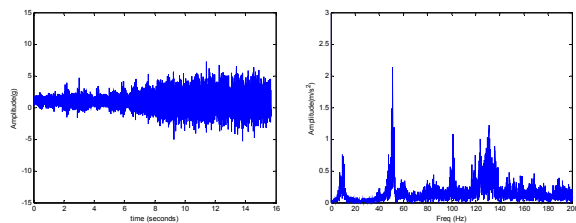


Fig. 6 The acceleration data and FFT result of acceleration on the bogie

rms 값은 1.165g 으로 확인되었으며 FFT 분석 결과 약 52Hz 에서 2.2m/s² 의 가속도가 발생한 것으로 확인되었다. 따라서 '② 대차 프레임 중앙' 에서 측정된 진동 가속도의 경우 댐퍼와 대차 자체에 의해 약 10Hz 의 진동수, 0.4m/s² 크기 진동 가속도가 감쇄된 것을 확인하였다. 하지만 본 연구결과 열차 주행 중 두 진동 가속도는 50 ~ 60 Hz 의 진동수 특성을 갖는 것으로 확인되어, 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환 매체는 piezoelectric material 을 이용하는 것이 electromagnetic 을 사용하는 것 보다 효과적일 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에는 piezoelectric material 을 적용하여 발생 전력을 예측하였다. 이때 열차주행에서 발생한 진동의 공진 모드를 이용하여 예상 전력을 계산하였으며, 이는 외부의 진동 가속도 주파수와 시스템의 공진 주파수를 일치시켜 에너지 전달이 최대가 되도록 하여, 에너지 변환 효율을 증대하기 위함이다. 그리고 식 (4)를 통해 계산 결과, '① 차축' 에서 측정된 진동 가속도 값은 piezoelectric material 변환매체 1cm³ 볼륨을 기준으로 계산한 결과 약 2.5mW 의 전력 생성이 가능한 것으로 예측되었으며, 댐퍼와 대차 자체에 의해 감소된 '② 대차 프레임 중앙' 의 진동 가속도 경우도, piezoelectric material 변환매체 1cm³ 볼륨을 기준으로 약 2mW 의 전력 생성이 가능한 것으로 계산되었다. 이러한 전력은 실제 열차 주행시간 1 시간을 기준으로 '① 차축' 에서는 9J, '② 대차 프레임 중앙' 에서는 7.2J 의 에너지가 발생 가능한 것을 의미하며, 서울-동대구 왕복 5 시간의 주행에 대하여 45J 과 36J 으로 상대적으로 큰 에너지가 발생 가능한 것을 보여주고 있다.

3.2 열차 주행 중 열에너지를 이용한 자가발전 검토

또한 본 연구에서는 열차 주행 중 차축베어링의 발열 온도와 외기온도의 차이를 이용한 자가발전 전력에 대하여 검토하였다. 열에너지를 이용하여 자가발전을 하기 위해서는 온도 차이를 이용하여 자가발전이 가능한 열전 소재(thermoelectric generator)를 사용해야 하며, 일반적으로 열전소재의 형상과 요소 수를 고려한 식 (2) 을 통해 전력 P (module power)를 계산할 수 있다.⁽⁸⁾

$$P = \frac{\alpha^2 NA (T_h - T_c)^2}{2\rho \left(L + \frac{\rho}{\rho_c} \right) \left(1 + 2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \left(\frac{L}{L_c} \right) \right)} \quad (2)$$

α is the seebeck coefficient, N is the number of elements, A is the area of elements, T_h is the module hot side temperature, T_c is the module cold side temperature, ρ is the electrical resistivity, ρ_c is the contact electrical, L is the element length, L_c is the thickness of the insulating ceramic, λ is the thermal resistivity of the module, λ_c is the contact thermal resistivity

하지만 식 (2)에 대하여 이상적인 온도 접촉이라 가정하여 저항 요소를 무시할 경우 식 (2)은 다음의 식 (3)와 같이 단순화하여 표현할 수 있으며,

$$P = \frac{\alpha^2 (T_h - T_c)^2 NA}{\rho \frac{2}{L}} \quad (3)$$

α is the seebeck coefficient, N is the number of elements, A is the area of elements, T_h is the module hot side temperature, T_c is the module cold side temperature, ρ is the electrical resistivity, L is the element length

현재까지 연구된 열전 소자 기술 중 가장 효율이 좋은 thermo life module (직경 1cm x 높이 1.4mm)의 경우에는 식 (3)를 이용하여 5°C의 온도차이에서 28uW의 전력이 발생 가능한 것으로 보고되고 있다.⁽⁹⁾ 그리고 이러한 식 (3)에 대하여 보다 단순화하여 열전소자만을 이용한 자가발전 전력을 계산할 경우,

$$P = \frac{P_{ref}}{(T_h - T_c)_{ref}^2} (T_h - T_c)^2 \quad (4)$$

P_{ref} is the reference power, T_h is the module hot side temperature, T_c is the module cold side temperature

식 (4)와 같이 단순화된 전력 계산 식을 사용할 수 있으며,⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 식 (3)을 이용하여 차축베어링 발열온도와 외기온도 차이를 이용한 자가발전 전력을 계산하였다. 실제 주행 중 측정된 온도차이(16.65°C, 17.15°C)에 약간의 측정 오차를 감안하여 15°C의 온도 차이 값에 대하여 직경 1cm x 높이 1.4mm 크기의 작은 thermo life module 열전소자를 사용하였다고 가정하여 전력을 계산한 결과 15°C의 온도 차이는 약 252uW의 전력 발생이 가능한 것으로 계산되었다. 그리고 약 252uW의 전력은 실제 열차 주행시간 1시간을 기준으로 약 0.9J의 에너지가 발생 가능한 것을 의미하며, 서울-동대구 왕복 5시간의 주행에 대하여 약 4.5J의 에너지가 발생 가능한 것을 보여주고 있다.

3.3 열차 주행 중 주변에너지를 이용한 자가발전 모니터링 적용 가능성 검토

그리고 본 연구에서는 이렇게 예측한 온도차이와 진동 가속도 두 에너지원의 자가발전 전력을 이용하여 모니터링 시스템에 적용 가능한지를 검토하였다. 먼저 이를 위하여 모니터링 시스템에 사용되는 무선 센서 시스템의 작동 모드와 휴지 모드(sleep mode)에 대한 소비 전력을 비교하였다. 무선 시스템의 경우 임무 주기(duty cycle)에 따라 전력 소비량이 달라지기 때문에 센서의 데이터를 읽고 무선으로 데이터를 전송하기 위한 각각의 컴포넌트에서 소비되는 전력과 시간이 필요하며,

Table 1 The power of each operation mode

Operation mode	Power (mW)
Sampling (Temp.)	0.150 ~ 0.500
Sampling (Acc.)	1.150
Sleep mode	0.054
Idle mode	11.500~
RX	12.000~
TX	15.000~

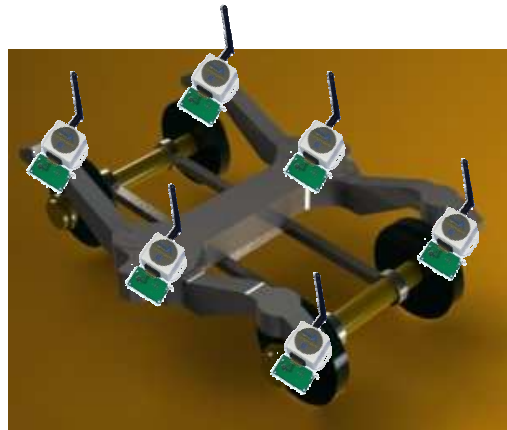


Fig. 7 the concept drawing of energy harvester installation on the bogie

이를 Table 1에 정리하였다.^(4,11,12) 이때 적용된 무선 시스템은 Zigbee compliant transceiver를 기준으로 하였다.

먼저 온도 모니터링을 위한 온도 센서의 경우에는 0.2ms의 짧은 샘플링(sampling) 동안 15uW ~ 0.5mW의 적은 소비 전력이 요구되고 있다. 또한 진동 모니터링을 위한 진동 가속도 센서의 경우 0.2ms의 짧은 샘플링(sampling) 동안 1.15mW의 전력이 요구되고 있다. 따라서 앞서 예측한 결과에서와 같이 철도차량 주행 중 온도차이 및 진동 가속도에 의해 자가발전될 것으로 계산된 0.252mW ~ 2.5mW 전력은 모니터링 시스템의 온도센서와 진동센서를 가동시키기에 가능한 전력으로 판단된다. 하지만 전체 무선 모니터링 시스템의 경우 센서에 대한 sampling 이외에 무선 데이터 송수신과 프로세싱을 위하여 추가적인 전력이 요구되고 있으며,⁽¹³⁻¹⁵⁾ 현재 예측한 전력은 전체 모니터링 시스템을 가동시키기에는 작은 전력이다. 이 경우 모니터링 시스템에 적용하기 위해서는 실시간 감지 및 시스템 휴지 모드에 소비되는 전력 이외의 나머지 전력에 대하여 충전 시스템에 저장을 하며 이상 상태에 대한 임계값에 도달하였을 경우, 이 충전된 전력으로 전체 모니터링 시스템을 가동시키고 감지된 이상상태 데이터를 전송하는 방식의 모니터링 시스템 설계가 가능할 것이라 판단된다. 하지만 이것은 센서 한 개에 하나의 자가발전 모듈을 연결했을 경우의 예상 결과이

며, 예로 Fig. 7 과 같이 최적의 설계를 통해 여러 개의 자가발전 모듈을 한 개의 센서 모니터링 시스템에 연결하였을 경우, 보다 큰 전력 (15.008mW = 차축진동 4 개 + 대차프레임 2 개 + 차축온도 4 개)을 자가발전으로 생성할 수 있을 것이라 예측되기 때문에 실시간으로 감지된 데이터의 실시간 전송이 가능한 모니터링 시스템 설계가 가능할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서는 이 후 계속적인 연구를 통해 철도차량에서 자가발전 모듈을 이용하여 얼마만큼의 전력이 발생가능한지 시뮬레이션과 시험을 통해 자가발전 에너지 지도를 연구하고, 실제 운행 중인 철도차량에 자가발전 모듈을 설계/제작하여 전력발생 및 모니터링 적용 가능성에 대한 연구를 수행할 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 지능형 철도시스템 모니터링을 위하여 열차 주행에 따른 새로운 에너지를 전기자원화 하는 자가발전 구동 기술에 대한 적용 가능성을 확인하기 위하여, 실제 주행 중인 고속열차를 이용하여 철도차량의 정확한 운행환경 하에서 발생하는 주변 에너지를 실측 하여, 자가발전 구동 모니터링 적용 가능성에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주행중인 열차의 레일과 차륜의 접촉에 의해 발생한 진동 가속도 값을 감쇠 영향 없이 “① 차축”에서 측정된 결과 순간 최대값을 기준으로 약 $\pm 40g$ 로 매우 큰 값이 발생하는 것으로 확인되었으며, rms 값은 1.334g, FFT 분석 결과 약 63Hz 에서 $2.6m/s^2$ 의 크기를 나타내고 있는 것으로 확인되었다.

(2) “② 대차 프레임 중앙”에서 측정되어 감쇠된 진동 가속도 측정결과의 경우에도 순간 최대값 기준으로 약 $\pm 8g$ 로 상당히 큰 진동 가속도가 발생하는 것으로 확인되었으며, rms 값은 1.165g, FFT 분석 결과 약 52Hz 에서 $2.2m/s^2$ 의 가속도가 발생한 것으로 확인되었다.

(3) 주행시 차축베어링에서 발생하는 온도 변화를 측정된 결과 $20^\circ C$ 이상의 온도 차이가 발생하는 것으로 확인되었다.

(4) 온도 차이에 대하여 자가발전 전력을 계산한 결과 열차 주행에 의하여 약 0.252mW 의 전력 발생이 가능한 것으로 계산되었다.

(5) “① 차축”에서 측정된 진동 가속도 값은 약 2.5mW 의 전력 생성이 가능한 것으로 예측되었으며, 댐퍼와 대차 자체에 의해 감소된 “② 대차 프레임 중앙”의 진동 가속도 경우도, 약 2.0mW 의 전력 생성이 가능한 것으로 계산되었다.

참고문헌

- (1) Kure, G., 2009, Condition Monitoring: the Apotheosis of Maintenance, *International Railway Journal*, pp. 42~43.
- (2) Gatini, O., 2010, Wireless Sensor Networks Opportunities, Energy harvesting & Storage Europe Conference.
- (3) Roundy, S., Wright, P. K. and Rabaey, J. M., 2004, Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks, Kluwer.
- (4) Cian, Terence, Rafael, James and Bredan, 2008, Energy Scavenging for Long Term Deployable Wireless Sensor networks, *Talanta*, 75, pp. 613~623.
- (5) Paul, D.M., Eric, M.Y., Rao, G.K., Andrew, S.H., Tim et al., 2008, Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices, *Proceedings of the IEEE*, 96(9).
- (6) Anton, S. R. and Sondano, H. A., 2007, A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials, *Smart Materials and Structures*, 16, R1-R21.
- (7) Priya, S., 2007, Advances in Energy Harvesting Using Low Profile Piezoelectric Transducers, *J Electroceram*, 19, pp. 165~182.
- (8) Rowe, D.M. and Min, G., 1996, Design Theory of Thermoelectric Modules for Electrical Power Generation, *IEEE Proceedings: Science, Measurement and Technology*, 143(6), pp. 351~356.
- (9) Moser, C., Power Management in Energy Harvesting Embedded System, thesis paper for the degree of Doctor of Sciences, *Swiss Federal Institute of technology Zurich*, p. 7.
- (10) Min, G. and Rowe, D.M., 1992, Optimization of Thermoelectric Module Geometry for ‘Waste Heat’ Electric Power Generation, *Journal of power Sources*, 38, pp. 253~259.
- (11) TC1047 Temperature Sensor Specification, 2002, Microchip Technology Inc.
- (12) KXPC4 Low Power Accelerometer Specification, 2007, Kionix.
- (13) Weddell, A. S., Harris, N. R. and White, N. M., 2008, Alternative Energy Source for Sensor Nodes : Rationalized Design for long-term Deployment, *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*.
- (14) Raghunathan, V., Ganeriwal, S. and Srivastava, M., 2006, Emerging Techniques for Long Lived Wireless Sensor networks, *IEEE Communications Magazine*, pp. 108~114.
- (15) Lee, J., Kim, J., Lee, K.-s. and Oh, J., 2011 Proceeding of KSR Spring Section, a Study on the Energy Harvesting System for the Health Monitoring of Railroad Vehicle