(19)대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(51) 。Int. Cl.
G01H 11/06 (2006.01)

(11) 공개번호 10-2006-0122585
(43) 공개일자 2006년11월30일

(21) 출원번호 10-2005-0045172
(22) 출원일자 2005년05월27일
심사청구일자 2005년05월27일

(71) 출원인 건양대학교산학협력단
충남 논산시 내동 26 건양대학교 산학협력단
허광희
대전광역시 서구 관저동 990 66/5 대자연마을아파트 108-103
주식회사 한양씨앤에이
충청남도 천안시 쌍용동 1592 효명리치빌 2층 220

(72) 발명자 허광희
대전광역시 서구 관저동 990 66/5 대자연마을아파트 108-103
김창환
충남 천안시 쌍용동 2045호 현대아이파크홈타운아파트101동 501호
이우상
대전 대덕구 법동 선비마을 APT 110-1701호

(74) 대리인 최익하

전체 청구항 수 : 총 3 항

(54) 구조물의 모니터링을 위한 동적응답측정용 무선계측 시스템

(57) 요약

구조물의 모니터링을 위한 동적 응답 측정용 무선 계측 시스템에 관한 것으로서, 실 구조물의 상시 가진 상황에서 동적 데이터를 획득 후 무선 전송하여 구조물에 대한 동특성 모니터링을 가능하게 하고, 종래 유선 전송에 따른 계측 데이터의 왜곡현상, 높은 초기 설치비용 및 유지관리비용의 문제점을 해결한 무선 계측 시스템에 관한 것이다.

상기 무선 계측 시스템은, 구조물의 진동을 감지하는 가속도 센서를 포함한 구조물 각 위치의 센서 시스템 모듈과 상기 가속도 센서에서 진동신호로 출력되는 동적 데이터의 획득 및 처리, 저장을 수행하고, 메인 컴퓨터의 제어신호에 따라 계측 시스템 제어 및 계측상황 결정을 수행하는 제어 및 처리 모듈과 이 제어 및 처리 모듈에 직접 연결되어 그로부터 출력되는 동적 데이터를 메인 컴퓨터로 무선 전송하고 메인 컴퓨터에서 출력되는 각종 제어신호를 수신하기 위한 센서측 모뎀과, 상기 제어 및 처리 모듈과 메인 컴퓨터간 송수신을 위하여 상기 센서측 모뎀과 무선 송수신이 가능하도록 구비되는 메인 컴퓨터측 모뎀으로 구성된 무선 모뎀 모듈을 포함하는 것을 특징으로 한다.

대표도

도 1

특허청구의 범위

청구항 1.

구조물 상시 모니터링 시스템에서 구조물의 거동 특성 계측 후 계측된 데이터를 특성 분석이 이루어지는 메인 컴퓨터로 전송하기 위한 계측 시스템에 있어서,

구조물의 진동을 감지하는 가속도 센서를 포함하며 구조물의 거동특성을 계측하기 위하여 구조물 각 위치에 다수개의 센서가 설치되는 센서 시스템 모듈;

상기 가속도 센서에서 진동신호로 출력되는 동적 데이터의 획득 및 처리, 저장을 수행하고, 메인 컴퓨터의 제어신호에 따라 계측 시스템 제어 및 계측상황 결정을 수행하는 제어 및 처리 모듈; 그리고

상기 제어 및 처리 모듈에 직접 연결되어 그로부터 출력되는 동적 데이터를 메인 컴퓨터로 무선 전송하고 메인 컴퓨터에서 출력되는 각종 제어신호를 수신하기 위한 센서측 모뎀과, 상기 제어 및 처리 모듈과 메인 컴퓨터간 송수신을 위하여 상기 센서측 모뎀과 무선 송수신이 가능하도록 구비되는 메인 컴퓨터측 모뎀으로 구성된 무선 모뎀 모듈로 이루어지는 구조물의 모니터링을 위한 동적응답측정용 무선계측 시스템.

청구항 2.

제 1 항에 있어서, 상기 가속도 센서는 멤스(Micro-Electro Mechanical System : MEMS) 타입의 가속도 센서인 것을 특징으로 하는 구조물의 모니터링을 위한 동적응답측정용 무선계측 시스템.

청구항 3.

제 1 항에 있어서, 상기 제어 및 처리 모듈은, 상기 제반 기능을 수행하는 프로그램이 저장된 플래시 메모리와 프로그램 실행시 생성 또는 필요한 데이터가 저장되는 데이터 메모리가 내장된 마이크로컨트롤러와, 추가적인 데이터 저장 공간을 제공하는 외부 메모리를 포함하는 것을 특징으로 하는 구조물의 모니터링을 위한 동적응답측정용 무선계측 시스템.

명세서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 구조물의 모니터링을 위한 동적 응답 측정용 무선 계측 시스템에 관한 것으로, 보다 상세하게는 실 구조물의 상시 가진 상황에서 동적 데이터를 획득 후 무선 전송하여 원격지에서 구조물에 대한 동특성 모니터링을 가능하게 하는 구조물의 모니터링을 위한 동적응답측정용 무선계측 시스템에 관한 것이다.

일반적으로 건설 구조물은 시간이 경과함에 따라 노후화가 발생하고, 또한 바람, 지진, 차량 등에 의해 시간에 따라 불특정하게 발생하는 하중을 받게 되며, 구조물의 거동 역시 시간 및 작용하는 하중에 따라 변화하게 된다.

하지만, 구조물의 상태가 일정하게 유지되면 구조물의 동적 거동 특성으로 나타나는 대상 구조물의 고유 진동수와 감쇠계수, 모드 형상 등은 일정하게 유지되고, 이러한 구조물을 원형 구조물(Integrity Structure)이라고 한다.

그러나, 노후화나 기타 손상은 구조물의 특성을 반영하는 질량, 강성 등의 요소에 변화를 나타나게 하고, 이러한 변화는 원형 구조물의 동적 특성치의 변화를 야기시킨다.

따라서, 구조물의 동적 특성을 상시로 모니터링할 수 있는 시스템이 구축된다면, 실시간으로 구조물의 상태를 평가하고, 안정성을 확보할 수 있게 된다.

최근 들어 고층 빌딩과 장대교량과 같은 대형 토목 구조물이 증가함에 따라서 구조물 상시 모니터링 시스템(Structural Health Monitoring System : SHM)의 역할이 중요하게 이용되고 있다. 이러한 점에서 모니터링 시스템을 구현하고자 하는 많은 연구가 시도되고 있다. 이와 같은 모니터링 기술은 건물, 교량 등과 같은 구조물의 동적 거동 상황을 측정, 분석 및 진단함으로써 구조물의 안전성을 극대화하고, 구조물의 안전성을 향상시킬 수 있는 기술이다.

이러한 모니터링 기술은 주로 구조물에 부착된 센서에서 데이터를 획득하고, 이들 데이터를 변환하여 구조물의 손상도 평가를 위한 데이터를 분석하는 과정으로 대별된다.

그러나, 효과적인 구조물 상시 모니터링 시스템을 설계하는데 있어서는 매우 많은 기술들을 필요로 하며, 특히 구조물 손상 식별(Damage Identification) 기법과 데이터 획득 및 전송 기술들은 가장 중요하고 기본적인 요소들이다. 이러한 시스템은 구조물을 가진시키기 위한 인위적인 입력 가진을 구조물에 발생시켜야 하고, 이로 인한 많은 문제점 등으로 인해 조건부에 근거한 건전도(Health) 모니터링에 그치고 있는 실정이다.

따라서, 이러한 문제점들을 해결하고 구조물의 건전도를 모니터링하기 위한 다양한 연구들이 보고되고 있는데, 예컨대 많은 연구자들에 의해 자연 가진 기법이 연구되었으며, 특히 Farrar 와 Caicedo 등은 실 구조물을 대상으로 실험한 결과 자연 가진 기법(NExT와 ERA)이 토목구조물의 건전도를 모니터하는데 효과적임이 입증된다.

한편, 구조물 상시 모니터링 시스템의 설계에 있어서 또 하나의 중요한 요소는 데이터 획득 시스템에 관한 것이다. 통상의 구조물 모니터링 기술에서 널리 사용되고 있는 센서로는 반영구적이면서 신뢰성이 있고 구조물에 용이하게 부착 가능한 경사계, 가속도 센서 및 변위계가 있으며, 또한 스트레인 게이지는 금속 또는 반도체의 저항체에 변형이 가해지면 그 저항값이 변화하는 압력저항 효과를 이용하는 것으로 구조물의 실응력을 측정하는데 사용되고 있다.

상기와 같은 센서들을 이용한 교량의 안전진단은 유사시 발생할 수 있는 교량 구조물의 붕괴에 대비하여 교량의 현장계측 자료를 실시간으로 직접 받아서 유선으로 접속된 자료분석장치에 기록하고, 교량관리통제소의 교량관리자가 이렇게 기록된 자료를 토대로 교량의 안전상태를 점검하여 실시되며, 이를 통하여 사전에 교량의 안전상태를 판단할 수 있다.

결국, 이러한 교량 안전진단 시스템을 이용하여 구조물에 대한 상시 모니터링을 실시하는 경우, 안전이 우려되는 교량에 대해서 교통량을 통제하는 등 각각의 상황에 맞는 대책을 세울 수 있으며, 인명사고의 발생 등과 같은 문제점을 미연에 방지할 수 있게 된다.

그러나, 종래의 구조물 안전진단 시스템에서는 토목 구조물에 부착된 다수의 센서들로부터 계측된 신호를 근거리 통신망 또는 전용회선이나 통신회사의 일반 공용회선과 같은 유선을 통하여 자료분석장치에 전송시키고 있다.

이와 같이 모니터링 시스템에서 유선에 의한 계측 시스템을 사용하는 경우, 높은 초기 설치비용이 필요할 뿐만 아니라, 계측 시스템의 변경과 추가에 있어서 많은 비용과 시간이 소요되고, 주변 환경에 의한 잡음(Noise)이 문제점으로 지적되고 있다.

또한, 주로 대형 교량에 설치된 모니터링 시스템은 아직까지 반자동 상태의 모니터링 시스템으로, 다량의 데이터 처리 문제, 데이터 정확도 등과 같은 문제를 갖고 있을 뿐만 아니라, 구조물의 상태를 평가하기 위한 구조물의 원형이 부정확함으로 인하여 본질적인 의미의 건전도 모니터링이 되지 못하여 왔다.

특히, 토목 구조물의 효과적인 노후화 진행상태 및 건전성 평가를 위해서는 동적 데이터 분석을 통한 동적 특성치 획득이 필수적으로 요구되고 있는 바, 실 구조물에 적용이 가능하면서 상용화가 가능하고, 종래와 같이 단순히 정적 데이터 획득을 위한 것이 아닌 토목 구조물의 동특성 식별이 가능한 동적 데이터 획득과 자체적으로 데이터 처리를 할 수 있는 새로운 무선 계측 시스템의 개발이 절실한 실정이다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

본 발명은 상기에서와 같은 문제점을 해소하기 위하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 실 구조물의 상시 가진 상황에서 동적 데이터를 획득 후 무선 전송하여 구조물에 대한 동특성 모니터링을 가능하게 하고, 종래 유선 전송에 따른 계측 데이터의 왜곡현상, 높은 초기 설치비용 및 유지관리비용의 문제점이 해소될 수 있는 구조물의 모니터링을 위한 동적응답측정용 무선계측 시스템을 제공하는데 있다.

상기 목적을 달성하기 위하여 본 발명은, 구조물 상시 모니터링 시스템에서 구조물의 거동 특성 계측 후 계측된 데이터를 특성 분석이 이루어지는 메인 컴퓨터로 전송하기 위한 계측 시스템에 있어서,

구조물의 진동을 감지하는 가속도 센서를 포함하며 구조물의 거동특성을 계측하기 위하여 구조물 각 위치에 다수개의 센서가 설치되는 센서 시스템 모듈;

상기 가속도 센서에서 진동신호로 출력되는 동적 데이터의 획득 및 처리, 저장을 수행하고, 메인 컴퓨터의 제어신호에 따라 계측 시스템 제어 및 계측상황 결정을 수행하는 제어 및 처리 모듈; 그리고

상기 제어 및 처리 모듈에 직접 연결되어 그로부터 출력되는 동적 데이터를 메인 컴퓨터로 무선 전송하고 메인 컴퓨터에서 출력되는 각종 제어신호를 수신하기 위한 센서측 모뎀과, 상기 제어 및 처리 모듈과 메인 컴퓨터간 송수신을 위하여 상기 센서측 모뎀과 무선 송수신이 가능하도록 구비되는 메인 컴퓨터측 모뎀으로 구성된 무선 모뎀 모듈;을 포함하는 것을 특징으로 한다.

또한, 상기 가속도 센서는 멤스(Micro-Electro Mechanical System : MEMS) 타입의 가속도 센서인 것을 특징으로 한다.

또한, 상기 제어 및 처리 모듈은, 상기 제반 기능을 수행하는 프로그램이 덤프된 플래시 메모리와 프로그램 실행시 생성 또는 필요한 데이터가 저장되는 데이터 메모리가 내장된 마이크로컨트롤러와, 추가적인 데이터 저장 공간을 제공하는 외부 메모리를 포함하는 것을 특징으로 한다.

본 발명에 의하면, 구조물의 모니터링을 위한 동적응답 측정용 무선 계측 시스템을 이용하여 구조물의 동적응답 측정을 위한 모니터링 구현에 있어서 종래 유선 전송시 발생되던 계측 데이터의 왜곡(Distortion)현상이 해소될 수 있고, 또한 초기 설치비용 및 유지관리비용의 절감과 편리한 시스템 관리가 가능해진다.

본 발명자는 종래의 구조물 상시 모니터링 시스템(SHM) 및 제어 시스템에서 유선 계측에 의존해 왔기 때문에 높은 초기 설치비용 및 유지관리의 어려움과 주변 환경에 의하여 잡음 등이 문제점으로 지적되면서 무선 계측 시스템을 이용하는 연구를 진행하고 있으며, 이러한 연구를 통하여 토목 구조물의 동특성 식별이 가능한 동적 데이터의 획득과 자체적으로 데이터 처리를 위한 지능형 무선 계측 시스템을 개발 및 설계하며, 다양한 성능 실험을 통하여 센서의 성능을 검증함은 물론 실내 실험과 현장 실험을 통하여 실 구조물의 모니터링에 적합한지 여부를 검증하고 있다.

발명의 구성

이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 특징적인 구성과 작용효과를 상세히 설명한다.

도 1은 본 발명에 따른 무선 계측 시스템의 구성을 도시한 블럭도이고, 도 2는 본 발명에 따른 무선 계측 시스템의 일 예를 도시한 구성도이며, 도 3은 본 발명에 따른 무선 계측 시스템을 구조물에 적용하여 상시 모니터링하는 시스템 나타낸 예시도이고, 도 4는 본 발명에 따른 시스템의 성능실험을 설명하기 캔틸레버 보를 개략적으로 나타낸 도면이고, 도 5는 본 발명에 따른 자유진동 실험결과를 나타내는 도면이고, 도 6은 본 발명에 따른 동특성 분석결과를 나타내는 도면이고, 도 7은 본 발명에 따른 실험에 의하여 얻어진 캔틸레버 보의 모드형상을 해석에 의해 구한 결과를 나타낸 도면이고, 그리고 도 8은 본 발명에 따른 캔틸레버 보의 실험에 의해 획득한 모드와 해석에 의해 획득한 모드간의 상관관계를 나타낸 도면이다.

도 1 내지 도 8을 참조하여 설명하면, 본 발명에 따른 지능형 무선 계측 시스템(1)은, 대상 구조물(50)의 각 위치에 설치되어 구조물의 동적 응답 데이터를 센싱하는 센서 시스템 모듈(10)과, 상기 센서 시스템 모듈(10)을 통해 센싱된 데이터를 획득 및 처리하는 제어 및 처리 모듈(20)과, 상기 제어 및 처리 모듈(20)에서 출력된 동적 데이터를 특성 분석이 이루어지는 모니터링 시스템의 메인 컴퓨터(40)에 실시간 또는 준 실시간으로 전송하는 무선 모뎀 모듈(30)을 포함하여 이루어진다.

우선, 본 발명의 센서 시스템 모듈(10)에서는 구조물의 각 위치에서 진동을 감지하기 위한 가속도 센서(11)가 사용되며, 이때 구조물 모니터링 시스템에 적합한 민감도와 분해능을 가지는 가속도 센서(11)가 사용되어야 한다.

상기와 같은 성능을 갖춘 가속도 센서(11)는 멤스(Micro-Electro Mechanical System : MEMS)에 기반을 둔 것이 사용되며, 상기 멤스(MEMS)는 미소전기기계시스템으로 저가 고성능, 초소형, 초경량 등의 반도체 직접회로의 장점을 지닌 센서 및 응용 시스템이다.

상기 가속도센서(11)는 완벽한 2축(X,Y)의 가속도 신호를 디지털 형식의 반위신호(Duty Cycle) 데이터로 출력하도록 제작되어 상기 제어 및 처리 모듈(20)의 마이크로컨트롤러(21)에 별도의 A/D 변환기를 통하지 않고 직접 연결하여 사용할 수 있다.

표 1은 본 발명에 따른 가속도센서가 갖는 일반적인 성능을 나타낸 것이다.

(표 1)

파라미터	가속도 센서
측정 범위	±10g
감도(듀티 사이클/g)	100mV/g(4%/g)
대역폭	0 ~ 50Hz
작동전압	5V
작동전류	0.6 ~ 1.0mA

상기 가속도센서(11)에서는 대역폭(Bandwidth)을 X_{FILT} 와 Y_{FILT} 단자에 접속되는 콘덴서(Capacitor)(도시 안됨)의 용량에 의하여 조절할 수 있고, 펄스의 길이(T2) 조절은 리셋단자(Reset Terminal)에 연결되는 저항소자(도시 안됨)의 용량에 의하여 조절할 수 있다.

한편, 상기 제어 및 처리 모듈(20)은 무선 계측 시스템(1)을 전체적으로 제어하고 계측상황을 결정하는 기능을 수행하는 것으로, 플래시 메모리(Flash Memory) 및 데이터 메모리(SRAM)를 내장한 마이크로컨트롤러(21)와 추가적인 저장 공간을 제공하는 외부 메모리(22)를 포함하여 구성된다.

상기 제어 및 처리 모듈(20)은 소형 CPU 칩 및 외부 메모리 등 상기의 부품을 장착한 회로보드 형태로 제작될 수 있는데, 기본적으로는 자가 데이터 획득 및 DSP(Digital Signal Processing) 기능, 임시 데이터 저장 기능, 메인 컴퓨터로부터 무선 모뎀 모듈(30)을 통해 입력되는 제어명령에 따라 시스템 제어 기능을 수행하도록 구비된다. 또한, 상기 센서 시스템 모듈(10)에서 계측된 동적 데이터의 수집과 샘플링 율, 획득시간, 획득방법을 조절하며, 또한 획득된 동적 데이터를 실시간으로 무선 모뎀 모듈(30)에 전송하게 된다. 이러한 기능은 마이크로컨트롤러(21)에 내장된 플래시 메모리에 저장된 프로그램에 의해 이루어진다.

상기한 기능을 갖춘 마이크로컨트롤러(21)로서 적당한 사양으로는 128kbytes의 플래시 메모리와 4,000개의 명령어를 제공하며, 프로그램 실행에서 생성되거나 필요한 데이터는 4kbytes 용량의 데이터 메모리에 저장되도록 되어 있다.

그리고, 상기 마이크로컨트롤러(21)에서 효과적인 임베디드 시스템을 구현하기에는 자체적으로 제공된 데이터 메모리에 한계가 있으므로 데이터 메모리의 한계를 극복하기 위하여 외부 메모리(22)가 모듈 내에 장착된다.

본 발명에서 무선 모뎀 모듈(30)은 제어 및 처리 모듈(20)에 직접 연결되어 그로부터 출력되는 동적 데이터를 메인 컴퓨터(40)로 무선 전송하고 메인 컴퓨터(40)에서 출력되는 각종 제어신호를 수신하기 위한 센서측 모뎀(31)과, 상기 제어 및 처리 모듈(20)과 메인 컴퓨터(40)간 송수신을 위하여 상기 센서측 모뎀(31)과 무선 송수신이 가능하도록 구비되는 메인 컴퓨터측 모뎀(32)으로 구성되며, 실 구조물에 효과적으로 적용되기 위해서는 긴 통신거리와 실시간으로 데이터 전송이 가능한 통신속도를 갖는 무선 모뎀이 필수적이다.

따라서 상기 센서측 모뎀(31)과 메인 컴퓨터측 모뎀(32)은 표 2에 나타낸 바와 같은 전력 소모량에 비하여 출력이 높고 통신속도가 빠른 모뎀을 사용된다.

(표 2)

구분	성능
주파수 범위	433.92MHz
최대 송수신 거리(Open field)	200m
출력(Standby/Operate)	0.25/10mW
인터페이스	RS232
작동전압/작동전류	9Vdc/300mA
전송속도	9600 ~ 57600bps

이와 같이 하여, 센서 시스템 모듈(10), 제어 및 처리 모듈(20) 및 무선 모뎀 모듈(30)로 이루어진 본 발명의 무선 계측 시스템(1)이 구성되며, 이러한 무선 계측 시스템(1)에서는 센서 시스템 모듈(10)의 가속도 센서(11)가 구조물(50)의 진동을 감지하여 그에 따른 진동신호를 출력하고, 제어 및 처리 모듈(20)은 상기 가속도 센서(11)로부터 진동신호를 입력받아 동적 데이터의 획득 및 처리, 저장을 수행하며, 무선 모뎀 모듈(30)은 제어 및 처리 모듈(20)에서 출력된 데이터 신호를 받아 메인 컴퓨터(40)로 전송하게 된다.

여기서, 상기 제어 및 처리 모듈(20)은 마이크로컨트롤러(21)와 외부 메모리(22)에 의하여 데이터의 획득에 관한 사항을 설정하고, 획득한 데이터의 저장과 처리를 하게 된다.

상기한 본 발명의 무선 계측 시스템(1)은 앞서 설명한 멤스(MEMS) 기반의 가속도 센서(11), 마이크로컨트롤러(21), 외부 메모리(22), 무선 모뎀(31,32)을 채용하여 교량 등 토목 구조물(50)의 모니터링 시스템에 적합하도록 구성한 새로운 스마트 무선 센서 시스템(Smart Wireless MEMS-based on Accelerometer System : SWMAS)으로서, 특히 실 구조물의 상시 가진 상황에서 멤스 기반 가속도 센서를 통해 동적 응답을 계측한 후 계측된 동적 데이터를 무선으로 전송함으로써, 메인 컴퓨터(40)에서의 동특성 분석이 수행될 수 있다.

이러한 본 발명의 무선 계측 시스템(1)은 메인 컴퓨터(40)와의 사이에 설치된 상기 무선 모뎀(31,32)을 통해 양방향 무선통신에 의한 제어가 가능하며, 도 3에 도시한 바와 같이 구조물(50)의 각 위치에 설치 구성된 무선 계측 시스템(1)과 메인 컴퓨터(40)간에 일대 다중으로 구조물 상시 모니터링 시스템을 구성할 수 있다.

한편, 본 발명의 무선 계측 시스템을 구성한 후 센서 성능을 검증하기 위하여 민감도와 분해능, 잡음의 영향 실험을 실시하였고, 또한 본 발명의 무선 계측 시스템을 적용한 모니터링 시스템을 구성한 후 상시 가진을 받는 캔틸레버 보의 동적 응답을 측정하여 동적 특성 분석을 실시하였는 바, 전송된 계측 데이터로부터 실시간 랜덤 주변 가진에 의한 구조물의 동적 특성을 계산하기 위하여, 메인 컴퓨터에서는 NExT(Natural Excitation Techniques)와 ERA(Eigensystem Realization Algorithm)의 알고리즘이 이용된다.

이를 설명하면 다음과 같다.

1. 무선계측시스템의 설계

앞서 설명한 멤스 기반의 가속도 센서(11), 마이크로컨트롤러(21), 외부 메모리(22), 무선 모뎀(31,32)을 채용하여 무선 계측 시스템을 설계한다.

센서를 포함한 무선 계측 시스템(1)이 구조물의 모니터링 시스템(무선 계측 시스템+ 메인 컴퓨터)에 사용되기 위해서는 분해능(Resolution), 대역폭(Bandwidth), 획득 시간(Frame Time)과 같은 기본적으로 요구되는 성능을 만족시켜야 한다.

이러한 요구 조건은 무선 계측 시스템(1)을 설계하는데 있어서 가속도 센서(11)의 대역폭이나 마이크로컨트롤러(21)의 클럭 속도, 펄스의 주기를 결정하는데 도움을 주며, 가속도 센서(11)의 대역폭 설정은 측정되어지는 분해능을 결정한다.

필터링은 잡음 층(Noise Floor)의 감소와 가속도 센서의 분해능 개선을 위하여 필요하며, 가속도 센서의 분해능은 X_{FILT}, Y_{FILT}의 아날로그 필터 대역폭과 마이크로컨트롤러의 타이머/카운터의 속도, 펄스의 길이에 의하여 결정된다.

듀티 사이클(Duty Cycle) 변환기는 가속도 센서의 분해능보다 더 높은 14비트(Bit)의 분해능을 가진다.

그러나, 실질적인 가속도 신호의 대역폭은 듀티 사이클을 해독(Decode)하기 위해 사용되는 카운팅 장치에 의하여 결정된다.

상기 가속도 센서(11)의 분해능이 X_{FILT}, Y_{FILT}에 의하여 설정된 상태에서도 마이크로컨트롤러(21)의 카운터 클럭을 빨리하면 할수록 분해능은 향상되며, 펄스의 주기를 작게 설정할 수 있다.

다음의 표 3은 마이크로컨트롤러의 카운터 속도와 펄스(T2)의 주기, 그리고 듀티 사이클 변조기의 분해능과의 관계를 보여준다.

(표 3)

마이크로컨트롤러의 카운터속도와 펄스(T2)의 주기, 그리고 분해농과의 관계

T2 (ms)	리셋(Rset) (kΩ)	가속도센서 샘플링 율 (sample rate) (Hz)	카운터 클럭 속도 (MHz)	카운터/T2 주기	카운터/g	분해능 (mg)
5.0	625	200	2.0	10000	400	2.50
5.0	625	200	1.0	5000	200	5.00
5.0	625	200	0.5	2500	100	10.00
10.0	1250	100	2.0	20000	800	1.25
10.0	1250	100	1.0	10000	400	2.50
10.0	1250	100	0.5	5000	200	5.00

본 설계에서는 가속도 센서의 성능을 X_{FILT} 와 Y_{FILT}에 0.10F, 리셋(Reset)에는 1.25M으로 설정하여 샘플링 주기를 10msec, 즉 샘플링 율을 100Hz, 대역폭은 50Hz를 갖도록 설계하였으며, 분해능은 4.3mg rms(g:중력가속도)로 설계한다.

2. 센서 성능실험

본 실험의 목적은 마이크로컨트롤러와 무선 모뎀으로 구성된 시스템이 가속도 센서의 본래 성분을 충분히 발휘시키는지를 검토하기 위한 것으로, 무선 계측 시스템을 구성하는 가속도 센서의 민감도와 분해능을, 실험 결과값과 데이터 시트(Data Sheet) 값을 서로 비교하는 방법으로 성능 평가한다.

본 실험에 따른 테스트용 가속도 센서는 기울기 센서를 포함하고 있는데, 지면과 수평으로 가속도 센서를 위치시키면 0g (g:중력가속도)와 같고, 지면과 수직이 되면 + 1g, 이 상태에서 180°회전을 시키면 -1g이 된다.

이와 같은 테스트용 가속도 센서의 특성을 이용하면 가속도 센서의 민감도와 분해능을 쉽게 구할 수 있다.

또한, 정상상태(Steady State)의 시간이력 가속도 신호를 획득하여 잡음의 분포 경향을 분석하였으며, 0g일 때의 가속도 신호를 실시간으로 100Hz의 샘플링 율로 20초 동안 획득하여 실험한다.

상기 설계한 무선 계측 시스템(1)에 대한 실험 결과로서, 표 4에 나타낸 바와 같이 민감도는 4.49%/g, 분해능은 4.4mg rms로, 데이터 시트의 민감도 4.0±0.8%/g, 분해능 4.3mg rms와 비교해 볼 때 거의 일치함을 보였다.

(표 4)

실험 결과값과 데이터 시트 값과의 비교

구 분	분해능(RMS)	피크-투-피크 노이즈 (Peak-to-Peak Noise*)	민감도
실험 결과값	4.4mg	18.0mg	4.49%/g
데이터 시트 값	4.3mg	17.2mg	4.0±0.8%/g

* 95% of Time that Noise Will Exceed Nominal Peek-to-Peek Value

3. 시스템의 성능평가실험

-실험장비

도 4에 나타낸 바와 같이, 해석 및 측정, 그리고 분석이 용이하고 구조물의 주축방향의 휨 모드에 의해 구조물의 전체적인 거동 특성이 결정되도록 캔틸레버 보를 제작한다.

이와 같은 캔틸레버 보를 이용하여 본 발명의 무선 계측 시스템이 토목 구조물의 실시간 모니터링에 적용 가능한지를 평가하기 위하여 상시 가진에 의한 동특성 분석을 실시한다. 상기 캔틸레버 보는 구조용 강재를 이용하여 제작하였으며, 모형 구조물의 총 길이는 0.94m로 제작한다.

상기 캔틸레버 보의 폭과 두께는 6cm와 0.5cm로 하여 횡방향의 동적 응답이 주축방향으로 발생하는 동적 응답에 영향을 받지 않도록 하였다.

-자유진동실험

무선 계측 시스템의 데이터 획득 방법에는 실시간 모드와 준 실시간 모드가 있으며, 실시간 모드에서는 데이터의 획득이 완료가 되고 메모리에 저장이 되면 데이터 로거에 축적된 데이터를 송신하고, 준 실시간 시스템에서는 메모리의 용량에 따라 한번에 획득할 수 있는 데이터 프레임의 크기가 제한된다.

그러나, 샘플링 율에는 거의 제한이 없으며, 본 무선 계측 시스템(1)에서는 외부 메모리를 장착하여 준 실시간 모드에서의 프레임 크기의 제한을 개선하였다.

상기 무선 계측 시스템(1)을 실시간 시스템으로 사용하기 위해서는 데이터를 전송하는데 걸리는 시간들을 모두 고려하여 최적의 샘플링 율과 한번에 전송하는 데이터량을 결정하여 프로그램을 하여야 하며, 본 무선 계측 시스템의 최대 실시간 샘플링 율은 일대일 통신인 경우 100Hz으로 나타났다.

상기 무선 계측 시스템(1)의 성능을 조사하기 위하여 자유진동 상태에서 캔틸레버 보의 가속도 신호를 획득하는 실험을 실시하며, 도 4의 캔틸레버 보 끝단에 테스트용 가속도 센서와 기준 가속도 센서를 설치하여 실시한다.

도 5는 실험을 통하여 캔틸레버 보의 끝단에서 테스트용 가속도 센서와 기준 가속도 센서로부터 획득한 데이터를 보여주고 있는데, 테스트용 가속도 센서에 의한 데이터 획득은 실시간 모드에서 100Hz 샘플링 율으로 총 30초동안 이루어졌다.

실험 결과는 도 5에서 보는 바와 같이, 상기 테스트용 가속도 센서에 의해 획득된 응답은 기준 가속도 센서로 측정한 응답과 상당히 우수한 일치를 보였다.

-동특성분석실험

본 실험에서는 본 발명의 무선 계측 시스템의 성능을 평가하기 위하여 NExt와 ERA을 이용하여 상시 진동으로부터 구조물의 동적 특성을 분석하였다.

준 실시간 모드로 설정된 무선 계측 시스템을 이용하여 캔틸레버 보에서 발생하는 출력신호를 약 10sec동안 1024개의 데이터를 10회 평균하여 획득하였으며, 참조(Reference) 채널은 보의 자유끝단으로 설정하였다.

데이터의 분석은 DAIMOND(Modal analyis software package developed at Los Alamos National Lab)를 이용하였다.

도 6은 이와 같이 분석된 교차 파워 스펙트럼(Cross Power Spectrum)으로부터 상호 상관 함수(Cross Correlation Function)로 변환된 대표적인 신호처리 결과를 나타낸 것이다.

본 구조물의 응답의 처음 두 개의 모드들은 4.482Hz와 28.002Hz로 도 6에서 쉽게 식별할 수 있다.

또한, 본 실험의 결과를 FE 모델에 의한 수치적인 계산값과 비교하기 위하여 다음의 표 5와 같이 정리하였으며, 여기서 실험에 의해 분석된 구조물의 고유 진동수는 수치적으로 계산된 값과 오차 범위 5% 이내에서 일치함을 보였다.

(표 5)

고유 진동수의 비교

구 분	1차 모드(Hz)	2차 모드(Hz)
해석값	4.700	29.470
실험값	4.482	28.002
오차(%)	4.64	4.98

도 7은 실험에 의하여 추출한 캔틸레버 보의 모드 형상을 해석에 의해 구한 결과와 같이 나타낸 것이다.

이와 같이 두 가지 방법에 의해 획득한 모드 형상의 상관관계를 수치적으로 분석하기 위하여 MAC을 이용하였다.

Ewins등의 연구 결과에 의하면, MAC의 지표 값이 0.9이상이면 상관관계가 우수하다고 판단하게 된다.

그렇지만, 상관관계 지표가 절점(계측 점)의 수에 많은 영향을 받게 되기 때문에 실험 등과 같이 계측 점의 수에 제약을 받게 되는 경우에는 0.8까지도 허용하고 있다[Ewins, D.J., Modal Testing : Practice and Application, R. S. P., 200].

다음의 표 6과 도 8은 캔틸레버 보의 실험에 의해 획득한 모드와 해석에 의해 획득한 모드 간의 상관관계를 나타낸 것으로, 1차 모드의 상관관계는 지표가 0.9752로높게 나타났으나, 2차 모드의 상관관계 지표는 0.8747로 나타났다.

(표 6)

MAC 분석 결과

구 분		해석 모드	
		1차 모드	2차 모드
실험 모드	1차 모드	0.9752	0.1623
	2차 모드	0.1897	0.8747

이와 같이 MEMS 형식의 가속도 센서, 마이크로컨트롤러, 외부 메모리, 무선 모뎀을 사용하여 토목 구조물의 스마트 모니터링 시스템에 적용하기 위한 새로운 무선 계측 시스템을 개시하였으며, 그 성능 특성을 평가하기 위하여 다양한 검증 실험을 실시하였는 바, 첫째로 센서의 성능을 평가하기 위한 센서 성능 실험을 실시하였고, 둘째로 무선 계측 시스템의 전체적인 성능을 평가하기 위하여 실시간 자유진동 데이터 획득 실험과 준 실시간에서의 상시 진동시험을 실시하였다.

센서 성능 평가 실험 결과, 전술한 본 발명의 무선 계측 시스템의 센서 민감도는 4.49%/g, 분해능은 4.4mg rms로 나타나 각각의 데이터 시트의 값인 4.00±8%/g와 4.3mg rms들과 거의 일치함을 보였다.

또한, 자유진동 실험 결과 획득한 데이터는 기존의 상용 가속도 센서로부터 획득한 데이터와의 비교에서도 우수한 결과를 얻었으며, 상시 가진 실험에 의한 캔틸레버 보의 고유 진동 분석에서도 FE 고유치 해석을 통해 해석된 값과 약 5% 이내에서 일치함을 보였다.

그리고, 구조물의 모드 형상 또한 우수한 상관관계를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 이상의 결과들로부터 본 발명에 따른 무선 계측 시스템을 이용하면 구조물의 동특성 분석이 가능함을 확인할 수 있다.

발명의 효과

이상 설명에서 알 수 있는 바와 같이, 본 발명은 구조물의 모니터링을 위한 무선 계측 시스템에 의하면, MEMS 형식의 가속도 센서, 마이크로컨트롤러, 외부 메모리, 무선 모뎀으로 구성됨으로써, 실 구조물의 상시 가진 상황에서 동적 데이터를 획득 후 실시간 또는 준 실시간으로 무선 전송할 수 있게 되고, 결국 동특성 분석을 통한 보다 효과적인 구조물 모니터링이 가능해지게 된다.

특히, 본 발명의 무선 계측 시스템은 실 구조물에 적용이 가능하면서 상용화가 가능하고, 종래와 같이 단순히 정적 데이터 획득을 위한 것이 아닌 토목 구조물의 동특성 식별이 가능한 동적 데이터의 획득, 처리 및 전송이 가능한 장점을 가진다.

또한, 종래 유선 전송시에 발생하던 계측 데이터의 왜곡현상이 해소될 수 있고, 또한 초기 설치비용 및 유지관리비용의 절감과 편리한 시스템 관리가 가능해진다.

이러한 본 발명의 무선 계측 시스템을 구조물 상시 모니터링 시스템에 적용하는 경우, 교량이나 건축물 등과 같은 각 구조물에 대한 유지보수를 보다 경제적으로 할 수 있으며, 사회 기간 시설물에 대한 안전성을 확보함으로써 건설분야의 신뢰 회복 및 사회적 불안을 해소할 수 있게 된다.

도면의 간단한 설명

도 1은 본 발명에 따른 무선 계측 시스템의 구성을 도시한 블럭도이다.

도 2는 본 발명에 따른 무선 계측 시스템의 일 예를 도시한 구성도이다.

도 3은 본 발명에 따른 무선 계측 시스템을 구조물에 적용하여 상시 모니터링하는 시스템 나타낸 예시도이다.

도 4는 본 발명에 따른 시스템의 성능실험을 설명하기 캔틸레버 보를 개략적으로 나타낸 도면이다.

도 5는 본 발명에 따른 자유진동 실험결과를 나타내는 도면이다.

도 6은 본 발명에 따른 동특성 분석결과를 나타내는 도면이다.

도 7은 본 발명에 따른 실험에 의하여 얻어진 캔틸레버 보의 모드형상을 해석에 의해 구한 결과를 나타낸 도면이다.

도 8은 본 발명에 따른 캔틸레버 보의 실험에 의해 획득한 모드와 해석에 의해 획득한 모드간의 상관관계를 나타낸 도면이다.

<도면의 주요부분에 대한 부호의 설명>

1 : 무선계측시스템 10 : 센서시스템모듈

11 : 가속도 센서 20 : 제어 및 처리모듈

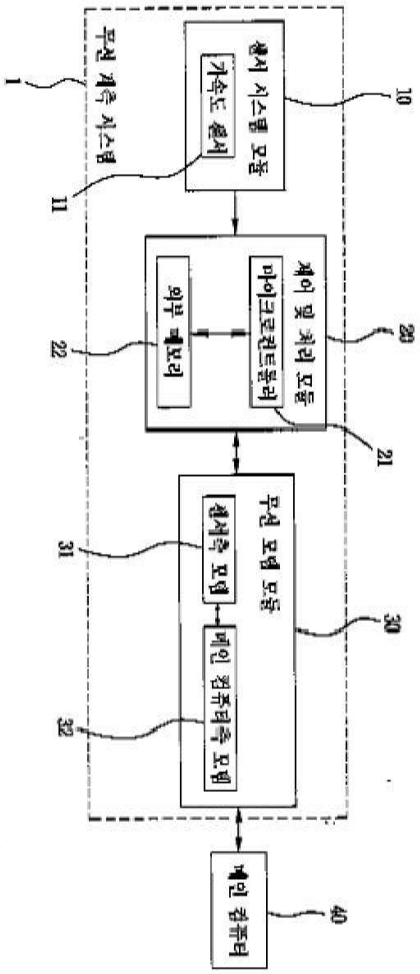
21 : 마이크로컨트롤러 22 : 외부 메모리

30 : 무선모뎀모듈 31 : 센서측모뎀

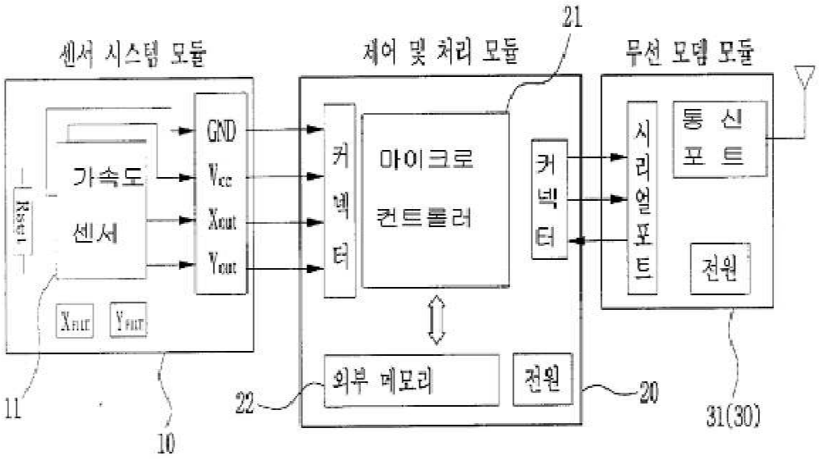
32 : 메인 컴퓨터측 모뎀 40 : 메인 컴퓨터

도면

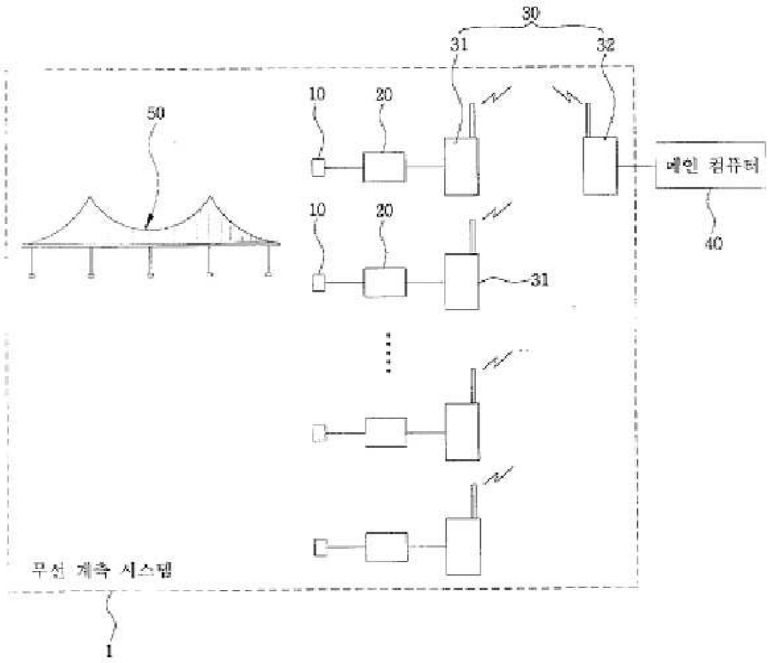
도면1


무선 계측 시스템
1
센서 시스템 모듈
10
가속도 센서
11
제어 및 처리 모듈
20
마이크로컨트롤러
21
외부 메모리
22
무선 모뎀 모듈
30
센서측 모뎀
31
메인 컴퓨터측 모뎀
32
메인 컴퓨터
40

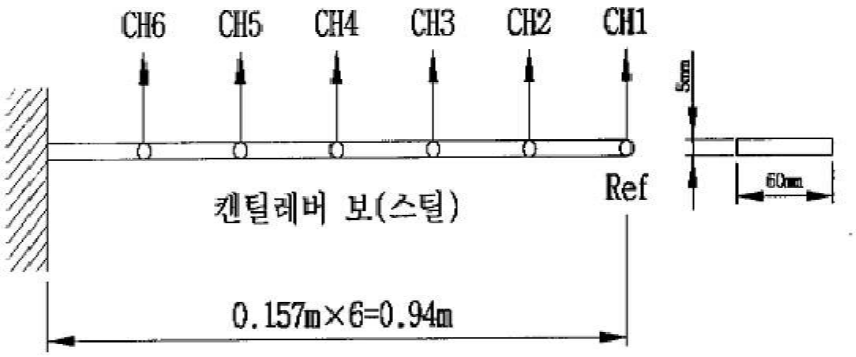
도면2


센서 시스템 모듈
제어 및 처리 모듈
21
무선 모뎀 모듈
가속도 센서
Reset
GND
Vcc
Xout
Yout
커넥터
마이크로 컨트롤러
커넥터
시리얼포트
통 신 포 트
전원
외부 메모리
전원
11
10
22
20
31(30)

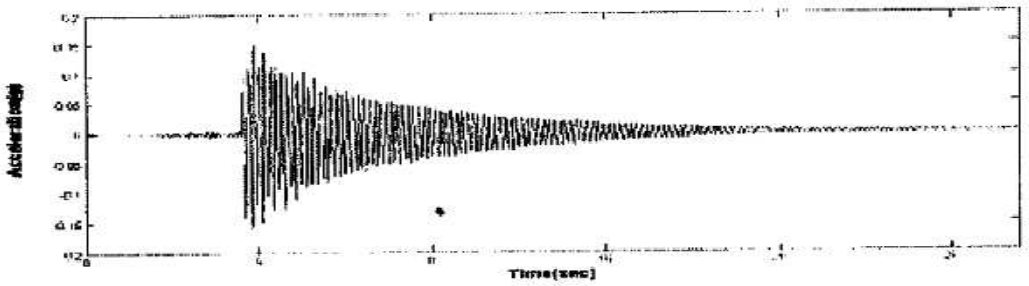
도면3


30
31
32
10
20
50
메인 컴퓨터
40
10
20
31
무선 계측 시스템
1

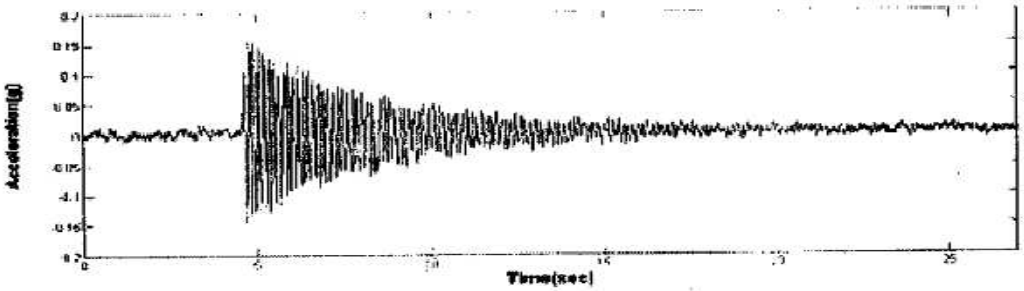
도면4


CH6
CH5
CH4
CH3
CH2
CH1
5mm
60mm
Ref
캔틸레버 보(스틸)
0.157m×6=0.94m

도면5



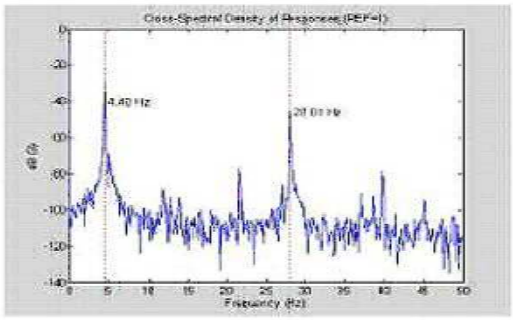
기준 가속도 센서



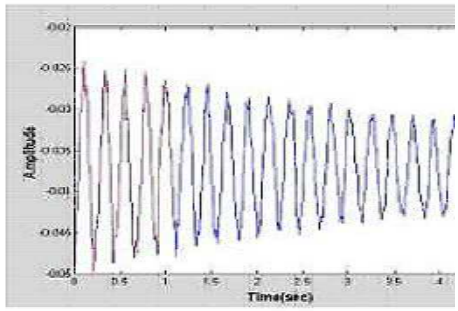
테스트용 가속도 센서

- 자유 진동 실험 결과 -

도면6

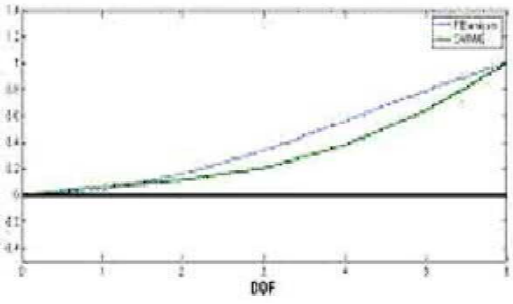


(a) CH. 3에서의 교차 파워 스펙트럼

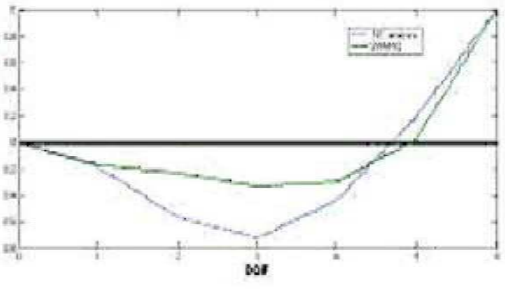


b) CH.3에서의 교차 파워 스펙트

도면7



(a) 1차 모드 형상



(b) 2차 모드 형상

도면8

