

인공신경망기법을 이용한 무선 임피던스 기반 강교량 건전성 모니터링

Wireless Impedance-based Steel Bridge Health Monitoring Incorporating Neural Networks

민 지 영* · 박 승 회** · 윤 정 방*** · 심 효 진****

Min, Jiyoung · Park, Seunghee · Yun, Chung-Bang · Shim, Hyojin

요 약

본 논문에서는 교량의 볼트 체결부, 응력집중부 등 손상의 발생이 유력한 위치에 부착된 압전센서-무선 임피던스 센서노드를 통해 구조물의 건전성을 지속적으로 모니터링 하는 시스템을 소개하였다. 임피던스 기반 건전성 모니터링에 있어서 구조물에 발생하는 손상에 따라 민감하게 반응하는 주파수 성분이 달라지기 때문에, 이러한 주파수 영역을 자동으로 결정함과 동시에 손상에 관한 정보를 획득하기 위하여 인공신경망 기법을 적용하였다. 제안된 기법은 기존에 구축되어 있는 데이터베이스를 기반으로 구조물에 발생한 손상의 종류 및 손상의 정도를 판단하는 것을 목적으로 한다. 무선 임피던스 센서노드-인공신경망 기반 손상탐색 통합 시스템은 실제 강교량에서 발생한 볼트풀림, 균열 등 국부적인 손상의 진단을 위하여 적용되었으며, 그 유효성을 입증하였다.

keywords : 교량, 건전성 모니터링, 무선 임피던스 센서노드, 인공 신경망 기법, 주파수 영역 결정

1. 서 론

구조물에 부착된 압전센서로부터 기전 임피던스(electromechanical impedance)를 측정하여 토목 구조물에 발생한 국부적인 손상을 탐색하기 위한 연구가 1900년대 중반부터 국내외 연구자들을 중심으로 이루어졌다 (Park et al., 2003). 이후 임피던스 기반의 손상 탐색 기법이 무선 모니터링 시스템의 필요성과 접목되면서, 고비용(\$41,000)에 휴대가 불편한 기존의 임피던스 측정 장비(예: HP4294A)를 대체할 초소형 임피던스 측정 칩(Analog Device사; AD5933), 무선 송신기, 마이크로 컨트롤러(MCU)의 통합 시스템에 관해 집중적으로 연구되기 시작하였다(Overly et al., 2007; Tayler et al., 2009; Min et al., 2010). 본 연구에서는 실제 교량의 국부적 손상 모니터링에 적용하기 위한 무선 임피던스 센서노드(Wireless Impedance Sensor Node; WISN)를 개발하였다. 무선 데이터 전송의 한계를 극복하고 구동 소모 전력을 줄이기 위하여 손상을 탐색하기 위한 신호처리가 WISN의 MCU에서 이루어지며, 신호처리 후 결과만이 서버로 전송된다. 한편, 손상에 따라 민감하게 반응하는 주파수 영역이 다르기 때문에 계측 초기의 주파수 영역 결정에 어려움이 따르게 된다. 부적절한 주파수 영역을 선택하여 계측을 할 경우 구조물의 상태에 대해 오진을 내릴 수 있으므로, 이를 해결하기 위

* 학생회원 · 카이스트 건설 및 환경공학과 박사과정 amote@kaist.ac.kr

** 회원 · 성균관대학교 사회환경 시스템 공학과 조교수 shparkpc@skku.ac.kr

*** 회원 · 카이스트 건설 및 환경공학과 교수 ycb@kaist.ac.kr

**** 학생회원 · 카이스트 건설 및 환경공학과 석사과정 sascha@kaist.ac.kr

해 본 연구에서는 인공 신경망 기법(artificial neural network; ANN)을 이용하여 손상에 민감한 주파수 영역을 자동으로 결정하고 구조물에 발생한 손상의 종류 및 정도를 판단할 수 있는 기법을 제안하였다. 마지막으로 WISN과 인공 신경망 기법을 강 교량 거더에 적용하였으며, 거더에 발생한 볼트 풀림 및 균열을 탐색함으로써 제안된 시스템의 유효성을 검증하였다.

2. 무선 임피던스 센서노드 (WISN)

WISN은 크게 계측부, 신호처리부, 무선 전송부, 전원 공급부로 나뉜다(Min et al., 2010). 계측부는 압전센서 및 온도센서를 연결하는 센서접속부와 압전센서로부터 임피던스를 측정하는 AD5933으로 구성되며, 계측된 온도 및 임피던스 데이터를 신호처리부로 보낸다. 이 데이터는 메모리에 일시적으로 저장되며, MCU에 내장되어 있는 손상탐색 알고리즘을 통해 손상지수가 계산된다. WISN은 Koo et al.(2009)가 제안한 유효 주파수 이동법(Effective Frequency Shift Method; EFS 기법)에 근거하여 손상지수인 최대 상관계수(Cross-correlation Coefficient; CC)를 계산하며, 온도변화로 인해 발생하는 임피던스 신호의 주파수 축에 대한 이동을 보상한다. 손상지수를 계산하기 위한 기준신호(baseline)는 Flash 메모리에 저장된다. 신호처리부에서의 손상지수 산출이 완료되면, 그 결과가 무선 RF 모듈과 안테나로 구성된 무선 전송부를 통하여 외부 서버로 전송된다. 기준 전압 3.3V로 구동되는 WISN은 5V DC 어댑터, 3.6-7.2 V 배터리, 혹은 태양전지 시스템으로부터 전원을 공급받을 수 있다. 한편, WISN은 서버의 MATLAB® 소프트웨어를 통해 제어된다. 관리자가 WISN의 ID, 계측 주파수 대역, 계측 옵션 등 입력변수를 설정하면 서버는 설정된 입력값에 해당하는 명령을 WISN에 전송한다. WISN이 모든 명령을 수행하면 그 결과가 서버로 전송되고 MATLAB의 결과창에 표시된다. WISN의 상세를 표 1에 나타내었다.

3. 인공신경망 기법 기반 주파수 영역 결정 자동화 및 손상 진단

임피던스 기반 손상탐색 기법은 일반적으로 30 kHz 이상의 고주파수 대역을 사용한다. 즉, 짧은 파장을 사용하기 때문에 구조물의 전체적인 거동보다는 국부적인 이상상태를 발견하기에 효과적이다. 그러나 주파수

표 1. WISN의 상세

주파수 영역	1 ~ 100 kHz (해상도 > 1 Hz)
임피던스 영역	1 kΩ ~ 1 MΩ
온도 영역	-20 ~ 120 °C (해상도 > 0.03 °C)
RF 대역	2.4 GHz IEEE 802.15.4
무선 전송거리	150 m (2dBi Dipole 안테나)
전원 공급원	5V DC 어댑터; 배터리 (3.6-7.2V); 태양광패널-NiMH 충전지
크기/ 무게	150x100x70 (mm ³); 310 (g)

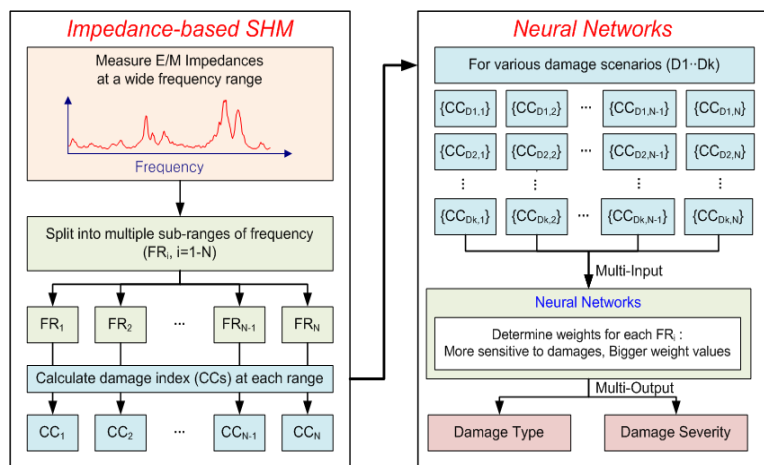


그림 1. 인공신경망을 이용한 주파수 영역 자동결정 및 손상 진단

대역마다 이상상태에 반응하는 정도가 민감하게 달라지기 때문에, 손상이 발생하기 전 측정 주파수 대역의 결정에 주의를 기울여야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 인공 신경망 기반의 주파수 영역 결정 및 손상 진단 알고리즘을 제안하였으며, 과정을 그림 1에 나타내었다. 우선, 넓은 대역의 주파수 영역에서 임피던스 신호를 획득하고, 획득된 신호를 수 개의 부분 영역으로 분할한다. 각 부분 주파수 영역에서 EFS 기법으로 온도보상된 손상 지수 CC값을 계산한다. 인공신경망은 수 개의 주파수 영역에 해당하는 CC값을 입력층으로, 손상 종류 및 정도를 출력층으로 구성되며, 미리 선정된 임의의 손상 시나리오에서 획득된 CC값을 바탕으로 훈련된다. 이러한 훈련 과정을 통해 손상에 민감한 주파수 영역이 자동으로 결정되며, 이후 미지의 손상을 진단할 수 있다.

4. 실험적 검증

제안된 기법을 검증하기 위하여 인천에 소재한 강교량에서 WISN 기반의 손상 탐색 실험을 수행하였다. 우선, 제일 외곽에 위치한 거더의 볼트 조임부 부근에 WISN을 설치하고, 볼트 조임부로부터 200 mm 떨어진 곳에 센서노드와 연결된 PZT 센서 (50x50x0.5 mm³)와 온도센서를 예폭시로 부착되었다. 실험은 표 2의 손상 시나리오에 따라 수행되었다. 무손상 상태 및 각 손상 경우에서 40-80 kHz 구간에서의 임피던스 신호를 50개씩 획득한 후(그림 3), 주파수 영역을 5 kHz씩 분할하면서(총 8개 구간) EFS-CC 값을 계산하였다. 그림 4에서 보듯이 측정 주파수 영역에 따라 서로 다른 손상 탐색 결과를 보여준다.



그림 2. 강교량에서의 손상 탐색 실험

표 2. 손상 시나리오

경우	손상	경우	손상
1	No damages	5	Additionally loosen bolt #1 (2 Turns)
2	Loosen bolt #1 (2 Turns)	6	Additionally loosen bolt #2 (2 Turns)
3	Hand-retighten bolt #1	7	Additionally apply notch #2
4	Apply notch #1	-	-

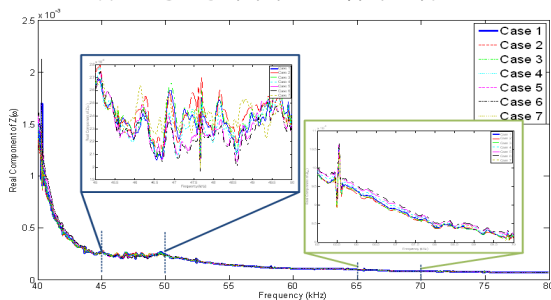


그림 3. 획득된 임피던스 신호

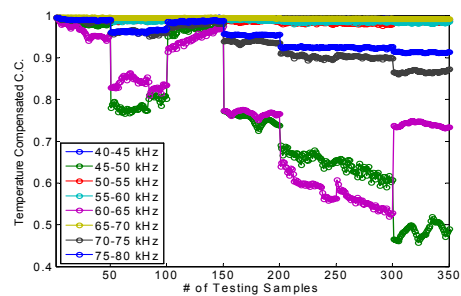
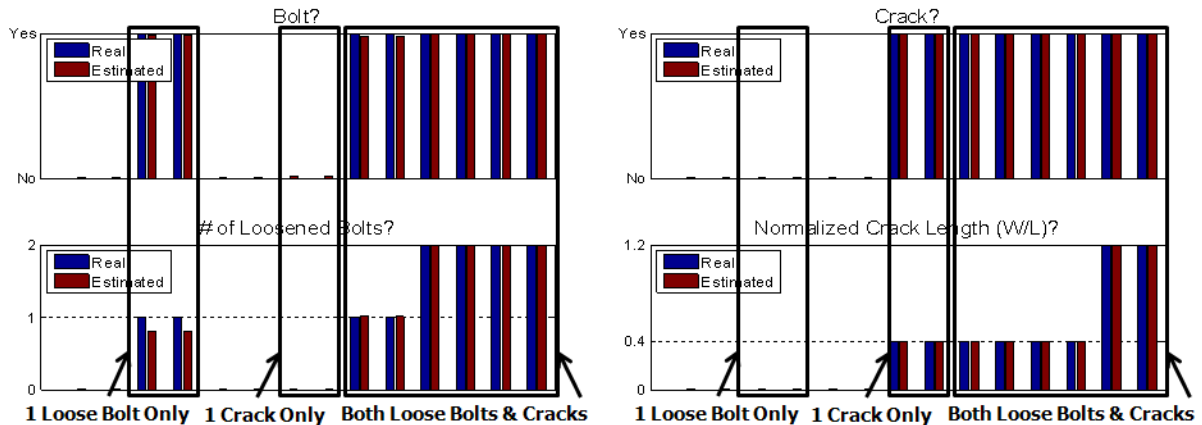


그림 4. 각 주파수 영역에서의 손상지수 CC값

따라서, 8개의 노드를 가지는 입력층과 16개와 7개의 노드를 가지는 2개의 은닉층, 4개의 노드를 가지는 출력층으로 인공신경망을 구성하여, 손상 종류 및 정도를 정량적으로 판단하는 훈련을 수행하였다. 여기서 출력층은, 손상이 없을 경우 [0,0,0,0], N개의 볼트 풀림일 경우 [1,0,N,0], 거리 L만큼 떨어진 곳의 폭 W의 균열 손상일 경우 [0,1,0,W/L], 볼트 풀림 및 균열의 멀티 손상의 경우 [1,1,N,W/L]의 값을 출력한다. 훈련된 인공신경망을 검증하기 위하여, 훈련에 사용되지 않은 14개의 CC값을 사용하였다. 그림 5에서 보듯이 볼트풀림 및 균열의 손상 분류 및 손상 정도를 명확하게 진단하였으며, 이로써 제안된 기법이 실제 구조물의 건전성을 효과적으로 모니터링 할 수 있음을 입증하였다.



5. 결론

본 연구에서는 압전센서 기반의 무선 임피던스 센서노드(WISN)와 계측을 위한 주파수 영역을 자동으로 결정하고 구조물의 이상상태를 진단할 수 있는 인공 신경망 알고리즘을 통합하여 실제 강교량에 발생한 손상을 모니터링 하는 시스템을 제안하였다. 볼트 풀림 혹은 균열 손상이 발생할 경우 WISN로부터 전송된 손상지수 값은 인공 신경망에 입력되고, 기존에 구축되어 있는 데이터베이스로부터 손상의 종류 및 정도에 관한 진단이 내려진다. 제안된 시스템의 검증은 인천 소재 강교량에서 수행되었으며, 그 결과 구조물 주요 부재의 무선 모니터링 및 손상진단을 효과적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)와 건설교통부 2006건설기술혁신사업(06건설핵심B05)의 연구비지원에 의해 이루어졌으며 저자들은 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Koo, K.Y., Park, S., Lee, J-J., and Yun, C-B. (2009) Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20, pp. 367-377.
- Min, J., Park, S., Yun, C-B., and Song, B. (2010) Development of a Low-cost Multifunctional Wireless Impedance Sensor Node, *Smart Structures and Systems*, accepted.
- Overly, T.G., Park, G., Farrar, C.R., and Allemang, R.J. (2007) Compact Hardware Development for Structural Health Monitoring and Sensor Diagnostics Using Admittance Measurements, *Proceedings of IMAC-XXV, A Conference & Exposition on Structural Dynamics*, Orlando.
- Park, G., Sohn, H., Farrar C.R., Inman, D.J. (2003) Overview of Piezoelectric Impedance-based Health Monitoring and Path Forward, *The Shock and Vibration Digest*, 35(6), pp. 451-463.
- Taylor, S.G., Farinholt, K.M., Park, G, and Farrar, C.R. (2009) Wireless Impedance Device for Electromechanical Impedance Sensing and Low-Frequency Vibration Data Acquisition, *Proceedings of SPIE Annual Int'l Symposium*, San Diego.