무선 센서 네트워크를 이용한 실시간 Feedback 진동제어 시스템 개발

The Development of Real-time Feedback Vibration Control System Using Wireless Sensor Networks

허 광 희¹⁾

김 충 길²⁾

안 의 종^{3)*}

Heo, Gwang Hee

Kim, Chung Gil

Ahn, Ui Jong

Abstract

This paper aims to constitute a feedback vibration control system using wireless sensor networks and experiment it on a model structure to verify its effectiveness. For the purpose, we set up a feedback vibration control system composed of a wireless input/output(I/O) sensor node based on bluetooth, a home-made shear type MR damper, a shaker which generates a constant size of sine wave, and a simple beam model structure. The vibration control experiment was performed by shaking the 1/4 point of beam with a shaker. At the moment of shaking, we controled the vibration with MR damper which was placed vertically on the center of beam. Simultaneously, by acquiring acceleration response at the 2/4 point of beam, we evaluated the effectiveness of control capability. The control command was set to send a voltage signal to MR damper when the acceleration response, acquired from the wireless I/O sensor node placed at the center of beam, was more than a certain amount. Although the realtime feedback vibration control system constituted in this paper is effective only within a limited command system, it has been proven that the system was able to effectively decrease the vibration of structure by generating a control command aimed for realtime purpose. The system also showed a possibility to be used as a structural response control system adapting a variety of semi-active control algorithm.

Keywords : Wireless sensor networks, Real-time feedback vibration control, MR damper

1. 서론

21세기에 접어들면서 건설분야의 유지·관리기술은 다양한 전기·전자·정보통신기술(IT)을 도입함으로써 구조물의 상태 모니터링을 위한 시·공간의 제약성을 극복하고, 스마트 재료 및 관련 장치들을 고안·적용함으로써 구조물이 돌발적인 외란에 보다 적극적으로 대응할 수 있는 지능형 시스템 체계로 변천하고 있다. 이러한 변천은 구조물의 실시간 상태평가 및 내구수명 연장, 나아가 국가 기간시설물에 대한 투자비용 절감 등의 효과를 기대할 수 있어 앞으로 관련기술의 연구는 지속될 전망이다. 특히 종래의 유선계측기반 모니터링 시스템이 갖고 있던 계측장비·장치의 취급·관리에 따른 적용 한계를 극복하고자, 무선계측기반의 모니터링 시스템이 부각되었다. 이러한 무선계측기반 모니터링 시스템이 Straser(1996) 등에 의해 처음 건설분야에 제안된 이래, 이와 관련된 대

표적인 연구로는 Lynch(2003) 등이 MEMS 기반의 무선 가속도 센서를 개발하여 가진된 5층 모형 구조물을 대상으로 동특성을 분석·평가하였고, Kurata(2003) 등은 버클리 대학에서 개발된 MICA 시스템을 이용하여 2층 모형 구조물의 자유진동 실험과 위험도 모니터링 실험을 수행하였으며, Shinozuka(2003) 등은 MEMS 센서, 마이크로컨트롤러, 무선모뎀 등으로 구성된 DuraNode를 개발하여 구조물의 실시간 데이터 획득 시스템을 구현하였다. 국내에서는 조수진(2011) 등이 스마트 무선 센서를 이용한 사장교 구조 건전성 모니터링 시스템에 관한 연구를 수행하였고, 허광희(2007, 2011) 등이 교량 모니터링을 위한 스마트 무선 계측 시스템 개발에 관한 연구를 진행하였다. 또한, 김경목(2009) 등은 교량 모니터링시에 데이터를 수집하고 종합할 수 있는 센서 네트워크의 하부 구조를 제안하였다. 근자에는 이러한 무선 모니터링 기술뿐만 아니라, 진동제어 기술을 복합적으로 접목

1) 정회원, 건양대학교 건설환경공학과 교수

2) 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

3) 정회원, 건양대학교 교수, 교신저자

* Corresponding author : uijong@konyang.ac.kr 041-734-5302

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

시킴을 위한 통합 시스템 구축에 관한 연구가 시도되고 있다. 이와 관련된 대표적인 연구로는 Wang(2007) 및 Lynch(2008) 등이 무선센서 네트워크와 준능동형 MR 댐퍼를 이용해 페루프 제어 시스템을 구성하고, 실규모급의 3층 모형 구조물을 대상으로 다양한 실험조건 하에서의 실시간 구조물 응답계측 및 진동제어에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 하지만 이와 관련된 국내의 연구사례는 크게 부족한 실정이며, 결국 중·장기적인 관점에서 볼 때 국내 건설 분야의 유지·관리기술 선진화를 위하여 다각적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 자체 기술력으로 개발한 무선 I/O 시스템과 전단형 MR 댐퍼 시스템을 상호 결합하여 무선 네트워크 기반의 실시간 피드백 진동제어 시스템을 개발하고, 이때 개발된 시스템의 검증에 위해 모형 구조물을 대상으로 실험실 규모의 단순 진동제어 실험을 수행하였다. 실험의 결과, 개발된 시스템은 구조물의 응답을 실시간 획득함과 동시에 실시간 제어명령을 생성·출력시킴으로써 구조물에 발생한 목적(target)된 진동을 명확히 제어함을 확인하였고, 이상으로부터 실시간 피드백 진동제어를 위한 효과적인 시스템으로의 활용 가능성을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 무선 네트워크 기반 진동제어 시스템

본 논문에서 개발한 무선 네트워크 기반 실시간 피드백 진동제어 시스템은 다음의 두 가지 시스템을 상호 결합한 형태로 구성하였다. 그 하나는, 기존 유선 시스템을 대체할 수 있는 무선 계측·전송·출력 시스템으로써, 본 논문에서는 최신 무선통신기술인 블루투스 통신방법을 채택하여 구조물의 응답 신호 혹은 필요 시 요구되는 명령 신호 등을 잡음(Noise)없이 빠르게 처리하도록 한 무선 입·출력(I/O) 시스템을 개발·적용하였다. 다른 하나는, 어떤 출력된 제어명령을 받아 구조물에 직접적인 제어력을 부여시킬 수 있도록 한 제어장치로써, 본 논문에서는 스마트 재료인 MR 유체를 이용한 전단형 MR 댐퍼 시스템을 개발·적용하였다.

이때, 무선 I/O 시스템은 n개의 MEMS형 1~3축 가속도 센서 노드를 동시에 사용할 수 있으며, 이들 각 센서 노드는 13~16Bit A/D 컨버터, 8bit 마이크로컨트롤러, 블루투스 통신모듈, Li-ion 충전모듈 그리고, 내장 메모리 등으로 구성되어 있어, 가속도 신호의 자가 획득뿐만

아니라 임베디드 된 알고리즘에 따라 의사결정(decision Making) 및 명령신호의 출력이 가능하다. 여기서, 가속도 센서의 측정범위는 $\pm 1.2 \sim 2g$, 측정 주파수 대역은 50Hz, 최대 무선 송·수신 거리는 약 1.2km이며, 특히 본 논문에서 개발·적용한 다음 Fig. 1 및 Table 1에 나타난 3축 가속도 센서 노드는 0~4V 범위의 출력신호단자를 갖고 있어, 필요시 의사결정에 따른 명령신호를 실시간 대응 시스템(ex. 제어장치 등)에 부여할 수 있도록 설계하였다.

그리고 전단형 MR 댐퍼 시스템은 다음 Fig. 2 및 Table 2와 같이 전자석 요크를 갖는 제어장치와 0~2A 범위의 전류신호를 댐퍼에 공급하는 전류 드라이버, 제어장치의 전단판에 적용되는 MR 유체 함침 폼 블록 등으로 구성하였고, 의사결정에 따라 명령된 전압신호를 전류신호로 변환하여 MR 댐퍼에 공급함으로써 실시간적으로

Fig. 1 3 direction wireless sensor

Table 1 Specification of 3 direction Acceleration sensor

Items	Specification
Sensor	3 direction Acceleration sensor
Measurement range	$\pm 2g$
Measurement distance	up to 1.2 km
Sampling rate	100 ~ 300 Hz
Output range	0 ~ 4 Volt
Output terminal	BNC
Resolution	13 bit
Memory	32 Kbyte
Measurement precision	0.75 mg
Batter life	10 hr
Size(b×h×d)	52×68×52 mm

Fig. 2 MR-Damper

Table 2 Specification of shear type MR damper system

Items	Specification
Design capacity	30 N
Yoke diameter	22 mm
Core diameter	4 mm
Core length	11.5 mm
Coil diameter	0.23 mm
Coil turns	600 turns
MR fluid	MRF-132AD
Current driver	RD-3002-03
Inside shear plate size (b×h×d)	20×25×5 mm
Outside friction plate size (b×h×d)	44.5×25×6.5 mm

제어력을 발생시키도록 하였다.

이상의 시스템들을 바탕으로 본 연구에서 계획한 무선 네트워크 기반 실시간 피드백 진동제어 시스템의 전체 개념도는 다음 Fig. 3과 같다.

Fig. 3 Key map of Real-time feedback vibration control system based wireless network

2.2 실시간 피드백 진동제어 실험

본 논문에서는 구조물에 발생되는 진동을 실시간으로 통제·관리함에 있어 활용될 수 있는 무선 네트워크 기반의 피드백 진동제어 시스템을 개발·구성하고, 이를 이용해 전단형 MR 댐퍼가 설치된 모형 단순보 구조물을 대상으로 진동제어실험을 수행하였다. 또한 이때 획득된 구조물의 가속도 응답을 바탕으로 진동제어성능을 평가하여 개발된 시스템의 타당성을 검증하였다. 실험을 위한 모형 단순보 구조물은 전체길이 80cm, 폭 4cm, 두께 0.3cm 크기를 갖도록 일반 구조용 강으로 제작하였고, 이때 구속조건은 일단 힌지 및 타단 롤러로 설정하였다. 진동제어장치는 보 구조물의 수직방향 진동을 제어할 수 있도록 설치하였고, 이때 Lord 사의 MR유체(MRF-132AD) 및 0~2A 출력범위를 갖는 전류공급 장치(RD-3002-03)를 사용하여 요구전류를 공급하였다. 또한, 구조물의 수직방향 진동발생은 일정 크기의 정현파를 발생시키는 편심모터형 가진기를 제작·활용하였으며, 실험을 위한 가진 주파수는 단순보의 최-저차 공진주파수인 약 27Hz를 사용하여 보 중앙단에서의 진폭이 최대가 되도록 하였다. 본 실험에서는 무선 가속도 센서 노드(3축) 및 유선 가속도 센서(Dytran 3134D)를 각각 1개를 사용하여 구조물의 응답을 획득하였으며, 특히 3축 무선 가속도 센서 노드에는 다음 Fig. 4와 같은 단순 제어 알고리즘을 임베디드 하였다.

Fig. 4는 입력 가속도 응답에서 제어 범위를 표시하기 위하여 일반적인 Sine파의 1주기를 나타낸 것이다. 구조물로부터 획득된 가속도 응답이 0.05g~0.445g 범위일 때, 400등분된 0~4V의 제어를 위한 출력 값이 전류공급 장치를 통해 MR 댐퍼로 실시간 부여된다.

그리고 이상의 각 시스템들에 대한 설치위치는 Fig. 3과 같이 편심모터형 가진기의 경우 보의 좌측 기준 상단

Fig. 4 Embedded Simple control algorithms

Fig. 5 Experiment setup of real-time vibration control

Table 3 Specification of experiment set

Experiment set	Specification
Communication method	Bluetooth
Sensor	MEMS Accelerometer
Bluetooth Access point	MSP-100 [SENA]
Communication protocol	TCP/IP
Measurement	Acceleration(g)
Control output	0~4 Voltage
Control output measurement	Tektronix TDS2002B
Simple beam size (L×W×T)	80×4×0.3 cm
Control device	Shear type MR damper
MR damper size (b×h×d)	44.5×25×24.5 mm
MR Fluid	MRF-132-AD
Current driver	RD-3002-03(0~2A)
Wire accelerometer	Dytran 3134D
Wire accelerometer measurement device	Zonic Medallion

1/4 등분점에, 3축 무선 가속도 센서 노드 및 유선 가속도 센서 노드는 상단 2/4 등분점에, 2축 무선 가속도 센서 노드 및 유선 가속도 센서 노드는 상단 3/4 등분점에 그리고, 전단형 MR 댐퍼는 하단 2/4 등분점 각각 설치하였다. 이상으로부터 본 논문에서는 다음 Fig. 5 및 Table

Fig. 6 Wire measurement system (Medallion)

Fig. 7 Oscilloscope (TDS2002B)

3과 같이 진동제어 실험셀을 구성하였다.

마지막으로, 본 논문에서는 시스템 검증을 위한 진동제어 실험은 크게 3가지 경우(비-제어, 수동 on/off 제어, 단순 알고리즘 제어)로 나누어 수행하였으며, 각 경우에 대한 가속도 응답은 유·무선 계측시스템을 이용해 동시에 획득하였다.

이때, 무선 응답과 비교하기 위한 유선 응답 계측은 Fig. 6과 같이 Zonic 사의 FFT 분석기(Medallion)를 사용하였고, 출력단의 실시간 제어명령 신호 측정은 Fig. 7과 같이 Tektronix 사의 오실로스코프(TDS2002B)를 사용하였다.

2.3 진동제어 실험결과의 분석 및 평가

본 논문에서는 무선 네트워크 기반의 실시간 피드백 진동제어 시스템을 모형 구조물에 적용하여, 제어조건 별 실시간 제어응답을 비교·평가함으로써 개발·구성된 시스템의 타당성을 검증하고자 하였다. 이를 위하여 진동제어 실험은 크게 비-제어, 수동 on/off 제어, 단순 알고리즘 제어 경우로 나누어 수행하였으며, 이때 구조물의 응답은 유·무선 계측시스템을 이용해 가속도 신호를 동시

에 획득·분석하였다.

본격적인 실험에 앞서, 먼저 3축 무선 가속도 센서 노드에 임베디드 된 단순 제어 알고리즘의 정상적인 연산·출력을 확인하기 위하여, 보 구조물의 최-저차 공진주파수(즉, 1차 휨 모드)인 약 27Hz를 사용해 구조물을 가진 한 상태에서 제어명령을 위해 발생한 출력단자의 전압값을 오실로스코프를 이용해 측정한 결과 다음 Fig. 8과 같이 나타났다. 여기에서 보면, 최-저차 공진주파수로 가진 할 경우 상대적으로 중앙단에서 진폭이 크게 발생하는 단순보 구조물의 거동 특성상 이에 상응하는 3~4V 범위의 높은 전압출력이 실시간적으로 유효하게 출력됨을 확인할 수 있었다.

다음으로는 전단형 MR 댐퍼가 실시간으로 제어효과를 발휘하는지 여부를 판단하기 위하여, 역시 27Hz로 구조물을 가진 한 상태에서 전류 공급 장치의 스위치를 사용하여 수동 on/off 제어 실험을 수행하였고, 이때 동시 획득된 유·무선 가속도 응답은 다음 Fig. 9와 같다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 유·무선 시스템의 가속도 응답은 전류 공급 장치의 on/off에 따라 동일한 시점에서 가속도 크기 변화를 보였다. 이로부터 적용된 MR 댐퍼는

기본적인 점성 및 마찰 감쇠력 이외에 제어에 따른 감쇠 성능을 보임을 확인하였고, 더불어 유선 시스템과 무선 시스템이 실시간으로 동일한 데이터를 획득함을 확인할 수 있었다.

마지막으로, 본 논문에서는 앞서 구성된 실험셀과 제어 알고리즘을 바탕으로 실시간 피드백 진동제어 실험을 수행하였다. 여기서 구조물의 가속도 응답은 유·무선 계측 시스템을 이용하여 비-제어 및 알고리즘 제어의 두 가지 실험조건으로 동시에 획득하였으며, 이때 획득된 유·무선 가속도 응답은 다음 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 여기서 보면, 3축 무선 가속도 센서 노드에 임베디드 된 제어 알고리즘을 통해 출력된 제어명령과 이 제어명령을 받아 감쇠력을 발생시키는 전단형 MR 댐퍼가 실시간 페루프를 형성하면서, 구조물의 응답을 효과적으로 감소시킬 수 있었으며, 이때 제어를 통해 감소된 가속도 응답은 약 $\pm 0.2g$ 내외임을 확인할 수 있었다. 실시간 피드백 진동제어 실험의 결과를 정량적으로 확인하기 위하여 다음의 Table 4와 같이 유·무선 시스템의 계측 값을 나타내었다. 계측 데이터는 각 조건별 최대값과 최소값을 비교하였으며, 그에 따라 제어 성능을 %로 나타내었다.

Fig. 8 Voltage output for real-time feedback control

Fig. 10 Feedback vibration control response of wire system

Fig. 9 Response of passive on/off control (Acceleration)

Fig. 11 Feedback vibration control response of wireless system

Table 4 Result of real-time vibration control

Case		Accel (m/s ²)		제어효과 (%)	
		max	min	max	min
유선	Uncontrol	0.6783	-0.6527	0	0
	Alg. Control	0.5413	-0.5437	20.20	16.70
무선	Uncontrol	0.6056	-0.6083	0	0
	Alg. Control	0.4326	-0.4345	28.57	28.57

Table 4에서 보는 바와 같이 유선 시스템의 경우 최대 값과 최소값의 비교결과 최대 약 20%의 진동제어 효과를 보였고, 무선시스템의 경우 약 29%의 진동제어 효과를 보였다.

3. 결 론

본 논문에서는 블루투스 기반의 무선 I/O 시스템과 스마트 재료(MR 유체)를 이용한 전단형 MR 댐퍼 시스템을 개발하고, 이들 두 시스템을 상호 페루프 형태로 결합하여 무선 네트워크 기반의 실시간 피드백 진동제어 시스템을 구성하였다. 또한, 이를 모형 단순보 구조물에 대하여 진동제어 실험을 수행하여 구성된 시스템의 타당성을 검증하고자 하였다. 이때, 일정한 크기로 가진된 단순보 구조물을 대상으로 크게 3가지 경우(비-제어, 수동 on/off 제어, 단순 알고리즘 제어)에 대한 진동제어 실험을 수행하였고, 유·무선 계측시스템으로 동시 획득된 각 제어조건 별 가속도 응답을 상호 비교·평가하였다. 이상의 시스템 검증에 관한 실험실 규모의 실험적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 논문에서 개발한 무선 네트워크 기반의 피드백 진동제어 시스템은 우선, 무선 I/O 센서 노드에 임베디드 된 단순 제어알고리즘으로부터 실시간으로 제어 명령이 출력됨을 확인하였고, 이때 출력된 제어명령으로부터 전단형 MR 댐퍼가 구조물 응답을 (약 30% 정도) 효과적으로 제어할 수 있음이 검증되었다. 결국, 본 시스템에 적합한 준능동 제어 알고리즘(ex. Lyapunov 및 Clipped-optimal 등)을 적용할 경우 대상 구조물의 거동특성을 반영한 개선된 진동제어 효과가 기대된다.
- (2) 특히, 본 논문에서 고려된 무선 I/O 시스템의 경우 측정·출력범위의 확장, 송수신 거리·속도 향상,

센서노드의 경량화 및 다중 센싱 기능, 그리고 MR 댐퍼 시스템의 경우 충분한 감쇠력 및 동적범위를 갖도록 각각의 시스템을 개선한다면, 건설 구조물의 유지·관리 측면에서 기존 유선 시스템의 한계를 극복하고, 지능형 시스템으로의 체계 확립이 가능할 것으로 사료된다.

- (3) 최종적으로, 본 논문에서 개발한 무선 네트워크 기반의 피드백 진동제어 시스템은 비록 실험실 여건을 고려해 단순 제어 알고리즘과 이상화 된 모형 구조물을 바탕으로 실험적 검증을 수행하였으나, 추후 대상 구조물에 적합하도록 시스템을 조정하여 적용할 경우, 구조물에 발생된 목적 응답을 외부 저전력(2A 내·외)만을 사용하여 실시간상에서 준능동적으로 제어·관리할 수 있는 적극·효율적인 방법으로서의 활용 가능성을 제시하였다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 2010-0024250, NRF-2011-220-D00105, 2011-0017218). 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. 김경목, 강철진, 오병주, 이영훈, “교량 모니터링을 위한 예약 기반 무선 센서 네트워크에 관한 연구”, 한국정보기술학회논문지, vol. 7, No. 6, 2009. 12, pp.121-127.
2. 조수진, 윤정방, 정형조, “스마트 무선 센서를 이용한 사장교 구조 건전성 모니터링 시스템”, 구조물진단학회지, vol. 15, No. 2, 2011.3, pp.12-22.
3. 허광희, 이우상, 김만구, “스마트 센서 기술을 이용한 구조물 건전도 모니터링 시스템 Part I: 스마트 센서의 개발과 성능평가”, 구조물진단학회지, vol. 11, No. 2, 2007. 3, pp.134-144.
4. 허광희, 이우상, 이진옥, 전준용, 손동진, “교량 모니터링을 위한 스마트 무선 계측 시스템 개발”, 구조물진단학회지, vol. 15, No. 2, 2011.3, pp.171-178.
5. 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, vol. 1, 2003, pp.353-357.
6. 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, vol. 16, No. 3, 2003, pp.108-114.

7. 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, 2008, 15:518-539.

8. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Chou, P., Chen, Y. and Park, C., "MEMS-Based Wireless Real-Time Health Monitoring of Bridge", The 3rd International Conference on Earthquake Engineering, Nanjing, China, 2003.

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,

1996, 2719:112-122.

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.

(접수일자 : 2011년 1월 19일)
(수정일자 : 2012년 3월 22일)
(심사완료일자 : 2012년 4월 30일)

요 지

본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 이용한 피드백 진동제어 시스템을 구성하고, 모형 구조물을 대상으로 구성된 시스템의 진동제어효과를 실험적으로 검증하고자 하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 블루투스 기반의 무선 I/O 센서 시스템과 스마트 재료를 사용한 전단형 MR 댐퍼를 개발하고, 또한 일정한 크기의 정현파형을 발생시키는 가진기 및 모형 단순보 구조물을 이용하여 피드백 진동제어 시스템의 실험설을 구성하였다. 진동제어 실험은 가진기를 이용해 보의 1/4 등분점에서 일정하게 가진한 상태에서, 보 중앙점에 수직방향으로 설치된 MR 댐퍼를 이용해 진동을 제어하였으며, 보의 2/4 등분점에서의 가속도 응답을 획득하여 제어효과를 평가하였다. 이때, 제어명령은 보 중앙점에 무선 I/O 센서 노드를 설치하고, 여기서 획득된 가속도 응답이 일정 크기 이상일 경우에 설정된 범위의 전압신호를 MR 댐퍼로 출력하도록 설정하였다. 최종적으로 본 논문에서 구성된 무선 센서 네트워크 기반의 실시간 피드백 진동제어 시스템은 비록 제한적인 명령 체계에서 검증되었지만, 실시간적으로 목적된 제어명령의 발생 시킴으로써 구조물의 진동을 효과적으로 감소시키는 것을 확인하였고, 추후 다양한 준능동 제어 알고리즘을 적용한 구조적 응답 제어시스템으로의 활용 가능성을 제시하였다.

핵심 용어 : 무선 센서 네트워크, 실시간 피드백 진동제어, MR 댐퍼