

# Lyapunov 알고리즘을 이용한 교량구조물의 무선 진동제어

## Wireless Vibration Control of Bridge Structure using Lyapunov Algorithm

허 광 회\*      김 충 길\*\*      전 승 곤\*\*      안 의 종\*\*\*      이 진 옥\*\*\*\*  
Heo, Gwanghee    Kim, Chunggil    Jeon, Seunggon    Ahn, Uijong    Lee, Chinok

---

### Abstract

본 논문은 외부의 하중에 따른 유해 진동에 쉽게 반응하는 장·대형 교량 구조물을 제어하고자 연구를 진행하였다. 일반적으로 장·대형의 교량 구조물의 진동제어를 위하여 유선시스템을 적용할 경우, 초기 설치 비용 문제, 유지관리 문제 등 많은 제약이 따른다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 외부 환경에서 적합한 무선 시스템을 진동제어시스템에 도입하여 TCP/IP 기반의 무선진동제어 시스템을 개발하였으며, 제어 시스템에서 중요한 제어 알고리즘은 준능동제어 시스템에 적합하다고 인정된 리야프노프 제어 알고리즘을 선택하였다. 이렇게 선택된 알고리즘을 적용한 무선진동제어 시스템의 제어 성능을 실험적으로 평가하기 위하여, 모형구조물과 준능동제어 장치를 자체 제작하여 무선 진동제어 실험을 행하였다. 그 결과 본 논문에서 개발한 무선진동제어 시스템은 유선시스템에 상응하는 진동제어 성능을 보임을 확인하였다.

In order to keep in control the long and large bridges whose vibration by external loads is fatal to their own structure, the adoption of wired system for vibration control entails some problems such as high initial set-up cost and onerous maintenance. This paper attempts to solve the problems by developing a TCP/IP based wireless vibration-control system which fits better outdoors and also by applying Lyapunov algorithm which has been proven to work well for semi-active control system. The performance of the Lyapunov -algorithm-applied wireless vibration-control system was evaluated through experiments with a model structure and a semi-active control device both of which were designed for this particular research. The experiments proved the wireless vibration-control system developed here was effective.

---

\* 정 회 원, 건양대학교 건설시스템공학과 교수

\*\* 학생회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정 회 원, 건양대학교 의료공과대학 교수

\*\*\*\* 정 회 원, 충남대학교 토목공학과 교수

**Keywords** : wireless vibration control, Lyapunov algorithm, bidirectional communication, MR damper, TCP/IP

## 1. 서론

일반적으로 이러한 장대교량은 장경간의 실현을 위하여 대부분 케이블을 사용하기 때문에 구조적으로 유연한 특성을 갖으며, 이러한 특성으로 인하여 외부의 하중에 의한 영향에 취약하다. 이에 따라 외부 하중의 영향으로부터 장대교량의 안전성을 확보하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 장대교량의 진동 제어를 위한 연구는 크게 제어 장치, 제어 알고리즘, 제어 시스템으로 분류 할 수 있다. 제어 장치의 경우, 초기의 수동제어 시스템에서 능동제어 시스템으로 발전하였고, 최근에는 두 시스템을 보완한 준능동제어 장치가 활발히 연구되고 있다. 제어 알고리즘의 경우, 많은 연구자들이 실험 및 이론적으로 다양한 알고리즘을 연구 및 개발하고 있으며, 대표적인 연구로는 Dyke 및 Spencer 등이 교량의 벤치 마크 문제를 통해 다양한 제어 알고리즘과 제어 장치를 비교하였다. 마지막으로 제어시스템의 경우 기존의 유선시스템의 비용 문제 및 설치와 유지관리에 따른 문제점을 해결하기 위하여, 최근에는 무선 모니터링 기술뿐만 아니라, 진동제어 기술을 복합적으로 접목시키기 위한 연구가 시도되고 있다. 대표적인 연구로는 Wang(2007) 및 Lyunch(2008) 등이 무선센서 네트워크를 이용하여 실규모급의 3층 모형 구조물을 대상으로 진동제어 실험을 행하였다. 하지만, 상기의 연구는 초기의 데이터를 무선센서로부터 획득하고, 데이터 분석에 따른 출력은 유선으로 행하는 유무선 복합형 연구였기에 장대형의 교량 구조물에 적용하기에는 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 장대교량의 진동제어에 적합한 무선 진동제어 시스템을 개발하였으며, 유선시스템에서의 성능이 인정된 Lyapunov 제어 알고리즘을 적용하여 교량구조물의 무선 진동제어 실험을 행하였으며, 이를 통하여 무선제어 시스템의 성능을 평가하고자 한다. 또한, 동일한 조건하에서 실시된 유선시스템의 제어 실험의 결과와 비교하여, 앞으로 무선 진동제어 시스템이 나아갈 방향을 제시하고자 한다.

## 2. Lyapunov 제어 알고리즘을 적용한 무선제어 시스템

### 2.1 Lyapunov 제어 알고리즘

본 논문에서는 교량구조물의 무선진동제어를 위하여 준능동제어 장치에 적용되어 성능이 평가된 Lyapunov 제어 알고리즘을 이용한 시스템의 제어 법칙을 사용하였다. 다음의 식 (1)은 시스템의 제어법칙(control law)이다.

$$v_i = V_{\max} H\left((-z)^T P B_i f_i\right) \quad 1)$$

여기서,  $H(\bullet)$  는 Heaviside step 함수이고, 첨자  $i$ 는 다수의 제어기를 사용하는 경우 제어기의 수를 고려하기 위한 표현이며,  $v_i$ 는 현 단계에서 각 제어기에 입력되어야 할 제어 전압, 마지막으로  $V_{\max}$ 는 현 단계에서 제어기의 제약조건에 따라 제어기에 유입되어야 할 최대 전압(maximum voltage) 이다. 종국적으로 Lyapunov 안정도 이론에 의해 제어법칙을 개발함의 궁극적인 목표는  $\dot{V}$ 가 가능한 한 음(negative)의 결과를 갖도록 각 장치에 대한 제어 입력을 선택하는 것이다.

## 2.2 무선 시스템

본 논문에서는 교량 구조물의 무선진동제어를 위하여 무선진동제어 시스템을 개발하였다. 개발한 무선진동제어 시스템은 HOST PC와 무선 통신을 통하여 계측, 제어를 하나의 시스템에서 처리 할 수 있는 통합 시스템으로 서로 다른 운영체제를 쓰는 컴퓨터 간에도 데이터를 전송할 수 있는 네트워크 전송 프로토콜인 TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 무선통신 방식을 사용하였다. 이러한 TCP/IP 방식을 사용하기 위하여 무선진동제어 시스템의 프로그램은 Labview를 사용하였으며, 양방향 통신을 위한 안테나는 RFLINK-500M을 사용하였다.

## 3. 무선진동제어 실험

본 논문에서 개발한 무선 진동제어 시스템의 성능을 평가하기 위하여, 다음의 Fig. 1과 같은 실험 장비 set을 이용하여 무선진동제어 실험을 수행하였다. 교량구조물에 진동을 인가할 실험장비는 전자식 진동시험기(EDS20-120)와 Power Amplifier(PA-1200)로 구성하였으며, 진동을 제어하기 위한 진동제어 장치는 자체 제작한 전단형 MR 감쇠기와 전류 공급을 위한 LORD사의 Device Controller Kit으로 구성하였다. 계측을 위한 센서는 Dytran사의 가속도 센서와 Force 센서, Tofyo Sokki의 변위센서로 구성하였다.

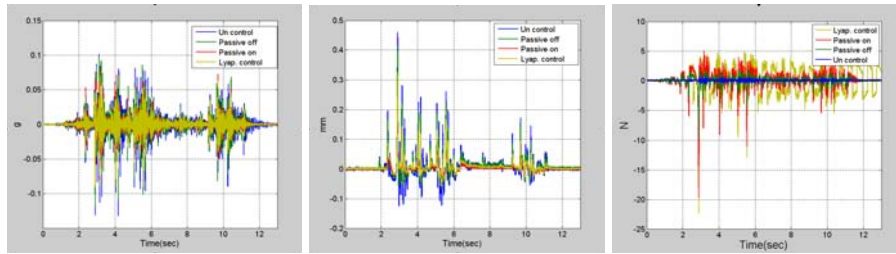


Fig. 1 실험장비 set

무선 진동제어 실험은 실험실 여건을 고려하여 축소판 El-centro 지진파형을 단기간의 중앙지점에서 인가되도록 한 후, 장기간의 중앙지점에서 진동을 제어하도록 진행하였다. 이때, 무선진동제어 장치의 안테나와 HOST PC의 안테나를 4m 떨어진 거리에 위치하여 서로 무선 통신 하도록 하였다. 안테나의 거리는 모형 교량의 최장거리와 실내실험의 여건을 고려하여 결정하였다.

## 4. 실험 결과

본 논문에서는 개발된 무선 진동제어시스템에 Lyapunov 알고리즘을 적용하여 모형 교량의 무선진동제어를 수행하였다. 실험은 전류를 인가하지 않은 Passive off 상태, 지속적인 전류를 인가한 Passive on상태, Lyapunov 알고리즘에 따른 결과에 따라 전류를 인가한 Lyapunov Control 상태로 구분하여 진행하였다. 그에 따른 실험 결과는 다음의 Fig. 2와 같이 나타내었다.



(a) 가속도

(b) 변위

(c) 힘

Fig.3 진동제어 실험결과

Fig. 2에서 보는 바와 같이 가속도, 변위, 힘의 그래프 모두 Lyapunov Control 상태에서 감소된 값을 보임을 확인할 수 있다. 또한, 변위 및 가속도의 수치적 비교를 위하여 진동제어 성능지수를 활용하였다(Dyke et al., 2003). 그에 따른 결과는 Table 1에서 성능지수로 나타내었다.

Table. 1 제어 조건에 따른 최대 응답 및 성능지수

	변위			가속도			인가전압		
	최대 응답	절대 평균값	성능 지수 ( $J_1$ )	최대 응답	절대 평균값	성능 지수 ( $J_2$ )	최대 응답	절대 평균값	성능 지수 ( $J_3$ )
Un control	0.4599	0.0241	100	0.1326	0.0105	100	-	-	-
Passive off	0.4145	0.0188	90.01	0.1182	0.0081	89.14	-	-	-
Passive on	0.2545	0.0081	55.34	0.0916	0.0054	69.08	130	-	100
Lyap. control	0.3247	0.0121	70.60	0.0910	0.0053	68.63	53	-	40.77

Table. 1에서 보는 바와 같이 Lyapunov Control 상태에서 변위, 가속도 각각 29.4%, 31.37%의 감쇠가 보임을 확인 하였다. 변위의 경우 Passive on 상태 보다 약 14.96%의 부족성능을 보였으나, 인가전압이 59.23% 감소한 것을 고려 하였을때, 인가전압 대비 성능이 우수한 것으로 판단 된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 장대교량의 진동제어에 적합한 TCP/IP 기반의 무선 진동제어 시스템을 개발하였으며, Lyapunov 제어 알고리즘을 적용하여 교량구조물의 무선 진동제어 실험을 행하였다. 또한, 선행 연구자에 의하여 실시된 유선시스템의 제어 실험의 결과와 비교하였다. 그에 따른 결과로부터 본 연구에서 개발한 무선진동제어시스템은 준능동 제어 장치를 이용한 실시간 피드백 구조물 진동제어에 적합함을 확인하였으며, 기존의 유선시스템과 무선시스템의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 적절함이 확인 되었다.

## 감사의 글

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(과제번호 : 2011-0026258 and D00105(I00168)). 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 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. Dyke, S. J., Turan, G., Caicedo, J. M., Bergman, L. A. and Hague, S., "Benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges", <<http://wusceel.cive.wustl.edu/quake/>>.
3. 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(3), 2003, pp.108-114.
4. Spencer, Jr, B. F., Christenson, R. E. and Dyke, S. J. "Next generation benchmark control problems for seismically excited buildings", *Proceedings of 2nd World Conference on Structural Control*, Vol.2, pp. 1135-1160, 1999.
5. 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.