교량의 진동제어를 위한 통합 무선제어 시스템

The Unified Wireless Control System for the Vibration Control of Bridge

허 광 희¹⁾

김 충 길²⁾

오 주 원^{3)*}

Heo, Gwang Hee

Kim, Chung Gil

Oh, Ju Won

Abstract

This paper aimed at the development of a unified wireless control system in order to control various forms of vibration of bridges. This unified wireless control system unified all different systems each of which functioned for different purpose such as measurement, analysis, judgement, and control of data acquired from the movement of structure. It was designed to control structures with feedback which was returned according to each different situation after analyzing various signals measured about the structure. In this system, every information in each step from measurement to control was wirelessly transmitted to its central system so that a manager was able to effectively monitor the whole process. Just for the case when any system control need to intervene occurred, a graph user interface was designed for better access. In order to evaluate its basic performance, an experiment was carried out to see how signal input and output were done by comparing its results with those of a wired system. On the basis of the experiment, a vibration control experiment was performed on a model of cable-stayed bridge to see if the unified wireless control system worked well in realtime. This was carried out under four conditions, and the graph and quantitative result under each condition were compared each other. All experiments proved that the unified wireless control system functioned as well as the wired one in terms of its basic performance and vibration control.

Keywords : Wireless Control System, Vibration Control, Wireless Measurement, Feedback Control

1. 서 론

건설기술의 발전과 사회적인 요구에 따라 최근 건설 구조물은 날로 장·대형화 되고 있다. 장대형 교량구조물의 경우 큰 지간을 지지할 수 있도록 대부분 케이블을 사용한다. 이와 같이 케이블을 사용한 장·대형 교량구조물은 구조적으로 유연한 특성을 갖고 있으므로 외부의 반복적인 불특정 하중으로 인하여 피로가 누적되거나 지진과 같은 급작스러운 과다 하중으로 인하여 상부구조가 낙교하거나 교각에 심각한 손상이 초래될 수도 있다. 따라서 교량구조물의 진동을 최소화 하기 위한 진동제어에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다 (Kobori, 1994; Jolly et al., 2000).

교량구조물의 진동을 제어하는 기술은 크게 계측모니터링 기술과 구조물 상태에 따른 피드백 제어 기술로 분류 할 수 있다. 먼저 계측모니터링 기술은 구조물에 부착

된 계측장치로부터 외부하중의 변화로 인한 구조물의 거동을 실시간으로 측정하고 모니터링 하는 기술이다. 최근 계측모니터링시스템은 과다한 초기 설치비용과 유지관리 의 어려움 및 주변 환경에 의한 잡음과 같은 문제점을 개선하고자 Straser가 무선 계측을 제안하여(Straser et al., 1998) 현재까지 많은 연구자들에 의하여 다양한 무선 계측에 관한 연구가 진행되어 오고 있다. 대표적인 연구로 Lynch 등은 MEMS 기반의 무선가속도 센서를 개발하여 구조물의 동특성을 분석·평가하였고(Lynch et al., 2003), Kurata 등은 USM(Ubiquitous Structural Monitoring)시스템을 센서 노드(Sensor Node) 간에 다단계(Multi-hop) 무선통신방식과 MEMS 가속도 센서를 바탕으로 개발하였다. 그는 USM의 성능 검증하기 위하여 Shaking 테이블 실험과 실제 빌딩에 USM을 설치하여 지진 감지 모니터링 실험을 수행하였다(Kurata et al., 2003). 두 번째로 구조물 피드백 제어기술은 계측시스템

1) 정회원, 건양대학교 건설환경공학과 교수

2) 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

3) 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : ohjw@hannam.kr 042-629-7560

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로부터 획득한 구조물의 응답을 분석하여 실시간으로 진동을 제어하는 기술이다. 이 기술은 Yao가 사회기반시설의 동적 하중을 감소시키기 위하여 피드백 제어시스템의 적용을 제안하면서 많은 연구가 진행되고 있다(Yao, 1972). 하지만, 초기의 피드백제어시스템은 구조물의 진동을 제어하기 위하여 큰 제어력을 구조물에 직접 전달하고자 하였기 때문에 대형의 장치와 많은 전력을 필요로 하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 준능동 제어시스템이 소개된 후(Dyke et al., 1998), 최근까지 무선계측모니터링 시스템을 이용한 피드백 진동제어 기술에 관한 연구가 활발하게 되었다(Eker et al., 2001; Nilsson et al., 1998; Poplys et al., 2004). 대표적인 연구로는 Wang 및 Lynch 등이 무선센서 네트워크와 준능동형 MR Damper를 이용해 페루프 제어시스템을 구성하고, 모형 빌딩구조물의 응답을 실시간으로 계측하여 진동을 제어하는 실험을 수행하였으며(Lynch et al., 2008; Wang et al., 2007), 국내의 허광희 등은 교량의 진동제어에 MR damper를 이용하고자 다양한 알고리즘을 적용하는 많은 연구를 진행하였다(허광희 et., 2010, 2011). 그러나 교량과 같은 구조물은 보다 장대형이고 긴 거리의 현장에 위치해있으므로 구조물을 효과적으로 실시간 진동제어하기 위해서는 데이터의 전송 속도와 전송거리, 데이터 손실로 인한 신호 복원 문제 등에 대한 다양한 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 기존의 유선계측모니터링 시스템이 지니고 있는 설계 및 설치의 복잡성과 비용 문제를 해결하고, 특히 무선계측시스템을 적용하였을 때 발생할 수 있는 데이터의 손실 문제 등을 해결하여 실시간 통합 무선제어가 가능한 시스템을 설계하고 개발하였다. 또한 개발된 통합무선제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 준능동제어 장치를 이용한 모형 교량의 진동제어를 수행하여 그 효용성을 검증하였다.

2. 통합무선제어 시스템

본 시스템은 유선시스템의 복잡성과 비용문제, 현재 개발된 무선시스템의 데이터 손실 문제 등을 해결하여, 하나의 통합된 시스템에서 계측, 판단, 및 제어를 손쉽게 관리 할 수 있는 통합 무선제어시스템을 개발하였다. 제안된 시스템은 무선계측시스템, 무선출력시스템, 중앙통제시스템, 양방향 무선 통신시스템으로 구성하였다. 각각의

시스템은 서로 다른 역할을 하지만, 실시간 진동제어를 수행하도록 서로 유기적으로 작동하여 피드백 진동제어가 될 수 있는 통합시스템이다.

2.1 무선계측 시스템

무선계측시스템은 구조물에 부착된 다양한 종류의 센서로부터 구조물의 응답을 계측하고, 계측된 데이터를 중앙통제시스템으로 무선 전송하는 시스템이다. 무선계측시스템은 N사의 Ethernet 기반의 데이터 로거(Data Logger) 장치인 cRIO-9014와 cRIO-9104를 사용하였다.

이 장치는 안정화된 Real-Time OS가 탑재되고, 고속의 데이터 처리가 가능한 FPGA 칩이 내장되어 있어 본 연구에서 요구하는 실시간 계측 및 계측결과에 실시간 피드백 제어가 가능하도록 시스템을 개발할 수 있는 환경을 제공하고 있다. 특히 다중 및 다채널시스템을 개발하는 통합계측 시스템에 적절한 NI 9233모듈과 NI 9237모듈을 사용하였다. NI 9233모듈은 각 모듈 별 4 Channel(Ch)로 구성되어 있는 24비트 아날로그 입력 모듈로써 구조물에 부착된 IEPE 표준에 따른 Piezometer Type의 가속도 센서와 Force 센서로부터 데이터를 획득할 수 있는 모듈이며, NI 9237모듈은 각 모듈 별 4 Ch로 구성되어 있는 24비트 반/완전 브리지(bridge) 아날로그 입력 모듈로써 구조물에 부착된 Wheatstone Bridge Type의 Strain 및 LVDT 등과 같은 센서로부터 데이터를 획득할 수 있는 모듈이다.

2.2 무선출력시스템

무선출력시스템은 전자식 진동시험기에 Analog 신호를 출력하는 시스템이다. 무선출력시스템의 Analog Output(AO)을 위한 장치는 한 개의 모듈(4 Chs)로 구성되어 있으며, $\pm 10V$ 의 16비트 아날로그 전압 출력이 가능한 NI 9263을 사용하여 개발하였다. 디지털 출력을 무선계측시스템에 통합하기 위해서 cRIO-9104에서 지원하는 FPGA를 이용하였고, 원하는 출력을 정확하게 내보내는지 확인하기 위하여 $\pm 10V$ 의 16비트 아날로그 입력 모듈인 NI 9215를 추가하여 기능을 보완하였다. 본 연구에서 개발된 무선출력시스템은 시스템을 통하여 구조물에 진동을 가하기 위한 출력과 제어기의 통제를 위한 신호를 내보내도록 다음 Fig. 1과 같이 프로그램 하였다. Fig. 1의 (a)

(a) Analog Output (AO. 1)

(b) Analog Output (AO. 2)

Fig. 1 Program of Wireless Analog Output(WAO) System

(a) Data Measurement

(b) Data Analysis

Fig. 3 Program of MC System

Fig. 2 Main Control(MC) System & WAO System

에서 보는 바와 같이 AO Ch 1은 구조물에 진동을 가하는 신호를 내보내도록 하였으며, (b)의 AO Ch 2는 Damper을 제어하는 신호를 내보내도록 하였다. 통합 시스템으로 제작된 무선계측시스템과 무선출력시스템은 다음 Fig. 2와 같다.

2.3 중앙통제 시스템

중앙통제시스템은 무선계측시스템으로부터 무선 전송된 데이터를 확인하고, 구조물의 상태를 확인하며, 구조물의 상태에 따른 제어 여부를 무선출력시스템에 무선으로 전송하도록 설계하고 실시간 제어에 필요한 데이터 손실이 없도록 각 시스템 사이에 유기적인 연결과 관리를 하도록 상용 컴퓨터를 사용하여 개발 하였다.

Fig. 4 GUI of MC System

Fig. 3(a)에서 보여주는 바와 같이 무선계측시스템으로 부터 전송된 데이터를 관리자가 확인 할 수 있는 계측 데이터 확인 창을 별도로 만들었고 (b)는 획득한 데이터를 분석하여 무선출력시스템에 명령을 전달하도록 하였다. Fig. 4는 전체적인 중앙통제시스템의GUI(Graph User Interface)로 각각 A는 무선계측시스템, B는 무선출력시스템의 출력데이터를 보여준다. 아이콘 C는 저장, 그리고 아이콘 D는 기타 시스템의 관리를 위하여 설계하였다.

2.4 양방향무선통신 시스템

양방향무선통신시스템은 무선계측시스템과 중앙통제시스템 그리고 무선출력시스템 상호간에 양방향무선통신이 가능하도록 하는 역할을 하도록 개발된 시스템이다. 양방향무선통신시스템은 cRIO-9014와 cRIO-9104를 이용하여 TCP/IP

통신이 가능하도록 설계하였다. 또한 RFLink-500M (RF Vision)의 무선 Bridge를 이용하였고, 데이터의 전송 및 손실 문제를 해결하기 위하여 무선계측시스템과 중앙통제시스템에 큐(Queue)로 불리는 가상의 저장 공간을 이용할 수 있는 함수를 사용하였다.

3. 실험모형제작과 장비 구성

본 연구에서 개발한 통합무선제어시스템의 성능을 실험적으로 검증하기 위하여, 모형 교량과 진동제어 장치를 직접 제작하여 무선진동제어를 위한 실험 장비를 구성하고 성능을 평가하였다.

3.1 진동제어를 위한 모형 구조물

진동제어 실험을 위한 모형 구조물은 한국의 대표적인 사장교인 서해대교를 1/200로 축소화하여 다음의 Fig. 5와 같이 설계 및 제작하였다.

구조물의 상판의 경계조건은 오른쪽 주탑부와 양쪽 끝단의 지점은 롤러로 하였고 왼쪽의 주탑부는 힌지로 제작하였다. 모형 구조물의 채원은 다음의 Table 1과 같다.

3.2 진동제어를 위한 제어장치

진동제어를 위한 제어장치는 전단형 MR Damper를 자체 설계 및 제작하여 사용하였다. 제작한 전단형 MR Damper는 다음의 Fig. 6과 같다. 이 MR Damper는 중앙에 전단판, 마찰판, 코일이 감겨 있는 요크 부분과 연결봉 그리고 외부고정대로 이루어져있다. 전단판, 마찰판, 그리고 요크

는 자기의 포화 및 풀림 현상을 극대화하기 위하여 S20C의 저 탄소강으로 제작하였으며, 연결봉과 외부 고정대는 자기의 영향이 적은 알루미늄으로 제작하였다. 그리고 요크를 감은 코일은 0.4mm의 에나멜 코일을 2000 turns 감아 제작하였다. 전단판과 마찰판의 gap 크기는 좌우 동일하게 6mm로 설정하였고, L사의 MRF-132DG가 함침된 스펀지를 삽입하여 장치를 완성하였다. 또한, MR Damper로 안정적인 전류 공급을 위하여 출력 전류 범위 0~2A인 L사의 Current Driver인 RD-3002-03을 이용하였다.

3.3 통합무선제어시스템의 실험을 위한 장비 구성

본 연구에서 제안한 통합무선제어시스템을 실험하기 위하여 다음의 Fig. 7과 같이 모형 교량 및 장치를 설치하였다. Fig. 7에서 A는 무선 통신을 위하여 사용된 RFLINK

Table 1 Specification of Model Structure

Items	Condition
Total length	4.2m
Middle span length	2.2m
Width	0.17m
Tower height	0.7m
Tower location Boundary Condition	Roller & Hinge
Side location Boundary Condition	Roller
Materials	Steel
Cable diameter	0.13

Fig. 5 Model Structure

Fig. 6 MR Damper

Fig. 7 Experiment Setup

500M이며 무선계측시스템에 유선으로 연결하였다. A와 통신을 하는 다른 하나의 RFLINK 장비는 실내 실험상의 여건으로 6m 떨어진 중앙통제시스템에 유선으로 연결을 하였다. 결과적으로 RFLINK 장비의 실내 무선 거리는 6m이다. B는 구조물에서 데이터를 획득하고, 제어 신호를 제어기에 인가하는 무선계측 및 무선출력시스템이다. C는 구조물에 부착되어 진동을 제어 하는 제어기인 MR Damper이며, D는 구조물에 직접적으로 진동을 가하는 전자식 진동시험기이다.

4. 무선제어실험

본 논문에서는 개발한 통합무선제어시스템의 성능 점검을 위하여 무선진동제어 실험 장비를 구성하였다. 통합무선제어시스템의 성능 점검에 앞서, Pre-test를 통하여 통합무선제어시스템의 기본 성능을 점검하였으며, 점검 결과를 바탕으로 구성된 무선 진동제어 실험 장비를 이용하여 통합무선제어시스템의 성능을 평가하기 위한 무선 구조물진동제어 실험을 수행하였다.

4.1 통합무선제어시스템의 Pre-Test

무선 제어 실험에 실행하기 전 통합무선제어시스템의 점검을 위해 무선 계측 및 출력실험을 수행하였다. 무선 계측 및 출력 실험은 전자식 진동시험기 SET (EDS20-120와 Power Amplifier 1200) 및 가속도계 D사의 3055B3모

Fig. 8 Pre-test Device Setup

(a) Oscilloscope (b) Iotech (c) WAO system

Fig. 9 Pre-test Result

델)을 이용하였다. 데이터의 검증을 위한 유선계측장비는 오실로스코프(TDS2002B)와 상용 계측 장비인 IOtech을 사용하였으며, 실험장비의 구성은 다음의 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 실험장비는 실험과정을 육안으로 확인을 위하여 통합무선제어시스템과 근접하여 위치 시켰으나, 무선 안테나인 RFLINK를 6m 떨어진 장소에 위치 시켜 무선 제어 실험시의 무선통신 거리 조건을 만족 시켰다.

실험은 중앙통제시스템에서 전자식 진동시험기로 무선출력시스템을 통하여 12hz Sine파로 움직이도록 출력신호를 보낸 후 전자식 진동시험기에 부착된 가속도계를 통해 데이터를 획득한 무선계측시스템이 무선으로 중앙통제시스템에 데이터를 전송하는 방법으로 진행하였다.

무선 계측 및 출력 실험은 무선출력시스템에 오실로스코프를 직접 부착하여 확인한 출력 데이터와 무선 전송되어 관리자가 확인한 중앙통제시스템의 데이터, 그리고 유선계측장비인 IOtech에서 획득한 데이터를 서로 비교하였다. 실험 결과는 다음의 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 좌측부터 오실로스코프, Iotech, 중앙통제시스템의 데이터 획득 그래프이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 본 논문에서 개발한 무선출력시스템은 관리자가 원하는 신호인 12hz의 Sine파를 출력함을 확인 하였고, 무선계측시스템은 구조물의 움직임을 정확히 계측하여 중앙통제시스템에 무선으로 전송함을 확인하였다. 결과적으로 통합무선제어시

시스템은 무선 제어를 위한 계측 및 제어의 기본 조건을 충족함을 확인하였다.

4.2 진동제어 실험 방법

통합무선제어시스템의 성능을 평가하기 위한 모형 구조물의 무선 진동제어의 실험은 다음의 Fig. 10과 같은 방법으로 진행하였다. Fig. 10의 무선 진동제어 시스템 개념도에서 보는 바와 같이 1차적으로 구조물에 진동을 가하기 위하여 1번 라인을 따라 중앙통제시스템에서 무선계측시스템으로 명령을 하달한다. 명령을 받은 무선계측시스템은 가진기를 이용하여 구조물에 진동을 가한다. 진동에 의한 구조물의 응답을 CH1을 통하여 획득한 무선계측시스템은 중앙통제시스템에게 전송한다. 데이터를 전송 받은 중앙통제시스템은 제어 신호를 내보낼지에 관하여 판단을 한 후, 판단 결과에 따라 2번 라인을 따라 무선출력시스템에게 명령을 내린다. 명령을 전달받은 무선출력시스템은 Wonder box를 통하여 MR Damper에 전류를 전달한다. 전류를 전달받은 MR Damper는 자기장을 형성하고, 형성된 자기장의 영향으로 구조물의 진동을 감쇠 시킨다. 구조물의 진동 감쇠에 의한 구조물의 응답은 CH4를 통하여 획득한 무선계측시스템이 중앙통제시스템에게 전달한다. 구조물의 가진이 종료 될 때까지 2번 라인의 과정은 반복된다. 여기서 점선은 무선 전송 구간이고, 실선은 유선 전송 구간이다.

무선 진동제어 실험은 진동 감쇠가 없는 상태(Un-damping), MR Damper를 부착시킨 후 전류를 인가하지 않은 상태 (Passive), MR Damper에 조건 없이 전류를 인가한 상태 (Active), 기본적인 트리거 함수를 사용하여

Fig. 10 Test Process

일정 기준 이상의 진폭에서 전류를 인가한 상태(Semi-active)에서 각각 가속도와 Force를 획득하였다. 이때, 구조물은 전자식 진동기침기를 이용하여 규모를 축소된 El-sentro 지진파로 진동을 가하였다. 구조물의 가진 명령 및 계측은 0.0005초 간격으로 총27642개의 데이터를 출력 및 획득하도록 하였으며, 실험을 통하여 획득한 데이터를 저장하여 각각 상호 비교하였다.

4.3 진동제어 실험 결과

무선제어 실험의 결과는 Un-damping, Passive, Active, Semi-active 상태에서의 가속도와 Force의 응답 데이터를 상호 비교하였다. 비교를 위하여 진동제어 성능지수 중 일부를 활용하였다(Dyke et al., 2003). 활용된 진동제어 성능지수는 절대 최대 가속도(J_2),인가전압의 소모량(J_3)이며, 특별히 MR Damper가 부착된 구조물의 중앙지점에서 발생하는 힘(제어력)을 절대 최대 힘(J_4)의 향으로 정형화하여 활용하였다. 여기서, 인가전압의 소모량(J_3)의 경우 준능동 제어 장치와 같은 별도의 외부전원 공급을 요구하는 장치를 제어시스템에 적용할 경우 반드시 평가되어야 하는 성능지수이다. 비교를 위한 성능 지수의 표현은 다음 식 (1) ~ (3)과 같다.

$$J_2 = \max \left\{ \frac{|x_i^a|}{x^{a,\max}} \right\} \quad (1)$$

$$J_3 = \max \left\{ \frac{\sum V_i}{\sum V_{on}} \right\} \quad (2)$$

$$J_4 = \max \left\{ \frac{|x_i^f|}{x^{f,\max}} \right\} \quad (3)$$

식 (1)에서 $x^{a,\max}$ 는 Un-damping상태에서의 최대 가속도 응답, $|x_i^a|$ 는 각 상태 별 최대 가속도 응답이고, 식 (2)에서 $\sum V_{on}$ 는 Active 상태에서 계속적으로 전압이 인가될 경우의 인가 전압의 Sample 수, $\sum V_i$ 는 Semi-active 상태에서 조건에 따라 전압이 인가 될 경우의 인가 전압의 Sample 수이다. 마지막으로 식 (3)의 $x^{f,\max}$ 는 Un-damping상태에서의 최대 힘 응답, $|x_i^f|$ 는 각 상태 별 최대 힘 응답이다.

무선제어실험을 통하여 획득한 각 상태 별 데이터의 비교는 그래프를 활용한 비교와 성능지수를 활용한 비교로 진행하였다. 먼저 획득한 각 상태 별 가속도, 인가전압, 힘의 응답 그래프는 다음의 Fig. 11과 같다. Fig. 11의 (a)는 획득한 가속도 응답을 각 상태 별 상호 비교하기 위하여 하나의 그래프로 나타내었으며, 전체적인 응답이 큰 Un-damping, Passive, Active, Semi-active순으로 나타내었다. (b)는 제어 조건 Semi-active 상태에서 출력된 인가전압의 데이터를 그래프화 하였다. (c)는 중앙 지점의 MR Damper의 연결봉에 설치된 Force센서로부

(a) Vibration Control Result(Accel.)

(b) Distribution of Applied Voltage

(c) Vibration Control Result(Force)

Fig. 11 Graph of Test Result

터 획득한 힘 응답 데이터의 그래프화 하였으며, 그래프는 응답의 규모가 크게 나타난 Active, Semi-active, Passive, Un-damping 순으로 나타내었다.

다음으로 응답 데이터 별 Maximum Response(MR), Performance Index(PI), 그리고 Control Effect(CE)는 다음의 Table 2, 3, 4에 나타내었다. 여기서, PI는 식 (1) ~ (3)에 따라 계산된 값을 백분율로 나타내었으며, CE는 PI 값을 이용하여 계산한 제어 효과이다. Table 2는 가속도 응답에 따른 최대가속도, Un-damping 대비 절대최대가속도 성능지수, 성능 지수에 따른 제어 효과 (최대가속도 감쇠비율) 순으로 나타내었다. Table 3은 MR Damper의 제어를 위하여 전압을 인가한 Active와 Semi-active 상태에서의 출력데이터 수, Active 대비 Semi-active 상태의 인가전압 소모량 성능지수, 성능지수에 따른 인가전압 감소 효과 순으로 나타내었다. 여기서 active 상태의 인가전압 수는 Semi-active의 수와 비교를 위하여 가진 시작시점과 종료시점의 인가전압 수로 한정하였다. Table 4는 힘 응답에 따른 최대 힘, Un-damping 대비 절대최대 힘 성능지수, 성능 지수에 따른

Table 2 Response and PI according to control cases (Accel.)

Control Case	MR	PI	CE
	Accel. (m/s^2)	J_2	Accel (%)
Un-damping	3.60	100	0
Passive	2.60	72.2	27.8
Active	2.24	62.2	37.8
Semi-active	2.52	70.0	30.0

Table 3 Response and PI according to control cases (Voltage)

Control Case	MR	PI	CE
	Input Sample	J_3	Input Sample (%)
Active	22971	100	0
Semi-active	9243	40.24	59.76

Table 4 Response and PI according to control cases (Force)

Control Case	MR	PI	CE
	Force. (N)	J_4	Force (%)
Un-damping	17.79	100	0
Passive	26.69	150.03	50.03
Active	80.07	450.08	350.08
Semi-active	53.38	300.06	200.06

제어력의 증가 비율 순으로 나타내었다.

4.4 실험결과 분석

본 논문에서 실시한 무선 진동제어 실험의 결과는 다음과 같다. 먼저 가속도 응답의 경우 Fig. 11 (a)와 Table 2에서 보는 바와 같이 Semi-active상태의 가속도 응답이 Passive와 Un-damping 상태 보다 감소된 응답을 보였다. 응답의 감소는 Active 37.8%, Semi-active 30.0%, Passive 27.8% 순으로 감소효과가 우수하였다. 여기서, Un-damping 상태와 Passive 상태에서 많은 차이를 보이는 것은 MR Damper의 마찰판과 전단판 사이에 부착된 Sponge와 MR Fluid로 인한 마찰 및 점성력의 영향으로 판단된다.

다음으로 인가전압 응답의 경우 Fig. 12 (b)와 Table 3에서 보는 바와 같이 본 논문에서 개발한 통합무선제어 시스템은 가속도의 응답에 따라 MR Damper의 Current Driver인 Wonder Box의 기준 전압(0~5V) 중 MR Damper가 최고의 성능을 발휘하는 5V의 전압을 출력하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, Active 대비 Semi-active 상태에서 인가전압이 59.76% 감소한 것을 확인 할 수 있다.

마지막으로 제어력 응답의 경우 Fig. 12 (c)와 Table 4에서 보는 바와 같이 Semi-active상태의 제어력이 Passive와 Un-damping 상태 보다 증가됨을 확인 하였다. 제어력은 Active 350.08%, Semi-active 200.06%, Passive 50.03% 순으로 증가되었다.

이상의 무선 진동제어의 실험 결과 가속도와 힘의 응답에서 Semi-active 진동제어는 Active 상태의 응답에 비하여 성능이 저하되었으나, 인가전압이 59.76% 감소한 것을 고려한다면 우수한 성능을 보인 것으로 판단된다. 또한, 가속도 응답의 감소율이 제어력의 증가율과 차이가 나는 것은 앞서 언급되었던 바와 같이 지속적인 제어가 아닌 조건에 의한 제어를 진행함에 있어 발생한 오차에 따른 영향으로 판단된다. 이점은 추후 연구를 통하여 다른 비교 조건을 추가해야 할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 교량 구조물의 진동 제어를 위해 통합된 무선시스템을 설계 및 개발하고, 이를 활용하여 무선 구조물 진동제어 실험을 수행하였으며, 실험에 따른 통합

무선 시스템의 제어 성능을 성능지수를 활용하여 평가 하였다. 또한, 무선제어 실험 전 무선시스템의 점검을 위하여 Wireless Measurement & Analog Output Test을 수행하여, 개발한 통합무선제어 시스템이 무선 구조물 진동제어에 활용 가능함을 확인하였다. 이상의 연구로부터 통합무선시스템을 이용한 교량의 진동제어에 관한 실험적 연구에 관한 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 통합무선제어시스템은 기존의 연구에서 문제점으로 지적되었던 데이터의 손실문제를 해결하기 위하여 프로그램을 추가하는 방법을 선택하였으며, Pre-test를 통하여 개발된 통합무선제어시스템은 데이터의 손실 없이 무선 양방향 데이터 전송이 가능함을 확인하였다.
- (2) 또한, 통합무선제어시스템은 연결 케이블의 길이를 최소화한 무선시스템으로 개발하였으며, 입력과 출력, 데이터 전송을 하나의 통합된 시스템에서 처리할 수 있도록 시스템을 설계 및 개발함으로써 기존의 유선시스템에서 문제점으로 지적되었던 계측 거리에 비례한 설치비용 문제와 시스템의 설계 및 설치의 복잡성 문제 해결을 위한 새로운 방안을 제시하였다.
- (3) 마지막으로, 개발된 통합무선제어시스템은 이용한 Pre-test 및 교량의 진동제어 실험을 통하여, 본 시스템은 구조물의 무선 제어에 적합함을 입증하였으며, 기존의 제어 알고리즘을 적용한 유선시스템과 견주어 보았을 때, 우수한 제어 성능을 보임을 확인하였다. 단, Passive상태와 Semi-active상태의 비교에서 가속도 응답의 감소율이 제어력의 증가율에 미치지 못하는 점은 제어장치의 개선을 비롯한 여러 가지 실험 조건을 변화시켜 연구되어야 할 문제로 사료된다.

이상의 결론으로부터 본 연구에서 개발한 통합무선제어시스템은 준능동 제어 장치를 이용한 실시간 피드백 구조물 진동제어에 적합함을 확인하였으며, 기존의 유선시스템과 무선시스템의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 적절함이 확인 되었다. 또한, 통합무선제어시스템은 프로그램 및 구성의 방향에 따라 다양한 유지관리 시스템에 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 2010-0024250, 2011-0017218, 2010-0027626). 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

참고문헌

1. 허광희, 전준용, "준능동형 실시간 Feedback 진동제어시스템의 성능평가", 구조물진단학회지, vol. 15, No. 1, 2011.1, pp.85-94.
2. 허광희, 전준용, 박승범, 오성근, "MR댐퍼 및 Lyapunov 제어 알고리즘을 이용한 교량 구조물의 실시간 진동제어", 구조물진단학회지, vol. 14, No. 4, 2010.7, pp.55-61.
3. 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, Issue 7, 2003, pp.857-872.
4. Dyke, S. J., Spencer Jr, B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., "An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection", Smart Materials and Structures: Special Issue on Large Civil Structures 7, 1998, pp.693-703.
5. Eker, J., Cervin, A. and Horjel, A., "Distributed wireless control using Bluetooth", IFAC Conference on New Technologies for Computer Control, 2001.
6. Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D., "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluid", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 10(1), 1999, pp.262-275.
7. Kobori, T., "Future Direction on Research and Development of Seismic Response Controlled Structure", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 11, Issue 5, 1996, pp.297-324.
8. 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.
9. 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, Issue 3, 2003, pp.108-114.
10. 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, Issue 4, 2008, pp.518-539.
11. Nilsson, J., Bernhardsson, B. and Wittenmark, B., "Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays", Automatica, vol. 34, Issue 1, 1998, pp.57-64.
12. Ploplys, N. J., Kawka, P. A. and Alleyne, A. G., "Closed-loop control over wireless networks", IEEE Control Systems Magazine, vol. 24, Issue 3, 2004, pp.58-71.
13. Straser, E. G. and Kiremidjian, A. S., "A Modular Wireless Damage Monitoring System for Structures", Report No. 128, John A. Blume Earthquake Center, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 1998.
14. 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.
15. Yao, J. T. P., "Concept of structural control", Journal of Structural Division, vol. 98, No. 7, 1972, pp.1567-1574.

(접수일자 : 2011년 8월 11일)

(수정일자 : 2012년 1월 16일)

(심사완료일자 : 2012년 2월 16일)

요 지

본 논문에서는 교량에 발생하는 다양한 진동을 제어하기 위하여 통합무선제어시스템을 개발하였다. 개발된 통합무선제어시스템은 구조물의 거동에 따른 데이터의 계측, 해석, 판단, 제어 등 데이터 처리 및 대응을 위하여 필요한 각각의 시스템을 하나의 시스템으로 통합한 일체형 시스템이다. 이 시스템은 계측된 구조물의 다양한 신호를 분석하여 상황에 따른 피드백제어(Feedback control)를 수행하도록 설계 하였다. 또한, 무선시스템의 계측에서 제어까지 각 단계의 과정을 중앙통제시스템에서 무선으로 전송 받아 전체적인 상황을 관리자가 모니터링 할 수 있도록 하였다. 그리고 필요에 따라 관리자의 통제나 참여가 필요한 경우 시스템에 쉽게 접근 할 수 있도록 사용자 환경을 구성하였다. 이와 같이 개발된 통합무선제어시스템의 기본성능을 검증하기 위하여 신호입출력 실험을 먼저 수행하였다. 이때 기본 성능 검증은 유선시스템을 활용하여 상호결과를 비교 검증 하였다. 신호입출력 실험의 결과를 바탕으로 통합무선제어시스템의 실시간 진동제어 성능을 평가하기 위하여 모형 사장교를 이용한 진동제어 실험을 실시하였다. 진동제어 실험은 4가지 조건하에서 진행하였으며, 그에 따른 그래프 및 정량적 결과를 비교 평가 하였다. 이상의 결과, 개발한 통합무선제어시스템은 유선시스템과 동일한 기본 성능을 보여 주었으며, 효과적으로 구조물의 진동을 제어할 수 있음이 증명 되었다.

핵심 용어 : 무선제어시스템, 진동제어, 무선계측, 피드백 제어