

사장교 케이블의 실시간 손상평가를 위한 센서 배치의 최적화

방건혁¹, 허광희², 이재훈³, 이유재^{4*}

Optimization of Sensor Location for Real-Time Damage assessment of Cable in the cable-Stayed Bridge

Geon-Hyeok Bang¹, Gwang-Hee Heo², Jae-Hoon Lee³, Yu-Jae Lee^{4*}

Abstract: In this study, real-time damage evaluation of cable-stayed bridges was conducted for cable damage. ICP type acceleration sensors were used for real-time damage assessment of cable-stayed bridges, and Kinetic Energy Optimization Techniques (KEOT) were used to select the optimal conditions for the location and quantity of the sensors. When a structure vibrates by an external force, KEOT measures the value of the maximum deformation energy to determine the optimal measurement position and the quantity of sensors. The damage conditions in this study were limited to cable breakage, and cable damage was caused by dividing the cable-stayed bridge into four sections. Through FE structural analysis, a virtual model similar to the actual model was created in the real-time damage evaluation method of cable. After applying random oscillation waves to the generated virtual model and model structure, cable damage to the model structure was caused. The two data were compared by defining the response output from the virtual model as a corruption-free response and the response measured from the real model as a corruption-free data. The degree of damage was evaluated by applying the data of the damaged cable-stayed bridge to the Improved Mahalanobis Distance (IMD) theory from the data of the intact cable-stayed bridge. As a result of evaluating damage with IMD theory, it was identified as a useful damage evaluation technology that can properly find damage by section in real time and apply it to real-time monitoring.

Keywords: Real-time damage assessment, Kinetic energy optimization techniques, Mahalanobis distance theory, Cable-stayed bridges

1. 서 론

경제 성장으로 화물의 운송과 같이 교통은 인류에게 있어서 매우 중요한 역할을 하게 되었고, 건설 기술의 발전을 통해서 장/대형 교량의 수가 증가하고 있다. 통계청의 자료에 따르면 2022년 기준 총합 38,598개의 교량이 설치되어 있으며, 이 중에서 5,926개소 교량이 준공 후 30년 이상이다. 이러한 노후 교량은 노후화되지 않은 교량보다 자연 재해에 대하여 피해가 더 크기 때문에 유지관리에 더욱 신경써야한다. 그러나 건설 기술의 발전한 정도에 비해서 구조물 유지관리에 관한 기술은 아직 부족한 상황이다.

구조물의 상태와 안전을 점검하기 위해서는 일반적으로 시설 안전 담당자 또는 점검자가 구조물을 직접 확인하는 육안

검사가 있다. 최근에는 사람이 직접 조사하기 어려운 위치에서의 손상을 판단하기 위해서 드론을 이용한 조사가 진행되고 있다(Lee et al., 2022).

그러나 드론을 이용한 조사는 날씨와 바람의 세기에 영향을 많이 받는 단점이 있으며, 조사 당일의 교량 상태일 뿐이다. 구조물의 상태를 실시간으로 판단하기 위해서 구조물의 응답 데이터를 측정하여 측정된 데이터를 기반으로 구조물의 상태를 평가 방법인 구조건전성 모니터링(Structure Health Monitoring : SHM)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Lee, 2011; Jun, 2012; Bae, 2017).

구조물의 상태를 판단하는 방법인 구조건전성 모니터링의 방법에는 손상평가가 있으며, 통계/확률을 기반으로 구조물의 손상 유무를 판단하는 방법인 구조손상 추정(Structure Damage Detection : SDD)에 관한 연구가 진행되었다(Kim et al., 2016). 그러나 해당 연구는 모형 구조물을 이용하여 알고리즘을 개발하고 사전에 측정한 교량의 응답 데이터를 분석하는 연구였으며, 실시간으로 구조물의 상태를 판단할 수 있는 기술이 필요하다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 실시간으로 측정 데이터를 적극적으로 활용하는 모니터링 시스템에 관한 연구가 진행되

¹정회원, 건양대학교 재난안전공학과 박사과정

²정회원, 건양대학교 해외건설플랜트학과 교수

³정회원, 건양대학교 재난안전공학과 박사과정

⁴정회원, 건양대학교 재난안전공학과 박사과정, 교신저자

*Corresponding author: 27817@naver.com

Department of Disaster Safety Engineering, Konyang University, Nonsan, 32992, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

고 있다(Kim, 2017; Lim, 2018). 대형 교량에 설치되어 장시간 운용되는 실시간 모니터링 시스템은 일반적으로 무선센서를 활용하는데 센서의 고장이나 통신 상태의 불량으로 인하여 데이터 취득이 되지 않는 문제가 있다. 게다가 실시간으로 진행되는 모니터링 시스템은 계속되는 데이터의 과다로 인하여 데이터 분석에 지연이 되는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 데이터 처리에 관한 연구가 진행되고 있다(Lee et al., 2008).

또한, 실시간으로 교량 구조물의 성능평가를 위해서 계속되는 다량의 데이터를 효과적으로 처리하고 데이터의 손실을 방지하기 위하여 Heo는 특정한 지진파에 대하여 구조물의 응답 데이터를 압축하고 압축된 데이터를 송신하고 전송된 데이터를 복원하는 기술을 개발하였다(Heo et al., 2020). 그러나 Heo의 연구는 특정 지진 주파수(입력 데이터)를 기준으로 필요하다는 조건이 붙는 단점이 있다. 이와같이 다양한 방법의 구조물의 데이터 처리에 관한 연구가 제시되고 있지만 장대형 교량의 경우 설치되는 센서의 수가 많아 근본적인 해결책이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 적은 수의 센서만으로도 구조물의 데이터를 추출하는 기술이 연구되고 있다(Kim, 2005). 그러나 Kim의 연구는 단순한 형태(단순보, 켄틸레버보)의 변위 계측을 위한 연구가 진행되었다. Park은 Shannon의 이론을 이용하여 구조물의 손상탐지에 관한 연구를 진행했다(Park, 2003). 그러나 단순 빔형태의 구조물을 이용한 연구이며, 복잡한 형태의 구조물에 적용할 필요가 있다.

본 논문에서는 기존의 손상평가 방법에서 사용된 통계적 기법에 대한 문제점으로 지적된 소실된 데이터 복구와 처리 방법에 대한 문제를 해결하고자 복잡한 형태의 구조물에 설치되는 센서의 위치와 수량을 최적의 조건을 선정하여 손상평가 및 손상의 위치를 판단하는 방법을 제시하고자 하였다.

제시한 손상평가 방법은 사장교 구조물의 거동으로 인하여 발생하는 위치에너지를 감지하여 센서의 위치와 수량을 최적화

하고 최적화된 센서를 통하여 구조물의 손상을 평가하였으며, 이러한 손상평가를 실시간으로 진행하기 위하여 모델 업데이트를 통하여 Structural Integrity를 설정하고, 구조물의 운동방정식을 통하여 손상 탐지 시뮬레이션 시스템(Damage Detection Simulation System)을 만들었으며, 마할라노비스 거리(Mahalanobis Distance : MD)이론을 이용하여 손상평가를 진행하였다. 이와같이 개발된 손상평가 기법을 통하여 사장교 케이블의 실시간 손상평가 기법의 실용화 가능성을 검증하였다.

2. 검증용 모형 사장교

2.1 검증용 모형 사장교 해석

일반적으로 구조물의 손상평가는 손상이 구조물의 동적 응답 데이터를 구조물의 안정(무손상) 상태에서의 상태 정보를 파악하고 안정상태의 데이터를 기준으로 손상 상태에서 측정된 데이터와 비교하여 손상평가를 진행된다. 본 논문에서는 케이블 손상에 대한 손상평가를 진행하기 위한 대상 구조물로 모형 사장교를 제작하여 대상 구조물로 정하였으며 서해대교를 1/200의 비율로 축소하여 검증용 모형 사장교 구조물을 제작하였다.

제작된 검증용 모형 사장교는 낮은 주파수의 고유진동수를 갖는 장경간 사장교의 특성을 모사하기 위하여 거더 하부에 추가 질량이 설치되었다. 검증용 모형 사장교는 2개의 상판과 2개의 주탑 43개의 가로보 그리고 80개의 케이블로 구성되어 있으며 케이블 중앙에 스프링이 연결되어 케이블의 장력을 대신하였다. 검증용 모형 사장교의 총 길이는 4220mm이며 두 개의 주탑을 기준으로 좌측, 중앙, 우측 경간으로 구분되었다. 사장교의 길이는 4,220mm으로 우측 경간부터 1010mm, 2200mm, 1010mm이며, 주탑의 높이는 680mm으로 이루어져 있다. 모형 사장교에 설치된 가로보는 등간격으로 총 43개가

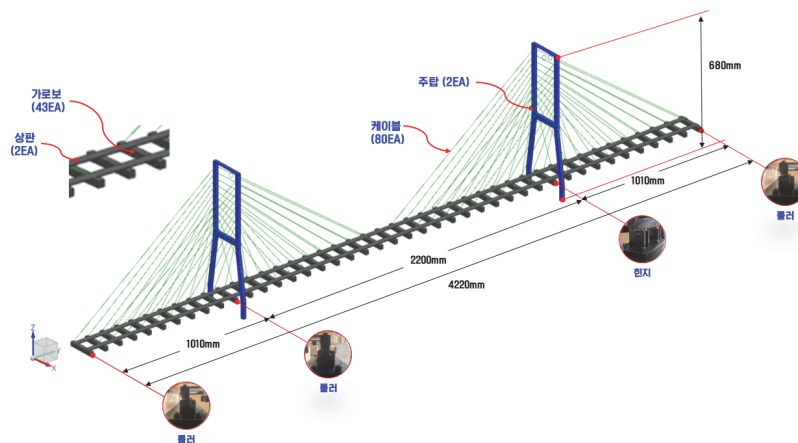


Fig. 1 3D FE Model of Cable-Stayed Bridge Model

설치되었다. 설치된 가로보 중에서 4개의 가로보(주탑위치, 양끝단)를 제외한 39개의 가로보에는 1kg의 추가 질량이 설치되었다. 추가 질량이 설치되지 않은 4개의 가로보는 우측에서부터 롤러, 힌지, 롤러, 롤러의 순서로 지점조건과 연결되었다. 이와같이 검증용 모형 사장교를 구성하고 있는 각 요소들의 제원에 대하여 Table 1과 같이 정리하였으며 각 구성요소의 주재료인 Steel의 탄성계수는 $20.6e+006 \text{ kPa}$ 이고 항복강도는 $23.5e+004 \text{ kPa}$, 포아송비는 0.288, 단위중량은 $7.829e-006 \text{ kg/mm}^3$ 으로 Table 2에 정리하였다.

2.1.1 검증용 모형 사장교의 FE 해석

본 논문에서는 구조물의 설계 당시 안정(무손상)상태의 구조물의 거동을 예측하기 위하여 유한요소해석(Finite Element Analysis : FE 해석)을 진행하였다.

FE 해석은 Siemens사의 NX nastran 10.0을 사용하였으며 사장교 모델을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 보이는 바와같이

Table 1 Specification of Cable-Stayed Bridge Model

Element	Size	Amount	Material
Slab	$4220 \times 30 \times 3 \text{ mm}$	2	Steel
Main Tower	height : 680mm	2	
Cross Beam	$20 \times 20 \times 170 \text{ mm}$	43	
Cable	d : 0.8mm	80	
Spring	Stiffness : 1.03 N/mm	80	
Add Mass	1kg	39	

Table 2 Material Properties of 3D FE Model

Modulus of Elasticity	$20.6e+006 \text{ kPa}$
Yeild Strength	$23.5e+004 \text{ kPa}$
Poison's Ratio	0.288
Unit Weight	$7.829e-006 \text{ kg/mm}^3$

이 검증용 모형 사장교는 상판, 가로보, 주탑으로 구성되어있으며, 3차원 요소인 육면체 형태의 솔리드로 모델링되었다. 또한, 꼭지점마다 한 개의 절점을 가지고 있는 CHEXA(8)요소를 이용하여 Mesh를 생성하였다.

검증용 모형 사장교의 상판은 3,384개의 절점을 갖고 1,266개의 요소로 구성되어있으며, 한 개의 가로보가 162개의 절점에 68개의 요소로 구성되었다. 또한, Mesh Mating 기능을 이용하여 구조해석 시 일체 거동을 하도록 요소들의 Mesh를 하나의 Mesh로 일치시켰다.

주탑은 CHEXA(8)요소를 이용하여 Mesh를 생성하였으며 496개의 절점을 갖는 158개의 요소로 구성하였다. 주탑과 가로보는 케이블로 연결되어 있으며 해석에 적용하기 위하여 가로보와 주탑에 Mesh Point 기능을 이용하여 새로운 절점을 생성하였다. 모형사장교 모델의 케이블은 PBUSH 1D요소를 이용하여 주탑과 가로보에 추가로 생성된 절점들을 이었다. PBUSH 1D요소는 1차원 요소로서 스프링의 역할을 수행하는 Rod타입의 요소이다. 실제 사장교의 낮은 주파수와 유연도를 유사하게 제작하게하기 위하여 설치된 추가 질량은 모델링을 하지 않고 CONM2요소를 이용하여 대체하였다. CONM2요소는 한 절점에 질량을 집중시키는 요소이다. 이와 같이 검증용 모형 사장교의 모델링에 사용된 요소들은 Table 3에 정리하였다.

이와 같은 조건으로 모델링된 검증용 모형 사장교는 NX Nastran의 SOL 103(Response Simulation)기능을 이용하여 유

Table 3 Element Types of 3D FE Model

Element	Element's Type
Slab	CHEXA(8)
Main Tower	CHEXA(8)
Cross Beam	CHEXA(8)
Cable	PBUSH 1D
Add Mass	CONM2

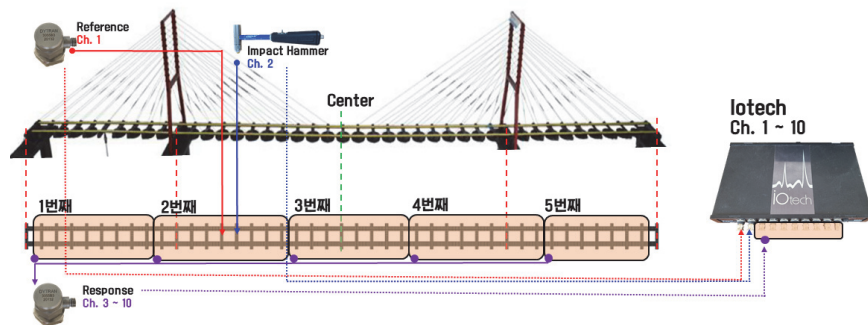
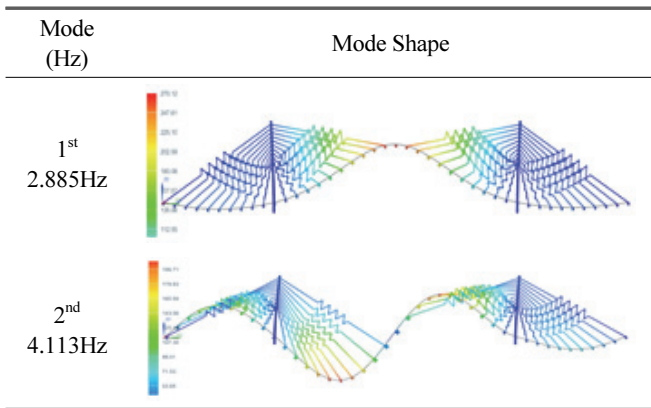


Fig. 2 Modal Test Composition Chart

Table 4 FE Analysis Result of 3D FE Model



한요소해석을 진행하였으며, 해석 결과인 모드별 고유 진동수와 모드 형상을 Table 4와 같이 나타내었다.

Table 4와 같이 SOL 103(Response Simulation)기능을 이용하여 유한요소해석을 진행한 모델사장교의 고유진동수는 1차 2.885Hz, 2차 4.113Hz의 결과값을 보여주었다.

2.1.2 검증용 모형 사장교의 Modal Test

FE 해석을 통하여 예측한 구조물의 거동특성을 검증하고자 제작한 검증용 모형 사장교를 대상으로 Modal Test를 진행하였다. Modal Test에 사용된 데이터 로거는 Famtech사의 Iotech-652u 장비가 사용되었으며, Dytran사의 Impulse해머(5850B모델)를 이용하여 Hammer Test를 진행하였다. Modal Test를 통한 목적 주파수 모드는 FE 해석과 마찬가지로 구조물의 1~2차 휨모드로 선정하였다. 검증용 모형 사장교의 동적 데이터 추출을 위하여 Dytran사의 가속도 센서(3055B3 모델)를 사용하였다. 이와 같은 장비를 이용한 Modal Test의 구성도는 Fig. 2와 같이 나타내었다.

Fig. 2에서 보이는바와같이 데이터 로거로 사용된 Iotech-652u 장비는 채널이 10개로서, 본 실험에서는 1개의 해머와 9개의 가속도 센서가 이용하였다. Impulse Hammer는 1번 채널에 연결되었으며, 2번부터 10번의 채널에는 가속도 센서들이 연결되었다. 이때, 3번부터 10번 까지의 채널들은 Response 채널로 구조물의 동적 응답신호를 받는 역할을 하였으며, 2번 채널은 Response 채널의 기준이 될 수 있는 Reference채널로 이용되었다.

구조물의 전체적인 거동확인을 위해서 43개의 가로보 중에 지점조건부분과 연결된 4개의 가로보를 제외한 39개의 가로보 중앙에 센서를 설치하고자 했다. 그러나 장비의 한계로 인하여 센서 8개씩 붙여가며 Modal Test를 5번 나누어 진행하였다. Modal Test의 결과값은 Table 5에 나타내었다.

Table 5와 같이 Impulse 해머를 이용한 Modal Test의 결과값은 1차 2.900Hz, 2차 4.290Hz의 결과 값을 보여주었다.

Table 5 Result of Modal Test

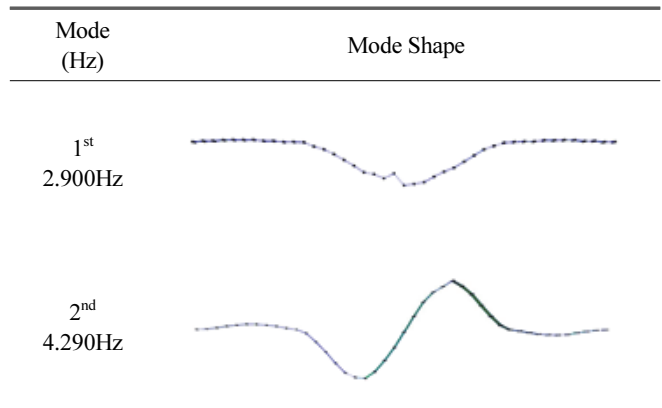


Table 6 Comparison of Results

	Result of FE Analysis	Result of Modal Test	Error Rate(%)
1 st Frequency	2.885Hz	2.900Hz	0.51
2 nd Frequency	4.113Hz	4.290Hz	4.12

2.1.3 FE 해석 및 Modal Test 결과값 비교

본 연구에서의 대상 구조물의 동적 특성을 파악하고자 진행한 FE해석과 Modal Test의 결과 값을 비교하였다. 비교한 데이터는 실제 제작된 모형 사장교에서 추출한 동적 응답 데이터인 Modal Test의 결과 값을 기준으로 오차율을 계산하였으며 Table 6에 나타내었다.

Table 6에서 나타낸 바와 같이 모형 사장교의 Modal Test와 FE해석값의 결과값은 1차모드에서 2.900Hz와 2.885Hz로 0.51%의 오차율을 보였으며, 2차모드에서의 오차율은 각각 4.12%로써 가장 큰 오차율이 4%정도로 모형 사장교의 FE Model신뢰성이 높은 FE 모델링로 판단하였다.

3. 센서 배치의 최적화

실시간 손상평가에 있어서 구조물에 설치되는 센서의 수량과 위치를 선정하는 것은 매우 중요한 과정 중에 하나이다. 본 논문에서는 실시간 손상평가를 진행하기 위하여 데이터의 처리 속도를 증가시키고자 센서의 수량과 위치에 대한 최적의 조건을 선정하였다. 센서의 수량과 위치를 최적의 조건으로 선정하기 위해서 최적 운동에너지 기술(Kinetic Energy Optimization Techniques : KEOT)를 이용하였다. KEOT는 대상 구조물이 가진(외력)으로 인하여 진동이 발생했을 때의 변형에너지가 최대 값을 갖는 모달 정보와 최저 값을 갖는 모달 정보들을 확인하여 목적하는 센서의 수량만큼 위치를 선정하는 방법이다.

3.1 최적 운동에너지 기술(Kinetic Energy Optimization Techniques : KEOT)

본 절에서는 검증용 모형 사장교의 실시간 손상평가를 위하여 최적운동에너지 기술인 KEOT를 이용하여 실시간 손상평가에 필요한 센서의 최적 위치와 그 수량을 파악하고자 KEOT를 이용하였다. Kammer는 EECM을 이용하여 유효독립법(Effective Independence Method : EIM)에 공간독립 개념을 적용하여 새로운 기법을 개발하고 트러스 구조물에 적용하였다. 본 연구에서 손상평가를 진행하기 위하여 사용한 모형 사장교의 경우는 낮고 좁은 간격의 고유 진동수를 보유하고 있으며, 구조물의 운동에너지를 최대화하여 동적 특성을 찾는 것으로 구조물의 운동에너지의 원리를 이용한 최적 운동에너지(Kinetic Energy Optimization Techniques : EOT)방법이 새롭게 유도되었다. EOT기법을 이용한 구조물의 운동에너지의 분포를 다음 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$KE = \{\Phi\}^T [M] \{\Phi\} \quad (1)$$

위 식 (1)에서의 $\{\Phi\}$ 는 구조물에서 측정된 모드형상 벡터를 의미하며, $[M]$ 은 질량 행렬을 의미한다.

3.2 KEOT를 이용한 최적센서 위치 선정

본 절에서는 모형 사장교의 실시간 손상평가를 위하여 최적운동에너지 기술인 KEOT를 이용하여 실시간 손상평가에 필요한 센서의 최적 위치와 그 수량을 파악하고자 KEOT를 이용하였다.

그림 Fig. 3은 KEOT를 이용하여 검증용 모형 사장교의 Node에 설치되는 센서의 효율을 나타내는 그래프이며, 총 43개의 Node 들 중에서 주탑을 기준으로 중앙경간에 위치한 센서 23개만 나타내었다. 11번과 33번은 주탑위치에 위치한 Node이며 센서를 설치하지 않기 때문에 0%의 효율이라 표기하였다.

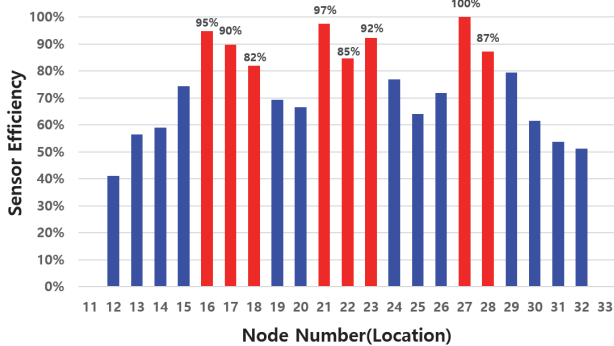


Fig. 3 Sensor Efficiency based on Node Location

이러한 결과를 바탕으로 검증용 모형 사장교 중앙경간에 센서를 설치하여 응답신호를 추출하는 것이 유리할 것이라는 결론을 내렸으며, NX사의 nastran10.0을 이용하여 각 감소된 DOF에 따른 모형 사장교의 동적 거동에서 발생한 운동에너지의 감소율을 Fig. 4와같이 표현하였다. DOF별 FE해석을 바탕으로 모형 사장교의 고유진동수를 추출하고 각 결과값에서의 오차율을 확인하여 Table 7과 같이 나타내었다.

Fig. 5와 같이 자유도(DOF)의 감소에 따라 센서를 통하여 추출한 모형 사장교의 변형운동에너지 또한 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

Table 7은 KEOT를 이용하여 자유도(DOF)의 감소에 따른 변형운동에너지의 감소율과 모형 사장교의 1차~2차 휨 거동의 주파수와 오차율을 표현하였다. 손상평가를 진행하기 위한 센서의 수량은 DOF감소에 따른 운동에너지의 감소율 79.48%(에너지 보존 20%)이고 최대 오차율이 3.428%인 8개의 조건으로 선정하였다. 8개의 센서의 설치위치은 Fig. 4에서 제시한 Node위치에 따른 센서 효율이 높은 위치인 지점조

Table 7 FE Analysis Result by DOF

DOF	Rate of decrease in kinetic energy	1 st Result		2 nd Result	
		HZ	Error	HZ	Error
39	-	2.885	-	4.113	-
35	10.256	2.885	0	4.113	0
30	23.076	2.886	0.034	4.122	0.218
25	35.897	2.888	0.103	4.185	1.750
20	48.717	2.890	0.173	4.210	2.358
15	61.538	2.891	0.207	4.220	2.601
10	74.358	2.893	0.277	4.236	2.990
8	79.487	2.896	0.381	4.254	3.428
5	87.179	2.901	0.554	4.276	3.963

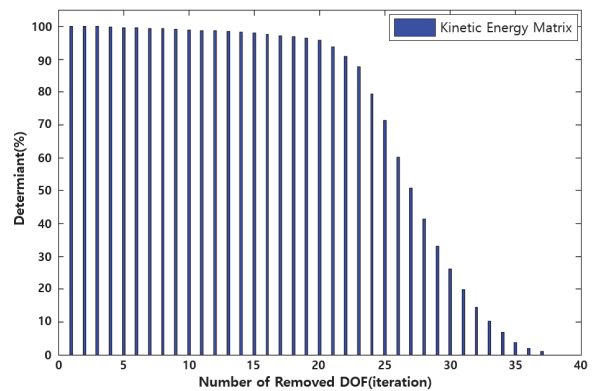


Fig. 4 Rate of decrease in Kinetic energy according to DOF Reduction

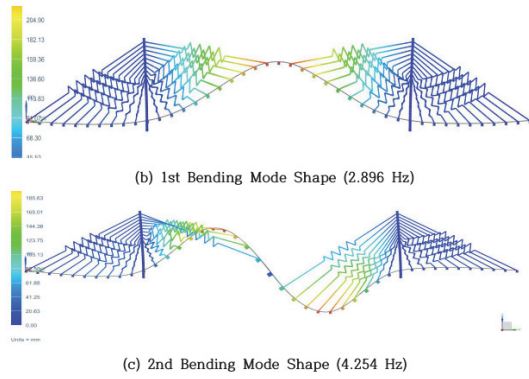


Fig. 5 FE Analysis Result at Selected Sensor Location (8 Point)

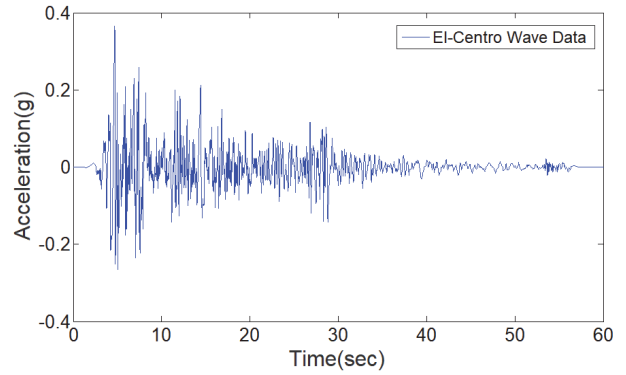


Fig. 6 El-Centro Seismic Wave

건 부분을 제외한 가로보 39개 중에서 14번, 15번, 16번, 19번, 20번, 21번, 25번, 26번의 위치로 선정하였다. 선정된 8개의 DOF를 통하여 FE해석을 진행한 결과를 다음 Fig. 5에 나타내었다.

4. 모형 구조물을 활용한 검증

본 장에서는 사장교 케이블의 실시간 손상평가를 진행하고 자 사용되는 장비들과 프로그램, 손상의 시나리오와 손상평

가 결과에 대하여 설명하였다. 실시간 손상평가를 위한 구성 요소는 손상평가의 주체가 되는 대상 구조물인 검증용 모형 사장교와 데이터 로거, 가진기, Amplifier로 구성되어 있으며, 손상평가의 구성요소 중에 데이터 로거는 데이터의 입출력 기능이 있는 dSPACE사의 CLP 1103를 이용하였으며, 가진기는 Famtech사의 EDS50-120의 전자식 전동 시험기를 이용하였다. CLP-1103에서 진동데이터를 EDS50-120로 보내는 중간단계에는 데이터를 증폭시켜주는 기능의 역할을 수행하고자 Famtech사의 PA-1200의 Amplifier를 연결하였다. 이용

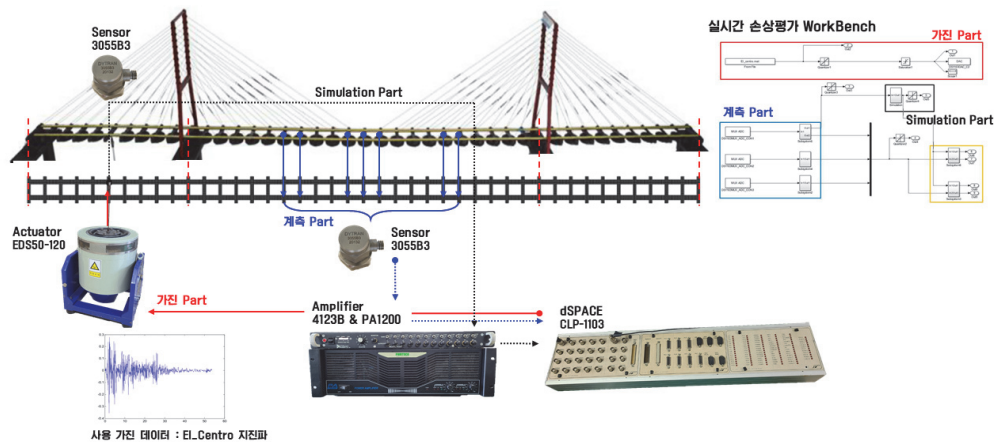


Fig. 7 Damage Assessment Composition Diagram

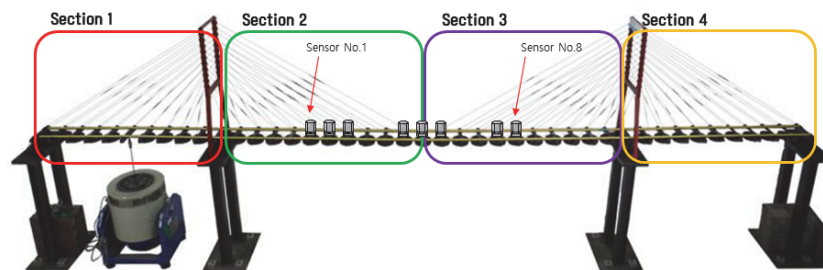


Fig. 8 Damage assessment by Section of Cable-Stayed Bridge

한 지진 데이터는 Fig. 8과 같이 El-Centro 지진파를 이용하였다. 이와같이 구성된 손상평가 시스템은 Fig. 7과 같다. Fig. 6의 지진파인 El-Centro 지진파는 dSPACE(CLP 1103)과 가진기(EDS50-120)를 순서로 거쳐 구조물을 진동하게 된다. 실시간으로 구조물의 손상을 평가하기 위해서는 손상 상태의 구조물 응답 데이터와 무손상 상태의 구조물 응답 데이터를 비교해야한다. 이와 같이 두가지 데이터를 실시간으로 비교하기 위해서 본 논문에서는 Matlab을 이용하여 구조물의 운동방정식을 바탕으로 가상의 구조물을 구성하였다.

4.1 손상평가 이론

본 논문에서는 실시간으로 구조물의 상태를 평가하는 것을 최종 목적으로 센서의 최적 위치를 선정하고 구조물의 실시간 손상평가를 진행하였다. 성능평가의 결과를 판단하기 위해서는 손상 상태의 데이터와 대상 구조물이 손상을 받기 이전의 데이터가 필요하다. 이러한 두가지의 데이터를 효과적으로 비교하고자 유클리드 거리 이론을 이용하였으며, 이는 다음 식 (2)와 같다.

$$D_E(x,y) = \sqrt{(x-y)^T(x-y)} \quad (2)$$

위 식에서의 유클리드 거리 이론은 두 가지의 데이터의 단순한 거리를 비교하기 때문에 두 데이터간의 변동성은 고려하지 않는다. 두 데이터의 변동성을 고려하지 않고 손상평가에 적용한다면, 구조물의 응답 데이터를 손상으로 잘못 파악할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 유클리드 거리 이론에 가중치를 부여하여 마할라노비스 거리(MD)에 관한 식 (3)으로 표현하였다.

$$MD = \sqrt{(x-m)^T R^{-1}(x-m)} \quad (3)$$

식 (3)의 마할라노비스 거리(MD)에서의 x는 응답신호를 의미하고, m은 응답신호의 평균값, R은 응답신호의 공분산행렬을 의미한다. 하지만 MD의 경우, 데이터 사이에 변동성이 크지 않다면 MD의 결과값은 큰 데이터를 갖지만, 반대로 변동성이 큰 상황에서의 MD의 결과값은 매우 미소한 값이 나오게 된다. 즉, 지진하중에 의한 구조물의 응답신호와 같이 변동성이 큰 상황에서의 손상데이터와 무 손상상태의 데이터를 비교하는 데에 있어서 MD의 결과값은 판단하기가 어려운 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 MD이론을 다음 식 (4)와 같이 개선하여 개선된 마할라노비스 거리이론을 사용하였다.

$$IMD = \sqrt{(\Delta x - m)^T R^{-1}(\Delta x - m)} \quad (4)$$

식 (4)에서의 Δx 는 무손상 상태의 응답 신호와 손상된 구조물의 응답 신호간의 차이를 의미한다. 두 데이터 간의 차이를 식에 적용함으로써 변동성의 크기를 감소시키고 손상 상태에서의 데이터와 무 손상 상태의 데이터의 데이터를 비교하고자 하였다.

4.2 손상 시나리오

본 절에서는 실시간 손상평가를 진행하기에 앞서 손상에 대한 정의와 시나리오에 대하여 설명하고자 한다. 케이블은 주탑에 연결되어 장력을 이용하여 사장교의 자중을 지지하는 주요 구성요소이며, 본 연구에서의 손상은 이러한 케이블의 파단으로 정의하였으며, 사장교를 주탑과 사장교 중앙을 기준으로 하여 좌측 경간을 Section 1, 중앙경간의 좌측부분을 Section 2, 중앙경간의 우측부분을 Section 3 마지막으로 우측 경간을 Section 4로 4개의 구간으로 나누었다.

케이블 손상 시나리오는 첫 번째로 4개로 나누어진 구간 중에서 1개의 구간을 선정하여 케이블을 손상시킨 상태의 데이터를 계측하여 무 손상 상태의 데이터와 비교함으로써 케이블이 손상된 구간을 찾는 것과 두 번째로 손상을 입은(파단상태의) 케이블 수를 증가 시킴으로써 손상정도에 따른 평가를 진행하는 것으로 정의하였다.

4.2.1 구간별 발생한 케이블에 대한 손상평가

본 연구에서 손상으로 정의한 케이블의 파단 위치를 판단하는 것을 목적으로 대상 구조물인 모형 사장교를 Fig. 8과 같이 4개의 구간을 설정하였다. 다음 Fig. 8에서 나타나듯이 Section 1은 모형 사장교의 좌측 경간을 의미하며 좌측경간의 중앙 가로보에 가진기인 EDS50-120과 연결하여 지진 하중을 직접적으로 받는 구간이다. Section 2는 모형 사장교의 좌측에 위치한 주탑에서부터 모형 사장교의 중앙 경간에서 정중앙에 위치한 가로보까지 설정하였다. Section 3은 모형 사장교의 정중앙에 위치한 가로보에서부터 우측 주탑사이의 구간으로 설정하였다. 마지막 Section 4는 모형 사장교의 우측 경간으로 가진기로부터 가장 멀리 떨어져 있다. 위와 같이 4개의 구간으로 나누는 모형 사장교에서 실시간 손상평가를 진행하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 각 구간별로 케이블의 손상이 발생하였을 때의 구조물의 응답데이터를 MD와 IMD값으로 나타낸 그래프이다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 보이는 바와 같이 각 구간(Section 1 ~ Section 4)에서 발생한 케이블의 손상에 대한 구조물의 응답 데이터와 무손상 상태의 응답데이터를 MD와 IMD를 이용하여 나타낸 결과 값이다. 그래프에서의 x축은 구조물에 설치한 센서의 번호이고 y축은 구조물의 응답신호를 MD와 IMD로 계산한 결과 값들의 평균의 제공한 결과이며, 빨간색, 파란색, 분홍색, 연두색의 실선 데이터는 Case1, Case2, Case3, Case4

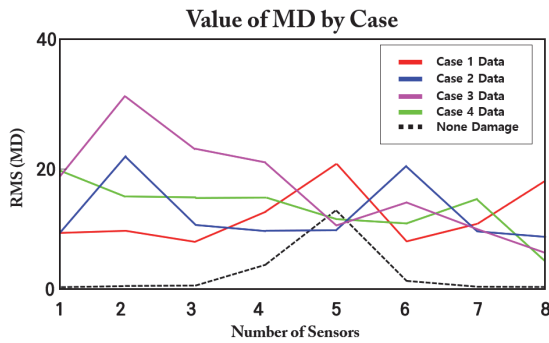


Fig. 9 Damage assessment by Section (MD)

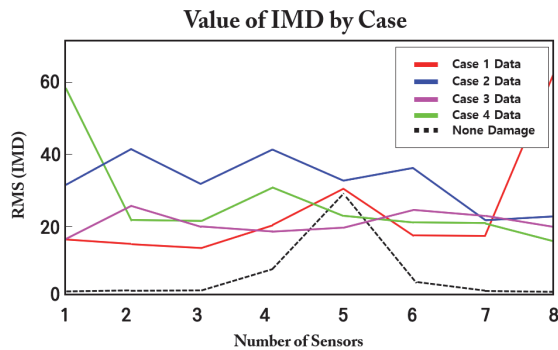


Fig. 10 Damage assessment by Section (IMD)

의 순서로 케이블의 손상에 대한 구조물의 응답데이터이다. 이때, Case는 손상시나리오를 의미하며 각각의 Section에서의 케이블 손상을 의미한다.

또한, 검정색 점선 데이터는 무손상 상태의 구조물의 응답 데이터를 의미하며 케이블 손상 발생에 대하여 기준선 역할을 한다. 구간별 발생한 케이블의 손상 Case에 따라 데이터를 구분함으로써, 케이블의 손상된 Section을 판별 할 수 있는 것을 확인 할 수 있었다.

Case1과 같이 Section 1에서 케이블 손상이 발생했을 때, 가진기 위치에서 멀리 떨어진 7번과 8번의 센서가 나머지 1~6번의 센서보다 더 민감하게 반응한 것을 확인할 수 있었고, MD 보다는 IMD의 값에서 더욱 효과적으로 반응한 것을 확인할 수 있었다. Section 2에서 손상이 발생했을 때에는 오히려 MD의 결과 값이 IMD의 결과 값보다 더 잘 반응한 것을 확인할 수 있었으며, IMD의 결과 값에서는 손상이 발생한 위치를 판단하기는 어려운 것을 확인할 수 있다. Section 3에서도 Section 2와 마찬가지로 손상의 위치를 파악하기는 어려운 것으로 확인되었다. Section 2와 3의 경우는 손상의 위치가 센서와 너무 가까워서 발생하는 문제로 예상되어진다. 마지막으로 section 4는 가진기와 가장 먼 구간으로 Section 1과 반대로 정중앙의 센서의 우측편에 있는 센서들이 왼쪽이 센서보다 효과적으로 반응한 것을 확인할 수 있었다.

Table 8 Damage Cased of Cable

	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4
	Cable Number	Cable Number	Cable Number	Cable Number
Case 1	2	2	2	2
Case 2	2 - 3	2 - 3	2 - 3	2 - 3
Case 3	2 - 5	2 - 5	2 - 5	2 - 5
Case 4	2 - 7	2 - 7	2 - 7	2 - 7

4.2.2 사장교 케이블의 손상 정도에 따른 손상평가

본 시나리오에서는 실시간 손상평가 시스템의 케이블의 손상 정도에 따른 평가 성능을 확인하기 위하여 각 구간에서 발생하는 손상의 정도(케이블의 수)를 증가시키며 손상평가를 진행하고 그에 대한 결과를 서술하였다. 손상평가의 평가 대상인 케이블은 Fig. 8과 같이 주탑과 각 가로보에 연결되었으며, 총 43개의 가로보 중 3개의 가로보(주탑위치와 동일한 가로보 2개와 모형 사장교의 정 중앙부분에 위치한 가로보 1개)를 제외한 40개의 가로보의 양 끝과 주탑 상부 벽면에 연결하였다. 연결된 케이블의 중앙 부분에는 Spring을 달았으며, Spring의 강성을 케이블의 강성으로 대체하였다. 설치된 케이블의 파단은 첫 번째 손상시나리오에서 설정한 4가지의 구간 중 한 구간에서만 케이블을 손상시키는 것으로 정의하였다. 각 구간에 설치된 케이블은 주탑에 가까운 위치의 가로보를 기준으로 1번부터 10번까지 번호를 설정하였다. 손상된 케이블의 정도에 따라 응답신호의 변화를 확인하기 위하여 케이블 손상 Case를 Table 7과 같이 나타내었다.

Table 8에서처럼 4개의 손상 Case를 선정하였다. 각 손상 Case는 2번 케이블 하나만 파단시켰으며, 2번 Case는 2번과 3번 케이블 2개를 파단시켰다. 3번 Case는 2번 케이블부터 5번 케이블까지 4개의 케이블을 파단시켰다. 마지막으로 4번 Case는 2번 케이블부터 7번 케이블까지 6개를 파단하였다. 10번 케이블의 경우, 양측 경간인 Section 1과 4에서 지점조건과 연결된 케이블이기 때문에 각 Section에서의 케이블 손상 조건을 동일하게 하기 위하여 손상시키지 않았다. 그 외의 8번 케이블부터 9번 케이블의 경우, Section 2와 3은 중앙경간 부분이기 때문에 단일 구간에 영향을 최소화시키기 위하여 손상 조건에서 제외하였다. Fig. 11은 케이블의 손상 정도에 따른 실시간 손상평가 응답 데이터이다.

Fig. 11는 각 구간에서 발생한 손상에 대해서 8개의 센서 중 가장 효과적으로 반응한 센서를 이용하였다. 빨간색의 선은 손상되지 않은 상태의 MD를 근거로 계산한 상한계선이다. 이 상한계선위로 데이터가 있다면 손상이 되었다는 의미이다. Fig. 11(a)는 Section 1에서는 첫 번째 센서를 이용하였으며, 케이블의 손상은 Case별로 2개, 4개, 8개, 12개를 파단시

킨 데이터이다. 또한 손상의 정도가 심해질수록 상한계선을 넘는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)는 Section 2에서 발생한 Case별 케이블의 파단되었을 때의 데이터이다. 확인한 센서

는 2번 센서를이용하였으며, 1번, 2번의 Case에서는 큰차이가 없지만 Case 3, 4에서는 손상의 정도에 따라 데이터가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11(c)는 6번 센서를 이용한 데이터이다. 손상의 정도에 따른 데이터의 변화는 크지는 않다는 것을 확인 하였으며, 시나리오 1에서의 Section 3에서의 데이터와 같이 대상 구조물의 중앙경간에서는 효과적이지 않은 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11(d)는 Section 4에서의 손상에 대하여 8번 센서가 추출한 응답 데이터를 이용하였다. 케이블의 손상 정도에 따라 데이터의 차이가 있으나, 미미한 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 사장교의 케이블 손상에 대하여 실시간으로 평가하기 위하여 센서의 최적 위치와 수량을 선정하였으며, 손상평가의 대상인 모형 사장교를 일정한 구간으로 나누고 구간에서 발생한 케이블 손상의 정도를 증가시킴으로써 손상된 케이블의 손상 위치를 파악하고 손상 정도에 따른 손상평가를 진행하였다. 또한, MD와 IMD를 이용하여 무손상 상태의 응답신호와 손상 상태의 응답신호를 비교 분석함으로써 구조물의 손상을 판별하였다. 본 논문에서 진행한 최적센서를 이용한 사장교 케이블의 실시간 손상평가는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 실시간 손상평가의 데이터 처리를 위하여 구조물에 설치되는 센서의 수량을 최적의 조건을 찾고자 구조물이 거동할 때에 발생하는 에너지 변환에너지 변화를 이용하여 손상평가를 진행하였다. 그 결과, 구조물의 거동에 의해서 가장 많은 에너지의 변화를 띄는 중앙경간에 8개의 설치하는 것이 실시간 손상평가에 따른 데이터 처리가 높을 것이라 판단하였다.
2. 케이블의 손상위치를 판단하기 위하여 모형 사장교를 주탑기준으로 총 4개의 구간을 나누어 구간별로 케이블 손상평가를 진행하였다. 손상평가는 IMD와 MD이론을 각각 비교하였다. 그 결과, MD 이론보다 IMD 이론을 이용한 손상평가 기법이 구간에 따른 사장교 케이블의 손상위치를 판단하는데 더욱 효과적인 것을 확인할 수 있었다.
3. 케이블의 손상 정도를 판단하기 위하여 모형 사장교에 설치된 케이블을 구간별로 2개에서 12개까지 파단시켜 가며 케이블 손상정도에 따른 실시간 손상평가를 진행하였다. 그 결과, 사장교 케이블의 손상 정도가 증가함에 따라 MD와 IMD를 이용하여 모형 사장교의 손상의 규모를 평가할 수 있는 성능을 확인하였다.

이상의 결과를 바탕으로 본 논문에서 사장교의 실시간 손상평가를 위한 센서의 효율적인 위치와 수량을 파악할 수 있

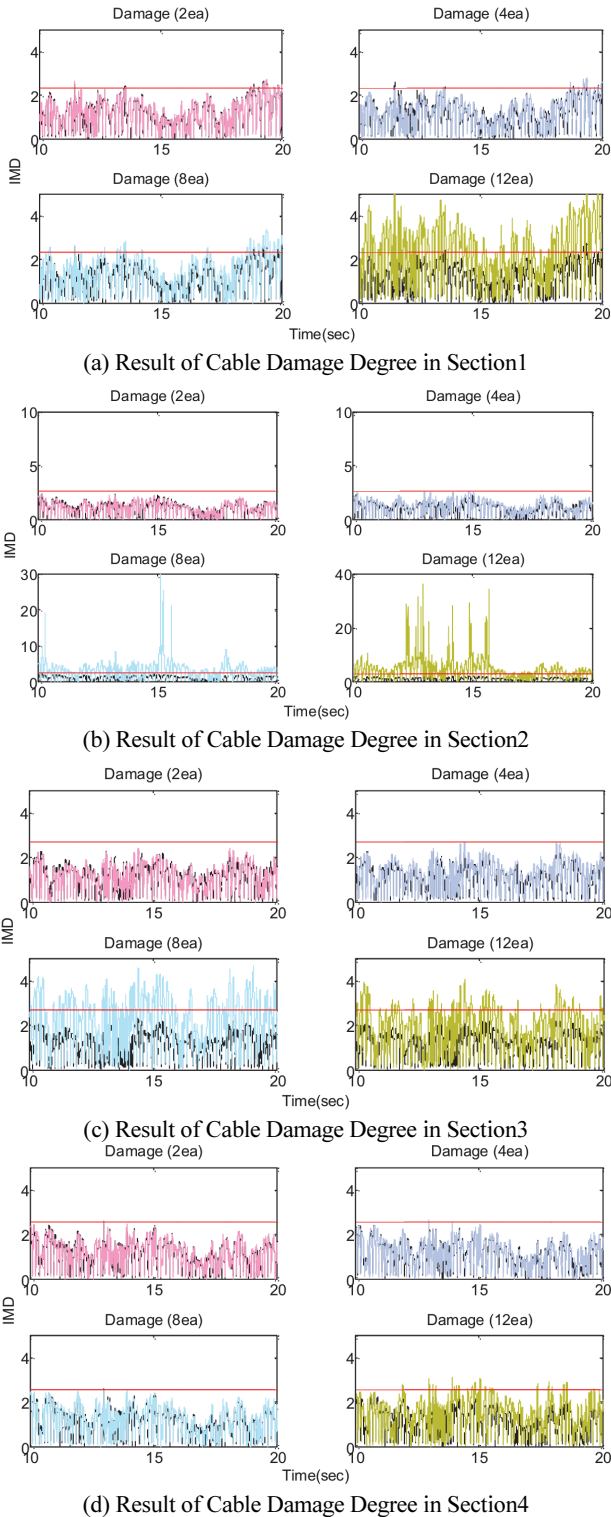


Fig. 11 Result Based according to Damage Degree

었으며, 케이블의 손상 구역과 손상 정도에 따른 손상평가 성능을 확인할 수 있었다. 향후 연구에서는 풍하중과 같이 교량에 전체적으로 전달되는 외력에 대하여 실시간 손상평가를 진행하여 보다 현실적인 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2018년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구사업(과제번호: NRF-2018R1A6A1A03025542)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Lee, S. G., Joo, B. C., and Kim, J. H. (2022), Cable-supported Bridge Safety Inspection Blind Spot Elimination Technology using Drones, *Korean Society of Disaster & Security*, 15(4), 31-38 (in Korean).
2. Lee, K. H., Ahn, B. J., and Kim, D. H. (2011), Fiber Optic Displacement Sensor System for Structural Health Monitoring, *Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing*, 31(4), 374-381 (in Korean).
3. Jun, Y. J., Park, I. W., and Lee, U. S. (2012), A Method of Lamb-Wave Modes Decomposition for Structural Health Monitoring, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 29(8), 887-895.
4. Bae, J. H., and Chang, S. H. (2017), Feasibility Check of Textile Sensor Made of P(VDF-TrFE) for Structural Health Monitoring of Composite Structures, *Composites Research(online)*, 30(2), 126-131. (in Korean).
5. Kim, E. J., Park, J. W., and Sim, S. H. (2016), Kalman Filter-based Data Recovery in Wireless Smart Sensor Network for Infrastructure Monitoring, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(3), 42-48 (in Korean).
6. Kim, S. W. (2017). Real-Time Monitoring System Based on IPv6 over BLE. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 21(2), 309-315 (in Korean).
7. Lim, J. D., Kim, J. J., Hong, D. E., and Jung, H. K. (2018), Safety Monitoring System of Structures Using MEMS Sensor, *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 22(10), 1307-1313 (in Korean).
8. Lee, J. J., Park, Y. S., Yun, C. B., Koo, K. Y., and Yi, J. H. (2008), An Overview of Information Processing Techniques for Structural Health Monitoring of Bridges, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute*, 21(6), 615-632 (in Korean).
9. Heo, G. H., Lee, C. O., Seo, S. G., Jeong, Y. S., and Jeon, J. R. (2020), Compression Sensing Technique for Efficient Structural Health Monitoring - Focusing on Optimization of CAFB and Shaking Table Test Using Kobe Seismic Waveforms, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 24(2), 23-32 (in Korean).
10. Kim, H. (2005), The optimum displacement measurement to estimate realtime states of Beam, Master's dissertation, Korea University, Seoul, South Korea, 1-6 (in Korean).
11. Park, S. Y. (2003), Optimal Placement of Sensors for Damage Detection in a Structure and its Application, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 7(4), 81-87 (in Korean).

Received : 09/11/2023

Revised : 11/21/2023

Accepted : 12/05/2023

요 지 : 본 연구에서는 케이블의 손상에 대한 사장교의 실시간 손상평가를 진행하였다. 사장교의 실시간 손상평가를 위한 센서는 가속도 센서를 사용하였으며, KEOT(Kinetic Energy Optimization Techniques)를 이용하여 센서의 위치와 수량에 대한 최적의 조건을 선정했다. KEOT는 구조물이 외력에 의해서 진동할 때, 최대변형에너지의 값을 계측하여 최적 계측 위치와 센서의 수량을 결정한다. 본 연구에서의 손상 조건은 케이블의 파단으로 제한하였으며 사장교를 4개의 구간으로 나누어 구간별 케이블 손상을 주었다. 사장교 케이블의 실시간 손상평가 방법은 FE 구조해석을 통하여 실제 모델과 유사한 가상의 모델을 만들었다. 생성된 가상 모델과 모형 구조물에 랜덤 가진파를 가한 이후 모형 구조물의 케이블 손상을 주었다. 가상 모델에서 출력되는 응답을 무손상 상태의 응답으로 정의하고 실제 모델에서 계측되는 응답을 손상 상태의 데이터로 정의하여 두 데이터를 비교하였다. 무손상 상태의 사장교의 데이터로부터 손상 상태의 사장교의 데이터를 IMD(Improved Mahalanobis Distance) 이론에 적용하여 손상의 정도를 평가하였다. IMD 이론으로 손상을 평가한 결과 구간별 손상을 실시간으로 적절하게 찾아내어 실시간 모니터링에 적용할 수 있는 유용한 손상평가 기술로 확인되었다.

핵심용어 : 실시간 손상평가, 최적 운동에너지 기술, 마할라노비스 거리 이론, 사장교