

시설물 맞춤형 에너지 블록 구조의 동적 특성 및 발전 성능 평가

노명현* · 김효진** · 박지영*** · 이상열****

Noh, Myung-Hyun*, Kim, Hyo-Jin**, Park, Ji-Young***, Lee, Sang-Youl****

Dynamic Characteristics and Power Generation Performance Evaluation of Customized Energy Block Structures

ABSTRACT

This study carried out structural behaviors and power generation performances of customized energy harvesting block structures, especially for infrastructures such as parking facility. The improved energy block structures described in this study were represented by using numerical and experimental models. In particular, the composite-PZT hybrid energy blocks are tentatively proposed for better structural durability and power generation effects. The finite element model using ABAQUS program is used for studying static and dynamic characteristics of block structures made of composite materials. In addition, we evaluated the various power generation capacities of advanced energy block structures through laboratory-scale and field experiments.

Key words : Energy block, Composite-PZT hybrid structure, Power generation performance, Field experiment

초록

본 논문에서는 주차시설 등에 적용할 수 있는 시설물 맞춤형 에너지 하베스팅 블록 구조에 대하여 구조적 거동 및 발전 성능 평가를 수행하였다. 본 논문에서 제시한 개선된 에너지 블록은 수치해석 및 실험적 모델을 통하여 구현되었다. 특히, 복합소재-PZT 하이브리드 에너지 블록은 향상된 구조적 내구성 및 발전 성능 효과를 위하여 제안되었다. 복합소재로 구성된 에너지 블록의 다양한 정적 및 동적 특성을 분석하기 위해 ABAQUS를 통해 구현한 복합소재-PZT 유한요소 모델이 적용되었다. 또한, 실험실 규모 및 현장 실험 결과는 제안한 에너지 블록 구조의 다양한 발전 성능 효과를 보여준다.

검색어 : 에너지 블록구조, 복합소재-PZT 하이브리드 구조, 발전성능, 현장 실험

1. 서론

주변에는 항상 존재하나 의식하지 못하는 다양한 에너지원들이 존재하는데, 이러한 에너지원들은 그동안 활용되지 못해왔다. 2000년을 전후로 이러한 에너지원을 첨단 과학기술로 수확하여 전기에너지로 활용하기 위한 다양한 노력들이 이루어지고 있으며, 통상적으로 이것을 에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술이라 정의하고 있다. 이러한 기술은 생활, 가전, 산업, 건설, 우주항공 등 모든 부분에서 수확하여 활용이 가능하다. 건설 및 도시 분야로 한정하더라도 각종 시설물에 열, 유체, 진동, 하중 등의 다양한 에너지원들이 상존하고 있다. 그러나 타 분야에 비하여 건설과 도시 분야에서의 에너지 하베스팅 기술을 활용하기 위한 노력은 미미하였다. 특히, 선진국에

* 중신회원 · 포스코 철강솔루션마케팅실 구조연구그룹, 책임연구원 (Structure Research Group, Steel Solution Marketing Dept., POSCO · mnoh@posco.com)

** LH 토지주택연구원 도시환경연구실, 연구위원 (Urban Environment Research Lab., Land & Housing Institute, LH Corp. · hyojin@lh.or.kr)

*** LH 토지주택연구원 공공주택연구실, 수석연구원 (Public Housing Research Lab., Land & Housing Institute, LH Corp. · parkjy@lh.or.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 안동대학교 토목공학과 부교수

(Corresponding Author · Department of Civil Engineering, Andong National University · lsy@anu.ac.kr)

Received July 22, 2015/ revised August 25, 2015/ accepted February 22, 2016

비해 국내에서는 이러한 기술개발 노력이 부족한 실정이다. 이들 중 주택과 도시와 관련하여 상용화된 제품들은 조명조절용, HVAC 센서, 출입문 자동제어 시스템 등이 있다. 현재 시제품으로 출시되고 있는 제품들 중 시장에서 가장 활성화되어 있는 것이 조명관련 제품들이다. 건설 분야에서의 적용은 자연에너지, 도시의 시설물에서 발생하는 진동, 압력, 온도차를 이용하는 것이다. 시설물 분야는 주로 무선센서네트워크에 의해 시설물의 관리 및 모니터링을 통하여 시설물의 안전관리나 효율적인 유지관리를 위한 공공적인 차원에서 적용하는 것이 효율적일 수 있다(Darnell Group Inc., 2012; EnOcean, 2010a,b; Harrop and Das, 2008; Holster Centre, 2010; IDTechEx, 2019; Priya and Inman 2009).

선진국은 무선스위치 및 무선센서 등 맞춤형 개발을 통해 다양한 제품을 상용화하는데 성공하였다. 그러나 국내의 에너지 하베스팅 기술개발은 소자 및 소재 개발에만 집중하여 왔다. 따라서 우리나라도 향후 기초소자 개발과 더불어 시설물 맞춤형 제품 개발을 병행한다면 에너지 하베스팅 분야의 기술향상이 기대된다(REN21 Secretariat, 2012; Priya, 2010). 기존에 개발된 압전 및 전자기유도 복합방식 에너지블록은 발전성능 및 내구성 확보에 문제점을 내포하였다(Kazmierski and Beeby, 2011; Kim et al., 2014). 특히 외부의 진동 등에 대하여 에너지 블록의 변형 또는 파괴 현상이 지속적으로

발생하여 수시로 교체해야하는 문제가 발생할 수 있다(Kim and Park, 2014). 따라서 본 논문에서는 복합소재를 적용하여 에너지 하베스팅 구조의 내구성을 개선하였으며, 주차시설 등에 적용할 수 있는 시설물 맞춤형 에너지 블록 구조를 제시하고 발전성능에 대한 효과를 분석하고자 한다. 한편, 에너지 하베스팅 기술을 건설분야에 상용화하기 위해서는 현재 기술수준에서의 최적 전기에너지 수확 가능량을 예측하고 그 적용 분야를 결정하는 것이 매우 중요하다(Munaz and Sang, 2012). 따라서, 본 논문에서는 개선된 에너지 블록의 발전 성능을 실험실 조건과 현장조건에서 검증하고자 한다. 이를 통하여 최대 발전성능을 파악하고, 그 수요처에 맞는 적정 에너지 하베스팅 시스템을 제시하고자 한다.

2. 복합소재 적용 개념 및 에너지블록 구조

2.1 PZT-복합소재 코팅 모듈 구조

전술한 바와 같이 내구성이 뛰어난 복합소재(ACM: Advanced Composite Materials)를 적용하여 업그레이드 된 에너지 수확 블록 구조의 개발이 필요하다. 복합소재는 경량이면서 내구성이 우수하기 때문에 외부의 충격에서 발생하는 진동에도 발전 블록을 보호하는 장점을 갖는다. 본 연구에서는 내구 성능 확보를 위한

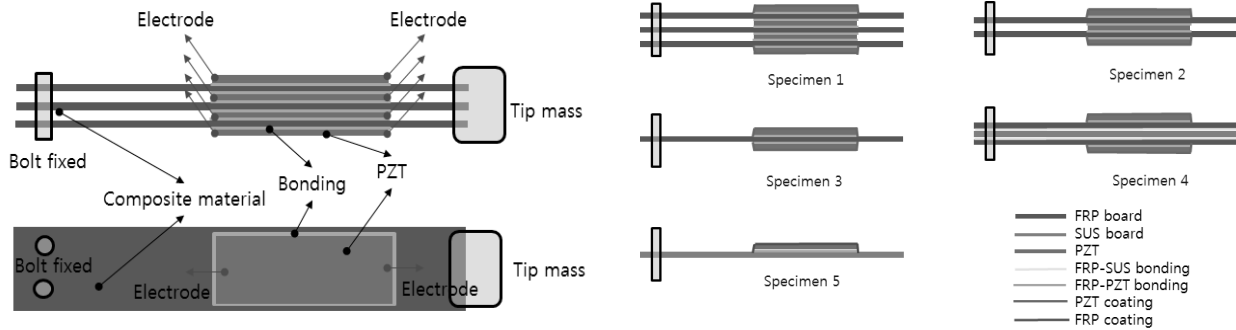


Fig. 1. Concept of Multi-Layer PZT-Composite Bimorph

Table 1. Cases of Composite-PZT Energy Block Structures

Case	Module	PZT	Coating	Layers
I	0.25mmt GFRP module-3EA (0.75mmt)	0.25mmt PZT-4EA (1.00mmt)	Coating/New bonding	7-layer (1.75mmt)
II	0.25mmt GFRP module-2EA (0.50mmt)	0.25mmt PZT-3EA (0.75mmt)	Coating/New bonding	7-layer (1.25mmt)
III	0.25mmt GFRP module-1EA (0.25mmt)	0.25mmt PZT-2EA (0.50mmt)	Coating/New bonding	7-layer (0.75mmt)
IV	0.25mmt SUS module (middle)-1EA (0.25mmt) 0.25mmt CFRP module-2EA (0.50mmt)	0.25mmt PZT-2EA (0.50mmt)	Coating/New bonding	7-layer (1.25mmt)
V	0.25mmt SUS module-1EA (0.25mmt)	0.25mmt PZT-1EA (0.25mmt)	Composite coating (0.15mmt)	3-layer (0.65mmt)

PZT-복합소재 코팅 개념을 제시하고 이를 수치해석 및 실험적으로 검증하고자 한다. 또한, 개선된 에너지 블록구조를 개발하여 시설물 맞춤형 용도로 사용성 및 발전 성능을 평가하고자 한다.

복합소재 코팅 에너지 모듈 구조의 정·동적 수치해석 및 성능 실험은 Fig. 1과 같은 몇 가지 Case를 대상으로 제작의 효율성이 높은 Case를 선정하여 실험에 적용하고자 하였다. 최초로 고려한 하이브리드 모듈 구조에 대한 5가지 Case의 제원 및 형상을 요약하면 Table 1과 같다. 본 연구에서는 5가지 Case에 대하여 검토한 결과 복합소재 코팅 제작의 원활함과 및 경제적으로 효율성이 높은 시편 5 (Case V)를 대상으로 수치해석 및 성능 실험을 수행하였다.

2.2 개선된 하이브리드 블록 구조

개선된 에너지블록은 (재)포항산업과학연구원에서 기존에 개발한 진동형 에너지블록 모듈을 개선한 것으로 에너지 하베스팅 원리는 압력과 진동을 동시에 이용하는 하이브리드 방식이다 (Spremann, 2012; Venkatasubramanian, 2012). 이 하이브리드 모듈 구조에서 압전부의 특성은 중앙부를 고정시킨 상태에서 양단을 자유단으로 하는 캔틸레버 구조를 형성하고 자유단에 중량 (mass)을 주어 진동을 유발함으로써 압전체로 부터 전기를 생산하는 방식이다. 또한 전자기 부는 코일속에 자석을 배치하여 자석의 진동을 통해 전기를 생산한다. 하이브리드 블록 전체 구성은 압전부의 경우 블록의 중앙에, 그리고 전자기부의 경우 블록의 양쪽에 배치하는 구조이다. 이러한 하이브리드 모듈은 1회 가진 시에 0.453w, 그리고 5회 연속 가진 시에 1.032w의 전기를 생산하는 것으로 측정되었다. 이러한 결과는 (재)포항산업과학연구원서 초기 개발한 프로토타입 모듈에 비해 1회 가진 시에 약 12.7배, 그리고 5회 연속 가진 시에 28.9배의 전기 생산 효율을 증대시킨 것이다.

반면, 본 연구에서는 이러한 출력을 더욱 향상시켜 공동주택단지 주차장의 출입부 차단개폐기, 안내표지판, 경광등 등을 수확전력만

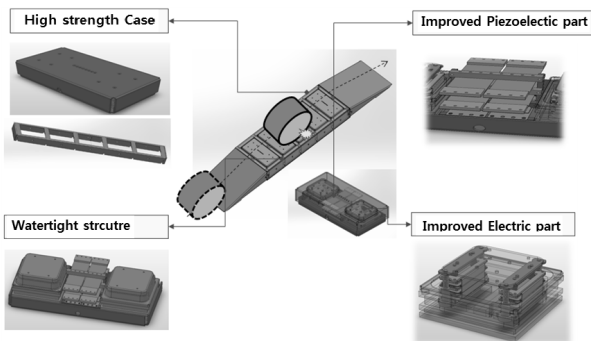
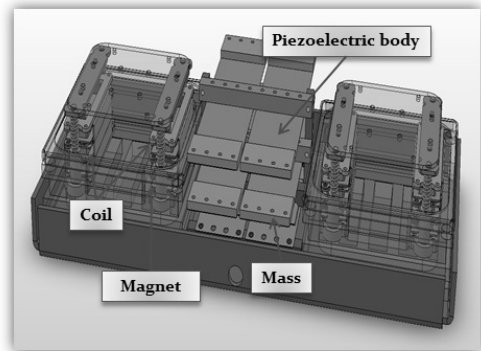


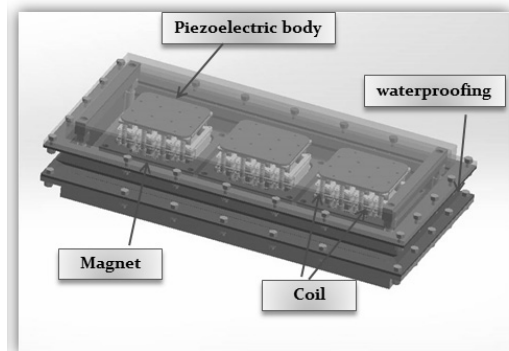
Fig. 2. Improved Hybrid Energy Block Structures

으로 자체 구동할 수 있는 수준의 전기 생산이 가능하도록 시설물 맞춤형 에너지블록 모듈 개선목표를 설정하고 모듈을 개발하였다. 개선모듈은 차량의 하중을 견딜 수 있도록 고강도 케이싱 구조로 개발하였다. 이를 위하여 차량의 바퀴 폭에 맞도록 케이싱의 형상을 결정하고 편심제어를 위하여 6개 지점에 완충 지지부를 구성하였다. 또한, 도로나 단지라는 외부환경에 적합하게 이중 수밀구조로 개선하였다. 특히, 모듈 내외부에 배수홀과 배수통로를 도입하여 상시 침수되는 것을 방지하는 구조로 설계하였다. 이러한 개선방안을 요약하면 Fig. 2와 같다. 또한, Fig. 3은 선행 연구 개발된 하이브리드 에너지블록의 성능개선을 위한 기존 모듈과 개선모듈의 특성을 비교한 것이다.

본 연구에서는 세부 구성항목별 설계개선을 위하여 전술한 개선 모듈구조의 특성에 적합한 모듈의 증폭 및 공간효율화 구조로 개선하였다. 즉, 전체적으로는 전자기부 3개, 그리고 전자기부 1개 소당 상부에 압전부(PZT) 2개씩을 배치하였다. 따라서 세트모듈에는 총 6개의 압전부를 설치하였다. 이는 기존 세트모듈에 비해 전자기부 1개소, 압전부 5개를 증가시킨 것이다. 두 번째로 방수 및 배수성능을 부여하였는데, 이를 위하여 단위모듈에 대한 방수케



(a) Previous Module



(b) Improved Module

Fig. 3. Comparison Between Previous and Improved Module Structures

이스 도포, 세트모듈 전체에 대한 방수케이스 설치, 세트모듈 내 배수홀 설치, 프레임 모듈에 방수재를 설치하는 구조로 설계하였다. 세 번째로 단위모듈 3개로 구성되는 세트모듈의 내구성을 증진하기 위하여 차량 통과 시 일정깊이 이하로 처짐이 발생하지 않도록 세트모듈의 외부 프레임에 스톱퍼(stopper)를 설치하였다. 또한 내구성 증진을 위하여 외부 케이싱은 스테인리스 재질의 2중 구조로 설계하였다. 이러한 개발모듈에 대한 성능 시험은 실험실 및 현장 조건으로 나누어 수행하였다.

3. 복합소재-PZT 하이브리드 에너지 블록의 수치해석

본 연구에서는 전술한 복합소재-PZT 하이브리드 에너지 블록의 거동 시뮬레이션을 위하여 고등유한요소 프로그램 패키지인 ABAQUS를 사용하여 정·동적 해석을 수행하였다(ABAQUS, 2007). 수치해석은 1) PZT+SUS 기관(CASE I) 2) PZT+SUS+복합재 코팅 기관(CASE II) 3) PZT+SUS+복합재+복합재 코팅 기관(CASE III)의 세가지 CASE에 대하여 Solid 요소를 사용한 3차원 정밀 해석을 실시하였다. Fig. 4는 세 가지 해석 모델에 대한 정적 처짐 형상을 나타낸 것이다. 전체적으로 처짐 형상을 해석 Case에 따라서 유사한 경향을 보이고 있으나, 최대 처짐 및 응력값은 서로 다른 양상을 보임을 알 수 있다(Table 2 참조). 해석 결과 Case I의 경우가 가장 큰 처짐과 응력값을 나타냈다. Case I는 SUS기관과 PZT만이 결합된 기존 모델로서, 복합재로 코팅하거나 보강된 경우보다는 다소 취약한 것을 알 수 있다. 또한, 최대 응력 및 최소응력의 차이도 다른 경우보다 크게 발생하여 내구성능에도 바람직하지 못한 것으로 분석된다.

Case II와 III의 경우는 처짐 및 응력 분포에 큰 차이는 보이지 않으나, SUS에 GFRP로 보강한 Case III의 경우가 다소 유리한 것으로 나타났다. 기관의 구조적 성능 향상이라는 관점에서 기존의 SUS 판을 사용하는 경우 GFRP로 PZT를 코팅하여 보호하고, SUS 아래쪽은 FRP 판으로 덧씌워 하이브리드 Muti-layer 구조로 설계하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

고유진동 해석의 경우는 Case I은 39~40Hz, Case II와 III은 44~48Hz의 분포를 보였으며 전반적으로 Case I의 경우가 다소 작은 고유진동수를 나타냈다(Figs. 5~7 and Table 3 참조). 본 개발 모듈을 주차장 입구 등에 설치하는 경우, 차량은 중저속으로 주행하게 되어 차량 주행으로 인한 공진효과가 미미하다. 다만, 고속 주행에 적용할 경우, 복합소재의 물성 및 재료를 변화시키지 않고도 화이버의 보강 각도와 적층배열 변화만으로 고유진동수 제어가 가능하여 내구성 확보와 동시에 압전기관의 공진 효과를 유도할 수 있는 장점이 있다. 이러한 복합소재의 장점을 활용하여 발전기관을 설계한다면, 기관의 한정된 규격을 준수하면서도 내구

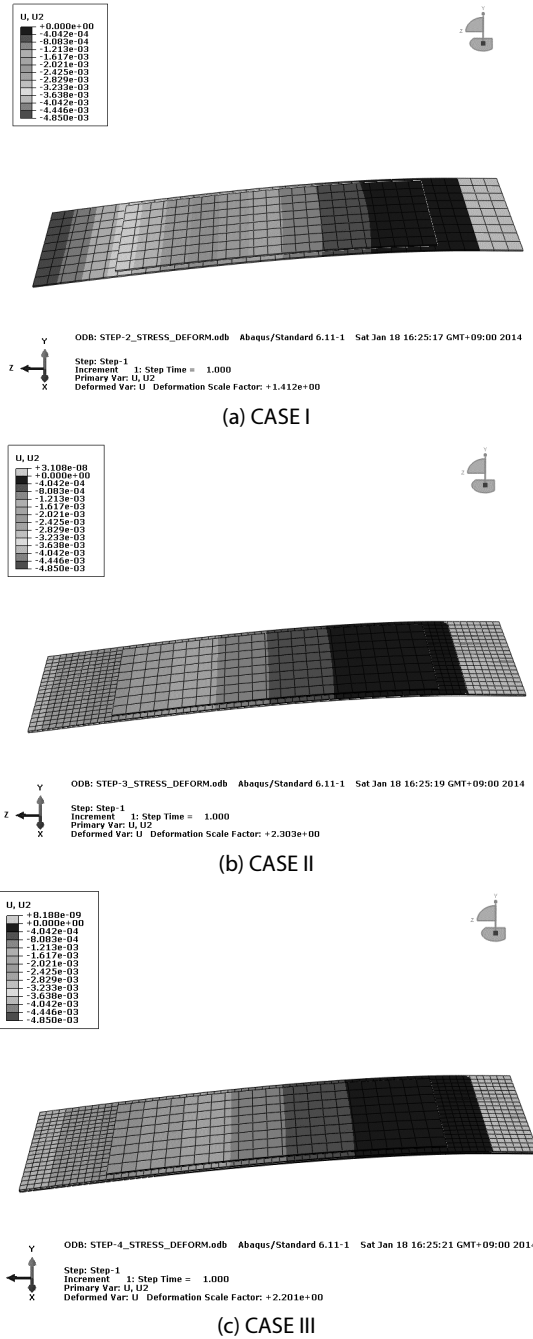


Fig. 4. Static Analyses of Composite-PZT Hybrid Energy Blocks

Table 2. Maximum and Minimum Displacements and Stresses for Three Cases

	Stresses		Displacements	
	max (Pa)	min (Pa)	max (m)	min (m)
CASE I	2.172e+7	-2.19e+7	0	-4.85e-3
CASE II	1.802e+7	-1.85e+7	3.108e-8	-2.975e-3
CASE III	1.680e+7	-1.705e+7	8.188e-9	-3.112e-3

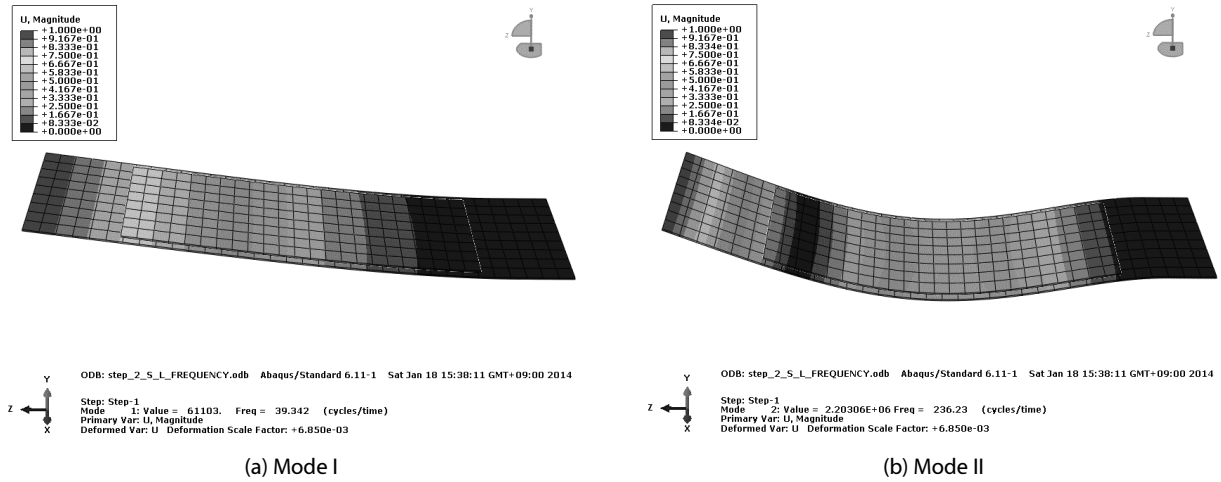


Fig. 5. Natural Frequencies and Mode Shapes for CASE I

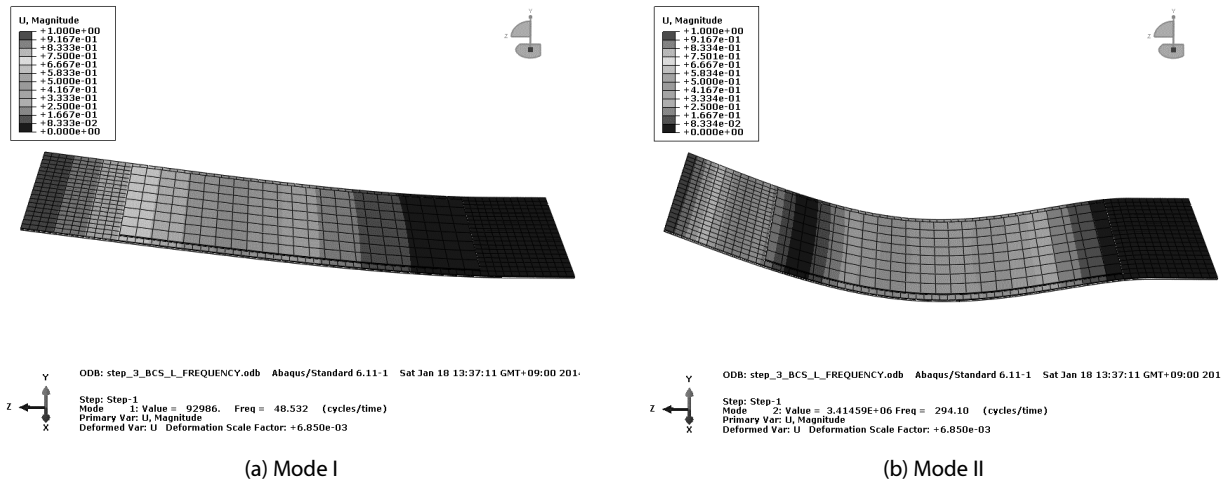


Fig. 6. Natural Frequencies and Mode Shapes for CASE II

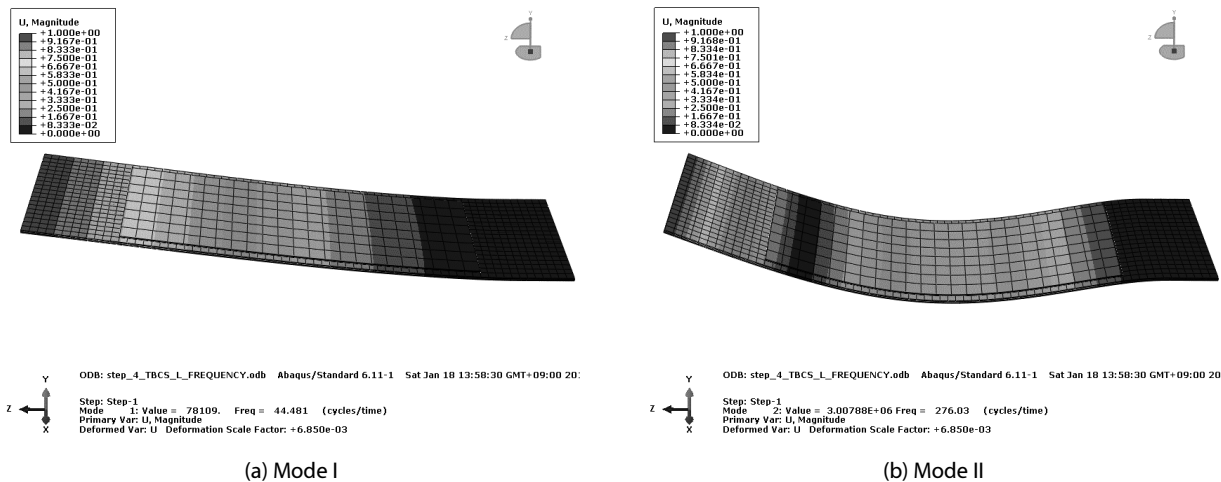


Fig. 7. Natural Frequencies and Mode Shapes for CASE III

Table 3. Induced Natural Frequencies for Three Cases

	Mode	Frequency (Hz)
CASE I	I	39.33
	II	236.18
	III	275.46
	IV	644.61
CASE II	I	48.53
	II	294.10
	III	325.15
	IV	795.94
CASE III	I	44.48
	II	276.03
	III	309.92
	IV	755.98

성능 향상 및 공진 유발에 따른 발전성능 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 개선된 에너지블록 모듈구조의 성능 실험

4.1 실험실규모의 재하성능 분석

본 연구에서는 개발모듈에 대한 발전성능 평가 1단계로 실험실 조건에서의 평가를 실시하였다. Fig. 8은 실험실 규모의 에너지블록 가진 시 발생전력 측정 장치를 보여준다. 발전성능평가는 직접 충격에 의한 하중시험은 1회 가진 시, 그리고 5회 연속 가진 시로 구분하여 실시하였다. 가해진 압력에 대한 전기에너지 생산효율은 오실로스코프로 측정하였다. 측정된 결과는 Fig. 9와 같이 시간대별 출력으로 분석하였다. 먼저, 1회 가진 시의 개선모듈에서 발생하는 순간 최대전력은 1.066W이었다. 따라서 이론적으로 충전할 수 있는 시간당 전력은 639.9W이다. 이러한 결과는 선행 연구 개발된 에너지블록에 비해 출력이 235% 증가한 것이다(Table 4 참조).

다음으로 5회 연속 가진 시의 개선모듈에서 발생하는 순간 최대 전력은 1.830W이었다. 따라서 이론적으로 충전할 수 있는 시간당 전력은 1,098.3W이다. 이는 선행 연구 개발된 에너지블록에 비해 출력이 177% 증가한 것이다. 그러나 선행개발 모듈이 1회 가진 시 대비 약 2.3배의 증폭효율이 있던 것에 비해 개선 모듈은 1회 가진 시 대비 1.7배의 효율이 증가하여 상대적으로 증가 폭은 적게 나타났다.

4.2 개선모듈의 차량 직접재하 실험 및 시험 시공 평가

개발된 모듈에 대한 발전성능의 2단계로 실제 차량에 의해 실험실의 직접재하 성능평가를 실시하였다. 발전성능 평가에 사용된 차량은 Fig. 10과 같이 공차중량이 1,440kg인 S모델과 2,085kg인 C모델의 두 종류로 하였다. 재하시험은 차량의 한쪽 바퀴가 프레임

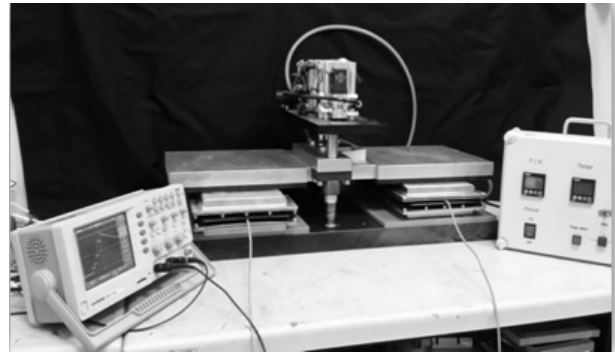
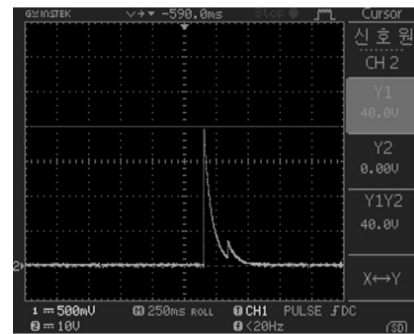
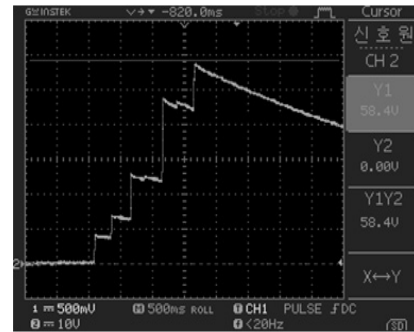


Fig. 8. Laboratory-scale Experimental Setup



(a) Once Excitation



(b) Five Times Excitations

Fig. 9. Generation Performance Evaluation of Improved Energy Blocks

Table 4. Generation Performance results of Improved Energy Blocks

		Max. Power (W)	Theoretical recharge (W/h)	Improved rate (%)
Once Excitation	Existing results	0.453	271.80	-
	This study	1.066	639.90	235
Five Times Excitations	Existing results	1.032	619.20	-
	This study	1.830	1,098.30	177

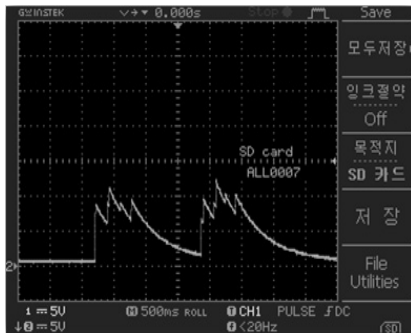


(a) S-Model

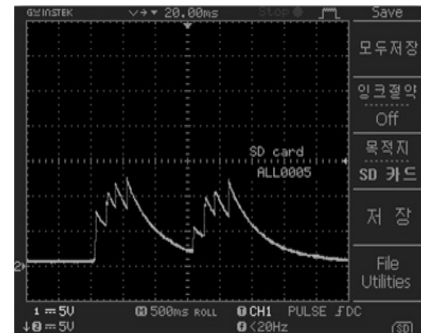


(b) C-Model

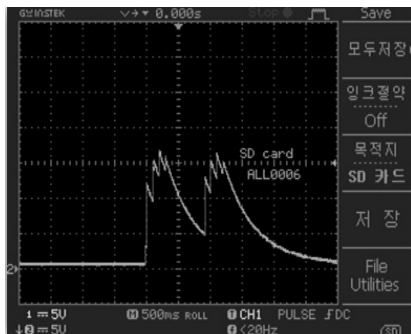
Fig. 10. Generation Performance Experimental Setup for Modules in the Laboratory-Scale



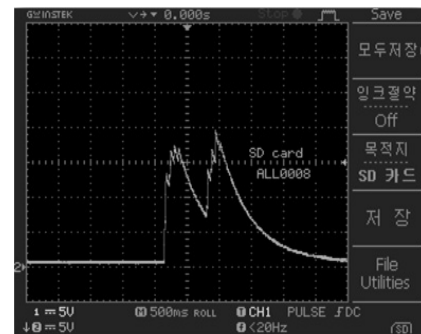
(a) S-Model (10km/h)



(b) S-Model (20km/h)



(c) C-Model (10km/h)



(d) C-Model (20km/h)

Fig. 11. Generation Performance Evaluation of Improved Energy Blocks Under Passing Vehicle

모듈의 속도가 각각 10km/h와 20km/h로 지날 때의 발전성능을 측정하였다. 가해진 압력에 대한 전기에너지 생산효율은 오실로스코프로 측정하였다. 차량 재하시 차종별, 속도별 측정결과는 Fig. 11과 같다.

Fig. 11로부터 S모델 차량에 의한 속도차이에 따른 변화가 없는 결과는 측정오차에 따른 것으로 분석된다. C모델 차량에 의한 측정결과 동일 중량 차량의 속도변화에 따른 에너지블록의 발전 성능은 속도 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 개발된 하이브리드 에너지블록의 실증시험으로

서 토지주택공사의 THE Green관 외부 주차장을 대상으로 적용하였다. 설치되는 에너지블록은 총 36개의 단위모듈, 단위모듈 3개씩으로 결합한 12개의 세트모듈, 따라서 총 4개의 프레임 모듈을 적용하는 것으로 하였다. 설치 에너지블록에서 생산전기의 이용대상 시설물은 주차장 출입부 차단기(A), 차량출입 경광등(B), 그리고 안내전광판(C)의 세 가지로 설치하였다. 또한, 에너지블록 모듈의 주차장 출입부 배치를 위한 설치체원을 결정하였다. 먼저, 에너지블록은 세트 및 프레임 모듈단위로 설치하였으며, 총 세트 모듈은 12개이다. 이러한 세트모듈의 설치간격을 결정하기 위하여 차량의



Fig. 12. Field Installation of Improved Energy Blocks Under Passing Vehicle



Fig. 13. Field Test of Improved Energy Blocks Under Passing Vehicle

바퀴 폭과 차바퀴의 앞뒤 간격 및 좌우간격을 검토하였다. 검토는 THE Green관 출입이 가장 많은 승용차를 기준으로 하였다. 검토된 승용차는 2,000CC급 국산 모델로 하였다. 검토 차량의 타이어의 최대 폭은 225mm이고, 그에 따라 에너지블록 세트모듈과 프레임

모듈의 제작 크기를 결정하였다. 표준차량의 좌우 바퀴 중심간 거리는 1,587mm, 그리고 타이어 접지중심간 앞뒤 간격은 2,795mm로 설정하였다. Fig. 12는 현장에 시험시공을 위한 에너지블록 시공 과정을 보여준다.

Table 5. Results of Field Tests

Velocity		Voltage (V)			Generation rate (W)		
		I	II	Evaluation	I	II	Evaluation
5km/h ± 3km	1	8.8	-	-	0.15	-	-
	2	6.2	-	-	0.08	-	-
	3	6.0	-	-	0.08	-	-
	Ave.	7.0	-	-	0.23	-	-
10km/h ± 3km	1	13.9	21.2	▽ 7.3	0.39	0.90	▽ 0.51
	2	14.8	21.6	▽ 6.8	0.44	0.93	▽ 0.49
	3	15.0	21.2	▽ 5.4	0.45	0.90	▽ 0.45
	Ave.	14.7	21.3	▽ 6.6	0.43	0.91	▽ 0.48
20km/h ± 3km	1	28.2	23.4	△ 4.8	1.59	1.10	△ 0.49
	2	23.6	25.4	▽ 1.6	1.22	1.29	▽ 0.07
	3	25.0	24.2	▽ 0.8	1.25	1.17	△ 0.08
	Ave.	25.6	24.3	▽ 1.3	1.35	1.15	▽ 0.20
30km/h ± 3km	1	31.8	33.0	▽ 1.7	2.02	2.18	▽ 0.16
	2	29.2	34.6	▽ 5.4	1.71	2.39	▽ 0.68
	3	-	33.0	-	-	2.78	-
	Ave.	30.5	33.5	▽ 3.0	1.87	2.45	▽ 0.58

에너지블록 구조의 에너지수확 성능을 평가하기 위하여 총 12개의 세트모듈을 5개의 프레임 모듈로 구획하여 설치하였다. 시험용 에너지블록에 대한 성능시험은 2,000cc급 시험용 승용차량을 이용하였다. 시험은 주행속도를 5km/h, 10km/h, 20km/h로 구분하여 속도별로 각각 3회씩 측정하여 평균값을 선택하였다. Fig. 13은 시험용 차량에 의한 재하실험 및 차량 통과시 LED 전광판과 경광등이 작동하는 시험을 보여준다.

현장실험은 2회 실시하였다. 1차 실험에서는 THE Green관 실험현장 여건상 차량의 주행속도를 20km/h 이상 구현하기가 어려웠다. 따라서 1차 실험은 주 실험은 5km/h, 10km/h, 20km/h로 설정하여 실험하였고, 보조적으로 30km/h에 대해 측정하였다. 1차 실험에 이어 실험 회차별 편차를 판단하기 위하여 2차 실험을 실시하였다. 2차 실험에서는 1차 실험결과의 발전량이 적은 5km/h는 생략하고, 10km/h, 20km/h, 30km/h에 설정하여 실험 측정하였다. Table 5는 현장 차량재하 성능실험 결과를 보여준다. 먼저, 에너지블록의 1, 2차 현장 발전성능 평가결과, 차량의 속도증가에 따라 발전성능은 개략 속도의 증가에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 차량 속도가 높은 곳에서 에너지 수확효율이 높으므로 에너지블록의 용도는 속도 30km/h 이상이 가능한 용처에 적용하는 것이 적절하다는 것을 의미한다. 다음으로 에너지블록의 1, 2차 현장 발전성능 평가결과, 측정 횟수에 따라 동일 속도에서 발생하는 발전성능을 다소 변동이 있으나 전체적인 평균 발전성능은 유사하게 나타나는 것으로 분석된다. 또한, 실험실의

가진 실험결과의 최대전력과 현장 실험결과의 최대전력을 비교한 결과, 실험실 조건 1회 가진 시의 수확전력은 차량이 약 20km/h 이상 주행할 때, 그리고 5회 연속 가진에 대비해서는 최소한 30km/h 이상 주행할 때에 동일하거나 그 이상의 전력효율을 거둘 수 있는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 장에서는 복합소재를 적용한 하이브리드 에너지 블록구조의 정·동적 구조성능에 대한 수치해석을 수행하였으며, 개선된 에너지블록에 대하여 실험 및 시험시공을 통하여 성능을 검증하였다. 본 연구 결과를 요약하고 결론을 제시하면 다음과 같다.

- (1) 복합소재-PZT 하이브리드 구조에 대한 수치해석 결과, SUS기판과 PZT만이 결합된 기존 모델로서, 복합재로 코팅하거나 보강된 경우보다는 다소 취약하였다. 또한, 최대 응력 및 최소 응력의 차이도 다른 경우보다 크게 발생하여 내구성에도 바람직하지 못한 것으로 분석되었다. 본 연구결과로부터 기판의 구조적 성능 향상이라는 관점에서 기존의 SUS 판을 사용하는 경우 GFRP로 PZT를 코팅하여 보호하고, SUS 아래쪽은 FRP 판으로 덧씌워 하이브리드 Muti-layer 구조로 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (2) 실험실 조건에서 개선된 하이브리드 에너지블록의 발전성능

평가결과 1회 연속 가진 시에는 1.066W, 5회 연속 가진 시에는 1.830W의 전기를 생산할 수 있었다. 이는 진동 및 압력 인가형 하이브리드 하베스터의 경우 연속 가진이 유리하다. 두 번째, 실험실에서의 실제 차량 재하조건에서 시속 20km/h에서 최대 0.76W의 전기를 생산할 수 있었다. 이러한 결과는 실험실의 가진에 의한 성능보다는 낮은 결과이다. 이는 실험실의 가진 조건과 실제 차량의 가진 조건의 차이로 판단된다.

- (3) 현장조건에서의 차량재하 성능실험결과 시속 30km/h에서 평균 최대 2.16W의 전력생산이 가능하였다. 현장 차량재하 시험 결과 동일차량으로 속도조건을 달리했을 때 속도가 높을수록 에너지수확 성능이 비례적으로 높아진다. 이러한 결과는 향후 도로용 에너지 하베스팅의 적용분야를 확대할 수 있을 것으로 기대된다.
- (4) 차량운행 재하에 의한 에너지블록은 4개의 바퀴가 동시에 4개의 에너지블록을 통과하는 것과 하나의 에너지블록을 지나 는 것과 큰 차이가 없었다. 따라서 향후 유사조건인 도로용 에너지하베스터의 개발 및 적용 시에는 하나의 차량하중만을 이용하는 방법으로 개발하는 것이 효과적일 것이다.

본 연구로부터 에너지하베스팅 기술은 우선적으로 건물의 무선 센서 네트워크 구축이 경제성, 효율성, 입주자 만족도 등에서 상용화가 가능할 것으로 판단된다. 따라서 향후 유관 기관과의 공조를 통하여 무선센서네트워크의 적용성을 확보할 필요성이 제기되며, 보다 다양한 구조물의 무선센서네트워크 실증연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 (재)포항산업과학연구원과 토지주택연구원의 공동연구 과제 연구비 지원으로 수행되었으며, (주)티오션 압전에너지센터 협조로 실험이 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

ABAQUS (2007). "ABAQUS/CAE user's manual, version 6.7." Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., Pawtucket, R.I.
 Darnell Group Inc. (2012). "Energy harvesting & related energy

storage devices : Worldwide Forecasts (Forth Edition)."
 EnOcean (2010a). "Residential buildings : ENOCEAN -The wireless standard for sustainable buildings."
 EnOcean (2010b). "EnOcean technology and LEED - Enabling Sustainability."
 Harrop, P. and Das, R. (2008). "Energy harvesting and storage for electronic devices 2009-2019." IDTechEx report (www.IDTechEx.com).
 Holster Centre (2010). "Workshop the future of energy harvesting."
 IDTechEx (2019). "Energy harvesting and storage for electronic devices 2009-2019."
 Kazmierski, T. J. and Beeby, S. (2011). "Energy harvesting systems - principles, modeling and applications." Springer.
 Kim, H. J. and Park, J. Y. (2014). "Energy harvesting technology for housing and urban application." *The Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 27, No. 1, pp. 41-47 1229-3059 (in Korean).
 Kim, H. J., Jin, G. N., Park, J. Y. and Noh, M. H. (2014). "A basic and practical use study on the energy harvesting technology to apply in housing & urban structures (II)." LHI, Land & Housing Institute (in Korean).
 Munaz, A. and Sang, G. (2012). "Design and analysis of a vibration-driven electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet." *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 172-179.
 Noh, M. H. and Lee, S. Y. (2012a). "Dynamic characteristics and piezoelectric effect of energy harvesting block structures with different shapes." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 32, No. 6-A, pp. 379-387 (in Korean).
 Noh, M. H. and Lee, S. Y. (2012b). "Evaluation on the performance of power generation and vibration characteristics of energy harvesting block structures for urban & housing application." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 8, pp. 3735-3740 (in Korean).
 Priya (2010). "Energy harvesting technologies." Springer
 Priya, S. and Inman, D. J. (2009). "Energy harvesting technologies." Springer.
 REN21 Secretariat (2012). "Renewable energy policy network for the 21st century."
 Spreemann (2012). "Electromagnetic vibration energy harvesting devices: architecture, design, modeling and optimization." Springer.
 Venkatasubramanian (2012). "Energy harvesting - recent advances in materials, devices and applications." Cambridge University Press.