

폐교량 실험을 통한 무기저 손상 진단 기법의 검증

Validations of Reference-Free Crack Detection Technique through a Decommissioned Bridge Test

안 윤 규*·임 형 진**·김 민 구***·손 훈****
An, Yun-Kyu · Lim, Hyung Jin · Kim, Min Koo · Sohn, Hoon

요 약

무기저 손상 진단 기법은 능동센서를 이용하여 과거의 기저자료와 현재 상태에서 취득한 유도파의 정보를 비교하지 않고, 구조물의 현재 상태에서 취득한 신호만을 분석함으로써 구조물의 상태를 진단하는 기법이다. 온도 변화 및 하중 변화 등의 외부 환경의 변화에 민감한 유도파의 특성으로 인하여 기저자료를 이용하는 과거의 방법론은 현실적용성이 떨어질 우려가 있다. 본 무기저 손상 진단 기법은 외부 환경적 영향을 최소화함으로써 구조물의 상태를 효율적으로 진단할 수 있다. 최초, 본 연구진에서 제안하였던 무기저 기법은 두 쌍의 능동센서를 구조물에 양면 대칭으로 배치시켜 능동센서의 극성을 이용한 방법이었다. 하지만 실제 구조물의 양면에 완벽한 대칭성을 유지하며 능동센서를 배치시키는 것은 사실상 불가능하다. 이와 같은 한계점을 극복하기 위해 신개념의 듀얼 능동센서를 활용한 무기저 손상 진단 기법이 제안되었고, 수치해석 및 연구실 환경에서 제한적으로 그 실용성이 검증되었다. 본 논문에서는 무기저 손상 진단 기법의 실 구조물에의 적용성을 폐교량을 대상으로 검토하였다. 특히, 보강재를 포함하는 영역에서 본 기법을 적용함으로써 실제 구조물에 적용 가능성을 검증하였다.

keywords : 구조물 건전도 모니터링, 무기저 손상진단, 유도파, 능동센서, 폐교량

1. 서 론

최근, 토목, 기계 및 항공 분야의 구조물 안전진단 분야에서 유도파 기반의 국지적 손상 진단은 상당한 관심 대상이 되어왔다 (Raghavan and Cesnik, 2007). 그 동안 연구 되어온 유도파 기반의 방법론은 구조물 초기 상태의 기저 신호와 현재 수집된 자료를 비교함으로써 손상과 관련한 특성을 추출하여 손상 유무를 판단하는 방법이 주를 이루었다. 이러한 방법론은 온도 및 사용 하중 변화 등과 같은 외부적 요인에 의하여 오보가 발생할 우려가 있다 (Sohn, 2007). 따라서 이와 같은 한계점을 극복하기 위하여 무기저 손상감지 기법이 본 연구진에 의해 세계 최초로 제안되었다 (Kim and Sohn, 2007). 본 기법은 구조물의 양면에 대칭으로 배치된 능동센서의 극성을 기반으로 과거의 기저 자료를 활용하지 않고 구조물의 현재 상태에서 취득된 데이터만을 이용하여 구조물의 손상진단이 가능한 기법이다. 나아가, 구조물의 한쪽 면에서 손상진단이 가능하도록 디자인된 신개념의 듀얼 능동센서를 이용하는 무기저 손상진단 기법이 제안되었다 (Kim and Sohn, 2008). 이 기법은 한쪽 면에만 접근이 가능한 파이프, 항공기 구조물 등에 적용이 가능하며, 나아가 실 구조

* 학생회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 ayk2028@kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 limnice87@kaist.ac.kr

*** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 joekim@kaist.ac.kr

**** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수 hoonsohn@kaist.ac.kr

물의 양면에 센서를 장착하기 어렵다는 점을 감안할 때, 교량 구조물과 같은 실 구조물에의 적용성 또한 뛰어나다. 본 논문에서는 새롭게 개발된 듀얼 능동센서 기반의 무기저 손상진단 기법에 대한 실구조물에의 적용성을 폐교량 실험을 통해 검증해 보았다.

2. 듀얼 능동센서와 모드변이

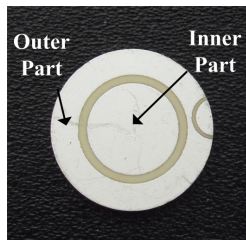


그림 1 듀얼 능동센서

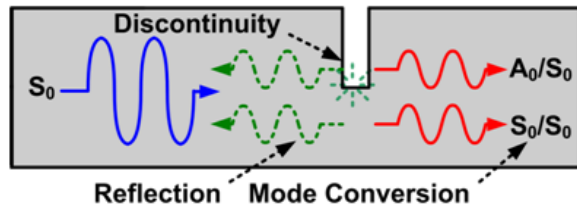
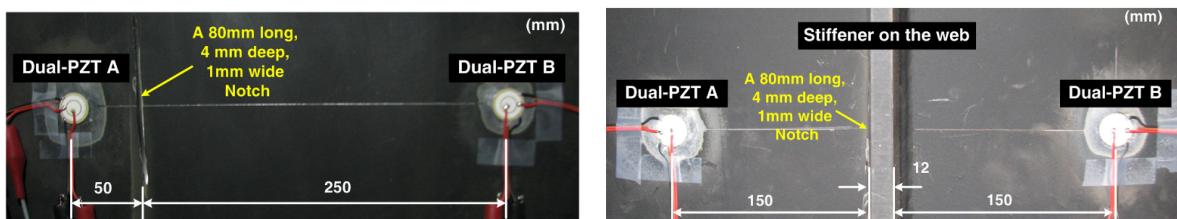


그림 2 모드변이

본 연구진에 의해 개발된 듀얼 능동센서는 그림 1과 같이 외부와 내부 영역으로 나누어 질 수 있다. 각 영역은 각각 혹은 동시에 유도파의 가진 및 측정이 가능한 특성을 지니고 있다. 이와 같은 특성은 한 쌍의 듀얼 능동센서를 활용하여 구조물의 손상으로 발생하는 모드 변이의 추출을 가능하게 한다. 모드변이는 그림 2에서 보는 바와 같이 구조물의 갑작스러운 단면변화에 기인하여 대칭 및 비대칭 모드 사이에서 발생하는 일종의 상호 변환 모드이다 (Cho, 2000). 이와 같은 모드변이는 듀얼 능동센서의 가진 및 측정 영역의 크기 차를 이용하여 추출가능하며, 추출된 모드변이의 에너지는 기저자료를 사용하지 않고 손상을 진단하는 손상 인덱스로 활용된다.

3. 무기저 손상 진단 기법을 적용한 폐교량 실험

듀얼 능동센서 기반의 무기저 손상 진단기법의 실구조물에의 적용성을 검증하기 위해 폐교량의 강거더의 웹에 그림 3과 같이 듀얼 능동센서를 부착하였다. 보강재가 포함되지 않는 평평한 영역 I (그림 3(a))과 보강재를 포함한 영역 II (그림 3(b))에서 본 기법을 검증하였다. 영역 I 에서는 듀얼 능동간의 거리를 300 mm로 부착하였고, 길이 80mm, 두께 1mm, 깊이 4mm의 균열을 발생시켰다. 이는 단면의 변화가 없는 가장 이상적인 경우로 본 기법의 실교량에서의 적용 가능성을 검토하고자 하는 실험이다. 영역 II 에는 강거더 웹부위에 비대칭으로 배치된 보강재를 중심으로 양측으로 150mm 씩 떨어진 부분에 듀얼 능동센서를 부착하였다. 구조적 취약부분 중 하나인 보강재의 용접부에 영역 I 에서와의 같은 크기의 손상을 만들어 보강재를 포함한 실구조물에서의 본 기법의 적용성을 검토하였다.



(a) 보강재가 없는 영역 (영역 I)

(b) 보강재를 포함한 영역 (영역 II)

그림 3 듀얼 능동센서의 배치 및 균열 발생 위치

그림 4는 듀얼 능동센서를 이용하여 취득한 신호들로부터 추출된 D_{13} 신호의 결과를 나타내고 있다. D_{13} 신호는 전진신호(A의 전체면적에서 가진 후 B의 내부면적에서 측정)와 후진신호(B의 전체면적에서 가진 후

A의 내부면적에서 측정의 차이를 의미한다. 구조물에 손상이 있는 경우, D_{13} 신호는 모드변이 성분을 포함하게 된다 (그림 4 (b), (d)). 반면에 구조물에 손상이 없는 경우에는 단지 에러 신호만을 포함하게 된다 (그림 4 (a), (c)). 결과적으로 영역 I 과 II에서 공통적으로 균열 발생이후 모드 변이 신호가 두드러지게 나타남을 확인해 볼 수 있다.

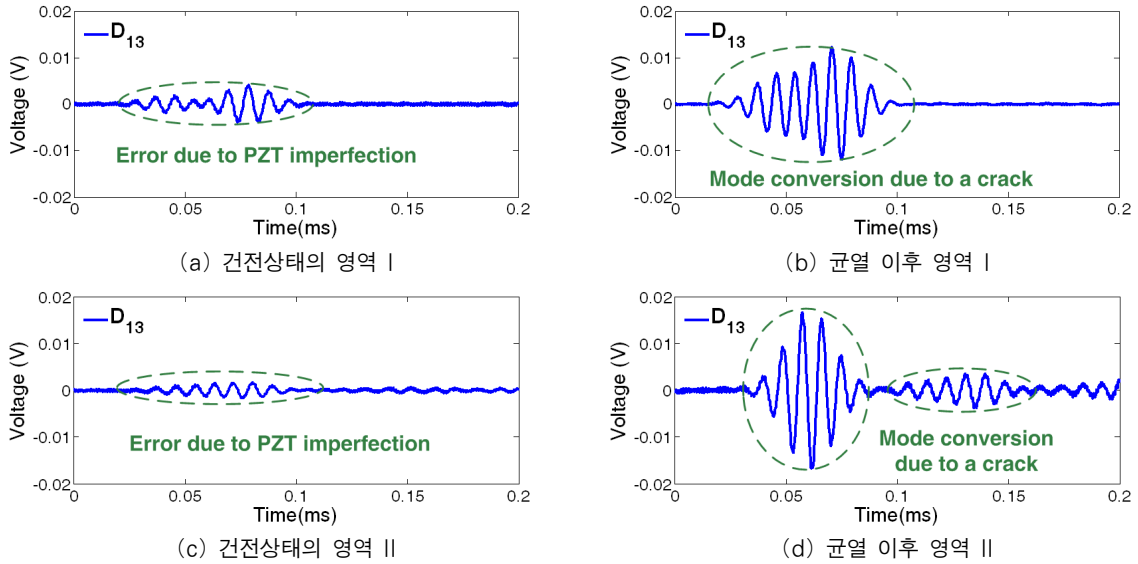


그림 4 시간영역에서의 추출된 D_{13} 신호

듀얼 능동센서로부터 얻어진 다양한 조합의 신호들을 기반으로 무기저 손상 감지 알고리즘을 적용하면 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 "Threshold"는 구조물의 현재 상태에서 얻어진 신호의 조합들로부터 얻어지는 능동적 에러 에너지의 기준값이다. 이는 주변 환경의 영향이나 능동센서의 접촉 조건 등에 따라 달라질 수 있다. "AMCE"는 모드 변이 에너지의 평균치를 의미한다. 정리하면, 균열로 기인한 모드변이의 에너지가 에러에너지의 기준값을 초과하면 무기저 손상감지 알고리즘을 통해 손상 알람이 발동하게 된다.

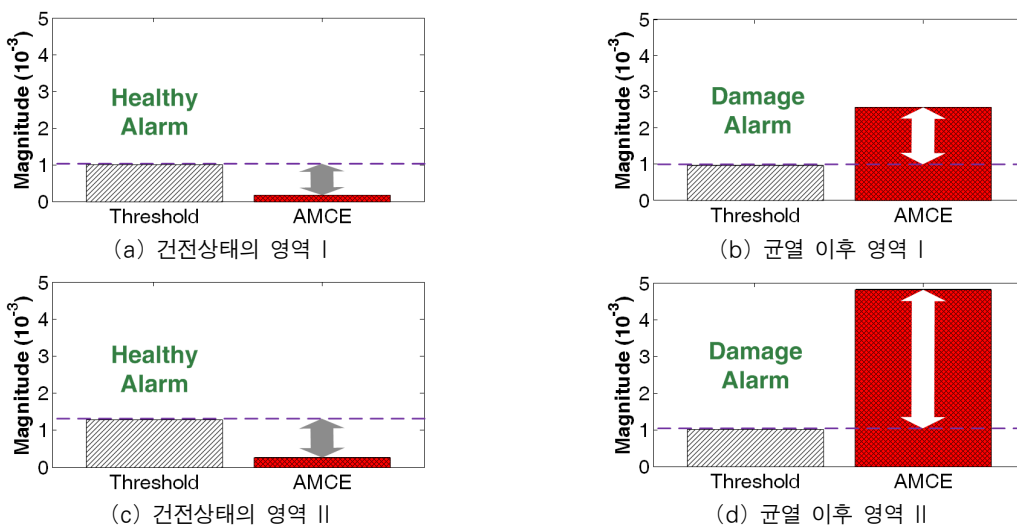


그림 5 무기저 손상 진단 알고리즘을 통한 손상 진단결과

4. 결론

본 논문에서는 듀얼 능동센서 기반의 무기저 손상 진단 기법을 폐교량을 대상으로 검증해 보았다. 과거에 취득한 기저자료를 사용하지 않고, 현재 상태에서 취득한 데이터만을 사용함으로써 온도 및 하중 변화 등의 외부 환경 변화의 효과를 최소화 할 수 있는 본 기법은 실제 구조물의 국지적 손상 감지에서도 탁월한 효율성이 입증되었다. 특히, 본 연구는 보강재를 포함한 극심한 단면 변화가 있는 영역에서도 손상 여부를 오보 없이 진단함으로써 본 기법을 복잡한 형태의 실구조물에 적용 할 수 있는 가능성을 보여주는 의미를 갖는다. 앞으로, 보다 복잡한 형태의 실제 교량, 항공기 및 파이프라인 구조물 등에 적용 가능성을 검토하고, 균열 손상 외에도 부식 및 박리현상 등의 다양한 형태의 손상 감지에도 적용 가능성을 검증해볼 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 출연한 U-Eco 시티 기술개발사업과 방위사업청에서 출연하고 국방과학연구소(ADD)에서 위탁 시행한 구조건전성 모니터링 요소기술 연구사업, 한국연구재단 지정 KAIST 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC) 사업의 지원으로 이루어진 것으로, 각 기관의 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- A. Raghavan, C.E.S. Cesnik. (2007) Review of guided wave structural health monitoring, *Shock Vibration Digest*, 39(2), pp. 91-114.
- H. Sohn. (2007) Effects of Environmental and Operational Variability on Structural Health Monitoring, *Philosophical transactions of the Royal Society A*, 365(1851), pp. 539-560.
- S. B. Kim, H. Sohn. (2007) Instantaneous reference-free crack detection based on polarization characteristics of piezoelectric materials, *Smart Materials and Structures*, 16(6), pp. 2375-2387.
- S. B. Kim, H. Sohn. (2008) Instantaneous Crack Detection using Dual-PZT Transducers. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optic Engineering*, 693509.
- Y. Cho. (2000) Estimation of Ultrasonic Guided Wave Mode Conversion in a Plate with Thickness Variation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 47(3), pp. 591-603.