

KAIST 건설 및 환경공학과 구조제어 및 지능시스템 연구실

정 형 조
(KAIST 건설 및 환경공학과)

1. 머리말

KAIST 건설 및 환경공학과 구조제어 및 지능시스템 연구실은 필자가 세종대학교에서 KAIST로 학교를 옮긴 2007년 1월 설립되어 한 달 후면 설립된 지 만 10년이 된다. 현재 우리 연구실에서는 박사후연구원 2명, 박사과정 7명, 석사과정 4명 등 총 13명의 연구원이 각 분야에서 다양한 연구를 수행하고 있다.

구조제어 및 지능시스템 연구실은 교량이나 건물과 같은 사회기반시설을 지능화시킴으로써 자연재해(지진, 강풍 등) 및 인적재난(휴먼에러, 부실 시공/유지관리 등)으로부터 안전한 사회를 만들어 국민의 삶의 질을 높이는 것을 비전으로 삼고 있다. 이러한 비전을 성공적으로 달성하기 위하여 혁신적인 스마트구조 기술을 개발하고 이를 사회기반시설에 적용하는 연구를 주요하게 수행하고 있다. 특히, MR 유체/엘라스토머와 같은 스마트 재료 기반의 스마트 진동제어 시스템 및 바람이나 진동을 활용한 전자기유도/압전 방식의 고효율 에너지하베스팅 시스템 개발에 역량을 모아 왔다. 또한, 무선 센서 네트워크, 압전 센서/액추에이터와 같은 첨단 계측/구동 기술을 사회기반시설에 응용하는 연구도 진행 중이다. 우리 연구실에서는 연구를 보다 효율적으로 수행하기 위하여 기계공학, 전기 및 전자공학과 같은 다양한 공학 분야의 국내 ·

* E-mail : hjung@kaist.ac.kr

외 연구진들과 공동 연구를 수행하고 있다. 이 글에서는 KAIST 구조제어 및 지능시스템 연구실에서 수행하고 있는 다양한 연구내용에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

2. 주요 연구분야

교량, 건물, 파이프라인 등과 같은 주요 사회 기반시설의 노후화에 따라서 구조물에 대한 안전성 및 건전도를 감시하고 평가하는 기술에 대한 중요성이 크게 대두되고 있다. 이러한 내용은 미국공학한림원이 선정한 '공학분야 12가지 주요 도전' 주제에 포함된 바 있다. 또한, 2011년 발생한 동일본대지진에 의한 후쿠시마 원전 문제에서 볼 수 있듯이 주요 사회기반시설의 재해/재난에 대한 안전성 향상 문제 또한 매우 시급히 해결해야 할 난제이다. 위와 같은 여러 문제들은 건전도 모니터링 기술이나 구조제어 기술 등을 통해 해결 가능하며, 우리 연구실의 주요 연구분야이기도 하다. 또한 최근 들어 무선센서를 이용한 건전도 모니터링 기술이 주목을 받고 있으나 이 기술이 완벽하게 개발되기 위해서는 무선센서의 전원 공급 문제가 선결되어야 하는데, 이 문제를 에

너지하베스팅 시스템의 성능 향상 및 관련 혁신 기술 개발을 통해 해결하려는 노력도 병행하고 있다.

다음은 우리 연구실에서 수행했거나 수행하고 있는 연구내용을 세 개의 주요 분야로 분류하여 간단하게 정리한 내용이다.

2.1 구조제어 분야

구조제어 및 지능시스템 연구실에서는 설립 초기부터 스마트재료 기반의 혁신적인 구조제어 시스템을 제안하고 이에 대한 성능을 검증해왔다. 특히, 많은 시간을 MR 유체나 MR 엘라스토머를 기반으로 하는 스마트 제어장치를 개발하는 데 사용하였다. 먼저 대용량 MR 유체 댐퍼를 이용한 반능동제어(semi-active control) 시스템을 구축한 후 이를 활용한 사회기반시설의 내진 및 내풍 대책을 수립하였다. 또한, 기존 반능동제어 시스템의 한계 및 제한사항을 극복하기 위하여 MR 유체 댐퍼에 전자기유도부를 결합한 새로운 형태의 스마트 제어장치를 개발하였으며, 교량, 건물, 사장케이블과 같은 대형 사회기반시설에 대한 적용가능성을 수치적인 방법과 실험을 통해서 확인하였다(그림 1, 2 참조).

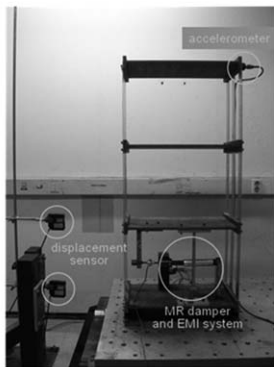


그림 1 MR 유체 댐퍼와 전자기유도부가 결합된 스마트 진동제어 장치

면진(또는 지진격리) 시스템은 사회기반시설의 대표적인 내진 대책 중 하나이다. 면진 시스템의 성능을 향상시키기 위해(주로 상부 구조물의 과도한 변위를 저감시키기 위해) 수동형 면진장치에 MR 유체 댐퍼를 함께 사용하는 방식이 개발되었다. 하지만, MR 유체 대신에 MR 엘라스토머를 활용한다면 같은 기능을 하면서도 훨씬 단순한 제진 시스템 구성이 가능하다. 얇은 강판과 MR 엘라스토머를 적층하여 만들어지는 MR 엘라스토머 면진장

치는 자기장 변화에 따라 강성을 바꿀 수 있기 때문에 매우 효과적으로 상부구조물을 지진으로부터 보호할 수 있다(그림 3 참조).

우리 연구실에서는 이외에도 매우 다양한 구조제어 연구를 수행해왔다. 그 중 일부를 그림 4에 나타내었다: 공기스프링과 압전가력기로 구성된 복합형마운트시스템을 이용하여 방진테이블의 미진동을 저감시키는 연구(그림 4a); 적응성과 강인성이 뛰어난 시간지연제어기법을 이용한 건물의 진동제어 연구



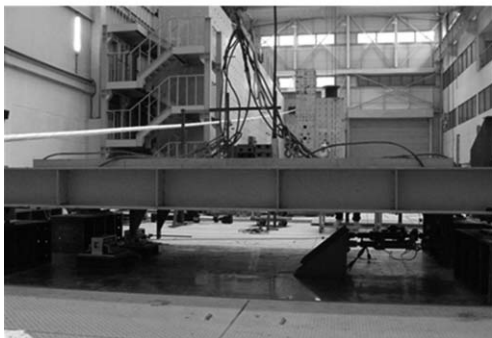
(a) 3층 축소건물모형



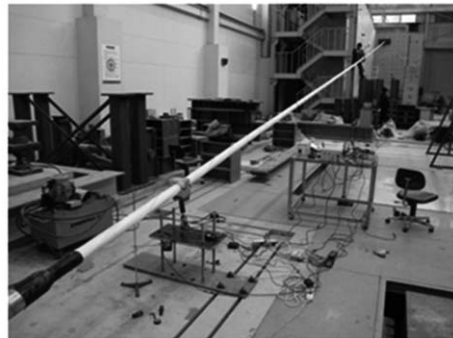
(b) 6층 축소건물모형



(c) 5층 실규모 테스트모형



(d) 축소교량 모형



(e) 사장케이블 모형

그림 2 다양한 대상 구조물을 활용한 스마트 진동제어 장치에 대한 성능 검증

⇒ ⇒ ⇒ 국내연구실 소개

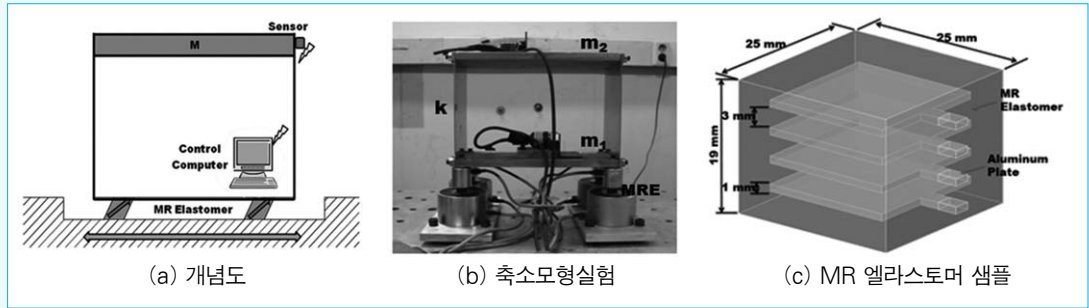


그림 3 MR 엘라스토머를 활용한 면진시스템

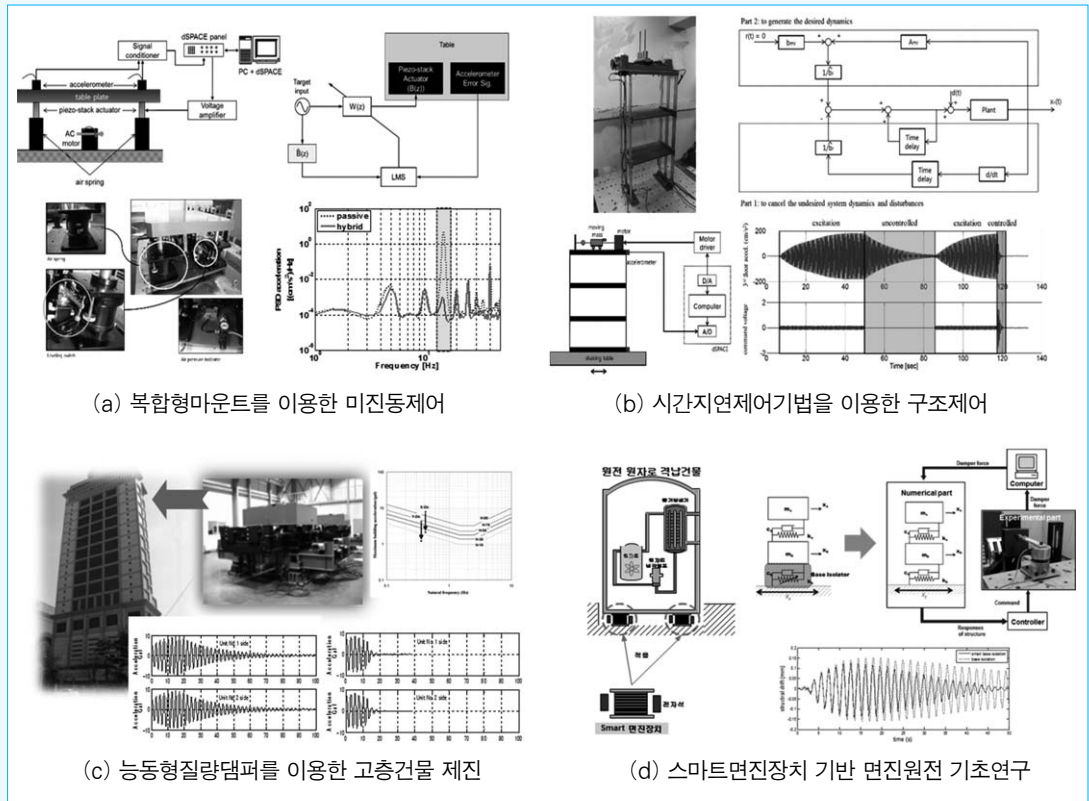


그림 4 우리 연구실에서 수행한 다양한 구조제어 관련 연구 사례

(그림 4b); 공용중인 고층건물의 사용성을 향상시키기 위한 능동제어기법 실적용 연구(그

림 4c); 원전구조물의 내진성능 향상을 위한 스마트면진시스템 기초 연구(그림 4d).

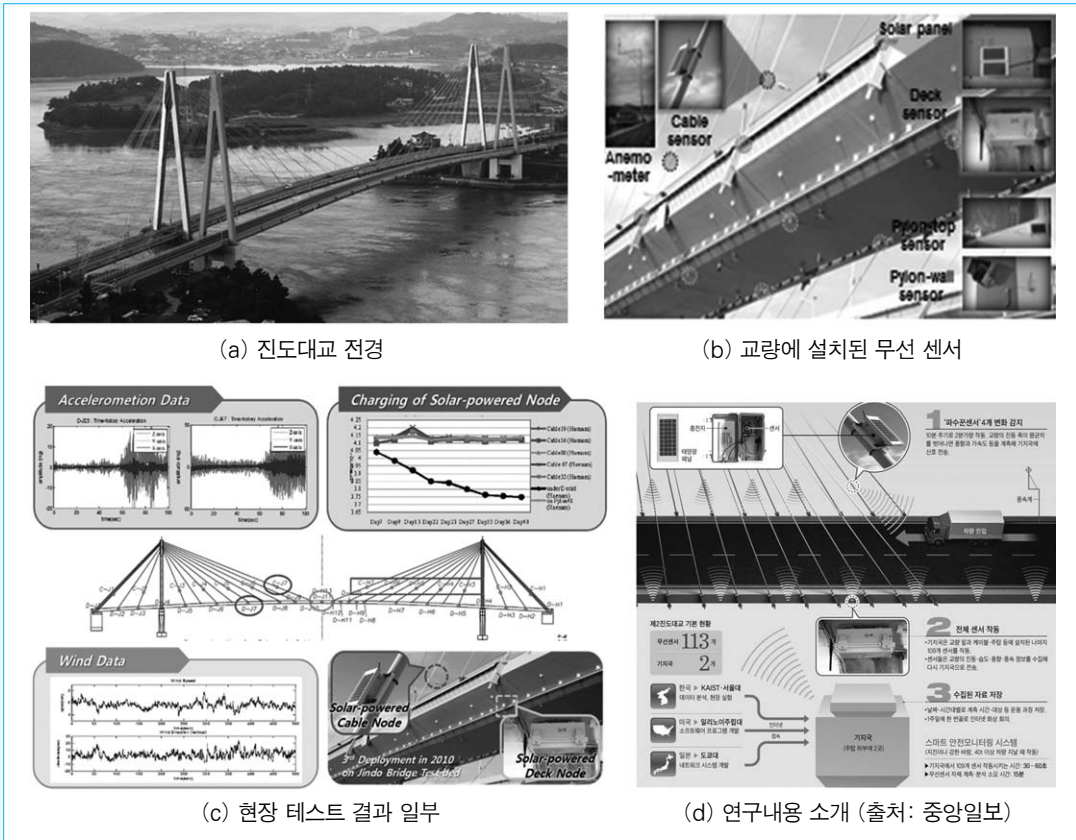


그림 5 스마트 무선센서 기반 사장교 건전도 모니터링 시스템

2.2 구조물 건전도 모니터링 분야

우리 연구실에서는 세계최고 수준의 스마트 무선센서 기반 사장교 건전도 모니터링 시스템을 국제공동연구를 통해 개발하고 실제 공용 중인 교량에서 개발한 시스템의 성능을 검증하였다. 이를 위해 필자는 한국연구재단에서 시행하는 글로벌연구네트워크(GRN) 사업의 책임을 맡아서 서울대와 함께 미국 UIUC, 일본 동경대학교 등과 국제공동연구를 수행하였다. 연구를 통해 신뢰성 높은 교량 거동

데이터 획득, 자율적인 모니터링 시스템 운영 전략 수립 및 검증, 장기간 운영에 필수적이고 효율적인 전원관리를 위한 소프트웨어 개발 등의 성과를 얻을 수 있었다(그림 5 참조).

사회기반시설이 노후화됨에 따라 이에 대한 정확한 상태 평가 및 확실한 유지관리가 요구되고 있으며, 우리 연구실에서는 다양한 방법을 통해 구조물의 상태 평가 및 손상 추정을 보다 정확하고 확실하게 수행하기 위해 노력해왔다. 먼저, 구조물의 동특성으로부터 구성되

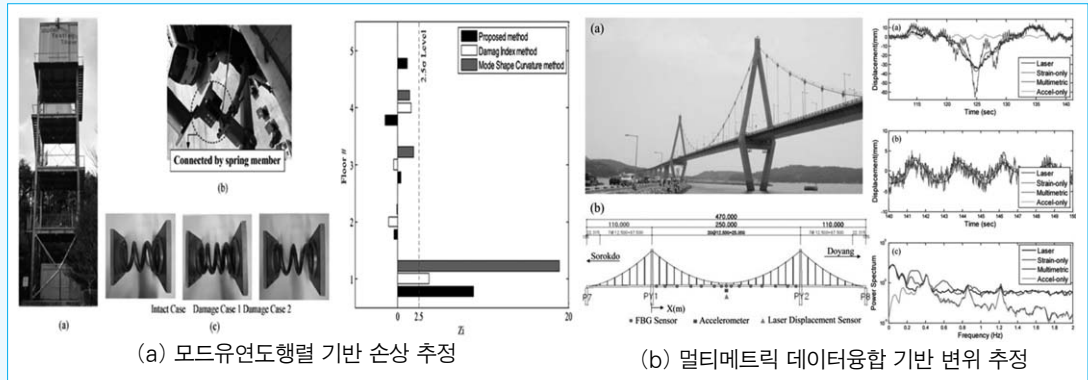


그림 6 구조물 손상 및 거동 추정 기법 연구

는 모드유연도행렬 기반의 손상 추정 기법들을 개발하고, 이 방법들이 단일 손상의 경우뿐만 아니라 다중 손상의 경우에도 정확하게 손상을 추정할 있음을 수치해석 및 소규모/실규모 실험을 통해 검증하였다(그림 6a 참조). 또한, 구조물의 안전성에 가장 직접적이고 중요한 정보인 변위를 정확하게 추정하기 위해 가속도와 변형률을 융합한 멀티메트릭 데이터융합 기반 변위 추정 기법을 제안하고 다양한 실험을 통해 성능을 검증하였다(그림 6b 참조).

구조물의 효율적인 유지관리를 위해서 내하력 평가를 포함한 다양한 평가 기법들이 사용되고 있으며, 이를 위해서는 구조물의 정확한 해석모델이 필요한 경우가 있다. 공용 중인 구조물의 거동을 제대로 모사하는 해석모델을 구축하기 위해서는 모델 업데이트 기법이 사용되는데 우리 연구실에서는 정확성과 해석시간에서 장점을 갖는 대체모델 기반의 모델 업데이트 기법을 개발하였고 수치해석과 실험실 및 현장시험을 통해 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 이외에도 계측 자료를 이용한

수치해석 모델의 신뢰성을 향상하고 이를 활용하는 연구를 수행하였으며, 이를 위해 패턴인식을 이용한 실시간 이상상태 모니터링 기술과 계측된 자료 및 수치해석 모델을 이용하여 예측 모델을 구축하는 베이지안 추론을 활용하여 최종적으로 구축된 예측 모델의 불확실성을 고려하여 의사결정에 활용하는 연구를 수행한 바 있다.

최근에는 드론과 같은 무인체를 활용하여 교량구조물의 상태를 신속진단하고 평가하는 기술을 개발하는 연구를 타 대학, 정부출연연구소, 기업체와 컨소시엄을 구성하여 진행하고 있으며, 우리 연구실은 이중 영상 데이터를 융합하여 강교량의 외관상태 검사가 가능한 비접촉식 무인검사장비를 개발하는 부분을 담당하고 있다.

2.3 진동과 바람을 활용한 에너지 하베스팅 연구

2000년대 후반부터 우리 연구실에서는 주변에서 미활용되고 버려지는 에너지를 모아 유용한 형태(주로 전기)로 바꾸주는 에너지 하

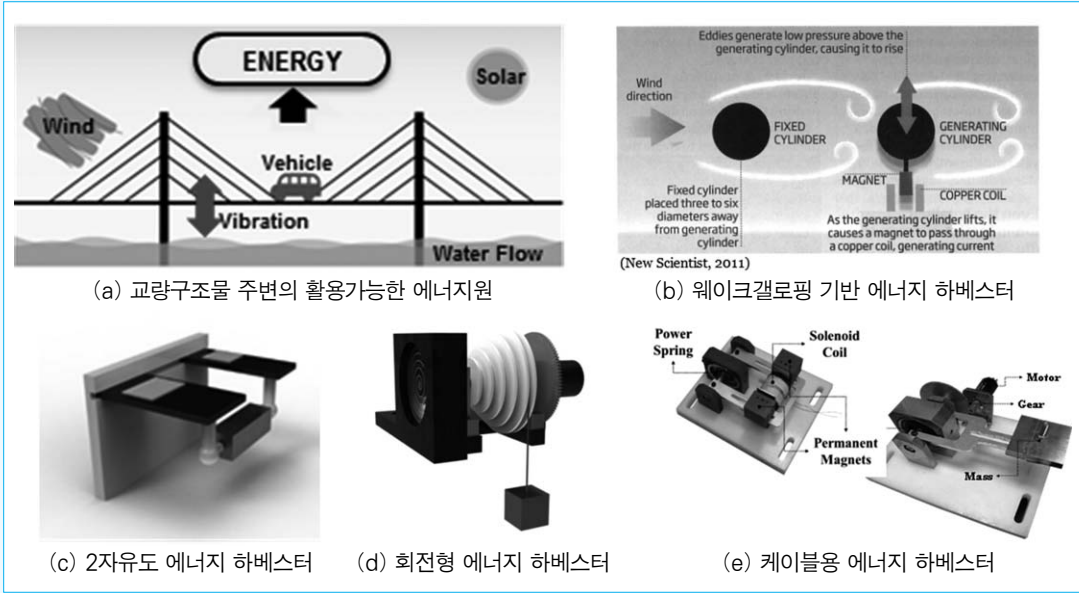


그림 7 고성능 에너지 하베스팅 시스템 개발 연구 사례

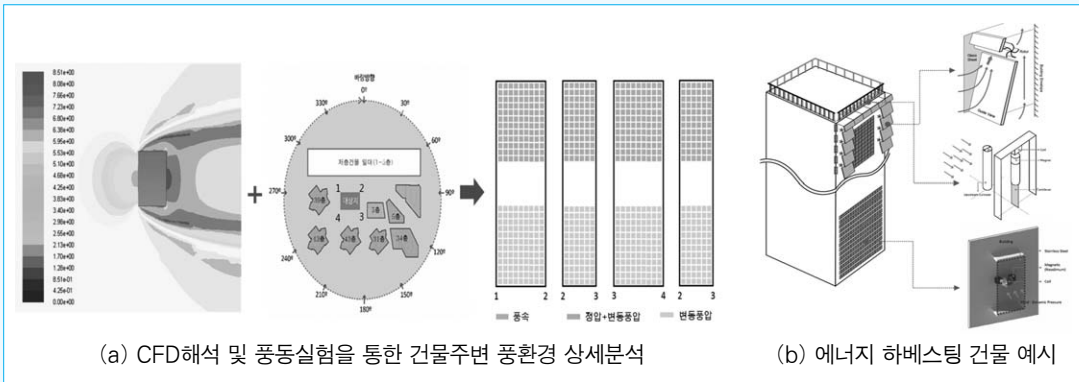


그림 8 에너지 생산형 사회기반시설에 대한 핵심 기반기술 연구 사례

베스팅에 대한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 특히, 교량이나 고층건물과 같은 사회기반 시설 주변에 존재하는 미활용 에너지(바람, 구조물 진동 등)가 주요 관심사이다. 일차적으로 기존 에너지 하베스팅 시스템의 한계를

극복하고 성능을 향상시키기 위해, 혁신적인 아이디어(웨이크궤로핑 현상, 다자유도 진동체 등)를 도입한 새로운 개념의 고성능 에너지 하베스팅 시스템을 다수 제안하고, 그 성능을 해석적·수치적·실험적으로 검증하였다

(그림 7 참조). 이러한 에너지 하베스팅 시스템 개발의 기본적인 목표는 무선센서와 같이 매우 작은 전력을 필요로 하는 전자장치의 전력원으로 활용하는 것이다.

최근 들어, 소규모 전기를 수확할 수 있는 개별 장치 개발뿐만 아니라, 다양한 용도로 활용 가능한 수준의 전기를 확보할 수 있는지를 검토하는 연구를 수행하고 있다. 즉, 개별 장치를 모듈화하거나 조합하여 상당한 수준의 전력을 확보하는 방안, 이러한 시스템을 건물이나 교량과 같은 사회기반시설에 적절히 설치하는 방안, 그리고 빌딩에너지 시뮬레이션 등을 이용한 전력생산량 추정하는 연구 등을 수행하고 있다. 이러한 일련의 연구를 통해, 우리 연구실에서는 도시공간에 존재하는 미활용에너지를 최적으로 활용할 수 있는 에너지 생산형 사회기반시설에 대한 핵심 기반기술을 확보하고자 한다(그림 8 참조).

이외에도, 그라핀을 활용하여 열전 에너지 하베스팅 시스템의 효율을 향상시키는 연구, 낮은 주파수와 큰 진폭을 갖는 파력에너지를 활용하기 위한 가변강성시스템이 적용된 요요 진동 에너지 하베스터 개발 등 에너지 하베스팅과 관련된 다양한 연구를 수행한 바 있다.

2.4 기타 연구 분야

우리 연구실에서는 위에서 소개된 세 가지 주요 연구분야 이외에도 구조진동 또는 구조동역학과 관련된 많은 연구를 수행하고 있다.

지면관계 상 그 중 두 가지만 간략히 소개하면 다음과 같다.

- 면진구조물 지진취약도 평가: 추계론적 응답분포 데이터베이스 개념을 새로 제안하고, 이를 활용하여 면진구조물의 지진취약도를 효과적으로 계산하는 방법을 제시하였다. 또한, 지진재해도와 지진취약도를 함께 고려하여 면진 원전의 확률론적 리스크 평가를 수행하였다.

- 송전선의 갯로핑 사고확률 예측: 로지스틱회귀분석과 같은 통계적분석 기법을 이용하여 갯로핑 현상에 의해 야기되는 송전선 사고 확률을 예측하는 기법을 개발하였다. 여기에서 사고 발생 송전선의 정확한 기상 정보 추정을 위해 크리깅을 포함한 다양한 보간법을 고려하여 연구를 수행하였다.

3. 맺음말

KAIST 구조제어 및 지능시스템 연구실은 지난 10년간 교량이나 건물과 같은 대형 구조물 진동 제어 및 건전도 모니터링 분야에서 활발히 연구를 수행해 왔다. 또한, 스마트구조기술을 사회기반시설에 접목하여 구조물을 지능화함으로써 사회를 보다 안전하게 만들고자 노력 중이다. 앞으로도 기계, 전기전자, IT 분야들과의 융복합 연구를 통해 사회기반시설의 진동 관련 문제를 해결하는 데 앞장 서 나갈 것이다. **KSHVE**