압전 하베스팅 기술의 철도차량 적용에 대한 고찰

Review on the piezoelectric harvesting technology to the rail vehicles

이성준*, 김주원*, 정형일*, 김진우*, 김용한*

Seoung-Jun Lee*, Juwon Kim*, Hyungil Juug *, Jinwoo Kim*, Yonghan Kim*

Abstract In 1830 Liverpool - Beginning with the opening of the Manchester section , and fetal movement the railway has grown into a large axis of the land transportation that combines speed and load capacity . It collects more energy being wasted , Energy Harvesting field of use as the power is applied in many fields . Piezoelectric power generation , it is possible to produce through the deformation or vibration caused by pressure acting from the outside . Railway is always accompanied by a vibration , we have to convey the pressure caused by the body of the weight to the rail . Therefore , the train is determined to have provided an environment suitable for piezoelectric generator . Consider for rail vehicles application of energy harvesting technology that utilizes piezoelectric elements via the analysis of the national and international research case.

Keywords **:** Piezoelectric, the piezoelectric element, harvesting, piezoelectric power generation, rail vehicles

초 록 1830년 리버풀-맨체스터 구간의 개통을 시작으로 태동한 철도는 속도와 수송력을 겸비한 육상운송의 큰 축으로 성장하였다. 또한 에너지를 절감하고 온실가스 배출을 줄이는 동력원에 대한 다양한 연구도 이루어지고 있다. 낭비되어지는 많은 에너지를 수집하여 전력으로 활용하는 Energy Harvesting 분야는 많은 분야에서 적용되어 지고 있다. 압전 발전은 외부에서 작용하는 압력에 의한 변형과 진동을 통해서 생산이 가능하다. 철도는 늘 진동을 수반하고 있고 차체의 중량으로 인한 압력을 레일에 전달하고 있다. 따라서, 철도는 압전 발전에 적합한 환경을 갖추고 있다고 판단된다. 국내외 연구 사례 분석을 통해 압전소자를 활용한 에너지 하베스팅 기술의 철도차량 적용에 대해 고찰하고자 한다.

주요어 : 압전, 압전소자, 하베스팅, 압전발전, 철도차량

1. 서 론

산업혁명과 더불어 태동한 철도는 1830년 리버풀-맨체스터 구간의 개통을 시작으로 발전하게 되었다. 현재의 철도는 속도와 수송력을 겸비하고 육상운송의 큰 축을 형성하고 관련 시장규모도 증가하는 추세에 있다. 철도를 비롯한 현대 산업의 기술이 지향하는 방향은 에너지 절감과 환경보호이다. 압전소자를 이용하여 전기에너지를 생산하는 기술이 일부 국가에서 실용화 되고 있고 많은 연구와 특허가 진행중에 있다. 진동이나 압력을 철도에 적용하여 압전하베스팅의 가능성을 살펴보고자 한다.

* 한국철도공사연구원

2. 본 론

2.1 압전소자의 이해

2.1.1 압전소자의 정의

압전소자(piezoelectric element, 壓電素子)란 피에조전기소자 라고도 하며 어떤 종류의 결정판에 일정한 방향에서 압력을 가하면 판의 양면에 외력에 비례하는 양·음의 전하를 나타내는 소자를 말한다. 압전기가 발생하는 현상은 1880년 프랑스의 자크 퀴리(Jacque Curie)와 피에르 퀴리(Pierre Curie) 형제가 처음 발견하였다. 과거에는 수정, 전기석, 로셀염 등을 이용하였으나 그후 타이타늄산바륨, 인산이수소암모늄, 타타르산에틸렌다이아민 등의 압전성이 향상된 물질들도 개발되었다. 최근에는 세라믹 소자를 활용한 압전 하베스팅 기술이 연구되고 있다. 이러한 압전소자는 운동에너지와 전기에너지의 상호 변환이 가능해 다양한 분야에 응용될 수 있는 장점이 있다. 압전소자 한 장의 결정판에서 나타나는 압전기는 미약하지만 금속박을 삽입하면서 여러 장을 겹칠 경우 그 양이 크게 증대된다.

2.1.2 압전소자의 특성

압전 세라믹 소자는 일반 물질과는 달리 서로 다른 에너지 특성(기계적 에너지↔전기적 에너지)간의 변환이 가능하기 때문에 스마트 물질로 불리며, 1차 변환 및 2차 변환이 가능하다.

- 1차 변환 : 압전효과(기계적 에너지 → 전기적 에너지)
- 2차 변환 : 역압전효과(전기적 에너지 → 기계적 에너지)

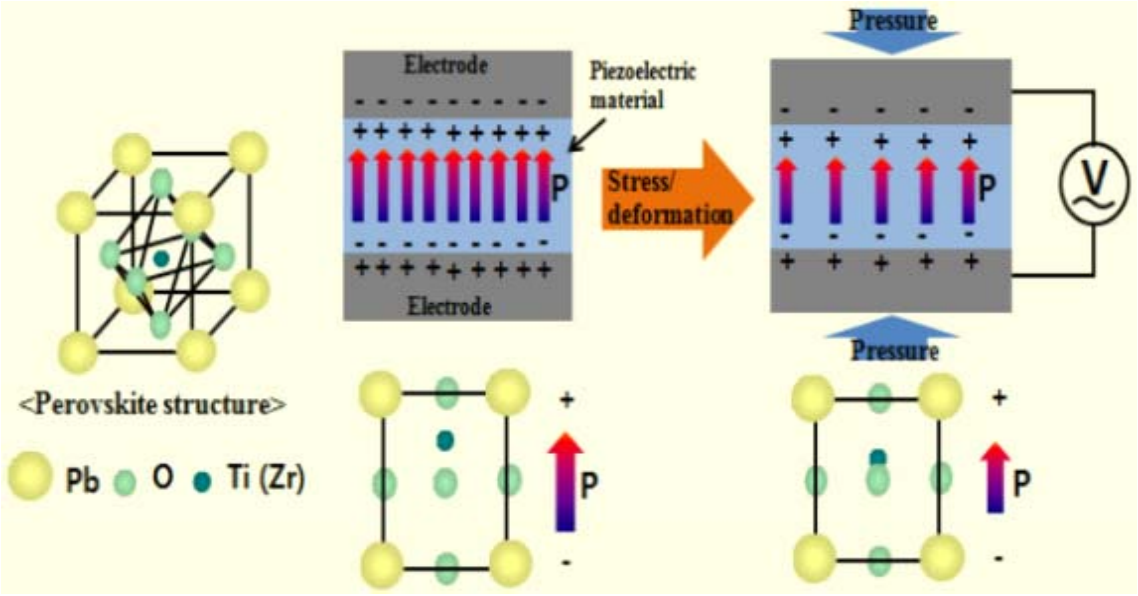

Fig. 1 Piezoelectric phenomenon

2.2 압전소자의 주요 상수와 요구 특성

압전소자의 성능을 평가할 때 쓰이는 주요한 상수 몇가지를 소개하고자 한다.

(1) 전기기계 결합 계수(K) : 압전 소재가 서로 다른 에너지를 상호 변환할 때의 변환 효율을 나타내며 0에서 1사이의 값을 가진다.
(2) 기계적 품질 계수(Q) : 유전손실의 역수를 말하며 Q값이 클수록 손실이 작다. 일반적으로 Q값이 클수록 열 발생이 적으며 주파수 특성이 좋아지는 장점이 있고 Q값의 범위는 50~2000 으로 재료에 따라 다양하다.
(3) 상전이 온도(T) : 압전체의 결정 구조가 Cubic으로 바뀌는 온도를 의미하며 이 온도 이상이 되면 압전 특성을 잃어버리게 되므로 값이 클수록 좋다. PZT 계열은 약 180~350 ℃, NKN 계열은 250~500 ℃ 정도의 값을 가진다.

압전소자는 제작이나 소결 과정에서 상대밀도, 결정구조, 입도크기, 도핑상태 등에 따라 특성이 달라지게 된다. 상대밀도가 크다는 것은 빈 공간이나 결함없이 소결이 잘 되었다는 것을 말한다. 빈 공간은 압전특성에 아무런 기여를 하지 않으므로 상대 밀도가 증가할수록 압전특성은 상승하게 된다. 압전소자는 일반적으로 2개 이상의 결정구조가 섞여 있는 경우를 많이 사용하는데 이런 경우 압전특성이 비약적으로 상승하기 때문이다. 이와 같이 두 개 이상의 결정구조가 섞여 있는 것을 상공존영역 또는 MPB(Morphotropic Phase Boundary)라 부른다. 소결 후 미세구조에서 보이는 입도크기는 커질수록 압전특성이 향상된다. 입도 사이즈가 일정 크기 이하가 될 경우 아예 압전특성을 잃어버리는 경우도 있다. 도핑은 인위적으로 압전세라믹에 원자가가 다른 물질을 입히거나 치환하는 것을 말한다.

Table 1 Doping of the piezoelectric element

Donor 도핑	**Acceptor 도핑**
· 원자가가 더 높은 물질을 도핑	· 원자가가 더 낮은 물질을 도핑
· 재료가 부드러워짐(소프트닝 효과)	· 재료가 딱딱해짐(하드닝 효과)
· K증가, Q감소	· K감소, Q증가
· 상전이 온도(T)는 상승과 하락 모두 가능	

2.3 압전소자의 한계와 성장가능성

일반적으로 많이 쓰이는 압전 재료인 PZT, NKN 계열 세라믹의 한계와 문제점을 살펴보고 성장가능성에 대하여 간략하게 살펴보기로 한다. PZT 계열의 가장 큰 문제는 Pb에 의한 환경문제가 발생할 수 있다는 점이다.

RoHS[1]에 따르면 납, 수은, 6가크롬, 카드뮴 등을 포함한 6가지 물질에 대해 규제를 하고 있다. 그러나 압전체의 경우에만 대체 물질이 개발될 때 까지 허용되고 있다. 또한 상전이온도가 낮다는 문제점도 있다. 반면 NKN 계열의 가장 큰 문제는 PZT 계열에 비하여 압전특성이 낮다는 점이다. 이외에도 수분에 취약하며 공정 시 변수가 많다는 단점도 있다. 압전 하베스팅은 미활용 되고 있는 철도 차량의 진동에너지를 전기에너지로 변환하는 신개념 전력에너지 생산 기술로 설치비 및 유지비가 저렴하고, 독립전원으로 사용이 가능해 응용분야가 다양해질 것으로 기대된다. 철도의 진동에너지는 운행 중 항상 발생되는 자연적인 에너지로 친환경적이며 지속적인 전기에너지 생산이 가능하다. 다만 발전량을 증대시키는 기술의 개발이 선행되어야 할 것으로 생각된다.

2.4 압전하베스팅 기술의 국내외 사례

국내에서는 (주)센불이 한국세라믹기술원과 협력하여 세라믹 압전체를 이용한 '압전에너지 블록'을 개발하여, 부산 서면역 승강장에 설치하여 승객들의 휴대폰 충전에 활용하고 있으며 기아자동차는 광주공장에 에코존을 설치하여 압전하베스팅 기술을 체험할 수 있도록 하고 있다. 최근 세라믹기술원은 미세한 압력이나 변형을 가하면 전기를 생성하는 '세라믹 u-압전발전소자'를 개발하였다. 세라믹 압전발전소자는 25×5밀리미터(㎜) 크기에서 3볼트(V), 4마이크로암페아(㎂) 전기를 생성한다. 세라믹 압전발전소자 한 층 전기 발전량은 적지만 여러 층을 쌓으면 웨어러블 기기나 플렉시블 디스플레이를 구동시킬 수 있을 만큼 전기를 만들 수 있다.

Fig. 2 piezoelectric power generation system, Seomyeon Station in Pusan

일본 JR에서는 지하철 개찰구 바닥에 압전블록을 설치하여 6,000 Ws/day의 전력을 생산하고 있다. 도쿄의 고시키 사쿠라 대교에는 통행하는 자동차의 진동을 이용한 압전발전 시스템을 설치하여 다리의 조명에 사용하는 실험을 진행중이다. 또한 동경 지하철역 내 계단에 압전 발전장치를 설치하여 수확된 전력으로 역사 조명에 활용하고 있으나, 압전 발전장치를 열차에

[1] RoHS 란 유해물질 제한지침(Restriction of Hazardous Substances Directive)을 말하며 유럽연합에서 시행되며 해로운 물질을 사용한 전자제품이나, 전기기기를 제한하는 지침이다.

직접 적용한 사례는 없다. 이스라엘 이노와텍(Innowattech)사는 도로에 압전 블록을 설치하여 500kwh 발전 시스템을 연구 중이다. 이노와텍은 압전 블록을 1㎞ 설치하고 차량 600여대가 압전 블록 위를 지나가면 250가구에 전기 공급이 가능하다고 주장하고 있다. 압전 하베스팅을 통하여 35% 에너지회수 시 차량에서 발생하는 이산화탄소를 전력생산으로 얻는 저감으로 상쇄가 가능하다. 도로에 설치하는 압전 블록은 설치는 물론 관리도 까다롭지 않아 태양광이나 풍력발전기에 비해 설치비용이 50% 가까이 저렴한 것으로 알려지고 있다.

Fig. 3 Piezoelectric power system in Israel

이 외에도 다양한 국가 및 연구소에서 압전 응용기술을 이용하여 활발하게 연구하고 있다.

Table 2 Overseas piezoelectric harvesting technology

국가	기술명	개발단계	개발 내용	개발주체
미국	Micro Power Generation(MPG)	개발 중	다양한 에너지원을 소형화 개발 추진	MIT
미국	바람을 이용한 압전 banner	개발 중	압전 banner 를 통하여 조명, 진동센서, 기타기기 등에 활용	조지아공대
일본	진동에너지 LSI 구동전력	개발 중	건물의 미세한 진동을 구동전력으로 사용	히타치제작소
일본	WINDMILL 시스템	Pilot	도로 램프그동을 위해서 압전소자를 이용한 WINDMILL 시스템 개발	NEC-TOKIN
이스라엘	도로용 압전 발전 기술	상용화	도로용 압전 블록으로 자동차 도로에 실제 적용	Innowattech
독일	Transmitter Module 에 압전 방식의 Power Generator	상용화	배터리 없이 스위치를 눌렀을 때 발생하는 에너지를 센서구동, RF 무선신호 공수신 및 각종 변환기를	EnOcean

			작동시키는데 활용	

2.5 압전하베스팅 기술의 철도 적용성

러시아 철도 연구원에서는 네덜란드의 Energy Floors사와 파트너십을 통하여 대형 역사에 압전 발전 기술을 적용하여 이동하는 사람들의 발걸음으로부터 생산되는 전력을 현장에서 사용하거나 전력망으로 다른 곳으로 보내는 연구를 진행하려 하고 있다. 비슷한 시도가 프랑스 세인트 오메르에서 진행중인데, 역사 보도의 일부에 14개의 패이브젠(Pavegen) 에너지 타일이 깔려있다. 이 타일들은 사람들이 지나가면서 발생하는 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 역사의 일부 전원으로 사용하고 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 우리나라에서도 서면역에 압전 블록이 설치되어 있다. 그러나 사람의 이동으로 얻을 수 있는 전기에너지는 발전량으로 본다면 미미한 수준에 그치고 있다. 일본 등 여러 국가에서 교량을 활용하려는 이유도 발전량과 무관하지 않다. 건국대학교에서 ‘압전소자를 이용한 발전기능과 하중계측기능을 가진 교량 받침의 개발’이라는 국가 R&D 과제를 수행하였다. 하지만 발전량이 상대적으로 미약하고, 초점이 교량을 통과하는 차량의 과적을 통제하기위한 시스템에 맞추어져 있는 것으로 보인다. 압전 발전은 외부에서 작용하는 압력에 의한 변형으로도 가능하고, 진동을 통해서도 생산이 가능하다. 철도는 늘 진동을 동반하고 있고 무거운 중량으로 인한 압력을 레일에 전달하고 있다. 특히 우리나라는 선로 용량이 포화상태에 다다르고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 본다면 철도를 이용한 압전 하베스팅 기술을 접목하기에 적합한 기반 환경을 갖추고 있는 것으로 판단된다.

3. 결 론

지구라는 한정된 공간에서 우리의 삶을 영위하고, 후손들의 터전을 지켜가기에는 자원과 에너지의 문제가 크게 작용한다. 화석에너지의 고갈 위험과 이산화탄소의 배출로 인한 환경문제는 시급히 해결해야할 인류의 과제이다. 이산화탄소의 배출이 없거나 최소화 할 수 있는 대체에너지의 개발은 많이 진척되었다. 대표적으로 상용화 되어있는 태양광 발전이나 풍력발전은 설치 장소가 제한적이며, 설치비가 많이 들어 투자금 회수에 10년 이상이 소요된다. 이에반해 압전 하베스팅 기술은 투자비가 적고 장소가 제한적이지 않다. 이스라엘의 압전 발전 도로는 6년 정도면 투자비의 회수가 가능하다고 한다. 효율성이 높은 압전소자의 개발기술은 빠르게 발전되고 있다. 이러한 압전소자를 블록화해서 레일의 하부에 설치하고 운행되는 열차로부터 전기에너지를 생산해내고, 생산된 전기에너지를 열차의 동력으로 다시 활용하는 시스템이 실현된다면 공사의 영업수지도 대폭 개선될 것이며, 보다 저렴한 가격으로 열차 서비스를 국민에게 제공할 수 있는 기틀이 될 것이라 생각된다. 영국의 시장조사기관인 ID TechEx에 따르면 전세계 에너지 하베스팅 시장규모가 2020년에 43억 7000만 달러(한화 약 4조 7294억 원)에 달할 것으로 전망된다. 그 중에서도 압전 발전은 가장 각광받는 분야가 될 것이라 생각된다. 이스라엘에서 이미 철도에 압전하베스팅 시스템을 적용하여 신호기 등의 전원으로 활용하고 있다. 기술의 선점과 세계시장 개척을 위해서 압전 하베스팅 기술에 대한 선제적인 투자와 연구

가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

[1] 한양대학교 산학협력단 (2014) 국토교통부, 철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발 최종보고서.

[2] 건국대학교 산학협력단 (2014) 국토교통부, 압전소자를 이용한 발전기능과 하중계측 기능을 가진 교량 받 침의 개발 최종보고서.

[3] 양충헌 (2010) 압전기술을 이용한 도로의 에너지 하베스팅-이스라엘 개발사례, 도로정책 Brief, 37호.

[4] ARUP (2014) Future of Rail 2050, ARUP.