

해상풍력발전시스템의 구조 건전성 및 상태  
모니터링 기술개발을 위한 예비 기획연구

2009. 7.

한 국 해 양 연 구 원

해상풍력발전시스템의 구조 건전성 및 상태  
모니터링 기술개발을 위한 예비 기획연구

2009. 7.

한 국 해 양 연 구 원

# 제 출 문

한국해양연구원장 귀하

본 보고서를 한국해양연구원 기본연구사업(정책지원사업)으로 지난 2008년 9월부터 2009년 7월까지 수행한 “해상풍력발전시스템의 구조 건전성 및 상태 모니터링 기술개발”의 최종보고서로 제출합니다.

2009년 7월

연구기관명 : 한국해양연구원

연구책임자 : 이진학

# 목 차

## Chapter 1. 기획연구

1. 추진 필요성 및 목적 .....	1
1.1. 추진 필요성 .....	1
1.2. 목적 .....	5
2. 국내외 연구개발 동향·분석 .....	7
2.1. 관련 연구/기술의 국내외 동향 .....	7
2.2. 관련기술의 시장규모 및 적용가능 분야 .....	11
2.3. 국내 연구개발 현황 및 능력분석 .....	15
2.4. 선진국 수준과의 비교 .....	16
3. 연구개발 목표 .....	18
3.1. 최종목표 .....	18
3.2. 단계별 연구 목표 .....	18
4. 연구내용 및 범위 .....	20
4.1. 단계별 수행 연구 개발 과제 .....	20
4.2. 연구대상기술의 개발 가능성 .....	22
4.3. 기술개발 및 시장점유 가능성 .....	22
5. 연구개발 추진전략 및 체계 .....	24
5.1. 기본방안 .....	24
5.2. 추진전략 .....	24
5.3. 연구개발 추진일정 .....	26
6. 기대성과 및 활용방안 .....	27
6.1. 기대성과 .....	27
6.2. 활용방안 .....	27
7. 결론 및 정책적 시사점 .....	28
7.1. 결론 .....	28
7.2. 정책적 시사점 .....	28
8. 소요예산 .....	29
9. 참고문헌 .....	30

## Chapter 2. 연구논문성과

## Chapter 1. 기획연구

해상풍력발전시스템의 구조 건전성 및 상태  
모니터링 기술개발을 위한 예비 기획연구

# 1. 추진 필요성 및 목적

## 1.1. 추진 필요성

### 추진 필요성

- 2030년 이후 신재생에너지 분야에서 가장 큰 전력생산을 담당할 것으로 예상되는 해상풍력발전시스템의 유지관리를 위하여 기존의 운전상태에 대한 모니터링 외에 Tower 및 기초 등 지지구조물의 구조적 건전성 모니터링에 대한 연구 필요성이 대두되고 있음
- 특히 해상풍력발전시스템은 육상에서 관리되는 여타의 시설물과는 달리 유지관리가 매우 어려우므로 사용성 및 안전성 확보를 위하여 원격 모니터링 시스템을 구축할 필요가 있으며, 이를 통하여 발전시스템의 경제성을 극대화 시킬 수 있음
- 또한 사회·문화적으로도 해상풍력발전시스템에 대한 기대가 매우 큰 현재의 상황에서 시스템의 사용성 및 안전성 확보는 매우 중요한 과제가 되며, 이를 위하여 상태 및 건전성 모니터링 시스템이 매우 중요함

### □ 기술적 관점에서의 추진 필요성

- 해상풍력발전시스템(Offshore Wind Energy Plants, OWEP)은 기존의 육상풍력 발전 시설에 비하여 발전효율이 높고, 환경문제가 작게 발생하는 장점이 있는 반면, 정기 점검 및 유지관리 비용이 크게 증가하는 단점이 있음. 특히 해상풍력발전시스템의 경우 접근성이 매우 열악하며, 기상 악화 시에는 접근 자체가 불가능할 수 있으므로, 계측 시스템을 충분히 활용하여 구조적인 건전도 및 운전 상태를 원격으로 모니터링 함으로써 유지관리 비용을 절감시킬 필요가 있음.
- 기존 풍력발전시스템에 대한 모니터링은 주로 운전 상태를 모니터링하기 위한 CBM (condition-based monitoring)을 중심으로 연구가 수행되고 있으며, 이를 위하여 신호기반 모니터링(signal-based monitoring) 방법이 활용되고 있음. 그러나 이러한 방법은 정량적인 평가가 어려우며 또한 구조적인 건전도 평가를 위해서는 추가적인 연구가 필요한 상태임. 다음 그림 1과 같은 풍력발전시설의 구조적인 붕괴 또는 파

손을 미연에 방지하기 위해서는 구조 건전성 모니터링을 위한 기술이 필요함.



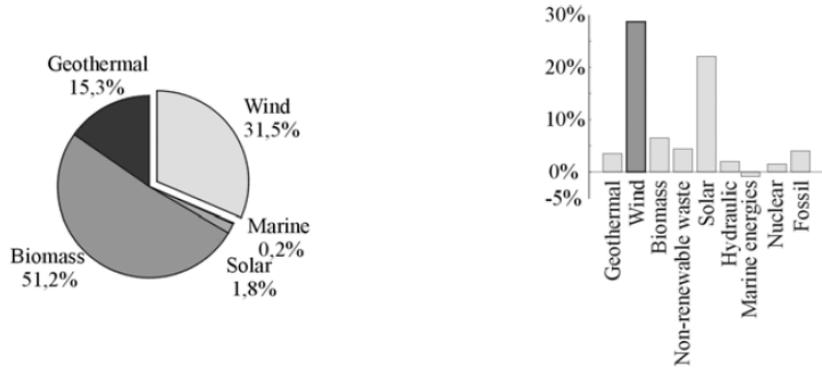
(a) 블레이드 화재 사고 (출처: jcwinnie.biz) (b) 타워 파손 사례 (출처: richarddows.co.uk)

그림 1. 풍력발전시설의 구조적 손상 사례

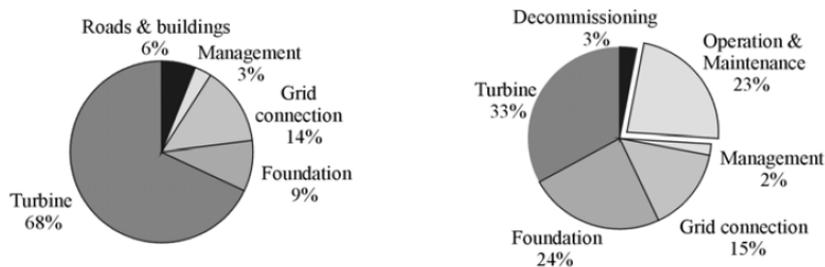
- 외국의 경우 이와 관련한 연구가 대형 콘소시움 형태로 정부의 지원을 받아 수행되고 있어 다양한 기술의 축적이 이루어지고 있으나 국내에서는 현재까지 지식경제부 등의 관련부처에서 해상풍력발전시스템 터빈 개발 및 시공 등에 관한 연구가 중심을 이루고 있음. 유지관리와 관련된 이슈는 현재까지는 부각되지 않았으나 풍력발전시설을 운영하면서 부각되고 있음. 따라서 유지관리와 관련된 기술에 대한 국산화가 이루어 지지 않을 경우 외국 기술의 도입 및 귀속이 우려됨.
- 한편 모니터링 시스템의 경우 시공단계에서부터 응답을 어느 정도 예측하여, 이를 고려한 설계 및 제작, 설치가 이루어져야 하며, 또한 해상시공의 특성을 충분히 파악하고 있어야 함. 즉, 육상시설에 대한 모니터링 시스템 계획과는 다른 기술적 문제가 발생할 수 있으며, 이를 해결하기 위한 기술적 연구가 필요함.

#### □ 경제, 산업적 측면에서의 추진 필요성

- 풍력발전은 신재생에너지 중 그 비중이 Biomass 다음으로 크며, 또한 최근 10년 동안 가장 크게 성장하고 있는 산업으로, 최근에는 발전효율을 높이기 위하여 해상에 건설하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있음(그림 2 참조). 그러나 해상풍력발전시스템은 육상풍력발전시스템에 비하여 기초 시공 비용 및 유지관리 비용이 크게 증가하는 문제가 있음(그림 3 참조).



(a) 신재생에너지 생산전력의 비율 (b) 1996-2006년 동안의 연평균 증가율  
그림 2. 풍력발전시스템의 중요성 (Observer, 2007)



(a) 육상풍력발전시스템의 비용 (b) 해상풍력발전시스템의 비용  
그림 3. 육상 및 해상풍력발전시스템의 비용 분석 (DUWIND, 2001)

- 따라서 기초 보강 및 시공비용을 줄이고, 유지관리 비용을 절감시키기 위한 노력이 반드시 필요함.
- 한편 발전 효율을 높이기 위하여 수심이 깊은 해상에 풍력발전시스템을 설치하는 경우, 설치 대상 지반이 대수심 조건의 연약지반일 가능성이 높고, 따라서 지반개량에 많은 비용이 소요됨. 따라서 새로운 공법에 의하여 지반을 개량하거나 시공방법을 개선할 필요가 있음. 다만 새로운 공법을 적용하는 경우에는 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring)에 의한 이상 거동 (abnormal behavior) 발생 시 신속한 대처가 필요함. 이러한 관점에서 볼 때 모니터링 시스템은 전체 해상풍력발전시스템 건설비용을 절감시킬 수 있고, 유지관리의 효율성을 높여 전체 비용을 줄일 수 있는 대안이 됨.
- 다음 그림 4는 풍력발전시스템에 있어서 빈번하게 발생하는 손상과 그에 따른 지연시간(downtime)을 비교한 것으로, 이로부터 가장 빈번하게 손상 또는 고장이 발생하는 곳은 전기관련 분야, 제어관련 분야 및 센서 등이며, Gearbox, Generator, Structure 등은 고장 및 손상이 자주 발생하지는 않지만 그에 따른 지연시간이 매우

심각함을 알 수 있음. 따라서 운영 상태에 대한 모니터링과 함께 구조적인 측면에서의 건전도 모니터링이 경제성 향상을 위하여 반드시 필요함을 알 수 있음.

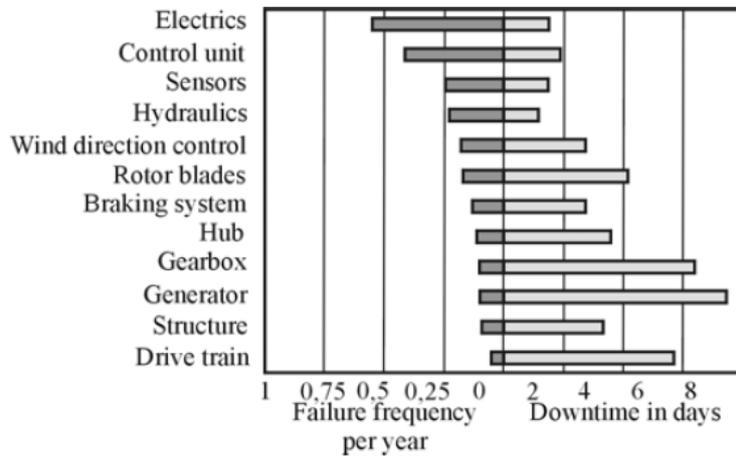


그림 4. 풍력발전시스템의 주요 구성품에 대한 손상 주기 및 지연시간 (REISI Database)

#### □ 사회, 문화적 측면에서의 추진 필요성

- 해상풍력발전시스템은 미국 캘리포니아주에 설치되어 있는 대단위 육상풍력발전시스템 단지에서 알 수 있듯이 그 지역의 랜드마크 역할을 하며, 또한 해당 국가의 과학기술 수준을 알릴 수 있는 시금석과 같은 역할을 하고 있음 (그림 5).
- 한편 교토의정서 발효 이후 지속적으로 증가하고 있는 CO2 저감에 대한 국제적인 압력에 대응하기 위한 노력의 일환으로도 상징성이 있어 사회 문화적으로 큰 역할을 하는 사회기반시설이라 할 수 있음.
- 향후 많은 관심과 투자가 계획되어 있는 인공해상도시 등의 건설 시 에너지 자생도시 개발을 위하여 해상풍력발전시스템 등이 신중히 고려되고 있으므로 앞으로도 이러한 시설의 사회 문화적인 가치는 지속적으로 상승할 것으로 예상할 수 있으며, 이러한 시설을 안전하고 경제적으로 유지관리 하도록 하는데 큰 기여를 하는 구조 건전성 및 상태 모니터링 시스템 개발이 필요함.



(a) 육상풍력 대규모 단지 (연합뉴스 2004)

(b) 해상풍력 조감도 (조선일보 2006)

그림 5. 육상풍력발전시스템과 해상풍력발전시스템의 대규모 개발

## 1.2. 목적

### 목적

- 해상풍력발전시스템의 운전 상태 모니터링을 통하여 발전 시 고장에 의한 지연시간(Downtime)을 감소시키고, 발전량을 극대화함으로써 신재생에너지 분야에서의 경쟁력 강화 및 보급 확대에 기여
- 해상풍력발전시스템의 원격 상태 및 건전도 모니터링을 통하여 해상에 위치한 발전시스템의 사용성 및 안전성을 확보하고, 전체 생애주기비용(LCC, Life Cycle Cost)을 경감시킴으로써 해상풍력발전의 경제성을 극대화하는데 기여
- 해상풍력발전시스템의 부품 고장 시 지연시간 감소 및 발전량 극대화에 기여
  - 해상풍력발전시스템은 지속적인 풍하중에 노출되어 있으며, 또한 기계적으로는 터빈 블레이드, 증속기 및 발전기 등의 주요 부품이 끊임없는 동적 하중에 노출되어 있음. 따라서 피로 하중의 증가 및 베어링 마모 등으로 인하여 잦은 고장이 발생하는 단점이 있음.
  - 그림 4에서 기 제시한 바와 같이 이러한 부품의 상태에 이상이 발생함으로써 유발

되는 지연시간이 크며 따라서 이러한 부품의 이상을 조기에 발견하여 경보함으로써 부품 고장으로 인한 지연시간을 감소시키고 발전시간을 증가시킴으로써 전체 발전량을 극대화 하는데 기여할 수 있음

□ 원격 모니터링을 통한 해상풍력발전시스템의 사용성 및 안전성 확보, 전체 경제성 극대화에 기여

- 해상풍력발전시스템은 바람의 품질이 우수한 비교적 육지로부터 멀리 떨어진 해역에 설치되는 경향이 크며, 따라서 관리인력이 상주하기 매우 어려운 상황임. 따라서 유지관리를 위해 원격 모니터링을 실시함으로써 해상풍력발전시스템의 사용성 및 안전성을 확보하고, 부품 및 구조체에 있어서의 지연시간을 크게 하는 고장 및 손상을 조기에 발견하여 경보함으로써 효율적인 유지관리가 가능하도록 할 수 있음.
- 따라서 최종적으로는 효율적인 유지관리로 인하여 전체적인 LCC가 줄어드는 효과를 얻을 수 있음. 또한 보험료를 경감시킬 수 있는데 기여를 할 수 있음.

## 2. 국내외 연구개발 동향 · 분석

### 2.1. 관련 연구/기술의 국내외 동향

#### 국외 동향

- 외국의 경우에도 주로 상태 모니터링 (Condition Based Monitoring)에 대한 연구가 주로 수행되고 있음
- 유럽에서는 유럽연합 주도의 풍력발전시설에 대한 상태 모니터링에 관한 대형 프로젝트가 2000년대 초반부터 다양한 형태로 수행되고 있음
- 대표적인 프로젝트로는 IMO-WIND Project, CONMOW Project, WT-OMEGA Project, Offshore M&R Project, CleverFarm Project, SIMU-Wind Project 등이 있음

- 외국의 경우 주로 기계, 항공분야의 엔진 관련 상태 모니터링(Condition Based Monitoring, CBM) 기술에 관한 연구가 많이 수행된 바 있으며, 풍력발전시스템에 대해서도 주로 기계 및 전력계통의 구성요소 즉, Gearbox, Rotor, Converter 등에 대한 모니터링 관련 연구가 활발함.
- 그러나 기 제시한 그림 4에서와 같이 Tower 및 기초와 같은 구조체의 경우 손상이 자주 발생하지는 않으나 한 번 손상이 발생하면 지연시간이 길고, 특히 해상풍력발전시스템의 경우, 구조체에 손상이 발생할 시점에서 대처를 하는 것이 육상풍력발전시스템보다 더 중요함을 알 수 있음.
- 해상풍력발전시스템에 대한 전체적인 모니터링 시스템 구축을 위하여 IMO-WIND (Integrated Monitoring and Evaluation System for Offshore Wind Energy Plants) 프로젝트가 독일 Ministry of Economics의 지원으로 수행되고 있으며, 이 프로젝트에는 Multibrid, Offshore Wind Tech, micro-Sen, IGUS, Inofkom, GermanLoyd WInd의 6개 회사와 BAM과 Univ of Siegen의 2개 연구기관이 참여하고 있음 (그림 6 참조) (Rohrmann et al 2005, Rohrmann et al 2007).

**IMO Wind: Integrated Monitoring and Assessment System for Offshore Wind Energy Farms**



Wind energy farm

The use of offshore wind energy farms of the megawatt class represents a large technical challenge for their design, construction and operation. Complex load conditions develop due to both the dynamic interactions between equipment components and the location. However, our current understanding is not sufficient regarding effective loads and relevant stresses in individual components. Also, our current state-of-the-art knowledge cannot yet guarantee a sufficiently safe and simultaneous economic foundation of such sites under offshore conditions and the combined effect of wind and wave forces.

The prime target of the **IMO WIND** integrated project (Integrated Monitoring and Assessment System for Offshore Wind Energy Farms) is to develop the hardware and software needed for an integrated monitoring and assessment system. It must be able to guarantee the maintenance of the overall system by monitoring the conditions of all elements in offshore wind energy farms combined with the development and testing of adapted sensor technology. All components must meet the heavy-duty operating conditions (offshore conditions, safe functionality and longevity). The provision of information which can ensure a safe assessment of the conditions of the entire plant is of prime importance.

Eight partners from research and industry participate in Imo wind, among them three BAM divisions. Methods for the assessment of fatigue safety of rotor blades and integral sensor technology for the online assessment of component behaviour are being tested.

A further key aspect of the project is the development of concepts for the assessment of the conditions of the entire plant including the foundations. The project runs from 01. 06. 2005 to 31. 05. 2008 and is funded with a budget of 777,090 euro.

Contact:  
 Dr.-Ing. Werner Rucker  
 Phone: +49 30 8104-1720,  
 email: [werner.ruecker@bam.de](mailto:werner.ruecker@bam.de)

Dipl.-Ing. Rolf Rohrmann  
 Phone: +49 30 8104-3293,  
 email: [rolf.rohrmann@bam.de](mailto:rolf.rohrmann@bam.de)  
 Division VII.2 Buildings and Structures  
<http://www.imo-wind.bam.de>

그림 6. IMO-WIND Project 소개 Website (<http://www.bam.de>)

- WT-OMEGA(Wind Turbine Operation & Maintenance based on Condition Monitoring) 프로젝트가 1999년부터 2003년까지 ECN, Lagerwey the WindMaster, Siemens, SKF 등이 참여하여 수행됨 (Verbruggen 2003). 이 프로젝트에서는 일반적인 상태 모니터링 기법들을 조사하고 이들 기법들의 풍력발전기 적용성을 분석하였으며, 선정된 모니터링 기법들을 검증함. 또한 침단센서, 알고리즘 및 시스템 통합 등 향후 개발과제를 도출함.
- WT-OMEGA 프로젝트의 후속 과제로서 수행된 CONMOW(Condition Monitoring Offshore Wind turbines) 프로젝트는 유럽위원회(European Commission)의 지원으로 2002년부터 2006년까지 네덜란드의 ECN(Energy research Centre of the Netherlands), 영국의 Loughborough 대학 및 네덜란드, 덴마크, 영국, 독일의 관련 기업들이 참여하여 수행되었으며, 이 프로젝트에서는 기존의 시스템 및 기술들을 해상풍력발전기의 상태 모니터링에 적용하기 위한 연구가 주로 수행된 바 있음 (European Commission, Watson et al 2006).
- Offshore M&R(Advanced Maintenance and Repair for Offshore Wind Farms using Fault Prediction and Condition Monitoring Techniques) 프로젝트는 2003년부터 2005년까지 역시 유럽위원회의 지원으로 독일의 ISET(Institute of Solar Energy Supply Technology) 주관으로 덴마크의 Risoe National Laboratory 및 덴마크와 독일의 관련 기업들이 참여함. 이 프로젝트의 목표는 해상풍력발전기에 대한 상태 기반 유지, 보수의 기반을 구축하는 것이며, 이를 위하여 상태 모니터링 및 결함 예측에 필요한 하드웨어와 소프트웨어 통합을 수행함 (ISET 2005).
- CleverFarm 프로젝트는 2000년부터 2003년까지 유럽위원회의 지원으로 덴마크의 Risoe National Laboratory, 독일의 ISET 및 독일, 덴마크, 영국의 관련기관이 공동으로 참여. 이 프로젝트의 목표는 풍력발전단지의 풍력발전기 유지 및 건전성 평가

를 위한 모든 정보를 취득할 수 있고 사용할 수 있는 통합 모니터링 시스템을 구축하는 것이고, 특히 나셀에 장착된 부품들의 잔여수명을 중앙 시스템에서 모니터링할 수 있도록 함. 프로젝트 수행 기간 중 개발된 소프트웨어와 하드웨어는 덴마크와 독일의 두 풍력 단지에 설치된 바 있음 (<http://www.iset.uni-kassel.de/osmr>, Giebel *et al* 2004).

- SIMU-Wind 프로젝트는 독일 Aachen 대학의 IBH(Institute of Mining and Metallurgical Machine Engineering), Dresden 대학의 IMM(Institute of Machine Elements and Machine Construction) 및 독일의 관련 기업들이 공동으로 수행 (Seeliger *et al* 2006). 이 프로젝트의 목표는 다양한 센서를 이용한 상태 모니터링 시스템을 다물체(multi body) 시스템 시뮬레이션 및 전기적 시뮬레이션과 통합하는 것으로, 그림 7에 보인 바와 같이 80개 이상의 센서를 2MW 풍력발전기의 드라이브트레인과 전기 시스템에 설치하여 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교함.

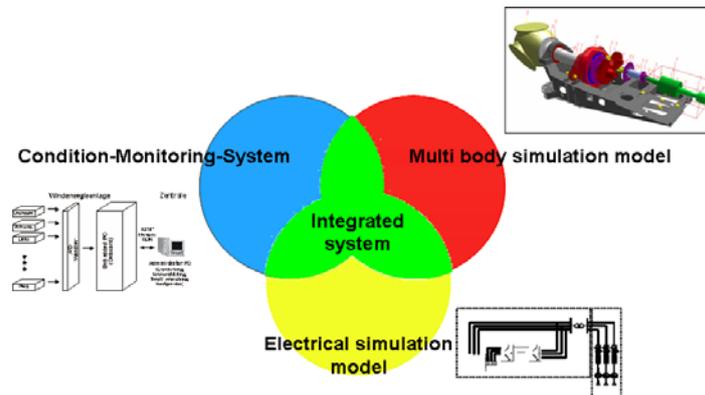


그림 7. 상태 모니터링 시스템과 기계, 전기적 시뮬레이션의 통합 (Seeliger *et al* 2006)

- Blade의 구조 건전성 모니터링과 관련된 기존 연구로는 Acoustic Emission을 이용한 방법(Mc Guban 2007), Acoustic Emission과 Guided Wave를 이용한 방법 (Lehmann *et al* 2006), Impedance를 이용한 방법 (Pitchford 2007), Transmittance 함수, 공진, 운전중변형형상(Operational Deflection Shape), 파전달(Wave Propagation) 등을 동시에 사용한 방법(Ghoshal *et al* 2000)에 관한 연구 등이 수행된 바 있으며, 광섬유센서를 이용한 연구가 수행된 바 있음(Guemes *et al* 1998).
- Tower와 Foundation 등에 대한 구조 건전성 모니터링과 관련된 연구로는 변형률과 속도 사이의 비례관계를 이용한 손상 검색 방법에 관한 연구 (Rolfes *et al* 2007), 상시 가진에 의한 Attractor를 이용한 방법 (Nichols 2003), Stochastic Subspace Fault Detection을 이용한 연구 (Kraemer and Fritzen, 2007)등이 있음.
- 위의 그림에서 알 수 있듯이 센서 역시 자주 고장이 발생하는 구성요소로서 모니터

링에 사용되는 센서에 고장이 발생할 경우 이를 찾아내는 것이 또한 중요한데 이와 관련하여 센서의 고장 검출에 관한 연구가 수행된 바 있음 (Kraemer and Fritzen, 2007)

### 국내 동향

- 국내에서는 현재까지 풍력발전터빈의 대형화 및 국산화에 관한 연구를 주로 수행하고 있으며, 유지관리와 관련한 기술 개발은 대형 프로젝트 내에서 세부 소규모 형태로 수행되고 있음
- 현재까지는 주로 한국기계연구원 풍력핵심기술연구센터를 중심으로 몇 개 대학에서 소규모로 연구를 수행하고 있음
- 그러나 스마트 센서 기술, 구조물 상태 평가 및 건전도 모니터링, 원격 모니터링 등에 대한 요소기술은 기계분야의 회전체, 건설분야의 교량 및 고층 건축물 등을 대상으로 많은 연구가 이루어지고 있음

- 국내에서 풍력발전과 관련된 연구를 수행하는 기관으로는 한국에너지기술연구원과 한국기계연구원 등을 들 수 있으며, 그 외 효성(주), 유니슨(주), 두산중공업(주) 등에서 증속기 등과 관련된 연구를 수행하고 있음.
- 특히 풍력발전시스템의 상태평가와 관련하여 한국기계연구원 풍력핵심기술연구센터에서 많은 연구를 수행하고 있음.
- 그러나 현재까지의 연구는 주로 블레이드, 기어박스과 발전기, 기어박스과 베어링 등에 대한 상태모니터링에 관한 내용을 다루고 있으며, 해상풍력발전시스템의 경우 더욱 중요하게 고려되는 Tower 및 기초 부분에 대한 구조 건전성 모니터링과 관련한 연구는 활발하지 않음(최형래 등 2005, 김석현 등 2007, 이종원 등 2007, 이종원 등2008).

## 2.2. 관련기술의 시장규모 및 적용가능 분야

### 가. 관련기술의 시장규모

- 2011년 전체 풍력시장의 10%에 해당하는 50억 달러 수준의 해상풍력발전 시장이 형성될 것으로 예측되고 있음
- 해상풍력발전시스템의 비용 중 약 25%가 운영 및 유지관리에 필요한 예산이며, 이 중 10%를 모니터링 시스템의 설치 및 유지보수 비용으로 고려한다면, 총 비용 대비 2.5%가 운전상태 및 구조 건전성 모니터링 시스템의 시장이라 고려할 수 있음
- 이 경우 2011년의 경우 모니터링 시스템의 시장 규모는 약 1.25억 달러 (1500억 원)의 시장이 형성될 수 있을 것으로 예측

- 해상풍력발전 관련 산업은 교토의정서 발효로 신재생에너지가 각광받고 있는 가운데, 전 세계적으로 연평균 113%의 가파른 성장세를 보이며 2010년까지 연간 3,900MW, 8조원의 시장이 형성될 것으로 전망되고 있음
- 우리나라 역시 기술개발이 완료되는 2010년 이후에는 그 규모가 급격히 확대될 전망으로, 이는 해상이 육상보다 바람이 강하고 끊임없이 불어 획득할 수 있는 전력량이 육상풍력보다 약 40% 많은 장점이 있고, 또한 향후 세계풍력시장에서 발전가능성이 가장 높은 분야로 전망되고 있기 때문임
- 해상풍력발전은 덴마크, 독일, 영국, 스웨덴, 네덜란드 등의 유럽 국가들이 주도해오고 있으며, 유럽 풍력협회(EWEA: Europe Wind Energy Association)의 전망에 따르면, 2010년까지 유럽지역에서 4만 메가와트의 해상풍력설비가 설치되고 2020년까지는 7만 메가와트의 해상풍력설비가 설치될 것으로 예측되고 있음. 이를 2008년 기준으로 해상풍력발전 국가별 규모를 살펴보면, 영국(800MW), 덴마크(200MW), 스웨덴(140MW), 네덜란드(120MW), 프랑스(105MW), 독일(60MW), 벨기에(30MW) 등임

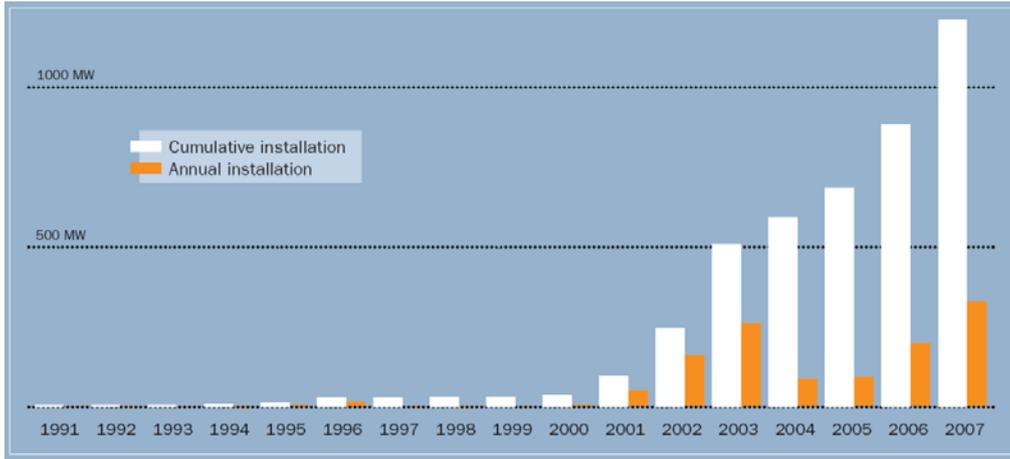


그림 8. 유럽 해상풍력시장 발전 현황 (1991년~2007년)(출처: EWEA 2007 Report)

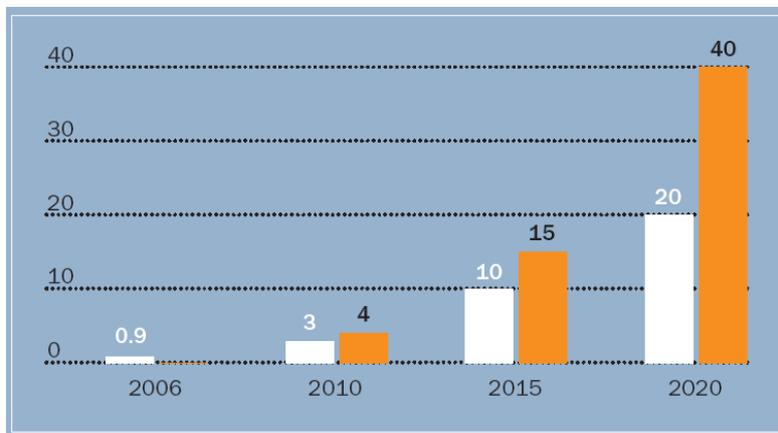


그림 9. 유럽 해상풍력시장 발전 전망 (단위: GW) (자료: EWEA 2007 Report)

- 금액기준으로 해상풍력발전 시장규모는 2011년에는 전체 풍력시장의 10%에 해당하는 50억달러까지 성장할 것으로 예측되고 있음.

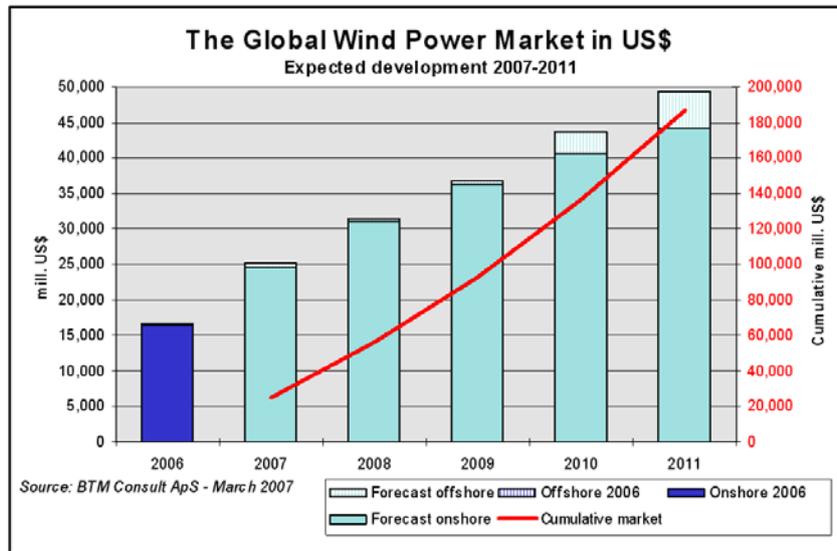


그림 10. 세계 육상·해상 풍력발전 시장 단기 예측

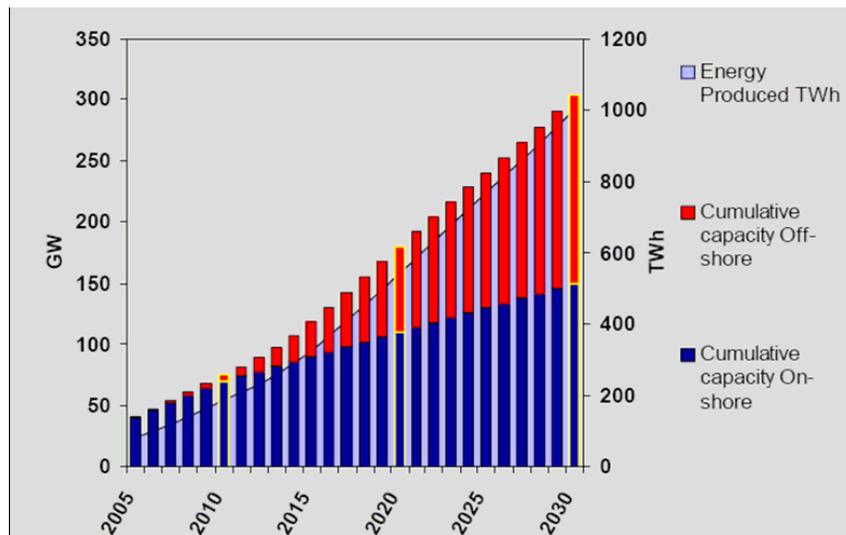


그림 11. 세계 육상·해상 풍력발전 시장 장기 예측 (자료: EWEA 2007 Report)

- 장기적으로 해상풍력발전 시장은 2020년에는 전체 풍력발전 시장의 39%로 확대될 전망이며, 2030년에는 총 누적 풍력발전 용량 300GW중 해상풍력이 150GW로 육상 풍력과 같은 비중으로 성장할 것으로 예측되고 있음.
- 해상풍력의 발전단가는 1MW당 50~80유로 정도로 높은 초기 설치비로 인해 육상풍력과 비교해 다소 높은 수준이나, 해상풍력발전단지와 풍력발전기의 대규모화로 단가가 계속 낮아지고 있는 추세임.

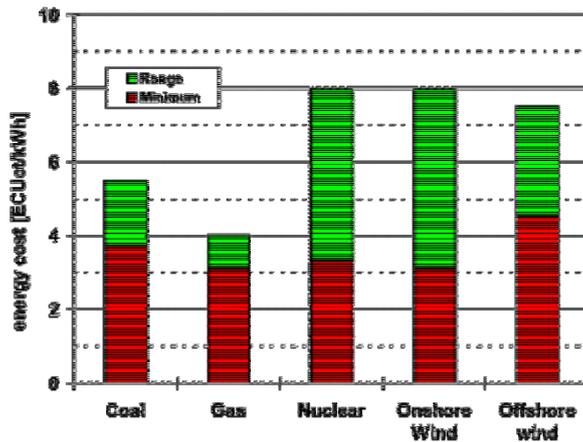


그림 12. 해상풍력발전 발전단가

- 해상풍력발전시스템의 비용 측면에서 볼 때 총 비용의 약 25%가 운영 및 유지관리에 소요되며, 이 비용 중 10%를 모니터링 시스템의 설치 및 유지보수 비용으로 고려한다면, 총 비용 대비 2.5%가 구조 건전도 및 상태 모니터링 시스템의 시장이라고 고려할 수 있음. 따라서 2011년에는 50억 달러의 시장이 형성될 것으로 고려한다면 이 중 모니터링 시스템의 시장은 약 1.25억 달러가 형성될 수 있을 것으로 판단할 수 있음.
- 특히 2020년, 2030년의 경우 해상풍력 시장이 풍력 시장 전체에서 차지하는 비중이 각각 39%, 50%로 증가할 것으로 예상되고 있기 때문에 이와 관련하여 모니터링 시스템의 시장은 보다 크게 확대될 것으로 판단할 수 있음.

나. 관련기술의 적용가능 분야

기술분류	적용 가능 분야
해양구조물 분야	○ 다양한 해양구조물의 원격지 모니터링을 위하여 개발 기술을 적용할 수 있고, 이를 통하여 해양구조물의 안전성 및 경제성을 극대화함
신재생에너지 분야	○ 상태 모니터링 시스템의 경우 진동형태의 신재생에너지 발전시스템, 즉 조류 및 조력발전, 풍력발전, 파력발전에 있어서 상태 모니터링 시스템 구축 시 개발된 세부 기술 중 일부 기술 적용 가능 ○ 신재생 에너지 발전시스템의 건전성 평가를 위하여 개발된 기술 중 일부 기술 적용 가능

## 2.3. 국내 연구개발 현황 및 능력분석

- 해상풍력발전시스템에 대한 상태 및 구조 건전성 모니터링 관련 기술에 관해서는 한국기계연구원을 중심으로 소규모의 연구가 수행되고 있으나, 외국에 비하여 수준 및 완성도가 높지 않음
- 그러나 USN 기반 모니터링 시스템, 스마트 센서 기술, 안전관리 네트워크 등에 대한 연구가 기존 교육과학기술부, 국토해양부 과제로 다수 수행되고 있으며, 따라서 이들 기술을 해상풍력발전시스템으로 융합 적용하는 것이 필요함
- 국제적으로는 교량 등에 대한 모니터링 기술 수준이 매우 높고, 실제 Test Bed에의 적용을 통한 검증 단계에 이미 접어든 기술들이므로 이들 기술을 해상풍력발전시스템의 특성을 고려하여 적용하는 것이 매우 중요함

- USN기반 모니터링 시스템에 대한 연구가 활발하며, 주로 토목분야와 전자분야의 융합연구를 통하여 관련 연구가 수행되고 있음. 최근 USN 기반의 모니터링 시스템은 대형 사업 내에서 핵심 연구아이템으로 주목받고 있으며, 다음과 같은 국가연구개발 과제의 세부 연구과제로 수행되고 있음.

- U-eco City 사업단 (국토해양부 첨단도시개발사업 (VC10))
- 초장대 교량 사업단 (국토해양부 건설기술혁신사업 (VC10 과제))
- U 중차량 무인 과적 단속 시스템 (국토해양부 건설기술혁신사업)

- 한편 기존의 고가의 고성능 센서를 대체할 수 있는 MEMS (Micro Electro Mechanical System), NEMS (Nano Electro Mechanical System) 형태의 센서 및 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting), 능동형 센서인 압전형 센서 등의 스마트 센서 기술과 관련하여 국내의 연구개발 현황으로 다음과 같은 연구개발과제가 수행되고 있음.

- KAIST 스마트 사회기반시설 연구센터 (교육과학기술부 한국과학재단 지정 우수 연구센터 사업)
- 국가 주요시설물 안전관리 네트워크 시범구축 및 운영시스템 개발 (국토해양부 건설기술혁신사업)
- 사회기반 콘크리트 구조물 성능평가 통합시스템 구축 (국토해양부 건설교통RnD 정책인프라사업)

- 위와 같이 시설물 유지관리와 관련하여 스마트 센서 및 USN 관련 기술은 국토해양부에서 융합 성격의 과제로 전기전자 분야와의 학제간 연구를 통하여 핵심기술을 개발하고 있으며, 따라서 이 과제에서는 이들 타 국가연구개발사업의 성과를 최대한 활용할 수 있도록 하여야 함
- 한편 해상풍력발전시스템의 유지관리와 관련하여 현재 수행 중인 국가연구개발사업은 현재까지 없는 상태로 일부 연구가 한국기계연구원 등에서 수행되고 있는 상태임. 그러나 기존의 기계 회전체 역학 분야, 토목 교량 모니터링 분야 등 타 학문분야에서 개발된 상태 및 건전도 모니터링 기술이 융합된다면 충분한 연구역량은 이미 확보한 상태라 평가할 수 있음.

## 2.4. 선진국 수준과의 비교

- 이미 풍력발전시설에 대한 상태 모니터링 시스템 개발에 많은 연구프로젝트를 수행한 바 있는 유럽과 기술 수준을 비교할 때 약 50% 수준으로 국내 기술 수준을 평가할 수 있음
- 유럽의 경우 이미 많은 해상풍력발전시스템을 실제 건설하여 운영하고 있으나 국내에서는 현재 Test Bed 구축단계에 있으므로 모니터링 시스템의 기술 수준 및 완성도 수준 역시 낮은 단계임
- 그러나 해상풍력발전시스템의 경우 그 특성상 원격 모니터링이 필요하며, 이를 위하여 USN 기술, 무선통신 기술 등과 같은 IT 융합 기술의 적용이 필요하고, 이들 부분에 대한 연구를 적극 수행한다면 향후 해상풍력발전시스템의 시장이 더욱 커지는 2020년 경에는 충분히 경쟁할 만한 수준까지 발전할 수 있을 것으로 기대할 수 있음

- 현재 외국의 경우에는 풍력발전 시장이 크게 형성되어가고 있는 상황으로 많은 연구개발이 이루어지고 있음
- 그러나 최근 삼성중공업(주)이 미국 풍력발전시장을 개척해 나가고 있는 것과 같이 현재 풍력발전 관련 시장은 유럽 중심이기는 하나 미개척 시장이 많이 존재하고 있음. 특히 터빈 등의 부품 개발과 관련해서는 한국중공업(주), 삼성중공업(주) 등에서 2MW급 이상까지 국산화를 이루고 있는 상황이므로 기술경쟁력이 높을 것으로 판단할 수 있음

- 이들 기술은 주로 육상풍력발전시설과 관련된 기술로서 향후 각광을 받은 것으로 예상되는 해상풍력발전시스템 수주를 위해서는 유지관리 분야의 기술 역시 매우 중요해 질 것으로 판단할 수 있음
- 해상풍력발전시스템의 상태 모니터링 기술과 관련해서 현재 국내 기술 수준은 선진 유럽 국가의 기술수준에 비하여 50% 내외의 수준이며, 건전도 모니터링 기술과 관련해서는 유럽의 여러 국가 역시 크게 진행된 상태가 아니므로 70% 정도 수준으로 평가할 수 있음
- 특히 해상풍력발전시스템의 경우 원격 모니터링이 필요하므로 USN 기반 기술, 무선 통신기술 등 IT 융합 기술의 적용이 필요하며, 국내의 높은 IT 기술 수준을 고려할 때 향후 해상풍력발전 시장이 크게 증가하는 2020년 경에는 충분히 경쟁할 수 있을 것으로 기대함

### 3. 연구개발 목표

- USN (Ubiquitous Sensor Networking) 기반기술 및 MEMS (Micro Electro-Mechanical System) 센서, NEMS (Nano Electro-Mechanical System) 센서를 이용한 상태 및 건전도 모니터링 시스템 개발
- 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting) 기술을 이용한 무선 센서의 전력공급 기술 및 센서 자기진단 (Sensor Self-Diagnosis) 기술 개발
- 웹기술 및 원격통신기술을 활용한 해상풍력발전시스템의 원격지 모니터링 시스템 개발
- 하이브리드 기법에 의한 기기상태 및 건전도 모니터링 기법 개발
- 시제품 제작 및 1MW급 해상풍력발전시설에 대한 시험 적용 및 검증

#### 3.1. 최종목표

- 해상풍력발전시스템이 그 기능을 원활하게 수행하고 설계 수명 동안 안전하게 유지 관리될 수 있도록 USN 기반의 하이브리드 상태 및 건전도 모니터링 시스템을 개발
- 특히 해상풍력발전시스템의 특성 상 중요성이 매우 높은 원격지 모니터링이 가능하도록 USN 센서, Energy Harvesting, 센서 자기진단, 원격 모니터링 기술 등을 개발

#### 3.2. 단계별 연구 목표

- 1단계 (2010년~2012년) : 해상풍력발전시스템 상태 및 건전도 모니터링을 위한 세부 핵심기술 개발
  - USN 기반 센서 시스템 개발
  - 센서 전력공급을 위한 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting) 기술 개발
  - 웹-기술 및 무선통신기술을 이용한 원격 모니터링 기술 개발
  - 센서 자기진단 (Sensor Self-Diagnosis) 기술 개발

- 모델기반 건전도 모니터링 기술 개발
- 신호기반 상태 및 건전도 모니터링 기술 개발

□ 2단계 (2013년~2015년) : 해상풍력발전시스템에 대한 개발 시스템 적용 및 운영 보완

- USN 기반 계측 H/W 시스템과 하이브리드 모니터링 S/W 시스템의 통합
- 1MW급 풍력발전시스템에 대한 시험적용 및 장기 모니터링을 통한 개발 시스템의 검증 및 보완

## 4. 연구내용 및 범위

### 4.1. 단계별 수행 연구 개발 과제

단 계	연구 개발 과제
1단계 (2010년~2012년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ USN 기반 센서 시스템 개발</li> <li>▶ 센서 전력공급을 위한 에너지 하베스팅 기술 개발</li> <li>▶ 센서 자기진단 (Sensor Self-Diagnosis) 기술 개발</li> <li>▶ 웹-기술 및 무선통신기술을 이용한 원격지 모니터링 기술 개발</li> <li>▶ 모델기반 건전도 모니터링 기술 개발</li> <li>▶ 신호기반 상태 및 건전도 모니터링 기술 개발</li> </ul>
2단계 (2013년~2015년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ USN 기반 계측 H/W 시스템과 하이브리드 모니터링 S/W 시스템의 통합</li> <li>▶ 1MW급 풍력발전시스템에 대한 시험적용 및 장기 모니터링을 통한 개발 시스템의 검증 및 보완</li> </ul>

#### ○ USN 기반의 계측 시스템 개발

- 현재 주요 사회기반시설물에 대한 모니터링 시스템은 고가의 고사양 센서를 기반으로 구축되고 있으나, 이 경우 시스템 구축 비용, 케이블링에 의한 인력 소요 등의 제한으로 최소한의 위치에 센서를 설치하고, 자료를 분석하여 시설물에 대한 안전성 및 사용성을 평가하고 있어 실제적인 유지관리에 대한 정보는 매우 제한적임.
- 그러나 현재 많은 연구개발이 이루어지고 있는 MEMS 센서 및 NEMS 센서, 그리고 무선통신기술을 융합하여 USN (Ubiquitous Sensor Network) 환경을 구축하고, 이러한 환경 하에서 계측시스템을 구축하는 경우 비용은 절감시키면서 성능은 최대한 높일 수 있음.
- 따라서 이 연구에서는 이러한 USN 기반의 계측시스템을 개발하고자 함

#### ○ Energy Harvesting 및 Sensor Self-Diagnosis 기술

- 현재의 무선센서는 대부분 센서부(Sensor Node)에서 로거부(Data Logger Node)까지 무선으로 계측자료를 송수신하는 형태이며, 센서에 대한 전력은 주로 배터리로 공급하거나 혹은 기존 육상전원을 이용하고 있음.
- 완전한 무선센서를 구축하기 위해서는 전력공급 역시 무선으로 해결하여야 하며, 특히 해상풍력발전시스템의 터빈 블레이드에 무선센서를 적용하는 경우는 전원 역시 육

상전원이나 배터리에 의존하지 않는 시스템을 구축하여야 함.

- 이러한 목적을 위하여 구조부재에 발생하는 동적인 변형률, 또는 진동 등을 이용하여 소규모 전력을 생산하는 전력자가발전 즉 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting) 기술에 관한 연구가 활발하며, 해상풍력발전시스템에도 이러한 기술이 적용되어야 함
- 한편 해상풍력발전시스템의 경우 원격지에서 유지 관리하고 접근성이 매우 불량하기 때문에 부품 및 구조체의 이상상태뿐만 아니라 센서 자체의 고장에 대한 진단이 필요함. 이를 위하여 센서 자기진단 (Sensor Self-Diagnosis) 기술을 개발하여 적용할 계획



그림 13. USN의 이용 분야

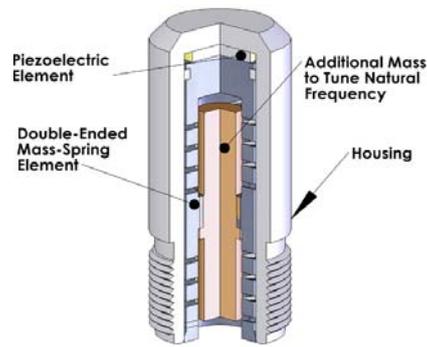


그림 14. 에너지 하베스팅 사례 (진동형)

### ○ 모델기반 및 신호기반 건전도 모니터링 기술

- Gearbox, Generator 등의 주요 구성품의 경우 베어링 마모 등으로 인하여 열이 발생하기 쉽고 따라서 고장 가능성이 매우 높음. 이들에 대한 상태 모니터링을 위해서는 모델기반의 방법보다는 이들 기기 주변의 가속도 등 진동을 계측하여 신호를 분석함으로써 이상상태를 규명하는 신호기반의 모니터링이 주로 연구되고 있음.
- 이 연구에서도 이와 같이 해석이 매우 어려운 구성품에 대해서는 신호 자체를 분석함으로써 이상상태를 찾아내는 신호기반의 모니터링을 수행하고자 하며, 그 방법으로는 시계열 분석, 스펙트럼 혹은 캡스트럼 분석법, 시간-주파수 영역 분석법 등의 적용성을 평가하며, 또한 신경망 기법 및 퍼지이론 등과 같은 소프트컴퓨팅(Soft Computing)의 적용성을 검토할 계획임
- 한편 Tower 및 기초부의 경우 구조해석이 충분히 가능한 부분이므로 이들 지지구조물에 대한 건전도 모니터링에 있어서는 해석에 근간을 둔 모델기반 모니터링과 함께 국부적인 응답신호를 이용한 신호기반 모니터링을 동시에 활용하는 이른바 하이브리드 모니터링 기법을 개발 적용하고자 함

## 4.2. 연구대상기술의 개발 가능성

- USN 기반 모니터링 시스템 개발
  - 현재 국내에서는 U-Eco City, USN을 이용한 안전관리 네트워크 등 여러 국가연구개발 사업이 추진되고 있으므로, 이러한 프로젝트를 수행한 연구기관 및 연구성과를 적극 활용함으로써 이 분야의 기술 개발 가능성을 높일 수 있음
- Energy Harvesting 및 Sensor Self-Diagnosis 기술
  - 현재 KAIST 스마트사회기반시설연구센터, 연세대학교 첨단융합기술연구센터 등을 중심으로 스마트 센서 등에 대한 연구가 활발하며, 또한 Energy Harvesting 및 Sensor Self-Diagnosis 기술에 대한 연구 역시 지속적으로 추진되고 있으므로 이들 기술을 이 연구에서 충분히 활용한다면 기술 개발이 가능할 것으로 판단됨
- 웹-기술 및 무선통신기술을 이용한 원격지 모니터링 기술 개발
  - 국내의 높은 IT 융합기술 수준을 고려할 때 기술 개발 가능성이 높음
- 모델기반 건전도 모니터링 기술 개발
  - 모델기반 건전도 모니터링과 관련하여 기존의 교량, 건축구조물 등에 대하여 많은 적용 사례가 있음. 다만 해상풍력발전시스템의 경우 구조체 내부에 회전하는 블레이드와 Gearbox, Generator 등이 있으므로 이들을 고려한 해석을 수행한다면 충분히 개발 가능성이 있는 것으로 평가할 수 있음
- 신호기반 상태 및 건전도 모니터링 기술 개발
  - 현재 Guided Wave, Impedance, 변형률, 가속도 등 주요 계측신호에 대한 신호만을 이용한 상태 및 건전도 모니터링에 관한 기술이 연구되고 있으므로, 이 연구에서도 기존의 자료와 경험을 활용하여 기술 개발을 이룰 수 있을 것으로 평가함

## 4.3. 기술개발 및 시장점유 가능성

- 최근 미국, 유럽을 비롯하여 아시아의 여러 국가에서 신재생에너지 중심으로의 발전 시스템을 전환하고자 하는 노력을 기울이면서 특히 많은 국가에서 해상풍력발전시스템에 대한 관심이 증가하고 있음.
- 특히 2020년을 전후로 하여 풍력발전이 전체 신재생에너지 분야에서 가장 큰 시장을 형성할 것으로 예상되고 있으며, 이 중 38~50%를 해상풍력발전이 기여할 것으로

예측되고 있어 시장 형성에는 큰 문제가 없을 것으로 예상되고 있음.

- 또한 해상풍력발전의 경우 육상풍력발전과 달리 기초 및 유지관리 분야에 전체 비용의 50% 이상이 소요되므로 이 분야의 중요성이 무엇보다 커진다고 할 수 있음.
- 해상풍력발전시스템은 육상풍력발전시스템과 달리 유지관리를 위한 상태 및 건전도 모니터링 시스템의 구축이 반드시 필요하며, 이를 통하여 실제적인 보험료 인하 효과도 기대할 수 있을 것임. 이를 위한 핵심요소기술의 경우 최근 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있는 스마트 센서 기술을 비롯하여 국내 기술이 세계 기술을 선도하고 있는 USN 기술, 통신기술을 적극 수용하여 최대한 빠른 기간 내에 효율적인 시스템의 개발이 가능할 것으로 기대되고 있음.
- 국내에 해상풍력발전시스템이 설치되는 경우 반드시 모니터링 시스템을 구축하여야 하며, 그 성능에 대해서는 각종 규정에 제시되어 있는 성능 기준을 만족하여야 할 것임. 이러한 성능 기준을 만족하는 시스템을 구축하고, USN 기술, 통신기술 등을 접목하여 그 효율성을 증대시킨다면 국내 시장은 물론 국제 시장에서도 기술을 선도하여 시장점유율을 높일 수 있을 것으로 판단됨.

## 5. 연구개발 추진전략 및 체계

### 5.1. 기본방안

- 연구목표 및 성과의 정량화
  - TRM 작성 등을 통하여 연구목표 및 연구기간을 구체화 및 정량화 함
  - 연구결과의 객관적 검증을 위한 논문 발표, 학술지 게재 및 특허 출원, 등록
  
- 다학제간 연구 및 산학연 공동연구를 통한 실용화 연구 추진
  - 해양, 전자, 전기, 토목, 기계 등의 다학제간 연구
  - 대학, 산업체, 연구소 등의 산·학·연 공동연구 추진
  
- 연구역량 집중 및 통합을 통한 단기간 실용화 연구 추진
  - 하드웨어 시스템과 소프트웨어 시스템을 분리하여 각각 개발한 뒤, 이 두 시스템을 통합하여 실제 풍력발전시설에 적용함으로써 개발된 시스템의 성능을 검증하고, 보완을 통하여 개발 기술을 실용화 하고자 함

### 5.2. 추진전략

#### 가. 세부추진전략

- 연구목표 및 성과의 정량화
  - Micro TRM (Technical Road Map)을 작성하여, 필요한 핵심기술을 신규 개발 기술, 도입기술, 적용기술 등으로 분류하고, 그 시기와 규모를 정량적으로 제시함으로써 연구목표를 구체화, 정량화하여 연구를 추진함
  - 연구성과의 객관적 검증을 위하여 국내외 학술대회 논문 발표, 국내외 전문 학술지에 대한 논문 게재, 개발된 신규 기술의 특허 출원 및 등록 등을 적극 추진
  
- 다학제간 연구 및 산학연 공동연구 추진
  - 해상풍력발전시스템에 대한 상태 및 건전도 모니터링 시스템 개발을 위해서는 해양

공학을 비롯하여 전자, 통신, 기계, 토목 등 여러 학제 간의 연구가 필요

- 따라서 해양공학, 해양지반 분야의 전문연구기관인 우리 연구원을 비롯하여 전자부품연구원, 한국표준연구원 등의 정부출연연구기관과 한국전력공사 등의 전력 관련 공기업, 그리고 유니슨, 한국중공업 등과 같은 관련 기업체의 참여가 필요하며 이를 통한 다학제간 연구를 수행
- 한편 센서 기술 및 모니터링 기술에 있어서 세부 요소 기술을 보유하고 있는 국내의 KAIST, 서울대 등 대학과의 공동연구를 통하여 산·학·연 형태의 연구수행을 추진

#### □ 단기간 실용화 연구 추진

- 해상풍력발전시스템에 대한 상태 및 건전도 모니터링 시스템은 그 핵심기술로 (1) USN 기반기술 (2) 에너지 하베스팅 기술 (3) 웹기반 및 무선통신기술, (4) 신호기반 모니터링 기술 (5) 모델기반 모니터링 기술 등을 포함함
- 이들 기술은 기존의 교량 및 건축구조물과 같은 사회기반 시설물에 대한 건전도 평가시스템 개발기술과 전기 및 기계 분야에서에의 상태평가 기술로부터 핵심적 기술을 도입할 수 있음
- 따라서 기존 기술에 대한 정리를 포함하여 계측시스템 개발 분야의 연구를 1단계 3년 동안, 그리고 하이브리드 기법에 의한 모델 및 신호기반 모니터링 기술 연구를 역시 동기간 동안 수행 한 후, 2단계 1차년도에 이들 H/W 시스템 및 S/W 시스템을 통합하여 Test Bed 풍력발전시설에 적용함. 즉 실질적인 연구수행기간은 4년(1단계 3년 + 2단계 1년)이 되며, 2단계 2, 3년차는 모니터링 시스템 운영 및 보수, 성능 개선 등을 위한 연구를 수행하게 됨.

## 나. 단계별 추진전략

추진단계	기본방안	추진전략
1단계	현재기술검토 핵심기술개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 타부처 R&amp;D 사업 추진현황 및 연구성과 분석</li> <li>▪ 기존 논문 및 특허 자료 분석</li> <li>▪ 필요한 핵심기술 도출 및 TRM 작성</li> <li>▪ 핵심기술 개발</li> </ul>
2단계	개발시스템통합 Test Bed 적용 개발시스템보완	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 개발된 H/W 및 S/W 시스템 통합</li> <li>▪ Test Bed 해상풍력발전시스템 또는 육상풍력발전시스템에 대한 적용</li> <li>▪ 개발된 시스템의 성능 검증, 보완 및 개선</li> </ul>

## 5.3. 연구개발 추진일정

분류	핵심기술 연구내용	1단계			2단계			비고
		05	06	07	08	09	10	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ USN 기반 센서 시스템 개발 (20억/3년)</li> <li>▶ 센서 전력공급을 위한 에너지 하베스팅 기술 개발 (10억/3년)</li> <li>▶ 센서 자기진단 (Sensor Self-Diagnosis) 기술 개발 (10억/3년)</li> <li>▶ 웹-기술 및 무선통신기술을 이용한 원격지 모니터링 기술 개발 (10억/3년)</li> <li>▶ 모델기반 건전도 모니터링 기술 개발 (20억/3년)</li> <li>▶ 신호기반 상태 및 건전도 모니터링 기술 개발 (20억/3년)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 웹-기술 및 무선통신기술을 이용한 원격지 모니터링 기술 개발 (10억/3년)</li> </ul>							
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ USN 기반 계측 H/W 시스템과 하이브리드 모니터링 S/W 시스템의 통합 (2억/1년)</li> </ul>							
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 1MW급 풍력발전시스템에 대한 시험적용 및 장기 모니터링을 통한 개발 시스템의 검증 및 보완 (28억/3년)</li> </ul>							

## 6. 기대성과 및 활용방안

### 6.1. 기대성과

#### 기 대 성 과

- ▶ 국내의 높은 IT 융합기술을 바탕으로 기술적으로 수준이 높고, 실제 시스템에 적용이 가능한 실용적인 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대
- ▶ 해상풍력발전시스템에 대한 여러 하중 상태에서의 응답을 DB화 함으로써 향후 설계에 반영할 수 있을 것으로 기대
- ▶ 궁극적으로 사용성 및 안전성을 최대한 증가시킴으로써 해상풍력발전시스템의 경제적 유지관리가 가능할 것으로 기대

- 해상풍력발전시스템의 특수성을 충분히 고려하여 모니터링 시스템을 계획하고, 필요한 기술을 분석함으로써 기술적으로 수준이 높은 시스템을 제안할 수 있을 것으로 기대함.
- 또한 이 과제를 해상풍력발전시스템의 핵심 기술로서 추진함으로써 향후 해상풍력발전시스템의 실해역 설치 이후 발생할 수 있는 여러 가지 문제점들을 거동을 기반으로 분석할 수 있고, 또한 계측응답 결과를 분석함으로써 다양한 하중 하에서의 구조물의 거동을 데이터베이스화 함으로써 향후 설계에 반영할 수 있을 것으로 기대할 수 있음
- 막대한 예산이 소모되는 해상풍력발전시스템 건설의 비용을 절감시키고, 안전한 유지관리를 위하여 모니터링 시스템이 설치됨에 따라, 여러 부수적인 경제적, 산업적 측면에서의 기대효과가 있을 것으로 예상

### 6.2. 활용방안

#### 활 용 방 안

- ▶ 국내 해상풍력발전시스템의 모니터링 시스템을 부유식 해양구조물 등 첨단 해양구조물의 모니터링 시스템 개발에 도입, 적용함으로써 개발 비용을 줄이고, 그 성능은 극대화 할 수 있을 것으로 기대

## 7. 결론 및 정책적 시사점

### 7.1. 결론

#### 결론

- ▶ 향후 저탄소 녹색성장의 국정 과제 추진을 위하여 발전 가능성이 가장 큰 신재생에너지 자원으로 평가되고 있는 해상풍력발전시스템 개발에 있어 간과되어 오고 있는 상태 및 모니터링 시스템 개발을 추진함으로써 해상풍력발전시스템의 사용성 및 안전성을 극대화하고, 유지관리 비용을 최소화함으로써 전체 경제성을 향상시킬 수 있음
- ▶ 궁극적으로는 신재생에너지 시장의 지속적 확대와 대국민 홍보를 강화하는데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단됨
- ▶ 따라서 우리 연구원을 중심으로 해상풍력발전시스템의 모니터링 시스템 개발연구를 적극 추진할 필요가 있을 것임

### 7.2. 정책적 시사점

#### 정책적 시사점

- ▶ 저탄소 녹색성장과 관련하여 향후 신재생에너지 관련 시장의 지속적 확대가 예상되는 시점에서 상태 및 건전도 모니터링에 관한 연구를 추진하는 것은 매우 시의적절하다 할 수 있음
- ▶ 특히 해상풍력발전시스템의 비용 중 25%를 차지하는 운영 및 유지관리 비용을 최소화하기 위해서 원격 모니터링 시스템의 구축이 반드시 요구된다고 할 때 이들 기술을 국산화하는 것은 향후 외국 기술의 무분별한 도입을 방지함과 동시에 중국, 미국 등 향후 해상풍력발전 시장의 큰 부분을 차지할 것으로 예상되는 외국에 기술 및 시스템을 판매함으로써 관련 산업을 신성장 동력산업으로 육성하는데 기여할 수 있을 것으로 기대

## 8. 소요예산

□ 총 연구비 : 120억원 (6년간)

(단위 : 억원)

분 야	1단계			2단계			합 계
	'10	'11	'12	'13	'14	'15	
해상풍력발전시스템 상태 및 건전도 모니터링 시스템 개발	30	30	30	25	3	2	120

## 9. 참고문헌

- [http://ec.europa.eu/research/energy/nn/nn\\_rt/nn\\_rt\\_wind/article\\_1104\\_en.htm](http://ec.europa.eu/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_wind/article_1104_en.htm):  
Overview of current program activities, European Commission
- <http://www.iset.uni-kassel.de/osmr>: Institute of Solar Energy Supply Technology
- 김석현, 유능수, 김윤호. “소형 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링 및 출력 성능 평가” 한국소음진동공학회논문집 : Vol.17 No.2 2007
- 이종원, 정상윤, 정성훈, 이용국, “풍력발전시스템의 상태 모니터링 기술현황” 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회
- 이종원, 허영철, 남용윤, 이근호, 김유성/ “이용배 분포형 광섬유 센서를 이용한 풍력발전기의 기계적 부하 측정 및 모니터링” 한국소음진동공학회논문집 : Vol.17 No.11 2007
- 최형래, 이인혁, 송성근, 강필순, 문채주. “LabVIEW를 이용한 풍력발전기용 모니터링 시스템” 전력전자학회 2005년도 전력전자학술대회 논문집 pp. 663~665 2005. 7
- Delft University Wind Energy Research Institute (Duwind), 2001, “Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe”, Report Ref.: Duwind 2001.006.
- Ghoshal A., Sundaresan M. J., Schulz M. J., Pai P. F., 2000, “Structural health monitoring techniques for wind turbine blades”, J. of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics, 85: 309-324.
- Giebel, G., Juhl, A., Hansen, K.G., Giebhardt, J., Pahlke, T., Waldl, H.P., Rebbeck, M., Brady, O., Ruffle, R., Donovan, M.H., and Bjerger, C., “CleverFarm - A SuperSCADA system for wind farms”, Report, Risø-R-1444(EN), Risoe National Laboratory, Denmark, August 2004
- Guemes J. A. et. al., 1998, “ Strain and damage monitoring of wind turbine blades by piezoelectrics and fiber optic sensors”, Proc. of the ECCM-8, 3,: 357-364.
- ISET, "Advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction and condition monitoring techniques (Offshore M&R)", Final Report, NNE5/2001/710, Institute of Solar Energy Supply Technology, Germany
- Kraemer P., Fritzen C.-P., 2007, “Concept for Structural Health Monitoring of Offshore Wind Energy Plants”, Proc. 6nd Intl. Workshop on SHM, Stanford: 1881-1888.
- Lehmann M., Buter A., Frankenstein B., Schubert F., Brunner B., 2006, “Monitoring System for Delamination Detection-Qualification of Structural Health Monitoring (SHM) Systems”, Conference on Damage in Composite Material CDCM 2006, Stuttgart.
- McGugan M., Sorensen B. F., 2007, “Fundamentals for Remote Condition Monitoring of Offshore Wind Turbine Blades”, Proc. 6nd Intl. Workshop on SHM, Stanford: 1913-1919.

- Nichols, J. M., 2003, "Structural health monitoring of offshore structures using ambient excitation", *Applied Ocean Research*, 25: 101-114.
- ObservEr, 2007, "Worldwide electricity production from renewable energy sources, Ninth inventory" available on: <http://www.energies-renouvelables.org>.
- Pitchford W, 2007, "Impedance-Based Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades", Master Thesis Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Rohrmann R. G., Rucker W., Thons S., 2007, "Integrated monitoring Systems for Offshore Wind Turbines", *Proc. 6nd Intl. Workshop on SHM*, Stanford: 1897-1904.
- Rohrmann R., Rucker W., Said S., 2005, "IMO-WIND An integrated monitoring system for offshore wind energy turbines", 6th Intl. Conf. on Structural Dynamics (on CD-ROM), Paris.
- Rolfes R, S. Zerbst , G. Haake, J. Reetz and P. Lynch, 2007, "Integral SHM-System for Offshore Wind Turbines using Smart Wireless Sensors" 6th Intl. Workshop on SHM, Stanford: 1889-1896.
- Seeliger, A., Schaaf, C., Lachmann, J., Meßner, A., Steinhusen, C., Schlecht, B., Schulze, T., Hermsmeier, J., and Nahrath, T., "Combination of multi body system simulation, electrical simulation and condition monitoring - A powerful research development", *Proceedings of European Wind Energy Conference*, Paper 876, Athens, Greece, May 2006
- Verbruggen, T.W., "Wind turbine operation & maintenance based on condition monitoring: WT-OMEGA", Final Report, ECN-C-03-047, Energy research Centre of the Netherlands, Netherlands, April 2003
- Volkmer P., Kuhl A., Muller F., Schlbach D., Volkmer D., 2006, "Continuous Natural Frequency monitoring of Rotor Blades for Detection of Damages, Ice-foundation and Dynamik Overloads", *Deutsche Windenergiekongress*, Bremen, Germany.
- Watson, S. and Xiang, J., "Real-time condition monitoring of offshore wind turbines", *Proceedings of European Wind Energy Conference*, Paper 719, Athens, Greece, May 2006

## Chapter 2. 연구논문성과

Submitted to *Journal of Sound and Vibration*

Substructural Identification of Flexural Rigidity for Beam-Like Structures

# Substructural Identification of Flexural Rigidity for Beam-Like Structures

Ki-Young Koo<sup>1)</sup> and Jin-Hak Yi<sup>2)</sup>

Authors' Affiliation:

<sup>1)</sup> Research Associate, Dept. of Civil & Structural Engineering, Sheffield University, U.K.

<sup>2)</sup> Senior Research Scientist, Korea Ocean Research and Development Institute, Korea

**All correspondences concerning this paper should be addressed to:**

Jin-Hak Yi

Senior Research Scientist

Coastal Engineering and Ocean Energy Research Department

Korea Ocean Research and Development Institute

Ansan, Gyeonggi 426-744

Korea

Tel: +82-31-400-7811 Fax: +82-31-408-5823

E-mail: [yjh@kordi.re.kr](mailto:yjh@kordi.re.kr)

## Abstract

This study proposes a sub-structural identification method incorporating one variable optimization to estimate the flexural rigidity of a beam-like structure such as a bridge deck, which is one of the major indices of structural integrity of a structure. In bridges, the boundary condition of a superstructure is changed significantly by aging and environmental changes to the bridge bearings, the actual conditions of which are generally unknown. To handle the problems related to boundary conditions efficiently, a substructural identification method is proposed to evaluate the flexural rigidity regardless of the actual boundary conditions by isolating an identification area within the internal substructure. The proposed technique is very simple and effective as it utilizes one-variable optimization to evaluate the flexural rigidity. The proposed method is verified through (1) an experimental study using a simple beam model with several different boundary conditions, (2) a numerical simulation study using a steel box-girder bridge model and (3) an experimental study using a steel box-girder bridge with different structural damage conditions.

Keywords: sub-structural identification, beam theory, power spectral density, optimization, flexural rigidity

## 1. Introduction

To maintain civil infra-structures safely and economically, it is very important to utilize major indices reflecting the structural integrity and to monitor changes of those values periodically. In the case of bridges, structural integrity can be represented by the remaining fatigue life, load carrying capacity and so on. Among them, the load carrying capacity, which indicates the maximum allowable live load for a certain bridge, is the most popularly used index for the decision of the structural integrity of a bridge and for bridge rating and maintenance. The load carrying capacity is related to many structural properties including flexural and torsional rigidities, deck mass, and boundary conditions. However, the flexural rigidity of a bridge deck is the most governing factor.

Therefore, the monitoring of flexural rigidity of a bridge is an essential and important procedure for a bridge management system. To evaluate the flexural rigidity of a bridge deck, several methods such as a static loading test and a dynamic test can be introduced. However, it is necessary to consider and rationally model the boundary conditions at the abutment and bridge piers for a reliable evaluation of flexural rigidity of a bridge deck.

In cases of existing bridges in operation, the bridges' supports may not behave according to the designed supporting conditions even though they were fabricated and installed as typical bearings such as rollers and hinges due to aging and other environmental changes [1-3]. For example, rollers can behave similarly to fixed shoes due to aging and deterioration, and this can reduce the vertical deflections by constraining the rotational deflection at the boundaries under live loads, and therefore it can over-estimate the load carrying capacity when the boundary conditions are not correctly reflected. In this study, a new concept for a substructural identification method is proposed incorporating one variable optimization for the flexural rigidity estimation of a beam-like structure without considering boundary conditions and also without carrying out complex and complicated experimental modal analysis. The applicability of the proposed method is verified through numerical simulation and model tests for a beam model and a steel box-girder bridge model.

The substructural identification method can efficiently reduce the measuring points and identified parameters by constraining the estimation area within an isolated internal substructure, and hence the instability during the identification process is dramatically reduced. This approach has been developed by many researchers over the last two decades. Oreta and Tanabe [4] proposed a Kalman Filter-based substructural identification for estimating structural damages, and Yun and Lee [5] proposed a substructural identification using the ARMAX model in a time domain to identify damage in frame structures. Yun and Lee utilized the sequential prediction error method while Oreta and Tanabe incorporated Kalman filtering. While they utilized time domain substructural identification methods, Koh et al. [6] proposed an iterative method combining substructural

identification and progressive identification in frequency domain, and Koh and Shankar [7] proposed a substructural identification method that does not require interface measurements to avoid problems with the interface measurements. However, Koh et al and Koh and Shaker verified their proposed methods using only a series of numerical simulations, and the real application has not yet been fully verified.

## 2. Formulation of substructural identification using one-variable optimization

Flexural rigidity of a beam-like structure such as a slab-girder bridge and a box-girder bridge is the most important structural parameter determining the load carrying capacity of the bridge. It is also a very simple and intuitive parameter used to evaluate the deterioration level due to structural damages and aging. For identification of the flexural rigidity of the bridge, the boundary condition at the abutments and the bridge piers need to be carefully considered since the structural response is a function not only of the flexural rigidity but also of the boundary condition which is apt to change due to temperature and humidity change as well as aging. However, it is very difficult to examine the concurrent status of the boundary conditions in operation.

Hence, a new concept for the sub-structural identification technique is proposed based on the one variable optimization, and this approach is very easy and simple to implement to an existing structural health monitoring system by utilizing the divide and conquer strategy especially for complex civil infra-structures with numerous structural members.

The fundamental concept of the proposed substructural identification is summarized in Figure 1. First, an internal substructure of interest can be selected for identification, and then the vertical accelerations at both the interfaces  $\ddot{d}_1(t)$  and  $\ddot{d}_3(t)$ ; and the rotational accelerations at the same positions  $\ddot{\phi}_1(t)$  and  $\ddot{\phi}_3(t)$  are measured simultaneously with the vertical acceleration at the center of the internal substructure  $\ddot{d}_2(t)$ . It should be noted that  $\ddot{d}_2(t)$  is a function of the input excitations

$\ddot{d}_1(t)$ ,  $\ddot{\phi}_1(t)$ ,  $\ddot{d}_3(t)$  and  $\ddot{\phi}_3(t)$  and the dynamic properties of the substructure including flexural rigidity can be estimated by identification based on the input and output measurements.

The transfer function  $H(\omega)$  between the boundary inputs and the internal output is derived from the Bernoulli-Euler beam theory in Section 2.1 and the flexural rigidity estimation procedure is formulated based on the one variable optimization in Section 2.2.

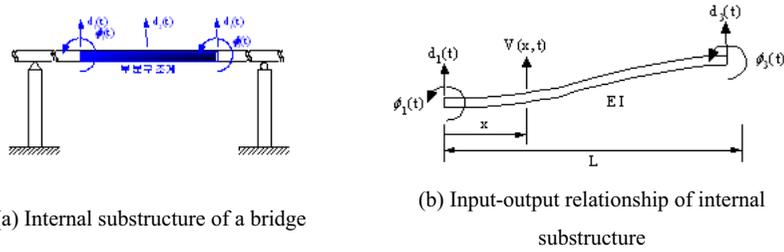


Figure 1. Substructural system of a bridge for estimating flexural rigidity

## 2.1. Transfer function of Substructure

The dynamic governing equation of the Bernoulli-Euler beam is represented as follows,

$$(EIv'''' + \rho A \ddot{v} = 0 \quad (1)$$

where  $EI$ ,  $\rho$ , and  $A$  are the flexural rigidity, the mass density, and the sectional area of the beam, respectively. By using separation of variables  $v(x,t) = X(x)T(t)$ , the partial differential equation can be transformed into a set of two ordinary differential equations with respect to  $X(x)$  and  $T(t)$  as follows,

$$\frac{X^{(4)}}{X} = -\frac{\rho A T''}{EI T} = \lambda^4 \quad (2)$$

where  $\lambda^4 = \rho A \omega^2 / (EI)$ .

The general solution of PDE in Eq (1) can be derived as in Eq (5) by combining  $X(x)$  and  $T(t)$ ,

$$V(x,t) = X(x)T(t) = [\sinh(\lambda x) \quad \cosh(\lambda x) \quad \sin(\lambda x) \quad \cos(\lambda x)] \mathbf{C} e^{i\omega t} \quad (3)$$

where  $\mathbf{C} = [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4]^T$  is a coefficient column vector.

The particular solution can be obtained considering the time varying boundary conditions at the interfacial locations as follows,

$$v(0,t) = d_1(t), \quad v(L,t) = d_3(t), \quad \left. \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \phi_1(t), \quad \left. \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} = \phi_3(t) \quad (4)$$

The boundary condition above constitutes the following set of linear algebraic equations as,

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \lambda & 0 & \lambda & 0 \\ \sinh \lambda L & \cosh \lambda L & \sin \lambda L & \cos \lambda L \\ \lambda \cosh \lambda L & \lambda \sinh \lambda L & \lambda \cos \lambda L & -\lambda \sin \lambda L \end{bmatrix} \mathbf{C} e^{i\omega t} = \begin{Bmatrix} d_1(t) \\ \phi_1(t) \\ d_3(t) \\ \phi_3(t) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

It is worthy to note that the r.h.s of Eq (5) which shows the inputs of  $\mathbf{U}(t)$  to the substructural system should be in the following form in order to derive the particular solution.

$$\{d_1(t) \quad \phi_1(t) \quad d_3(t) \quad \phi_3(t)\}^T \triangleq \mathbf{U}(t) = \mathbf{D} e^{i\omega t} \quad (6)$$

where  $\mathbf{D}$  is an arbitrary coefficient column vector.

By using the coefficient column vector  $\mathbf{C}$  from Eq. (5), the particular solution is obtained as,

$$v(x,t) = [\sinh \lambda x \quad \cosh \lambda x \quad \sin \lambda x \quad \cos \lambda x] \mathbf{A}^{-1} \mathbf{U}(t) \quad (7)$$

where,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \lambda & 0 & \lambda & 0 \\ \sinh \lambda L & \cosh \lambda L & \sin \lambda L & \cos \lambda L \\ \lambda \cosh \lambda L & \lambda \sinh \lambda L & \lambda \cos \lambda L & -\lambda \sin \lambda L \end{bmatrix} \quad (8)$$

The transfer function  $\mathbf{H}(x,\omega)$  of  $v(x,t)$  with respect to the boundary movement  $\mathbf{U}(t)$  can be obtained by Fourier transform of Eq. (7)

$$\mathbf{H}(x,\omega) = \frac{\mathcal{F}\{V(x,t)\}}{\mathcal{F}\{\mathbf{U}(t)\}} = [\sinh \lambda x \quad \cosh \lambda x \quad \sin \lambda x \quad \cos \lambda x] \mathbf{A}^{-1} \quad (9)$$

The transfer function for  $x = L/2$  can be derived as

$$\mathbf{H}(\omega)_{x=L/2} = [h_1(\omega) \quad h_2(\omega) \quad h_3(\omega) \quad h_4(\omega)] \quad (10)$$

where  $h_i(\omega)$ 's are

$$h_1(\omega) = h_3(\omega) = \frac{(1+i) \left( \sin \frac{\lambda L}{2} + \sinh \frac{\lambda L}{2} \right)}{\sin(1+i) \frac{\lambda L}{2} + \sinh(1+i) \frac{\lambda L}{2}}$$

$$h_2(\omega) = -h_4(\omega) = \frac{(1+i) \frac{1}{\lambda} \left( \cos \frac{\lambda L}{2} - \sinh \frac{\lambda L}{2} \right)}{\sin(1+i) \frac{\lambda L}{2} + \sinh(1+i) \frac{\lambda L}{2}}$$

The transfer function of Eq (10) can be further simplified using the non-dimensional variable  $\xi$  as

$$H(\xi) = [\bar{h}_1(\xi) \quad L\bar{h}_2(\xi) \quad \bar{h}_3(\xi) \quad L\bar{h}_4(\xi)] \quad (11)$$

where

$$\xi = \lambda L = \sqrt[4]{\rho A / EI} \sqrt{\omega} L \quad (12)$$

$$\bar{h}_1(\xi) = \bar{h}_3(\xi) = \frac{(1+i) (\sin(\xi/2) + \sinh(\xi/2))}{\sin((1+i)\xi/2) + \sinh((1+i)\xi/2)} \quad (13)$$

$$\bar{h}_2(\xi) = -\bar{h}_4(\xi) = \frac{(1+i) (\cos(\xi/2) - \cosh(\xi/2)) / 2}{\xi [\sin((1+i)\xi/2) + \sinh((1+i)\xi/2)]} \quad (14)$$

## 2.2. Estimation of Flexural Rigidity

The input and output relationship between the responses at the interfaces and the center of the internal substructure can be represented as

$$\begin{aligned} d_2(\omega) &= \mathbf{H}(\xi) [d_1(\omega) \quad \phi_1(\omega) \quad d_3(\omega) \quad \phi_3(\omega)]^T \\ &= \bar{h}_1(\xi) d_1(\omega) + \bar{h}_2(\xi) L \phi_1(\omega) + \bar{h}_3(\xi) d_3(\omega) + \bar{h}_4(\xi) L \phi_3(\omega) \end{aligned} \quad (15)$$

By using the relationships  $\bar{h}_3(\xi) = \bar{h}_1(\xi)$  and  $\bar{h}_4(\xi) = -\bar{h}_2(\xi)$ , the equation above can be simplified

as a 2-inputs and 1 output system as follows

$$d_2(\omega) = \bar{h}_1(\xi) u_1(\omega) + \bar{h}_2(\xi) L u_2(\omega) \quad (16)$$

where  $u_1(\omega) \equiv (d_1 + d_3)(\omega)$ ,  $u_2(\omega) \equiv (\phi_1 - \phi_3)(\omega)$ . By multiplying  $\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} d_2^*(\omega)$  on both sides of

Eq (16), a representation of spectral densities can be obtained as follows for convenience of the calculation and interpretation of the terms.

$$S_{yy}(\omega) = \bar{h}_1(\xi) S_{1y}(\omega) + \bar{h}_2(\xi) L S_{2y}(\omega) \quad (17)$$

Finally, the unknown parameter  $\xi$  can be obtained by optimizing to minimize the error norm as follows

$$\min J(\xi) = \int_{\Omega} \left\{ S_{yy}(\omega) - (\bar{h}_1(\xi) S_{1y}(\omega) + \bar{h}_2(\xi) L S_{2y}(\omega)) \right\}^2 d\Omega \quad (18)$$

where  $\Omega$  is the integral domain, i.e. the frequency range to be used for the identification. Usually, a frequency range around the first natural frequency is preferable. The Bernoulli-Euler beam theory assumes that the flexural deflection is dominant by ignoring the shear deformation. In practice, this assumption requires that the ratio of the length over the height of the beam is greater than 10, i.e.  $L/h \gg 10$ . The mode shape of the first natural frequency fits the assumption best.

Eq (24) is a one variable optimization problem, and the unknown variable  $\xi$  can be solved by any kind of optimization procedure such as a steepest-descent method. Using the optimal solution  $\xi_{opt}$ , the flexural rigidity  $EI$  can be estimated as follows based on Eq (12).

$$EI_{estimated} = \rho A \omega_1^2 L^4 / \xi_{opt}^4 \quad (19)$$

The proposed algorithm for estimating flexural rigidity using 4 responses at the interfaces and 1 response in the internal substructure is summarized as shown in Figure 4.

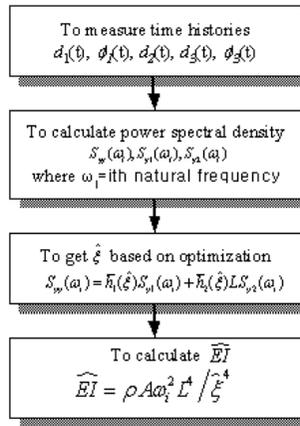


Figure 2. Procedure for flexural rigidity estimation using substructural identification

### 3. Verification Study

#### 3.1. Simple beam structure with different boundary conditions

The proposed method can estimate the flexural rigidity of a bridge deck without considering the boundary conditions by incorporating the substructural identification. To validate the applicability, the test model which can change the boundary conditions easily to fixed, roller and friction is designed and several dynamic tests are carried out with different boundary conditions. The substructure is set as the internal 1.4m part among the beam with a 2m length, and the two vertical accelerations at the interface parts and the vertical acceleration at the center of the substructure are measured. The vertical vibration is obtained using the mean of the adjacent two accelerations and the rotational acceleration is obtained by dividing the difference of the adjacent two accelerations with the distance between the two sensors.

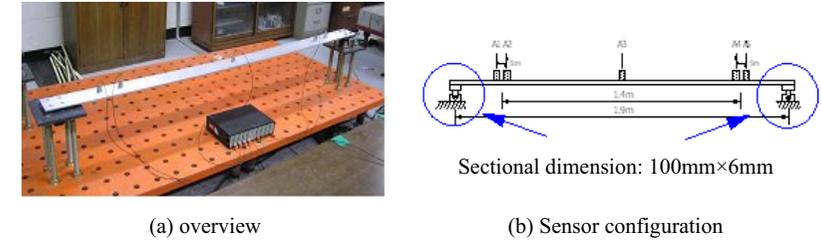
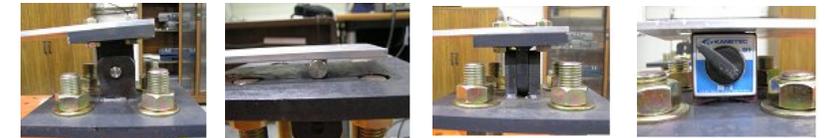


Figure 3. Simple beam test structure

Relaxation tests are performed for the 4 different boundary conditions in Figure 4 and Table 1. Figure 5 shows the acceleration responses for A1~A5 for Case 1 and Figure 6 shows the approximated responses at the interfaces ( $\ddot{u}_1(t)$ ,  $\ddot{\phi}_1(t)$ ,  $\ddot{u}_3(t)$  and  $\ddot{\phi}_3(t)$ ) and the output response at the internal substructure ( $\ddot{d}_2(t)$ ). Fig 7 summarizes the PSD function of  $\ddot{d}_2(t)$ .



(a) Hinge Condition (b) Roller Condition (d) Fixed Condition (e) Friction Condition

Figure 4. Different Boundary Conditions

Table 1. Test Scenarios

Boundary Condition	1	2	3	4
Left end	Fixed	Roller	Roller	Friction
Right end	Fixed	Fixed	Hinged	Hinged

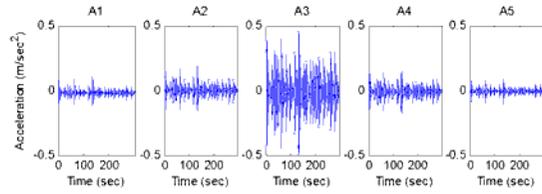


Figure 5. Measured acceleration for Case 1

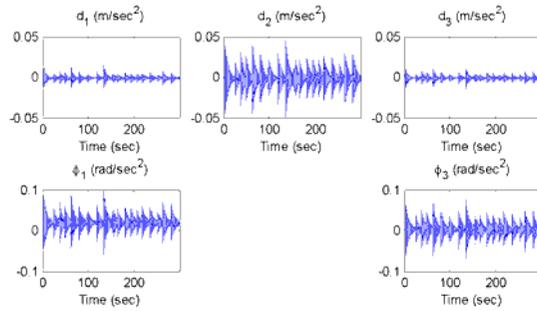


Figure 6. Input and Output Data for Case 1

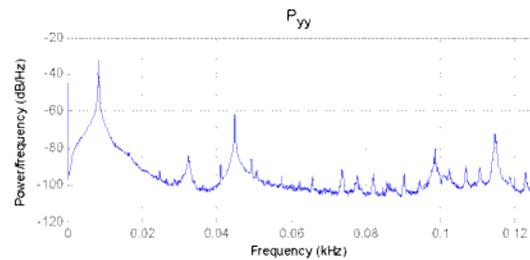


Figure 7. PSD function of output response at the internal substructure for Case 1

Finally, the nondimensional variable  $\xi$  is obtained by optimizing the PSD relationship of the substructural system around the first resonant frequency. The flexural rigidity ( $EI$ ) is then estimated using Eq (25). The estimated values are summarized as shown in Table 2. From the results, we can

observe that the first natural frequency of the system with different boundary conditions are changed from 8.179Hz for Case 1 (fixed-fixed) to 5.981Hz for Case 2 (roller-fixed), 3.845Hz for Case 3 (roller-hinged), and 4.883Hz for Case 4 (friction-hinged) by changing the boundary conditions. Even though the first natural frequency of substructure varies significantly, the flexural rigidity is very precisely and accurately estimated by the proposed method. The maximum and minimum values are 131.1Nm for Case 2 and 122.0Nm for Case 1, and the relative difference between maximum and minimum estimates of estimated values is about 7.2%. The relative errors of the estimates with respect to the exact value (128.2Nm) are -4.8%~2.2%. The minimal amount of errors may be due to the approximation step for the acceleration measurements at the adjacent two points to the mean and difference signals. The proposed method can be applied to estimate flexural rigidity in the condition in which the boundary conditions are not fully understood.

Table 2. Estimated Flexural Rigidity (Exact Value: 128.2Nm)

Cases	$f_i(\text{Hz})$	$R_1 = \frac{2d_2}{u_1}$	$R_2 = \frac{2}{L} \frac{d_2}{u_2}$	$\xi$	$EI$ (Nm)	Error(%)
1	8.179	5.108+0.019i	0.531+0.001i	3.436	122.0	-4.8
2	5.981	3.041+0.020i	0.500+0.001i	2.886	131.1	2.2
3	3.845	2.485+0.015i	0.478-0.002i	2.346	124.0	-3.2
4	4.883	2.820+0.109i	0.472+0.004i	2.615	129.6	1.0

### 3.2. Application to Steel Box-Girder Bridge Model: Numerical Simulation Case

The proposed method is verified using the numerical simulation data for the steel box-girder bridge as shown in Figure 8. The example bridge is comprised of 5 steel box blocks and each block has a 2m length. The upper part is not fully covered by steel plate. This bridge is supported by a roller and hinge 1m apart from each end. Numerical simulation is performed using the commercial numerical analysis program SAP2000, and band limited white noise is used for the input loading condition.

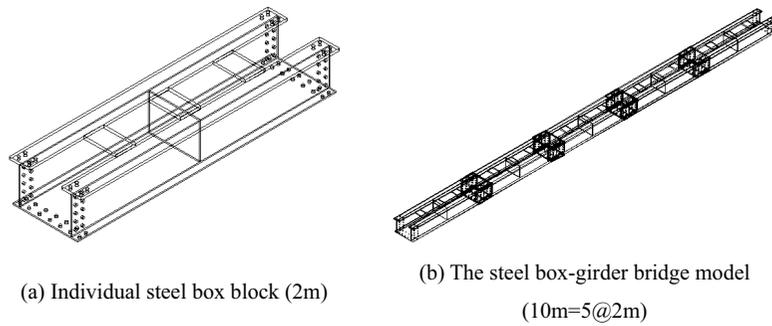


Figure 8. Steel box bridge model



Figure 9. Numerical analysis model (SAP2000)

In this example study, the consistency is verified using 3 different substructure systems. As shown in Figure 10, we divided the internal substructure into 3 different cases. For each case, the vertical and rotational accelerations at the boundaries are obtained using the numerical simulation results. And the flexural rigidity is estimated from the calculated acceleration responses.



Figure 10. 3 Different cases for the substructural system

Figure 11 shows the input and output acceleration responses at the both ends and at the center of the internal substructure and Figure 12 shows the PSD function of the internal substructure  $\ddot{d}_2(t)$ . The first resonant frequency ranges are utilized for the optimization procedure, and the estimated results are summarized in Table 3. Because the internal substructures differ from each other but the whole structure includes the deck and boundary conditions, the first natural frequencies are the same as 12.64Hz. Since the length of the internal substructure differs, the nondimensional variable  $\xi$  is estimated differently. In the case of substructure 1, the internal substructure is longer than system 2 and 3, and  $\xi$  is estimated as larger. Since the nondimensional variable  $\xi$  is defined as  $\lambda L$  in Eq (12),  $\xi$  is proportional to the substructure length ( $L_1 = 6m$ ,  $L_2 = L_3 = 4m$ ) when  $\lambda$  is constant. It can therefore be expected that the nondimensional variable  $\xi_1$  is equal to  $1.5\xi_2$  or  $1.5\xi_3$ . The results show that the  $\xi_1 / \xi_2$  is about 1.49 as expected. In addition, the estimated flexural rigidity is very accurately estimated within 2% estimation error.

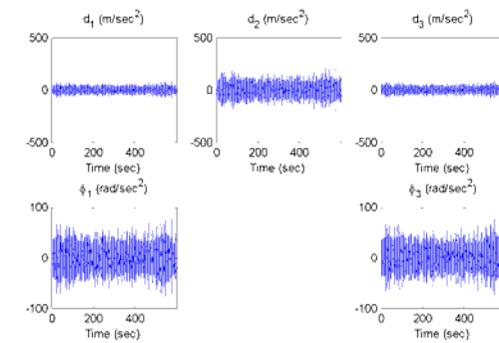


Figure 11. Input-output time histories of Substructure #1

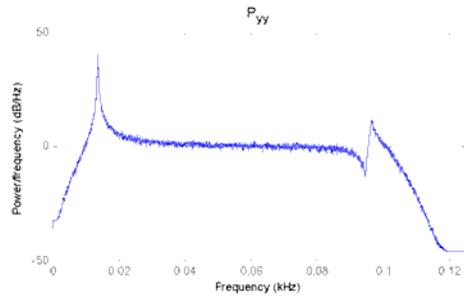


Figure 12. Power Spectral Density of Substructure #1

Table 3. Estimated flexural rigidity

Substructure No.	$f_j$ (Hz)	$R_1 = \frac{2d_2}{u_1}$	$R_2 = \frac{2}{L} \frac{d_2}{u_2}$	$\xi$	$EI$ (Nm)	Error(%)
1	13.641	2.597+0.000i	0.458+0.000i	2.3235	4.54e+007	0.22
2	13.641	1.412+0.000i	0.902-0.000i	1.5564	4.45e+007	-1.76
3	13.641	1.413+0.000i	0.900+0.000	1.5565	4.45e+007	-1.76

### 3.3. Application to Steel Box-Girder Bridge Model: Experimental Case

In this example study, the structural damages are artificially inflicted by loosening bolts between steel box blocks and the equivalent flexural rigidity of the superstructure is estimated using the proposed method. Figure 13 shows the 6 damage scenarios. The Damage Case 1, the exterior bolts in the upper connecting plates between the second and the third blocks are loosened. In Damage Case 2, all the bolts are loosened in the same damaged plate for Damage Case 1. In Damage Case 3, the two rows of the side connecting plates are additionally loosened, and in Damage Case 4 all the bolts are loosened in the upper plate between the third and fourth blocks additionally. In Damage Case 5, the bolts in the upper plate between the fourth and fifth blocks are loosened instead of the upper plate between the third and fourth blocks (in Damage Case 4). In Damage Case 6, the bolts in the upper plate and the side plate connecting the second and third blocks are tightened, and this can

be considered as the partially repaired condition.

The acceleration responses at two boundaries and the internal substructure are measured and the mean acceleration between two adjacent sensors is used as vertical acceleration while the difference acceleration between adjacent sensors is used to calculate rotational acceleration as shown in Figure 15. PSD function is shown in Figures 16 and 17. The vertical and rotational responses are approximately obtained by averaging and differencing the responses of the adjacent two sensors.

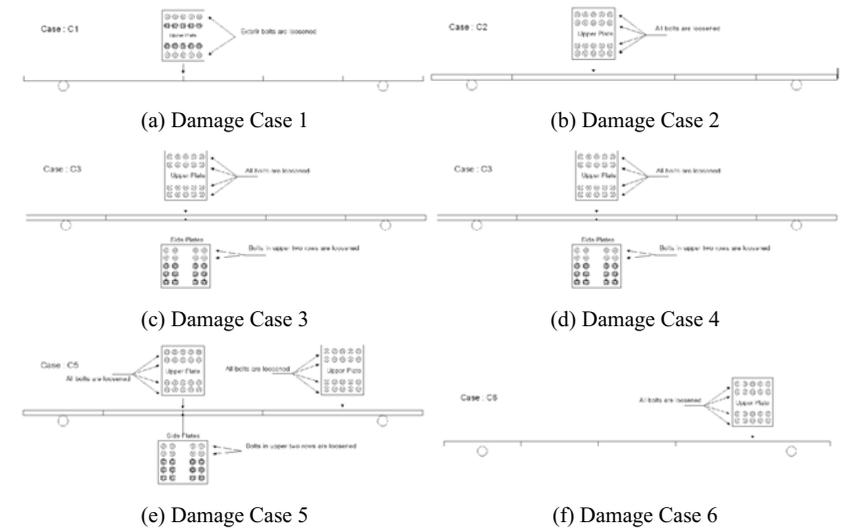


Figure 13. Inflicted Damage Scenarios



Figure 14. Substructure used for estimating flexural rigidity

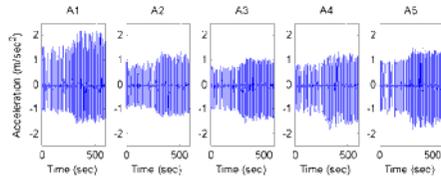


Figure 15. Measured acceleration time histories

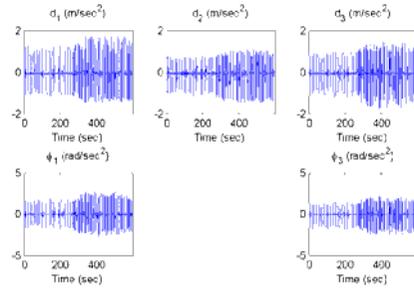


Figure 16. Input and output responses for prescribed substructural system

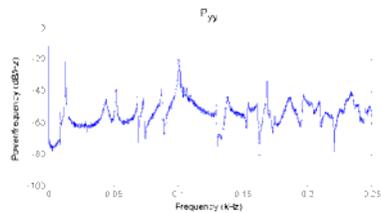


Figure 17. PSD of output responses at the center of substructure

The estimated results for 6 damage cases are summarized at Table 4 and the estimated flexural rigidity is gradually decreased as the structural damage is more severe from Damage Case 1 to Damage Cases 2, 3, 4 and 5. However flexural rigidities are slightly increased from Damage Case 2 to Damage Case 3 by about 0.8% and it is expected that the measurement noise and approximation errors are affecting the accuracy of the estimation. Damage Case 4 and Damage Case 5 are almost the same and the estimated results also show that two damages are not significantly deviated. For

Damage Case 6, since the bolts in the connecting plates between the second and third blocks are tightened it can be expected that the flexural rigidity is increased. The result show that the flexural rigidity is increased from 12.5MNm to 14.2MNm and this estimated flexural rigidity is lower than that of intact case and greater than that of Damage Case 1, even though the Damage Case 1 is more slight damage than Damage Case 6, which means the damage in side connecting part is not severer than the structural damage in central part.

Table 4. Estimated flexural rigidity for each damage case

Damage Cases	$f_1$ (Hz)	$R_1 = 2 \frac{Y(\omega)}{u_1(\omega)}$	$R_2 = \frac{1}{L} \frac{Y(\omega)}{u_2(\omega)}$	$\xi$	$EI$ (Nm)	$EI_i / EI_o$ (%)
Intact	13.245	1.640-0.000i	0.772+0.009i	2.284	1.51E+07	0.00
1	13.123	1.639-0.001i	0.787+0.011i	2.332	1.37E+07	-9.27
2	12.695	1.650-0.001i	0.778+0.008i	2.333	1.28E+07	-15.23
3	12.299	1.654-0.004i	0.761+0.019i	2.289	1.29E+07	-14.57
4	11.932	1.658-0.007i	0.757+0.022i	2.284	1.23E+07	-18.54
5	12.207	1.645-0.002i	0.773+0.017i	2.301	1.25E+07	-17.22
6	13.153	1.628-0.002i	0.793+0.014i	2.314	1.42E+07	-5.96

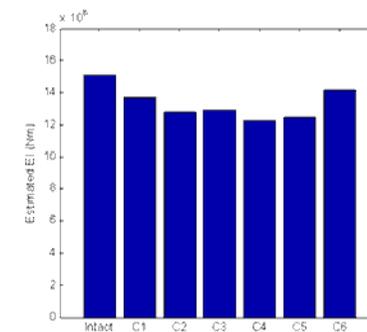


Figure 18. Estimated Flexural rigidity according to the damage cases

#### 4. Conclusions

The substructural identification method is proposed to estimate the flexural rigidity of a beam-like bridge regardless of the actual boundary conditions in operation. The proposed method is fairly simple and effective since it only requires five acceleration measurements around the substructure and single variable nonlinear optimization. As a result, it is verified that the proposed method can estimate the flexural rigidity of a beam-type structure even though the boundary conditions are changed significantly through experimental study using a simple beam model. Also, the method is verified regardless of the definition of internal substructure through numerical study using a steel box-girder bridge model. Finally, the equivalent flexural rigidities of the bridge can be easily estimated by the proposed method.

#### Acknowledgement

This work was supported by the KORDI Research Fund (Grant No. PE9830T) in Korea.

#### References

- [1] Sohn, H., Dzwonczyk, M., Straser, E.G., Kiremidjian, A.S., Law, K.H. and Meng, T. An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28 (1999) 879-897.
- [2] Alampalli, S. Effects of testing, analysis, damage, and environment on modal parameters. *Mechanical Systems and Signal Processing* 14(1) (2000) 63-74.
- [3] Peeters, B. and De Roeck, G. (2001) One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 30 (2001) 149-171.
- [4] Oreta, A.W.C. and Tanabe, T. (1993) Element identification of member properties of framed structures. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 120(7) 1961-1976.
- [5] Yun, C.B., and Lee, H.J. Substructural identification for damage estimation of structures. *Structural Safety* 19(1) (1997) 121-140.
- [6] Koh, C.G., Hong B., and Liaw, C.Y. Substructural and progressive structural identification

methods. *Engineering Structures* 25 (2003) 1551-1563.

- [7] Koh, C.G., and Shankar, K. Substructural identification method without interface measurement. *Journal of Engineering Mechanics* 129(7) (2003) 769-776.