

# 케이블교량 구조건전성모니터링 기술의 현재

## The State of the Arts - Structural Health Monitoring Technology of Cable-Supported Bridges



박 종 철\*

\*한국도로공사 도로교통기술원 구조연구그룹 전임연구원

### 1. 서 론

2000년대 들어 서해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 대형 교량이 완공된 것을 기점으로 현재 건설중인 국내 최장의 인천 대교를 포함하여 서·남해안의 국도 노선 상에 다수의 케이블교량이 설계·시공되고 있다. 일반적으로 케이블교량은 케이블로 지지되는 교량(cable-supported bridge)의 줄임말로써, 사장교(cable-stayed bridge)와 현수교(cable-suspended bridge) 및 두 교량의 복합형태를 포함하는 교량형식을 의미한다.

이러한 서해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 케이블교량에는 체계적인 유지관리와 안전성 평가를 위하여 전산화된 유지관리시스템과 계측시스템이 구축되어 운영되고 있다. 이들 교량에 있어서 계측시스템의 일부분으로 적용된 구조건전성모니터링(SHM, Structural Health Monitoring)은 교량관리의 한 분야로써 지난 십여 년간 세계적으로 많은 발전을 이뤄왔다.

본고에서는 아직은 보편화 되지않은 구조건전성모니터링 기술의 현황에 대한 고찰을 통해 관련 연구자와 실무자의 관심을 도모하고자 하며, 특히 구조건전성모니터링 기

술이 가장 활발히 적용되고 있는 케이블교량의 관점에서 기술하고자 한다.

### 2. 구조건전성모니터링(SHM)

#### 2.1 개 요

Housner<sup>1)</sup>는 SHM을 “the use of in-situ, nondestructive sensing and analysis of structural characteristics, including the structural response, for detecting changes that may indicate damage or degradation”이라고 정의하였다. 즉, 구조계의 손상이나 기능저하에 의해 나타나는 변화를 감지하기 위한 현장 비파괴 센싱, 구조계 해석 및 구조 응답의 적용을 의미한다. 그러나 현재는 많은 관련 기술 및 연구의 발전과 더불어 구조계의 손상을 진단하고 상태를 평가하는 수준까지의 의미로 받아들여지고 있다. 여기에 자가진단 및 조치가 가능한 스마트(smart)개념이 도입되고 있지만, 아직은 초보적인 단계로 생각된다.

Regional SHM	· 지진, 재해와 같이 지역(regional) 네트워크 수준에서의 모니터링 예) 지진경보시스템
System-Level SHM	· 교량, 건물과 같이 한 시스템(system) 수준에서의 모니터링 예) 서해대교 계측시스템
Component-Level SHM	· 구조계를 구성하는 각 요소(component) 수준에서의 모니터링 예) 케이블 진동제어용 댐퍼

그림 1 구조건전성모니터링(SHM)의 범위

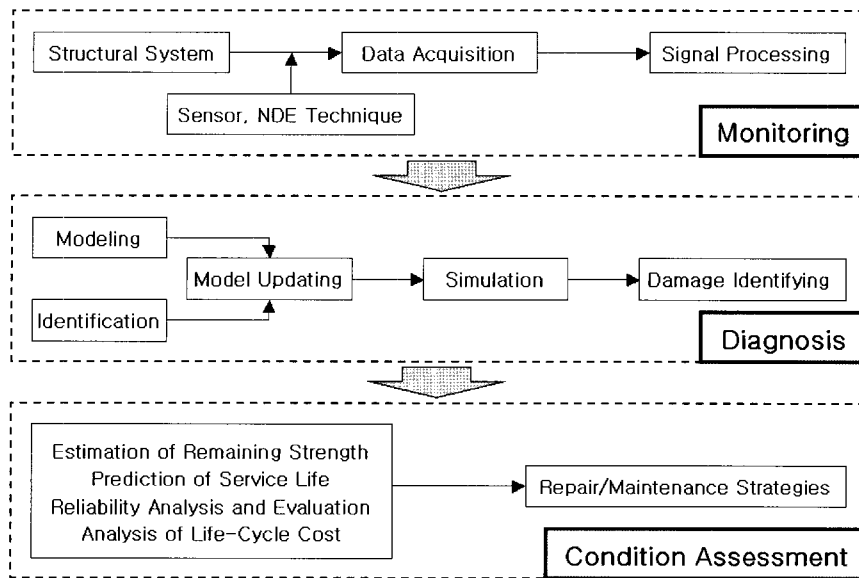


그림 2 구조건전성모니터링(SHM)의 구성요소

표 1 구조건전성모니터링(SHM) 기술이 적용된 주요 케이블교량

국 가	사장교	현수교
한 국	서해(470m), 진도(344m), 돌산(280m), 영흥(240m), 삼천포(230m), 올림픽(300m)	남해(404m), 영종(300m), 광안(500m)
중 국	Kap Shui Mun(430m), Ting Kau(475m)의 11개교	Tsing Ma(1377m) 의 3개교
유 럽	Helgeland(425m), Skarnsundet(530m), Faro(290m)	Great Belt(1624m)
일 본	Meiko Nishi(405m)	Seto(1100m), Akashi Kaiko(1991m)
미 국	Sunshine Skyway(366m), Fred Hatman(381m)	Golden Gate(1280m), Vincent Thomas(457m), New Carquinez(728m)
기 타	Neva(러시아, 382m) Pereria-Dos Quebradas(콜롬비아, 211m)	

주) 괄호안의 수치는 주경간장을 의미함

SHM의 범위는 그림 1과 같이 크게 세 가지로 분류할 수 있으며, 시스템 수준(system-level)에서의 모니터링을 통상적인 의미의 SHM으로 받아들이고 있다.

SHM 시스템의 구성요소는 그림 2와 같이 (1) 구조물에 센서를 설치하여 데이터를 받고 이를 신호처리 하는 모니터링(monitring), (2) 해석모델과 신호처리된 데이터의 시뮬레이션과 계산을 통한 구조거동과 손상의 판단분석(diagnosis), (3) 안전성, 사용성, 신뢰성, 비용효과 등을 분석하여 효율적인 유지관리 전략을 수립하기 위한 상태평가(condition assessment)로 나눌 수 있다.

## 2.2 SHM 적용현황

항공, 우주, 기계, 자동차 분야와는 달리 토목 분야에서는 구조계가 지닌 동특성을 이용하여 구조계를 식별하는 SI(System Identification)나 SHM이 제한적으로 적용되고 있는데, 이는 제조(manufacture)와는 달리 시공(construction)에 따라 크기, 비용, 수명, 재료성질의 변화, 운영, 재하(load)환

경 등과 같은 많은 불확실성이 존재하기 때문이다. 예를 들면, 불확정변수 중 온도와 같은 환경의 영향은 구조물에 손상이 발생하거나 무거운 차량하중이 구조물에 작용하는 것과 같은 모델 변화를 유발시킬 수도 있다.

현재 세계적으로 다수의 장경간(지간 100m이상) 교량에 구조건전성모니터링 시스템이 설치되어 있다. 대표적인 사례로는 덴마크의 Great Belt교, 캐나다의 Confederation교, 홍콩의 Tsing Ma교, 미국의 Commodore Barry교, 일본의 Akashi Kaiyo교, 한국의 서해대교가 있다.<sup>2)</sup> 참고로 표 1은 구조건전성모니터링 기술이 적용된 주요 케이블교량을 국가별로 나타낸 것이다.

케이블교량의 구조건전성모니터링 적용에 있어 세계적으로 몇 가지 주목할 만한 경향은 (1) 최근 계획 중인 교량에 있어서 모니터링시스템의 설계는 교량설계의 일부분으로써 입찰시 요구되고 있으며, (2) 새로운 교량에 적용되는 장기 모니터링시스템은 교량의 시공과정과 동시에 진행되도록 설계되어 있고, (3) 최근에 고안된 장기 모니터링시스템은 교량의 일체성, 내구성 및 신뢰성 등 다양한

표 2 구조건전성모니터링(SHM) 관련 활동

구분	내용
학회, 기관	<ul style="list-style-type: none"> <li>• International Association for Structural Control and Monitoring(IASCM)</li> <li>• International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructures(ISHMII)</li> <li>• European Association for the Control of Structures(EACS)</li> <li>• Structural Integrity Monitoring Network(SIMoNET)</li> <li>• International Association for Bridge Maintenance and Safety(IABMAS)</li> <li>• The International Society for Optical Engineering(SPIE)</li> <li>• International Association for Structural Safety and Reliability(IASSAR)</li> <li>• The European Network for Structural Assessment Monitoring and Control(SAMCO)</li> <li>• Smart Infra-Structure Technology Center(SISTeC)</li> </ul>
저널	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Structural Control and Health Monitoring</li> <li>• Structure and Infrastructure Engineering-Maintenance, Management, Life-Cycle Design &amp; Performance</li> <li>• Structural Safety</li> </ul>
컨퍼런스	<ul style="list-style-type: none"> <li>• International Conference on Structural Safety and Reliability</li> <li>• International Conference on Inspection, Appraisal, Repairs &amp; Maintenance of Structures</li> <li>• International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructures</li> <li>• International Conference on Structural Condition Assessment, Monitoring and Improvement</li> <li>• World Conference on Structural Control and Monitoring</li> <li>• International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management</li> <li>• SPIE Annual Symposium - Smart Structures and Materials</li> <li>• International Workshop on Structural Health Monitoring</li> <li>• International Modal Analysis Conference</li> </ul>

모니터링 기능이 강조되고 있다. 홍콩의 경우, Tsing Ma 교의 모니터링시스템에서 현재 공사 중인 Stonecutter 교의 모니터링 시스템으로 가면서 발전하였는데, 교량의 안전과 신뢰성 평가를 위해 부식센서, 기압계, 비중계, 그리고 우량계와 같은 환경을 계측할 수 있는 센서가 추가되었다.

### 2.3 SHM 관련 활동

SHM과 관련한 대표적인 학회나 기관, 발행되고 있는 저널, 관련 컨퍼런스를 표 2에 정리하였다.

## 3. 주요 연구동향

### 3.1 분석기술

#### 3.1.1 진동신호 분석

현재 연구 중인 대부분의 SHM 방법은 구조계의 동적 응답으로부터 구조계를 식별하고 손상을 감지하는 데에 중점을 두고 있다. 이러한 진동에 기초한 손상감지기법은 국부적인 강성변화가 구조물의 전체(global) 동특성에 영향을 끼친다는 사실에 근거하며, 진동 데이터로부터 모달 모델을 찾아가는 과정이 SI이다. 손상인식은 모달 모델의 변화에 근거하는데 실험실에서의 단순보와 같은 간단한 모델은 잘 맞지만, 케이블교량과 같은 고차 부정정 구조계에서는 국부적 강성변화가 전체 동특성에 거의 영향을 주

지 않아 실제로는 모드변수를 정확히 또는 빠르게 추출하는 연구수준에 머물러 있다.

고유진동수, 모드형상, 감쇠비와 같은 모드변수는 주파수 영역(frequency domain)에서의 주파수응답함수와 시간영역(time domain)에서의 충격응답함수를 통한 입력과 출력에 근거하여 추출된다. 그러나 케이블교량은 규모와 질량이 커서 가진력(입력)을 주기 어렵기 때문에 출력에만 의존하는 방법을 주로 사용하며, 바람이나 통행차량에 의해 상시 발생하는 미세진동을 이용하는 상시진동실험(AVT, Ambient Vibration Test)이 대표적인 방법이다. 단지 출력에만 의존하는 모드변수 추출방법에는 Peak-picking법, ARMA(AutoRegressive-Moving Average)모델, NEXT (Natural Excitation Technique), SSI(Stochastic Subspace Identification), Maximum Likelihood 주파수영역법 등이 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

#### 3.1.2 패턴인식(pattern recognition)

근래의 국내 케이블교량에는 전산화된 유지관리시스템과 계측시스템이 구축·운영되고 있으며, 방대한 양의 유지관리 및 계측 자료가 축적되고 있다. 이러한 자료는 주로 시간에 따라 관측되는 시계열(time series) 자료가 대부분을 차지하며, 적절한 가공과 분석과정을 거쳐야만 공학적으로 의미를 가진 자료가 된다. 장기적인 모니터링에 있어서 수집된 방대한 양의 정보 데이터로부터 분석·평가를 위해서는 유용한 소수의 통계 데이터로 줄이는 것이 무엇보다 필요하다. 지금까지는

관련 시스템의 조기정착과 안정적인 자료축적에 중점을 두고 운영된 측면이 있으며, 이들 축적된 자료를 어떻게 활용할지에 대한 방안과 연구가 현재 활발히 진행 중에 있다. 이 연구의 주된 방향은 확률과 통계기법의 적용이다.

계측시스템이 적용된 국내 교량에서 지금까지는 계측된 데이터가 단지 정해진 관리치를 벗어나는가를 가지고 구조물의 이상 유무를 판단하는 근거로 활용하는 경향이 있었다. 관리치는 주로 극한상태에서의 설계개념에서 정해지는 값으로써 실제 공용 중인 교량에서 당연히 계측값이 관리치를 벗어나는 상황은 발생하지 않으며, 이를 토대로 구조물이 건전하다고 판단하는 것은 매우 불합리하다. 그럼에도 불구하고 관리치를 설정하여 비교하는 경우가 많은데 이는 편의주의적이며 바람직한 방향이 아니다.

구조계가 평상시나 특수한 상황에서 단·장기적으로 어떠한 거동을 보이고 있는지를 분석하고, 이를 토대로 향후의 거동이 어떻게 될지 예측하는 것이 더 중요하다. 이는 확률과 통계기법의 적용을 통해서만 가능하다. 그러기 위해서는 신뢰할 만한 데이터를 장기간 축적해야 하는데, 이것은 생각만큼 쉽지 않다. 장기간 센서뿐만 아니라 시스템이 정상 작동해야 하고, 전담자가 주기적으로 일차적인 데이터 가공 및 분석을 해야 하고, 구조물의 이력을 지속적으로 관리해야 하기 때문이다.

따라서 제한된 데이터 양 및 데이터 신뢰도 수준에서 행하는 확률기반 해석과 패턴인식기법을 찾는 연구가 최근 늘고 있다. 패턴인식은 어떠한 대상을 인식하는 문제를 다루는 인공지능의 한 분야로써, 차량번호 인식, 지문 인식, X-레이 판독, 주가 예측, 군사목표물 추적 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 패턴인식의 접근법은 분류(classification)와 회귀(regression)를 통한 통계적 접근법, 처리단위(neurons)로 이루어진 망(network)의 응답과정으로 분류를 행하는 신경망 접근법, 패턴의 구조적 유사성을 찾는 구조적 접근법 등이 있다. Ko<sup>2)</sup>는 신경망 접근법인 SVM (Support Vector Machine)를 이용하여 Ting Kau교의 모달 주파수에 대한 온도효과를 분석하는 연구를 수행하였으며, 한국도로공사<sup>3)</sup>에서는 ARX(AutoRegressive

eXogeneous) 모델을 사용하여 구조물의 거동에 대한 온도영향을 평가하는 연구를 수행하였다.

### 3.2 센싱 및 모니터링

교량에 센서를 설치하여 데이터를 수집하고 이를 관리하는 센싱 및 모니터링 기술은 지난 십여 년 전과 비교해 볼 때, 많은 발전을 이뤘다. 90년대 중반부터 국내 교량에 본격 도입된 모니터링 기술은 현재 표 3과 같이 원격관리가 가능한 네트워크가 구축되고 실시간 온라인(real-time on-line)기능을 갖추게 되었다. 케이블교량에 있어서는 그림 3과 4와 같이 다른 시스템(교통, 기상, 재난 등)들과 함께 관리되기도 한다.

센싱 기술도 지난 십년간 큰 진보가 이루어져 종래의 전기저항식 변형률계, 가속도계에서 벗어나 광섬유센서나 무선센서가 서서히 상용화되어가는 단계에 들어서고 있다. 장래의 교량 건전성모니터링시스템은 하중과 환경의 영향, 구조 특성과 응답에 대한 실시간 정보를 필요할 때마다 취득할 수 있는 값싸고, 공간적으로 분산되어 있으면서, 무선으로 연결된 센서로 구성될 것이다. 무선센서의 활용은 아직 기술적으로 시험적용의 수준에 머물러 있으며, 어떠한 무선통신 방식을 쓸 것인가, 무선주파수 할당대역과 허가, 멀티 센싱이 가능한가 등의 해결할 문제가 남아 있다.

케이블교량에 적용된 기존의 센서들은 상대적인 처짐(변위)만을 측정할 수 있어 절대변위는 알 수 없다. 이 문제에 대한 해결책으로 현재 GPS, 토탈 스테이션(Total Station)을 이용하는 방법이 시도되고 있으나, GPS를 이용한 케이블교량 모니터링에서는 두 가지 해결할 제약 조건이 있다. (1) GPS의 측정오차가 15mm정도<sup>4)</sup>로 충분치 않다는 점과 (2) 동적 측정에 필요한 주파수 분해능을 갖지 못한 점이다.

최근에는 첨단기술분야의 융합을 통해 탄소나노튜브를 이용한 나노복합물로 만든 센서와 같은 나노센서, 3차원적으로 공간을 마련하고 전기선처럼 회로를 배열하는 MEMS 센서, 무선인식 유비쿼터스 센서 네트워크인 RFID/USN

표 3 모니터링 기술의 변화

구분	과거	⇒ ⇒ ⇒ 현재
시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단품, 기능중심</li> <li>• Off-Line</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Network, PC 기반화, 복합화</li> <li>• On-Line, 시스템화, 개방형 구조</li> </ul>
성능	<ul style="list-style-type: none"> <li>• H/W 중심, 단순기능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S/W 중심, 지능화</li> </ul>
감지기술	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 접촉 감지 기술</li> <li>• 기능구현</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비접촉 감지기술</li> <li>• Chip화, 정확도, 정밀도</li> </ul>
신호처리 및 제어	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 아날로그</li> <li>• H/W 처리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 디지털, DSP기반, 고속, 실시간</li> <li>• S/W 처리, 원격화, 자동화</li> </ul>
통신체계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stand-Alone</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Networking</li> </ul>

주) 출처 : 교량계측 강의자료(강경구, 2003)

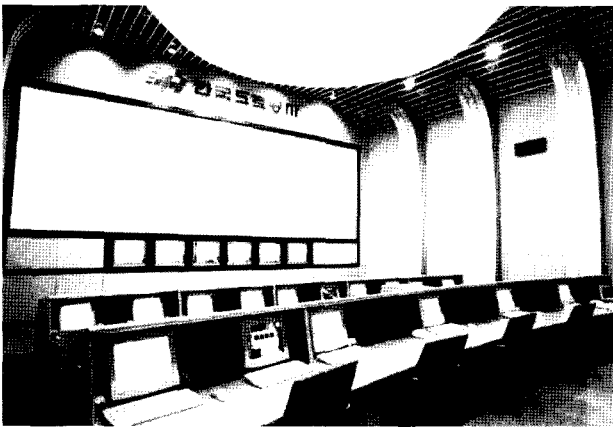


그림 3 서해대교 통제실

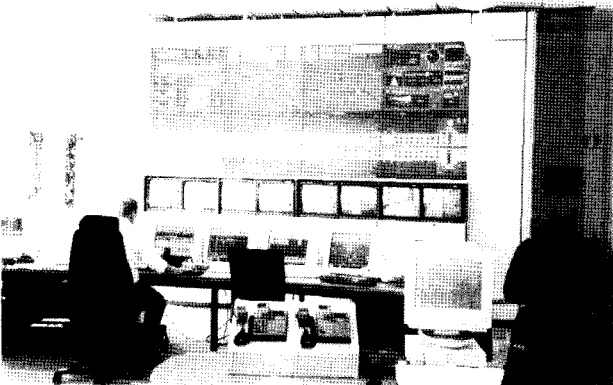


그림 4 Oresund교 통제실

기술에 대한 연구도 진행되고 있으며, 이들 센서를 혹한 환경에 노출되는 토목 구조물에 적용하기 위해서는 내구성 확보와 저가격화가 요구된다.

#### 4. 현안 및 발전방향

교량의 구조건전성모니터링은 도입된 시기도 얼마 되지 않았지만, 충분한 검증과정과 연구를 거치지 않았기 때문에 많은 시행착오를 겪었다. 이 절에서는 그 동안의 적용과 경험을 통해 얻어진 현안 및 발전방향에 대해 큰 줄거리만 정리해 보았다.

##### 4.1 센싱 및 모니터링

흔히 “more sensor, more accurate”, 즉, 센서를 많이 설치하면 구조물을 더 잘 알 수 있다고 생각한다. 하지만 현실에서는 “more sensor, more confused”, 즉, 혼란스럽다. 측정되는 데이터양은 방대해지고, 유지관리 해야 할 센서, 솔직히 말하면 고장

나는 센서가 많아지는 게 현실이다. 따라서 정확한 측정목적을 정하고 거기에 맞는 센서만을 집중적으로 선택할 필요가 있다.

연약지반에 의한 지반침하가 문제가 되면 그에 맞는 센서를 집중적으로 하부구조에 설치해야 하고, 크리프와 건조수축과 같은 장기거동을 측정한다면 그에 맞는 내구적이고 안정적인 정적센서를 선택해야 하고, 바람에 대한 동적거동을 알고 싶다면 그에 맞는 동적센서를 제대로 된 위치에 배치해야 한다. 그러나 현실은 대부분의 국내 교량은 교량형식에 관계없이 설치되는 센서종류가 비슷하고, 위치나 수량마저 거의 같다.

또한 교량의 공용수명보다 센서의 수명이 짧은 것이 사실이다. 따라서 모니터링이 과연 필요한지 필요하다면 언제부터 시작할 지를 결정하고, 장기적인 시스템으로 운영할 것인지 아니면 주기적인 측정으로 대체할 것인지를 고민해야 한다. 모니터링 시스템 설계에 있어서는 웹기반, 자동 경보기능 같은 보여주는 시각적 효과보다는 하드웨어와 소프트웨어의 확장성, 특수한(측정목적에 부합되는) 상황에서 정상적으로 데이터를 확보할 수 있는 안정성 및 기능성에 더 충실해야 한다.

##### 4.2 안정적인 데이터 확보

센서나 장비가 혹한 외부환경에 노출됨으로 인해 이상이 발생하고, 교량에 매립된 센서는 고장 시 교체가 거의 불가능한 문제가 있다. 이외에도 기상, 전기, 통신 등으로 인해 안정적인 데이터 확보가 곤란한 경우가 많다. 일부 초음파나 레이저를 이용하는 센서는 정작 데이터가 수집되어야 할 심한 기상상황에서는 정상적인 데이터 수집이 곤란하기도 하다. 또한 대부분의 센서가 외산으로 교체시 상당기간이 소요되고 고가여서 재고를 확보하기 어려운 문제도 있다.

##### 4.3 데이터 신뢰성

분석과정에서 중요한 것은 데이터의 양이 아니라 신뢰할 만한 데이터를 확보하는 것이다. 장기거동 측정을 목적으로 한다면 완공 전후의 초기치가 가장 중요하지만 이를 제대로 확보한 사례는 많지 않다. 또한 센서 설치시에 센서의 신뢰성 검증 및 검교정 작업이 이뤄져야 하지만, 시공의 주요 공정에 밀려 간과되기도 한다. 장기간 사용에 따른 시간적 드리프트가 발생하는 센서에 대해서는 주기적인 검교정이 필요하나, 현재 관련 기준이 없으며, 검교정에 소요되는 시간 경과와 그에 따른 데이터 손실이 발생하게 된다.

온도, 습도와 같은 환경의 영향은 계측값에 상당한 영향

을 미칠 수 있는데, 이는 손상과 같은 급작스런 현상이 아니라 장기적인 거동의 변화이다. 이러한 환경영향을 제거할 수 있는 센서기술이나 분석과정에서 구조거동과 분리해내는 연구가 필요하다. 또한 측정된 데이터는 한 개 또는 한 종류만 개별적으로 사용되어서는 안 되며, 통계적 개념에서 상호 연관되게 접근할 필요가 있다.

#### 4.4 전문인력

구조건전성모니터링시스템의 개발 및 활용은 다른 분야에서 개발된 혁신적인 기술이 토목분야에 적용되는 것으로서 센싱, 통신, 신호처리, 데이터관리, SI, IT 등을 포함한다. 이 연구에는 토목, 기계, 전기, 컴퓨터공학 등의 유기적인 협업이 요구되는데, 현재로서는 관련 교육과정이나 전문인력이 거의 없는 실정이다. 또한 관련 업체의 규모가 작고 이직률이 상대적으로 높은 편이어서 기술수준의 유지가 어려운 형편이다.

#### 4.5 구조건전성모니터링에 대한 인식

교량에 센서만 설치하면 교량이 위험한지 그렇지 않는지를 금방 파악할 수 있다거나, 교량에 대한 모든 정보를 얻을 수 있다고 생각하기 쉽다. 물론 어느 정도 가능할 수 있겠지만 현재 기술수준에서는 엄청난 비용투자 와 전담인력이 배치되어야만 할 것이다. 교량의 유지관리에서 가장 중요한(main) 것은 훈련된 전문기술자에 의한 체계적인 점검이며, 구조건전성모니터링시스템은 이를 보조(sub)해주는 보이지 않은 손과 같은 역할을 하는 것이며, 나아가 사용자(주로 운전자)와 관리자에게 유용한 정보(예:현재의 기상, 풍속, 풍향, 가시거리 등)를 함께 제공해 주는 방향이 바람직하다.

현재까지 서해대교와 같은 케이블교량에서 축적된 많은 데이터는 그 존재만으로도 충분한 학술적 가치를 가지며 값진 지식자산이다. 즉, 데이터를 활용해서 얻어진 연구뿐 만 아니라 데이터 자체만으로도 지식의 한 부분인 것이다. 이에 대한 외부의 공개요구나 범위에 있어서 현장 기술자들의 노고가 담긴 데이터의 소중함에 대한 연구자들의 인식의 변화가 필요하다.

교량 구조건전성모니터링 분야에서 현재의 관심사는 센싱 기술, 데이터의 분석기법, 설계 및 유지관리에 필요한 의사결정을 위한 유용하고 실질적인 정보를 제공하는 것이다. 이를 간단히 요약하면 다음과 같다.

##### 4.5.1 센싱 기술

- 무선 모니터링시스템 개발

- 스마트 센싱
- 분산 매입형 센싱

##### 4.5.2 데이터 분석기법

- 데이터 압축 기술
- 데이터 마이닝
- 신속한 분석 알고리즘 개발
- 손상 시나리오나 문제 자동인식 알고리즘 형성
- 학습기반 분석기법

##### 4.5.3 정보제공

- 타시스템(BMS)과의 연계
- Reliability/LCC를 통한 유지관리 전략
- 설계 Feedback

### 5. 결 론

본고에서는 케이블교량의 구조건전성모니터링 기술의 개요와 적용현황, 주요 연구동향, 현안 및 발전방향에 대해 살펴보았다. 지나치게 이상적인 구조건전성모니터링을 추구하거나 측정목적에 대한 충분한 검토를 거치지 않고 현장에 적용하기 보다는 필요한 시기에 교량 점검과의 결합을 통해 유지관리에 필요한 정보를 제공하는 것이 바람직하다. 서해대교, 영종대교와 같은 케이블교량에 구조건전성모니터링 시스템을 적용하면서 얻은 경험과 이를 토대로 한 연구, 첨단기술과의 융합을 통해 앞으로 이 분야의 많은 기술적 발전을 기대해 본다.

### 참 고 문 헌

1. Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., et al.(1997), Structural control: past, present, and future, *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9) pp.897~971.
2. Ko, J. M., Ni, Y. Q.(2005), Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges, *Engineering Structures*, 27(12), pp.1715~1725.
3. 한국도로공사(2004), 계측데이터의 통계기법 및 환경적 요인에 대한 평가기술개발, 보고서, 한국도로공사
4. Nickitopoulou, A., Protopsalti, K., Stiros, S.(2006), Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises, *Engineering Structures*, 28(10), pp.1471~1482. 