

# 무선센서를 이용한 실 건축물의 계측 사례

## Monitoring of Real Building Structures Using Wireless Sensors



유 은 종\*



이 상 현\*\*

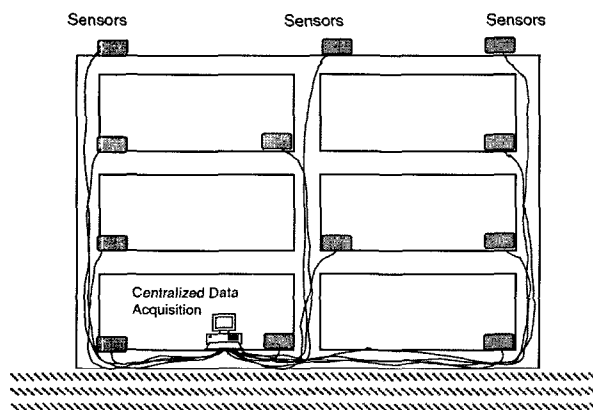
\*한양대학교 건축대학 건축공학부 조교수  
\*\*단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사

### 1. 서 론

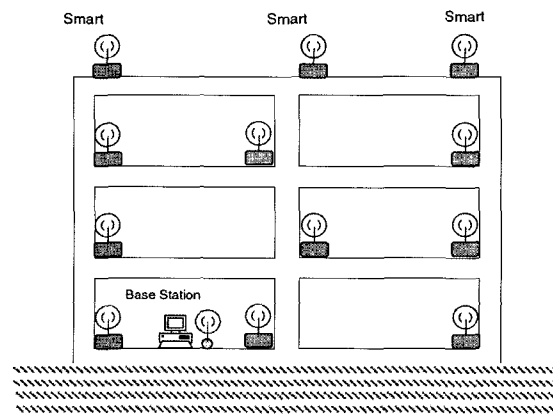
구조물은 수명기간동안 예상되는 하중조건을 만족시키면서 경제성을 고려하여 가능한 최적의 형상으로 설계된다. 그러나 실제의 경우 설계 시 예상하지 못하였던 외력이나 환경에 놓이게 되어 단기적 혹은 장기적으로 구조물에 열화가 발생한다. 이때 구조물에서 측정된 실측데이터는 설계를 위해 해석모델에 가정되었던 다양한 조건들을 검증하고, 구조물의 현재 상태를 진단하는데 사용될 수 있는 중요한 정보이다. 강진지역의 경우, 강진시 혹은 강진

이후의 실측데이터는 구조물의 비선형거동을 정량적으로 평가하고 지진에 의한 구조물의 손상을 탐지하는데 활용될 수 있다. 우리나라와 같은 중약진 지역의 경우, 실제측을 통해 유지보수의 측면에서 장기적인 구조물의 열화를 파악하고 보강의 필요성을 판단하기 위한 정보를 얻을 수 있다.

계측시스템은 센서와 센서로부터 데이터를 받아 디지털 데이터로 변환하고 이를 저장하는 부분으로 구성된다. 현재까지는 그림 1(a)와 같은 구조물 각 부에 위치한 센서들을 케이블을 통해 하나의 DAQ로 연결하는 중앙집중식 유



(a) 중앙집중식 유선센서 계측시스템



(b) 무선센서기반 계측시스템

그림 1 계측시스템 (Spencer 등 2004)

선센서 계측시스템이 많이 사용되고 있다(Spencer 등 2004). 이러한 전통적인 중앙집중식 유선센서 계측시스템은 소요되는 장비의 수가 작고 끊어짐 없이 안정적으로 데이터를 취득할 수 있다는 장점이 있지만, 실제 구조물에서는 케이블의 길이가 길어질 수밖에 없으며, 이 경우 전압으로 주어지는 아날로그 신호에 잡음이 끼어들 가능성이 높아진다. 또한 하나의 DAQ가 처리할 수 있는 채널의 수에 한계가 있으며, 케이블 및 케이블 보호를 위한 덕트 설치에 큰 비용과 시간이 들고 설치 후에는 계측시스템을 확장하거나 센서의 배치에 변화를 주기 어렵다는 단점을 가진다. 이러한 유선센서 시스템의 경우 전체 시스템 구축비용중 25%가 케이블 설치비용으로 지출되며, 고층빌딩의 경우 긴 케이블 길이로 인해 설치비가 증가하여 채널당 시스템 구축비용이 5000USD까지 소요된 예가 있다(Celebi, 2002).

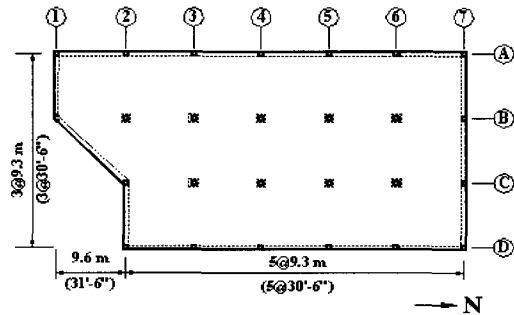
중앙집중식 유선센서시스템의 문제를 해결하기 위해 제안된 방법이 최근에 급격히 발전하고 있는 그림 1(b)에 보여지는 컴퓨터 무선통신기술을 활용한 무선센서기반의 계측시스템이다. 무선센서시스템에서는 복수의 DAQ가 사용되며 하나의 DAQ는 소수의 센서만을 담당한다. 무선으로

전송되는 것은 아날로그 전압신호가 아니라 DAQ를 통해 변환된 디지털데이터 값으로, 이 디지털데이터들은 802.11 혹은 지그-비(Zig-Bee)와 같은 근거리 무선통신기술을 통해 구조물 내부 혹은 외부에 설치된 베이스 스테이션(Base station)으로 집합되어 저장된다. 서로 다른 DAQ에서 얻어진 계측값들은 GPS의 시간정보 혹은 다중 홉핑(multi hopping)기법을 이용하여 동기화(synchronization)된다. 무선센서시스템에서는 대규모의 배선이 필요치 않으므로 초기설치비가 적게 들고 또한 설치가 신속하다는 장점이 있다. 또한 개별적인 DAQ가 기능적으로 독립되어 있으므로 전체적인 계측시스템의 성능이 센서의 수에 영향 받지 않는다. 부분적으로 정밀한 계측이 필요할 경우 센서를 추가하기 쉬우며, 일부 센서에 문제가 발생할 경우에도 교체가 간편하다는 등 시스템의 구성 및 유지보수에 유연성을 가지고 있다.

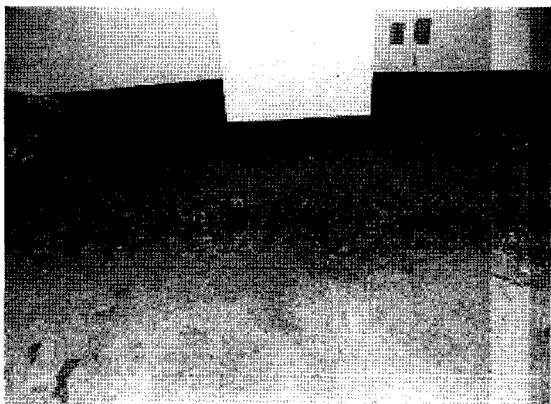
본고에서는 무선센서 계측시스템을 이용한 4층 철근콘크리트 건물의 진동실험의 예(Whang, 2004)와 유선으로 상시계측시스템을 구축한 17층 철골조 건물의 예(Skolnik, 2006)를 소개하고자 한다. 본고에서 소개되는 17층 철골조



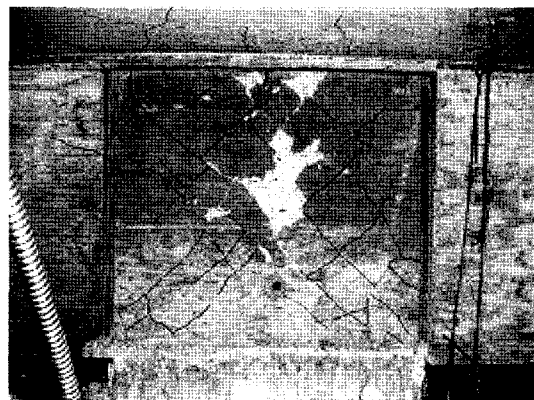
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2 실험건물, (a) 건물의 전경, (b) 기준층 평면도 (c) 3층 슬래브에 발생한 펀칭파괴 (d) 외부기둥과 3층바닥의 보의 접합부에 발생한 대각선 접합부균열

물의 계측시스템은 유선기반 시스템이지만 그 건물자체의 동특성에 연관된 연구이외에도 새로운 무선센서 네트워크(wireless sensor network) 개발의 실험대(testbed)로 사용되고 있다.

## 2. 무선센서를 이용한 4층 RC건물의 가진실험

가진실험에 사용된 건물은 미국 엘에이(LA) 북부의 셰르만 오크스(Sherman Oaks)에 위치한 4층 철근콘크리트 골조건물(그림 2)로 상부에 옥탑층을 가지고 있으며, 1977년에 준공되었으나 1994년 노스리지 지진에 의해 구조체에 손상을 입어 실험당시에는 사용되지 않는 상태였다. 이 건물의 구조시스템은 건물내부는 포스트텐션플랫슬래브-기둥골조로 연직하중을 지지하며, 외곽부는 횡하중지지를 위해 모멘트저항골조로 구성한 것으로, 미국 서부지방에서 비교적 많이 사용되는 구조형식이다. 이 건물은 노스리지 지진에 의해 내부골조에서는 2층부터 4층에 걸쳐 다수의 플랫슬래브-기둥접합부에서 편칭파괴가 발생하였으며 외부골조의 경우 3층 바닥의 기둥-보 접합부에서 대각선 균열이 다수 발생하였다. 지진이후 몇몇 연구자들에 의해 이 건물에서 발생한 지진피해의 원인의 규명을 위한 연구가 이루어졌으나 실제 지진피해의 양상과 연구에 의해 예상되는 손상부의 위치 및 정도가 서로 상충되는 결과를 보여, 현재까지는 파괴 원인에 대한 정확한 규명이 수행되지 않았다.

가진실험은 표 1과 같이 두대의 대용량 편심가진기와 한대의 선형가진기를 이용한 강제진동실험, 그리고 강제진동실험 전후에 실시한 상시미진동측정으로 구성되어 있다. 선형가진기실험과 상시미진동측정실험에서는 주로 층가속도를 측정하여 시간영역 구조물 식별(time domain system identification) 기법을 통해 구조물의 모드정보를 얻었다. 가력하중의 크기가 큰 편심가진기 실험에서는 층

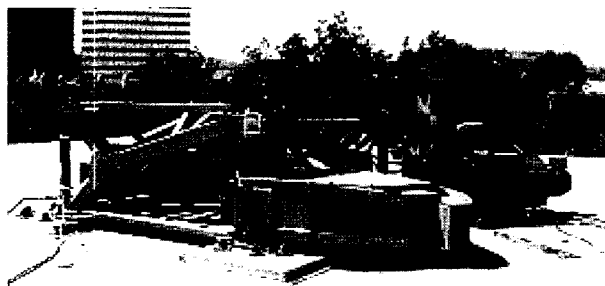
표 1 실험의 순서

실험일시	실험의 종류	실험일시	실험의 종류
04/7/2	미진동 1차	04/07/22 ~ 04/08/02	편심가진기 남북(NS) 방향
04/06/22~04/07/1	편심가진기 동서(EW)방향, 비틀림방향	04/08/02	선형가진기 2차
04/07/19	미진동 2차	04/08/03	편심가진기 동서(EW) 방향, 비틀림방향
04/07/19	선형가진기 1차	04/08/03	미진동 3차

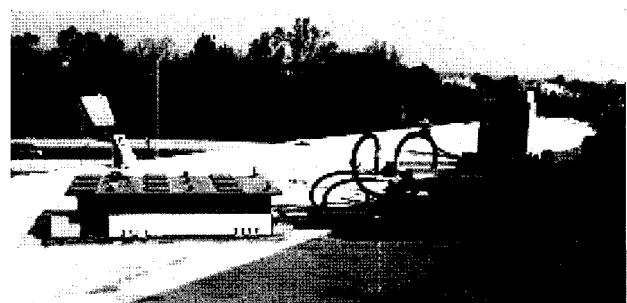
가속도 이외에도 LVDT, 변위계지를 사용하여 층간변위 및 바닥판과 기둥의 곡률분포를 측정하였다. 편심가진기실험에서는 두 가진기 회전사이의 위상각과 편심질량체의 위치를 조절하여 동서방향, 남북방향, 비틀림의 방향의 가진실험을 순차적으로 실시하였다.

16개의 3축가속도계(Kinematics ES-T)와 27개의 1축가속도계(Kinematics ES-U)를 사용하여 가속도를 측정하였다. 가속도계는 힘-발란스(force-balance)형으로 동적범위 155dB, 크기  $\pm 2g$ , 주파수 200Hz의 사양을 가진다. 옥탑을 포함한 모든 층에서 바닥판의 운동을 계측하기 위해 가속도계를 배치하였으며, 지반-구조물 상호작용에 의한 구조물의 락킹(rocking)운동을 검출하기 위해 지상 1층에 추가로 수직방향으로 가속도계를 배치하였다. 지상층부터 지붕층사이 4개층에서 각 3개 경간 총12개 경간에서 층간변위량을 측정하기 위해 총 12개의 변위계(Trans-Tek Series 240 DC LVDT)를 설치하였다. 하나의 내부기둥과 하나의 외곽기둥에서 1층부터 4층까지의 곡률분포를 연속적으로 측정하기 위해 총 48개의 콘크리트 변형계이지(TML, PL-60-11-5L)를 부착하였다. 또한, 플랫슬래브 바닥판의 곡률분포를 측정하기 위해 3층과 4층의 바닥판의 상하면에 총 34개의 변형계지를 부착하였다.

실험에는 두 종류의 계측시스템이 사용되었다. 가속도계와 변위계는 키네메트릭(Kinematic)사의 데이터로거인 Q330과 계측소프트웨어인 Antelope을 사용하여 계측하였



(a)



(b)

그림 3 (a) 편심가진기 (b) 선형가진기

다. Q330은 무선데이터 송신이 가능한 24비트 A/D 컨버터로서 하나당 6채널을 가지고 있으며, 다른 데이터로거에서 측정된 데이터와의 동기화를 위한 GPS 시간 스탬핑(time stamping) 기능을 가지고 있다. 본 실험에는 총 19개의 Q330이 사용되었다. 가속도계와 변위계는 주위의 Q330으로 유선으로 연결되고, 여기서 A/D 변환을 통해 수치화된 계측데이터는 그 때의 GPS 시간정보와 함께 근처의 WAP(Wireless Access Point)을 경유하여 옥상에 위치한 DC(Data Concentrator)로 무선네트워크전송 프로토콜인 802.11b과 tcp/ip에 의해 전송되었다. DC는 Antelope이 실행되고 있는 유닉스 컴퓨터로 실험데이터와 함께 실험장면을 담은 비디오클립을 전송할 수 있는 네트워크 장비를 갖추고 있다. DC에 임시 저장된 정보는 옥탑지붕에 설치된 야기(yagi) 안테나를 사용하여 실험건물의 주차장에 있는

MCC(Mobile Command Center)로 무선전송되었다. MCC는 인공위성 통신장비와 전산장비를 탑재한 트럭으로서 인공위성을 통해 인터넷으로의 실제 실험장면 및 데이터의 실시간 전송이 가능하다. 그림 4는 계측시스템의 개요를 보여준다. 변형개이지는 네쇼날 인스트루먼트(National Instrument)사의 DAQ 시스템과 소프트웨어인 Labview를 사용하여 계측하였다. 실험에는 각 32개의 변형개이지채널을 가지고 있는 3대의 NI DAQ시스템이 사용되었는데, 데이터 동기화를 위해 각각 GPS 리시버와 타이머보드가 장착되어 있다.

선형가진기실험과 상시미진동측정에서 얻은 가속도데이터로부터 시간영역구조물식별기법의 일종인 N4SID를 이용하여 실험건물의 모드정보를 추출하였다. 표 2에 각 실험에서 얻어진 고유진동수 및 고유진동수들의 비율 나

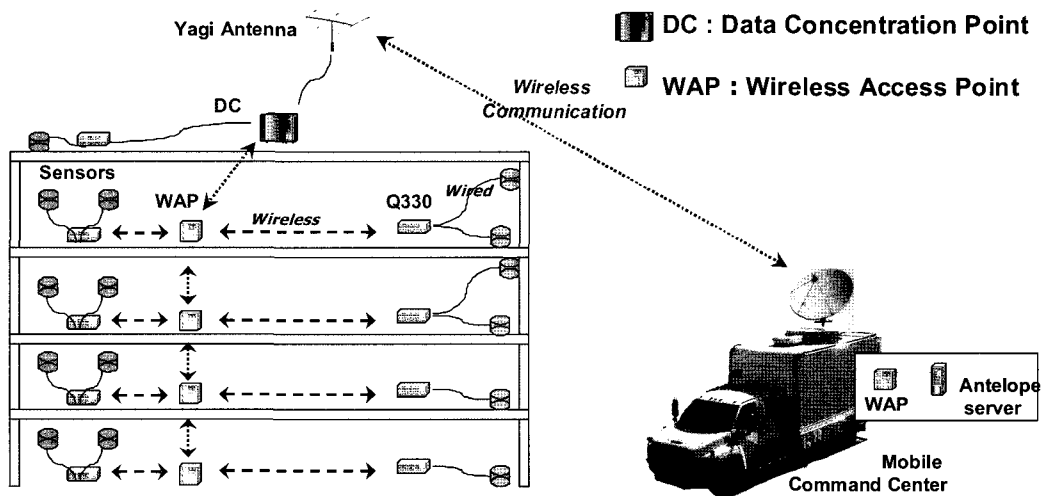


그림 4 가속도계와 변위계를 위한 Wireless DAQ 시스템

표 2 각 실험에서 얻은 고유진동수 및 모드별 비율

A. 고유진동수 (Hz)							
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
주 변형방향	EW	NS	Torsion	EW	NS	Torsion	Mixed
미진동1차, (a)	1.09	1.25	1.55	3.23	3.63	4.16	5.38
편심가진기, (b)	0.81	0.87	1.1~1.2	-	-	-	-
미진동 2차, (c)	1.06	1.20	1.50	3.11	3.51	3.99	-
선형가진기1차, (d)	0.87	0.94	1.25	2.73	2.91	3.43	-
선형가진기2차, (e)	0.88	0.94	1.26	2.73	2.94	3.44	4.54
미진동3차, (f)	1.06	1.21	1.49	3.11	3.48	3.96	-
B. 고유진동수의 모드별 비율							
	1st/1st	2nd/1st	3rd/1st	4th/1st	5th/4th	6th/4th	7th/1st
미진동1차, (a)	100%	115%	142%	295%	112%	129%	491%
편심가진기, (b)	100%	108%	135% ~ 148%	-	-	-	-
미진동 2차, (c)	100%	113%	142%	293%	113%	128%	-
선형가진기1차, (d)	100%	108%	144%	315%	107%	126%	-
선형가진기2차, (e)	100%	107%	143%	310%	108%	126%	516%
미진동3차, (f)	100%	115%	141%	294%	112%	127%	-

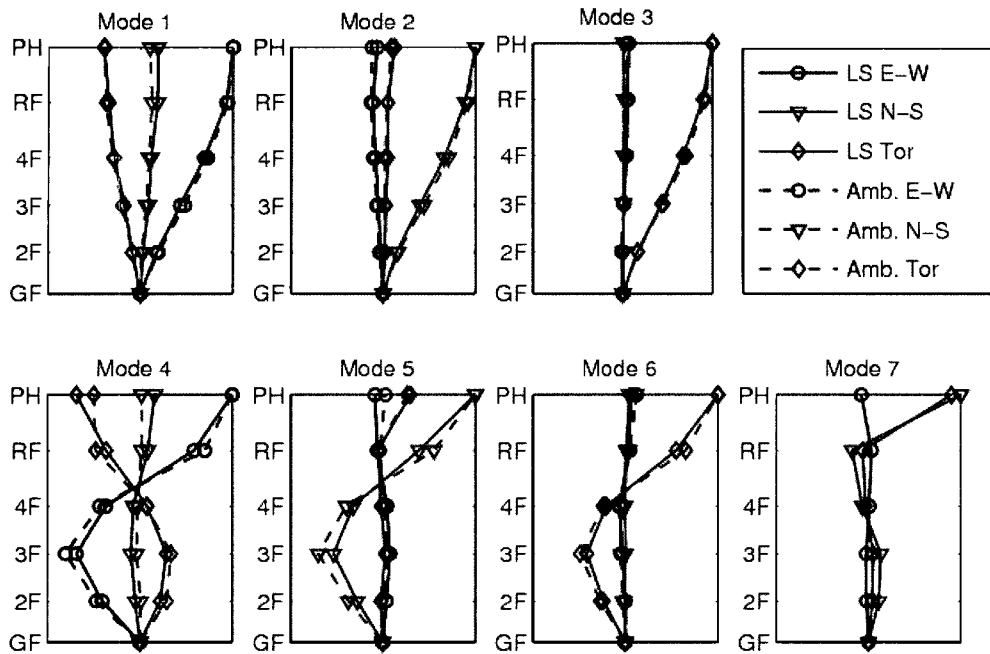


그림 5 모드형상 (선형가진기 2차실험과 미진동 1차실험)

타내었다. 표 2에 나타난 것과 같이 선형가진기실험의 고유진동수는 미진동에 비해 약 14%정도 낮게, 편심가진기 실험에 비해 약 8%정도 높게 나타났다. 상시미진동, 선형가진기실험, 그리고 편심가진기실험의 순으로 진폭의 크기는 증가하며 이에 따라 고유진동수는 감소한다. 이러한 진폭의 크기에 따른 고유진동수의 변화는 기존 실험결과에서도 이미 보고된 바 있다(Trifunac, 1972; Celebi, 1993).

고유진동수의 변화이유로는 일반적으로 1) 구조재의 비선형적인 거동, 2) 구조재와 비구조재의 상호작용, 3) 지반-구조물의 상호작용 그리고 4) 적재하중의 변화 등을 포함한 환경적인 요인 등을 들고 있다. 본 실험건물의 경우 지반-구조물의 상호작용은 거의 없는 것으로 분석되었고, 또한 비구조재의 경우도 이미 지진에 의해 구조재로부터 분리되어 그 영향은 미미할 것으로 판단된다. 또한 각 실험에서 건물의 질량에는 변화가 없었으므로 이러한 고유진동수의 변화는 주로 구조부재의 비선형거동에 의한 것으로 추론할 수 있다.

남북방향의 고유진동수는 동서방향의 고유진동수에 비해 상시미진동의 경우 112~115%정도이나 강제가력실험의 경우 107~108%정도로 낮아졌다(2nd/1st, 5th/4th). 이는 가진력 혹은 진동진폭이 커지면서 남북방향의 진동수 저하가 동서방향보다 크게 나타났음을 의미하며, 이러한 현상의 원인으로는 노스리지 지진에 의해 건물의 남북방향의 강성에 기여하는 구조요소에서 피해가 컸던 사실과 연관이 있는 것으로 사료된다.

선형가진기실험 및 상시미진동계측에서 구한 모드형상을 그림 5에 비교하였다. 1차-6차모드의 주 변형방향은 동서-남북-비틀림방향 순으로 규칙적으로 나타났으나 7차모드는 비틀림과 남북방향의 변형이 혼합된 것으로 보인다. 모드 형상은 고유진동수와는 달리 진동의 진폭의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

### 3. 15층 철골조 건물의 모니터링

본 장에서 소개할 내용은 CENS(Center for Embedded Networked Sensing) 연구센터에서 진행하고 있는 연구의 일부이다. CENS는 NSF의 지원을 받아 ENS(Embedded Networked Sensing)에 관한 연구를 수행하기 위해 남부 캘리포니아지역의 대학들 즉 UCLA, USC, UC Riverside, Caltech, UC Merced이 공동으로 설립한 연구센터로서, 분산된 센서들 사이의 무선통신, 신호처리 및 센서/구동기 개발 등 센서시스템 자체에 대한 연구 및 이들을 생태계 모니터링, 해양미생물관찰, 토양 오염물 전달감시, 지진 감시, 도시환경 감시 등의 과학/공학의 각 분야에 적용하는 것을 주 연구목표로 하고 있다(CENS Website).

본 장에서는 CENS의 지진분야 연구과제의 하나인 팩터 (Factor) 빌딩의 고밀도지진계측시스템을 간단히 소개하고자 한다. 팩터 빌딩은 미국내에서 가장 정밀한 계측이 이루어지는 건물들 중의 하나로서 여기에 설치된 계측시스템은 다음과 같이 손상탐지와 건전성감시시스템(structural

health monitoring system)에 관한 여러 주제에 관한 연구를 수행하고 검증하기 위한 하나의 실험대(testbed)로 사용되고 있다.

1. 노이즈가 포함된 계측데이터부터 지진 및 구조물의 거동에 관한 유용한 정보를 파악하는 방법(System identification)
2. 계측된 데이터를 사용하여 구조물의 거동을 모사할 수 있는 해석모델의 도출 및 검증(FE model updating)
3. 저가 경량의 무선센서(mote)를 이용한 무선센서네트워크의 구성방법 및 신뢰성 검증
4. 높은 샘플링 속도(sampling rate)로 계측된 대량의 계측데이터로부터 중요이벤트 발생여부를 빠르게 판단하는 방법(Onset Detection)

팩터 빌딩은 UCLA 캠퍼스내에 위치한 지하2층 지상15층 건물이다. 이 건물은 1970년대 후반에 건설되었으며, 구조형식은 철골로 이루어진 모멘트저항골조이고 기초형식은 콘크리트 케이슨 말뚝과 확장기초이다. 노스리지 지진직후 이 건물에 USGS (U.S. Geological Survey)에 의해 72채널의 가속도계가 설치되었으며, 이후 2003년 12월에는 이 계측시스템의 DAQ부분이 NSF CENS 연구과제에 의해 고성능 시스템으로 업그레이드되었다. 즉 기존의 72개의 모든 가속도계 채널이 24비트 A/D 컨버터인 키네메틱사의 Q4120 데이터로거로 연결되어 연속계측이 가능하고 그 결과가 인터넷을 통해 실시간으로 제공되는 시스템이 구축되었다. Q4120 데이터로거는 130dB의 동적범위와 하나당 8채널을 가진 24비트 A/D 컨버터로 총 9대가 사용되었다. 데이터로거는 모두 15층의 기계실에 설치되

었는데 케이블을 사용하여 각층의 센서와 연결되었고 각 데이터로거에서 계측된 데이터는 GPS 시간신호로 동기화되었다. 계측은 500sps로 이루어져 하루 측정데이터 3기가 바이트에 이른다. 최근에는 지진시 지반에 의한 지진파의 증폭효과를 규명하기 위해 3채널의 보어홀(borehole) 지진계와 12채널의 자유지표면 가속도계가 추가되었다. 가속도계는 그림 6과 같이 각 층당 4개가 수평방향으로 지하층에는 추가로 2개가 수직방향으로 설치되어 있다 (UCLA Factor Seismic Array Website).

연속계측을 시작한 2003년 12월 이후 규모는 크지 않지만 많은 수의 지진파 이에 의한 건물의 진동이 계측되었다. 이 중 2004년 9월 28일에 계측된 파크필드(Parkfield) 지진파와 2004년 4월 29일에 계측된 미진동데이터를 사용하여 건물의 동특성을 시스템 식별기법을 통해 식별하였다.

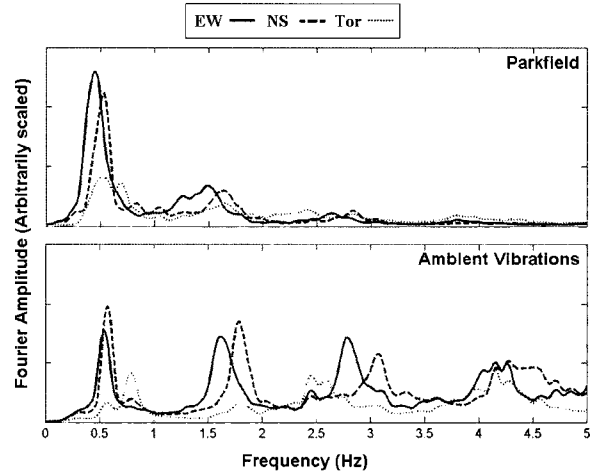


그림 7 파크필드 지진진동과 미진동의 FFT 스펙트럼

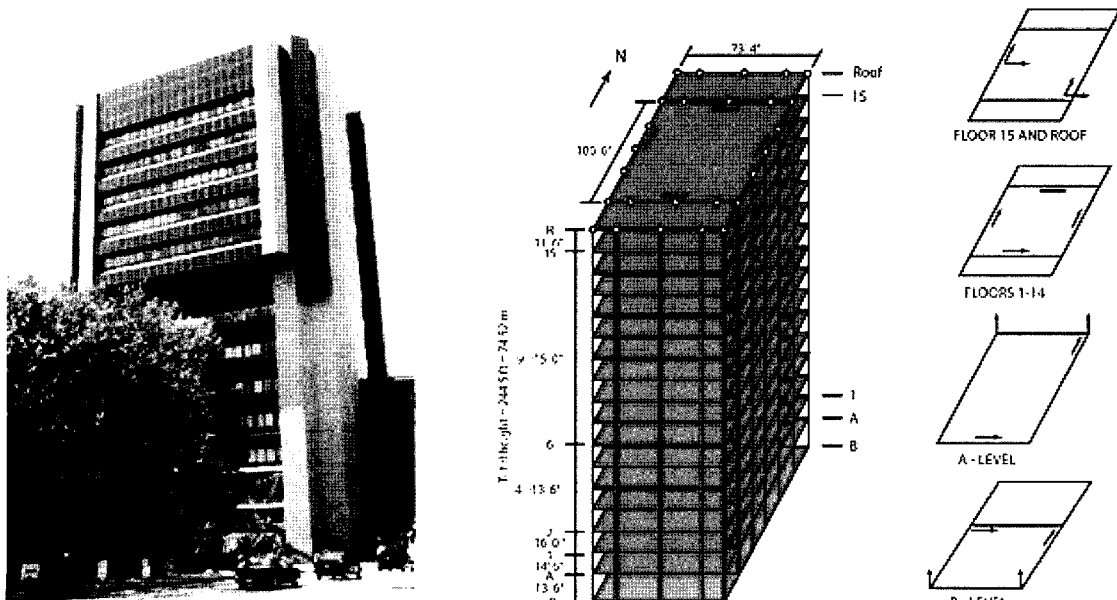


그림 6 팩터 빌딩의 전경과 가속도계의 배치도

표 3 구조물식별기법을 통해 얻은 건물의 모드정보

Mode shape		Ambient Vibration (A)		Parkfield EQ (B)		Difference(B/A)	
No.	Direction	Freq. (Hz)	Damping ratio (%)	Freq. (Hz)	Damping ratio (%)	Freq.	Damping ratio
1	EW	0.545	5.1	0.467	4.8	86%	94%
2	NS	0.588	8.3	0.506	4.7	86%	57%
3	Torsion	0.807	10.8	0.681	5.8	84%	54%
4	EW	1.626	2.1	1.488	5.4	92%	257%
5	NS	1.795	1.4	1.665	4.9	93%	350%
6	Torsion	2.485	2.9	2.362	7.4	95%	4%
7	EW	2.825	2.2	2.677	4.4	95%	200%
8	NS	3.061	1.3	2.862	4.9	93%	377%
9	Torsion	4.017	2.9	3.826	4.6	95%	159%

파크필드지진은 규모가 6.0으로 비교적 큰 지진이었으나 팩터 빌딩이 진앙에서부터 원거리(163마일)에 위치하여 지진으로 인한 지붕층의 최대 가속도는 0.0025g에 그쳐 지진에 의한 건물의 영향은 미미하였다. 그림 7은 계측된 지진진동과 미진동의 FFT 스펙트럼의 각 방향 합을 비교한 그래프이다.

표 3은 미진동과 지진진동 가속도계측데이터로부터 얻어진 고유진동수 및 감쇠비를 보여준다. 각 방향 3차모드까

지 총 9개의 모드를 얻었으며 각 모드의 변형형상은 그림 8에 나타내었다. 1차, 4차, 7차모드는 동서방향이 주변형모드이며, 2차, 5차, 8차는 남북방향, 3차, 6차, 9차모드는 비틀림 방향으로서 각 방향의 모드가 순서대로 나타났다.

이러한 구조물식별결과로부터 구조물의 거동을 모사할 수 있는 해석모델을 도출함으로써 향후 강진시 예상되는 구조물 손상부위를 추정하는 연구가 현재 진행되고 있다 (Skolnik, 2006).

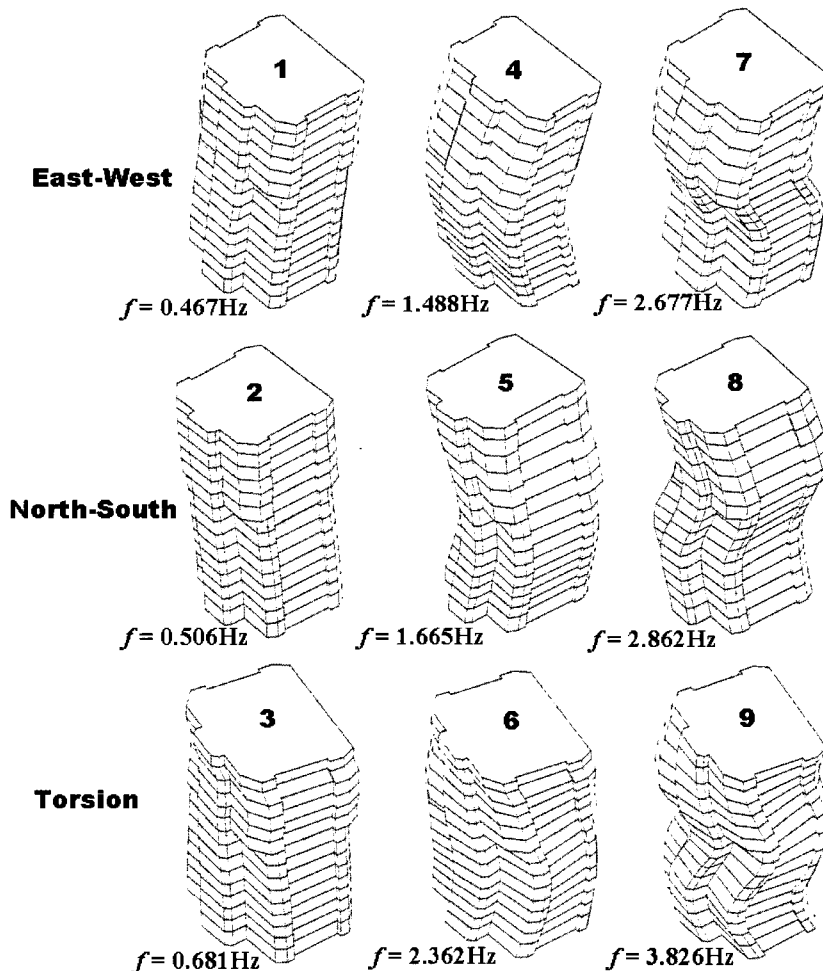


그림 8 팩터 빌딩의 모드형상

#### 4. 구조건전성감시기법 및 새로운 무선 센서 네트워크 개발

센서와 통신기술, 컴퓨터 분야의 기술발전을 통해 안정적인 계측시스템의 구성이 가능하게 됨에 따라 이를 활용한 건축구조물의 안전성 평가기술도 발전하고 있다(Doebling, 1998). 계측을 통한 구조물의 손상을 추정하기 위해 현재 많이 사용되는 기법은 지진이나 강풍과 같은 손상을 초래할 만한 사건 전후의 구조물의 거동을 계측한 다음 각각의 계측 값에서 고유진동수, 감쇠계수, 모드형상 등의 변화를 식별하여 손상을 추정하는 것이다. 이중 고유진동수의 변화량이 가장 많이 활용되는데 그 이유는 논리적으로 볼 때 구조물의 손상은 강성의 변화를 의미하고 강성의 변화는 고유진동수의 변화로 표출되기 때문이다. 그러나 실제로 고유진동수의 변화는 구조물의 손상에만 연관되는 것은 아니며, 구조물질량의 변화, 지반강성의 변화에 의해서도 일어날 수 있다. 또한 비구조재의 영향 등에 의해 비선형적인 거동을 나타낼 수 있으므로 구조체의 손상이 없어도 진동의 크기에 따라 구조물의 활선강성은 차이를 보일 수 있다. 실제로 LA 지역에 위치한 40층 철골구조물에서 6개의 크고 작은 지진시 계측기록과 미진동계측을 통해 얻어진 고유진동수는 구조물에 큰 손상이 없음에도 불구하고 구조물의 비선형거동과 지반-구조물 상호작용에 의해 최대 30%까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 다른 건물에서 장기간 연속적으로 계측된 자료를 분석한 결과 구조적 요인이 아닌 환경적 요인, 즉 강우, 풍속, 기온 등에 의해서도 고유진동수가 변화할 수 있음을 보고하고 있다(Bradford, 2004). 따라서 가속도계측을 통한 고유진동수나 모드형상의 분석만으로 구조물의 손상발생을 추정할 경우에는 이와 같은 요인들을 고려하고 확인할 필요가 있다.

큰 외력에 의해 구조물이 비선형적으로 거동할 경우 반드시 변위 혹은 회전각의 형태로 잔류변형이 발생하므로 이를 식별할 수 있으면 손상발생여부를 판단하는데 큰 도움이 된다. 건축물의 경우 층간변위측정을 통해 계측한 잔류변위가 손상의 지표로 사용되고 있다. 하지만 층간변위를 얻기 위해 측정된 가속도를 이중적분하는 것은 가속도계측에 포함된 저주파 영역의 잡음으로 인해 거의 불가능하다. 따라서 최근에는 GPS 센서로 절대변위를 측정하거나 레이저 변위계로 층간변위를 측정하여 손상탐지의 정확성을 높이려는 시도가 이루어지고 있다(Safak, 2006).

구조건전성감시는 그 목표수준에 따라 다음과 같이 4단계로 구분할 수 있다.

1. 손상탐지 (Damage detection) : 구조체가 손상을 입었는가?
2. 위치파악 (Damage localization) : 어디에 손상을 입었는가?
3. 손상정도 (Damage quantification) : 얼마나 심한 손상을 입었는가?
4. 손상예측 (Damage prognosis) : 손상을 입을 가능성이 있는가?

이중 1단계의 손상발생여부는 구조물식별을 통해 얻어진 고유진동수나 모드형상의 비교만으로 판단하는 것이 가능하지만 2단계이상의 수준을 구현하기 위해서는 계측치 혹은 구조물 식별결과로부터 구조물의 실제거동을 모사할 수 있는 구조해석모델을 구축하는 기법이 요구된다.

이와 같은 손상탐지 알고리즘에 대한 연구와 더불어 무선센서 네트워크를 이루는 하드웨어와 소프트웨어에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 무선센서 네트워크의 각 노드는 엄밀히 말해 전통적인 센서라기보다는 센서와 A/D 변환모듈 및 통신 장치가 복합된 독립적인 계측시스템이다. 앞서 소개한 CENS 연구센터에서는 상업용으로 판매되고 있는 저가의 WSN 모듈인 모트(mote)를 기반으로 하는 무선센서 네트워크소프트웨어인 Wisden을 개발하여 팩터 빌딩을 적용성 및 성능을 검증하기 위한 실험대(testbed)로 이용하고 있다. Wisden에서는 무선데이터 통신의 안정성을 높이기 위해, 전송에 사용되었던 각 노드에 임시로 저장된 데이터를 활용하여 에러발생시 이를 복원하는 알고리즘과 GPS시간정보를 필요로 하지 않는 다중합평을 이용한 시간동기화 즉, 데이터전송 중 각 노드에서의 체류시간에 근거한 시간동기화기법이 구현되어 있다(Whang, 2004).

또한, 효과적인 상시계측을 위해 무선센서네트워크의 각 노드는 배터리의 교체없이 장기간 작동해야 한다. 계측과 A/D 변환보다 무선통신에 가장 많은 전력이 소비되므로 데이터전송을 최소화시킬 경우 동작시간을 크게 증가시킬 수 있다. 이를 위해, 각 노드에 마이크로프로세서 모듈을 추가해 스스로 데이터를 분석하고 판단하는 유비쿼터스 센싱/컴퓨팅 기술이 필요하다. 온셋 디텍션(Onset detection)은 계측된 데이터가 송신이 필요한 부분인지를 판단하기 위한 알고리즘으로 시간영역 분석 혹은 FFT 분석에 의한 방법 등이 연구되고 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Bradford, SC., Clinton, JF., Favela, J., and Heaton TH.,



- “Results of Millikan library forced vibration testing,” EERL 2004-03, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, 2004, 35pp.
2. Celebi M., “Seismic Instrumentation of Buildings (With Emphasis on Federal Buildings),” Technical Report No. 0-7460-68170, United States Geological Survey, 2002, Menlo Park, CA.
  3. Celebi, M., Phan, LT., Marshall, RD., “Dynamic characteristics of five tall buildings during strong and low-level amplitude motions,” International Journal of Design of Tall Buildings, John Wiley and Sons, Vol. 2, 1993. pp.1~15
  4. CENS Home, <http://research.cens.ucla.edu/>
  5. Chintalapudi, K., Fu, T., Paek, J., Kothari, N., Rangwala, S., Caffrey, J., Govindan, R., Johnson, E., Masri, S., “Monitoring Civil Structures with a Wireless Sensor Network,” IEEE Internet Computing, March/April 2006 Vol.10 No.2 pp.26~34
  6. Chintalapudi, K., Jeongyeup Paek, Omprakash Gnawali, Tat S. Fu, Karthik Dantu, John Caffrey, Ramesh Govindan, Erik Johnson, Sami Masri, “Structural damage detection and localization using NETSHM,” Proceedings of the fifth international conference on Information processing in sensor networks, 2006
  7. Chintalapudi, K., Paek, J. Kothari, N., Rangwala, S., Govindan, R., Johnson, E., “Embedded Sensing of Structures: A Reality Check,” 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA'05) pp.95~101
  8. Doebling SW, Farrar CR, Prime MB, “A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods,” The Shock and Vibration Digest, 1998 - svd.sagepub.com
  9. Doebling, EW., Farrar, CR., Prime, MB., Shevitz, DW., “Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review,” Los Alamos National Laboratory, LA-13070-MS, 1996
  10. Foutch, D.A., “The vibrational characteristics of a twelve-storey steel frame building,” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 6, No. 3, 1978, pp.265~294.
  11. Jeongyeup Paek, Nupur Kothari, Krishna Chintalapudi, Sumit Rangwala, Ning Xu, John Caffrey, Ramesh Govindan, Sami Masri, John Wallace and Daniel Whang, “The Performance of a Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring,”
  12. Lynch JP, Loh KJ, “A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring”, The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No.2, March 2006, pp91~128
  13. Lynch JP, Sundararajant A, Law KH, Kiremidjian AS, Kenny T., Carryer E., “Embedment of structural monitoring algorithms in a wireless sensing unit,” Structural Engineering and Mechanics, Vol. 15, No. 3, 2003, pp285~297
  14. Lynch, JP., Law, KH., Kiremidjian, AS., Kenny, TW., Carryer E., Partridge, A. “The Design of a Wireless Sensing Unit for Structural Health Monitoring,” Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural, Health Monitoring, Stanford, CA, USA, Sep. 12-14, 2001
  15. Paek J., Chintalapudi, K., Govindan, R., Caffrey, J. Masri, S. “A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring: Performance and Experience,” The Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, 2005. EmNetS-II.
  16. Safak, E., Hudnut, K., “Real-time structural monitoring and damage detection by acceleration and GPS sensors,” 8th US National conference on Earthquake Engineering, San Fransisco, California, 18-22 April 2006
  17. Skolnik D, Lei Y, Yu E., Wallace JW, “Identification, Model Updating, and Response Prediction of an Instrumented 15-Story Steel-Frame Building.”, Earthquake Spectra, Vol. 22, No.3, 2006, pp.781~802
  18. Spencer, BF., Ruiz-Sandoval, ME., Kurata, N., “Smart sensing technology: opportunities and challenges,” Structural Control and Health Monitoring, Vol. 11, 2004, pp349~368
  19. Trifunac M.D., “Comparisons between Ambient and

- Forced Vibration Experiments," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 1, No.2, 1972, pp.133~150
20. UCLA Factor Seismic Array, <http://factor.gps.caltech.edu/>
  21. Whang, D.H., Kang, S.W., Wallace, J.W., Stewart, J.P., Yu, E., and Lei, Y., "Integration of NEESgrid into the nees@UCLA field testing site," 13th World Conference on Earthquake Engineering, EERI, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 0486.
  22. Whang, DH., Xu, N., Rangwala, S., Chintalapudi, K., Govindan, R., Wallace, JE., "Development of an Embedded Networked Sensing System for Structural Health Monitoring," 1st International Workshop for Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology, Waikiki, Hawaii, January 12-14, 2004
  23. 윤희준, 유병억, 안형준, "스마트구조물의 상시계측시스템에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 학술발표대회(창립60주년 기념) 논문집, v.25 n.1 2005.10
  24. 이우식, 남상관, "유비쿼터스 환경의 시설물 모니터링 시스템 구현을 위한 모듈 설계," 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 2006.11
  25. 채명진, 유현석, 김정렬, 박재우, 조문영, "무선 네트워크를 이용한 실시간 교량 상태 계측", 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, 2006.11 