

# 프리스트레스트 콘크리트 거더교의 하이브리드 손상 검색

## Hybrid Damage Detection in Prestressed Concrete Girder Bridges

홍 동 수\* · 이 정 미\*\* · 나 원 배\*\*\* · 김 정 태\*\*\*\*  
Hong, Dong-Soo · Lee, Jung-Mi · Na, Won-Bae · Kim, Jeong-Tae

---

### ABSTRACT

To develop a promising hybrid structural health monitoring (SHM) system, a combined use of structural vibration and electro-mechanical (EM) impedance is proposed. The hybrid SHM system is designed to use vibration characteristics as global index and EM impedance as local index. The proposed health monitoring scheme is implemented into prestressed concrete (PSC) girder bridges for which a series of damage scenarios are designed to simulate various prestress-loss situations at which the target bridges can experience during their service life. The measured experimental results, modal parameters and electro-magnetic impedance signatures, are carefully analyzed to recognize the occurrence of damage and furthermore to indicate its location.

**Keywords:** hybrid monitoring, damage detection, prestressed concrete, electro-mechanical impedance

---

### 1. 서 론

교량은 국가 산업 수송의 근간을 이루고 있는 교통망에서 핵심적인 기능을 수행하는 시설물로서, 단경간의 소형 라멘교량에서부터 시해대교, 광안대교와 같은 장대 케이블 교량에 이르기까지 그 종류와 구조적인 기능이 다양하게 나타나고 있다. 최근에는 관광자원의 개발과 물류체계의 개선을 목적으로 장대교량을 신설하는 대형 SOC사업이 활발히 진행되고 있으며, 급격한 산업화 추세에 부응하기 위해 지난 40년 동안 건설된 많은 교량의 노후화와 90년대 발생한 행주대교와 성수대교, 창선대교의 붕괴사고로 인해 교량의 건설뿐만 아니라 유지관리의 필요성과 교량의 건전성 평가에 대한 인식이 크게 개선되고 있다(윤정방 등, 2004).

이에 교량의 성능을 저하시키는 손상의 원인을 분석하고, 유지관리 및 건전성 평가를 위한 구조 건전성 모니터링(Structural Health Monitoring; SHM) 기법에 대한 관심이 고조되고 있으며, 크게 두가지로 구분할 수 있다. 먼저, 가속도센서를 이용한 진동기반 진역적 모니터링 기법은 진동 특성치의 변화를 감지하여 구조 특성치의 변화를 식별하는 개념에 기초한다. 이런 모니터링 기법은 고유진동수와 모드형상 등의 진동 특성치에 큰 변화를 발생시키는 손상의 검색에 용이하다(Kim

---

\* 학생회원 · 부경대학교 해양공학과 박사과정 Email: king2532@pknu.ac.kr  
\*\* 학생회원 · 부경대학교 해양공학과 석사과정 Email: neron2580@pknu.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 Email: wna@pknu.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수 Email: idis@pknu.ac.kr

등, 2003). 하지만 손상의 위치가 모드 특성 민감도의 변화가 작은 곳인 경우와 손상 크기가 초기 균열과 같이 모드특성 민감도의 변화를 작게 야기시키는 경우에는 손상검색이 어렵다. 다음으로, PZT센서를 이용한 임피던스기반 국부적 모니터링 기법은 국부적인 손상이나 초기의 미소 손상에 도 민감하게 반응하는 고주파수 대역의 진동특성을 이용함으로써 구조물의 상태를 판별한다. 하지만 이런 모니터링 기법은 센서 인접부의 국부 상태의 변화를 감지하는 기법이며, 파괴위험 부위의 손상여부 규명에는 용이하지만 모니터링 영역이 협소하다는 제약이 따른다(Bhalla S. 등, 2003). 이에 각각의 모니터링 기법의 장점들을 이용한 새로운 모니터링 체계의 필요성이 대두되어지고 있다.

프리스트레스트 콘크리트(Prestressed concrete: PSC) 형식의 교량의 경우, 시공사태가 비교적 많으며, 안전진단 시 실시한 외관 조사 결과에 의하면, 교량의 안전에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 손상이 다수 발견된 것으로 나타나 있다. 특히, PSC I형 거더교의 경우에는 PSC형식 교량의 대부분을 차지하며, 바닥판에 작용하는 활하중이 주형과 받침장치를 통해 하부구조로 전달되는 하중이동 경로를 갖고 있어 하중이 집중되는 받침장치와 주형단부에서 구조적 손상이 자주 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한, 오래전부터 PSC I형 교량을 사용해오고 있는 미국과 유럽의 안전진단 보고서에 의하면, 쉬스관 내부로 물이 침투하여 텐던을 부식시키고 심한 경우 파단에 이르는 경우가 자주 보고되고 있다(윤정방 등, 2004).

이에 본 논문에서는 PSC 거더교의 여러 손상 유형 중 긴장력 감소에 대한 모니터링 체계로써 진동기반(Vibration-based)의 진역적 모니터링과 임피던스기반(Impedance-based)의 국부적 모니터링을 병행한 하이브리드 모니터링 체계를 구축하고 이를 PSC 모형 거더교 실험을 통해 검증하였다. 먼저, PS 텐던의 긴장력 감소 상황을 손상시나리오로 선택하여 각 손상 시나리오에 대한 가속도 응답과 임피던스 응답신호를 계측하였다. 다음으로, 계측된 가속도 신호를 주파수 영역에서 분석하여 동적 특성을 추출하고 주파수 응답 함수의 변화와 고유치 변화율을 이용하여 긴장력 감소에 대한 손상정보를 수행하였다. 마지막으로, 계측된 임피던스 신호를 주파수 영역에서 분석하여 특징정보를 추출하고 그 변화를 분석하여 손상정보의 원인이 긴장력 감소에 의한 것임을 확인하였다.

## 2. EM(Electro-Mechanical) Impedance 기법

국부 건전성 모니터링 방법 중 하나인 EM Impedance 기법은 PZT 패치의 압전효과와 역압전효과를 이용하여 구조손상이나 구조물의 다른 물리적 변화를 알아내는 구조건전성 모니터링 기법이다. 이런 PZT 패치의 거동 관한 압전 기본식은 다음과 같다.

$$S_1 = \frac{T_1}{Y_{11}^E} + d_{31}E_3 \quad (1)$$

$$D_3 = d_{31}T_1 + \overline{\epsilon_{33}^T}E_3 \quad (2)$$

여기서  $T_1$ 은 1방향의 축 방향 응력이고  $S_1$ 은 1방향의 변형률,  $D_3$ 은 3방향의 전기적 처짐  $\overline{Y_{11}^E}$ 은 PZT의 일정 전기장하 1-1방향의 복소 탄성계수,  $d_{31}$ 은 PZT의 piezoelectric strain coefficient,  $\overline{\epsilon_{33}^T}$ 는 PZT의 일정 응력 하의 3-3방향 복소 유전율이다.

다음으로 PZT patch를 부착한 구조를 단자유도계로 등가화 하는 경우, 구조물의 역학적 임피던스( $Z = F_0/\dot{x}_0$ )는 다음과 같다.

$$Z = c + \left( \frac{m\omega^2 - k}{\omega} \right) i = |Z| e^{i\theta} \quad (3)$$

여기서  $F_0$ 는 가진력,  $\dot{x}_0$ 는 속도이며,  $m, c, k$ 는 각각 구조물의 질량 감쇠 강성을 의미하고 실수부는 에너지가 소산하는 물리량을 표현하고 허수부는 반작용 물리량이다.

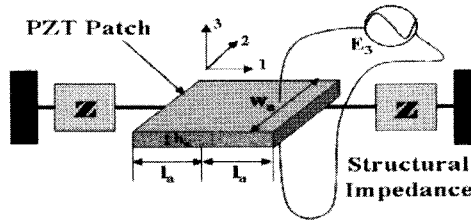


그림 1 구조물-PZT 패치의 상호작용 모델(Bhalla and Soh, 2003)

또 폭  $w_a$ , 높이  $h_a$  그리고 길이가  $2l_a$ 인 직육면체 형태의 PZT 패치에 대한 임피던스( $Z_a$ )는 다음과 같이 구할 수 있다(Bhalla and Soh, 2003).

$$Z_a = \frac{k w_a h_a \overline{Y_{11}^E}}{(i\omega) \tan(kl_a)} \quad (4)$$

여기서,  $k = \omega \sqrt{\rho/Y_{11}^E}$ 는 파수(wave number)이며 이 때  $\omega$ 는 가진 주파수이다.  $\overline{Y_{11}^E}$ 는 일정한 전기장 하에서의 1-1방향으로의 PZT 탄성계수이다. 그리고 구조물-센서 시스템의 EM Impedance는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{Y} = 2\omega i \frac{w_a l_a}{h_a} \left[ \left( \frac{\overline{c_{33}^T}}{c_{33}^T} - d_{31}^2 \overline{Y_{11}^E} \right) + \left( \frac{Z_a}{Z + Z_a} \right) d_{31}^2 \overline{Y_{11}^E} \left( \frac{\tan kl_a}{kl_a} \right) \right] \quad (5)$$

구조물의 질량, 감쇠 및 강성과 연관하여 임피던스 신호가 생성되며 동특성을 이용하여 특성을 분석할 수 있다. 따라서 손상에 따른 구조계의 변화로부터 손상 전후의 임피던스가 변화하고 이는 어드미턴스의 크기와 공진 주파수에 변화를 준다. 이로부터 구조구멍이 가능하고 손상검색이 된다. 그리고 구조물-PZT 패치 시스템의 Active admittance는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{Y}_A = G_A + B_A i = \omega i \frac{w_a l_a}{h_a} \frac{Z_a}{Z + Z_a} d_{31}^2 \overline{Y_{11}^E} \left( \frac{\tan kl}{kl} \right) \quad (6)$$

### 3. 하이브리드 모니터링 체계의 실험 검증

#### 3.1 실험 대상 모델 및 Setup

PS 텐던의 긴장력 감소에 대한 하이브리드 모니터링 기법을 평가하기 위하여 실험에 사용된 PSC 거더의 치수와 형상 및 실험 Setup이 그림 2와 같다. 압전형 가속도계(PCB 393B04)는 총 7개를 등간격으로 부착하였고, PZT 패치의 일종인 MFC 센서는 우측 정착판의 텐던 고정을 위한

뼈기 옆에 부착하였다. 가진은 Impact Hammer로 충격하중을 주어 실험을 수행하였다.

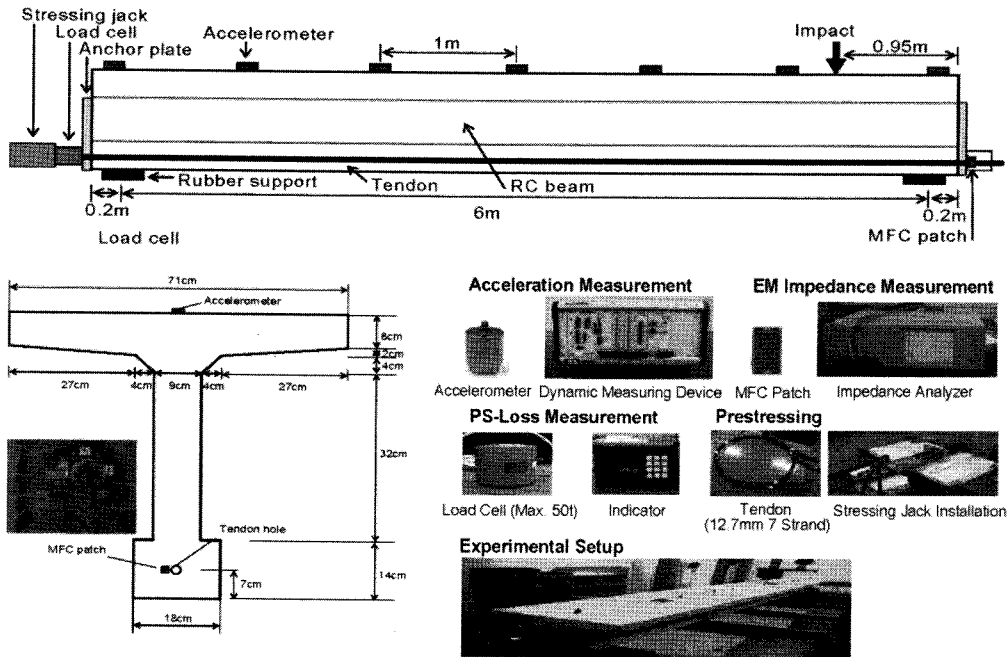


그림 2 PSC 거더의 형상 및 실험 Setup

### 3.2 손상 시나리오 별 실험

손상시나리오는 초기 117.6kN 상태에서 19.6kN씩 긴장력을 감소시켜, 텐던 정착을 위한 최소 긴장력인 39.2kN이 될 때까지 감소시켰다. 초기 긴장력인 117.6kN 상태에서 압진형 가속도계를 이용하여 획득된 가속도 신호가 그림 3과 같고, 주파수영역분해법(Frequency Domain Decomposition; FDD)을 이용하여 추출한 모드형상이 그림 4와 같다. 표 1은 손상시나리오별로 추출된 고유진동수를 보여주며, FDD를 이용하여 추출된 고유진동수는 각 손상시나리오별 8회 실험을 통해 취득된 값을 평균한 것이다. 임피던스 분석기는 HIOKI 3532를 사용하였으며 신호의 주파수 간격은 1kHz이고, 전압의 크기는 1V로 하여 신호를 추출하였다.

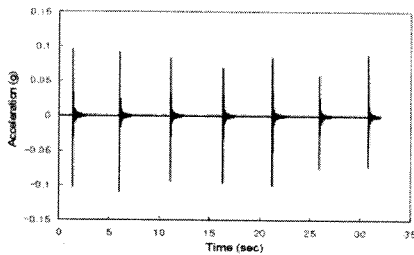


그림 3 PSC 거더의 가속도 응답 신호

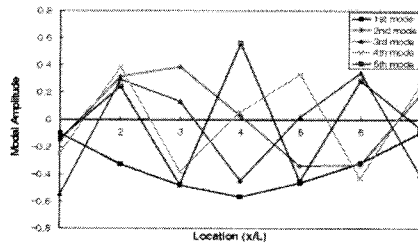


그림 4 PSC 거더의 모드형상

표 1 PSC 거더의 손상시나리오 별 추출된 고유진동수

PS-Loss	In-situ prestress force(kN)	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
PS 1	117.6	23.72	102.54	228.87	294.32	358.98
PS 2	98.0	23.60	101.70	227.16	291.92	358.08
PS 3	78.4	23.29	101.65	225.93	288.54	354.97
PS 4	58.8	23.23	101.39	224.20	287.59	353.93
PS 5	39.2	23.08	98.73	221.76	284.09	359.00

### 3.3 실험 결과

PSC 거더의 긴장력 감소에 대한 손상 정보로써, 주파수 응답함수와 고유치 변화율을 이용하였다. 주파수 응답함수는 시간영역의 가속도 신호를 주파수 영역으로 변환한 뒤, 그 변화를 관찰하여 손상발생을 경보하는 모니터링 기법이다. 또한, 고유치 변화율은 고유치 변화율이 모드 강성변화율과 일치한다는 이론에 근거하여, 고유치 변화율의 변화를 감지하여 구조계 강성의 변화를 예측하여 손상발생을 경보한다. 그림 5와 그림 6은 각각 주파수 응답함수와 고유치 변화율의 적용한 결과를 도식한 것으로, 긴장력 감소에 따른 손상 정보를 수행하는데 좋은 결과를 보여주고 있다.

가속도 센서로부터 취득된 가속도 신호를 이용한 PSC 거더의 손상 정보의 원인이 긴장력 감소에 의한 것임을 확인하기 위한 방법으로 EM Impedance 기법을 적용하였다. 그림 7은 MFC 센서로부터 취득된 임피던스 신호의 변화를 보여주는 것으로 긴장력 감소에 따른 임피던스의 뚜렷한 변화를 살펴볼 수 있으며, 그림 8은 긴장력 감소에 따른 공진주파수의 변화를 보여준다.

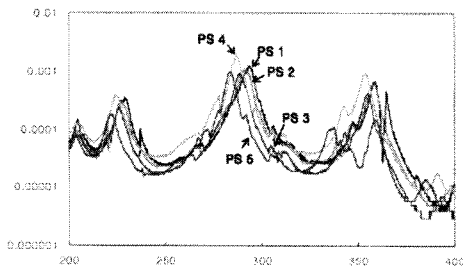


그림 5 긴장력 감소에 따른 FRF의 변화

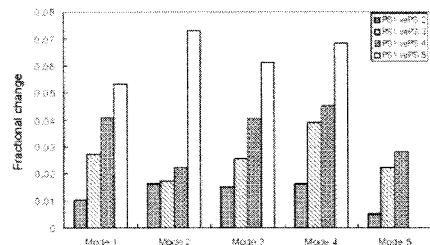


그림 6 PS 1에 대한 모드 별 고유치 변화율

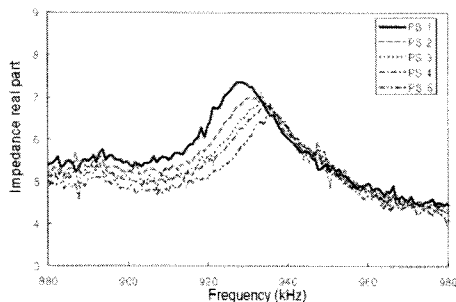


그림 7 긴장력 감소에 따른 임피던스의 변화

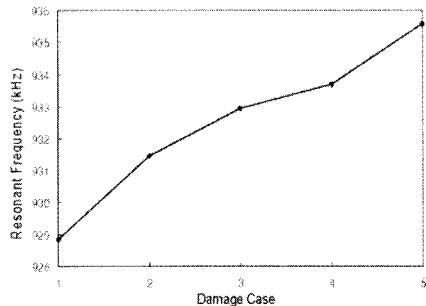


그림 8 긴장력 감소에 따른 공진주파수의 변화

## 6. 요약 및 결론

본 논문에서는 PSC 거더 모형을 대상으로 손상 시나리오에 따른 전역-국부적 혼합 건전성 모니터링을 수행하였다. 먼저, 실험 대상인 PSC 거더 모형의 실험으로부터 긴장력 감소에 따른 가속도 응답과 임피던스 응답신호를 계측하였다. 다음으로, 계측된 가속도 신호를 주파수 영역에서 분석하여 동적 특성을 추출하고 주파수 응답함수와 고유치 변화율을 이용하여 PSC 거더교에 발생한 손상을 경보하였다. 마지막으로, 계측된 임피던스 신호를 주파수 영역에서 분석하여 EM Impedance 특징정보를 추출하고 그 변화를 분석하여 손상의 원인이 긴장력 감소에 의한 것인지를 검토하였다. 그 결과 손상 경보의 원인이 긴장력 감소에 의한 것임을 확인하였다. 따라서 진동기반의 전역적인 모니터링 기법과 EM Impedance기반의 국부적인 모니터링 기법을 결합한 하이브리드 모니터링 시스템(hybrid monitoring system)의 구축으로 보다 효과적이고 신뢰할 수 있는 구조 건전성 모니터링을 할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2007년 한국과학재단 지정 스마트 사회기반연구센터 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 김정태 (1999) 소수의 고유진동수를 사용하는 비과괴 균열발견모델의 유도 및 검증, 한국전산구조공학회 논문집, 12(2), pp.140-159.
- 윤정방, 김정태, 박효경, 전귀현 (2004), 교량의 건전성 평가를 위한 IT기반 스마트 계측 및 모니터링 시스템의 개발, R&D/03-A0205, 한국전산구조공학회, 과학문화사.
- Adams, R.D., Cawley, P., Stone, C.J., Stone, B.J., (1978), A vibration Technique for Nod-Destructively Assessing the Integrity of Structures, *Journal Mechanism Physical Solids*, 20, pp.93-100.
- Bhalla S., Soh, C.K., (2003), Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 32, pp.1897-1916.
- Kim, J.T., Stubbs, N., (2002), Improved Damage Identification Method Based on Modal Information, *Journal of Sound and Vibration*, 252(2), pp.223-238.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., Stubbs, N. (2003), Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method, *Engineering Structure*, 25, pp.57-67.
- Park, G., Cudney, H.H., Inman, D.J. (2001), "Feasibility of using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, pp.1463-1474.
- Park, G., Kabeya, K., Cudney, H.H., Inman, D.J. (1999), Impedance-Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications, *JSME International Journal, Series A*, 42, pp.249-258.
- Park, G., Cudney, H.H., Inman, D.J. (2001), Feasibility of using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, pp.1463~1474.