

센서기반 교량 유지관리 시스템

Sensor Based Bridge Monitoring System

○ 장정환* · 김완중** · 안호현*** · 이세호*** · 정태영***

Jeonghwan Jang, Wanjong Kim, Hohyun An, Seho Lee, Taeyoung Jung

Key Words : Sensor(센서), Performance History(거동이력), Monitoring System(계측 시스템)

ABSTRACT

Sensors based bridge monitoring system (SBBMS) is designed to perform real-time monitoring and to store the performance history of in-service bridges. In general, visual inspections play a major role in maintenance of in-service bridges; however, they are not adequate to document the behavior of a bridge. Therefore, visual inspections and sensor based monitoring systems complement each other. Sensor based bridge monitoring systems consist of hardware and software systems. The hardware system contains the sensors and data-loggers to measure the behavior of a structure, the communicational equipment to transmit the measured data from the site to the monitoring center, and the computers to arrange and analyze the data. The software system controls data-loggers, arranges and analyzes the measured data, makes real-time display, stores the performance history.

1. 서 론

교량은 하나의 생명체이다. 교량의 건설은 곧 하나의 생명체를 탄생시키는 것이다. 그리고 이 생명체는 시간이 지남에 따라 노화현상, 즉, 교량의 성능이 저하된다. 인간이 수명을 연장시키기 위해서 아픈 곳이 있으면 치료를 받듯이, 교량도 사용자가 원하는 수명만큼 또는 더 이상 사용하기 위해서는 저하된 성능을 개선시켜 주어야 한다. 물론 교량은 인간이 아니므로 경제성을 고려하여 성능개선 비용이 과도하면 폐쇄를 시키는 것이 타당하다. 하지만, 사람이 적절한 시기에 치료를 받는다면 적은 비용으로 수명 연장이 가능하듯이, 교량도 적절한 시기에 보수/보강을 실시한다면 적은 비용으로도 수명 연장이 가능하다. 보수/보강이 적절한 시기에 이루어진다면 교량

의 수명을 연장할 수 있을 뿐만 아니라, 교량의 안전성과 사용성 확보가 가능하다. 이것은 곧 교량의 유지관리비용의 효율성을 증대하는 것이다. 하지만 아직까지 인간과는 달리 교량의 상태를 평가할 수 있는 방법이 제대로 이루어지지 않고 있다. 이는 교량의 상태를 평가하기 위한 유지 관리 자료-육안 점검 자료, 거동이력 자료-가 부실하고 있다고 하더라도 데이터베이스화가 되어 있지 않기 때문에 이를 이용한 교량의 상태 평가 기법에 대한 연구가 활성화되어 있지 않다. 즉, 교량의 상태를 제대로 파악하기 위해서는 교량의 유지 관리 자료를 체계적으로 구축한 후에, 이를 이용하여 구조공학자들이 구조물의 상태를 평가하는 방법을 연구하여야 한다.

교량의 유지 관리 자료를 생성하는 방법은 육안 점검과 계측이 있다. 일반적으로 교량에서 유지관리는 육안 점검을 통해서 이루어진다. 하지만, 육안점검은 교량의 거동에 대한 정보는 획득할 수 없다. 계측 시스템을 이용하여 획득된 거동 정보는 육안 점검 자료와 더불어 교량의 상태를 평가하는데 중요한 자료이다. 이 논문에서는 이러한 계측 시스템의 전반적인 구성에 대하여 언급하고자 한다.

교량의 계측 시스템은 교량 공학자가 대상 구조물에서 거동 정보가 필요한 항목을 설정하고, 교량 공학자와 전

* (주) 이제이텍 구조공학부 부장
E-mail : jangjh@ejtech.net
Tel : (031) 711-480(401), Fax : (031) 713-6311

** (주) 이제이텍 대표이사

*** (주) 이제이텍 구조공학부 과장

기 공학자가 서로 협력하여 하드웨어를 구축하게 되고, 교량공학자의 의견을 받아서 프로그래머가 계측 모니터링 소프트웨어를 구성하게 되는 복합적인 분야이다. 이러한 계측 시스템은 육안 점검과 더불어 보다 객관적이고 체계적으로 교량을 관리하는데 필요한 정보를 제공할 수 있다고 판단된다.

계측 모니터링 시스템은 구조물의 거동 정보를 원격지에서 취득할 수 있도록 하기 위한 하드웨어 부분과 이러한 하드웨어를 제어하고 취득한 데이터를 사용자가 요구하는 형식으로 정리, 저장, 분석 및 표출하기 위한 소프트웨어 부분이 있다. 계측 모니터링 시스템을 구축하는 목적은 다음과 같다.

첫째, 교량의 상태를 평가하는 데 필요한 거동 정보를 제공한다.

둘째, 교량의 사용성 및 안전성 확보를 위한 정보를 제공한다.

셋째, 유사교량의 설계, 시공, 유지관리에 필요한 정보를 제공한다.

2. Hardware System

하드웨어 시스템은 구조물의 응답을 측정 및 수집하는 센서 및 데이터로거, 측정된 데이터를 현장에서 계측실까지 전송하기 위한 통신 장비, 측정된 데이터를 정리, 저장, 분석 및 표출하는데 사용할 컴퓨터로 구성된다.

2.1 센서

계측 시스템을 통하여 교량의 상태 판정에 필요한 자료를 취득하기 위해서는 그림 1과 구조물에서 발생하는 거동 정보만을 측정하는 것이 아니라, 교량에 하중으로 작용하는 차량 중량, 온도 및 바람에 대한 정보도 측정하여야 한다.

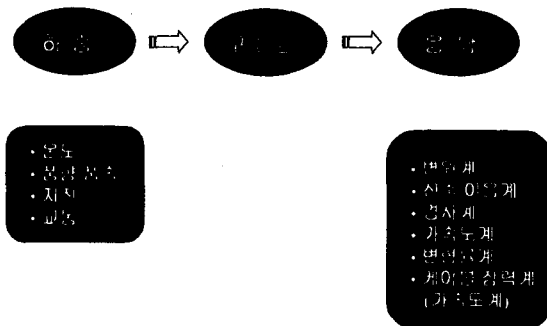


Fig.1 Measurements of a Bridge

현재 교량에 작용하는 하중 중에서 교통하중을 측정하기 위한 센서는 다른 하중들을 측정하는 센서에 비해 정확성과 사용성이 떨어지기 때문에 현재 구축된 또는 구축 예정인 교량 동태관측 계측 시스템에서는 설치되지 않고 있다. 다만 변형률계를 이용하여 간접적으로 교통하중을 측정하기 위한 연구들이 국내외적으로 진행되고 있다. 다른 하중들은 온도계, 지진계, 풍향 풍속계를 이용하여 측정되고 있다. 교량의 응답은 교량의 형상 관리를 위하여 처짐계, 경사계, 신축이음계 등을 이용하고 있고, 응력을 측정하기 위해서 변형률계를 사용하고, 교량의 동특성을 추출하기 위해서 가속도계를 사용하고 있다. 사장교 케이블 장력과 현수교의 행어 장력은 주로 가속도계를 이용하여 얻어진 진동 특성으로부터 장력을 추출하고 있다. 각 계측 센서별로 여러 제조사에서 다양한 센서들을 생산하고 있다. 그림 2는 현재 교량에 많이 적용되고 있는 센서들을 보여주고 있다. 일반적으로 센서에 대한 사양은 발주자가 설정하고, 계측시스템을 구축하는 용역사가 그 사양에 맞추어 센서를 선택하게 된다. 그러므로 발주자가 센서들의 사양을 선정할 때, 측정 목적에 맞도록 센서의 측정 범위, 정확도 및 센서 사용 온도 범위 등을 정확하게 고려하여 선정하여야 한다.

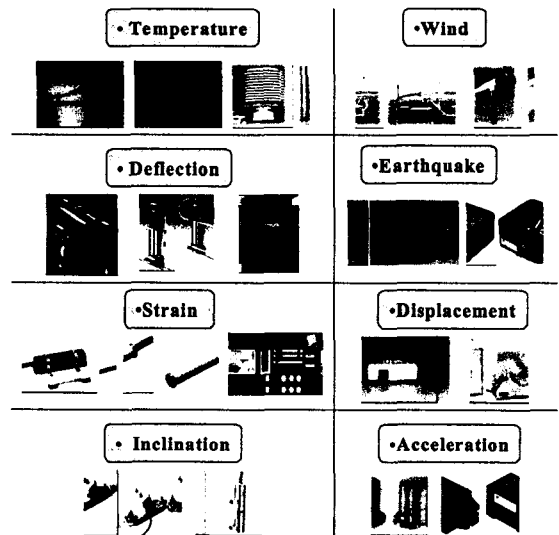


Fig.2 Sensors for measurements

아래에서는 교량 거동 응답 중에서 중요한 처짐과 응력을 측정하는데 사용되고 있는 처짐계와 변형률계에 대해서 간략히 소개하고자 한다. 교량의 처짐을 측정하고자 할 때, 이것이 활하중에 의한 처짐보다는 시간 경과에 따른 정적 처짐을 측정하고 싶을 때에는 정적 처짐계-수위

식 처짐계를 주로 사용-를 사용하는 것이 경제적이고 동적 처짐계를 사용하는 것보다 더 정확하게 측정이 가능하다. 하지만 활하중에 의한 교량의 동적 처짐 정보까지도 측정을 하고 싶다면, 동적 처짐계-레이저 변위계를 주로 사용-를 사용하여야 한다. 하지만 현재 상태 교량에서 많이 사용되고 있는 레이저 변위계는 반사되어 오는 광선의 각도를 이용하여 측정하고, 각도에 대한 해상도가 정해져 있기 때문에 광원과 타겟 사이의 거리에 비례하여 측정 범위와 해상도가 달라진다. 그러므로 교량의 경간장과 활하중에 의한 처짐량을 고려하여 동적 처짐계의 사용여부를 결정하여야 한다. 교량의 정/동적 처짐을 측정하기 위해서 GPS를 사용하는 경우도 있지만 가격이 비싸고, 동적 측정에서 정확도가 수평인 경우 1cm, 수직인 경우가 2cm 정도의 오차를 가지고 있기 때문에 측정거리가 300m-경간장 600m-이하인 경우에는 정확도가 레이저 변위계에 비해 떨어진다. 현재 사용되고 있는 레이저 변위계의 경우에는 측정거리가 300m인 경우에는 4mm 정도의 오차를 가지고 있다. 하지만 일본의 아카시 대교와 같이 중앙 경간의 길이가 2km에 이르는 교량에서는 레이저 변위계 보다는 GPS가 더 좋은 정확도를 가지게 된다.

구조물의 응력을 측정하기 위해서는 주로 변형률계를 사용한다. 변형률계도 활하중에 의한 응력변화 보다는 시간 경과에 따른 정적 응력 변화를 측정하고 싶을 때에는 센서의 안전성에서 우수한 vibration wire type 변형률 게이지를 사용하는 것이 좋지만, 활하중에 의한 응력 변화를 보고 싶을 때에는 전기저항식 변형률 게이지를 사용하여야 한다. 최근에는 광섬유 센서가 개발되고 있다. 광섬유 센서는 기존의 센서에 비해 여러 가지 장점이 있고 현재 여러 제조사에서 교량 계측 시스템에 적용할 수 있는 광섬유 센서들을 생산하지만 센서와 측정 장비가 고가이고 기존의 계측 시스템과는 별도의 시스템을 구축해야하므로 아직까지는 기존의 변형률계를 대체하지는 못하고 있는 실정이다. 하지만 신뢰성 있는 계측을 수행하는 데에는 기존의 센서들에 비해서는 광섬유 센서들이 더 적합하다고 판단된다.

2.2 데이터로거

센서에서 측정된 데이터를 수집하고 전송하는 장비인 데이터로거는 scan 속도에 따라 정적 데이터로거와 동적 데이터로거로 구분된다. 교량 계측에 주로 사용되고 있는 정적 데이터로거는 로그에 연결된 채널들에서 들어오는 데이터를 하나의 A/D 변환기로 기계식 relay 방식으로 획득하기 때문에 고속 측정이 불가능하다. 교량 계측에 주로 사용되고 있는 동적 데이터로거는 각 채널마다

A/D 변환기가 있기 때문에 고속 측정이 가능하다. A/D 변환기가 1개인 경우에도 고속 변환기를 사용하여 여러 채널을 전자식 relay방식 측정하므로 고속 측정이 가능하다. 정적 데이터로거는 동적 데이터로거에 비해 저렴하고 채널 확장이 가능하다. 하지만 구조물의 동적 응답을 취득하기 위해서는 동적 데이터로거를 사용하여야 한다. 그러므로 정적 데이터로거와 동적 데이터로거는 서로 경쟁 관계에 있는 것이 아니라 사용자가 측정하고자 하는 응답의 종류에 따라 어느 데이터로거를 사용할 지 결정되어야 한다.

2.3 통신 장비 및 방법

통신설비 설계 시 측정된 신호들을 원격지까지 보내는데 유선으로 보낼 것인지, 무선으로 보낼 것인지를 결정해야 한다. 무선 통신은 현장 여건상 유선 통신이 불가능한 경우나 현장에서 케이블 설치 비용이 과도하게 발생하는 경우에 적합하다. 유선 통신은 무선 통신에 비해 데이터를 안정적으로 보낼 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 교량 계측에서는 유선통신을 사용하고 있다. 유선 통신을 사용하는 경우에는 데이터를 전송하는 거리와 전송하고자 하는 데이터의 양을 고려하여 통신설비를 구축하게 된다.

현재 교량 계측 시스템에서 사용 중인 정적 로거에는 전송하는 데이터의 양이 적기 때문에 시리얼 통신인 RS-232 방식을 사용하고, 동적 로거에서는 전송하는 데이터의 양이 많기 때문에 Ethernet 통신인 UDP/IP 방식을 사용하고 있다. 이러한 통신 방법은 고정된 방식이 아니며 상황에 따라 통신 방식이 달라질 수 있다.

데이터를 전송해야 할 거리가 가까운 경우에는 신호를 전기적 신호로 보내도 되지만, 거리가 먼 경우에는 신호를 광 신호로 보내야만 한다. 전기적인 신호로 보내는 방법은 경제적이지만 장거리를 보낼 수가 없고, 길이가 길어짐에 따라 노이즈도 크게 발생하는 단점이 있다. 광 신호로 보내는 방법은 상대적으로 비싸지만 장거리를 보내기에 적합하고, 노이즈도 덜 발생하게 할 뿐만 아니라 대용량을 전송할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 경제성과 기술적인 부분을 고려하여 전기신호로 보내는 구간과 광신호로 보내는 구간을 적절히 배합하여 시스템을 설계하여야 한다.

계측 데이터가 데이터로거에서부터 계속실까지 전송되는 과정을 보다 상세하게 살펴보면 다음과 같다. 정적로거에서는 RS-232를 사용하지만 거리가 약 30m 이내에서 사용이 가능하다. 그래서 전기적 신호를 보다 멀리 보내기 위해서는 RS-422 또는 RS-485(Multi Drop 가능)로 변환하여 사용하여 약 1.2Km까지 전송할 수 있다. 하

지만 케이블 길이가 몇 백m씩 되면 전기적인 잡음이 크게 발생할 수 있기 때문에 광모뎀을 이용하여 보내는 것이 바람직하다.

동적 로거는 Ethernet(주로 UDP/IP)으로 약 200m 이내까지는 데이터 전송이 가능하다. 현장에서 계측실까지 거리가 수 Km이상 떨어져 있는 경우에는 광 전송장치를 이용하여 데이터를 전송해야 한다.

현장에서 최종적으로 데이터는 광 전송장치에 모아서 계측실로 보내지게 되는데, 정적로그와 동적로그의 통신 방식에 차이가 있으므로 (정적은 Serial통신이고 동적은 Ethernet 통신) 있다. 일반적으로 광 전송장치는 Ethernet 통신을 사용하므로 정적 데이터로그에서 오는 데이터를 광 전송장치에 전달하기 위해서는 Serial 통신을 Ethernet 통신으로 변환시켜주는 Protocol Converter가 필요하다. 그림 3은 계측 시스템의 일반도를 보여주고 있다.

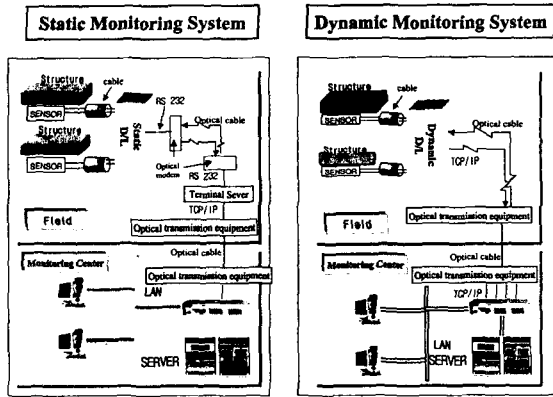


Fig. 3 A general diagram for hardware system

2.4 컴퓨터

현장에서 계측된 데이터를 원격지에서 처리하기 위해서는 컴퓨터가 필요하다. 기본적으로 상시 계측을 수행하기 위해서는 서버급 컴퓨터가 필요하다. 서버급 컴퓨터는 전송되어 오는 데이터를 정리, 분석 및 저장을 하기 위해서 필요하다. 현장에서 계측되어지는 자료는 데이터베이스화하여 저장된다. 현장에서 측정되는 데이터의 양이 적은 경우에는 서버급 컴퓨터에서 현장에서 들어오는 데이터를 실시간으로 표출하고 저장된 자료를 표출하는 소프트웨어를 구동할 수 있지만, 들어오는 데이터의 양이 많은 경우에는 컴퓨터에 걸리는 부하를 줄이기 위해서 자료를 정리, 분석, 저장하는 기능만을 서버급 컴퓨터에 부여하고, 측정된 자료를 실시간 표출하고 저장된 자료를 보는

용도로 일반 PC를 사용하는 것이 바람직하다.

위에서 언급한 계측 시스템 요소들을 이용하여 그림 3과 같은 시스템을 설계하는 순서는 다음과 같다.

A. 계측 항목 결정 - 대상 구조물에서 계측이 필요한 항목이 결정되면, 필요한 센서 수량을 동적과 정적으로 분류한다.

B. 데이터로거 수량 결정 - 필요한 센서 수량과 센서 위치를 고려하여 데이터로거의 수량을 결정한다. 센서에서 데이터로거까지의 거리가 너무 길면 측정된 데이터에 잡음이 많이 생길 수 있기 때문에, 가급적 센서에 가깝게 데이터로거를 설치하는 것이 바람직하다. 데이터로거는 고가의 장비이기 때문에 기술적인 부분과 더불어 경제적인 부분도 함께 고려하여 데이터로거의 수량을 결정하여야 한다.

C. 통신 방법 결정 - 전송하고자 하는 데이터의 양과 거리를 고려하여 통신 방법을 결정하여야 한다. 통신 방법에 대해서는 위에서 언급하였다.

D. 서버급 컴퓨터와 사용자용 컴퓨터 결정 - 계측실에서 처리해야 하는 데이터 용량에 따라 서버급 컴퓨터의 용량과 수량을 결정하고, 사용자가 계측되고 있는 상황을 체크하기 위한 컴퓨터는 일반적인 산업용 컴퓨터를 사용한다.

3. Software System

계측 소프트웨어는 구조공학자가 사용자와 협의하여 계측 소프트웨어에서 보고자하는 내용들을 선정하고, 이를 프로그래머에게 전달하면 프로그래머가 계측 소프트웨어를 구축하게 된다. 계측 소프트웨어는 다음과 같은 기능을 가지고 있어야 한다.

A. 데이터로거 제어 기능 - 데이터로거에 적용되는 setup values 중에서 sampling rate, gage factor 등을 계측실에서 제어 가능해야 하고, 네트워크 상황을 점검할 수 있어야 한다. 그림 4는 데이터로그 제어 기능을 소프트웨어에서 구현하고 있는 화면을 보여주고 있다.

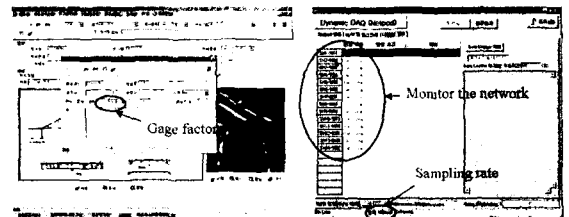


Fig. 4 Display for data logger control

B. 데이터처리기능- 전기적신호를 공학적 물리량으로 환산하는 기능을 가지고 있어야 한다. 데이터로거에서 들어오는 전기적인 물리량을 공학적인 물리량으로 환산하기 위한 gage factor와 offset 값을 데이터베이스로 구축하여 사용자가 언제든지 변경이 가능토록 한다. 그리고 각 계측항목에 대한 관리기준치를 설정하여 과도한 하중-풍속과 지진-이 작용하는 경우 경보를 발생하도록 한다. 그리고 사장교 케이블 장력이나 현수교 행어 장력 등은 가속도계에서 얻어진 동특성을 이용하여 장력을 추출하게 된다. 그림5는 데이터처리 기능을 보여주는 화면이다.

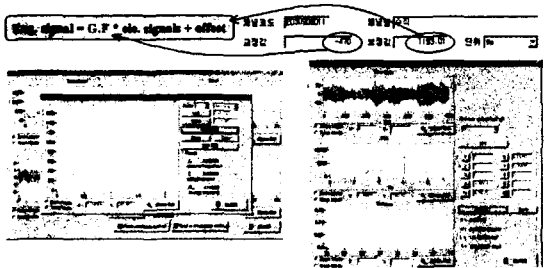


Fig.5 Display for signal processing

C. 데이터 저장 기능 - 계측 시스템 구축의 가장 기본적인 목표는 구조물 거동 정보를 체계적으로 구축하여 설계자, 구조공학자, 유지관리를 수행하는 사람에게 유용한 정보를 제공하고자 하는 것이다. 실시간으로 들어오는 데이터를 모두 저장할 수는 없고, 저장하더라도 막대한 양의 데이터를 이용하여 구조물의 거동이력을 보는 것도 무리가 따른다. 그러므로 측정되는 데이터의 통계치를 계산하여 데이터베이스로 구축하여야 한다. 그리고 일정분량의 측정치는 raw data로 저장하는 것이 바람직하다.

D. 데이터 표출 기능 - 데이터 표출은 기본적으로 GUI(Graphic User Interface) 방식으로 한다. 소프트웨어에서는 실시간 계측 자료를 표출하고, 또한 사용자가 원하는 기간 동안 측정값들의 통계치를 볼 수 있어야 한다. 계측 소프트웨어에서는 이외에도 사용자의 요구에 따라 계측 항목별 상관성 계산 및 계측 데이터 요약보고서 등과 같은 다양한 기능들을 첨가할 수 있다. 그림 6은 실시간 측정되어진 데이터를 표출하고 데이터베이스로 구축된 거동 정보를 보여주고 있고, 그림 7은 서로 다른 두 가지 계측 항목 사이의 상관관계를 알아보기 위한 기능을 보여주고 있다.

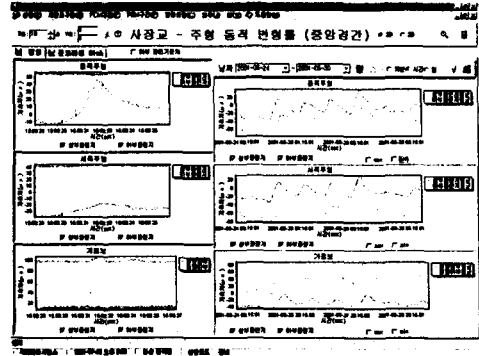


Fig. 6 Display for real time data and measured DB

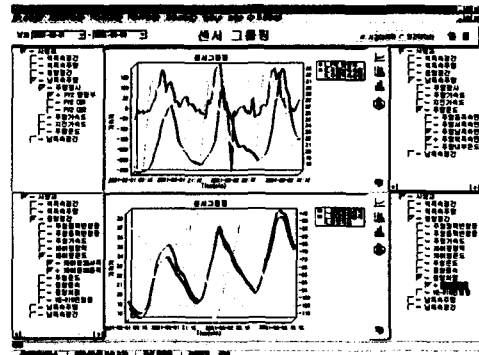


Fig. 7 Display for correlation between two measurements

4. 결 론

교량의 유지 관리 자료를 생성하는 방법은 육안 점검과 계측이 있다. 일반적으로 교량에서 유지관리는 육안 점검을 통해서 이루어진다. 하지만, 육안점검은 교량의 거동에 대한 정보는 획득할 수 없다. 교량 거동 계측 시스템을 이용하여 획득된 거동 정보는 육안 점검 자료와 더불어 교량의 상태를 평가하는데 중요한 자료로 사용될 수 있다.

신호기반 교량 거동 계측 시스템은 공용중인 교량의 실시간 거동을 감시하고 시간과 하중에 따른 거동을 저장 및 표출하고, 사용자가 교량 거동을 분석하기 용이하도록 하기 위한 도구이다. 이러한 계측 시스템은 하드웨어와 소프트웨어로 구분할 수 있다. 하드웨어는 구조물의 거동을 측정하는 센서, 측정된 데이터를 수집하는 데이터 로그, 수집된 데이터를 원격지에 있는 계측실까지 전송하기 위한 통신 설비 및 계측실까지 전송된 데이터를 정리,

저장 및 표출하기 위한 컴퓨터로 이루어진다. 소프트웨어는 데이터로그의 연결 상황 및 작동 상황을 계측실에서 감시할 수 있도록 하고, 계측실까지 전송된 데이터를 정리, 분석, 저장 및 표출이 가능토록 하여야 한다. 이러한 교량 계측 시스템은 교량 전문가에게 교량의 상태를 평가하는데 유용한 정보를 제공하기 위한 수단이지 계측 시스템 설치가 교량 상태 평가의 완성을 의미하지는 않는다. 또한 계측 시스템은 거동 정보를 제공하는 생명체

이므로 사용자가 시스템에 대한 유지 관리를 제대로 하지 않는다면 시간이 지남에 따라 계측 시스템은 기능을 상실하게 된다. 마지막으로 구조물의 유지관리에 도움이 되는 신뢰성 있는 시스템을 구축하기 위해서는 토목공학자만의 노력으로는 어려움이다. 그러므로 계측 시스템은 하드웨어를 구축할 때 필요한 전기/전자 엔지니어와 소프트웨어를 구축할 때 필요한 프로그래머와 유기적인 관계를 가지고 함께 구축하여야 한다.