

도시·주택 적용 에너지수확 블록구조의 진동 특성 및 발전성능 평가

노명현¹, 이상열^{2*}

¹포항산업과학연구원 에너지인프라연구본부, ²안동대학교 토목공학과

Evaluation on the Performance of Power Generation and Vibration Characteristics of Energy Harvesting Block Structures for Urban & Housing Application

Myung-Hyun Noh¹ and Sang-Youl Lee^{2*}

¹Energy Infrastructure Research Dept., Research Institute of Industrial Science & Technology,

²Department of Civil Engineering, Andong National University

요약 본 연구는 다양한 에너지 하비스팅 기술들 중 압전 기술과 전자기 유도 방식을 조합한 에너지 블록 구조를 개발하고 발전성능 평가를 수행한다. 본 연구의 목적은 개발된 에너지 하비스팅 블록의 주택·도시 분야 적용성을 평가하기 위한 것이다. 본 연구는 동적 특성을 분석하기 위하여 유한요소 해석을 실시하고, 실험실 규모의 다층 에너지 하비스터의 현 발전수준을 평가하여 제시하였다. 그 다음으로 증폭기술이 적용된 프로토타입의 특징을 설명하고 개발된 프로토타입 모듈의 발전성능을 다각적으로 평가하여 제시하였다.

Abstract In this paper, the performance of power generation for the energy harvesting block with a combination of piezoelectric technology and electromagnetic technology among various energy harvesting technologies was investigated. The goal of this study is to evaluate on the applicability of our developed energy harvesting block into the field of urban & housing. First, we carried out a finite element vibration analysis and evaluated the performance of power generation for the multi-layer energy harvester at laboratory scale. Second, we described the features of our developed prototype module that includes amplification technologies to improve power density per module and evaluated the performance of power generation for the energy harvesting block in a variety of ways. Finally, we suggested the direction for the improvement of the energy harvesting block module.

Key Words : Energy Harvesting, Piezoelectric Harvester, Energy Block, Finite Element Vibration Analysis

1. 서론

현재 국내에서 사용되는 전체 에너지량 중 약 1/4은 주거용 및 상업용 구조물들을 통해 소모되고 있다. 이는 구조물이 운영 및 유지되는 동안 엄청난 양의 에너지가 낭비되고 있다는 것을 보여준다. 환경파괴에 영향을 미치지 않고 에너지 절감이 지속되는 구조물을 개발 및 유지하기 위해서는 에너지 효율성을 높여야 한다. 우리나라의 2020년까지 국가온실가스 중기 감축목표는 발생 예상량

(BAU) 대비 30%이다. 도시와 건축물 부문은 단계적으로 26.9%를 감축하고, 2025년부터는 제로에너지 주택보급 목표를 국제적으로 발표하였다. 이러한 도시 및 건축물 부문의 목표는 산업부문의 감축목표(18.2%)에 비해 월등히 높은 것이다. 따라서 기존의 에너지성능 강화를 위한 Passive 기술 및 신재생에너지로 대표되는 Active 기술과 함께 새로운 에너지 획득수단인 에너지 하비스팅(Energy Harvesting) 기술의 선제 개발을 통한 대응이 필요한 실정이다.

*Corresponding Author : Sang-Youl Lee

Tel: +82-10-3011-4696 email: lsy@andong.ac.kr

접수일 12년 05월 29일

수정일 12년 07월 09일

게재확정일 12년 08월 09일

현재 에너지하비스팅 연구는 에너지 수확원별로 에너지를 수확하는 다양한 방법들이 제시되고 있다[11,13]. 대표적인 방법은 압전, 전자기장, 압전 및 광전 등을 이용하는 것이다[1,3-8].

현재까지 에너지하비스팅 시스템을 갖춘 구조물의 설계, 해석, 평가 및 유지관리 등의 연구는 차량의 운동 에너지 하비스팅을 위한 압전소자 활용 기초연구가 수행된 바 있다. 미국은 태양전지패널을 이용해 에너지를 수확하는 솔라로드라는 도로 포장체의 공학적 개념설계가 수행되어 이를 상용화하기 위한 기초연구를 수행한 바 있다[9]. 그러나 기존의 에너지수확 기술은 발전장치의 소형화를 목적으로 개발되어 모듈당 발전수확 용량이 마이크로 수준에 머물러 있다. 용도 또한 센서 및 초소형 전자기기 등의 전원 공급용에 제한적으로 적용되고 있어 수확된 에너지를 중/대용량급의 도시·주택 분야 활용처에 적용하기 위해서는 많은 양의 에너지 소자를 설치해야 하는 단점 있다. 이러한 면적 증가 방식의 증폭 방법은 초기 투자비용이 많이 소요되어 상용화에 큰 걸림돌이 되고 있어 제한된 에너지 모듈 크기에서 전력을 최대한 증폭할 수 있는 연구개발이 필요한 실정이다[2].

따라서 본 논문에서는 도시·주택 분야 미관 및 생태 블록으로 적용할 수 있는 에너지하비스팅 블록의 증폭 기술 적용 가능성을 검토하고 향후 에너지 하비스팅 블록 모듈의 개선 방향을 제시함으로써 에너지하비스팅 블록의 연구 개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 기본 개념 및 이론 고찰

에너지 하비스팅의 기본 개념은 건물 및 도시 환경에 상시 존재하고 있는 열, 진동, 바람, 인간의 도보 등의 에너지 원을 전기에너지로 변환하여 재활용하는 것이다. 이는 현재 버려지는 압력, 진동, 열원으로부터 새로운 에너지를 수확하여 생산하는 신재생에너지와는 또 다른 기술이다. 압전 하비스팅의 이론적 발전 성능 평가를 위해서는 PZT 소자의 전기적 특성 평가가 선행되어야 한다. 일반적으로 1kHz에서 Impedance Analyzer에 의해 정전용량 C 가 측정되며 식 (1)로 이론적 추정이 가능하다[3].

$$C = \frac{\epsilon^{T_{33}} \cdot \epsilon_0}{S \cdot t} \quad (1)$$

여기서, C 는 정전용량, S 는 시편의 면적, t 는 시편의 두께, ϵ_0 는 진공 중의 유전율($8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$), 그리고

ϵ_{33} 은 상대유전체상수를 의미한다. 식 (1)로부터 계산된 값을 식 (2)에 대입함으로써 압전 하비스팅의 최대 발전 성능을 이론적으로 도출할 수 있게 된다[12].

$$P_{\max} = \frac{1}{\omega_r^2 (4\zeta_m^2 + 4\kappa^4)(R_L C \omega_r)^2 + 4\zeta_m \kappa^2 (R_L C \omega_r) + 2\zeta_m^2} a^2 \quad (2)$$

여기서, R_L 은 저항 하중, Y 는 PZT 소자의 탄성계수, d 는 압전 변형률 계수, t 는 PZT 소자 두께, b^* 는 압전 발전기의 치수와 관련된 상수, ϵ 은 유전체 상수, ω_r 은 공진주파수, ζ_m 은 역학적 감쇠계수, κ 는 압전 재료의 전기-역학적 커플링 계수, a 는 진공 가속도를 의미한다.

한편, 전자기유도 방식 하비스팅의 이론적 발전 성능 평가를 위해 자기장은 자석과 떨어져서 변하는 것으로 가정한다. 이때 유도 기전력은 다음과 같다[13].

$$\text{e.m.f.} = -N \cdot S \cdot \frac{dB}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \kappa \cdot \frac{dz}{dt} \quad (3)$$

여기서, N 은 코일의 회전 수, S 는 코일의 유효 면적, dB/dz 는 자속 밀도 경사, dz/dt 는 자석과 코일의 상대속도, κ 는 전자기유도 커플링 계수를 의미한다. 하중 및 코일 저항으로 발생하는 최대 평균 발전 성능은 다음 식에 의해 이론적인 추정이 가능하다[13].

$$P_e = \frac{m a^2}{16\zeta_m \omega_r (1 - R_c/R_L)} \quad (4)$$

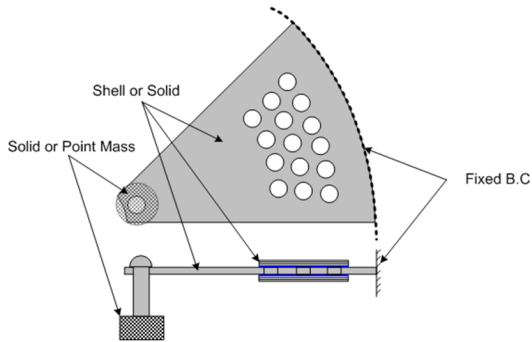
여기서, m 은 하비스팅의 질량, a 는 진동 가속도, ζ_m 은 역학적으로 유도되는 감쇠계수, ω_r 은 공진주파수, R_c 와 R_L 은 코일과 하중의 저항을 의미한다.

3. 유한요소 고유진동 해석

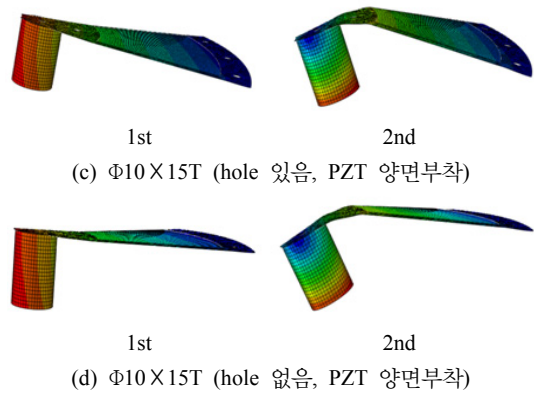
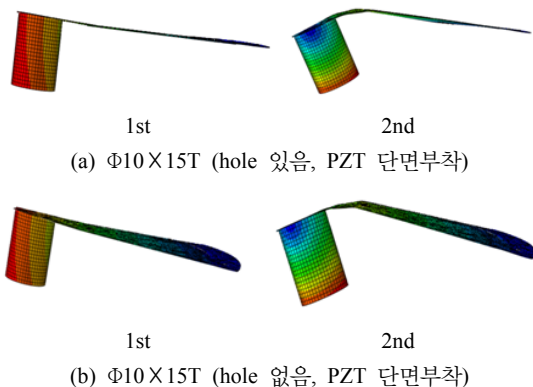
본 연구에서는 개발한 에너지 블록의 다양한 동적 특성을 분석하기 위하여 범용 유한요소 상용 패키지인 ABAQUS [10]를 사용하여 해석을 수행하였다. 제안된 모델은 그림 1과 같이 캔틸레버 구조 하단에 Tip mass 부착되고 PZT는 상·하단에 각각 부착된 경우이다. 이 경우,

Tip mass는 3차원 Solid 요소를, 캔틸레버구조 및 PZT는 Shell 요소를 각각 적용하였다. 재료 모델링의 경우 Substrate 및 Tip mass는 Isotropic elastic material로 고려하였고, PZT는 E11, E22, E33를 고려한 Orthotropic elastic material로 고려하여 모델링하였다. 또한, Substrate, PZT 및 Tip Mass의 상호거동 문제는 ABAQUS의 Tie interaction을 적용하여 연결하는 기법을 사용하였다. 유한요소 mesh type은 기본적으로 Linear hex mesh를 적용하였으나, hourglass mode 발생하는 경우에는 Quadratic element 사용하여 보정하였다.

해석 결과, tip mass가 하면에 부착된 경우에 대하여, 첫번째부터 네번째 고유진동수 범위는 약 3.2~ 88.9 Hz로 PZT 단면 및 하면 부착, hole의 유무에 따라 그 차이는 미미한 것으로 나타났다. 이 경우는 물성변화에도 불구하고 매우 안정적인 동적특성을 나타내는 것으로 분석되었다. 고유 모드 형상은 그림 2에서 보는 바와 같이 PZT 단면 및 양면 부착에 대하여 유사한 경향을 나타낼 수 있다. 첫번째 모드형상이 지배적임을 감안할 때, 특이사항은 관찰되지 않았다.



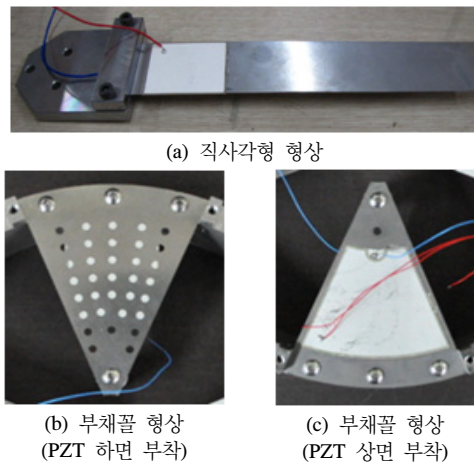
[그림 1] 에너지수확 블록 모델
[Fig. 1] Block model for energy harvesting



[그림 2] 고유진동 모드 형상
[Fig. 2] Natural vibration mode shapes

4. Multi-layer 압전 구조의 성능평가 비교

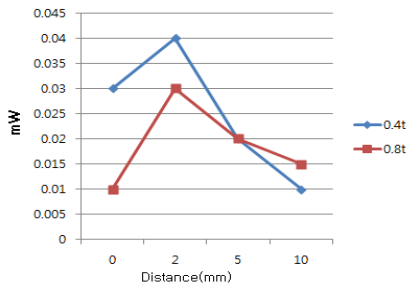
본 연구에서는 실험실 규모(Lab-scale)의 3-layer PZT 소자가 부착된 multi-layer 압전 구조의 발전 성능을 평가하기 위하여 그림 3에서 보이는 바와 같이 가장 일반적으로 적용되는 직사각형 형상의 PZT 기반 캔틸레버 하비스터와 본 연구에서 진동 특성을 검토한 후 개발한 부채꼴 형상의 PZT 기반 캔틸레버 하비스터를 제작하였다. PZT는 3개 층(layer)으로 적층되어 있으며 캔틸레버 기저판에 단면 혹은 양면으로 부착될 수 있다. PZT의 정전용량은 1302 nF (at Frequency 1kHz, Test Signal level 1V, Parallel Circuit Mode)이며, 크기는 40mm × 50mm × 0.35mm이다. PZT가 부착된 기저판(substrate)은 SUS 430 재료가 적용되었다.



[그림 3] Multi-layer PZT 에너지 하비스터 타입
[Fig. 3] Types of multi-layer PZT energy harvester

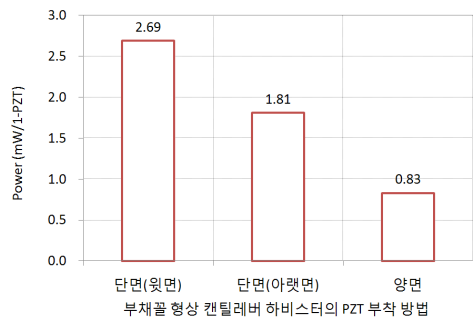
직사각형 형상의 압전 하비스터는 진동 특성 검토 없이 임의 스케일로 제작하였으며, 현 수준 압전 하비스터로 고려하였다. 구성된 직사각형 압전 하비스터의 현 수준 성능 평가를 위해 적용한 실험 변수는 캔틸레버 기저판의 고정단부에서 PZT 압전소자 부착지점(좌측 끝단)까지의 거리(0mm, 2mm, 5mm, 10mm) 및 캔틸레버 기저판의 두께(0.4mm, 0.8mm)이다. 고정단 부위에 PZT를 부착한 이유는 휨응력 및 변형이 집중되는 부위로서 D31모드의 변형량이 증가되어 발전 효율이 높은 지점이기 때문이다. 또한 기저판의 휨강성이 발전 성능 측면에 미치는 영향을 평가하기 위해 캔틸레버 기저판 두께를 시험변수로 고려하였다. 반면, 부채꼴 형상의 압전 하비스터는 PZT의 부착 개수를 증가시키고, D31 휨 변형모드를 증폭시키기 위하여 기저판에 동적 특성을 튜닝하기 위한 홀을 도입한 후, 3절의 유한요소 고유진동 해석을 수행한 후 안정적인 동특성을 갖는 구조로 제작하였다. 구성된 부채꼴 형상의 압전 하비스터의 발전 성능 평가를 위한 실험 변수로는 PZT 압전소자의 부착 특징(단면, 양면)과 PZT 압전소자의 부착 면적(1-PZT, 8-PZT)을 고려하였다. 부착 면적을 실험 변수로 고려한 이유는 가장 용이하게 발전 성능을 증폭시킬 수 있는 방법이기 때문으로 실험 변수로 고려한 PZT 면적 증가에 따른 발전 성능 증폭의 가능성을 검토하기 위함이다.

직사각형 형상의 압전 하비스터의 현 발전수준 평가결과, 그림 4에서 보는 바와 같이 캔틸레버 기저판의 고정단부에서 PZT 압전소자 부착지점까지의 거리가 2mm이고 캔틸레버 기저판의 두께가 0.4mm인 하비스터에서 출력력이 가장 높게 나타나고 있다. 그 이유는 PZT 소자가 고정판에 가깝고, SUS 기저판의 두께가 얇을수록 휨 응력과 D31모드의 변형이 크게 발생하기 때문이다. 그러나 3-layer PZT의 발전성능이 0.04mW에 불과하여 이 캔틸레버 구조를 W급 용량의 도시·주택 분야 활용처에 직접 적용하는 것은 불가능할 것으로 판단된다.

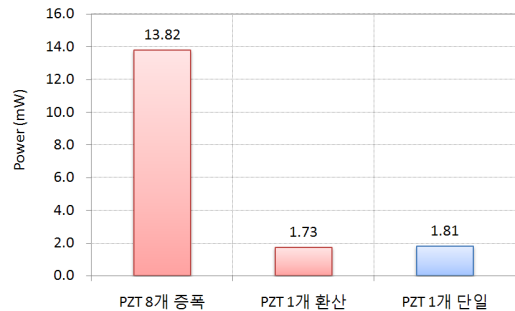


[그림 4] 직사각형 형상 하비스터의 성능 평가 결과
 [Fig. 4] Performance of Power Generation of rectangular-type harvester

반면, 동특성을 검토하여 제작한 부채꼴 형상의 압전 캔틸레버 하비스터의 성능 평가 결과, 그림 5와 같이 PZT를 기저판 윗면에 단면으로 부착한 경우가 2.69mW/1-PZT로 평가되었고, PZT를 기저판 아랫면에 단면 부착한 경우가 1.81mW/1-PZT, PZT를 기저판 윗면과 아랫면에 양면 부착한 경우가 0.83mW/1-PZT로 평가되었다. PZT 윗면 부착의 경우가 아랫면 부착에 비해 효율이 좋게 나타났으며 PZT 단면 부착이 양면 부착에 비해 효율이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 양면 부착이 효율이 떨어지는 이유는 양면 부착으로 인해 기판 강성이 증가하였고, 이로 인해 하비스터 동특성 구조가 변했기 때문이다. 특히, 양면 부착이 단면 부착에 비해 평가시 인가되는 진동의 가속도 레벨에 덜 민감하기 때문이다.



[그림 5] 부채꼴 형상 하비스터의 성능 평가 결과
 [Fig. 5] Performance of Power Generation of fan-type harvester



[그림 6] PZT 부착 면적 증가에 따른 증폭 효과
 [Fig. 6] Power amplification effect according to the number of PZT area

한편, PZT를 기판의 아랫면에 1개 부착하는 단일 캔틸레버 하비스터와 PZT 1개씩을 동일하게 아랫면에 부착한 후 8개의 캔틸레버 하비스터를 병렬로 연결한 면적을 증가시킨 하비스터의 발전 성능 평가결과, 그림 6에서 보는 바와 같이 PZT 1개를 연결한 하비스터의 경우 1.81mW의 출력을 보였고, PZT 8개를 부착한 하비스터

의 경우가 13.82mW의 출력을 나타내어 1-PZT로 환산할 때, 1.73mW/1-PZT의 성능을 보임으로써 면적증가에 의한 이론적 증폭효과가 큰 손실없이 구현되는 것으로 평가되었다.

5. 결론

본 논문에서는 도시·주택 적용 미관용 에너지 블록에 적용되는 에너지하비스팅 기술의 기본 개념 및 이론을 간략히 고찰하였고, 유한요소 진동해석을 통해 부채꼴 형상의 PZT 기반 에너지 하베스터를 검토하였다. 또한, PZT 기반 직사각형 형상의 하비스터와 부채꼴 형상의 하비스터의 발전 성능을 평가하였다. 평가 결과, 동특성을 고려하지 않고 임의로 제작한 직사각형 형상 하비스터의 현 수준 발전 성능은 0.04mW에 불과하였던 반면 유한요소 진동해석을 통해 진동 특성을 튜닝하여 제작한 부채꼴 형상의 하비스터의 발전 성능은 0.83~2.69mW로 매우 높게 나타났다.

한편, 부채꼴 형상의 하비스터의 경우는 PZT 윗면 부착의 경우가 아랫면 부착에 비해 효율이 좋게 나타났으며 PZT 단면 부착이 양면 부착에 비해 효율이 높게 나타났다. 이는 PZT 양면 부착으로 인해 기판의 강성이 증가하여 인가되는 진동의 가속도 레벨이 하비스터에 큰 영향을 주지 못하는 구조로 변했기 때문인 것으로 사료된다.

향후, 부채꼴 형상의 PZT 기반 에너지 하비스팅 블록은 도시·주택 분야의 조명등, 미관용 에너지 징검다리, 센서 자가 충전 모듈 등으로 적용이 가능할 것이다. 그러나 이러한 에너지 하비스팅 블록을 조기에 상용화하기 위해서는 제작 단가와 발전 성능을 합리적으로 절충한 에너지 블록의 구조 개발에 초점을 맞추어야 한다. 또한, 배터리 충전 및 관리 기술과 같은 시스템 기술과 융합의 필요성도 제기된다. 마지막으로, 에너지 하비스팅 기술을 도시·주택 분야에 활발히 적용하기 위해서는 중·소용량의 덜 안정적인 전력으로도 충분히 운용이 가능한 활용처를 발굴하는 노력이 필요하다.

References

[1] S.-W. Kim, "Development of Energy Harvesting Device based on Piezoelectric Semiconductor Nanomaterials", Energy Harvesting Seminar, Korea Green Energy Show 2011.

[2] M.-H. Noh, et al., "Development of Vibration-based Hybrid Energy Harvesting Prototype for Bridges", Final Report, RIST, 2012

[3] Jong-Hu Beak, "The Study of Automatic Power Generation System using Piezoelectric Ceramics", Final Report, Ministry of Commerce, Industry and Energy, 2006.

[4] B.-D. Youn, "Energy Harvesting Industry Trends and Prospects", Energy Harvesting Seminar, Korea Green Energy Show 2011.

[5] W.-Y. Lee, "The Research Trend on Nanotechnology-based Ultra-high-efficiency Thermoelectric Devices", Energy Harvesting Seminar, Korea Green Energy Show 2011.

[6] S.-H. Jeong, "Potential Applications of Thin Film Battery with Hybridization of Energy Harvesting Devices", Energy Harvesting Seminar, Korea Green Energy Show 2011.

[7] J.-S. Kim, "Thermoelectric Power Generation Technology-Overview and Applications", Energy Harvesting Seminar, Korea Green Energy Show 2011.

[8] S.-K. Lee, "The Technical Issues for PEH and Energy Management/Storage", Energy Harvesting Seminar, Korea Green Energy Show 2011.

[9] T.-Y. Yoon, "Sustainable Green Road Pursuing the Growth and Environment" KICT Brand Series, KICT, 2010.

[10] ABAQUS, ABAQUS/CAE user's manual, version 6.7, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., Pawtucket, R.I., 2007.

[11] Peter Harrop, Raghu Das, "Energy Harvesting and Storage for Electronic Devices 2009-2019", IDTechEx report (www.IDTechEx.com), 2008.

[12] Shashank Priya, Daniel J. Inman, "Energy Harvesting Technologies", Springer, 2009.

[13] Tom J. Kazmierski, Steve Beeby, "Energy Harvesting Systems - Principles, Modeling and Applications", Springer, 2011.

노 명 현(Myung-Hyun Noh)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : 한양대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 2005년 2월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2005년 3월 ~ 2009년 8월 : 한양대학교 산업과학연구소 연구원
- 2009년 9월 ~ 2009년 11월 : 포항산업과학연구원 강구조연구소 연구원
- 2009년 11월 ~ 현재 : 포항산업과학연구원 에너지인프라연구본부 선임연구원

<관심분야>

구조 및 재료역학, 에너지 수확기법

이 상 열(Sang-Youl Lee)

[정회원]



- 1997년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : 서울시립대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2002년 8월 ~ 2004년 1월 : 미국 메사추세츠 공과대학(MIT) 토목환경공학과 Post-doc.
- 2005년 4월 ~ 2006년 6월 : 스페인 국립 Granada 대학교 구조공학과 연구교수
- 2006년 7월 ~ 2009년 1월 : 한양대학교 건설환경공학과 BK 계약교수
- 2011년 3월 ~ 현재 : 안동대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

복합재료 구조공학, 전산구조역학