

무선 가속도센서 시스템을 이용한 건축물의 실시간 피드백 진동제어 - 시스템 구축 및 기초성능 평가 -

Real-time Feedback Vibration Control of Structures Using Wireless Acceleration Sensor System - System Design and Basic Performance Evaluation -

전 준 용¹⁾ 박 기 태²⁾ 이 진 옥³⁾ 허 광 희⁴⁾ 이 우 상^{5)*}
Jeon, Joon Ryong Park, Ki Tae Lee, Chin Ok Heo, Gwang Hee Lee, Woo Sang

Abstract

This is a preliminary study for the real-time feedback vibration control of building structures. The study developed a wireless acceleration sensor system based on authentic technology capacities, to integrate with the Prototype AMD system and ultimately construct the feedback vibration control system. These systems were used to evaluate the basic performance levels of the control systems within model building structures. For this purpose, the study first developed a wireless acceleration sensor unit that integrates an MEMS sensor device and bluetooth communication module. Also, the study developed an operating program that enables control output based on real-time acceleration response measurement and control law. Furthermore, the Prototype AMD and motor driver system were constructed to be maneuvered by the AC servo-motor. Eventually, all these compositions were used to evaluate the real-time feedback vibration control system of a 2-story model building, and qualitatively measure the extent of vibrational reduction of the target structure within the laboratory validation tests. As a result of the tests, there was a definite vibrational reduction effect within the laboratory validation tests. As a result of the tests, there was a definite vibrational reduction effect within 1st and 2nd resonance frequency as well as the random frequency of the model building structure. Ultimately, this study confirmed the potential of its wireless acceleration sensor system and AMD system as an effective tool that can be applied to the active vibration control of other structures.

Keywords : Wireless acceleration sensor system, Real-time feedback vibration control, Active mass damper

1. 서론

광의적인 의미에서 구조물의 안전도를 진단하는 유지관리 기술은 설계 당시 구조물에 부여한 기대 성능을 시공 후 내구연한까지 최대한 보존하고, 충분히 발휘하도록 하기 위한 총체적 기술행위라 정의할 수 있다. 이러한 구조물의 진단 및 유지관리 차원의 일례로 국내에서는 한국시설안전공단을 중심으로 국가 중요시설물에 대한 주기적 관리지침 매뉴얼을 만들고, 이를 법제화 한 “Special Art on Safety Control

for Infrastructure in Korea (2011)”을 운영하고 있다. 여기서 건설구조물은 사용자의 활동으로 인해 상시적으로 외력의 조건에 노출되어 있고, 경우에 따라서는 지진, 돌풍 등과 같이 예견치 못한 돌발상황에도 직면할 수 있기 때문에 구조물의 건전도를 신속·정확하게 진단하고, 불의의 사태를 미연에 방지하기 위한 효과적인 대응방안 모색은 반드시 선결되어야 한다. 결국 구조물의 건전도를 신속·정확하게 진단하기 위해서는 무엇보다 효율적인 구조응답 획득이 중요한 요소로 작용한다. 또한 구조물 자체의 결함이 없다는 가정

1) 정희원, (주)카이센 R&D연구소 책임연구원, 공학박사
2) 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사
3) 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수
4) 정희원, 건양대학교 토목공학과 교수
5) 정희원, 스마트제어계측 이사, 공학박사, 교신저자

* Corresponding author : smartcs@chol.com

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2013년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하에 여타 외력으로 인해 발생할 수 있는 불의의 사태 (파손, 붕괴 등)에 사전 대응하기 위해서는 효과적인 외력 (하중, 진동)저감 대책이 대안일 수밖에 없다. 이러한 맥락에서 구조물 응답 획득 기술과 외력 저감기술은 구조물의 진단 및 유지관리기술에서 핵심 기술의 하나이다. 먼저 구조물의 응답 획득 기술은 종래 유선 기반의 계측시스템 이용이 대부분이며, 이는 많은 장점에도 불구하고 다음과 같은 운영·관리차원의 한계를 내포하고 있다. 우선 센서의 설치 시 각 센서마다 신호선 (Cable)을 연결하여야 하고, 이때 신호선이 길어짐에 따라 계측 신호의 잡음 (Noise) 대책이 요구되며, 또한 이들 시스템이 원활히 구동되기 위한 충분한 외부 전원 (Power)이 반드시 확보되어야 한다. 더불어 기존 유선 계측 장치·장비들이 대부분 미국과 일본, 일부 유럽 등의 외국산에 크게 의존하고 있어 국가적 차원의 경제적 손실뿐만 아니라, 해당 시스템의 지속적인 관리와 유지보수가 원활치 않다는 점도 충분히 고려하여 개선해야 할 사항이다.

한편, 구조물에 발생될 수 있는 유해 외력에 대한 진동저감 기술은 종래 수동적 방법 (마찰댐퍼, 면진받침 등)에 크게 의존하였다. 이러한 수동적 외력 저감 방법은 재료-물리-기구적으로 장치자체가 갖는 성능범위 내에서는 안정적인 외력저감 효과를 기대할 수 있음에도 불구하고 다음의 현실적인 한계를 내포하고 있다. 우선 해당 시스템 자체의 구입·설치하는 비용은 상대적으로 저렴할 수 있으나 설치 후 성능범위 한계를 벗어나 장치에 손상이 가해진 경우 시스템의 일부 혹은 전체를 요구한다. 무엇보다도 이러한 수동적 방법은 구조물에 작용할 수 있는 다양한 하중조건에 충분히 대응하기 어렵다는 점에서 이를 극복할 대안이 요구된다. 이러한 종래의 계측시스템 및 진동저감 시스템의 문제점과 한계로 인해 최근에는 다양한 방법·기술이 제안되었다. 이 중 대표적으로 무선 개념을 도입한 계측 시스템과, 보다 탄력적으로 외력에 대응할 수 있는 능동적 개념의 진동저감 방법 등이 새로운 접근방법으로 부각되고 있다.

먼저 무선 개념을 도입한 계측 시스템은 1990년대 중반을 시점으로 건설분야에서도 연구되었으며, 이때 개발된 시스템은 일부 선진국을 중심으로 실구조물 조건에 적용하기 위한 시도가 진행 중이다. 이는 IT 융합 (전기, 전자, 통신, 메카 등)기술을 도입하여 구조물 안전도의 진단·유지관리를 위한 종래의 시스템을 효과적으로 개선하고자 하는 노력의 일환이다. 이와 관련된 연구로써 무선 센서 시스템은 Straser (1996) 등에 의한 초기 개념연구를 기반으로 Kurata (2003) 및 Lynch (2003) 등이 다각적인 연구가 진행되었다. 이들 연

구에는 디지털 회로의 실리콘 층에 기계적인 센싱 변환기를 장착한 MEMS 센서 소자를 활용하였는데, 이는 기존 유선 시스템과 비교하여 저가이고, 정밀하며, 소형이면서 저전력형으로 시스템을 구성하고 있어 근자에 여타분야에서도 그 활용도가 높다.

구조물의 외력 저감을 위한 능동적 방법은 제어력 기여방식에 따라 반능동식 (Semi-active)방법과 완전능동식 (Active)방법으로 구분된다. 대표적인 반능동식 방법으로는 최근 MRFD (Magneto-Rheological Fluid Damper)를 활용한 제어 시스템, 완전능동식 방법으로는 AMD (Active Mass Damper)를 활용한 제어 시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 모두 구조물에 부가되는 가변적인 외력에 실시간이면서도 능동적으로 대응할 수 있다는 점에서 기존 수동적 방법의 한계를 극복할 것으로 기대된다. 최근 Dyke (2004)에 의해 MRFD에 관한 연구가 진행되었고, 이를 기반으로 해 Wang (2007), Lynch (2008) 등이 무선센서 시스템과 MRFD를 이용해 실험규모 3층 모형 구조물을 대상으로 응답계측 및 실시간 진동제어에 관한 실험연구를 수행하였고, 이와 관련하여 국내에서는 Heo (2010 & 2011) 등이 유사연구를 수행한 바 있다. 국내에서는 Min (1998) 등이 1층 전단형 건물모델을 대상으로 유선계측 시스템 및 AMD를 이용하여 임의 지진파에 대한 속도피드백 알고리즘의 제진성능을 검증하였다. 하지만 국내의 경우 무선 센서 시스템과 능동적 제어방법을 이용한 구조진동저감에 관련된 연구가 미진하며, 특히 건설분야에서의 이들 시스템에 대한 면밀한 연구와 기술력 확보의 노력이 크게 부족하므로 이에 대한 다각적인 연구가 요구된다.

따라서 본 논문에서는 구조물의 실시간 구조응답 획득을 목적으로 무선 가속도센서 시스템을 개발하고, 또한 서보모터 기반의 프로토타입 (prototype) AMD 시스템을 개발하였으며, 이들 두 시스템을 결합하여 실시간 피드백 진동제어 시스템을 구성하였다. 또한 실험실 규모의 2층 빌딩 구조물을 대상으로 피드백 진동제어 시스템의 검증·평가 실험을 수행하였으며, 중국적으로 구조물의 실시간 진동제어를 위해 본 논문에서 개발된 두 시스템 (무선 센서 & AMD)이 향후 건축물의 진동제어시스템으로 응용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 무선 가속도센서 시스템

본 논문에서는 기존 유선 계측시스템을 대체하고자, MEMS

기반의 무선 가속도센서 시스템을 개발하였다. 먼저, 개발된 무선 가속도센서 유닛은 일반 건설구조물에 범용적으로 사용될 수 있도록 2축 MEMS 가속도 센서를 사용하였고, 이때의 가속도 측정 범위는 약 $\pm 1.2g$, 민감도는 약 1000mv/g , 데이터 측정 주파수 범위는 약 $0.2\sim 50\text{Hz}$, 데이터 정밀도는 약 0.001mg 이다. 또한, 해당 센서유닛에 블루투스 무선 통신 모듈을 채용하여 통신거리가 약 1.2km , 구동전압은 약 3.4V 이며, 전원 소모량은 약 300mW , 자체 Li-ion 충전 모듈을 포함하고 있어 약 10 시간 내외의 연속측정이 가능하다. 마지막으로 센서 유닛의 크기 (size)는 $48\times 65\times 40\text{mm}$ (b \times h \times d)이며, 무게는 약 150gram , 그리고 32 Kbyte 용량의 내장 메모리를 탑재하였다. 개발된 블루투스 통신 방식의 MEMS형 무선 가속도센서 유닛의 상세는 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

또한 개발된 무선 가속도센서 유닛의 데이터를 안정적으로 획득하고 분석하기 위하여 일체화 로거 (Logger) 본체와 로거 프로그램을 개발하였다. 먼저 일체화 로거 본체는 고성



Fig. 1 Wireless Accel. Sensor Unit (MEMS)

Table 1 Spec. of Wireless Accel. Sensor (MEMS)

Index	Spec.
Internal Sensor	MEMS 2-Axis Accel.
Range	$\pm 1.2g$
Sensitivity	1000mV/g
Measure Distance	up to 1.2 km
Measure Freq.	$0.2\sim 50\text{ Hz}$
Operate Mode	Wake/Sleep
Operate Voltage	3.4V
Power dissipation	300mW
Resolution	16 bit
Internal Flash	32 Kbyte
Measure Accuracy	1.0 mg (rms)
Battery Life	10 hr
Size (b \times h \times d)	$48\times 65\times 40\text{ mm}$
Body Weight	150gram

능 태블릿 PC와 블루투스 액세스 포인트 (MSP), 유무선 공유기, 상용 배터리 등을 내장하고 있어, 계측장비의 휴대성을 고려함과 동시에 최대 14개 채널을 동시 접속할 수 있도록 설계하였으며, 충격과 온습도에 강한 하드케이스를 채용하였다. 이렇게 개발한 로거 본체는 무선 센서 유닛과 연결하여 시스템을 구성함에 있어, 시스템의 현장 적용성 및 사용자의 취급 용이성 등을 고려한 것이다. 무엇보다도 센서 유닛과 로거 본체 모두 자체 배터리를 내장하고 있어 별도의 외부전원이 없어도 수 시간동안 현장 이동, 계측, 분석, 모니터링이 가능하다. 이러한 무선 계측시스템은 기존 유선 계측시스템과의 명확한 차별성, 많은 이점 (benefit)을 피할 수 있다. 이러한 개념으로 개발된 무선 가속도 센서 일체화 로거 본체의 상세는 Fig. 2 및 Table 2와 같다.

마지막으로, 개발한 무선 가속도센서 유닛으로부터의 데이터 측정 및 분석을 위해 Fig. 3 및 Table 3과 같이 데이터 로거 프로그램을 개발하였다. 이때 개발된 프로그램은 각 채널별 데이터 획득 시 다양한 측정모드를 제공하고, 윈도우 함수 및 필터링 함수를 내장하였으며, 모니터링 시 간단히 사용할 수 있는 신호분석 함수와 자가획득 및 자가진단 틀을 함께 구현하였다.

2.2 Prototype AMD 시스템

본 논문에서는 능동형 제진시스템을 구성하기 위하여 능



Fig. 2 Unity Logger of Wireless Accel. Sensor

Table 2 Spe. of Unity Logger

No	Spec.
1	Bluetooth Access Point Including
2	Serial, LAN, PAN & Dialup Networking
3	Wire/Wireless Shear Point Including
4	$12''$ Wide Touch Panel Tablet PC Including
5	Battery Including (Duration : 5hr)
6	Multi-Point Access Support (7CH~14CH)
7	Carrying & Water-off Case



Fig. 3 Logger Program of Wireless Accel. Sensor

Table 3 Spec. of Logger Program

Index	Spec.
Measure Mode	Manual / Trigger / Period
Window Func.	Hanning / Hamming / Blackman
Filtering Func.	Butte-Chebyr Worth LFP / BPF
Signal Anal.	Power Spectrum / FFT / Integrate
etc	Auto Save / CH-Battery Check

동적으로 움직이는 질량체의 기구 부, 질량체의 능동적인 구동을 위한 서보모터 부, 그리고 상기 두 부분의 결합으로 구성된 AMD 몸체가 실시간적으로 기동할 수 있도록 제어 입력을 부여하는 AMD 제어 랙장치 부 등으로 구성된 프로토타입 AMD 시스템을 개발하였다. 이때 AMD 질량체 기구부에는 삼익 THK 社의 LM 가이드 액추에이터인 KR20 모델을 사용하였고, 서보모터 부에는 Mitsubishi 社의 AC 서보모터인 KP053 모델을 사용하였으며, 이들 두 부분을 상호 결합하여 AMD 몸체를 구성하였다. 그리고 AMD 몸체에는 이동 질량체가 설정된 스트로크 범위를 이탈할 것에 대비해 Omron 社의 Limit 센서인 EE-SX674 모델을 양측단에 부착하여 완성하였다.

또한 세 번째 부분인 AMD 제어 랙장치에는 상기 AMD 몸체에 구동전원 및 제어신호를 인가할 수 있도록 MR-J3 모델의 서보 드라이버를 적용하고, 더불어 제어 입력단을 설계하여 AMD 제어 랙장치를 완성하였다. 상기와 같이 구성된 프로토타입의 AMD 몸체 및 AMD 제어 랙 (Rack) 장치는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같고, AMD 몸체에 대한 기본 사양은 Table 4 및 5와 같다.

2.3 실시간 피드백 진동제어 시스템

본 논문에서는 앞서 개발한 무선 가속도센서 시스템 및 프

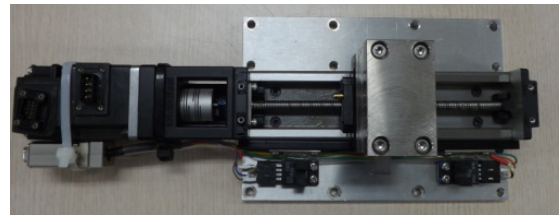


Fig. 4 Prototype AMD Body (Including AC Servo-motor & LM-Actuator)



Fig. 5 Prototype AMD Control Rack

Table 4 Spec. of AC Servo-motor

Index	Spec.
Rated Output	50W
Rated Torque	0.16N · m
Max. Torque	0.48N · m
Rated Rotate Speed	3000RPM
Max. Rotate Speed	6000RPM
Rated Current	0.9A
Max. Current	2.7A
Body Weight	0.35kg

Table 5 Spec. of LM-Actuator

Index	Spec.
Move-Axis Type	ball-screw
Ball Lead	6 mm
Body Length	209 mm
Outer Rail Length	150 mm
Stroke Range	91.5 mm
Body Weight	0.58 kg
Positioning Accuracy	±0.01 mm
LM-Friction Factor	0.001~0.003

로토타입 AMD를 이용하여 피드백 진동제어 시스템을 구성하였다. 이를 위하여, 먼저 PC와 AMD간 제어지령 전달 그리고, PC와 무선센서 간 계측신호 전달 등을 위한 통신 네트워크를 구성하였다. 네트워크 구성 시 PC와 AMD간 제어지령 전달을 위해 본 논문에서는 커미조아 社의 DIO 모듈인 ceNM-SE 모델과 아날로그 출력모듈인 ceAO02A 모델을

이용하였다. 이때 DIO 모듈은 PC로부터 출력되는 실시간 제어지령 신호를 이더넷 (Ethernet) 통신단으로 전달받는 역할을 하고, 또한 아날로그 출력 모듈은 DIO 모듈로부터 전달된 제어지령의 디지털 신호를 일정한 전압범위를 갖는 아날로그 신호로 변화하여 최종적으로는 서보모터에 실시간 전달하는 역할을 한다.

다음으로, PC와 무선센서 간 계측신호 전달을 위해 본 논문에서는 블루투스 통신 기반의 멀티 (Multi)채널 접속장치인 SENA의 Parani-MSP1000을 이용하였다. 이 장비는 본 논문에서 블루투스 통신 방식으로 개발한 무선 가속도센서 시스템과 상호간 무선 통신으로 임의의 계측신호를 전달받고, 이 데이터를 디지털화하여 이더넷 통신단을 이용해 최종적으로 PC에 전달하는 역할을 한다. 본 논문에서 피드백 시스템 구축을 위해 이용한 통신장비는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

Fig. 6 및 Fig. 7에 보인 통신장비는 상기 Fig. 2에 나타난 무선 가속도센서 일체화 로거 본체에 모두 내장하였으며, 더불어 향후 AMD 기동을 위한 제어지령 연산 및 출력 프로그램 역시 상기 Fig. 3의 무선 가속도센서 로거 프로그램에 포함하였다. 결국 본 논문에서 구성한 Fig. 2의 일체화 로거 본체는 센서응답 (입력), 제어결정 (연산), 제어지령 (출력)등 일련의 처리과정을 통합적으로 수행하여 실시간으로 처리할 수 있도록 하였다. 본 논문에서 이상의 무선 가속도 센서 및 프로토타입 AMD를 이용해 구성한 실시간 피드백 진동제어 시스템은 Fig. 8과 같다.



Fig. 6 Real-time DIO & D/A Convert Module



Fig. 7 Bluetooth Multi CH. Access Point

2.4 실험실 규모의 진동제어 시험

본 논문에서는 자체 기술력으로 개발·구성한 무선 가속도센서 시스템 및 프로토타입 AMD 시스템을 이용하여 구조물의 실시간 피드백 진동제어 시스템을 구성하였고, 해당 시스템에 대한 기초성능을 실험적으로 검증하고자 하였다.

이를 위하여 먼저 본 논문에서는 개발된 무선 가속도센서 시스템 및 프로토타입 AMD 시스템의 기동을 통해 각 시스템의 타당성을 종합적으로 검증하였다. 이때 함수 발생기를 이용해 1~10Hz까지의 정현파를 생성하였고, AMD 시스템의 이동 질량체에 개발된 무선 가속도센서 및 범용 유선 가속도 센서를 설치하여 기초 실험 장치를 구성하였다. 마지막으로 생성된 정현파형을 1Hz부터 10Hz까지 1Hz 간격으로 증가시켜 총 10개의 기동조건을 AMD 시스템에 인가하였으며, 이때 이동 질량체에 설치된 유·무선 센서들로부터 가속도 응답을 동시에 획득하였다. 이렇게 획득된 각 주파수 별 가속도 응답 결과는 Table 6에 나타내었다. Table 6을 살펴보면, 무선 가속도센서 시스템은 기존의 범용 유선 가속도센서 시스템과 상호 우수한 응답 일치도를 보임으로써 시스템적으로 안정하며, 계측된 응답이 충분히 신뢰적임을 확인할 수 있었다. 또한, 프로토타입 AMD 시스템 역시 전체적으로 시스템이 안정하며, 임의의 주파수 형태의 외부 제어입력신호를 부여했을 때 기계적인 기동 및 입력신호의 추종능력이 우수함을 확인하였다.

이상의 결과를 토대로 본 논문에서는 개발된 센서 시스템과 AMD 시스템을 Fig. 8의 구성과 같이 실험실 규모의 2층 구조 모형 건축물에 적용하여 실시간 피드백 진동제어에 관한 기초성능을 평가하였다. 이때 제작한 모형 구조물은 실 구조물의 정량적 규모 축소화 (Scale-down)를 고려한 것은 아니며, 단지 대형 건축물의 동적 거동특성을 고려해 낮은 주파수 범위 내에 1차 및 2차의 지배 휨모드 (Bending mode)

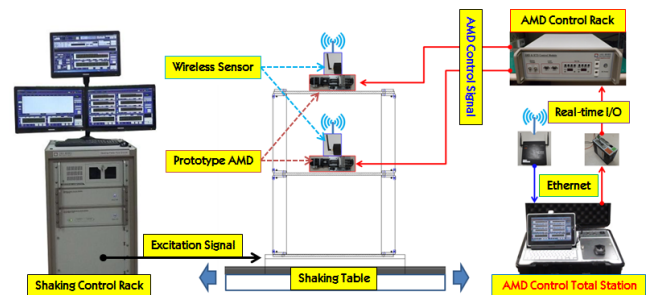
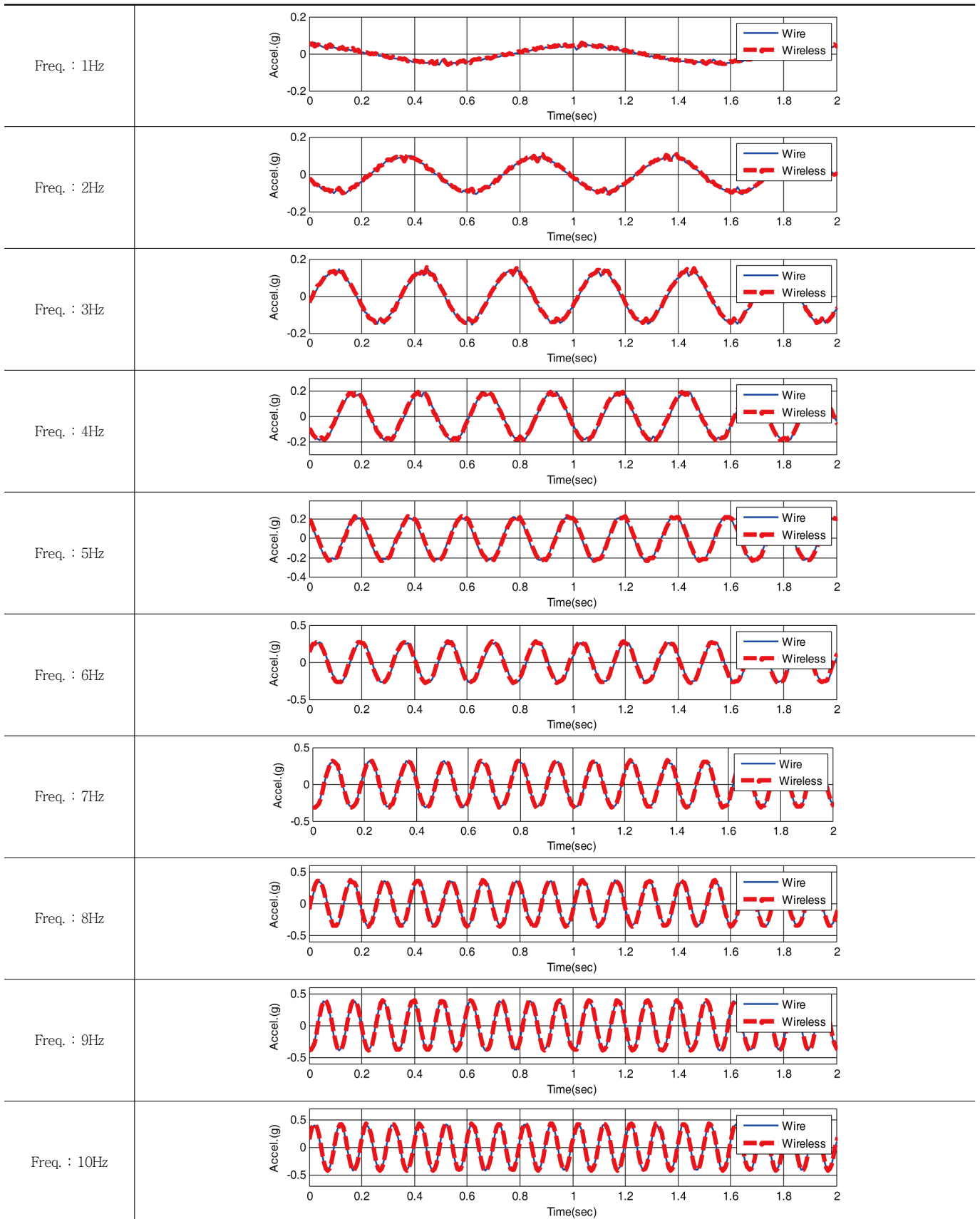


Fig. 8 Real-time Feedback Vibration Control System using Wireless Accel. Sensor & Prototype AMD

Table 6 Wire vs. Wireless Accel. Response using Prototype AMD



가 포함되도록 기둥 부재의 강성을 조절해 상대적으로 유연 (Flexible)하게 제작하였다.

진동제어 실험을 위해 무선센서 시스템 및 프로토타입 AMD 시스템을 설치한 모형 건축물의 실험장치 구성은 Fig. 9 와 같다. 이때 모형 구조물에 임의의 가진조건을 부여하기 위한 가진기 (Shaking Table)는 스마트제어계층의 S/T-ER-2을 활용하였으며, 해당 진동제어 실험은 상기 스마트제어계층의 R&D 연구소 [한국표준과학연구원 (대전 소재)]에서 진행하였다.

본 논문에서는 본격적인 진동제어 실험에 앞서, 실험 대상 구조물의 모달특성을 실험적으로 평가하였다. 모달 실험은 개발된 AMD 몸체를 모형 구조물의 각 층에 설치한 상태에서, 구조물 2층의 횡방향으로 해머 (Hammer)가진하였고, 이때 구조물의 응답은 본 논문에서 개발한 무선 가속도센서를 활용해 각 층별 가속도를 획득하였다. 여기서 각 층에 설치된 AMD 몸체 질량이 약 1.8kg으로써, 모형 구조물의 각 층별 질량인 약 2kg에 육박하였다. 따라서 AMD 몸체 질량은 필연적으로 전체 모형 구조물의 거동에 상당한 영향을 미치게 되므로, 실험여건을 고려하여 본 논문에서는 AMD 질량을 고려한 상태에서 모달실험을 수행하였다. Fig. 10은 각 층별 가속도 응답의 시간이력을 나타낸 것이고, Fig. 11은 각 층별 스펙트럼 분석결과를 보인 것이다. 모달실험의 결과, 1층과 2층 모두 동일한 주파수에서 2자유도 구조물에 상응

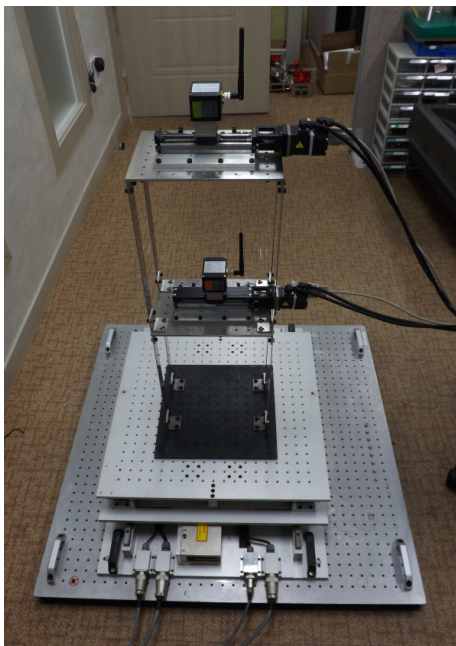


Fig. 9 Test Set of Real-time Feedback Vibration Control using Wireless Sensor Networking

하는 2개의 지배모드가 명확히 나타났으며, 정량적으로는 1차 지배모드가 2.391Hz, 2차 지배모드가 6.347 Hz로 각각 규명되었다. 여기서, AMD 몸체와 직접적으로 연결된 모터의 전원 및 엔코더 (Encoder) 케이블로 인한 구조물의 응답 간섭 및 감쇠효과는 무시하였다.

이상의 결과로부터 본 논문에서 개발한 무선 센서 및 프로토타입 AMD 시스템은 모두 하드웨어적으로 안정하며, 각 시스템의 구동성능 역시 기대치에 충분히 만족되었다. 따라서 이상의 각 시스템을 결합하여 본 논문에서는 실시간 피드백 진동제어 시스템을 구축하였고, 모형 건축물을 대상으로 개발 시스템의 기초성능 평가를 위해 단일 제어장치 설치 시 제어효과를 평가하고자 진동제어 실험을 수행하였다.

일반적으로 제어장치를 이용한 능동적 진동제어는 대상 구조물에 임의의 외부 가진력 (지진, 바람, 기타 활하중 등)

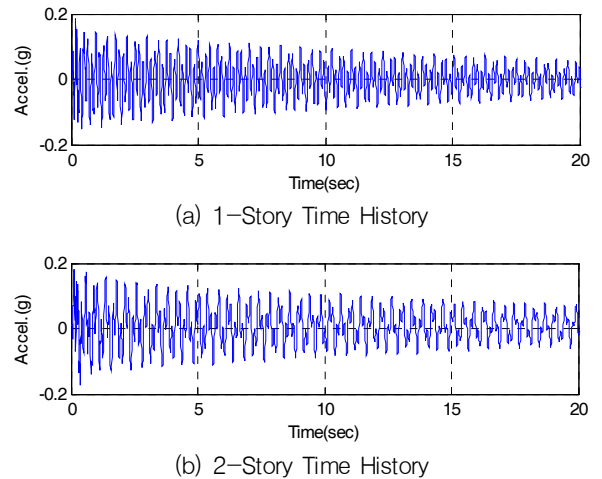


Fig. 10 Time History to Each Story of Model

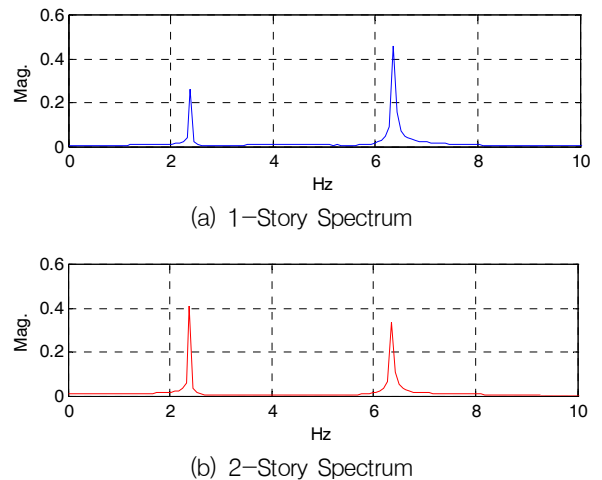


Fig. 11 Spectrum to Each Story of Model

이 부여되었을 때, 위험 방향으로 발생될 구조물 진동의 위치별 크기를 예측하고, 이를 효과적으로 상쇄시킬 수 있도록 목표된 제어력을 계산하여, 중국적으로는 계산된 제어력에 상응하는 제어신호를 제어장치에 부여함으로써 목표된 크기의 진동을 실시간적으로 저감시키게 된다. 이를 위해서는 대상 구조물에서 실시간 발생하는 진동에 따라 목표된 제어력을 계산하기 위한 제어법칙 (Control Law)이 요구된다. 본 논문에서는 개발된프로토타입 AMD의 기본 작동원리 (구동시 발생하는 제어력이 결국엔 질량체의 관성력)에 입각하여 개념적인 단순 제어법칙을 설정하였다. 이는 각 층의 가속도 신호를 실시간으로 획득하고, 이를 역 (-)방향 신호로 변환하여 다시 실시간으로 구조물에 부여하는 방법이다. 이러한 단순 제어법칙을 도식화하면 Fig. 12와 같다.

이때 구조물에 부여된 제어신호는 목적 위치에 설치된 제어장치 (프로토타입 AMD)의 이동 질량체를 구조물 움직임 방향과 반대가 되도록 구동시키며, 결국 구조물의 진동과 상반된 방향으로 실시간 관성력을 발생시킨다. 따라서 본 논문에서 설정한 단순 제어법칙의 목적은 정량적인 제어수준 및 목표값 등의 평가가 아닌, 온전히 무선 센서 시스템 및 제어장치를 구조물에 적용하여 진동제어 시스템으로의 타당성 및 진동제어 효과를 실험적으로 검증하는데 있다. 이때 정량적인 제어수준 및 목표값 설정 등으로 대상 구조물의 외력 조건 별 정밀제어를 위한 실험적 연구는 추후 단계적으로 수행할 계획이다.

본 논문에서는 앞서 설정한 단순 제어법칙과 대상 구조물의 모달 실험 결과를 토대로 1차 공진주파수를 이용해 구조물을 가진 한 경우, 2차 공진주파수를 이용해 구조물을 가진 한 경우, 그리고 El-centro 지진파형을 이용해 구조물을 랜덤하게 가진 한 경우 등의 세 가지 가진 조건으로 구분하여 진동제어 실험을 수행하였다. 여기서, 실험을 위한 가진 신호의 생성은 가진기의 허용 입력 범위를 고려하고, 더불어 대상 구조물의 영구변형 및 국부과괴 등이 발생되지 않도록 각 실험

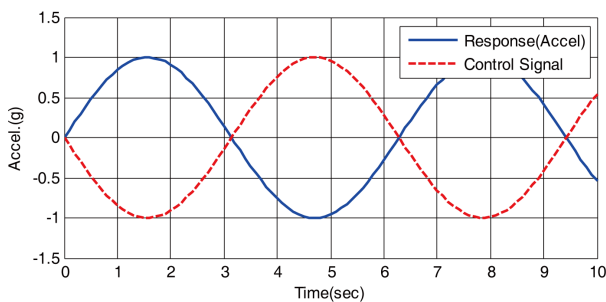


Fig. 12 Concept of Simple Control Law

시나리오 별 가진 신호에 적절한 이득 (Gain)을 취해 실험대상 구조물의 바닥가진 (Ground Excitation)으로 사용하였다.

본 논문에서는 구조물의 진동제어를 위해 실시간 구조물의 응답을 획득·활용하였으며, 구조물의 응답은 개발된 AMD의 설치위치에 대한 응답을 기준으로 하였다. 개발된 AMD 1기만 사용하여 각층에 독립적으로 설치하였고, 상기 세 가지 가진 조건 별 실험 시나리오에 따라 실시간 진동제어 실험을 수행하여 제어응답을 획득하였다. 여기서 획득된 제어응답은 각 시나리오에 따른 모형 구조물 층별 가속도 응답이며, 이는 비제어시 모형 구조물 층별 가속도 응답과 상호 비교하였다.

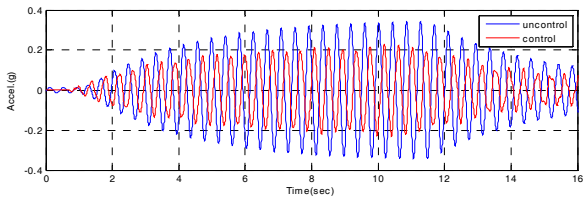
2.5 실시간 피드백 진동제어 실험 및 결과 분석

본 논문에서는 개발된 AMD를 설치한 모형 구조물을 대상으로 각 층별 실시간 피드백 진동제어 실험을 수행하였으며, 기 설정한 세 가지 경우의 실험 시나리오 별 구조물 응답 분석 결과를 제어 시와 비 제어 시로 구분하여 Fig. 13-Fig. 18에 나타내었다. 여기서 1층 AMD 제어와 2층 AMD 제어는 각각 AMD를 독립적으로 설치한 것을 의미한다 (1층 제어 시 2층 미설치, 2층 제어 시 1층 미설치).

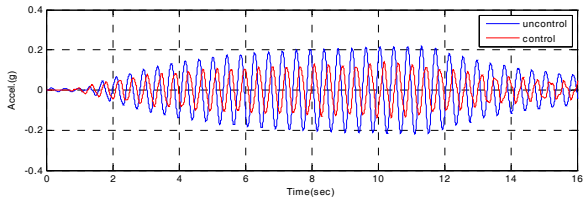
먼저 Fig. 13 및 Fig. 14의 (a), (b)에 대한 비제어시 가속도 응답을 살펴보면, 1차 공진주파수를 이용한 가진 시 응답이므로 2층의 응답이 1층의 응답에 비해 상대적으로 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 다음, Fig. 15 및 Fig. 16의 (a), (b)에 대한 비제어시 가속도 응답을 살펴보면, 2차 공진주파수를 이용한 가진 시 응답이므로 1층의 응답이 2층의 응답에 비해 상대적으로 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 한편, El-centro 지진파형의 랜덤주파수를 이용한 가진 시 응답인 Fig. 17 및 Fig. 18의 (a), (b)를 살펴보면, 1층과 2층에 대한 비제어시 가속도 응답에 차이가 상대적으로 미소하게 나타났다.

본 논문에서는 실시간 진동제어 효과를 정량적으로 평가하기 위하여 비제어시 대비 실시간 제어응답의 절대최대 가속도 (J1) 및 RMS (Root Mean Square Value; 실효값) 가속도 (J2)를 진동제어성능 평가지수로 사용하였다. 이때 절대최대 가속도 및 RMS 가속도의 수식적 표현은 다음 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$J_1 = \max \left\{ \frac{|x_i^a|}{x^{a, \max}} \right\} \quad (1)$$

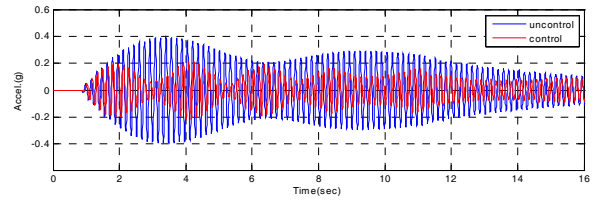


(a) 2-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

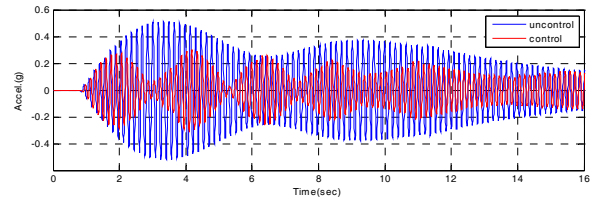


(b) 1-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

Fig. 13 1-Story AMD & 1st Mode Freq. Exciting

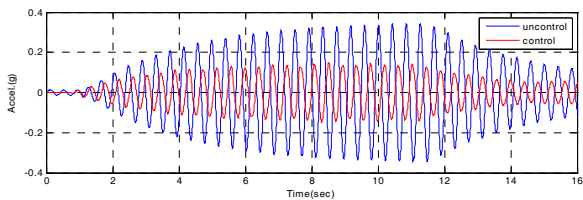


(a) 2-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

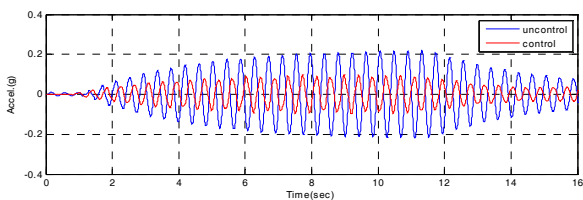


(b) 1-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

Fig. 15 1-Story AMD & 2nd Mode Freq. Exciting

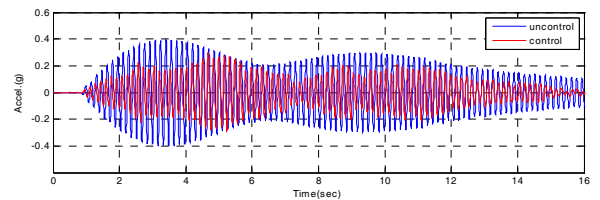


(a) 2-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

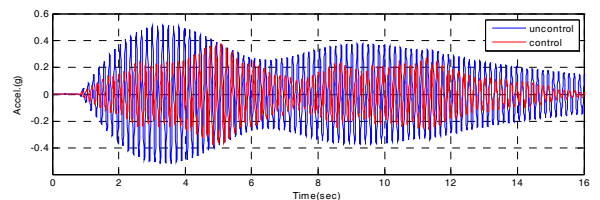


(b) 1-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

Fig. 14 2-Story AMD & 1st Mode Freq. Exciting



(a) 2-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)



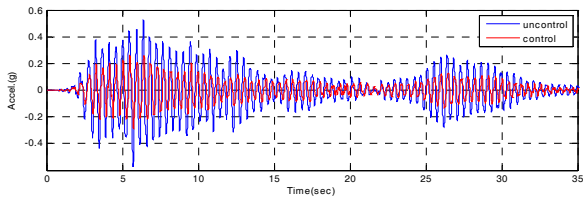
(b) 1-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

Fig. 16 2-Story AMD & 2nd Mode Freq. Exciting

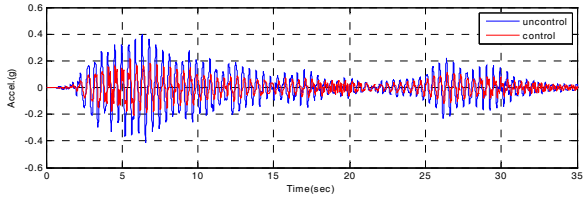
$$J_2 = \left\{ \begin{array}{l} x_i^{a, RMS} \\ x^a \cdot RMS \end{array} \right\} \quad (2)$$

여기서, 식 (1)의 $x^{a, max}$ 는 비제어시의 최대 가속도 응답, x_i^a 는 시간 단계별 가속도 응답이다. 또한 식 (2)의 $x^a \cdot RMS$ 는 비제어시의 RMS 가속도 응답, $x_i^{a, RMS}$ 는 시간 단계별 RMS 가속도 응답이다. 본 논문에서 고려한 진동제어 성능 평가지수는 진동제어의 효과를 진동 폭의 변화로 나타낼 때 유용하게 활용될 수 있으며, Dyke (2003) 등은 상기 진동제어 성능 평가지수를 사장교 진동제어에 관한 벤치마크 문제에서 사용한 바 있다. 이때 구조물의 응답에 대한 절대 최대값 (Peak or Max value)은 응답파형의 가장 큰 값을 나타내며, 이는 짧은 시간 (충격 등)의 진동크기를 나타내는데 유용

하다. 여기서 어떤 하중이나 응답이 시간 (T)에 따라 변화하는 양상을 묘사한 것이 “파형 (Waveform)”이라 정의하면, 이때 파형의 최대값은 파형의 시간에 대한 변화량을 나타내지는 않는다. 다음으로 구조물의 응답에 대한 RMS 값은 관심 있는 시간 (T) 동안 파형의 제곱평균에 제곱근을 씌운 값으로 계산되며, 이는 진동의 크기를 나타낼 때 파형의 시간에 대한 변화량을 고려하고, 또한 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지량 (Power)에 관련된 진폭을 표시하므로 진동 크기의 표현에 널리 사용된다. 본 논문에서는 상기 식 (1) 및 식 (2)에 나타난 진동제어 성능 평가지수를 산출하고, 정량적으로 제어효과를 평가하기 위하여, 구조물의 최대 가속도 응답 및 RMS 가속도 응답을 분석하여 Table 7에 나타내었다. 이때 분석된 응답들은 평가지수 (J1 및 J2)를 산출하는데 활용하였고, 최종적으로 각 실험 시나리오별 진동제어효과를

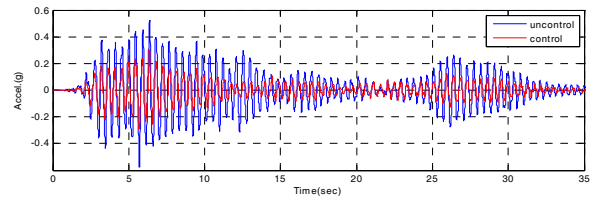


(a) 2-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

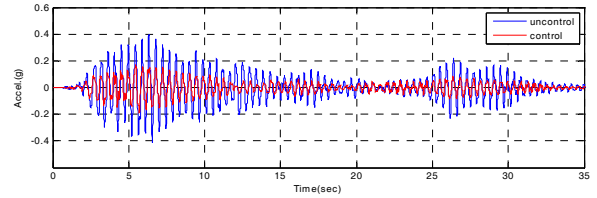


(b) 1-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

Fig. 17 1-Story AMD & El-centro Exciting



(a) 2-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)



(b) 1-Story Accel. Resp. (Uncon. vs Control)

Fig. 18 2-Story AMD & El-centro Exciting

Table 7 Model Resp. & Control Index & Control Effect to Real-time Feedback Vibration Control using Prototype AMD

Control Scenario		Estimate Results		Model Response		Control Index		Control Effect	
		Max. Accel. (g)	RMS Accel. (g)	J_1 (%)	J_2 (%)	Max. Accel. (%)	RMS Accel. (%)		
Uncontrol (1st Mode)	1sty Resp.	0.2186	0.1150	100	100	0	0		
	2sty Resp.	0.3442	0.1790	100	100	0	0		
1st Mode (1sty Con.)	1sty Resp.	0.1653	0.0858	75.61	74.60	24.39	25.40		
	2sty Resp.	0.2329	0.1110	67.66	62.01	32.34	37.99		
1st Mode (2sty Con.)	1sty Resp.	0.1007	0.0476	46.07	41.39	53.93	58.61		
	2sty Resp.	0.1472	0.0755	42.76	42.17	57.27	57.83		
Uncontrol (2nd Mode)	1sty Resp.	0.5213	0.2348	100	100	0	0		
	2sty Resp.	0.3996	0.1810	100	100	0	0		
2nd Mode (1sty Con.)	1sty Resp.	0.3098	0.1192	59.42	50.76	40.58	49.24		
	2sty Resp.	0.2186	0.0872	54.29	48.17	45.71	51.83		
2nd Mode (2sty Con.)	1sty Resp.	0.3802	0.1391	72.94	59.24	27.06	40.76		
	2sty Resp.	0.2984	0.1094	74.32	60.44	25.68	39.56		
Uncontrol (El-centro)	1sty Resp.	0.4166	0.0965	100	100	0	0		
	2sty Resp.	0.5760	0.1374	100	100	0	0		
El-centro (1sty Con.)	1sty Resp.	0.2158	0.0506	51.81	52.43	48.19	47.57		
	2sty Resp.	0.3020	0.0688	52.43	50.07	47.57	49.93		
El-centro (2sty Con.)	1sty Resp.	0.1878	0.0440	45.08	45.59	54.92	54.41		
	2sty Resp.	0.2889	0.0636	50.15	46.28	49.85	53.72		

정량적으로 평가하였다.

진동제어의 효과를 평가하기 위해 1차 공진주파수로 구조물을 가진한 경우를 살펴보면, 비제어시 대비 1층 제어의 경우 1층 응답은 J_1 및 J_2 가 약 75% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 25%를 보였고, 2층 응답은 J_1 및 J_2 가 약 65% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 35% 정도를 보였다. 또한 비제어시 대비 2층 제어의 경우 1층 응답은 J_1 및 J_2 가 약 44% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 56%를 보였고, 2층 응답은 J_1 및 J_2 가 약

43% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 57% 정도를 보였다. 여기서 1차 공진주파수로 구조물을 가진한 경우, 1층 제어시보다 2층 제어시 제어효과가 1층의 경우 J_1 및 J_2 가 약 56% 정도 향상되었고, 2층의 경우 J_1 및 J_2 가 약 39% 정도 향상되었으며, 이상의 결과로부터 AMD를 2층에 설치하는 것이 구조물의 1차 공진조건에 대비한 제어대책으로 유리한 것으로 판단된다.

다음으로 2차 공진주파수로 구조물을 가진한 경우를 살펴보면, 비제어시 대비 1층제어의 경우 1층 응답은 J_1 및 J_2 가

약 55% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 45%를 보였고, 2층 응답은 J1 및 J2가 약 51% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 49% 정도를 보였다. 또한 비제어시 대비 2층 제어의 경우 1층 응답은 J1 및 J2가 약 66% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 34%를 보였고, 2층 응답은 J1 및 J2가 약 67% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 33%를 보였다. 여기서 2차 공진주파수로 구조물을 가진한 경우, 2층 제어시보다 1층 제어시 제어효과가 1층의 경우 J1 및 J2가 약 24% 정도 향상되었고, 2층의 경우 J1 및 J2가 약 33% 정도 향상되었으며, 이상의 결과로부터 AMD를 1층에 설치하는 것이 구조물의 2차 공진조건에 대비한 제어대책으로 유리한 것으로 판단된다.

다음으로 규모화 된 El-centro 지진과 형태의 랜덤주파수로 구조물을 가진한 경우를 살펴보면, 비제어시 대비 1층 제어의 경우 1층 응답은 J1 및 J2가 약 52% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 48%를 보였고, 2층 응답은 J1 및 J2가 약 51% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 48% 정도를 보였다. 또한 비제어시 대비 2층 제어의 경우 1층 응답은 J1 및 J2가 약 45% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 55%를 보였고, 2층 응답은 J1 및 J2가 약 48% (평균치) 정도로 나타나 이때의 제어효과는 약 52%를 보였다. 여기서 랜덤주파수로 구조물을 가진한 경우, 1층 제어시보다 2층 제어시 제어효과가 1층의 경우 J1 및 J2가 약 12% 정도 향상되었고, 2층의 경우 J1 및 J2가 약 6% 정도 향상되었으며, 이상의 결과로부터 AMD를 2층에 설치하는 것이 구조물의 랜덤가진 조건에 대비한 제어대책으로 다소 유리한 것으로 판단된다.

3. 결론

본 논문에서는 구조물의 실시간 구조응답 획득을 목적으로 MEMS 기반의 무선 가속도센서 시스템을 개발하고, 또한 서보모터 기반의 프로토타입 AMD 시스템을 개발하였으며, 이들 두 시스템을 상호 결합하여 실시간 피드백 진동제어 시스템을 구성하였다. 또한 구성된 시스템의 기초적인 구동성능평가 실험과 더불어 실험실 규모의 2층 빌딩 구조물을 대상으로 진동제어실험을 수행하였다. 종국적으로 본 논문에서 구성한 시스템의 타당성 검증 및 제어실험을 통한 기초성능 평가에 관한 실험적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서 개발한 무선 가속도센서 시스템은 기존의 범용 유선 가속도센서 시스템과 상호 우수한 응답 일치도를 보임으로써 개발된 무선 센서 시스템이 시스템적으로 안정하며, 예측된 응답이 충분히 신뢰적임을 확인할 수 있었다. 또한, 본 논문에서 개발한 프로토타입 AMD 시스템 역시 전체적으로 시스템이 안정하며, 더불어 임의 주파수 형태의 외부 제어입력신호를 부여했을 때 기계적인 기동 및 입력신호의 추종능력이 우수함을 확인하였다.
- (2) 진동제어 실험을 위해 적용한 제어법칙의 연산입력(input)값을 위해 요구된 대상 구조물의 실시간 가속도 응답을 획득함에 있어 개발된 무선 가속도센서 시스템이 효과적이며, 또한 구조물의 실시간 진동제어를 위한 실시간 제진력을 능동적으로 부여함에 있어 개발된 프로토타입 AMD 시스템이 충분히 활용 가능함을 확인하였다.
- (3) 실시간 피드백 진동제어 시스템을 활용해 수행한 진동제어 실험의 결과에서는 진동제어성능 평가지수인 절대최대 가속도 및 RMS 가속도 모두에서 우수한 제어효과를 보였다. 특히 2층 빌딩 구조물의 진동제어시 1차 공진조건에 대비하기 위해서는 제어장치를 2층에 설치하는 것이 효과적이고, 2차 공진조건에 대비하기 위해서는 제어장치를 1층에 설치하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 더불어 El-centro 지진파형과 같은 랜덤조건에 대비하기 위해서는 제어장치를 2층에 설치한 경우가 보다 향상된 제어효과를 기대할 수 있었으며, 이때 1층과 2층의 제어효과의 차이는 미소함이 실험적으로 확인되었다.
- (4) 본 논문에서는 자체 기술력으로 개발·구성한 무선 센서 시스템 및 프로토타입 AMD 시스템의 안정성 및 타당성을 검증하고 각 시스템을 활용한 진동제어시스템으로의 활용가능성을 확인하기 위하여, 단순 제어 알고리즘과 이상화 된 모형 구조물을 바탕으로 실험적 연구를 수행하였다. 여기서 대상 구조물에 최적화된 제어알고리즘과 제어장치 그리고, 실시간성이 보장된 다채널 센서 시스템 등으로 본 시스템을 개선·구현한다면 무선 센서 기반의 실시간 피드백 멀티 (Multi) 진동제어 시스템으로 활용 가능할 것으로 사료된다.
- (5) 향후 최적화된 멀티 진동제어를 목표로 상기 고려조건을 반영하고, 안정적 통신 및 전원공급 환경이 구축되도록 전체 제어 시스템을 구성하여, 지속적으로 무선

능동진동제어에 관한 연계연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (건축/대형구조물의 안전관리를 위한 내외피용 IT기반 고정밀도 패치/임플란트시스템 기술개발)과 교육과학기술부 산하 한국연구재단 (과제번호 : NRF-2011-220-D00105)의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 이에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. Dyke, S. J., Caicedo, J. M., Turan, G., Bergman, L. A. and Hague, S. "Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, No. 7, 2003, pp.857-872.
2. Heo, G. H. and Jeon, J. R., "Performance Estimation of Semi-active Real-time Feedback Vibration Control System", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, vol. 15, No. 1, 2010, pp.85-94.
3. Heo, G. H., Lee, W. S., Lee, C. O., Jeon, J. R. and Sohn, D. J., "Development of Smart Wireless Measurement System for Monitoring of Bridges", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, vol. 15, No. 2, 2011, pp.170-178.
4. Kurata, N., Spencer Jr., B. F., Ruiz-Sandoval, M., Miamoto, Y. and Sako, Y., "A Study on Building Risk Monitoring Using Wireless Sensor Network MICA-Mote", *First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure*, Tokyo, Japan, November 13-15, 2003.
5. Lynch, J. P., Partridge, A., Law, K. H., Kenny, T. W., Kiremidjian, A. S. and Carryer, E., "Design of a Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with a Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring", *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, 16(3), 2003, pp.108-114.
6. Lynch, J. P., Wang, Y., Swartz, R. A., Lu, K. C. and Loh, C. H., "Implementation of a Closed-Loop Structural Control System using Wireless Sensor Networks", *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 15, 2008, pp.518-539.
7. Min, K. W., Kim, D. H., Lee, S. K and Hwang, J. S., "Vibration Control for Building Structures using Active Mass Driver (II) : Shaking-Table Test", *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, vol. 2, No. 4, 1998, pp.95-101.
8. Ministry of Land, Korea "Special Act on Safety Control for Infrastructure", Law No.10671, ver.2011. (in Korean)
9. Straser, E. G. and Kiremidjian, A. S., "A Modular Visual Approach to Damage Monitoring for Civil Structures", *Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials*, vol. 2719, 1996, pp.112-122.
10. Wang, Y., Swartz, R. A., Lynch, J. P., Law, K. H., Lu, K. C. and Loh, C. H., "Decentralized Civil Structural Control using Real-Time Wireless Sensing and Embedded Computing", *Smart Structures and Systems*, vol. 3, No. 3, 2007, pp.321-340.

Received : 01/22/2013

Revised : 03/05/2013

Accepted : 03/08/2013

요 지

본 논문에서는 건축물의 실시간 피드백 진동제어를 위한 기초연구로써, 자체 기술력을 바탕으로 개발된 무선 가속도센서 시스템 및 프로토타입 (Prototype) AMD 시스템을 결합하여 피드백 진동제어 시스템을 구성하고, 모형 건축물을 대상으로 구성된 제어시스템의 기초성능을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 우선 MEMS 센서 소자 및 블루투스 통신 모듈 기반의 무선 가속도 센서 유닛, 실시간 가속도 응답 획득 및 제어법칙에 근거한 제어출력을 구현하도록 구성한 운영프로그램 등을 개발하였다. 또한 AC 서보모터를 이용해 기동되도록 설계한 프로토타입 AMD 및 모터 드라이버 시스템을 구성하였다. 마지막으로 이를 이용해 실시간 피드백 진동제어 시스템을 구성하였고, 2층 모형 건축물을 대상으로 실험실 규모의 진동제어 실험을 수행하여 목적된 구조물의 진동저감 효과를 정량적으로 분석하였다. 실험의 결과, 모형 구조물의 1차 및 2차 공진주파수 그리고 랜덤주파수 등의 실험조건에서 명확한 진동저감의 효과를 확인할 수 있었으며, 궁극적으로 본 논문에서 개발한 무선 가속도센서 시스템 및 AMD 시스템이 향후 여타 구조물의 진동제어를 위한 효과적인 수단으로 응용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

핵심 용어 : 무선 가속도 센서 시스템, 실시간 피드백 진동 제어, 능동 질량 댐퍼