

사장교의 케이블 손상 검출을 위한 변동성이 고려된 손상평가 기술 개발

고병찬¹, 허광희^{2*}, 박채린³, 서영득⁴, 김충길⁵

Development of Damage Evaluation Technology Considering Variability for Cable Damage Detection of Cable-Stayed Bridges

Byeong-Chan Ko¹, Gwang-Hee Heo^{2*}, Chae-Rin Park³, Young-Deuk Seo⁴, Chung-Gil Kim⁵

Abstract: In this paper, we developed a damage evaluation technique that can determine the damage location of a long-sized structure such as a cable-stayed bridge, and verified the performance of the developed technique through experiments. The damage assessment method aims to extract data that can evaluate the damage of the structure without the undamage data and can determine the damage location only by analyzing the response data of the structure. To complete this goal, we developed a damage assessment technique that considers variability based on the IMD theory, which is a statistical pattern recognition technique, to identify the damage location. To complete this goal, we developed a damage assessment technique that considers variability based on the IMD theory, which is a statistical pattern recognition technique, to identify the damage location. To evaluate the performance of the developed technique experimentally, cable damage experiments were conducted on model cable-stayed bridges. As a result, the damage assessment method considering variability automatically outputs the damageless data according to external force, and it is confirmed that the performance of extracting information that can determine the damage location of the cable through the analysis of the outputted damageless data and the measured damage data is shown.

Keywords: Damage Assessment Technology, Statistical Pattern Recognition Technology, Variability, SHM, Cable-Stayed Bridge

1. 서 론

교통의 흐름에 중요한 역할을 하는 사장교는 교량 하부 공간의 활용, 지형적 요인으로 인한 장경간의 필요성 등으로 17세기부터 근대의 사장교와 비슷한 형태의 교량이 건설되었으며, 각국의 건설 기술 발전을 대표하기 위하여 장, 대형화되고 있다. 하지만, 최근 발생한 사장교의 손상 및 붕괴에서 볼 수 있는 바와 같이, 사장교는 자연적인 요인과 사용량 등으로 인하여 노후화되며, 이러한 노후화로 인한 손상은 붕괴의 큰 원인이 된다(Li and Ou, 2016; Das R et al., 2016).

일반적으로 단순한 교량과는 달리, 사장교는 다양한 부재를 활용하고 있으며, 이러한 각 부재로부터 상호 영향을 받는 복잡한 구조형식으로 건설되고 있다. 현재 사용되고 있는 구조물의 상태평가 방법은 점검자가 직접 육안으로 점검하거나, 육안으

로 점검하기 어려운 곳은 로봇이나 장치를 이용하여 직접 확인하는 방법(안전 점검)이 주로 이용되고 있다. 이러한 방법은 복잡한 구조형식을 가지는 사장교의 케이블 장력 손실 및 국부적인 손상을 실시간으로 파악하는 데 한계가 있다.

일반적으로 사용되고 있는 안전 점검을 통한 구조물의 상태평가 방법의 문제점을 개선하기 위하여, 구조물의 응답 데이터 기반의 구조물 상태평가 방법인 SHM(Structure Health Monitoring)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Amezquita-Sanchez and Adeli, 2014; Meruane and Heylen, 2011; Lederman G. et al., 2014;). SHM의 최종 목표는 획득된 데이터를 활용하여 구조물의 상태를 판단하는 것으로서, 획득된 데이터의 분석이 구조물 상태판단의 신뢰성을 좌우한다. 최근, 기후의 변화 및 교량의 노후화로 인한 손상이 발생함에 따라 SHM 방법으로 파악된 구조물의 상태를 바탕으로 통계적 기법으로 데이터를 분석해 손상의 위치를 탐지하는 방법인 SDD(Structure Damage Detection)에 관한 연구가 많은 관심을 받고 있다 (Abdeljaber O et al., 2017; Teng Z et al., 2020;).

고전적인 SDD는 SHM의 초기 방법과 유사하게 엔지니어의 시각으로 구조물을 평가해 손상의 위치를 찾는 방식으로 진행되었다. 그러나 이런 방식은 엔지니어의 주관적인 생각에 따라 판단하기 때문에 결과의 신뢰도가 낮았으며, 작업 시

¹학생회원, 건양대학원 재난안전공학과 석사과정

²정회원, 건양대학교 해외건설플랜트학과 교수

³학생회원, 건양대학원 재난안전공학과 석사과정

⁴정회원, 지진방재연구센터 선임연구원

⁵정회원, 건양대학교 공공안전연구소 연구교수

*Corresponding author: heo@konyang.ac.kr

Civil Engineering, Konyang University, Nonsan, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2021년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

간이 오래 걸리고 어렵다는 단점이 있었다(Farahani and Penumadu, 2016).

이와 같은 단점을 개선하기 위해 고유진동수와 모드 형상을 활용해 손상의 위치를 판별하는 방법을 도입했다. 고유진동수와 모드 형상을 활용하는 손상 위치 탐지 방법은 초기에 단순히 고유진동수를 활용해 손상된 위치를 찾으려고 하였으나, 결과적으로 고유진동수만으로 손상 위치를 탐지하는 것은 한계가 있었다. 그리고 모드 형상을 기반으로 한 방법은 실험 결과가 환경에 너무 영향을 받아서 정확한 손상의 위치를 찾을 수 없다는 단점이 확인되었다(Döhler M et al., 2014).

이런 단점을 극복하기 위하여 외력으로 인하여 구조물에서 출력되는 진동 응답을 활용한 손상 위치 검출 방법이 다양하게 제안되었다(Li Z et al., 2017). 그러나 계측된 구조물의 진동 응답은 구조물의 사용 하중, 구조물에 작용하는 외력 등으로 인하여 상시 변화가 생기며, 이러한 데이터의 변화로부터 구조물의 손상 유무를 판별하는 것을 기대하기는 어렵다. 그래서 정확한 손상 위치를 탐지하기 위해서는 진동 신호에서 손상에 따른 신호의 변화를 확인하기 위한 추가적인 통계적 방법이 필요하다(Fugate M L et al., 2001). 정확한 손상 위치를 탐지하기 위한 통계적 기법은 데이터 분석 방법에 따라서 감독학습과 무감독학습 2가지로 나뉘어 구분된다. 감독학습은 신뢰도 높은 결과를 도출하는 방법이지만, 구조물의 손상을 찾아내기 위하여 구조물에 발생할 수 있는 다양한 손상에 따른 응답에 대한 학습이 필요하다. 무감독학습은 구조물의 다양한 손상 응답을 학습하지 않은 상태에서 구조물의 손상을 식별하는 방법으로 수많은 데이터에 대한 학습 과정이 필요하지 않지만, 결과의 신뢰도가 낮다는 한계가 있다(Worden K et al., 2000). 이러한 장단점을 가지고 있는 통계적 기법 기반의 손상평가 방법은 필수적으로 구조물의 손상 응답을 판별하기 위한 무손상 상태의 구조물 응답을 확보하고 있어야 한다. 외력으로 인한 구조물의 응답을 확보하기 위한 SHM과 SDD는 최근 활발히 진행되고 있으나, 이러한 기술이 적용되기 전의 구조물은 건전한 상태에서 계측된 구조물의 응답이 확보되어 있지 않아, 구조물의 손상 판별에 많은 어려움이 있다.

본 논문에서는 기존의 통계적 기법을 이용한 손상평가 방법에서 문제점으로 지적된 무손상 데이터 확보 문제를 해결하고, 사장교와 같은 다양한 부재가 상호 간의 영향을 미치는 구조물의 손상 위치를 판단하기 위한 손상평가 기법을 개발하였다. 손상평가 기법은 구조물의 운동방정식에 기반한 Simulation 부와 개선된 마할라노비스 거리(Mahalanobis Distance : MD) 이론에 기반한 계측 위치별 변동성이 고려된 손상평가부로 분류하여 개발하였다. 개발한 손상평가 기법의 손상 위치 판별 성능을 검증하기 위하여, 모형 교량을 대상으로 케이블 손상 실험을 수행하였다. 실험 결과, 개발한 손상평

가 기법은 계측 위치의 변동성을 인식하고, 케이블의 손상 위치를 판별할 수 있는 정보를 제공하는 것이 확인되었다.

2. 변동성이 고려된 통계적 패턴인식 (Statical Pattern Recognition : SPR) 기반의 손상평가 기술

2.1 변동성이 고려된 손상평가(Damage Assessment considering Variability : DAV) 기술

사장교는 지리적 특성을 극복하기 위하여, 케이블을 이용하여 장경간을 지탱하는 구조물으로써, 케이블의 손상은 사장교의 안전에 중요한 영향을 준다(Wang L et al., 2014; Li and Ou, 2016). 사장교 케이블의 손상은 구조적 문제가 발생할 정도로 다수의 케이블이 파단 되거나, 케이블 각각에 케이블의 장력을 계측할 수 있는 센서를 배치해야 파악할 수 있다. Heo 등은 케이블의 손상을 정량적으로 판단하기 위하여 케이블의 손상으로 인한 특정 케이블의 장력 데이터를 활용한 통계적 패턴인식 방법을 개발하였으나, 케이블의 손상 위치를 판단하는 통계적 근거를 제시하지는 못하였다(Heo and Kim, 2014).

본 연구에서는 사장교와 같이 다양한 부재가 상호 연관되어 외력에 저항하는 구조물에 발생하는 국부적 손상의 위치를 구조물 전체의 응답을 기반으로 판별하기 위하여 변동성이 고려된 손상평가 기술을 개발하였다. 여기서, 변동성이란 사장교의 응답을 계측하기 위하여 설치된 센서로부터 획득되는 국부적인 응답 데이터들의 상호 간의 변화를 의미합니다. 즉, 본 연구에서 개발한 변동성이 고려된 손상평가(DAV) 기술은 미지의 케이블이 손상되었을 경우 발생하는 N개의 센서로부터 획득되는 국부적인 응답 데이터들을 하나의 모집단으로 구성하고, 하나의 모집단의 변동성을 계산하여 모수를 추출한다. 추출된 손상 상태 모집단의 모수와 무손상 상태의 모수를 비교하여 손상 위치를 판단하는 방법이다. 연구에서 개발한 DAV 기술은 다음 Fig. 1과 같은 순서로 교량의 손상 위치를 판별한다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 먼저 외력으로 인한 구조물의 응답을 계측한다. 응답 계측과 동시에 구조물에 작용하는 외력은 DAV 기술에 포함된 Simulation 프로그램에 입력되어 구조물이 손상되지 않은 상태의 데이터를 추출한다. 여기서, Simulation 프로그램은 구조물의 기본정보를 기반으로 외력에 따른 응답 데이터를 추출하는 프로그램으로 SHM이 활성화되기 이전에 무손상 데이터가 확보되지 않은 구조물에 적용할 수 있도록 DAV 기술에 임베디드 하였다. Simulation 프로그램의 기본 식은 다음 식 (1)과 같은 기본적인 운동방정식

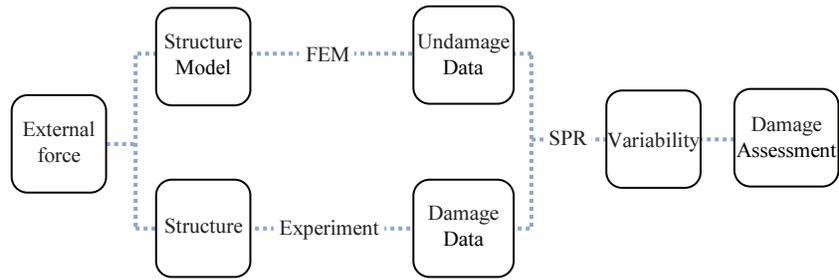


Fig. 1 Flow Chart of DAV Technic

을 이용하였다.

$$m\ddot{u} + k\dot{u} + cu = F \quad (1)$$

여기서 m, c, k 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성이다. 그리고 \ddot{u}, \dot{u}, u 는 각각 구조물로부터 획득되는 가속도, 속도, 변위 응답이다. Simulation 프로그램에서 추출한 구조물의 무손상 데이터는 계측한 손상 데이터와 비교한다. 두 데이터의 비교는 Heo 등이 사장교 케이블의 손상평가를 위하여 개발한 통계적 패턴인식 기술인 개선된 마할라노비스 거리이론 (Improved Mahalanobis Distance : IMD)을 사용하였다. 다음의 식 (2)는 DAV 기술에서 사용한 IMD 이론이다.

$$IMD = \sqrt{(\Delta x - m)^T R^{-1} (\Delta x - m)} \quad (2)$$

$$\Delta x = x_{undamaged} - x_{damaged}$$

여기서, Δx 는 무손상 상태 구조물의 응답 데이터와 손상 상태 구조물의 응답 사이의 거리이고, R 은 Δx 의 공분산 행렬이며 m 은 Δx 의 평균이다. 다음의 Fig. 2는 데이터의 처리 과정을 그림으로 표현한 것이다. Fig. 2에 표현한 바와 같이, 각 센서에서 계측된 외력의 작용으로 인한 구조물의 가속도 응답 데이터는 독립적으로 무손상 데이터와 비교되어 IMD를 계산한다.

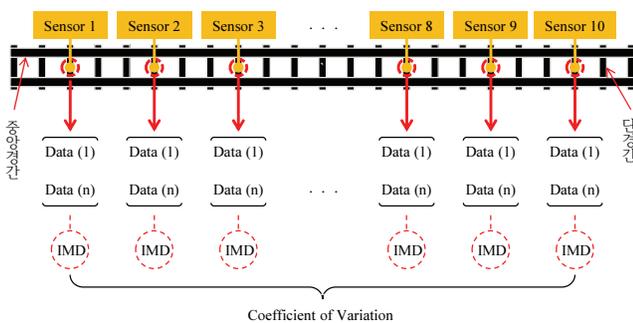


Fig. 2 Data Classification and Analysis Process

계산된 센서 별 IMD는 하나의 모수가 되고, 마지막으로 다음의 식 (3)을 이용하여 모수의 변동성을 계산한다. 식 (3)의 CVMD(Coefficient of Variation of IMD)는 IMD 결과값을 변동계수 공식에 대입해 도출한 결과값이고 a_{IMD} 는 IMD 계산 값의 평균이며, σ_{IMD} 는 IMD 계산 값의 표준편차이다.

$$CVMD = \frac{\sigma_{IMD}}{a_{IMD}} \quad (3)$$

2.2 DAV 기술 프로그램

본 연구에서 개발한 변동성이 고려된 손상평가(DAV) 기술은 구조물의 정보에 기반하여 외력에 의한 구조물의 무손상 상태의 응답을 추출하고, 추출된 무손상 상태의 응답 데이터와 구조물로부터 계측된 손상 상태의 응답 데이터를 상호 비교하여 손상 위치를 판별하는 기술이다.

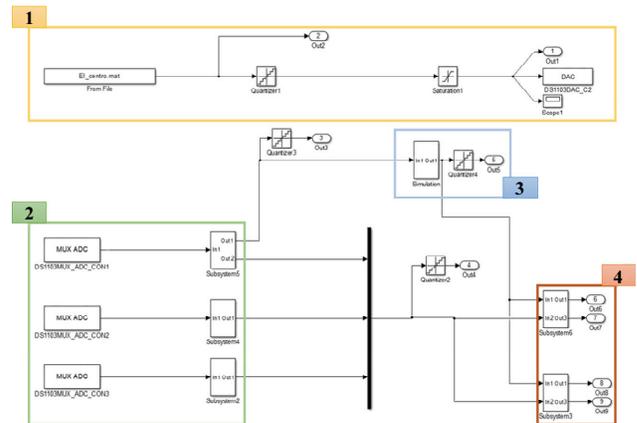


Fig. 3 DAV Technic Programming using Matlab & Simulink

개발한 DAV 기술은 다음의 Fig. 3과 같이 Matlab & Simulink를 활용하여 프로그램하였다. DAV 기술의 프로그램은 실험 대상 구조물에 외력을 인가하기 위한 출력부, 외력으로 인하여 발생하는 구조물의 응답을 계측하기 위한 계측부, 외력으로 인한 구조물의 무손상 상태의 응답을 출력하는

Simulation 부, 그리고 Simulation 부에서 출력된 무손상 상태의 응답과 구조물로부터 계측된 손상 상태의 응답을 상호 비교하는 손상 평가부로 분류하여 프로그램하였다.

Fig. 3에서 1번으로 표기한 곳은 구조물에 외력을 가하는 신호를 출력하는 출력부로서, 실험실 환경에서의 실험을 위하여 추가한 파트이다. 다음으로 2번으로 표기한 곳은 구조물에 인가된 실제 외력과 외력으로 인한 구조물의 현재 상태의 응답을 계측하는 계측부이다. 3번으로 표기한 곳은 Simulation 부로 2번에서 계측한 구조물에 인가된 실제 외력을 바탕으로 구조물이 손상받지 않은 상태에서의 무손상 응답을 출력한다. Simulation 부는 식 (1)의 운동방정식을 다음의 식 (4)의 상태공간방정식으로 유도하여 프로그램에 반영하였다.

$$\{\dot{z}\} = [A]\{x\} + [B]\{f\} \quad (4)$$

$$\{y\} = [C]\{x\} + [D]\{f\} \quad (5)$$

식 (4), (5)에서 $\{\dot{z}\}$ 는 시스템의 상대 벡터, $\{y\}$ 는 출력 벡터이고, A, B, C, D 는 상수 행렬로서 순서대로 시스템 행렬과 입력 행렬, 출력행렬, 직접 전달 행렬이고 $\{f\}$ 는 외력 벡터이다.

손상평가에서 중요한 무손상 데이터의 추출을 위한 Simulation 프로그램의 시스템 모델은 무손상 상태의 구조물에서 계측된 데이터와 구조해석 프로그램을 이용한 시간이력 해석 결과를 상호 비교하여 수치 모델의 무손상 상태의 출력이 실제 구조의 응답과 95% 이상 일치하도록 Modal Updating 과정을 수행하여 모델의 기본적인 파라미터를 추출하고, 이를 시스템 모델에 반영하였다. 모델의 기본적인 파라미터는 계측 위치와 동일한 위치의 집중된 구조물의 정보로서, Guyan Reduction 방법을 이용하여 계산하였다.

마지막으로 Fig. 3에서 4번으로 표기한 곳은 DAV 기술의 핵심이 되는 손상평가부로서, 2번에서 입력받은 손상 상태의 구조물 응답과 3번에서 입력받은 무손상 상태의 응답을 비교하는 역할을 한다. 즉, 실시간으로 입력받은 손상 상태의 응답과 무손상 상태의 응답을 식 (2)를 이용하여 계측 위치별로 IMD를 계산하여 모집단을 생성한다. 그리고 식 (3)을 이용하여 모집단의 변동성을 계산하여 손상 위치 판별을 위한 통계적 자료를 출력한다. IMD는 초당 512개의 값이 각 센서별로 생성된다. 데이터의 통계적 패턴을 확인하기 위하여, 실험 시간 동안 생성된 각 계측 위치별 IMD를 RMS하여 변동성 계산에 적용하였다. 출력된 자료는 케이블의 손상에 따른 계측 위치별 응답의 변동성이며, 이 변동성의 추세로부터 손상 위치를 판단한다.

3. 변동성이 고려된 SPR 기반 손상평가 기술의 손상평가 성능 검증을 위한 실험

3.1 검증을 위한 손상평가 실험

본 연구에서 케이블의 손상 검출을 위하여 개발한 변동성이 고려된 통계적 패턴인식 기반의 손상평가 기술은 사장교 케이블의 손상에 따른 응답의 변동성으로부터 케이블의 손상 위치를 판단할 수 있는 데이터를 추출하는 기술이다. 개발한 손상평가 기술의 손상평가 성능을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같은 서해대교를 1/200의 비율로 축소한 모형 사장교를 대상으로 테이블 손상 실험을 수행하였다.

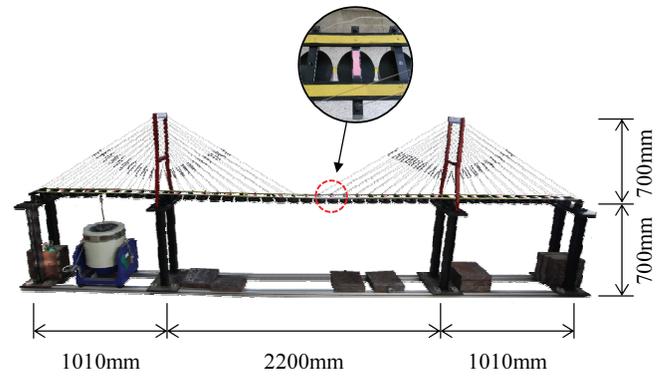


Fig. 4 Experimental Structure

Fig. 4의 모형 사장교는 총 길이 4m, 주탑의 높이 0.7m로 제작하였다. 총 80개의 케이블을 교량 상판(거더) 가로 보 40개에 2개씩 연결하였으며, 각 케이블에는 케이블의 장력 조절을 위하여 스프링을 설치하였다. 각 가로 보에는 1kg의 추가 하중을 설치하였다. Fig. 4와 같이 단경간 하부에 전자식 진동시험기를 설치하여, 사장교에 지진하중과 같은 외력을 인가할 수 있도록 하였다.

Table 1 Software / Device

Classification	Details	Name
Software	FEM	NX Nastran
	Control Desk	MATLAB & Simulink
Device	Measurement	dsPACE 1103
	External Force	Electronic Vibration Tester
	Sensor	3055B3(Dytran)

실험을 위한 장비 및 소프트웨어는 다음의 Table 1과 같다. 손상평가 실험에서 외력으로 인한 구조물의 응답을 실험적으

로 획득하기 위하여, dSPACE 1103 장비를 활용하였다. dSPACE 1103의 구동 및 손상평가 프로그램을 위하여 Matlab&Simulink 기반의 Control Desk를 활용하였으며, 구조물로부터 발생한 응답을 계측하기 위한 가속도 센서는 Dytran의 3055B3 모델을 활용하였다.

본 연구에서 개발한 손상평가 방법을 활용하여 구조물의 손상 위치를 판별하기 위해서는 구조물의 전체적인 응답을 대표할 수 있는 계측 위치의 선정이 중요하다. 이러한 이유에서 본 연구에서는 최적운동에너지법(Kinetic Energy Optimization Technique: EOT)을 활용해서 구조물의 응답을 대표하는 최적의 계측 위치를 선정하였다(Heo G et al., 1997).

다음의 Fig. 5는 EOT 방법을 이용하여 구조물의 응답을 대표하는 최적의 계측 위치를 순차적으로 나타낸 그림이다.

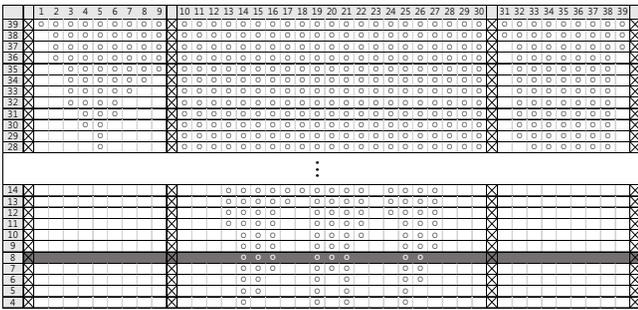


Fig. 5 Kinetic Energy Optimization Technique for Measurement Location Selection

Fig. 5에서 보는 바와 같이, 전체 가로보에서부터 시작하여 순차적으로 계측의 위치가 선정되었으며, 최종적으로 8개의 계측 위치를 선정하였다. 선정된 8개의 계측 위치가 중앙경간에 집중되어서 추가적으로 단경간에 각각 1개의 계측 위치를 추가하여, Fig. 6과 같이 계측 위치를 설정하였다.

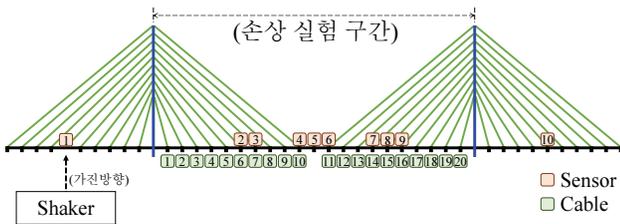


Fig. 6 Sensor Location and Experiment Case

Fig. 6은 구조물의 응답을 계측하기 위한 센서 위치와 손상 실험에서 케이블 손상을 진행할 케이블을 그림으로 표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 구조물의 응답을 계측하기 위하여 총 10개의 센서를 설치하였으며, 총 20개의 케이블을 대상으로 케이블에 손상을 주었다. 케이블 파단 위치별로 외

력이 인가된 상태의 케이블 손상에 따른 구조물의 상하 방향 가속도 응답 변화를 확인하기 위하여, 케이블의 손상은 가로보에 연결된 2개의 케이블을 파단 시켰으며, Fig. 6에 표현된 케이블 1번부터 20번까지 반복적으로 케이블을 파단하였다. 구조물을 가진 하기 위한 외력은 El-centro 지진하중을 Fig. 6의 센서 1번 아래에 설치된 전자식 진동시험기를 이용하여 구조물에 인가하였다. 실험은 각 케이블 손상 위치별로 3회씩 진행하였다.

3.2 개발한 손상평가 기술의 손상 검출 성능

본 연구에서 개발한 변동성이 고려된 통계적 패턴인식 기술 기반의 손상평가 기술의 성능을 실험적으로 검증하기 위하여 총 20구간의 케이블을 대상으로 손상 실험을 수행하였다. 실험은 각 조건별로 40초 동안 진행하였으며, 실험을 통하여 외력으로 인한 교량의 상하 방향 가속도 응답을 획득하였다. 가속도 응답은 초당 512개의 데이터를 획득하였다.

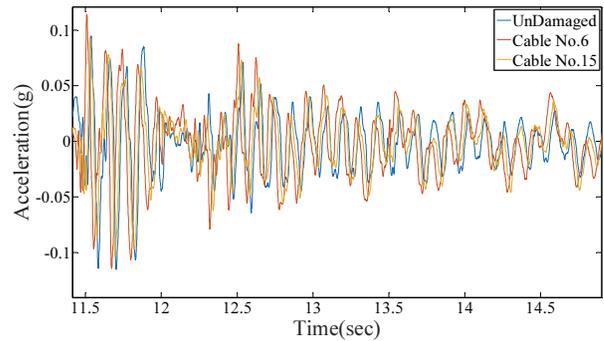
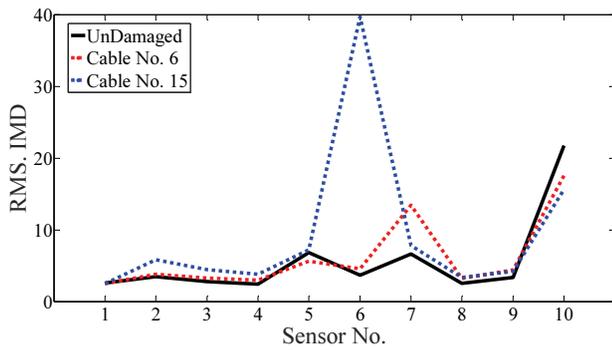


Fig. 7 Response data of structure (Time Domain, Acceleration)

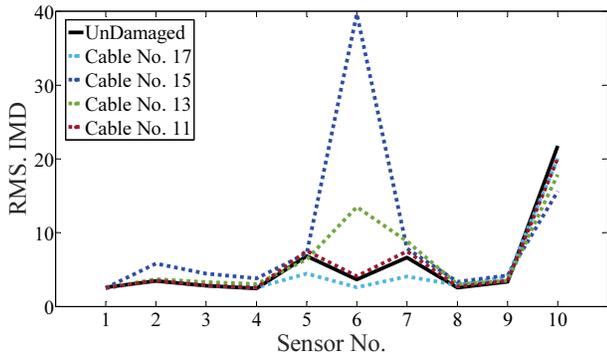
다음의 그림은 무손상 상태에서 계측한 가속도 응답과 Fig. 6에 표기한 6번과 15번 구간의 케이블이 손상되었을 때 외력으로 인한 구조물의 응답의 한 부분을 확대해서 하나의 그래프로 표현했다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 구조물로부터 획득된 응답만으로는 케이블의 손상에 따른 무손상 상태와의 차이를 구별하기 어렵다. 이러한 결과는 손상 실험을 진행한 다른 구간의 응답에서도 동일하게 확인되었다.

다음으로 (Heo and Kim, 2014)에서 제안한 개선된 마할라노비스거리(IMD) 이론 기반의 통계적 패턴인식 기술을 이용하여 손상평가를 수행하였다. IMD를 계산할 때, 평균과 공분산은 시간에 따른 누적값을 사용하였다. 다음의 Fig. 8은 손상 실험을 통하여 획득한 데이터의 각 센서별(계측 위치별) IMD를 RMS로 계산해 그래프로 표현한 것이다.

Fig. 8에서 x축은 Fig. 6에 표기한 계측 위치에 따른 센서 번호이고, y축은 각 센서 위치별 IMD의 RMS값이다. RMS는 데이터의 양이 많아 대표적인 값을 활용하기 위해 계산하였



(a) Damage of No.6 & No.15



(b) Damage of No.11, No.13, No.15, and No.15

Fig. 8 Damage Detection using IMD

다. Fig. 8 (a)는 무손상 상태의 구조물 응답, 그리고 케이블 6번 구간과 15번 구간이 각각 손상된 상태 구조물의 응답 데이터를 센서별로 IMD를 계산하여 그래프로 표현한 것이다. 센서 위치 1번의 경우, 외력을 가하는 전자식 진동시험기 위에 위치해 있기 때문에 조건별 IMD 값이 동일하게 출력되었다. 케이블의 손상 여부에 따른 IMD는 센서 위치 5번과 6번, 그리고 7번에서 큰 차이를 보였다. 그리고 8번, 9번, 10번은 외력이 가해지는 위치에서 멀어짐에 따라 케이블의 손상에 따른 IMD가 큰 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 결과는 Fig. 8(b)에서도 유사한 형태를 보였다. Fig. 8에 표현한 각 조건 및 센서 위치별 IMD는 Fig. 7에서 구분하지 못하는 손상 여부는 구분할 수 있었지만, 케이블의 손상 위치를 판단할 수 있는 통계적 패턴은 보이지 않았다. (Heo and Kim, 2014)에서 개발한 IMD 이론은 하나의 센서를 이용하여 손상의 정도를 파악하는 것에는 효과를 발휘하지만, 구조물 전체에서 획득하는 다량의 센서 정보를 분석하여 손상의 위치를 파악하는 것에는 한계가 있는 것으로 확인되었다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여, 본 연구에서 개발한 변동성이 고려된 통계적 패턴 인식 기술 기반의 손상평가 기술은 Fig. 8에서 확인된 케이블의 손상에 따른 외력에 의한 계측 위치별 응답의 변동으로부터 케이블의 손상 위치를 판별하는

데이터를 추출하는 방법이다. 먼저, 손상평가 실험에서 구조물의 응답을 획득하기 위하여 10개의 계측 위치를 선정하였으며, 케이블의 손상 위치에 따른 10개의 계측 위치에서 획득된 데이터를 하나의 모집단으로 구성하였다. 본 연구에서는 20개의 케이블을 대상으로 손상 실험을 수행하였으며, 총 20개의 모집단을 구성하였다. 케이블의 손상에 따른 개별 모집단은 Simulation 프로그램에서 추출된 1개의 무손상 모집단과 상호 비교하여 계측 위치별 모수를 추출한다. 이때, 모수는 IMD 이론을 사용하여 계산하였다. 마지막으로 각 모집단 별 변동성을 계산하였다. 다음의 Fig. 9는 본 연구에서 개발한 손상평가 이론을 반영하여 사장교 케이블 손상 위치에 따른 통계적 패턴을 그래프로 표현한 것이다.

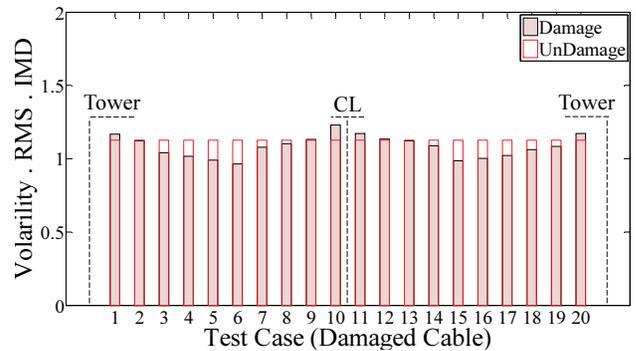


Fig. 9 Damage Detection using DAV Technic

Fig. 9에서 x축은 손상된 케이블의 구간 번호이고, y축은 케이블의 손상 조건에 따른 계측 위치별 IMD 값의 변동성이다. Fig. 8에서 확인할 수 있는 바와 같이, 진행한 손상평가 실험의 환경적 요인(가진 방법 및 위치)으로 계측 위치 1번부터 5번까지의 응답은 손상 조건에 따른 데이터의 변동성이 큰 차이가 없었다. 이러한 이유에서 Fig. 9의 IMD의 변동성은 계측 위치 1번부터 5번에서 획득한 데이터는 제외하고 6번부터 10번 계측 위치에서 획득한 데이터를 대상으로 변동성을 계산하였다. Fig. 9에서 손상된 케이블의 1구간과 20구간은 주탑에 가장 근접한 케이블이고, 10구간과 11구간은 사장교의 중앙에 가장 근접한 케이블이다. Fig. 9에서 확인할 수 있는 바와 같이, 본 연구에서 개발한 손상평가 기술을 이용한 손상평가 진행 결과, 손상 케이블이 주탑 근처와 사장교 중앙에 가까울수록 계측 위치별 변동성은 무손상 상태의 변동성을 초과하였으며, 그 반대의 경우 무손상 상태의 변동성보다 작아지는 패턴을 보이는 것이 확인되었다. 이러한 패턴은 사장교의 중앙 지점을 중심으로 대칭으로 확인되었다. 무손상 상태와 비교하여 변동성의 변화가 가장 크게 나타난 케이블의 손상은 6번 구간과 15번 구간, 그리고 10번 구간으로 확인되었다. 해당 구간은 1차 모드와 2차 모드에서 최대 변위를 보이는 구간으로

해당 구간의 케이블 손상은 교량 전체 응답의 변동성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이, 개발한 손상평가 기술은 기존에 응답 데이터 자체적인 분석 및 IMD 기술에서 확인할 수 없는 사장교의 케이블 손상위치를 판별할 수 있는 통계적 근거를 추출하였다.

4. 결론

본 연구에서는 케이블로 상판을 지탱하는 사장교와 같은 다양한 구성요소가 결합된 복잡한 구조물의 손상 위치를 판단할 수 있는 통계적 근거를 추출하는 손상평가 기술을 개발하고자 하였다. 이러한 연구 목표를 달성하기 위하여 구조물 전체에서 계측되는 외력으로 인한 구조물 응답의 변동성이 고려된 통계적 패턴인식 기술 기반의 손상평가 기술을 개발하였다. 개발한 손상평가 기술은 사장교 손상 실험을 진행하여 손상평가 성능을 검증하였다. 그에 따른 결론은 다음과 같다.

- 1) 개발한 손상평가 기술은 손상이 발생하지 않은 상태의 구조물 응답 데이터를 운동방정식 기반의 Simulation 프로그램을 통하여 획득할 수 있도록 개발하였다. Simulation 프로그램은 구조물의 기본정보를 이용하여 시스템(구조물)을 구성하고, 구성된 시스템에 손상 실험 진행 시에 작용하는 외력(input)이 실시간으로 입력되어 구조물의 무손상 상태의 가속도 응답을 출력하도록 프로그램하였다. 그 결과, 추출된 다양한 외력으로 인한 구조물의 무손상 상태 응답을 손상 상태의 응답과 비교하여 무손상 상태의 데이터가 확보되지 않은 구조물의 손상평가에 적용이 가능함을 확인하였다.
- 2) 기존의 개선된 마할라노비스 거리 이론을 이용한 손상평가 기술의 한계(손상 위치 판별 불가)를 극복하기 위하여 구조물의 계측 위치별 응답의 변동성을 활용한 손상평가 기술을 개발하였다. 그 결과, 기존에 SHM을 통하여 획득되는 구조물의 응답을 사용하여 복잡한 과정을 수행하지 않고, 통계적 패턴인식 이론과 변동성만으로 손상 위치 판별을 위한 통계적 패턴을 추출할 수 있음을 확인하였다.
- 3) 사장교를 대상으로 진행한 손상 실험을 통하여, 개발된 손상평가 기술의 손상평가 성능을 검증하였다. 총 20개의 손상 케이스에 대하여 손상평가를 수행하였으며, 케이블 손상 위치에 따라 변동성의 패턴이 사장교의 중앙 지점을 중심으로 좌우의 패턴이 대칭되는 일정한 패턴을 보였다. 즉, 개발한 손상평가 기술은 기존에 응답 데이터 자체적인 분석 및 IMD 기술에서 확인할 수 없는 사

장교의 케이블 손상 위치를 판별할 수 있는 통계적 근거를 출력하는 것이 확인되었다.

이상의 결과를 통하여 본 논문에서 개발한 변동성이 고려된 통계적 패턴인식 기술 기반의 손상평가 기술은 무손상 상태의 데이터가 확보되지 않더라도, 다양한 하중에 따른 구조물의 손상 위치를 판별할 수 있는 통계적 패턴을 추출함으로써 사장교와 같은 복잡한 구조물의 손상평가에 활용될 수 있음을 입증하였다. 개발한 기술의 입증에 위하여 하나의 교량을 대상으로 손상평가 성능을 검증하였기에 추가로 다양한 구조물에 대한 검증을 수행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2018년, 2019년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구사업임(NRF-2018R1A6A1A03025542, NRF-2019R1I1A1A01049701). 본 연구가 이루어지도록 지원하여 준 한국연구재단에 대단히 감사합니다.

References

1. Li, H., & Ou, J. (2016). The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1), 43-67.
2. Amezcua-Sanchez, J. P., & Adeli, H. (2014). Signal Processing Techniques for Vibration-Based Health Monitoring of Smart Structures. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(1), 1-15.
3. Meruane, V., & Heylen, W. (2011). An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(5), 1559-1573.
4. Lederman, G., Wang, Z., Bielak, J., Noh, H., Garrett, J. H., Chen, S., ... & Rizzo, P. (2014, July). Damage quantification and localization algorithms for indirect SHM of bridges. In Proc. Int. Conf. Bridge Maint., Safety Manag., Shanghai, China
5. Abdeljaber, O., Avci, O., Kiranyaz, S., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2017). Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks. *Journal of Sound and Vibration*, 388, 154-170.
6. Teng, Z., Teng, S., Zhang, J., Chen, G., & Cui, F. (2020). Structural Damage Detection Based on Real-Time Vibration Signal and Convolutional Neural Network. *Applied Sciences*, 10(14), 4720.
7. Farahani, R. V., & Penumadu, D. (2016). Damage identification of a full-scale five-girder bridge using time-series analysis of vibration data. *Engineering Structures*, 115, 129-139.
8. Döhler, M., Hille, F., Mevel, L., & Rücker, W. (2014). Structural health monitoring with statistical methods during progressive

- damage test of S101 Bridge. *Engineering Structures*, 69, 183-193.
9. Li, Z., Park, H. S., & Adeli, H. (2017). New method for modal identification of super high-rise building structures using discretized synchrosqueezed wavelet and Hilbert transforms. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(3), e1312.
 10. Fugate, M. L., Sohn, H., & Farrar, C. R. (2001). Vibration-based damage detection using statistical process control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(4), 707-721.
 11. Worden, K., Manson, G., & Fieller, N. R. (2000). Damage detection using outlier analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 229(3), 647-667.
 12. Wang, L., Wu, Y., & Wang, D. (2014). Thermal effect on damaged stay-cables. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 52(4), 1071-1082.
 13. Li, H., & Ou, J. (2016). The state of the art in structural health monitoring of cable-stayed bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1), 43-67.
 14. Heo, G., Kim. (2014). New Statistical Pattern Recognition Technology for Condition Assessment of Cable-stayed Bridges on Earthquake Load. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 34(3), 747-754.
 15. Heo, G., Wang, M. L., & Satpathi, D. (1997). Optimal transducer placement for health monitoring of long span bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16(7-8), 495-502.

Received : 10/15/2020
 Revised : 10/21/2020
 Accepted : 11/09/2020

요 지 : 본 논문에서는 사장교와 같은 장대형 구조물의 손상위치를 판단할 수 있는 손상평가 기법을 개발하고, 개발한 기법의 성능을 실험을 통하여 검증하고자 하였다. 손상평가 기법은 무손상 데이터가 확보되지 않은 상태에서 구조물의 손상평가가 가능하고, 구조물의 응답 데이터의 분석만으로 손상위치를 판단할 수 있는 데이터를 추출하는 것을 목표로 하였다. 이러한 목표를 완성하기 위하여, 손상 위치 판별을 위하여 통계적 패턴인식 기술인 개선된 마할라노비스 거리(IMD : Improved Mahalanobis Distance) 이론에 기반하여 변동성이 고려된 손상평가 기법을 개발하였다. 개발한 손상평가 기법에는 구조물의 고유한 정보에 기반한 Simulation 프로그램을 반영하여 다양한 외력에 따른 구조물의 무손상 응답을 출력하도록 하였다. 개발한 기법의 성능을 실험적으로 평가하기 위하여 모형 사장교를 대상으로 케이블 손상실험을 수행하였다. 그 결과, 변동성이 고려된 손상평가 기법은 외력에 따른 무손상 데이터를 자동으로 출력하고, 출력된 무손상 데이터와 계측된 손상 데이터의 분석을 통하여 케이블의 손상 위치를 판단할 수 있는 정보를 추출하는 성능을 보이는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 손상평가 기술, 통계적 패턴인식 기술, 변동성, SHM, 사장교
