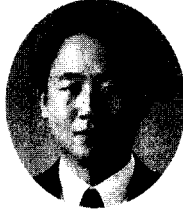


## 대형구조물의 구조응답 모니터링 시스템



김 재 동\*



이 중 원\*\*



이 탁 기\*\*

### 1. 서 론

대형구조물의 구조적 안전성 확보를 위해서는 1차적으로 구조물의 안전성을 충분히 고려한 설계와 기술 적용, 구조해석 및 모형시험을 통한 안전성평가 등을 통해 합리적이고 체계적인 계획, 설계, 건조 또는 시공이 이루어져야 하며, 2차적으로는 건조·시공된 구조물의 안전을 철저히 점검하고 점검결과에 따라 신속하고 합리적인 보수·보강을 하여 안전성을 확보해야 한다. 효과적인 유지관리를 위해서는 정기점검 및 정밀안전진단이 필수적이거나, 이들만으로 대형구조물의 안전성을 충분히 보장할 수 없기 때문에 구조응답 모니터링 시스템을 설치하여, 장기간에 걸쳐 누적되는 구조물의 노후화 정도 및 갑작스런 이상 발생을 항시 감시할 필요가 있다. 또한, 모니터링에 의한 장기적인 자료의 축적은 해당 구조물의 이력이 될 수 있으며, 이는 정기점검 및 유지

관리를 위한 자료로 활용될 수 있고, 구조물의 장기적인 거동예측 및 나아가서는 유사한 또는, 새로운 구조물의 설계시 중요한 기초자료로 이용될 수 있다.

이하에서는, 대형구조물의 구조응답 모니터링 시스템과 관련하여 토목구조물중 대표적으로 교량과 선박 및 해양구조물을 중심으로 고찰하기로 한다.

### 2. 교량의 모니터링 시스템

#### 2.1 개요

교량, 댐, 터널, 공항, 항만구조물 등과 같은 국가기반시설물은 국민들의 생활 및 안전과 직결되는 시설로서, 사회간접시설 확충의 필요성에 따라 계속 증가되고 있으며, 그 이용률 또한 크게 증가하고 있다. 우리 나라는 과거 30년간 압축경제성장을 이룩하면서 사회발전과 경제발전에 걸맞는 대형 토목, 건축구조물의 수요가 갑작

\* 한국기계연구원 구조시스템연구부, 책임연구원

\*\* 한국기계연구원 구조시스템연구부, 선임연구원

스럽게 증가하였다. 짧은 기간동안의 경제성장과 국민의 생활수준 향상에 따라 시설물이 양적으로 증가되어 왔으나, 질적인 면에서는 낙후된 성장을 이루었다는 사실이 최근 몇 년간 발생한 수많은 사고를 통해 입증되었다. 교량의 경우, 최근의 당산철교 철거 및 재건축을 비롯해 성수대교 붕괴사고는 무고한 인명과 재산상의 피해를 초래함으로써 구조안전기술의 중요성을 단적으로 보여주고 있다. 이러한 대형 사고의 영향으로 토목, 건축 구조물의 안전성을 확보하기 위해 구조응답 모니터링 시스템을 적용하려는 시도가 증대하고 있다. 그러나, 구조응답 모니터링을 위한 측정자료의 처리기법, 이상발생 감시기법, 이상상태 판정기법 등은 기존의 정기점검 및 정밀안전진단을 위한 일과성 상태판정기술과는 접근방법에서 차이가 있고 따라서, 이를 위한 집중적인 연구가 요구되고 있다.

구조응답 모니터링 시스템은 크게 센서시스템, 신호처리부분, 상태평가부분으로 분류할 수 있으며<sup>1)</sup>, 여기서는 상태평가방법을 중심으로 현재의 기술현황을 기술한 후 전체적인 시스템에 대해 간략히 기술하고자 한다.

## 2.2 이상발생 감지기술

"무엇을 측정하여 어떠한 기준을 가지고 감시해야하는가"라는 문제는 구조응답 모니터링을 위한 핵심적인 과제라 할 수 있다. 대형구조물의 모니터링 시스템은 계측목적에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 구조물 운용상의 문제점을 파악하기 위하여 풍속, 지진, 온도, 기초침하, 경사 등을 계측하여 상태 및 상황을 점검하는 것이고, 둘째는 가속도 수준, 변위, 동특성변화, 응력 등을 측정하여 구조물의 구조적 안전성을 감시하는 것으로써, 구조응답 모니터링은 후자를 의미한다고 할 수 있다. 현재 제시되고 있는 방법은 주로 응력, 가속도 등을 측정하여 그 감시기준치를 설계도면에 의한 해석치 및 재하실험을 통해 계측된 자료로 설정하는 것이다. 이는 장기감시를 위하여 참고할 수는 있으나 보다 합리적인 방법이 요구된다. 교량의 경우를 예

로 들면, 교량의 구조적 특성을 나타내는 가장 대표적인 측정항목 중의 하나인 응력감시에 있어서는 계절이나 일교차에 따른 온도의 영향을 필히 고려하여 감시지표와 감시기준치를 통계적으로 설정해야 한다. 이에 대한 외국의 기술개발 사례를 살펴보면 다음과 같다.

일본의 경우, 교량의 건전성 평가기법에 대한 개발이 활발히 진행되어 나름대로의 평가방법 및 평가절차를 제시하고 있다. 대표적인 예로써, 1987년부터 1989년까지 건설성 산하 토목연구소와 6개 민간기업이 참여하여 범국가적으로 추진된 "기설 구조물의 점검·보수 시스템의 개발" 「교량 장기감시 시스템의 개발」 과제<sup>2)</sup>에서는 활하중 증가, 손상 및 균열전진성의 감시를 위하여 작용응력을 이용하였다. 즉, 측정데이터를 1주일 단위의 통계치로 처리하여 감시기준치와 비교하였는데, 감시기준치는 장기감시 개시 후 최초 1주일간의 계측치, 온도의 영향, 부재 항복응력 등을 고려하여 제시하고 있다. 이를 검증하기 위하여 15개 교량에 대해 3~4개월 동안 계측을 수행하기도 하였다. 또한, 철도종합연구소에서는 기본 허용응력범위, 교량지간과 통과차량 중량, 실응력 비등을 고려하여 보수한(補修限) 응력도를 제시하고 있으며<sup>3)</sup>, 이를 이용하여 강철도교 건전성 평가기법을 개발하고, 시스템화함으로써 상용으로 판매하고 있기도 하다.

미국의 경우도 정적 데이터의 장기계측을 통한 교량안전감시가 시도된 바 있으며, 일례로 E. Aktan, et al.은 "Sustainability of civil infrastructure systems" 연구에서 지간 55m, 3경간 steel-stringer교량인 HAM-42-0992에 대해 2년 동안 응력, 변위, 회전, 온도, 습도 등을 계측한 바 있다<sup>4)</sup>. 이 결과에 따르면 환경과 통과차량에 의한 응답의 복합된 영향은 발생시간 및 위치에 따라 동일위상 또는 반대위상으로 나타난다. 즉, 교량의 성능과 응답은 장기간의 온도변화, 계절변화, 지반조건 등의 상호작용에 의해 영향을 받으므로 1회의 교량실험결과로는 타당한 결론을 도출할 수 없음을 밝혀냈다.

이상에서 알 수 있듯이, 장기간의 계측데이터

의 적절한 처리를 위해서 온도 등의 외부환경, 활하중, 계측위치, 실용력비 등의 영향을 복합적으로 고려한 감시지표 및 감시기준치를 개발하기 위한 노력이 지속적으로 진행되고 있다<sup>5)</sup>.

한편, 국내에서는 성수대교 붕괴 이후 교량안전성에 대한 인식이 확산되면서 모니터링 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 주로 교량의 상

태 및 상황감시를 목적으로 시스템이 적용되고 있으며, 남해대교, 진도대교, 돌산대교, 올림픽대교 등에 모니터링 시스템이 설치되어 있고, 서해대교, 광안대교, 영종대교 등에도 시스템의 설치가 계획되어 있다. 교량에 대한 국내외의 대표적인 모니터링 시스템 설치현황을 표 1에 나타내었다.

표 1 교량 모니터링 시스템 설치 현황

국가	교량명	소재지	교량형식	설치계측기	설치목적
미국	금분교	샌프란시스코	현수교	경사계	- 지진후 안전성
	Seattle Swing Bridge	씨애틀	Swing교, 강교	경사계	- 시공 안전성 및 정밀도 - Swing중의 균형유지 및 원위치 확보
	H-3	하와이	Segmental 콘크리트교	경사계 스트레인게이지	- 시공 안전성 및 정밀도 - 설계치와 실측치의 비교
	Perrot Ferry Bridge	Stanislans River	Segmental 콘크리트교	경사계	- 교량의 처짐
	Mississippi River Bridge	미시시피	사장교	가속도계 중속계	- 시설 유지관리
일본	세토대교	혼슈시코꾸엔락교	현수교 (3) 사장교 (2) 트러스교 (1)	풍향풍속계 지진계 가속도계 변위계 온도계	- 설계검증, 교통관리, 유지관리
캐나다	Three River Bridge	퀘벡주	강교	경사계 Extensometer	- 교각의 기울어짐 - 교량상판 처짐
덴마크	FAR		사장교	가속도계 중속계 온도계 경사계	- 시설 유지관리
영국	Wye ERsking		사장교	가속도계 중속계	- 시설 유지관리
국내	남해대교	경남 하동군-남해군	현수교	가속도계 경사계 풍향풍속계 지진계 스트레인게이지	- 교량의 상태점검
	진도대교 돌산대교 올림픽대교	- 상시감시시스템 적용			
	서해대교 광안대교 영종대교	- 상시감시시스템 적용 계획 중			

### 2.3 손상추정기술

손상추정기술은 보통 다음과 같은 4단계에 걸쳐 수행되며 - ① 손상발생유무의 판정 ② 손상위치의 판정 ③ 손상도의 추정 ④ 잔여수명의 산정-, 이상발생 유무를 감지하는 도중이나 감지한 후, 손상위치 및 손상정도의 추정이 요구된다<sup>6)</sup>. 즉, 각종 계측기를 통하여 얻은 신호를 처리하여 원하는 값(고유진동수, 진동모우드 등)으로 환산하여 손상도를 추정하게 되는데 이를 System Identification이라 한다.

System Identification분야의 대표적인 경우가 결함추정방법(failure detection 또는, damage estimation)이다. 이 방법은 구조물의 변화, 특히 동적 구조모형에 대한 구조계수들의 변화를 추정하는 방법으로, 먼저 구조물의 동특성을 구해내고, 이를 통해 구조물의 결함이나 균열 등에 의한 구조계수의 변화정도를 추산하는 방법이다. 이 방법들은 기존의 구조실험방법에 의한 안전진단이 국부적 구조변동성을 표현하는 데에는 미흡했던 점을 보완하여, 구조 각 부분의 변동성(결함, 손상 등)으로 환산해내는 방법이라 할 수 있다<sup>7)</sup>. 그림 1은 System Identification기법을 이용한 구조안전진단 방법의 개념도를 나타낸 것이다.

System Identification기법은 크게 주파수영역 방법과 시간영역방법으로 분류된다. 주파수영역 방법은 계측된 시간이력을 주파수영역으로 변환하여 주파수응답함수를 구하고, 이로부터 모우드 계수를 구하는 방법으로, 모우드실험(modal test)법이라고도 한다. 주파수영역의 System Identification기법에 의한 구조물의 손상도 추정은 1차로 얻은 모우드 계수를 다시 한번 처리하는 과정을 거치게 되며, 따라서 이를 간접법(indirect method)이라 한다<sup>4)</sup>. 이 방법들에서 사용 또는 연구되고 있는 다양한 기법들을 표 2에 정리하였다.

표 2 주파수영역의 손상도 추정기법

기법명	사용되는 물리량	수치계산방법
역삼동법	모우드 계수	최적화 방법
민감도 행렬법	모우드 계수/정적변형	비선형 최적화 방법
최소자승법	모우드 계수/정적변형	최소자승법
손상지표법	모우드 계수	손상지표식
변형률 모우드법	변형률모우드 계수 / 변형률 주파수응답함수	최적화 방법 등
신경망 방법	모우드 계수 / 변형률모우드 계수	학습된 신경망
패턴인식법	모우드 계수 / 주파수응답함수	패턴인식 알고리즘

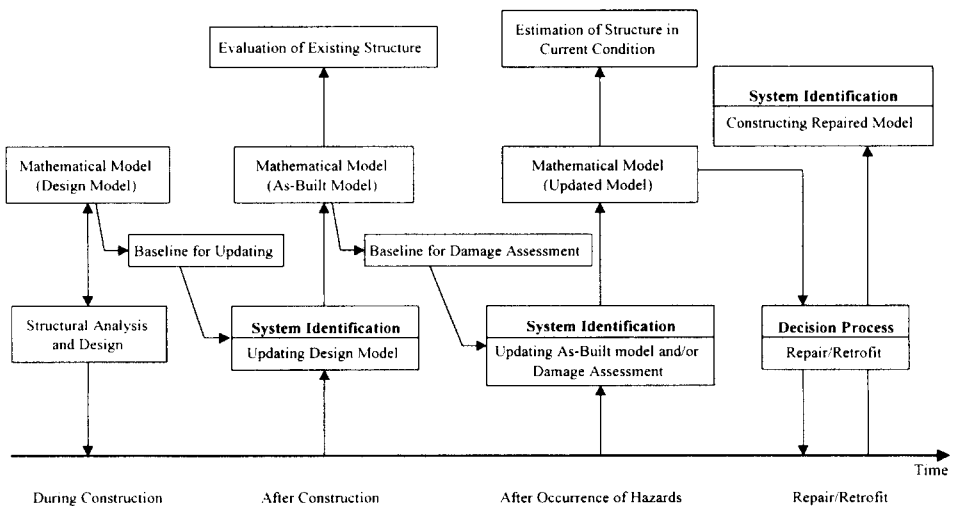


그림 1 System Identification과 수리 및 개보수에 대한 결정의 흐름도

시간영역 방법은 계측된 시간이력을 직접 처리하여 구조 손상을 구하게 되므로, 이러한 접근방법을 직접법(direct method)이라 부른다<sup>6)</sup>. 일반적으로 구조계를 추정하기 위해서는 적절한 가진을 통하여 하중을 가하여 얻어진 동적 응답 및 거동으로부터 구조계수를 추정한다. 그러나, 대형 토목, 건축구조물의 경우, 그 특성상 구조물에 대한 적절한 동적 응답을 얻기 위한 하중의 입력이 매우 어려울 뿐만 아니라, 모니터링시에는 바람, 지진, 파력과 같이 구조물에 중요한 진동을 유발하는 하중의 크기와 위치를 측정한다는 것은 거의 불가능하다고 할 수 있다. 또한, 실구조물의 경우, 동적 자유도가 고차이기 때문에 모든 자유도에 대한 동적 응답값을 구할 필요가 있는데, 이것 역시 불가능하다. 따라서, 하중에 대한 자료를 배제하거나 최소한의 정보를 이용하고, 제한된 일부 동적 응답만으로 구조계를 추정하는 방법에 대한 연구가 요구되고 있다. 이와 관련된 시간영역의 구조계 추정기법으로 KF-WGI기법, Stochastic-Adaptive기법, 자유감쇠곡선(free-decay curve) 해석법, Stochastic 접근기법, Random Decrement 기법, 반복최소자승(iterative least square)기법과 같은 방법들이 연구되어 왔다<sup>9)</sup>.

## 2.4 모니터링 시스템

언급된 바와 같이 구조응답 모니터링 시스템은 크게 센서시스템, 신호처리부분, 상태평가부분으로 구분할 수 있고, 이들 각 기본 시스템들이 서로 유기적으로 연결되어 하나의 통합적인 시스템이 구축된다. 그림 2에는 모니터링 시스템의 구성도를 교량을 예로 나타내었다.

### 2.4.1 센서시스템

모니터링 시스템을 구성하기 위한 계측항목의 선정은 구조해석의 결과와 계측기 설치성을 바탕으로 가장 효율적인 계측이 가능하도록 이루어져야 한다. 또한, 주변환경에 안정적이며, 교체 및 유지보수가 용이하고 정밀도, 반복 사용성, 내구성, 측정범위 등이 계측목적에 적합하고 온도,

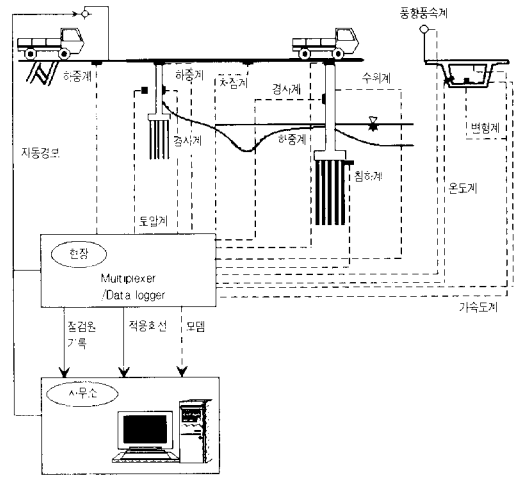


그림 2 교량 모니터링 시스템의 구성도

습도의 보정이 용이하며 자체검증을 거친 계측장비를 선정해야 한다.

일반적인 기존의 센서들은 모니터링 시스템에서 요구하는 조건들을 모두 충족시키지 못하기 때문에 새로운 센서들을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 중 대표적인 경우가 광섬유 센서(fiber optic sensor) 및 음파방출(acoustic emission) 등이다. 광섬유센서는 전자기방해에 대한 면역성, 다중송신능력, 다양한 물리적 파라미터 감지능력, 매설 또는, 표면부착을 통한 설치의 편이성 등의 장점 때문에 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 음파방출은 재료의 균열진전시 동반되는 탄성에너지의 급속한 방출로써, 균열의 진전을 감지할 수 있으며, 균열의 진전이나 균열표면의 마찰 및 소성변형 등도 감지할 수 있다. 이러한 AE기법의 주요장점은 뛰어난 민감도라 할 수 있다.

### 2.4.2 신호의 처리

각종 센서를 통하여 구해진 신호는 그 자체로는 큰 의미가 없으며, 이 신호들을 적절한 방법으로 처리하여 정확성을 높이고, 원하는 값(고유진동수, 진동모우드 등)으로 환산하는 방법을 포괄적으로 신호처리라 한다<sup>7)</sup>. 센서로부터의 신호

는 증폭, 기록되는데 이때, 저장방법, 자료 획득 주기, 노이즈제거 등이 고려되어야한다. 획득 및 조정된 자료를 해석(interpretation ; analysis)하여 유효한 인자를 선정하고, 이를 구조물의 상태 평가를 위해 사용한다.

### 3. 선체응력 모니터링 시스템

#### 3.1 개요

대양을 항해하는 선박은 파랑하중등 외력에 대하여 선체 및 승무원의 안전을 확보하는 것이 가장 중요하다. 최근 과학기술의 발달에 힘입어 선박에서도 정확한 기상 및 해상정보를 즉시 입수할 수 있고, 항해 및 선박조종과 관련된 각종 보조장치를 이용하여 안전항해를 기할 수 있게 되었다. 그러나, 아직까지도 파랑하중에 의한 선체응력과 슬래밍 등의 선체운동응답에 대해서는 정확하고 실질적인 자료를 얻지 못하고 있는 실정이다. 이에 대한 강력한 해결수단의 하나로, 일본, 영국 등은 1980년대 초부터 선체 감시시스템과 자동운항시스템 등을 개발해 오고 있다.

특히, 1980년대 후반에 산적화물선 및 유조선의 해난사고가 연이어 발생함에 따라 국제해사기구(IMO)에서는 해상에서의 선박안전을 확보하기 위한 방안으로 1994년 6월 MSC 제63차 회의에서 20,000 DWT 이상의 산적화물선에 대하여 선체응력 감시시스템의 설치를 권고하게 되었다<sup>10)</sup>.

선체응력 감시시스템은 해양운항중 선체의 응력, 가속도 등에 대한 객관적인 정보를 승무원에게 제공함으로써 변화하는 기상, 해상상태에서의 구조안전성 여부를 신속, 정확하게 판단하여 갑속이나 항로변경 등을 통하여 외부의 환경변화에 적절히 대응할 수 있도록 하는 것을 주목적으로 하고 있다. 아울러, 축적된 다수의 실선계측 자료는 선박구조의 안전성 및 신뢰성 제고를 위해 나아가서는 선박설계법의 검증 및 개선에 활용될 것이다.

파랑중을 항해하는 선박의 운동 및 구조응답을 감시하여, 안전하고 경제적인 운항을 도모하고자 하는 생각은 이미 오래 전에 제안되었는데, 그

기원은 실선탐재 계측시스템이라 할 수 있으며, 일본의 경우, 그 효시는 1975년 개발된 '실선시험용 계측 컨테이너 시스템'으로서, 이는 자동계측에서 FFT 해석, 그래픽 표현까지 가능한, 당시로서는 매우 의욕적인 시스템이었다<sup>11)</sup>.

1980년대 들어 컴퓨터 및 계측기기의 고성능화와 저가격화가 급속히 이루어짐과 동시에, 소프트웨어 분야도 크게 발전함에 따라 감시시스템의 개발은 가속화되었다. 나아가서, 단순히 자동계측·해석시스템의 개발에 그치지 않고, 이상해상상태에서의 해난방지 및 선박운항의 효율화, 지능화를 목적으로 하는 고도 자동 운항시스템 등 종합 운항시스템의 개발도 활발하게 진행되고 있다<sup>12)</sup>.

최근, 국제해사기구에서 20,000 DWT 이상의 산적화물선에 대한 선체응력 감시시스템의 장착 권고안을 제안함으로써, 이 시스템의 활용가능성에 대한 논란에 큰 획을 그었으며, 이에 앞서 LR(영국선급)에서는 1991년 8월에 선체감시시스템(Hull Surveillance System: HSS)에 대한 잠정규칙을 제정하기도 하였다<sup>13)</sup>. 또한, ABS(미국선급)와 DnV(노르웨이선급)에서도 잠정규칙을 제공하고 있으며<sup>14),15)</sup>, 전세계적으로 11개사 정도가 유사한 시스템을 제작하고 있는데, LR과 공동개발업체인 Strainstall사의 'STRESS ALERT'와 BMT-SeaTech사의 'SEA SMART'가 대표적이다<sup>16)</sup>.

#### 3.2 시스템의 구성

여기서는 한국기계연구원에서 KT전기, 토탈소프트뱅크와 공동으로 개발한 선체응력 감시시스템을 소개한다. 본 선체응력 감시시스템은 계측센서부, 신호처리부, 자료처리부 및 자료표시·저장부로 구성되는데, 그림 3에는 본 시스템의 실선 배치 예를 보여주고 있다<sup>17)</sup>.

계측센서는 장축 스트레인 게이지(Long Base Strain Gauge ; LBSG), 가속도계 외에 선체운동을 계측하기 위한 운동센서(또는 가속도계)와 압력계를 포함한다. 선체응력 감시시스템에 사용가능한 센서들은 형식에 대한 제한이 있는 것은 아니며, 주파수 응답범위 등에 있어 선급규칙상

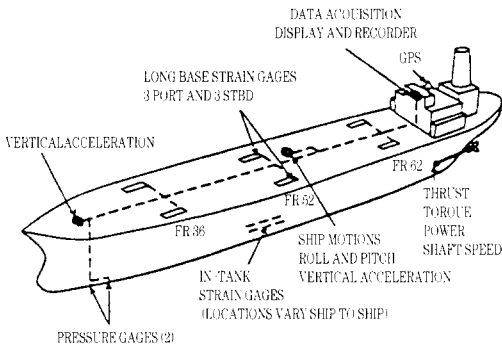


그림 3 선체응력 감시시스템의 실선 배치 예

의 요구사항에 따른 성능을 충족하는 것을 선정하면 된다. 대부분의 센서들은 기 제작된 센서 중 적절히 선정하여 사용할 수 있으나, 장축 스트레인 게이지는 일반적으로 제작·시판되지 않으므로 직접 설계·제작하였다<sup>19)</sup>.

장축 스트레인 게이지는 본 시스템의 계측센서 중 가장 핵심적인 장치로서, 주선체거더에 작용하는 굽힘모멘트를 계측하기 위하여 갑판상의 한 기준점에 대해 일정거리 떨어진 점의 변위를 측정하는 것이다. 본 장치는 변위계, rod, 증폭기, 변위계 구동부, rod 고정부 및 rod 지지부로 구성되며, 이때 측정길이는 2m로 설정하였다. 또한, 변위계로는 본질안전 (intrinsically safe)에 유리하고, LVDT (Linear Variable Differential Transducer)와 비슷한 수준의 정확성과 반복성을 가지면서도 비용이 저렴한 linear potentiometer (LPM)를 이용하였다. 그림 4에는 LPM이 장치된 장축 스트레인 게이지의 구동부를 보여주고 있다.

신호처리부는 계측센서로부터 전송되는 신호의 잡음을 제거하기 위한 필터, 신호증폭을 위한 증폭기 및 정전 등 전원공급 이상시 일정시간동안 전원을 자동적으로 공급해 주어 시스템의 갑작스런 동작정지를 방지하기 위하여 설치되는 무정전 전원공급장치 (Uninterruptible Power Supply : UPS)로 구성된다.

자료처리부 및 자료표시·저장부는 계측센서로부터 보내진 아날로그 신호를 디지털 신호를

변환시키기 위한 A/D 보드와 자료의 분석, 자료표시 및 자료저장 등을 위한 산업용 컴퓨터로 구성되어 있으며, 신호처리부와 함께 bridge console내에 조립되어 선교상에 설치된다. 그림 5에는 bridge console의 모습을 보여주고 있다.

본 시스템 개발과 관련, 한국기계연구원에서는 20만톤급 산적화물선을 대상으로 1998년 8월부터 약 1개월에 걸친 실선탑재시험을 수행함으로써 개발된 시스템의 실선성능평가를 성공리에 완료한 바 있다<sup>19), 20)</sup>.

#### 4. 부유식 해양구조물의 모니터링 시스템

##### 4.1 개요

일찌기 20세기 초반부터 지구의 마지막 남은 자원의 보고로서 또한 미래의 생활공간으로서 해양에 대한 관심이 고조되어 왔다. 해양의 에너지/광물 자원의 개발을 위한 노력은 이미 1950년대 부터 시작되어 상당한 가시적인 성과를 얻고

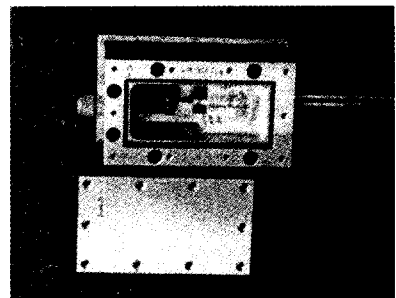


그림 4 LBSG의 LPM



그림 5 Bridge console

있다. 최근에는 특히 환경보존에 대한 관심이 고조됨에 따라 육상기피시설물(공항, 폐기물 처리시설, 원자력 발전설비 등)들의 부지확보 문제를 해결하기 위하여 해양공간을 활용하는 방안이 여러 선진국에서 연구되고 있으며 그중 가장 타당성 있는 방안의 하나로서 각종 생산활동을 위한 플랜트를 대형 부유구조물 위에 설치하는 해상플랜트(Barge Mounted Plant, BMP)가 제안되고 있다.

또한, 대형 부유구조물위에 탑재되는 BMP는 그 규모의 거대성, 사용 또는 가동의 초장기성 등 기존의 선박 및 해양구조물과는 많은 차이점이 있으며, 현재로서는 예측하기 어려운 여러 가지 고유의 해결해야 할 기술적 문제점들이 있을 것으로 판단된다. 따라서, 장기적인 가동, 유지관리 및 보수를 위한 종합시스템이 필수적으로 요구되기 때문에 기상, 해상정보는 물론, 구조응답에 대한 정보가 반드시 필요하며 특히, 대형구조물인만큼 체계화된 일관 구조응답 모니터링 시스템을 이용하지 않을 경우 그 거동 및 응답자체의 파악이 불가능하다. 또한, 만일 사고가 발생할 경우, 인명 피해는 물론이고, 주요 탑재설비에 복구불능의 치명적 손상을 초래할 수도 있으며 더우기, 환경보호 측면에서 심각한 해양오염 문제를 야기할 가능성도 배제할 수 없다<sup>21)</sup>.

부유구조물의 건전성 모니터링 시스템은 가동 중인 부유구조물의 응력, 가속도, 작용하중 및 압력, 경사도 또는 계류장력 등에 대한 객관적인 정보를 운영자에게 제공함으로써 변화하는 구조 거동 및 응답상태를 신속, 정확하게 판단하여 적절한 대응조치가 가능하도록 한다. 또한, 축적된 계측, 감시 자료는 향후 초대형 부유구조물의 구조 안전성 평가 및 신뢰성 제고에 기여하며, 나아가서 설계법의 검증 및 개선을 가능케 할 것이다.

## 4.2 부유구조물의 구조응답 계측

### 4.2.1 POSEIDON의 실험역 실증시험

부유구조물의 예인, 설치 및 유지에 관한 각종 측정자료취득을 목적으로 한 대표적인 실험역 실증연구가 일본 선박기술연구소 등에 의해 1986년부터 수행된 바 있다<sup>22), 23)</sup>. 이 연구는 5년에 걸

친 장기간의 계류를 통해 부유구조물의 신뢰성과 안전성의 확보, 내구성의 확인 및 설계기법의 확립을 최종목표로 하였다. 부유구조물의 명칭은 POSEIDON이고, 그 규모는 길이 34m, 폭 24m, 높이 26m, 흘수 5.5m, 배수량 528ton으로, 12개의 column으로 구성되었다. POSEIDON상에는 그림 6에 보인 바와 같이 계측을 수행하는 관측실이 있고, 부체의 운동 등 측정자료는 telemetering에 의해 육상의 관측기지까지 송신된다. 기상, 해상자료 외에 설계 및 운동해석법의 확인과 표류력 등 외력의 평가를 위해 부체의 동요, 계류력, 구조의 변형도 및 일사량 등의 계측이 병행되었다.

또한, 그림 7에서와 같이 POSEIDON의 모니터링 시스템은 무인·자동화 및 텔레미터링을 이용한 데이터의 통신, 화상전송 등에 비중을 두어 구성되었다. 부유구조물에서와 같은 실험상 모니터링 시스템에 있어 가장 중요한 요소의 하나는, 계측기 자체의 성능은 물론, 해상환경조건에 대한 장기안정성 및 신뢰성이 충분히 검증되어야 한다는 것이다. 또한, 실험상에서는 계측 주파수 범위가 모형실험에 비해 작아진다는 점도 유의하여야 한다. 따라서, POSEIDON의 경우에는 계측 범위, 주파수특성 및 분해능력에 따라 적합한 시 관계측기를 선정 한 후, 실험실에서 또는 실선에 탑재하여 예비실험을 수행함으로써 실험상에서의 적응성을 검증하였다. 그 결과, 경사계에 있어 가속도 영향, 가속도계의 중력영향 및 스트레

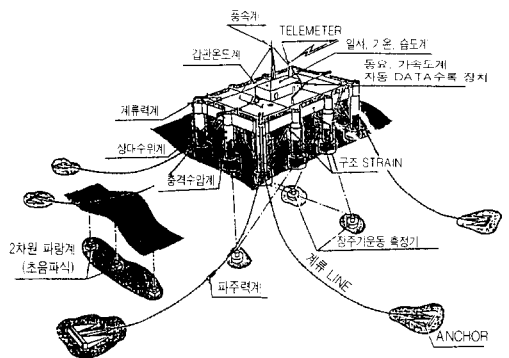


그림 6 POSEIDON의 계측장치



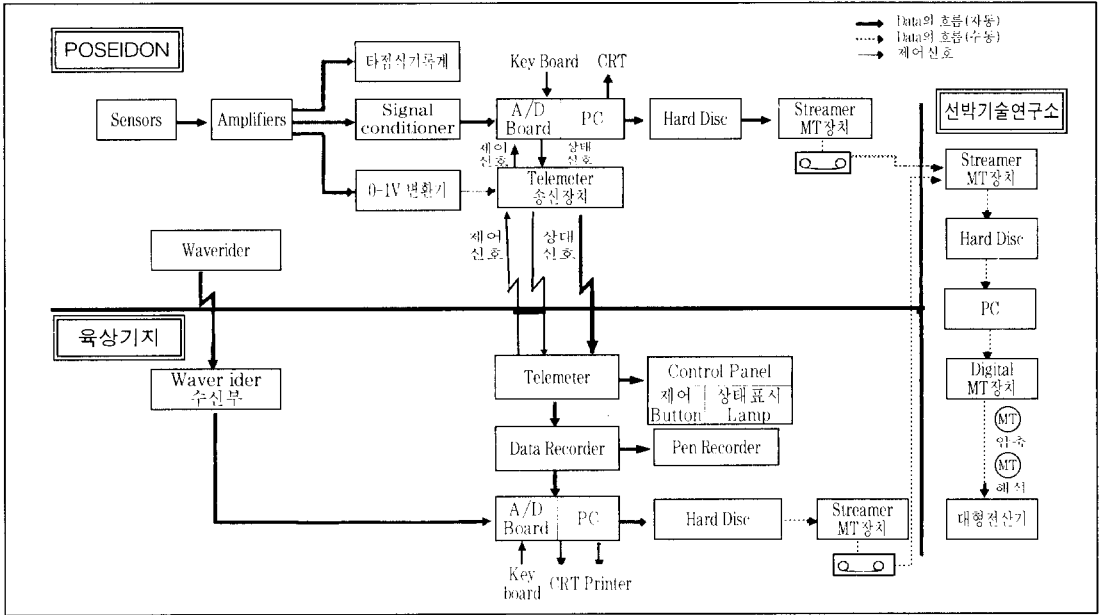


그림 7 POSEIDON의 모니터링 시스템

인 변환기의 온도영향과 장기안정성 등에 의문이 제기되어, 이에 대한 대책이 필요하였다. 전력은 해저케이블을 부설하여 육상으로부터 공급되었고, 정전에 대비하여 무정전 전원장치 및 발전기를 부유구조물상에 장비하여 최소 수개월간 전력 공급이 가능토록 하였다.

계측은 일정시간 간격을 두고 정기적으로 수행되었으며, 데이터의 결손을 방지하기 위해 기록 시스템을 2개의 계통으로 하여, 이중 하나를 back-up 시스템으로 사용하였고, 이를 위해 텔리미터링을 효과적으로 사용하였다. 기록장치는 약 1개월간 무인자동기록이 가능하고, A/D 변환기, P/C, 하드디스크 및 카세트 테이프, 디지털 레코더, 히스토그램 분석기 및 펜 레코더 등으로 구성되며 또한, 충격수압, 선체진동 등의 기록에는 아날로그 레코더를 이용하였다. 계측은, 매 6시간마다 34분 8초간 4,096개의 데이터를 0.5초 간격으로 샘플링하는 정시계측과 폭풍과 같은 이상해상조건시에 육상으로부터의 지령에 의해 임의시각에 연속계측 가능한 임시계측으로 구분된다. 임시계측은 관측원의 판단에 따라 수행되며,

이때 샘플링 시간은 1초였다. 기록시스템의 용량은 정시계측을 기준으로 할 때 최대 40항목의 데이터를 약 30일간 기록할 수 있다. 계측데이터는 카세트 테이프를 이용하여 대형 자기 테이프에 기록한 후, 대형전산기로 해석한다.

한편, 자동계측시스템에서 발생할 수 있는 만일의 장애에 대비하여 주요 계측항목 23개는 텔리미터링 장치를 이용하여 육상으로 전송함과 동시에, 이들중 16개 항목은 back-up 자료로 기록, 보관하였다. 계측자료의 전송을 위해 'RETRAS' 시스템이 개발되었으며, 50MHz의 마이크로파를 이용하여 P/C간의 데이터 통신외에도 실시간 화상정보를 전송하였다. 또한, 근거리 지역망(LAN)을 구축하여 계측 및 제어 등 전체 모니터링 시스템에 광범위하게 이용하였다.

#### 4. 2. 2 BMP 시험플랜트 모니터링 시스템

한국기계연구원에서는 과학기술부 후원으로 "해양공간이용 대형 복합플랜트 개발" 1단계 사업을 수행한 바 있으며, 이와 관련하여 "해상 시험플랜트 모니터링 시스템"을 개발하였다<sup>24)</sup>. 여기

서는 그 개요를 간략히 설명한다.

본 시스템의 목적은 시험플랜트 운용시 각종 센서로부터 다양한 자료를 계측, 기록함으로써 향후 건조가 기대되는 대형 부유구조물에 대한 설계자료를 확보함과 아울러 실제 시스템 운용에 대한 경험적 지식을 축적하는 것이다. 이를 위하여 본 시스템에서는 BMP 시험플랜트를 통해서 얻어지는 자료를 관리하고 감시하게 되는데, 여기서 감시라 함은 자료의 취득과정뿐만 아니라 이상 해상상태가 발생할 경우 경보를 주는 역할까지를 포함하는 원격 감시를 포함하고 있다.

주요 계측장비 및 설치목적은 표 3에 보였는데, 이들 센서 시스템들은 시스템 외부에 설치되어 유선 또는 무선으로 모니터링 시스템에 연결되어 있다. 60채널 이상의 직접 인터페이스와 3채널의 직렬 포트를 가진 다중 센서 시스템으로 네트워크 카드를 이용하여 네트워크 상에 구성하도록 되어 있다.

### 5. 향후 전망 및 결론

최근에 이르러 구조물의 상태감시, 예상되는 파손의 탐지 및 손상제어를 위한 또한, 변화하는 환경에 적응 가능한 지능형 즉, "스마트" 재료/

시스템의 개발이 활발히 진행되고 있다.

이들 재료의 잠재적 활용범위는 매우 광범위하여 예를 들면, 구조적 손상을 감지하기 하기 위해 광섬유 센서를 심은 스마트 항공기의 외판, 심각한 진동에 대처코자 감지/구동장치를 갖춘 교량 및 특수 폴리머로 만든 잠행장치를 갖춘 스텔스 잠수함 등이다. 현재, 연구 또는, 사용되고 있는 대표적인 스마트 재료들은 다음과 같다<sup>25)</sup>.

- 압전형 복합재료 (piezoelectric composites) : 전류를 기계적 힘으로 또는, 힘을 전류로 변환
- 형상기억 합금 (shape memory alloys) : 온도를 천이역 이상으로 변화시켜 힘을 발생
- 전기-유동 액체 (electro-rheological ; ER fluids) : 전기장에서 액체를 고체로 또는, 고체를 액체로 변환

현재 이 분야의 연구는 이해, 종합 및 분석능력이 있는 마치, 유기체와 같이 행동하는 시스템의 개발을 목표로 하고 있다. 스마트 재료는 기본적으로 고유의 센서(신경계), 프로세서(두뇌) 및 액츄에이터(근육계)를 보유하며 따라서, 생명체와 같이 거동하게 된다. 스마트 재료에 사용되는 센서는 광섬유, 부식센서 및 기타 환경센서와 감지입자 등이 있고, 액츄에이터로는 열을

표 3 BMP 모니터링 시스템의 계측장비 구성

구분	장비명	설치목적	사양
환경	Weather Station	실해역 환경측정	바람, 파장, 기상
	현장용 파랑·유속계	다방향 파랑 측정	P.U.V (Wave Rider)
	유속측정기	수면하 유속 측정	2방향
운동	가속도계	운동, 가속도 계측	1G
	경사계	경사각 계측	± 40°
	Compass	방위각 계측	± 180°
구조	표면설치형 스트레인계	전체응력 측정	Kyowa : BS-15CT
	용접용 방수 스트레인 게이지	국부응력 측정	KWC-5-120-G1-0-11-G 3M3S · 방수, 내압(100kgf/cm <sup>2</sup> )
	온도센서	구조 내·외부/온도계측	· 백금저항식 · -20~+100°C
	충격수압계	충격수압 계측	· 스트레인식 · 0~5kgf/cm <sup>2</sup>
돌핀	Tension Load Cell	계류 장벽	20 ton
	Compression Sensor	계류 압축력	140 ton

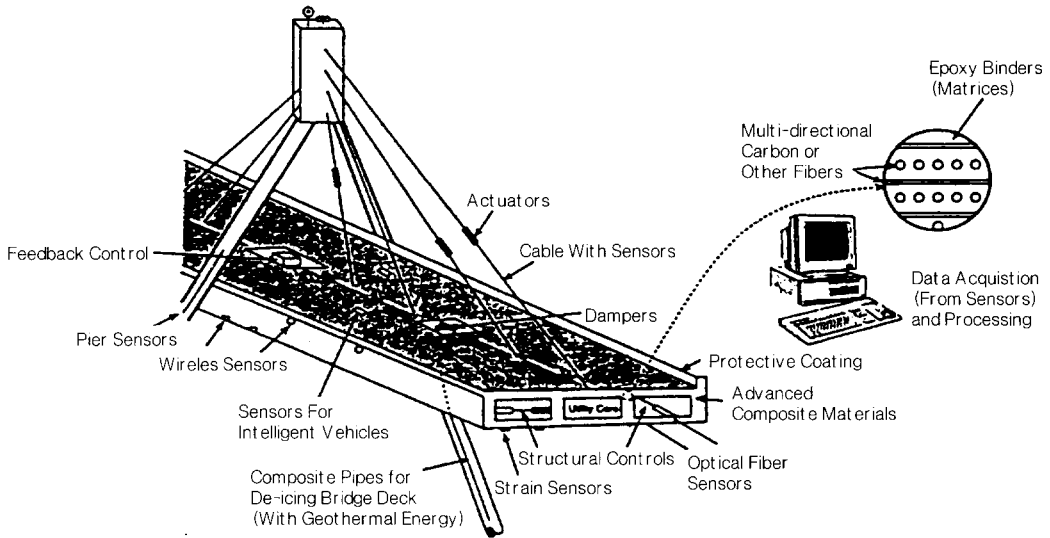


그림 8 지능/집적형 교량 시스템

받으면 원래의 형상으로 되돌아오는 형상기억합금, 유압시스템 및 압전 세라믹 증합체 복합재료가 있다. 또한, 프로세서 및 제어장치는 마이크로칩, 컴퓨터 소프트웨어 및 하드웨어 시스템을 이용한다. 참고로, 그림 8에 해빙장치 및 방식코팅된 고성능 선진복합재료와 함께, 지능센서, 자료처리 및 제어장치를 종합한 미래형 교량을 예시하였다.

이상과 같이, 본 고에서는 대형 구조물의 구조 응답 모니터링 시스템에 대하여 교량, 선박 및 해양구조물을 중심으로 간략하게 살펴보았다. 전술한 바와 같이 대형구조물 모니터링 시스템은 구조해석 및 설계관련 이론, 수치해석 및 실험, 시험평가기술 또한, 소프트웨어와 하드웨어 기술의 종합적인 집합체로서, 이들의 상호보완에 의한 유기적 관계를 통해서만이 발전 가능할 것이다.

향후, 지능형/고감도 센서의 개발, 신호처리기법의 향상과 신뢰성해석 및 통계적 기법의 적극 도입 또한, 설계자료 및 기준치와의 연계와 함께 현장적용을 통한 실용화기술 개발 등의 연구가 절실히 요구된다. 끝으로, 본 기술분야의 광범위성 및 다양성으로 인하여 좀 더 심도있는 소개가

되지 못한 점 양해바라며, 독자 여러분의 이해의 폭을 넓히는데 다소라도 이바지하기 바란다.

### 참 고 문 헌

1. 교량관리체계개선, 건설교통부, 1995.
2. "既設構造物の點檢・補修システムの開發 [橋梁の長期監視システムの開發]", 日本,建設省, 1991. 3
3. "鋼鐵道橋の健全度評價手法", 日本 鐵道總合研究所.
4. E. Aktan, et al., "Sustainability of civil infrastructure systems", Proc. of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, Sept. 1997, pp.564~576
5. 김재동 외, "강교량의 On-line 이상상태 판정을 위한 기준설정", 한국기계연구원 연구보고서 97-ND-02-02-A-02, 1998, 10
6. C. R. Farrar, et al., "Lessons learned from applications of vibration-based damage identification methods to a large bridge structure", Proc. of the International Work-

- shop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, Sept. 1997, pp.351~370
7. 윤정방, "강교량의 안전진단과 유지보수방법", 대한용접학회지, 제12권, 제3호, 1994. 9
  8. 윤정방, 이형진, "부분구조추정법을 이용한 대형구조물의 효율적인 구조안전도 모니터링", 한국지진공학회논문집, 제1권, 제2호, 1997. 6
  9. 최영민, "미지의 입력하중과 제한된 응답계측값을 이용한 노후구조물의 손상도 추정", 한양대학교 대학원, 박사학위논문, 1998. 12
  10. "Recommendations for the fitting of hull stress monitoring systems", IMO, MSC/Circ. 646, June 1994
  11. 竹澤誠二, "실선시험용 계측 Container System", 선박, 제48권, 제1, 2, 4, 5호, 1975
  12. 谷澤克治, "구조물의 Monitoring 시리즈-선박", Techno Marine, 제758호, 1992. 8
  13. "Provisional rules for the classification of hull surveillance systems", Lloyd's Register of Shipping, Aug. 1991
  14. "Guide for hull condition monitoring systems", American Bureau of Shipping, 1995
  15. "Hull surveillance system", Rules for Classification of Ships : Part 6, Chap. O, Det norske Veritas Classification AS, July 1995
  16. Slaughter, S.B., et al., "State of the art in hull monitoring systems", SSC-Report, Ship Structure Committee, USA, 1996
  17. D.J. Witmer et al., "Operational and scientific hull structure monitoring on TAPS trade tankers", Paper No. 21, Proc. of the Annual Meeting, SNAME, 1994
  18. 김재동 외, "선체응력 감시시스템 개발(I)", 한국기계연구원 연구보고서 BSM039-425.M, 1997
  19. 김재동 외, "선체응력 감시시스템 개발(II)", 한국기계연구원 연구보고서 BSN079-674.M, 1998
  20. 이탁기, 김재동, "대형 산적운반선에 대한 실선 응력계측", 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, 1999. 4, pp.344~347
  21. 大川豊, "メガフロートの目指すもの", Techno Marine, 제794호, 1995. 8
  22. "海洋構造物の建設に伴う計測とその技術", (社)國際海洋科學技術協會, 平成2年9月
  23. Marine Vision 2010 : Proceeding of '94 International Underwater Technology Conference, University of Ulsan, Korea, Sept. 12-13, 1994
  24. 정태영 외, "시스템 종합기술 개발-해상 시험플랜트 모니터링 시스템 개발", 해양공간 이용 대형 복합플랜트 개발사업, 한국기계연구원 보고서 98-NQ-12-01-A-01, 1998. 12
  25. K.P. Chong, "Health monitoring of civil infrastructures", Proc. of the International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, Sept. 1997, pp.339~350 