

에너지 하베스팅을 위한 철도 시스템 에너지 맵 Harvestable Energy Map of Rail System for Energy Harvesting

정병창¹, 윤현준², *윤병동²

B. C. Jung¹, H. J. Yoon², *B. D. Youn(bdyoun@snu.ac.kr)²

¹메릴랜드대학교 기계공학과, ²서울대학교 기계항공공학부

Key words : Energy Map, Energy Harvesting, Wireless Sensor Network, Rail System

1. 서론

최근 철도 시스템의 신뢰성과 안전성 향상을 위하여, 무선 센서 네트워크 (Wireless Sensor Network) 기술을 이용한 구조 건전성 모니터링 (Structural Health Monitoring)을 통해, 열차의 상태 진단 (Diagnostics), 고장 예지 (Prognostics), 상태 기반 유지보수 (Condition-Based Maintenance)에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 그러나 무선 센서들의 배터리 교체에 따른 비용 증가는 무선 센서 네트워크 구축에 있어 선결되어야 할 어려운 문제이다. 이를 해결하기 위해 열차 주행 시 발생하는 진동과 온도 차이처럼 주변에서 쉽게 버려지는 에너지를 재수집해 전력으로 사용하는 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting)이 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 에너지 하베스터 (Energy Harvester)의 위치와 개수를 설계하기 위해 반드시 필요한 수확 가능 에너지 맵 (Harvestable Energy Map)의 구축을 위한 절차 (Framework)를 제안하고, 이를 철도 시스템에 적용하였다. 2장과 3장은 각각 압전 효과와 열전 효과를 이용한 열차 내 진동 및 열 에너지 맵의 개발 과정을 요약하였다.

2. 열차의 진동 에너지 맵 구현

열차의 진동 에너지 맵 개발은 다음의 4가지 과정을 따른다.

(1) 열차 주변의 진동 에너지 분석

하베스터 설계를 위해 Fig. 1과 같은 구조의 차축과 대차에서 발생하는 진동을 측정했다. Fig. 2(a)와 (b)처럼 FFT로 주파수와 가속도를 분석하였다. 차축의 최대 가속도는 59.21Hz일 때 0.0587g, 대차는 7.86Hz일 때 0.0144g이다.

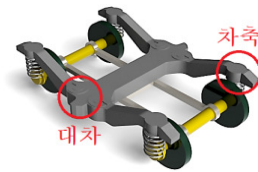
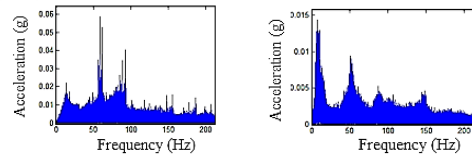


Fig. 1 Bogie System of Train



(a) Bearing

(b) Bogie

Fig. 2 FFT Analysis of Vibration

(2) 압전 하베스터 해석 모델 개발

본 논문에서는 전력량을 계산하기 위해 고유진동수가 낮으며, 비교적 높은 변형률을 얻을 수 있는 캔틸레버 빔 에너지 하베스터를 사용하였다¹⁾. 압전 하베스터로 수확할 수 있는 전력은 하베스터의 고유진동수가 가진주파수와 같고, 가속도가 클수록, Coupling coefficient가 클수록, 고유진동수가 작을수록 크다²⁾. 따라서 많은 전력을 얻기 위해 하베스터의 강성, 질량, 치수 등을 외부 가진에 맞춰 최적화한다.

고유진동수는 강성에 비례하는데, 공간의 제약으로 인해 빔의 치수로 강성을 조절하는 것은 어렵다. 이에 해석 모델의 길이와 너비를 5cm로 고정하고, 고유진동수 조정은 질량으로 한다. 설계된 차축 하베스터의 고유진동수는 59.21Hz, 질량은 0.05kg이다. 하지만 대차의 경우에는 7.86Hz일 때에 2.71kg이므로, 과도한 무게로 압전 소자의 항복응력을 초과해 파손될 수 있고, 실제 설치도 불가능하다. 따라서 수확 가능 전력을 줄이더라도 2차 피크인 50.93Hz를 고유진동수로 설계했으며, 질량은 0.06kg이다.

또한 정확한 예측을 위해, 실험으로 실제 전압과 고유진동수를 측정(Fig. 3(a))하여, 해석 모델(Fig. 3(b)) 보정 (Calibration)을 수행하였다.

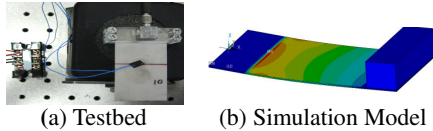


Fig. 3 Experiment and Finite Element Analysis

(3) 진동 에너지의 수확 가능 전력 정량화

Table 1처럼 최대 전력은 회로가 최적 저항 (Impedance Matching)일 때 얻어지며, 출력은 전 주파수영역에 걸쳐 적분해서 계산되었다.

Table 1 Harvestable Power from Vibrational Energy

위치	고유진동수	최적저항	출력
차축	59.21 Hz	2939.7 Ω	25.2 mW
대차	50.93 Hz	3417.7 Ω	1.1 mW

(4) 진동 에너지 맵 구현

정량화 된 전력을 토대로, Fig. 4처럼 에너지 맵을 구현했다. 차축이 대차보다 수확 가능한 전력이 많으며, 그 사이는 선형으로 분포한다.

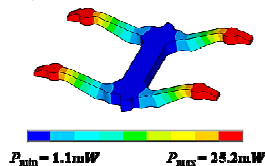


Fig. 4 Harvestable Energy Map from Vibration

3. 열차의 열 에너지 맵 구현

열차의 열 에너지 맵 개발은 다음의 4가지 과정을 따른다.

(1) 열차 주변의 열 에너지 분석

차축 베어링은 브레이크 마찰로 인해 열이 많이 발생하는 부품 중 하나이며, 평균 온도는 약 44.68℃로 측정되었고, 외부는 33℃이다.

(2) 열전 하베스터 해석 모델 개발

열전 소자에 온도 구배가 생기면 n형 반도체는 전자 (Electrons), p형은 정공 (Holes)이 저온부로 이동해 전압이 발생하는 것을 제백 (Seebeck) 효과라고 한다³⁾. 소자의 성능지수는 제백계수가 클수록, 저항이 클수록, 열전도도가 낮을수록 높고, 서로 상관관계를 갖는다. 이에 주어진 온도에 최적화된 재료를 선택해야 한다.

차축 베어링의 온도 차이 ΔT가 11.68℃로 작기 때문에, n형은 Bi₂Te₃, p형은 Sb₂Te₃로 선정했다. 제백계수 α는 Bi₂Te₃가 α_n=-189μV/K, Sb₂Te₃는 α_p=+140μV/K이므로, 329μV/K가 된다. 상온에서 Bi₂Te₃의 비저항은 7.7μΩ, Sb₂Te₃는 15.1μΩ이며, 열전 하베스터를 면적 4cm², 높이 1cm로 설계하면, 저항 R은 570μΩ이다.

(3) 열 에너지의 수확 가능 전력 정량화

열전 소자의 전력은 아래와 같이 계산된다.

$$P = \frac{(\alpha\Delta T)^2}{4R} = 1.6 \text{ mW}$$

(4) 열 에너지 맵 구현

Fig. 5는 온도에 대한 에너지 맵을 보여준다. 차축 베어링의 원주방향으로 열 에너지 분포가 균일하므로, 위치는 영향을 미치지 않는다.

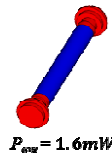


Fig. 5 Harvestable Energy Map from Heat Flux

4. 결론

압전 소자를 차축에 4개, 대차에 2개, 열전 소자는 차축 베어링에 2개를 설치했을 때, 총 106.2mW의 전력을 얻을 수 있다. Table 2에 있는 주요 센서들의 소모전력과 비교해 보면, 수확된 전력은 무선 센서의 작동에 충분하다.

Table 2 Required Power for Sensors

종류	모델	적용사례	소모전력
변형센서	SG Series	Health Monitoring	18.0 mW
조도센서	BH1600FVC	Fire Evacuation	0.2 mW
압력센서	PS1	Hydraulics	1.0 mW

참고문헌

1. S. Roundy, et al, "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics," Smart Materials and Structures, **13**, 1131-1142, 2004.
2. S. Roundy, et al, "Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers", IEEE CS, 28-36, 2005
3. G. J. Snyder, et al, "Complex thermoelectric materials," Nature Materials, **7**, 105-114, 2008