

트라이포드 하부구조물의 기저모델개선 및 결함추정 기법

이종원
남서울대학교 건축공학과

Baseline Model Updating and Damage Estimation Techniques for Tripod Substructure

Jong-Won Lee
Department of Architectural Engineering, Namseoul University

요약 해상풍력터빈 하부구조물은 중요한 기능의 수행, 접근성의 제약 등으로 인하여 건전성 모니터링을 통한 효과적 유지관리가 필요하다. 본 연구에서는 해상풍력터빈 트라이포드 하부구조물의 건전성 모니터링을 위한 기저모델개선 및 결함추정 기법을 실험적으로 연구한다. 우선 하부구조물 건전성 모니터링을 위한 절차를 제안한 후 이 과정을 트라이포드 하부구조물 축소모형에 대하여 적용한다. 즉, 축소모형에 대한 초기 기저모델을 수치적으로 수립한 후 모드특성을 추정하고, 건전상태 진동실험 결과로부터 구한 고유주파수와 모드형상을 기준으로 기저모델을 개선하는데, 이때 구조물의 경계조건을 고려하고 신경망기법을 이용한다. 이후, 개선된 기저모델을 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성하고, 손상상태 진동실험 결과로부터 구한 모드특성을 훈련된 신경망에 입력함으로써 결함을 추정한다. 유효고정부 모델을 이용하여, 건전상태에서 측정된 모드특성에 맞추어 합리적으로 기저모델을 수립할 수 있었다. 또한, 축소모형에 대한 손상실험을 수행하였는데, 4가지 손상경우에 대하여 손상을 추정한 결과, 합리적으로 손상위치를 추정할 수 있었으며, 실제 손상정도가 심해질수록 손상정도 추정치도 증가하였다. 그러나 손상정도가 상대적으로 미소한 경우, 해당 손상위치가 판정은 되지만 다른 위치와 비교하여 확실한 손상위치의 식별이 어려웠다. 향후, 이러한 미소손상 추정 및 손상정도 추정치의 강성감소에 대한 정량화 등에 대한 후속연구가 수반된다면, 해상풍력터빈 트라이포드 하부구조물의 건전성 모니터링에 제안 기법을 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract An experimental study was conducted on baseline model updating and damage estimation techniques for the health monitoring of offshore wind turbine tripod substructures. First, a procedure for substructure health monitoring was proposed. An initial baseline model for a scaled model of a tripod substructure was established. A baseline model was updated based on the natural frequencies and the mode shapes measured in the healthy state. A training pattern was then generated using the updated baseline model, and the damage was estimated by inputting the modal parameters measured in the damaged state into the trained neural network. The baseline model could be updated reasonably using the effective fixity model. The damage tests were performed, and the damage locations could be estimated reasonably. In addition, the estimated damage severity also increased as the actual damage severity increased. On the other hand, when the damage severity was relatively small, the corresponding damage location was detected, but it was more difficult to identify than the other cases. Further studies on small damage estimation and stiffness reduction quantification will be needed before the presented method can be used effectively for the health monitoring of tripod substructures.

Keywords : Tripod Substructure, Baseline Model, Damage Estimation, Modal Parameter, Neural Network

이 논문은 2019년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

*Corresponding Author : Jong-Won Lee(Namseoul Univ.)

email: jwlee@nsu.ac.kr

Received March 4, 2020

Revised May 11, 2020

Accepted June 5, 2020

Published June 30, 2020

1. 서론

풍력발전 시장에서는 환경파괴 및 민원발생이 적고, 대형화된 기기로 대규모 단지 개발이 가능하며, 우수한 풍력자원을 이용할 수 있는 해상풍력의 성장이 가속화되고 있다. 해상풍력터빈 하부구조물(substructure)은 해저 지반의 기초와 연결되어 상부의 나셀, 블레이드 및 타워를 지지하는 역할을 하는 중요한 구조물이며, 하부구조물의 손상 및 붕괴는 풍력터빈 운용을 중단시켜 막대한 비용손실을 초래하고 안전상의 문제도 야기할 수 있다. 육상풍력터빈과는 달리 해상풍력터빈의 경우 하부구조물의 제작 및 시공비용이 상당부분 차지하며, 이의 유지관리에 대한 관심이 고조되고 있다. 또한 해상풍력터빈에 대한 접근성이 제약되므로, 하부구조물에 대한 효과적 유지관리 및 신뢰성 확보 등을 위한 기술개발이 더욱 필요한 실정이다. 따라서 원격 건전성 모니터링을 통한 유지보수기술은 필수 기술이 될 것으로 예측되며, 하부구조물의 상태평가 및 결합탐지 기술은 건전성 모니터링의 핵심기술 중 하나이다.

해상풍력터빈 하부구조물은 수심 및 시스템에 따라 형식을 결정하며, 크게 고정식과 부유식으로 분류할 수 있다. 고정식으로는 모노파일(monopile), 중력식(gravity base), 자켓(jacket) 및 트라이포드(tripod) 등이 이용되고 있는데, 이중 트라이포드 형식은 중앙의 원형 강관 기둥을 레그(leg)와 브레이스(brace)를 이용하여 삼각형 형태로 지지하는 구조이며, 해저 지질의 다양한 강도에 적합한 형태로 평가되고 있어 전 세계적으로 널리 이용되고 있다.

해상풍력터빈 하부구조물의 상태평가 및 결합탐지를 통한 건전성 모니터링에 대한 중요성이 점차 부각되면서 이와 관련된 기술개발이 진행되어 왔는데, 이중 트라이포드 하부구조물에 대한 내용은 다음과 같다. 광섬유센서로부터 측정되는 변형률 데이터를 기반으로, 1단계로 제공 평균제곱근편차(root mean square deviation)를 이용하고, 2단계로 손상분리지수(damage isolation factor)를 이용하여, 해상풍력터빈 트라이포드 하부구조물의 결합위치를 판정할 수 있는 기법을 제안하였으며, 축소모형에 대한 손상실험을 통하여 기법을 검증하였다[1]. 또한, 축소 트라이포드 하부구조물에 대하여, 측정된 가속도 데이터를 실험 모드분석(input-output modal analysis)과 응답의존 모드분석(output only modal analysis)을 이용하여 처리한 후, 모드 매개변수 및 그 편차를 기반으로 결합을 평가할 수 있는 기법을 제안하였다[2]. 손상판

정을 위한 임계치, 신호처리 등과 관련된 지수들에 대하여 인간의 입력을 제공하여 건전성 모니터링 시스템을 훈련시킨 후, 자동화된 기법으로 손상유무 및 손상위치를 판정할 수 있는 반자동 결합평가기법을 제안하였으며, 이를 축소 트라이포드 하부구조물에 적용하였고, 광섬유센서에서 측정된 변형률 데이터를 이용하였다[3]. 또한, 축소 트라이포드 하부구조물을 인공수조에 설치한 후 인공파도 가력 조건에서 손상위치를 판정할 수 있는 손상지수를 개발하였으며, 광섬유센서 기반 변형률 데이터를 사용하였다[4]. 변형률 데이터에 대한 주파수 스펙트럼의 특정 주파수대역에 제공평균제곱근편차를 적용하는 손상지수를 개발한 후 이를 트라이포드 하부구조물의 결합탐지에 적용하였으며, 실험결과를 상용 소프트웨어의 결과와 비교하였다[5]. 또한, 트라이포드 하부구조물로 구성된 5 MW급 풍력터빈시스템의 유한요소모델을 수립하여 동적특성을 분석한 후 진동 모니터링 시스템을 구축하였는데, 가속도계로부터 측정되는 진동신호와 풍력터빈의 환경적 및 운용적 요소와의 관계를 분석할 수 있고 공진현상을 모니터링할 수 있는 기법을 제안하였다[6]. 풍력터빈의 환경적 및 운용적 요인들이 구조물의 동적특성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통하여 통계 기반의 손상지수를 개발하기 위하여, 트라이포드 하부구조물로 구성된 5 MW급 풍력터빈시스템의 구조물에 가속도계를 부착하여 진동신호를 장기간 계측/분석하였다[7]. 또한, 해상풍력터빈 트라이포드 하부구조물의 건전성 모니터링을 위하여 손상에 의한 모드특성의 변화와 신경망기법(neural network technique)을 사용하였으며, 프로토타입 하부구조물에 대하여 수치적으로 기법을 검증하였다[8].

본 연구에서는 트라이포드 하부구조물의 건전성 모니터링을 위한 기저모델개선(baseline model updating) 및 결합추정 기법을 실험적으로 연구한다. 즉, 건전성 모니터링을 위한 효과적 결합추정을 위하여 기저모델개선 방법을 제안하고, 이를 기반으로 손상추정을 수행한다. 우선 해상풍력터빈 하부구조물 건전성 모니터링의 절차를 제안한 후 이를 트라이포드 하부구조물 축소모형에 적용한다. 즉, 초기 기저모델을 수립하여 모드특성을 추정한다. 이후, 건전상태에서 측정된 가속도 데이터를 이용하여 고유주파수와 모드형상을 구하고, 이 실험결과에 대하여 초기 기저모델을 개선하기 위하여, 구조물의 경계조건을 고려하고 신경망기법을 이용한다. 개선된 기저모델을 기반으로 신경망의 훈련패턴을 생성한 후, 손상상태의 가속도 데이터로부터 구한 고유주파수와 모드형상을 훈련된 신경망에 입력하여 결합을 추정한다.

2. 해상풍력터빈 하부구조물 건전성 모니터링 절차

해상풍력터빈 하부구조물의 구조적 안전성 확보를 위한 건전성 모니터링을 위하여 가속도, 변형률, 변위 등의 구조응답을 계측하여 신호처리를 수행한 후, 다양한 상태 평가 알고리즘을 적용하여 현재 구조물의 상태를 평가하고 결함을 판정할 수 있다. 본 연구에서는 가속도 신호를 계측한 후, 모델기반 신경망기법을 적용하여 결함을 판정할 수 있는 기법을 제안하며, 이를 위한 절차를 정리하면 다음과 같다.

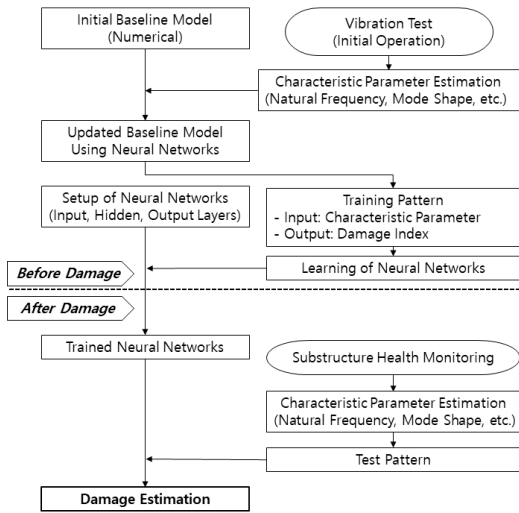


Fig. 1. Substructure health monitoring procedure

우선 대상 하부구조물의 설계도면 및 제원 등을 이용하여 초기 기저모델을 수치적으로 수립하는데 이때, 해상풍력터빈 하부구조물 수치해석 전용 프로그램, 유한요소법 등을 이용할 수 있다. 이러한 초기 기저모델은 경계조건, 제작오차 등의 이유로 실제 하부구조물에 대한 정확한 수치모델이 되기 어렵다. 따라서 결함이 없는 하부구조물 초기 운용 시 구조응답을 측정하고 신경망기법을 적용하여 기저 모델을 개선시킨다. 이때 특성 파라미터로는 고유주파수, 모드형상 등을 이용할 수 있다.

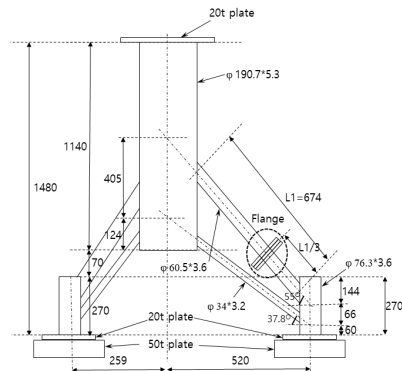
개선된 기저모델을 이용하여, 기저모델에 여러 가지 다양한 손상경우를 가정한 후 수치해석을 수행하여 신경망의 훈련패턴을 생성한다. 이때 입력자료는 특성 파라미터이며 출력자료는 강성저하, 균열, 부식 등을 나타내는 손상지수가 된다. 이후, 생성된 훈련패턴을 이용하여 신경망을 훈련시킨다. 본격적인 하부구조물 모니터링을 통

하여 특성 파라미터를 추정하고 이를 훈련된 신경망에 적용하여 손상지수를 구하면 결함위치 및 결함정도를 판정할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 해상풍력터빈 하부구조물 건전성 모니터링 절차를 Fig. 1에 정리하였다. 이후에는, 위 하부구조물 건전성 모니터링 절차를 수행하기 위한 기법을 순서대로 기술한다.

3. 트라이포드 하부구조물의 수치해석

본 연구에서는 Fig. 2에 보인 트라이포드 하부구조물의 강제 축소모형에 대한 결함추정의 절차를 진행하였으며, 축소모형에 적용된 원형강관의 단면특성을 Table 1에 정리하였다. 한편 Fig. 2에는 대상 구조물의 명칭을 함께 나타내었다.

축소모형에 대한 초기 기저모델 수립을 위하여, 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 해상풍력터빈 하부구조물 수치해석 전용 프로그램으로 개발한 SubDyn 프로그램[9] ver. 1.03.00을 이용하였다. 이 프로그램에서는 모노파일, 자켓 및 트라이포드 등의 하부구조물에 대한 고유치해석이 가능하고, 상부 풍력발전시스템에 대한 동력학 시뮬레이션 결과와 연동하여 하부구조물의 응답을 구할 수 있다. 축소모형의 고유치해석을 위하여 110개의 절점과 112개의 요소를 사용하였고, 모든 요소를 원형강관 단면을 가지는 보요소로 모델링하였다. 한편, Fig. 2의 상부 20 mm 두께의 강판은 14.13 kg의 집중질량으로 처리하였다. 또한, 3개의 석션(suction) 하단을 우선 고정단으로 처리하였다. 유한요소 모델링된 형상을 Fig. 3에 나타내었는데, 바람방향(fore-aft)과 바람횡방향(side-side)을 Fig. 3의 방향으로 가정하였다.



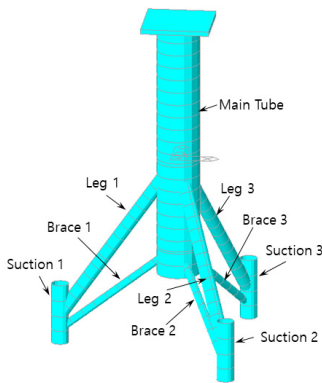


Fig. 2. Dimensions and terms of the tripod substructure scaled model (lengths in mm)

Table 1. Section properties of the used pipes

Description	Diameter (mm)	Thickness (mm)
Main tube	190.7	5.3
Leg	60.5	3.6
Brace	34.0	3.2
Suction	76.3	3.6

SubDyn 프로그램을 이용하여 모델링된 하부구조물의 고유주파수와 모드형상을 구하였으며, 고유주파수 결과를 Table 2에 정리하였다. 동일 조건에서 범용 유한요소 해석 프로그램인 Midas Gen 프로그램을 이용하여 구한 고유주파수 결과를 Table 2에 함께 나타내었는데, 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 한편, 비틀림 모드가 175.99 Hz에서 발생하였으나 이를 생략하였으며, 4차까지의 모드형상을 Fig. 4에 나타내었다.

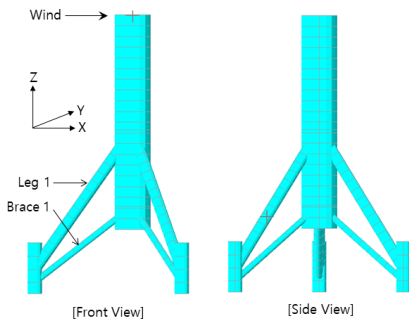


Fig. 3. Finite element model of the substructure

Table 2. Natural frequencies of the initial baseline model (Hz)

Mode No.	1 (fore-aft)	2 (side-side)	3 (fore-aft)	4 (side-side)
SubDyn	81.01	81.08	284.77	284.94
Midas	81.13	81.19	284.98	285.15

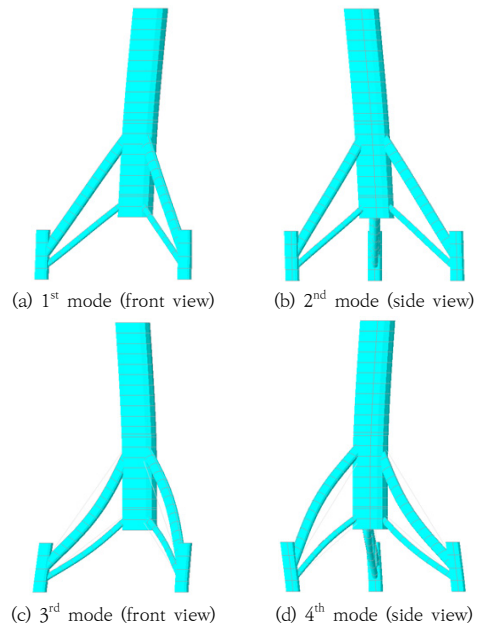


Fig. 4. Mode shapes of the initial baseline model

4. 실험 셋업 및 진동실험 방법

트라이포드 하부구조물의 기저모델개선 및 결합추정 기법에 대한 검증실험을 수행하기 위하여 Fig. 2의 도면에 따라 Fig. 5와 같이 축소모형을 제작하였다. 손상을 모사하기 위하여 Fig. 2와 5의 점선으로 표시된 것과 같이 1개 레그(Leg 1)의 하부에, 5 mm 두께의 원형강판이 6개의 고력볼트(F10T M10)로 연결되는 플랜지 부위를 제작하였다. 이러한 플랜지 부위를 설치하여 레그를 볼트로 접합한 후, 볼트를 탈락시킴으로써 원주방향 균열(circumferential crack)을 모사할 수 있다[1-5]. 한편 Fig. 5에 보인 바와 같이, 3개의 석션 하단은 각각 20 mm 두께의 강판과 용접으로 접합하였으며, 20 mm 강판은 각각 50 mm 두께의 강판에 4개의 고력볼트(F10T M24)를 이용하여 접합시켰다. 또한, 50 mm 강판의 하부 면과 시험실 바닥을 강력접착제를 이용하여 결합하였다.



Fig. 5. Tripod substructure scaled model

축소모형에 Fig. 6에 보인 위치에서 가속도를 측정하였는데, A1 - A4는 바람방향, A5 - A8은 바람횡방향 가속도계로 가정하였다. PCB Piezotronics사의 ICP형 가속도계(333B40)와 신호처리기(482C05)를 사용하였고, National Instruments사의 데이터 취득 장치(NI cDAQ-9178, NI 9234)와 소프트웨어(LabView)를 사용하였다.

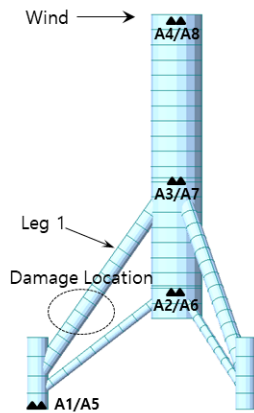


Fig. 6. Measurement locations

인위적으로 손상을 발생시키며 임팩트 해머에 의한 자유진동실험을 수행하였다. 즉, Fig. 5의 점선으로 표시된 원형강관에 체결된 볼트를 탈락(Case 1: 볼트 1개 탈락, Case 2: 볼트 2개 탈락, Case 3: 볼트 3개 탈락, Case 4: 볼트 4개 탈락)시키면서 실험을 수행하였으며, 발생시킨 손상의 형상은 Fig. 7에 나타내었다. 건전상태와 각 손상 단계별로 10회(바람방향 5회 가진, 바람횡방향 5회

가진)의 자유진동실험을 수행하여 결과를 평균하였다. 즉, 바람방향 및 바람횡방향 고유주파수 및 모드형상은 해당 방향으로 가진한 경우의 결과로 각각 구하였으며, 주파수 영역 분해(frequency domain decomposition) 기법을 이용하였다.

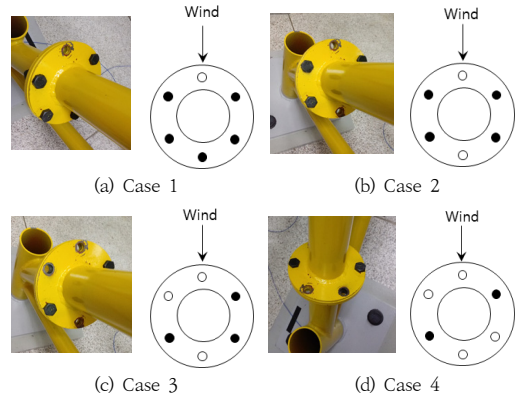


Fig. 7. Inflicted damages

5. 기저모델개선

결함추정을 위해서는 건전상태에 대한 실험결과에 맞추어 초기 기저모델을 개선할 필요가 있다. 건전상태에 대한 자유진동실험 결과로부터 추정된 고유주파수를 Table. 3에 정리하였으며, 이를 3장에서 석션 하단을 고정단으로 처리한 고유치해석 결과와 비교하였다. Table 3에서 오차는 실험결과에 대한 오차이다. 두 결과가 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 석션 하단 지지조건의 차이 때문인 것으로 판단하였다. 즉, 4장에서 언급한 바와 같이 고력볼트와 강판 등을 이용하여 석션 하단을 처리하였으나, 이러한 지지조건이 완전한 고정효과를 나타내

Table 3. Natural frequencies of the baseline model (Hz)

Mode No.	1	2	3	4	Error(%)
Experiment	71.44	71.48	200.56	200.63	-
Initial model (fixed-end)	81.01	81.08	284.77	284.94	27.71
Updated model (trial and error)	73.20	73.28	207.18	207.33	2.91
Updated model (Neural Network)	71.51	71.58	198.89	199.02	0.47

지 못하는 것으로 판단하였다. 따라서 석션 하단의 지지 조건을 수치적으로 개선함으로써 기저모델을 개선하였다.

개발되어 있는 대부분의 해상풍력터빈 해석 프로그램들에서는 하부구조물 기초부의 지반-파일 상호작용을 단순화된 선형모델을 이용하여 해석을 수행한다. 본 연구에서는 기초부 파일의 단면특성과 길이를 변경하여 전체 파일을 캔틸레버 보로 이상화하는 유효고정부 모델(effective fixity model)을 이용하였다[10]. 석션 3개의 하부에 각각 원형강관 단면을 가지는 보 요소로 유효고정부를 모델링하였으며, 시행착오방법(trial and error method)으로 초기치를 결정하였다. 즉, 원형강관 요소의 길이를 0.07 m, 외경을 0.05 m, 두께를 0.01 m로 설정한 후 수행한 고유치해석 결과를 Table 3에 비교하였다.

이후 신경망기법을 이용하여 유효고정부 원형강관의 길이, 직경 및 두께를 개선함으로써 기저모델을 수립하였다. 5,000셋의 유효고정부 원형강관의 길이, 직경 및 두께를 무작위로 샘플링하고, 각각에 대해 4차까지의 고유주파수와 모드형상을 SubDyn 프로그램을 이용하여 계산함으로써 훈련패턴을 생성하였다. 즉, 각각의 훈련패턴은 4개의 고유주파수, 16개의 모드형상 성분 및 이에 해당되는 원형강관의 길이, 직경 및 두께로 구성하였다. 즉, 신경망의 입력자료는 20개, 출력자료는 3개이며, 15개 및 10개의 노드를 가지는 2개의 은닉층을 구성하여 신경망을 학습시켰다.

학습된 신경망에 건전상태 실험결과를 입력하여 유효고정부 원형강관의 길이, 직경 및 두께를 추정하였다. 즉, 원형강관 요소의 길이는 0.069 m, 외경은 0.042 m, 두께는 0.0096 m로 추정되었고, 추정치를 이용한 고유주파수 해석결과를 Table 3에 비교하였는데, 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 이후 수행되는 결함탐지를 위하여 개선된 유효고정부 원형강관의 길이, 직경 및 두께를 적용하여 기저모델을 수립하였다.

6. 결함추정

해상풍력터빈 트라이포드 하부구조물은 강재로 제작되며, 해양환경 노출 및 반복하중에 의하여 부식 및 균열에 의한 손상이 발생할 가능성이 높다. 부식결함에 의해서 부재의 단면적이 감소되며, 균열결함에 의해서도 균열 발생 위치에서 부재 단면적 감소의 효과가 있을 것으로 판단된다. 따라서 트라이포드 하부구조물을 구성하는 원

형강관의 두께를 감소시킴으로써 손상을 모사할 수 있다. 본 연구에서는 손상전후 원형강관 두께의 비율을 이용하여 다음과 같이 손상지수(damage index)를 정의하였다. 즉, 손상지수가 0인 경우 건전상태를 의미하며, 손상지수가 커질수록 손상정도가 심해짐을 의미한다.

$$\beta_j = 1 - \frac{(Th)_j^d}{(Th)_j^o} \quad (1)$$

where, Th is pipe thickness, j denotes location in Table 4 and Fig. 8, and o and d are healthy and damaged state respectively.

우선, Table 4에 보인 바와 같이 대상 하부구조물의 부위를 분할하여 손상지수가 구해지는 15개의 신경망 출력자료를 선정하였으며, 이의 위치를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서, 4장에서 인위적으로 손상을 가한 위치는 Output No. 7, 즉 Leg 1의 하부에 포함된다. 기저모델에 적용된 해당 15개 부위의 원형강관 두께를 무작위로 변화시킨 10,000셋의 손상경우를 생성하였으며, SubDyn 프로그램을 이용하여 각각의 경우에 대한 고유주파수와 모드형상을 해석적으로 계산하여 훈련패턴을 생성하였다. 즉, 10,000셋의 각각의 경우에 대하여 변화된 4차까지의 고유주파수와 가속도 응답이 구해지는 8개 위치(Fig. 6 참조)에서의 4차까지의 모드형상을 구하였다. 이후 고유주파수와 모드형상 성분 및 이에 해당되는 15개 부위 원형강관 두께로 구성되는 10,000셋의 훈련패턴을

Table 4. Outputs of the neural network

Output No.	Location	Sectional area (mm ²)
1	Suction 1	822
2	Suction 2	822
3	Suction 3	822
4	Brace 1	310
5	Brace 2	310
6	Brace 3	310
7	Leg 1 lower	644
8	Leg 1 upper	644
9	Leg 2 lower	644
10	Leg 2 upper	644
11	Leg 3 lower	644
12	Leg 3 upper	644
13	Main tube lower	3087
14	Main tube middle	3087
15	Main tube upper	3087

생성하였다. 이때 바람방향과 바람횡방향 모드를 분리하여 구하였으므로 각 모드에 대하여 4개의 모달변위가 생성된다. 즉, 각각의 훈련패턴은 4개의 고유주파수와 16개의 모드형상 성분 그리고 이에 해당되는 15개 원형강 관 두께로 구성된다. 따라서 신경망 입력층은 20개, 출력층은 15개의 노드를 가지며, 18개 및 16개의 노드를 가지는 2개의 은닉층을 구성하였다.

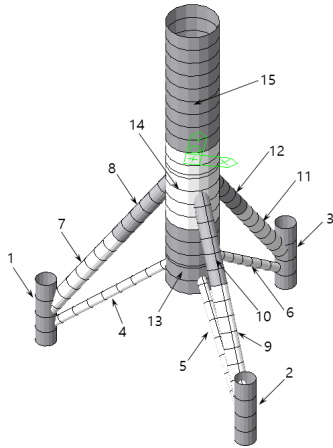


Fig. 8. Locations of outputs of the neural network

위에서 생성된 훈련패턴으로 신경망을 학습시킨 후, 4장에서 설명된 4가지 손상경우에 대한 자유진동실험 결과로부터 구한 고유진동수와 모드형상을 학습된 신경망에 입력하여 손상발생 위치 및 그 정도를 추정하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타내었는데, 세로축은 Eq. (1)의 손상지수이다. 손상정도가 상대적으로 미소한 Case 1의 경우, 손상이 발생한 위치(Table 4의 Output No. 7)에서 손상지수가 0보다 큰 수로 계산되기는 하지만, 다른 위치에서도 Output No. 7에서의 추정치보다는 적지만 손상지수가 함께 추정되어, 확실한 손상위치의 식별이 어려운 것으로 판단된다. 본 연구에서와 같이 구조물의 전역적 가속도 응답을 예측하여 손상에 의한 모드특성의 변화를 분석하는 경우, 손상은 특히 초기단계에서는 국부적 현상이지만, 가속도 기반 모드특성은 구조물의 전역적 매개변수이므로, 이러한 모드특성은 초기손상 및 미소손상에 민감하지 않다는 보고가 있다[11]. 따라서 미소손상에 대한 문제는 향후 압전재료와 같은 스마트센서를 활용한 임피던스 기법 등을 병용하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, Case 2, 3, 4에서는 손상발생 위치(Output No. 7)에 대한 손상지수가 다른 위치의 손상지수보다 상대적으로 크게 추정되므로 합리적인 손상위치의 추정이

가능한 것으로 판단된다.

4장에서 설명된, 플랜지의 볼트탈락으로 인한 손상은 해당 단면에서 국부적인 강성저하를 발생시키고, 또한 손상지수가 구해지는 Leg 1 하부 부재의 강성저하를 야기하는 것으로 판단된다. 이러한 손상형태에 의한 단면에서의 강성저하와 해당 부재의 강성감소 정도를 정량적으로 결정하기 어려워 손상정도 추정치를 정확해와 비교하지는 못하였다. 그러나 실제 손상정도가 심해질수록 손상정도 추정치도 증가하는 추세를 알 수 있다.

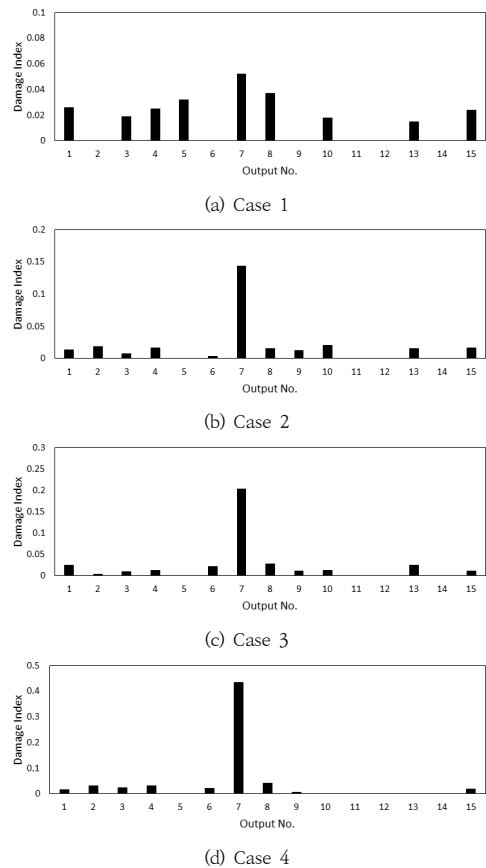


Fig. 9. Results of damage estimation

따라서 미소손상 추정 및 손상정도 추정치의 강성감소에 대한 정량화 등에 대한 후속연구가 수반된다면, 해상 풍력터빈 트라이포드 하부구조물의 건전성 모니터링에 제안 기법을 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 트라이포드 하부구조물의 건전성 모니터링을 위한 기저모델개선과 결합추정 기법을 실험연구를 통하여 제안하였다. 즉, 효과적 결합추정을 위하여 기저모델개선 방법을 제안하였으며, 이를 통하여 손상위치를 합리적으로 추정하였다. 우선 하부구조물 건전성 모니터링을 위한 절차를 제안한 후 이 과정을 트라이포드 하부구조물 축소모형에 대하여 적용하였다. SubDyn 프로그램을 이용하여 초기 기저모델을 수립하고, 건전상태 진동실험 결과로부터 구한 고유주파수와 모드형상을 기준으로 기저모델을 수립하였다. 이때 구조물의 경계조건을 개선하였고 신경망기법을 이용하였다. 이후, 개선된 기저모델을 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성하고, 손상상태 진동실험 결과로부터 구한 고유주파수와 모드형상을 훈련된 신경망에 입력함으로써 결합을 추정하였다.

석션 하단의 지지조건을 유효고정부 모델을 이용하여 개선함으로써, 건전상태 축소모형에서 측정된 고유주파수와 모드형상에 맞추어 합리적으로 기저모델을 수립할 수 있었다. 한편, 손상정도가 상대적으로 미소한 경우 (Case 1), 해당 손상위치가 판정은 되지만 다른 위치에 서의 추정치와 비교하여 확실한 손상위치의 식별이 어려웠다. 그 외의 경우 합리적으로 손상위치를 추정할 수 있었으며, 실제 손상정도가 심해질수록 손상정도 추정치도 증가하였다.

본 연구에서와 같은 가속도 기반 모니터링 기법은 구조물의 전역적 상태를 평가하므로 하부구조물 건전성 모니터링을 위하여 필요하고 적용되어야 한다고 판단된다. 그러나 미소손상 및 초기손상 추정이 어렵다는 단점을 보완하기 위하여 향후, 압전재료와 같은 스마트센서를 활용한 임피던스 기법 등을 병용하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 손상정도 추정치의 강성감소에 대한 정량화 등에 대한 후속연구가 함께 수반된다면, 해상풍력 터빈 트라이포드 하부구조물의 건전성 모니터링을 위하여 제안 기법을 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] R. Soman, M. Mieloszyk, and W. Ostachowicz, "A two-step damage assessment method based on frequency spectrum change in a scaled wind turbine tripod with strain rosettes", *Marine Structures*, Vol.61, pp.419-433, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.06.013>
- [2] M. M. Luczak, J. Telega, N. Zagato, and E. Mucchi, "On the damage detection of a laboratory scale model of a tripod supporting structure by vibration-based methods", *Marine Structures*, Vol.64, pp.146-160, 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.11.002>
- [3] R. Soman, "Semi-automated methodology for damage assessment of a scaled wind turbine tripod using enhanced empirical mode decomposition and statistical analysis", *International Journal of Fatigue*, Vol.134, 105475, 2020.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105475>
- [4] M. Mieloszyk and W. Ostachowicz, "An application of structural health monitoring system based on FBG sensors to offshore wind turbine support structure model", *Marine Structures*, Vol.51, pp. 65-86, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.10.006>
- [5] S. Opoka, R. Soman, M. Mieloszyk, and W. Ostachowicz, "Damage detection and localization method based on a frequency spectrum change in a scaled tripod model with strain rosettes", *Marine Structures*, Vol.49, pp.163-179, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.05.010>
- [6] W. H. Hu, S. Thons, R. G. Rohrmann, S. Said, and W. Rucker, "Vibration-based structural health monitoring of a wind turbine system. Part I: Resonance phenomenon", *Engineering Structures*, Vol.89, pp.260-272, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.034>
- [7] W. H. Hu, S. Thons, R. G. Rohrmann, S. Said, and W. Rucker, "Vibration-based structural health monitoring of a wind turbine system Part II: Environmental/operational effects on dynamic properties", *Engineering Structures*, Vol.89, pp.273-290, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.035>
- [8] J. W. Lee, "Structural health monitoring technique for tripod support structure of offshore wind turbine", *Journal of Wind Energy*, Vol.9, pp.16-23, 2018.
DOI: <https://dx.doi.org/10.33519/kwea.2018.9.4.003>
- [9] R. Damiani, J. Jonkman, and G. Hayman, SubDyn User's Guide and Theory Manual, Technical Report, NREL/TP-5000-63026, National Renewable Energy Laboratory, USA, pp.14-53, 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.2172/1225918>
- [10] J. Jonkman, S. Butterfield, P. Passon, T. Larsen, T. Camp, J. Nichols, J. Azcona, and A. Martinez, "Offshore code comparison collaboration within IEA wind annex XXIII: Phase II Results regarding monopile foundation modeling", *Proceedings of IEA European Offshore Wind Conference*, IEA, Berlin, Germany, pp. 6-7, December 2007.
- [11] R. Shanker, S. Bhalla, A. Gupta, and M. P. Kumar, "Dual use of PZT patches as sensors in global dynamic and local electromechanical impedance

techniques for structural health monitoring”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.22, pp.1841-1856, 2011.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X11414219>

이 종 원(Jong-Won Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 연세대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : KAIST 대학원 건설 및환경공학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 2008년 8월 : 한국 기계연구원 책임연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 건축공학과 교수

<관심분야>

구조물 건전성 모니터링, 손상추정, 스마트센서 기술