

센싱 · 모니터링 기술과 센서 네트워크 및 교각기초 건전성 평가



서사범

(주)서현기술단 부사장
공학박사/철도기술사
T.010.6219.1369
suh7484@hanmail.net

I. 머리말

철도의 안전을 확보하기 위해서는 설비나 열차전방의 선로상태를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 이와 같은 상태감시에 각종 센서나 화상처리기술을 활용함으로써 안전성 향상이나 생력화를 기대할 수 있다.

센서 네트워크는 센서를 관측개소에 설치하여 대상의 관측 데이터를 무선으로 수집하는 네트워크 시스템이다. 센서 네트워크를 이용함으로써 각종 설비의 상태를 감시하는 것이 가능하게 된다. 근년에 철도현장에서도 센서 네트워크를 이용한 상태감시시스템의 도입이 검토되고 있다.

한편, 하천의 증수(增水) 시에는 세굴의 영향으로 교각기초의 안전성이 저하되는 경우가 있기 때문에 철도사업자는 하천수위에 따라 필요시에 운전규제를 하여 열차의 안전을 확보하고 있다. 수위저하 후의 규제해제 시에는 교각기초의 건전성이 저하되어 있지 않음을 파악하는 것이 중요하다. 수면 아래에서 발생하는 세굴현상은 육안으로 직접 확인하는 것이 곤란하다고 하는 과제가 있다. 이 때문에 교각기초 건전성 평가시스템이 개발되었다.

본고에서는 ① 토목이나 철도 등의 인프라의 센싱 · 모니터링 기술에 관한 과제, 장래전망과 연구개발의 동향, ② 상태감시를 목적으로 한 센서 네트워크에 관한 최근의 화제 및 ③ 하천증수 시의 교각기초 건전성 평가시스템의 개요와 실제교량에서의 가동시험 결과 등에 관하여 소개한다.

II. 센싱 · 모니터링 기술의 과제와 전망

1. 센싱 · 모니터링의 개관

요즘의 세상은 점차로 감시, 모니터링(monitoring) 사회로 되어가고 있음을 느끼게 된다. 또한, 방범카메라라고 하는 감시센서가 문제의 해결에서 위력을 발휘하는 케이스를 가끔 듣게 된다. 산림청에서는 산불무인감시카메라를 설치하고 있다. 서울에서는 도로 위 움푹 팬 ‘포트홀(pot hole)’을 찾아 신속한 복구를 돕기 위해 시내버스에 센서와 카메라를 장착할 예정이라고 한다. 또한, CC카메라(방송용 무인카메라) 업체가 호황을 맞고 있다고 한다.

철도에서는 비접촉형 IC 카드와 같은 전자카드가 도입되어 있지만, 이 기록으로부터 한 사람 한 사람의 행동경로를 알 수 있다고 하는 의미에서는 강력한 센서이다. 휴대전화는 더욱 진화되고 있으며, 카메라나 비디오는 물론 GPS,

| 생물의 진화 | | 도시기반의 진화 | |
|----------|----------------|----------|-------------------------|
| 방어계(防禦系) | 피부 골격 | 방어계 기반 | 자연재해에 대처 안전하고 튼튼한 건물 |
| 물질 순환계 | 혈관 순환기 | 물질 순환계 | 라이프 라인 교통 · 에너지 |
| 신경계 | 신경 신경절 뇌 | 신경계 | 센싱 & 컨트롤 |

그림 1. 도시기반과 생물의 아날로지(analogy) 비교

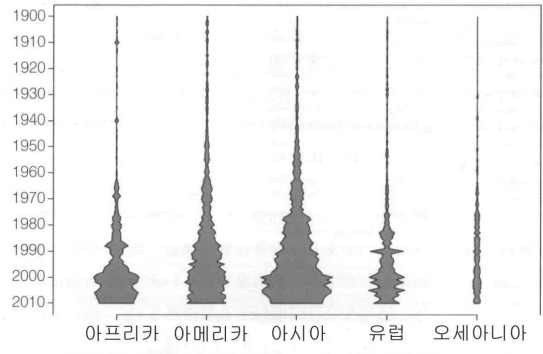
가속도계를 비롯하여 여러 가지 센서가 내장되어 있다. 상공에서는 위성으로, 아래에서는 거리의 비디오나 개인의 휴대전화로 지구나 사회에 관한 정보를 모니터링 할 수 있는 체계가 구축되어가고 있다고 한다. 이것은 ICT (Information and Communication Technology) 성과의 덕택이며 20, 30년 전에는 생각할 수 없었던 상황이다.

터널과 교량 등의 인프라가 고령화되면 안전에 대해 막연히 불안하게 된다. 이러한 시설물은 육안점검 등에 한계가 있으므로 현대 ICT 기술을 사용하여 이 한계의 문제를 해결할 수 있을 것이다. 여기에는 ‘인프라(infrastructure)의 안전’을 위한 선진기술인 센서나 로봇기술의 적용이 열거되고 있다. 인프라에 이른바 신경계를 삽입하여 손상을 파악할 수 있는 자율적 시스템으로 하는 것이다(그림 1).

모니터링을 지지하는 기술을 크게 두 가지로 나누면, 센싱과 시스템 동정(同定)기술로 나누어진다. 후자는 ERA(Eigen-system Realization Algorithm) 방법으로 대표되도록 1980년, 1990년대에 크게 발전되었다. 최근에는 빅 데이터(big data)라고 부르게 된 것처럼 대량의 데이터에서 유의(有意)한 사실이나 이상치 검출의 방향으로 진화되고 있는 것으로 보인다. 전자는 1990년대의 레이저 등의 계측장치나 고도의 비파괴 검사법이 계속적으로 발전되고 2000년대에 들어 와이어리스 센서의 연구가 가해져 더욱 더 성황인 상황으로 되었다.

이 분야는 원래는 항공계가 중심으로 되어 출발하였지만 ‘구조 헬스 모니터링, 영어로 말하면, Structural Health Monitoring(SHM)이라고 하는 새로운 분야를 형성하여 점차로 토목, 선박, 기계, 자동차, 원자력, 건물, 전자, 계측, 수리(數理) 등 여러 가지 분야가 모인 횡단적인 분야로서 성장하였다. Encyclopedia of SHM(구조 헬스 모니터링 백과사전)이라고 하는 2,700 페이지에 달하는 책이 간행되었지만, 유럽, 미국의 편저자에 더하여 아시아에서도 참여한 것은 이 테마의 범위가 세계로 미치는 아주 새로운 분야로 되어 있기 때문이며, SHM을 다루는 국제학회가 몇 개 조직되어 있다.

2. 구조 헬스 모니터링(SHM)에 대한 관심 고조의 배경
SHM에 대한 관심은 전술과 같이 세계적으로 높은 레벨



[出典] EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database
- www.emdat.be - Université catholique de Louvain - Brussels - Belgium.

그림 2. 자연재해 발생건수의 1900~2010년 추이(대륙 간의 비교)

을 나타내고 있다. 그 이유는 여러 가지 측면에서 설명할 수 있다고 생각된다.

큰 원인의 하나는 ‘안전’에 대한 사회 관심의 고조이다. 바꾸어 말하면, 사고, 재해가 증가하는 경향이 있다는 점이다. 자연재해가 세계적으로 늘어나고 있는 경향이 있다는 것은 통계적으로도 밝혀지고 있다(그림 2). 최근의 집중호우 등이 많은 것으로 보면 수궁하는 사람도 많을 것이다. 인구가 늘어나고 인프라 관계의 자산도 늘어나고 있는 상황에서는 자연재해에 따른 리스크(로스)가 늘어나는 것이 당연하다고도 한다.

터널이나 교량 등의 인프라는 인공물이며, 시간과 함께 열화되고 취약성이 증가된다. 우리나라는 고도 성장기에 건설된 인프라가 수십 년 경과 중이며, 적절한 유지관리, 보수를 하지 않으면 위험해지게 되는 경우가 생길 수 있다. 2007년에 갑자기 붕괴된 미국 Minnesota의 교량은 설계 미스가 원인이라고 한다. 이와 같이 설계나 시공의 미스나 불량률의 문제도 잠재적으로 안고 있다. 인프라 자체의 리스크가 높아져 가고 있는 것이다. 자연재해나 인프라의 사고를 줄이려고 할 때에는 센싱이 유력한 방법으로 된다.

인프라에는 철도, 도로, 상하수도 등 여러 가지가 있다. 원자력 발전 등의 에너지는 공공성이 높은 인프라라고 한다. 도서관이나 병원 등도 인프라라 하고, 최근에는 공공 공간에 큰 영향을 주는 주택, 오피스빌딩 등도 넓은 의미에서의 인프라에 포함하는 경향으로 있다. 이와 같은 인프라에 깊이 관계되는 것이 토목, 건축의 분야이며, 학술적으로

는 ‘구조공학’이라고 부르는 분야이다. 이 분야에서 최근 30년의 큰 학술적인 변화는 유한요소법이라고 부르는 해석기술의 진전과 침투이다.

유한요소법에 관하여는 고체뿐만 아니라 유체해석이나 열 등 여러 가지의 해석에 사용되며, 수많은 범용 소프트웨어가 시장에 나오고 있다. 여러 가지 비선형 문제(재료, 기하학, 충돌 등)도 다루고, 자유도도 몇 십만, 몇 백만이 풀리는 시대이다. 예전에는 자유도나 계산시간을 얼마나 줄이는가에 힘을 쏟았지만, 이제는 그렇지 않다. 식이 세워지면 풀리는 시대인 만큼 미크로한 엄밀한 실험으로부터 재료의 상세한 모델을 구축한다고 하는 ‘기초적 연구’와 실제의 구조물이 나타내는 복잡한 거동으로부터 새로운 현상이나 테마를 찾는 ‘필드 베이스(field base) 연구’의 2극화 시대로 되고 있다는 느낌이 든다. 초대형 진동기를 사용하는 구조실험이라고 하는 것도 물론 있지만, 개인 베이스로는 장치나 비용의 면에서 무리이며, 연구의 주류는 아니다. 연구자가 새로운 테마를 찾는 데에 센서를 사용하는 필드 계측으로 나가는 시대로 된 것이다.

이상은 니즈(needs) 면에서의 요청이지만, 전술과 같이 시즈(seeds) 측의 기술혁신도 경이적이다. 하나는 센싱 기술의 향상이다. 여러 가지 센서가 개발되어 소형화, 고기능화 및 저가격화가 상당히 진행된 것이 크게 영향을 미치고 있다. 센서로부터의 팽대한 데이터를 곧바로 처리하는 컴퓨팅 기술의 진전도 크다. 시스템 동정(同定) 기술, 즉 데이터로부터 모델 그 자체, 모델의 파라미터 결정 등의 해석기법도 상당히 진보되었다. 이것은 이른바 역(逆)문제에 상당하며, 파라미터를 넣어 응답을 구하는 보통의 정(正)해석에 비하여 어렵고 수학적으로도 고급의 문제이다. 연구자가 보다 고급의 과제를 좋아하는 것도 자연스럽다.

잘 알려져 있는 것처럼 어떤 기술이 사회로 보급되고 침투되어가기 위해서는 니즈(needs)와 시즈(seeds)가 매치되는 것이 불가결하다고 한다. 때때로 시즈가 앞서가서 연구는 진행되는 하나 사회로의 출구가 보이지 않는 경우가 흔히 있다. 인프라 모니터링은 현재 니즈와 시즈가 함께 늘어나고 있어 사회에서의 활용이 기대되고 있는 분야라는 점은 틀림없다. 그러나 그렇다면 가만히 있어도 전개가 계속 진행되느냐고 하면 인프라 특유의 어려운 면도 많이

있다. 그러한 문제를 어떻게 극복하는가를 인프라에 가까운 사람, 센서나 정보처리에 가까운 사람의 양쪽이 생각할 필요가 있다고 생각된다.

3. 인프라의 리스크

인프라의 재해·사고에 따른 리스크(Risk)는 개념적으로는 원인으로 되는 해저드(Hazard)와 취약성(Vulnerability)의 곱, 즉

$$R=H \times V$$

로 나타낸다. 해저드란 구조물에서는 작용(action)과 같은 것이며, 교통하중, 지진, 바람, 우량 등이 그것의 대표적인 것이다. 열화나 녹에 관계되는 소금이나 물도 포함될 것이다. 취약성은 구조물에서 이른바 저항에 상당하는 것으로 강도나 찰기는 당연하지만, 중복성이라든가 설계미스 등도 포함된다. 설계에서 고려하지 않은 상정 외의 거동을 포함시켜도 좋을지 모른다.

4. 해저드 센싱·모니터링

우리나라의 자연조건은 엄하며 태풍이나 호우에 따른 자연재해가 많은 편이다. 이 때문에 바람, 우량, 지진 등에 대한 해저드의 센싱은 종래부터 행하여져 왔다.

이와 같은 해저드 센싱을 인프라에 적용하고 있는 예로는 고속열차 선로연변 실시간 지진정보 시스템이 있다. 이 지진정보시스템은 경부고속철도의 주요교량 및 터널에 약 11km 간격으로 지진감지센서를 설치하여 지진관련 정보를 고속철도 관제실에 실시간으로 전송해 열차운행을 통제하고 있다. 고속철도 선로 연변에서 계측된 지진 값이 40 gal(진도 4) 이상이 되면 관제실에는 황색경보가 울리고 관제사는 운행 중인 열차를 170 km/h로 서행운전을 지시하게 되며 지진계측 값이 65 gal(진도 5) 이상이 되면 관제실에는 적색경보가 울려 관제사는 운행 중인 열차가 즉시 정지하도록 지시한다.

우리나라 계기지진관측은 1905년 인천관측소에 기계식 지진계를 설치함으로써 시작되었다. 그 후 40여 년간 조선총독부 산하 측후소에 지진계를 점진적으로 추가 설치하여 광복이전까지 우리나라에서는 총 6개소의 관측점을 갖는 지진관측 망을 운영했다. 한편, 1945년의 광복과 1950년

6.25 동란은 우리나라의 지진관측업무를 쇠퇴·중단시키는 결과를 초래했다. 약 20년간의 지진관측 공백기를 거쳐 계기지진관측이 재개된 것은 1963년 3월이다. 이는 미국지질조사소의 세계지진관측 망(WWSSN : World-Wide Standardized Seismograph Network) 사업의 일환으로 국립 중앙관상대에 세계표준지진계(WWSS : World-Wide Standardized Seismograph) 1대가 설치됨으로써 이루어진 것이다. 그리고 1978년 홍성지진을 계기로 장비현대화 사업에 힘입어 1990년 초에 12개소의 관측점을 갖는 온라인(On-Line) 지진감시시스템을 구성하게 되었다. 그 후 1996년 12월 13일 영월지진과 1997년 6월 26일 경주지진으로 국가의 지진방재체제에 대한 전면적 보강의 필요성이 제기되었다. 과거장비는 아날로그 기록방식으로 장비의 노후화뿐만 아니라 지진분석 시 관측자의 주관이 개입되어 오류발생 가능성이 높으므로 기상청은 지진 및 지진해일 정보시스템 보강을 위한 지진 및 지진해일 관측망 확충계획을 수립했으며, 이와 같은 시대적 상황에 따라 지진관측 장비가 전면적으로 보강되어 최신의 디지털식 지진관측 망을 확충했다.

우리나라의 소방방재청은 2013년 3월에 동일본 대지진 2주년을 맞아 한반도 주변 해역 전역에서 발생한 어떠한 지진에 대해서도 10분 내에 지진해일의 파도높이, 도달시간 뿐만 아니라 실시간 침수지역까지 예측할 수 있는 ‘지진해일대응시스템’을 개발했다.

일본의 경우에 동경가스의 Supreme은 1995년 阪神淡路 대지진 시 가스시설 피해의 크기를 거울삼아 개발해 도입한 것으로 SI지진계를 관할내의 4천 개소 남짓 설치하여 흔들림이나 액상화의 정보를 베이스로 가스의 차단을 리얼타임으로 행하는 것이라고 한다.

이들의 시스템은 해저드의 센싱이며 고가교나 가스관 등의 인프라 자체를 센싱하는 것은 아니다. 정지한 열차나 막은 가스의 재개로 되면 사람이 현지에서 인프라의 안전을 확인하는 작업을 필요로 하기 때문에 다운타임(downtime)이 크게 된다.

5. 인프라의 센싱

구조물의 강진 관측이라 부르는 센싱이 시작된 것은 일본의 경우에 1958년으로 댐이 최초이며, 교량에서는 1961

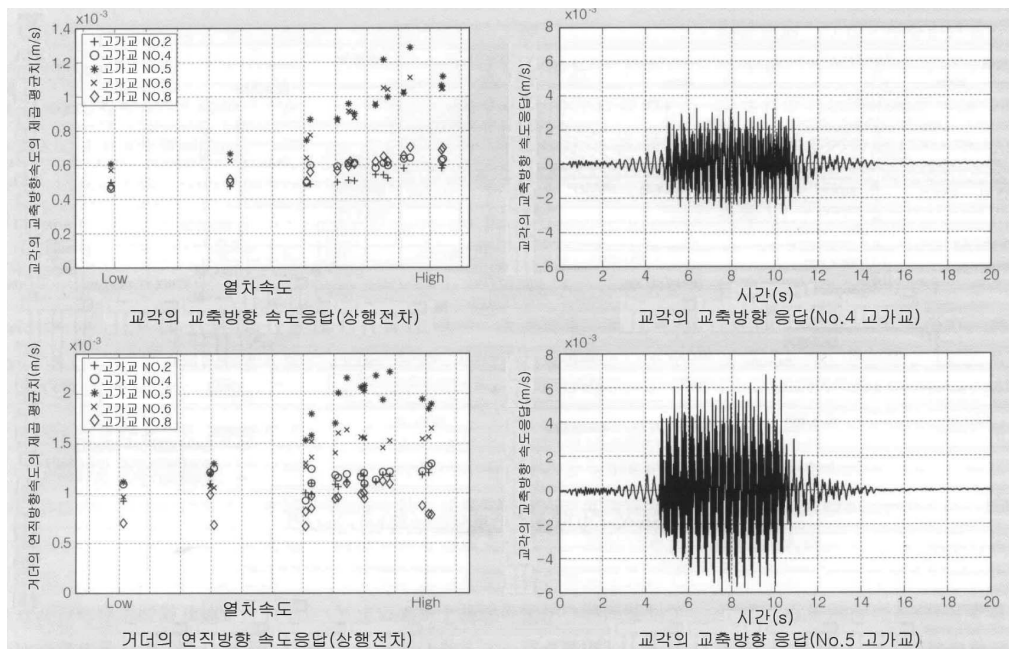


그림 3. 도면상은 완전히 같은 철도고가교 무리에서의 열차통과 시 진동계측

년에 시작되었다고 한다. 구조물의 주기대역을 대상으로 한 SMAC지진계가 1953년에 개발되어 지진동과 함께 구조물의 흔들림이 계측되었다고 한다. 이들은 리얼타임이 아니라 오프라인에서 처리되는 것이지만 지반의 흔들림이 구조물에서 얼마나 증폭되는지를 정량적으로 실증적으로 나타내낸 것으로 내진공학, 내진설계의 발전에 크게 공헌하였다고 한다. 지진에 민감하게 반응하는 장대교량의 건설이 활발하게 되어 이들에는 강진관측이 행하여지는 예가 늘어났으며, 장대교량에서 지진이나 바람으로 인한 흔들림을 장기에 걸쳐 센싱한 결과, 공학적 또는 학술적으로 가치가 있었다고 한다.

철도고가교는 경우에 따라서는 동일 형식이 연속하여 건설되어 사용되고 있다. 이들은 동일 하중에 대하여 유사 거동을 하는 것일까? 도면상은 완전히 같은 고가교의 동일 장소에 센서를 붙여 계측한 결과의 예를 그림 3에 나타낸다. 교량 위로 통과하는 열차가 공통이었음에도 불구하고 응답은 동일 주행속도에서도 분산이 크다. 이것은 무엇을 의미하는 것일까? 실제로는 그 후에 상세한 조사검토가 이루어져 보강공사가 행하여졌다고 한다. 유사 구조가 동일 하중을 받아도 그 중에는 특이적인 또는 일탈된 응답을 한다는 점이 유사 구조물을 수많이 센싱하여 처음으로 발견된 것이다.

인프라는 라이프라인이라고 영어에서 말하는 것처럼 중요한 선형 구조물이 많고, 철도가 대표적인 것이다. 그렇게 되면 궁극의 센싱은 이동하면서 선형의 인프라를 센싱한다고 하는 것이며, 이것을 이동체 센싱이라고 하는 사람도 있다. 궤도검측차, 도로에서 말하는 로드 프로파일러(Load profiler) 등은 이동하면서 도로나 노면의 상태를 높은 정밀도로 센싱한다. 그러나 이들은 고가이기 때문에 주요 간선 등에만 사용되고 센싱의 빈도도 낮다. 사고재해를 미연에 방지하려고 하면, 고빈도의 센싱이 불가결하다.

6. 인프라 센싱 · 모니터링의 향후 전개

인프라의 경년화, 고령화가 진행되고 있어 ‘노후화’라는 말이 사용되고 있다. 인프라에서 중요한 것은 안심하고 안전하게 사용하는 것이며, 사고재해를 없게 하고 유지관리 비용을 억제하기 위한 노력은 향후에도 큰 과제이다.

미국에서는 계속해서 일어난 교량에서의 큰 사고에 따라 1970년대 전반부터 교량에서는 육안검사를 도입하여 인프라 매니지먼트(infrastructure management)를 진행하여 왔다. 그러나 개인에게 크게 의존하고 보이지 않는 경우의 대응 등 육안검사의 한계를 의식하여 센싱을 증시한 LTBPP(Long Term Bridge Performance Program)를 2007년부터 개시하였다. 유럽에서도 같은 연구 프로젝트가 행하여지고 있다. 중국에서는 SHM을 만재한 교량을 이미 수많이 건설하고 있지만 모니터링의 효용이 현시점에서 나타나고 있지는 않다고 한다.

인프라 모니터링이 어려운 것은 양이 팽대한 점, 구조 특성도, 열화도 화학적인 것에서 물리적인 것까지 다종다양하다는 점에 있다. 리스크 매니지먼트에서는 해저드 모니터링에 역점이 주어졌지만, 고가교나 교량 등의 인프라 자체에 대한 센싱이 다음의 스텝인 점은 틀림없을 것이다. 오래된 교각에서는 세굴에 따른 경사의 문제가 있지만, 철도분야에서 센서를 사용한 상시 모니터링이 실용화되어가고 있는 것은 그 일례이다. 세굴이 염려되는 교각의 수는 많지 않다고 생각되지만, 실용화하기 쉬운 분야이기도 하다.

인프라 스톡(stock)의 센싱으로 되면 필요한 센서의 수가 늘어난다. 해저드인 지진동에서는 10 km든지 20 km 간격에서의 센싱이라고 하는 것에서도 어느 정도 흔들림의 공간적 분포의 상황을 파악한다. 그러나 하나의 고가교 유닛 각각에 센서를 배치하게 되면 20 m 간격의 오더로 되며 필요한 센서의 수는 2자리든지 3자리 늘어난다. 센서의 정밀도, 안전성, 내구성을 유지하면서 얼마만큼 센서의 코스트 다운을 하는가가 최대의 과제로 된다. MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 가속도계 등이 차차로 개발되고 있지만, 스펙을 명확히 한 후에 진짜로의 조직적인 개발이 불가결하다고 생각된다.

인프라의 입장에서 말하자면, 모든 고가교 유닛에 센서를 설치할 필요가 있는 것인가, 어느 정도 속아낼 수 있는가에 답할 수 있도록 해줄 필요가 있다.

재료의 열화에 기인하는 손상을 대상으로 하는 스톡 매니지먼트(stock management)에 대한 센서의 적용은 더욱 어려운 문제를 안고 있다. 손상은 극히 국소적(로컬)이며, 센서에 필요한 정밀도가 높게 된다. 손상의 가능성이 있는 개

소는 보통 무수히 많고 필요한 센서의 수도 막대하게 된다. 또한, 국소적인 손상의 진전은 대체로 극히 완만하며, 센서에 요구되는 정밀도, 안정성, 내구성, 코스트는 리스크 매니지먼트에 사용하는 센서에 비하여 한 오더는 높다고 한다. 구조 측에서 센서의 설치장소, 밀도 등에 관하여 스펙을 작성하는 것이 관건으로 될 것이다.

스톡 매니지먼트에 대한 모니터링의 적용은 상기와 같은 이유에서 매립형으로 하는 것은 어려운 면이 많으며, 이동형의 것을 추구하는 것이 하나의 방향일 것이다. 상기의 그림 3에 철도고가교에서의 진동측정의 예를 나타내었지만, 이와 같은 계측이 정밀도가 좋고 될 수 있으면 비접촉으로 간단하게 할 수 있는 방법 등이 고려될 것이다. 많은 동종의 구조를 대충 계측하여 모집단의 특성을 파악하여 그 중에서 일탈한 값을 나타내는 것을 상세 계측한다고 하는 2단계형을 고려하여도 좋을 것이다. 이동형의 궁극은 영업열차를 이용한 모니터링일 것이다.

Ⅲ. 상태감시용 센서 네트워크의 구축

1. 철도토목구조물의 보수 관리

철도토목구조물에 대한 예방보전은 주로 시간계획보전이며 정기적으로 실시하는 정기검사가 중심으로 되어 있

다. 그러나 철도토목구조물에 대한 정기검사의 주기는 통상적으로 수개월에서 2년 정도이기 때문에 정기검사 후에 이상이 발생된 경우에는 그 이상상태가 장기간 방치되어 버릴 리스크가 있다. 또한, 지금까지의 정기검사에서는 데이터의 지속적인 수집이 곤란하고 검사대상 설비의 경년 변화 경향을 적절히 파악하기가 어렵다고 하는 문제도 존재한다. 그 때문에 향후의 철도토목구조물 예방보전에서 계속적으로 데이터를 수집하여 상태 베이스에서의 예방보전을 하는 상태감시 보전의 중요성이 커진다고 생각된다. 근년에 이와 같은 상황에서 센서 네트워크를 이용한 상태감시가 주목을 받고 있다.

2. 상태감시 시스템을 이용한 보수 관리의 효율화

(1) 센서 네트워크

센서 네트워크는 센서를 관측개소에 설치하여 대상의 관측 데이터를 수집하는 네트워크 시스템이다. 센서 네트워크는 센서, 중계기, 데이터 집약장치로 구성된다. 센서에서는 일정한 간격으로 데이터를 수집하여 그것을 (필요하다면 중계기나 다른 센서를 경유하여) 데이터 집약장치에 무선으로 전송한다. 또한, 데이터 집약장치에 수집된 데이터는 인터넷 등의 공중망이나 전용회선을 이용하여 데이터베이스 서버에 축적된다(그림 4). 최근에는 터널, 교

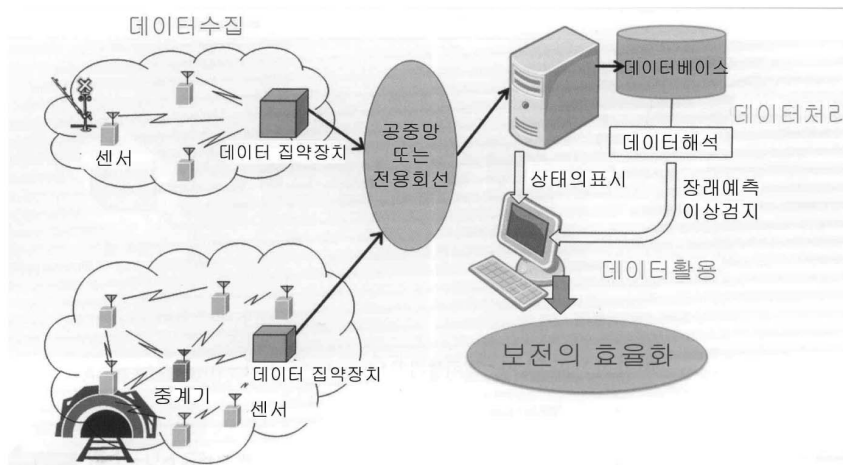


그림 4. 센서 네트워크를 이용한 상태감시 시스템에 의한 보전의 효율화

각, 역구내 등 여러 가지 설비에서의 센서 네트워크 도입이 진행되고 있다.

(2) 상태감시 시스템

상태감시 시스템의 기능은 데이터 수집, 데이터 처리, 데이터 활용으로 대별할 수가 있다(상기의 그림 4). 데이터 수집에서는 유선이나 무선의 시스템을 이용하여 설비의 상태에 관한 데이터를 수집하는 방법이나 USB 등을 이용하여 센서에서 직접 데이터를 회수하는 방법 등이 고려된다. 상기의 그림 4에서는 센서 네트워크를 이용하여 감시대상의 설비에서 데이터를 수집하고 있는 예를 나타내고 있다.

이와 같이 수집된 데이터는 데이터베이스 서버에 축적된 후에 설비상태의 파악에 활용된다. 상태감시 시스템에서 데이터 처리의 목적은 이상검지와 장애예측으로 나눌 수가 있다. 이상검지는 수집된 데이터를 항상 감시하여 이상상태를 나타내는 데이터가 관측된다면 즉석에서 그것을 검지하는 것을 목적으로 한다. 이상을 신속하게 검지함으로써 이상상태의 간과를 방지할 수가 있다. 또한, 조기검수에 따른 유지관리비용의 저감도 기대할 수가 있다. 한편, 장애예측은 데이터베이스 서버에 축적된 대량의 데이터를 해석하여 경년변화 경향을 예측하는 것을 목적으로 한다. 장기적인 변화경향을 파악함으로써 효율적인 유지관리 스케줄의 작성이 기대된다.

이와 같이 상태감시 시스템에서는 지금까지의 시간계획보전에서는 어렵다고 생각되어온 리얼타임 감시나 상세한 시계열 데이터에 입각한 보전의 효율화를 목적으로 한다.

3. 센서 네트워크 설치운영비용의 최소화계획

상태감시를 목적으로 한 센서 네트워크는 수년에서 십수년에 걸친 장기운영이 상정된다. 그 때문에 센서 네트워크를 설치하여 운용하기 위한 비용을 저감하는 것은 시스템의 운용계획에서 중요한 과제로 된다. 그러나 센서 네트워크의 설치비용과 운용할 때에 발생하는 비용은 서로 밀접하게 관계하고 있고 그들 사이에는 여러 가지 트레이드오프(trade off) 관계가 존재한다. 예를 들어, 일반적으로 센서와 중계기는 전지구동이지만 중계기를 많이 설치하면 네트워크 내의 전지 소비량이 평준화되어 전지를 교환하

기 위한 순회간격을 길게 할 수 있는 경향이 있다. 즉, 설치비용을 증가시키면 운용비용이 저하되는 경향이 있다. 이 때문에 이러한 트레이드오프 관계에 있는 여러 가지 비용 파라미터를 적절히 고려하여 센서 네트워크의 설치비용과 운용비용의 합계를 최소화하도록 센서 네트워크를 설치하는 기법의 개발이 중요하게 된다.

상태감시용 센서 네트워크에서는 센서와 데이터 집약장치의 설치장소가 사전에 주어지는 경우가 많아 이들의 설치비용은 매몰비용으로 고려할 수가 있다. 그래서 센서 네트워크의 설치비용으로서 나머지의 중계기 설치비용을 고려한다. 또한, 센서 네트워크의 운용에서는 센서와 중계기의 전지 구입비용, 네트워크 내의 고갈된 전지를 교환하기 위한 작업비용이 발생된다.

한편, 상태감시를 목적으로 한 센서 네트워크는 여러 가지 설치환경의 특징에 따라 중계기의 설치장소, 센서와 중계기에 탑재된 무선기의 송신출력 설정, 각 센서에서 수집된 데이터를 데이터 집약장치까지 전송하기 위한 전송경로를 적절히 결정할 필요가 있다. 이 문제에 대하여는 수리적인 모델을 이용하여 센서 네트워크를 설계하는 기법이 개발되었다.

영국 Cambridge 대학과 일본 철도총연의 공동연구에서는 런던지하철 터널에서의 센서 네트워크의 설치에 관여해왔다. 그래서 개발된 설계기법을 적용하여 런던지하철 주빌리선(Jubilee line)의 Baker Street역과 bond street역 간에 센서 네트워크 설계안을 구축하였다.

4. 센서 네트워크의 구축

전술과 같이 센서 네트워크는 센서, 중계기, 데이터 집약장치로 구성된다. 센서는 측정기능과 무선기능을 갖추고 있으며 경사각이나 변위량 등 여러 가지 데이터를 취득하여 그들을 무선 전송한다. 또한, 데이터 집약장치는 센서나 중계기에서 송신되는 데이터를 수신하기 위한 무선기능과 수신된 데이터의 처리기능 및 데이터베이스 서버로의 데이터 송신기능을 가진다.

통상적으로 센서나 중계기의 소비전력은 그다지 크지 않기 때문에 대부분의 경우에 그들은 전지 구동으로 되어 있다. 한편, 데이터 집약장치에는 모든 센서로부터 전송된

데이터를 수신 · 처리하여 그들을 데이터베이스 서버로 송신하기 때문에 센서나 중계기와 비교하면 소비전력량이 크게 되는 경향이 있다. 그 때문에 센서 네트워크를 구축할 때는 데이터 집약장치의 전원 확보가 중요한 과제로 된다.

일반적으로는 데이터 집약장치가 AC전원 구동으로 되어 있다. 그러나 근접 시공의 영향 감시 등의 운용기간이 비교적 단기로 된 때에는 AC전원 구동보다도 전지 구동으로 하는 쪽이 경제적인 경우가 있다. 즉, 단기 감시에서 감시구간 내에 이용 가능한 AC전원을 확보할 수 없는 경우에는 데이터 집약장치용의 AC전원을 새로 부설하는 비용보다도 데이터 집약장치에 사용하는 전원 전지의 구입 · 교환을 위한 비용의 쪽이 낮게 되는 경우가 고려된다.

AC전원과 전지의 각각에 대응한 데이터 집약장치는 무선기, 소형 컴퓨터, FOMA(Freedom Of Mobile multimedia Access) 모듈, 타이머로 구성되어 있다. 모든 센서로부터 전송된 데이터를 무선기로 수신한다. 다음에 소형 컴퓨터로 이들을 데이터베이스 서버에 축적하기 위한 데이터 처리를 한다. 소형 컴퓨터로 처리된 데이터는 FOMA 모듈에 의하여 FOMA회선을 통해 데이터베이스 서버로 송신된다. 게다가, 정전이나 소형 컴퓨터의 프리즈(freeze) 대책으로서 타이머에 의한 정기적인 전원공급의 온오프(on off) 제어를 하고 있다.

IV. 하천증수 시의 교각기초 건전성의 평가

1. 하천증수 시의 교각기초 건전성

하천 증수(增水) 시에는 세굴의 영향으로 교각기초의 안전성이 저하되는 경우가 있다. 이 때문에 철도사업자는 하천수위에 따라 필요시에 운전규제를 하여 열차의 안전을 확보하고 있다. 지금까지의 연구에 따라 충격진동시험 등으로 교각의 고유진동수가 기지이라면 증수 시의 상시 미동(微動)으로부터 교각의 고유진동수를 특정할 수 있고 그 변화로 증수 시 교각기초의 건전성을 평가할 수 있음이 알려져 있다(그림 5).

그래서 일본에서는 증수 시의 운전규제 해제판단에 도움이 되는 데이터를 수집하는 것을 목적으로 하여 상시 미동의 측정결과에서 구한 고유진동수에 의한 교각기초의

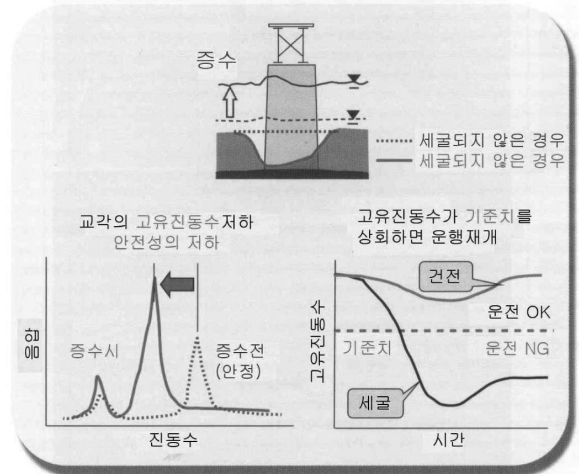


그림 5. 건전성 평가와 운전규제 시 판단지원의 이미지

건전성 평가 알고리즘을 내장하여 원격지에서의 제어와 감시를 할 수 있는 교각기초의 건전성 평가시스템을 개발하였다. 이하에서는 이에 관하여 소개한다.

2. 건전성 평가시스템의 기능

교각기초의 건전성 평가시스템의 개발에서는 다음과 같은 것도록 할 필요가 있다.

- ① 미동(微動) 계측 데이터를 시스템 내부에서 연산처리하고 리얼타임으로 교각의 건전성을 평가는 기능
 - ② 원격지로부터의 건전성 모니터링이 가능하게 되도록 미동 계측에 의한 건전성 평가결과나 측정조건의 설정정보를 인터넷 상의 데이터 서버에 순차적으로 보존하기 위한 통신기능
 - ③ 상용 전원이 없는 경우에도 장기간 가동할 수 있도록 배터리와 태양전지 등을 병용한 전원의 공급 · 제어 기능
- 이러한 기능을 만족시키면서 정밀도가 좋게 고유진동수의 변화를 파악할 수가 있는 평가 알고리즘을 가진 건전성 평가시스템으로 하였다.

3. 계측기와 연산처리 장치

(1) 건전성 평가시스템의 기기구성

건전성 평가시스템의 기기구성의 개략을 그림 6에 나타

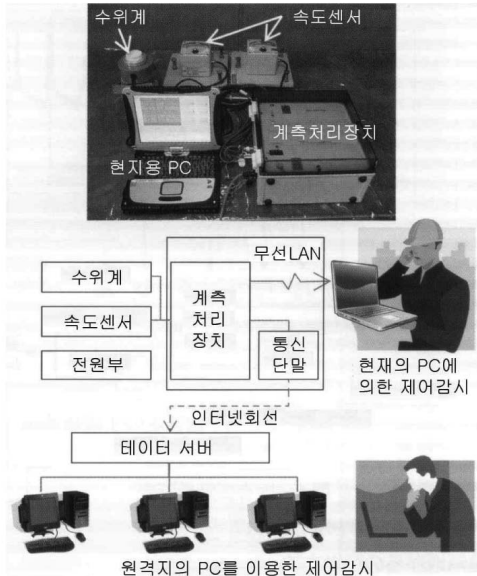


그림 6. 건전성 평가시스템의 개략 구성도

낸다. 건전성 평가시스템은 측정 대상의 교각 상에 설치하는 ‘속도 센서’와 ‘수위계’, 시스템의 제어와 건전성 평가를 하는 처리장치로 구성되는 ‘계측처리장치’, 계측시스템과 데이터 서버(이하에서는 ‘서버’라고 약칭) 간의 데이터 전송용의 ‘통신단말’, 이들의 동작 전원으로 되는 ‘전원부’ 등으로 구성되어 있다.

또한, 처리장치와의 사이를 무선LAN으로 접속하여 평가시스템의 제어·감시를 현지에서 행하기 위한 모니터 PC도 이용할 수가 있다. 그리고 원격지에서는 인터넷 상의 서버에 대하여 복수의 PC에서 액세스할 수 있고 PC마다로 평가결과의 확인이나 건전성 평가시스템의 측정조건을 변경하는 등의 제어가 가능하다. 평가결과와 측정조건 설정정보를 공유함으로써 리얼타임으로 복수의 원격지에서의 계측감시가 가능하게 된다.

(2) 통신방법

건전성 평가시스템에서 서버로의 통신수단은 현지에서의 설비를 될 수 있는 한 간소화하기 위하여 무선방식으로 하고, 데이터통신에는 2 GHz 주파수대의 데이터통신 전용의 휴대전화를 이용하는 것으로 하였다.

(3) 전원부

교량 상에 새로운 수전설비를 설치하지 않아도 건전성 평가시스템을 가동할 수 있도록 하기 위하여 배터리 급전에 의한 가동을 기본으로 하였다, 배터리는 밀폐형의 연축(鉛蓄)전지(lead storage battery)(12V-40Ah/개)를 이용하고 있다. 또한, 배터리의 교환주기를 연장시키기 위하여 공칭 최대출력 24 W의 태양전지 패널을 병용하였다.

4. 시스템 제어 소프트웨어의 기능

(1) 고유진동수의 측정방법

관측된 미동(微動)파형의 FFT처리로 얻어진 스펙트럼 파형에 대하여 충격진동시험으로 구한 고유진동수 6.4 Hz의 ±10%의 탐소(探索) 범위(5.76~7.04 Hz) 중에서 가장 탁월한 진동수를 상시미동에 의한 고유진동수로 하고 있다. 또한 FFT의 데이터해석 시간길이는 60 초이고 10 초마다 연속적으로 탁월진동수를 특정하여 이 탁월진동수의 5분간(30 개)의 평균치를 산출한다. 이 연산치의 변화를 감시함으로써 교각기초의 건전성 평가를 하고 있다. 그림 7에 고유진동수 특정의 순서를 나타낸다.

(2) 원격지에서의 제어방법

건전성 평가시스템은 기동할 때마다 서버에 액세스하여 측정조건이 기술된 파일을 읽어 들여서 설정된 조건으로 동작한다. 한편, 원격지에서는 측정조건이 기술된 파일을

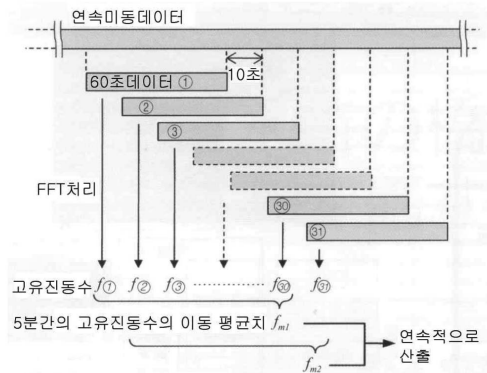


그림 7. 고유진동수 특정순서의 개요도

교환함으로써 임의의 조건에서 측정할 수가 있다. 또한, 통신장애 등으로 인하여 기동 시에 서버에 액세스할 수 없는 경우는 직전에 설정되어 있던 측정조건으로 작동한다.

(3) 측정결과와 감시화면

건전성의 평가결과는 수시로 서버에 업로드(upload)되기 때문에 서버에 액세스할 수 있는 PC단말이 있다면 복수의 개소에서 동시에 평가결과를 확인할 수 있다. 본 시스템에는 현지에서의 감시용과 원격지에서의 감시용 등 2 종류의 감시화면이 있다. 원격지에서는 상시미동의 각 방향성분의 스펙트럼 그림과 미동에서 구한 고유진동수의 시간경과 변화 및 수위를 수치로 하여 확인할 수 있다. 한편, 건전성 평가 시스템이 설치되어 있는 현지에서는 이들의 데이터에 대하여 측정되고 있는 상시미동의 파형을 모니터링할 수 있다.

(4) 측정모드

건전성 평가시스템에는 3 종류의 미동 측정모드가 있다. 첫째는 주로 평상 수위 시에 이용하는 ‘원격모드’이며, 일정시간마다 소정의 시간만큼 미동을 측정하고 측정 종료 시에 고유진동수를 산출한다. 둘째는 증수된 때에 이용하는 것을 상정한 ‘상측(常測)모드’이며, 연속측정으로 순차로 고유진동수를 산출하여 2 분마다 측정결과를 서버로 전송한다. 고유진동수를 산출하는 빈도는 임의로 설정할 수 있지만 통상 10 초마다로 하고 있다. 셋째는 소정의 수위에 도달하면 미리 정한 측정모드로 자동으로 이행하는 ‘수위연동모드’이다. 수위 정보에는 평가시스템이 가진 초음파 수위계로 측정된 값을 이용한다.

(5) 시스템의 휴면 및 자동복귀 기능

건전성 평가시스템이 배터리와 태양전지를 병용하여 가동하는 조건으로서 배터리로부터의 전압이 어느 일정치 이하로 된 경우에는 배터리의 과다방전을 방지하기 위하여 시스템을 강제적으로 정지시키는 휴면모드로 이행한다. 또한, 휴면모드로 이행 후에 배터리가 충전되어 시스템

의 동작이 가능한 전압 치까지 상승한 경우에는 자동적으로 평가시스템을 다시 가동시킨다.

5. 실제교량에서의 가동시험

(1) 현지시험의 개요

이 헬스 모니터링(Health Monitoring) 시스템의 동작을 확인하기 위하여 일본에서 약 반년 간에 걸쳐 현지시험을 실시되었다. 시험을 한 교각은 상하별선의 교량으로 양자가 인접하여 있고 상하선의 교각은 연락통로로 연결되어 있다. 하부공의 기초는 모두 케이슨 기초이며, 상선은 하로 거더, 하선은 강 트러스 거더로 되어 있다. 속도센서는 상선과 하선의 각 교각의 상부에 설치하고, 계속처리장치 등은 연락통로 위에 설치하였다. 사전에 실시된 충격진동시험의 결과, 상하선의 교각 모두 6.4 Hz이었다.

(2) 각종 기능의 확인

시험기간 중의 전원 전압치의 시간경과 변화를 살펴보았더니, 약 10일간의 어떤 기간에 전압 저하에 따른 휴면모드로 2 회 이행되었지만 그 후의 충전으로 전압치가 회복되면 자동으로 복귀되어 있음을 확인할 수 있었다. 이번의 현지시험에서는 약 반년 동안에 배터리의 교환이 필요 없고 태양전지와 배터리의 병용으로 배터리의 교환주기를 연신할 수 있었다. 또한, 그 외의 통신기능에도 문제가 없을 확인하였다.

한편, 현지시험의 당초에 시스템 본체가 자동적으로 기동하지 않게 되는 장애가 발생되었다. 그 원인으로서 열차 통과 시에 발생하는 전자(電磁)적인 노이즈의 영향에 기인하여 처리장치 내의 제어용 IC칩이 이상을 일으킨 것이 원인으로 생각되었다. 그래서 처리장치의 케이스 전체를 금속제의 망으로 덮고, 게다가 어스를 취함으로써 전자적 노이즈에서 보호하기 위한 조치를 취했더니 이후에는 같은 모양의 장애가 발생되지 않았다. 이 점에서 실용화에 있어서는 EMC(☞ 참조)의 가이드라인에 따른 사양을 만족시킬 필요가 있다고 생각된다.

☞ EMC 내부 또는 외부로부터의 전기적·전자적인 간섭에 의하여 전자기 자체에 결함이 생기는 전자 감수성(感受性)과 타 전자기나 인체에 악영향을 주는 전자방해 등의 양쪽에 대하여 대책을 실시한 것이다. 어느 일정한 기준에 따라 이들의 성질을 확인하기 위한 시험을 EMC시험이라고 한다.

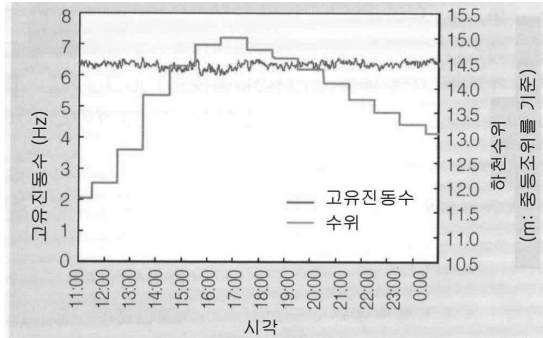


그림 8. 고유진동수와 수위의 시간경과 변화

(3) 증수 시에서의 교각기초의 건전성 평가결과

현지시험 실시기간의 어느 날 14 시간 동안에 수위가 약 4 m 상승한 사례가 관측되었다. 이 수위는 열차의 운전을 규제하는 수위에는 도달하지 않았다. 그림 8은 미동에서 구한 교각의 고유진동수와 근방의 수위관측점(국토교통부 telemeter)에서의 수위의 시계열변화 간의 관계를 나타낸다. 이에 따르면, 미동에서 구한 교각의 고유진동수는 약 6.0~6.5 Hz 내에서 변동하기는 하나 대체로 안정되어 특정할 수 있음을 확인할 수 있고 또한 이번의 증수에서는 교각기초의 건전성이 하락된 징후는 보이지 않았다.

V. 맺음말

향후에 인프라의 감시에서 ICT의 도입은 틀림없는 방향이라고 생각된다. 리스크 매니지먼트나 스틱 매니지먼트에의 적용에서는 인프라를 관리하는 사이드가 명확한 목적의식을 가진 후에 명확한 스펙을 작성하고, 센서 측 등의 ICT 측의 개발자와 면밀한 통합조정을 하여 서로가 상대측

의 상황을 잘 아는 것이 중요하다고 생각된다.

센서 네트워크를 이용한 상태 감시시스템은 계속적으로 수집한 자료를 활용하여 보전의 효율화로 이어지는 것을 목적으로 하고 있다. 향후에는 상태 감시시스템의 범용성을 향상시키기 위해 여러 가지 설비의 데이터 처리기법에 관한 연구가 필요하다.

또한, 건전성 평가시스템에 관하여는 향후에 적용조건의 식견을 얻음과 함께 시스템의 신뢰성 향상을 위한 가동실적을 축적하여야 할 필요가 있다. ☺

♣ 참고 문헌

- [1] 水野裕介, 片岡慶太, 松本好弘, 長山智則, 藤野陽三: 鉄道営業列車による移動体センシングの加速度応答を用いた位置同定と軌道変位の検出, 土木学会論文集 F, 2010
- [2] 下園 武範, 阿部 雅人, 藤野 陽三, 小芝 明弘, 鹿間 剛: 車両振動に着目した軌道モニタリングシステムの開発, <http://library.jsce.or.jp>, 2003
- [3] Dr. Angelos Amditiis : Structural Health Monitoring(SHM) today, The MEMSCON project approach, Institute of Communication and Computer Systems (ICCS), Greece, 2010, 10
- [4] 井手 剛: センサー・データによる状態監視技術, <http://www-06.ibm.com/ibm/jp>, 2013
- [5] 羽田明生: 設備監視のための無線センサネットワーク導入手法の提案, <http://bunken.rtri.or.jp>, 2013.
- [6] 羽田 明生, 土屋 隆司, 曾我 健一: 設置運用費用を考慮した無線センサネットワーク設計手法, <http://bunken.rtri.or.jp>, 2013.
- [7] 宮下 美貴: 設備の状態監視用センサネットワークの可用性評価, <http://bunken.rtri.or.jp>, 2012.
- [8] Satoshi WATANABE, Masahiko SAMIZO: Health-monitoring System for Bridge Pier Foundation by Micro-tremor Measurement, RTRI REPORT Vol. 25, No. 7, Jul, 2011.
- [9] 渡邊 諭, 佐溝 昌彦, 杉山 友康: 実橋りょうにおける橋脚基礎の健全性評価システムの適用例, <http://library.jsce.or.jp>, 2010.
- [10] 佐溝 昌彦, 興水 聡: 増水時に弱点となる橋脚を見つける, <http://bunken.rtri.or.jp>, 2008.
- [11] 서사범: 철도토목구조물의 관리에서 센싱과 모니터링 기술, 철도저널, Vol. 15, No. 1, 2012, 2.