

1. 머리말

최근까지 국내의 건설은 구조물의 완공에 치중하여 유지 관리에 대해서는 상당히 소홀했던 것이 사실이고 이로 인하여 성수대교 및 신해대교 붕괴와 같은 소중한 인명과 막대한 경제적 손실을 초래한 참사가 있었다. 이는 구조물의 계획 및 설계시에 건설 초기 비용과 함께 교량 수명 동안의 총비용을 고려한 구조 형식 및 공법의 선정이 제대로 이루어지지 않았고, 유지 관리를 위한 조사, 계측, 모니터링 시스템, 점검장비 등에 대한 충분한 고려가 되지 않은데 그 원인이 있다.

최근 일련의 사고가 발생한 후로는 시설물 안전관리에 관한 특별법이 제정되는 등 유지 관리에 대한 관심이 높아져 이 분야의 다양한 연구가 진행 중이며, 특히 사장교나 현수교와 같이 장대 교량과 중요도에 따라 특수 교량으로 분류된 교량에 대해서는 여러 건설 관련 업체가 유지 관리 업무를 수행하고 있다. 현재 현수교, 사장교, 고속철도교 등 다수의 대형 교량건설이 본격화되고 있는 추세에 있고, 유지 관리 기술에 관한 본격적인 연구가 수행되고 있을 뿐만 아니라, 정부 기관을 중심으로 전 교량을 대상으로 한 체계적인 교량

유지 관리 시스템(BMS : bridge management system) 개발이 계획·연구되고 있다. 본 고에서는, 교량의 유지관리를 위한 교량 모니터링 기술에 대하여, 주요 기술 내용, 연구·개발 및 응용 현황에 대하여 토의하려 한다.

2. 교량 모니터링의 목적

교량의 유지관리 모니터링 시스템은 교량의 손상을 초기에 파악하여, 교량의 안전성과 사용성을 확보하고 유지관리 비용을 최소화 하는데 그 목적이 있다. 교량에서 측정된 주요 자료들은 초기 설계 및 계측치와 비교하여 교량의 현 상태를 파악하여 필요시 잔존 수명을 예측하고, 보수 시기를 판단하는데 이용되며, 아울러 교량의 거동에 이상이 발견되면 경보를 발하여 교량기능을 유지 관리를 위한 감시 수단으로도 필요하다. 또한 계측 시스템에서 확보된 자료를 바탕으로 구조 시방 보완 및 설계 기준에 대한 정보를 제공하게 한다.

교량 모니터링이란 구조물의 거동, 손상을 자동적, 연속적, 객관적으로 모니터링하고 관리하는 시스템을 말하며 선진국에서는 교량에 대한 구조형식, 크기, 중요도에 따라, 건설초기부터 부재별 또는 구조별로 기능의 변화에 관한 모니터링을 지속적으로 실시하고 있으며, 유지관리 프로그램에 의한 정기적인 점검과 보수를 실시하고 있다. 그러

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

나 국내에서는 아직까지 RC, PSC 교량 및 강교의 유지관리 및 점검을 위한 기준 등이 마련되어 있지 않고, 시간이력에 따른 콘크리트교량의 건전성과 손상요인 및 상태진전에 대한 수학적 모형이 정립되어 있지 않으며, 안전진단에 관한 기술자료 또한 충분하지 못하여 체계적인 유지관리가 어려운 실정이다.

교량 모니터링 시스템은 크게 시공 중 계측과 유지관리 계측으로 구분될 수 있으며, 시공중 계측은 교량 시공시 가설 방법에 따라 설계시에 고려된 자료를 참고로, 공정단계에 따른 교량의 거동을 분석하고, 적절한 위치에 센서(가속도계, 응력계, 침하계, 변위계 등)를 부착하여 공정의 진행에 따른 측정 데이터와 예상 데이터를 비교하여 시공의 안전성을 증가시키는 것을 목적으로 한다. 유지관리 계측은 완공된 교량에 있어 시공중 계측의 측정 자료와 구조분석 등을 통하여 주요 지점을 선정하고 적절한 센서를 채택하여 부착후 필요에 따라 정, 동적 측정 방식을 병행하여 주기적으로 데이터를 수집, 분석하여 교량의 상태 및 건전성 등을 파악하는 것을 목적으로 한다.

3. 교량 모니터링 시스템 구성

교량 모니터링을 통하여 기대할 수 있는 효과는 다음과 같다. 우선, 실시간 계측을 통하여 교량의 현상태를 신속히 평가할 수 있으므로 구조적 안전성 확보의 유용한 수단이 되며, 외부하중과 구조물 거동과의 관계를 상시 모니터링 함으로서 교량 각 부재의 열화에 대한 정량적 평가로부터 경제적, 효율적으로 교량을 유지관리할 수 있다. 또한, 공용전 초기 특성값을 계측하고 이를 근거로 시공후 내하력 평가 및 유지관리에 효율성을 제공하게 되며, 안전도에 대한 자동 경보 시스템을 작동토록 하여 안전사고를 미연에 방지할 수 있도록 한다. 뿐만 아니라 계측 데이터가 누적되고 그에 따

른 분석이 지속적으로 수행됨에 따라 추후 타교량에 대한 분석자료로 유일하게 쓰일 뿐만 아니라 동일 형식의 교량 건설시 시방 및 설계기준의 개선을 도모할 수 있다.

구조물에 설치하는 계측 시스템이 갖추어야 할 가장 기본적인 조건으로는 안전성, 정밀성, 사용성이 있다. 첫째, 안전성은 계측기간 중에 외부적인 요인에 의하여 계측기가 영향을 받지 않아야 하며, 구조 특성 변화를 제외한 다른 전기적 요인에 의하여 측정값이 영향을 받지 않아야 함을 의미한다. 둘째, 정밀성은 계측기가 측정하려는 물리량을 충분히 측정할 수 있는 용량과 감도를 가져야 하고, 아울러 이 자료를 수집하는 데이터 획득 시스템(DAS : data acquisition system)도 같은 정도의 해상도를 가져야 하며, 자료전송 중에 손실이 없어야 함을 의미한다. 셋째, 사용성은 사용자가 계측 시스템을 쉽게 조작할 수 있고, 계측 결과에 손쉽게 접근·이용할 수 있어야 하고, 과도한 계측값이 발생했을 때 이를 자동적으로 인식하고 경보를 발할 수 있는 기능도 갖추어야 한다. 계측 결과로부터 대상 구조물의 안전성을 파악하기 위해서는 설치하는 센서의 수가 많을수록 데이터의 취득은 많아지지만 데이터가 많다는 것이 계측 관리의 높은 효율성을 보장하는 것은 아니며 센서를 설치하여 교량의 전반적 거동을 파악할 수 있어야 한다.

센서는 교량 구조물 부재에 부착되어 현재 건전 상태를 직접 측정, 전달하는 역할로 말미암아 그 선택 및 설치에 의한 정확도/오류는 계측 전반에 걸쳐 영향을 미치게 된다. 또한 허용되는 예산의 범위에 따르기 때문에 사전에 발주기관과 협의하여 결정하며 제조회사, 제품규격 등 각각의 센서와 기기의 사양을 설치, 용이성, 성능 등을 고려하여 추후 결정한다. 계측기와 계측위치 선정은 구조해석의 결과와 계측기 설치성을 바탕으로 가장 효율적인 계측이 가능하도록 이루어져야 한다.

4. 구조계 규명기법

구조계 규명기법(system identification)은 “실험결과를 분석하여 구조계의 현상태를 규명하는 과정”으로 정의할 수 있고, 실험에 의해서 구조물에 가해지는 하중과 응답을 계측한 후 실험결과를 이용하여 구조계의 수학적 모델을 구성하게 된다. 이는 모니터링 기술 중에서 데이터를 획득하기 위한 기술과 더불어 수집된 데이터를 처리하여 구조물의 현상태를 추정하기 위한 모니터링 기술의 핵심기술이다.

구조계 규명기법은 크게 시간영역에서의 방법과 주파수영역에서의 방법으로 나눌 수 있다. 주파수영역의 방법은 FFT(fast fourier transform)를 이용하여 입력과 응답의 PSD(power spectral density) 함수로부터 주파수응답함수를 추정한 후, 이로부터 구조물의 자유진동모드 특성을 산출하는 방법이 사용되고 있다. 이 방법은 시간영역의 방법에 비해 비교적 많은 데이터의 처리가 용이하고 특히 선형정상거동에 의한 동특성 추정에서 비교적 정확한 결과를 줄 수 있다는 장점이 있다. 반면, 시간영역의 방법은 구조계의 비선형거동이나 비정상 거동특성을 추정하거나 주어진 시계열자료가 적은 경우에 더 유용하게 이용될 수 있다. 최근에는 주파수 영역과 시간영역의 장점을 함께 가지고 있는 시간-주파수 영역해석 방법이 많이 연구되고 있는데, 웨이블릿 및 HHT(hilbert-hwang transform)를 이용한 비선형, 비정상 신호처리에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.

동적실험은 입력하중을 조정할 수 있는 경우와 조정할 수 없는 경우로 나눌 수 있다. 강제진동시험은 인위적으로 입력하중을 조정할 수 있는 경우로, 입력을 측정할 수는 없지만 인위적인 조절이 가능한 경우(폭발이나 트럭에 의한 충격시험 등)도 포함된다. 그러나 일반 토목구조물의 경우 대

부분 대형 구조물이기 때문에 구조물 전체를 가진할 수 있는 장치는 드물고, 비용이 많이 들며 사용하기가 매우 어려운 것이 사실이다. 또한 교량과 같은 구조물은 실험을 위해 차량통행을 통제해야 하는 등의 어려움이 있다. 이와는 달리 입력하중을 조정 및 측정할 수 없는 상태에서의 차량하중, 풍하중 등 주변하중 요인에 의한 구조물의 응답을 계측하는 동적구조실험을 상시진동시험이라고 하는데, 상시진동시험은 강제진동시험에 비해 모드계수 추정의 정확도가 떨어지는 경향이 있으나 인위적인 하중을 가해줄 필요 없이 구조물이 사용 하중상태에 있을 때에도 실험이 가능하고, 최근 계측자료의 취득과 저장기술이 발달함에 따라 토목구조물 등의 대형구조물에 대한 동특성 추정실험에서 많이 주목받고 있는 방법이다. 특히 교량 모니터링 기술에 있어서는 주행하중에 대한 대략적인 정보만을 활용한 WIM(weigh-in-motion) 자료를 활용하는 방법등에 대해서도 많은 연구가 수행되었다.

5. 손상추정기법

구조물이 심각한 손상을 입었을 경우에는 외관조사만으로 구조물의 손상을 찾는 일이 충분할 수도 있다. 그러나, 대형구조물에서 한두 개의 부재가 손상을 입었을 때, 구조물의 복잡성 때문에 외관조사만으로 손상의 유무나 손상위치를 찾는 것은 상당히 어려운 일이다. 또한 재료의 노후화에 의한 손상은 외관상 변화가 거의 없기 때문에 외관조사에 의해서는 발견하기가 어렵다. 구조적 손상의 결과로서 나타나는 현상은 국부적인 부재의 강성행렬의 감소로 나타나고, 강성행렬의 감소는 고유진동수의 감소나 모드형상의 변화를 초래하며, 손상전후의 강성행렬의 차이가 구조물의 손상상태를 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 구조물의 동특성을 추정하는 것이 구조물의 손상도를 평가하는

데 필요하며, 이러한 개념에 기초하여 구조물의 동특성을 측정하여 구조물의 손상도를 추정하는 방법들이 개발되어 왔다.

구조물의 손상도를 추정하는 방법은 크게 데이터에 근거한 방법과 모델에 근거한 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 구조물의 모델에 대한 정보를 사용하지 않고, 건전상태 혹은 초기상태의 구조물의 거동과 손상상태 또는 사용상태에서의 거동을 비교함으로써 구조물의 손상도를 추정하는 기법이다. 이 방법에서는 구조물의 주파수 응답함수 또는 모드계수를 직접 이용하여 손상지수를 구하고 손상도를 추정한다. 후자인 모델기반 손상도추정기법은 구조물의 손상이 모드계수의 변화를 초래하며, 이는 구조물의 강성의 감소와 관계가 있으므로, 적절한 구조모델의 수정을 통하여 손상도를 추정하는 방법이다. 추정된 모드계수로부터 강성의 변화를 추정하는 방법으로는 수학적인 수학적 모델에 근간을 둔 calculus-based 방법 (또는 hard computing 방법)과 가능한 해의 모든 가능성을 탐색하는 enumerative scheme, 그리고, 미분을 사용하지 않고 오직 함수값 만을 이용하는 랜덤 탐색 방법으로 나눌 수 있다. 최근에는 calculus-based 방법과 enumerative scheme의 단점들에 대한 대안으로 신경망 기법이나 유전자 알고리즘과 같은 soft computing 방법이 많이 제안되고 있다.

6. 교량 모니터링 적용사례

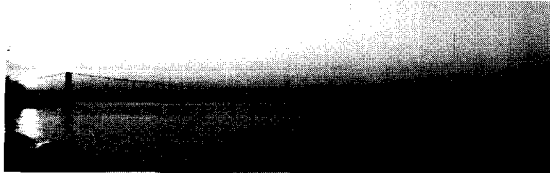
교량의 유지관리를 위한 계측 및 모니터링시스템은 국내에서는 주로 시공중의 계측과 구조물의 안전진단을 목적으로 하는 일시적 계측에 편중되어 있고, 국외에서도 주로 미국, 일본 및 유럽의 일부국가에서 도입기의 단계에 있는 실정이다. 국외에서는 교량의 손상정도를 파악하고 거동을 예측할 수 있도록 하는 유지관리시스템의 개발에

은 노력을 기울이고 있다. 그러나 개발되어지고 있는 모니터링 방법들은 공용중 발생할 수 있는 구조손상의 보수보강을 위한 모니터링 시스템의 구축, 시공중의 사고로 인한 구조물의 변형을 보수하기 위한 교량의 계측 모니터링 시스템 설치, 그리고 교량의 손상정도를 파악하고 거동을 예측할 수 있도록 하는 유지관리시스템의 개발 등 예방차원보다는 사후관리차원의 모니터링이 주를 이루고 있다.

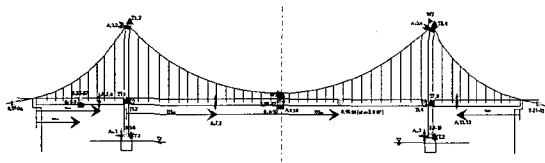
국내 계측, 모니터링시스템의 구축사례를 살펴보면, 세그멘탈 PC콘크리트 박스거더교 및 강함성 사장교인 신행주대교가 붕괴된 후에 안전한 재시공과 개통 후의 유지관리계측을 위하여 몇몇 교량에서 모니터링 시스템이 설치된 예가 있기는 하지만 그 기술수준이 아직도 계측 그 자체의 비중이 크다고 할 수 있다. 시공 중 붕괴된 신행주대교의 경우, 시공단계별 시공오차의 보정을 통해 안전한 재시공을 하였고, 기설치된 시스템은 개통 후 유지관리를 계측시스템으로 전환해서 모니터링 시스템으로 사용할 수 있도록 시도하였다.

장대교량에 대한 유지관리 계측시스템이 최근 국내에서 많이 구축되고 있다. 그러나 가장 주요한 부분이라고 판단되는 계측자료에 근거한 구조물의 안전성평가 기법이 아직까지 명확하게 제시되지 않고 있다. 국내에서는 노후 교량에 대한 적절한 모델을 산정하기 위하여 다양한 교량의 노후 등급 산정 및 데이터 분석 방안을 제시하고, 이에 대한 시행방법으로서 교량의 보수 및 보강의 우선순위 결정방법을 제시하고자 하는 연구가 계속 진행되고 있다.

남해대교는 교량에 설치되어 있는 자동계측시스템에 연결하여 계측기기를 제어하고, 센서 데이터를 수직/변환 및 분석하여 교량계의 손상유무 및 현재상태를 파악하고, 나아가서는 비상시 경보를 발할 수 있는 교량 계측/모니터링 프로그램의 개발을 목표로 하고 있다. 이 프로그램은 기설치된



(a) 남해대교 전경



- Sensor Identification
- ① : Joint meter (4ea, 4ch. dynamic)
 - ▲ ② : Biaxial tiltmeter (8ea, 16ch. static) + Temperature (8ea, 8ch. static)
 - ★ ③ : Submersible biaxial tiltmeter (2ea, 4ch. static) + Temperature (2ea, 2ch. static)
 - ⊖ ④ : Static strain gauge (44ea, 44ch. static)
 - ⊖ ⑤ : Dynamic strain gauge (10ea, 10ch. dynamic)
 - ⊖ ⑥ : Uniaxial accelerometer (12ea, 12ch. dynamic)
 - ⊕ ⑦ : Triaxial accelerometer for earthquake (2ea, 6ch. dynamic)
 - ⊖ ⑧ : Anemometer (2ea, 4ch. dynamic)
- Total 36 dynamic channels & 74 static channels

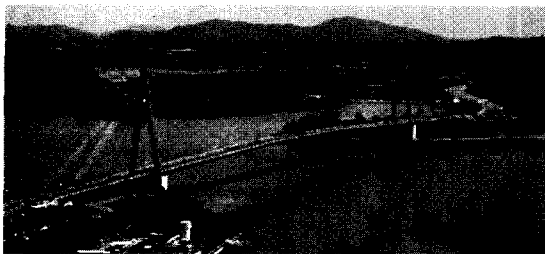
(b) 남해대교 계측 시스템
그림 2 남해대교

계측기기의 제어 및 신호 전송을 담당하는 통신 모듈, 신호 수집과 변환을 담당하는 신호처리 모듈, 그리고 마지막으로 신호를 분석하고 교량의 동특성을 파악하는 지식기반모듈로 구성되어 있다.

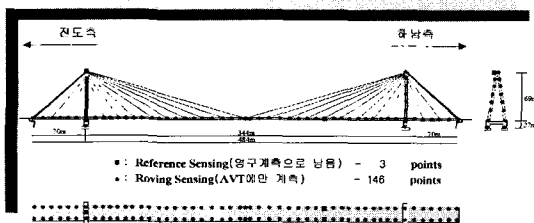
진도대교는 3경간 연속 강상형 사장교 형식으로서 장, 단기 정, 동적 거동을 파악하여 교량의 공용수명동안의 노후손상과정을 모니터링할 수 있는 장기계측시스템의 구축, 설치 및 운영에 대해서 연구된 바 있다. 진도대교에서 구축된 장기계측시스템은 66개의 정·동적 센서와 3대의 동적, 1대의 정적시스템으로 구성되어 데이터 수집 및 경보 시스템을 구성하고 있다.



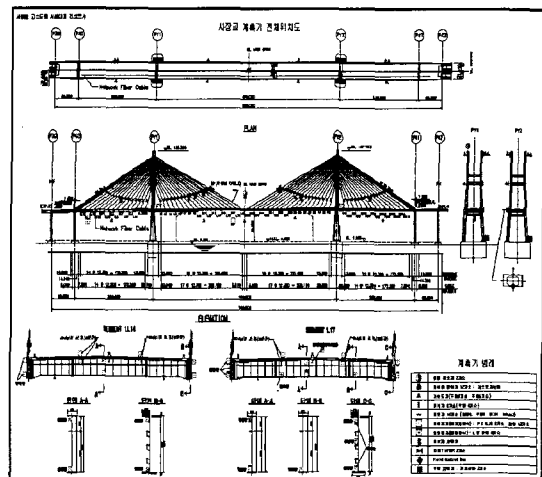
(a) 서해대교 전경



(a) 진도대교 전경



(b) 진도대교 계측 시스템
그림 3 진도대교



(b) 서해대교 계측 시스템
그림 4 서해대교

서해대교는 총 연장 7,310 m의 교량으로서 강 합성 사장교, FCM교, PSM교 형식으로 구성되어 있다. 서해대교 유지관리 체계는 교량과 관련하여 발생하는 모든 자료(교량제원, 보수점검, 유지관리, 시공, 교통량, 사고보고 등)들을 관리하고 분석하여 교량의 점검 및 보수, 보강에 관한 결정사항을 전산화하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 장기 손상을 예측하고, 교량의 안전 여부를 판단하며, 최적의 유지보수, 보강 및 개축 등에 대하여 효율적인 의사결정을 하도록 하는 객관적인 자료를 제공하도록 한다. 이를 위하여 주탑의 경사, 가속도 및 온도, 사장재 케이블의 장력 및 온도, 주형의 가속도, 변형율, 온도 및 신축이음량, 지진가속도, 풍향풍속 및 대기온도 등을 측정하고 있다.



그림 5 영종대교

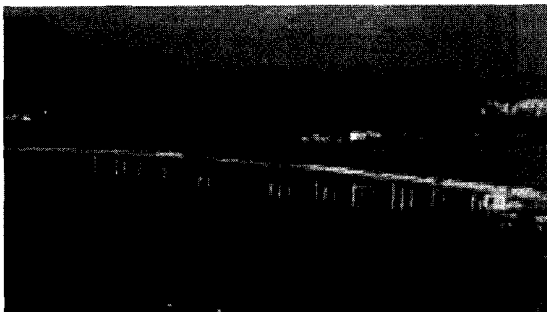


그림 6 방화대교

영종대교 구간의 현수교와 balanced arch truss type인 방화대교의 계측 모니터링시스템은 주요 부재에 설치된 각종 센서를 통하여 교량의 구조적 응답을 계측, 분석함으로써 사용수명동안 교량의 사용성 및 안전성을 확보하며, 교량의 위험요소를 사전에 발견하고 분석하여 적절한 대책을 수립함으로써 교량의 수명연장 및 유지관리 비용의 효율성을 높이기 위하여 구축되었다. 계측 시스템은 서해대교의 것과 유사하며, 교량 내 센서와 모니터링 센터의 거리는 20 km로서 광통신망으로 연결되어 있다. 광통신을 통하여 계측자료를 수집하고 계측 데이터 통신 및 자료수집기 제어를 맡은 서버의 데이터처리, 데이터 저장, 정보발생기능의 데이터베이스 서버, 데이터를 실시간 모니터링, 이력조회 및 분석할 수 있는 기능으로 구성되어 있다.

7. 스마트 모니터링

스마트 상시모니터링 시스템은 기존의 상시모니터링 시스템에 광섬유센서 등의 스마트 센서와 무선통신기술을 접목한 첨단 계측기술과 이로부터 얻어진 계측자료를 활용하기 위한 스마트 정보처리기술로 구성된다. 국내·외에서 실제 스마트 상시 모니터링 시스템이 구축되어 응용되고 있는 사례는 아직 미미하다. 국내에서는 돌산대교, 남해대교, 서해대교 등의 장대교량에 재래기술을 사용한 상시모니터링 시스템이 설치되어 운영되고 있지만, 계측된 자료를 체계적이고 효과적으로 분석하여, 교량의 이상상태를 감지하는 데까지는 아직까지 충분한 기술개발이 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

광섬유센서를 중심으로 한 스마트센서는 주변 전자기장의 변화(noise)에 안정적이고, 여러개의 센서를 한 line에 부착할 수 있는 multiplexing이 가능하며, 연결 cable이 가벼워서, 장대교와 같은

대형구조물의 상시 모니터링에 매우 이상적이다. 따라서, 미국, 일본, 유럽에서는 대학교와 연구센터를 중심으로 연구·개발이 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 일부 대학교와 연구소에서 광섬유 센서를 대형 사회기반 구조물에 적용하는 연구는 수년전부터 시작되었는데, 대형 구조물과 건설환경에서 발생하는 제반문제를 해결하기 위하여는 아직도 많은 부분의 기술적 보완과 개발이 필요하다. 스마트 계측기술과 스마트 정보처리기술을 기존의 상시모니터링시스템에 접목한 스마트 상시모니터링 시스템은 장대교량의 효율적인 유지관리뿐만 아니라, 고층건물, 발전설비 등 대형 사회기반 시설물의 안전하고 효율적인 유지관리를 위하여 매우 중요한 기술이다.

스마트 모니터링 기술과 관련하여 국내·외 관련 연구기관에서 최근 들어 많은 연구가 수행되고 있다. 국내에서는 대형 토목구조물에 대한 스마트 모니터링과 관련한 연구가 도로공사, 서울대학교 지진공학연구소, 표준과학연구원 등의 산·학·연에서 개별적으로 진행되어져 왔다. 최근 들어서는 과학기술부와 한국과학재단의 지정으로 스마트 사회기반시설 연구센터가 한국과학기술원에 설립되어 스마트 모니터링기술을 포함한 스마트 구조기술에 대한 전반적인 연구를 통합적으로 추진하려는 움직임이 활발히 진행 중에 있다. 국외에서는 광섬유 센서, 무선전송기술 및 MEMS(micro electro-mechanical system) 기술을 포함한 스마트 센서기술, 스마트 센서를 바탕으로 하는 스마트 정보처리기술 등에 대한 연구가 미국, 일본 및 유럽 선진국을 중심으로 활발히 연구, 응용되고 있는 실정이다.

8. 맺음말

국내 경제규모의 지속적인 성장과 사회요구의 고급화로 인해 향후 건설될 대형 사회기반 구조물들은 보다 더 복합적인 기능을 갖는 대규모의 복잡한 구조형태를 가질 것으로 예견된다. 따라서 긴 사용연한동안 구조물의 안전성과 사용성을 확보하기 위해서는 효과적인 관리 시스템 구축이 필수적이며, 이를 위해서는 기존의 구조공학기술의 첨단화와 함께 첨단 기계, 재료, 전자, 정보 기술이 이에 적절히 접목되어야 한다. 아울러 대형 사회기반 구조물에 대한 통합 관리 시스템의 구축이라는 명제 하에 각 분야별 관련기술의 유기적인 결합과 관련 정보의 재생산 및 핵심요소 기술의 개발을 통해 보다 안전하고 경제적인 구조물의 건설과 유지관리가 이룩되어야 할 것으로 판단된다.

이러한 배경에서, 교량 모니터링 기술은 실용성과 경제성의 측면에서 점차 스마트 모니터링 기술로의 전환이 필요하게 되었으며, 관련된 여러 분야의 국내외 연구자들 간의 학제 간 연구활동을 촉진하여, 대형 산업기반 구조물들의 사용성 및 안전성 증진에 기여할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라, 이 기술은 상시모니터링 시스템에 의한 교량의 이상유무 판정을 통하여 사회적·경제적 비용을 절감하고, 국내 건설 시장의 수입대체 효과 및 해외 건설시장의 경쟁력 확보에도 큰 기여를 할 것으로 기대된다.