한국소음진동공학회논문집 제 22 권 제 7 호, pp. 667~675, 2012.

http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2012.22.7.667

모노파일 형식 해상풍력발전기 지지구조물의 손상추정기법

Damage Estimation Method for Monopile Support Structure of Offshore Wind Turbine

김 상 렬*·이 종 원†·김 봉 기*·이 준 신**

Sang Ryul Kim, Jong Won Lee, Bong Ki Kim and Jun Shin Lee

(2012년 4월 30일 접수 ; 2012년 6월 20일 심사완료)

Key Words : Damage Estimation(손상추정), Monopile(모노파일), Support Structure(지지구조물), Offshore Wind Turbine(해상풍력발전기), Modal Parameter(모드특성)

ABSTRACT

A damage estimation method for support structure of offshore wind turbine using modal parameters is presented for effective structural health monitoring. Natural frequencies and mode shapes for a support structure with monopile of an offshore wind turbine were calculated considering soil condition and added mass. A neural network was learned based on training patterns generated by the changes of natural frequency and mode shape due to various damages. Natural frequencies and mode shapes for 10 prospective damage cases were input to the trained neural network for damage estimation. The identified damage locations and severities agreed reasonably well with the accurate damages. Multi-damage cases could also be successfully estimated. Enhancement of estimation result using another parameters as input to neural network will be carried out by further study. Proposed method could be applied to other type of support structure of offshore wind turbine for structural health monitoring.

1. 서 론

협소한 국토 및 민원문제 등으로 인한 육상풍력발전의 한계점 들을 극복하고 해상의 고품질 풍력자원을 이용하기 위하여 해상풍력발전기에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. 현재 풍력발전기에 대한 시장의 중요한 요구 중 하나는 대용량화이며, 해상풍력발전기의 건설에 대한 비용을 절감하기 위해 발전기의 대용량화가 더욱 요구되고 있다. 이에 따라 풍력발전기 구조물 및 기계요소의 대형화에 따른 기술적 문제점 들이 부각되는 한편 유지관리 문제가 대두되고 있다. 특히 해상풍력발전기에 대해서는 접근성 제약으로 인한 효과적 유지관리 및 신뢰성 확보 등을 위한 기술개발이 더욱 필요한 실정이다. 따라서 상태 모니터링 시스템(condition monitoring system) 적용을 통한 효과적인 유지관리기술 개발의 중요성이 증가하고 있으며, 특히 해상풍력발전기에 있어서는 접근의 제한성, 고신뢰성 요구 및 대형화로 인하여 상태 모니터링은 필수 기술이 될 것으로 예측되고 있다.

육상풍력발전기와는 달리 해상풍력발전기의 경우 지지구조물의 제작 및 시공비용이 상당부분 차지하며, 이의 유지관리 및 건전성 모니터링에 대한 관심이 고조되고 있다. 해상풍력발전기의 지지구조물은 Fig. 1과 같이 타워, 하부구조물 및 기초로 구분할

† 교신저자; 정회원, 남서울대학교 건축공학과
E-mail : jwlee@nsu.ac.kr
Tel : (041)580-2761, Fax : (041)580-2929
* 정회원, 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부
** 정회원, 한국전력공사 전력연구원

수 있다[1]. 이는 나셀과 블레이드를 포함한 발전기 구조물을 지지하는 역할을 하는 중요한 구조물이며, 지지구조물의 손상 및 붕괴는 풍력발전기 운용을 중단시켜 막대한 비용손실을 초래하고 안전상의 문제도 야기한다. 이러한 지지구조물은 바람, 파도, 조류, 해저지질조건 등 다양한 해상환경조건에 노출되기 때문에 이러한 요인들을 모두 고려한 설계기술 및 유지관리기술 개발이 필수적이다. 효과적 유지관리를 위해서는 구조물에 대한 건전성 모니터링(structural health monitoring) 기술의 개발 및 적용이 필요하다. 즉, 해상풍력발전기 지지구조물의 구조적 안전성 확보 및 지속적 운전을 위한 효과적인 유지관리를 위해서는 구조물의 현 상태를 항시 모니터링하고 장기간에 걸쳐 누적되는 구조물의 노후화 정도 및 손상을 항시 감시할 필요가 있다.

독일 정부의 지원으로 2007년부터 수행중인 Research at Alpha Ventus 프로젝트에서는 해상풍력발전기 및 단지개발을 위하여, 지지구조물의 설계 및 유지관리에 대하여 중요하게 연구를 수행 중이다[2]. 특히 지지구조물의 건전성 평가를 위하여 2종의 5 MW급 해상풍력발전기를 대상으로 가속도계, 변형률 센서, 수압센서, 부식센서 등 다양한 종류의 센서를 설치하여 계측 중이다. 또한, 풍력발전기 타워의 효과적인 건전성 모니터링을 위하여 손상에 의한 타워의 고유진동수 및 모드형상의 변화를 이용한 손상추정기법이 제안된 바 있다[3]. 풍력발전기 운용 중 타워의 상태를 추정하기 위한 연구로서, 원격계측이 가능한 마이크로웨이브 간섭계를 이용하여 풍력발전기 타워의 진동을 계측하고 이를 이용하여 동적해석을 수행한 후 타워의 상태를 추정하는 연구가 수행된 바 있다[4].

한편, 이 연구에서 손상추정에 이용된 신경망기법(neural network technique)은 다양한 형태의 입출력 데이터를 이용할 수 있고 미리 훈련된 패턴을 이용하여 신속하게 계산을 할 수 있기 때문에 다양한 구조물에 대한 안전성 평가 및 건전성 모니터링에 널리 활용되고 있다. 예를 들어, 충격이나 손상에 의하여 발생하는 저주파 웨이브 전파에 의한 변형률 응답을 연속형 센서를 이용하여 계측하고, 신경망 기법을 이용하여 손상위치를 추정할 수 있는 연구가 수행되었다[5]. 신경망에 다양한 동적응답을 적용하는데 있어 신경망 손상평가법의 일반적인 특성과 적용의 문제점이 연구되었고[6], 강구조물 접합부의 볼트 이완을 램 웨이브와 확률 신경망을 적용하여 탐지할 수 있는 기법이 제안되었다[7].

이 연구에서는 모노파일 형식의 해상풍력발전기 지지구조물에 대한 효과적인 건전성 모니터링을 위하여 손상추정기법을 제안한다. 해저지질조건을 고려하여 지지구조물의 모드특성을 추정하며, 손상에 의한 지지구조물의 고유진동수와 모드형상의 변화를 이용하여 손상위치 및 손상정도를 판정하기 위하여 신경망기법을 사용한다.

2. 모노파일 형식 지지구조물

2.1 하부구조물 및 기초의 종류

해상풍력발전기는 Fig. 2와 같이 수심에 따라 하부

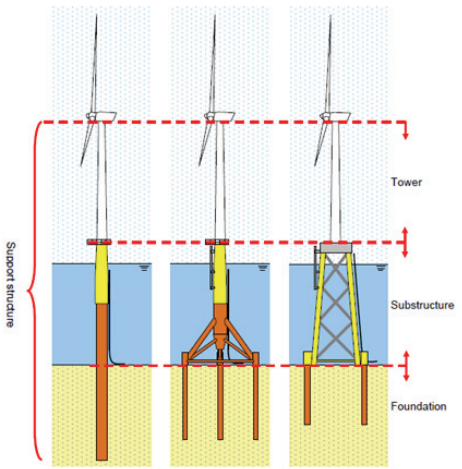


Fig. 1 Definition of support structure

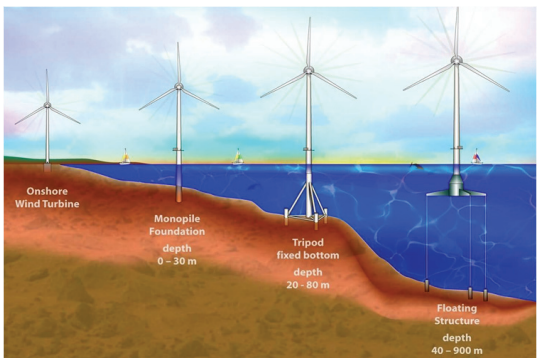


Fig. 2 Substructure and depth of water

구조물의 형식이 달라지게 된다[8].

하부구조물 및 기초의 형식은 크게 고정식과 부유식으로 분류할 수 있으며, 고정식으로는 모노파일(monopile), 중력식(gravity base), 자켓(jacket) 및 트라이포드(tripod) 등이 이용되고 있다. 한편 부유식 구조물의 형식은 부력체가 외력을 받는 경우에 대항하여 자세를 유지하는 복원성의 메커니즘에 따라 폰툰형, 주상형 및 인장 계류형으로 분류할 수 있다. 이 중 모노파일 형식은 유럽 해상풍력발전기의 하부구조물 형태 중 가장 많이 사용하는 형태로, 제작 및 설치가 용이하고 기초 형태 중 가장 경제적이며 30 m 이하의 비교적 얕은 수심에서 사용 가능하다[9]. 이는 강관 파일이 타워와 기초를 연결하며, 기초는 해저 면에서 파일을 항타 또는 드릴링으로 고정하며, 해저 지질층이 안정적이지 못할 경우 풍력발전기 자체에 위험을 초래할 수 있다. 한편, 모노파일은 해양 환경에 노출되어 있으므로 부식결함이 발생할 수 있고, 반복하중을 받으므로 피로에 의한 균열결함이 발생할 가능성이 있다.

2.2 모노파일 형식 지지구조물 모델링

이 연구에서는 손상에 의한 지지구조물의 고유진동수와 모드형상의 변화를 이용하여 손상을 추정할 수 있는 기법을 제안한다. 이를 위하여 우선 해석적으로 기법을 적용하고 검증할 필요가 있으며, 이후 실제 해상풍력발전기 운용 중 지지구조물에 대한 모드특성을 측정 및 분석하고, 실구조물에 대한 손상에 대하여 제안 기법을 검증해야 한다.

기계 서브시스템, 공력학 서브시스템, 전기 서브시스템 및 피치 시스템 등이 포함된 풍력발전기 전체에 대한 동력학 해석을 수행하고, 해석 결과로부터 구한 타워 구조물의 가속도 응답을 주파수 영역 분해 기법을 통해 분석하여 모드특성을 추정할 수 있는 과정에 대한 자세한 설명은 Lee et al.[3]을 참조할 수 있다.

이 연구에서는 모노파일 형식의 지지구조물만을 모델링하고, 나셀과 블레이드를 포함한 발전기 구조물은 타워 상부의 질량으로 처리하여 지지구조물의 모드특성을 추정하며, 이를 통하여 손상위치와 손상정도를 추정할 수 있는 기법에 대해서 설명한다. 손상추정에 사용된 지지구조물은 Table 1에 제원을 나타낸 5 MW NREL Reference 모델[10]에 적용할 수 있는 구조물로 설정하였다.

모노파일은 외경 6 m, 두께 60 mm의 강관이며, Fig. 3에 보인 바와 같이 머드라인(mudline)부터의 높이는 30 m이고 평균해수면(mean sea level)까지의 높이는 20 m이다. 해석대상 지지구조물(타워 포함)의 높이는 머드라인으로부터 107.6 m이며 높이에 따라 단면이 변화하고 위치에 따른 지지구조물 단면의 주요 특성을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 위치는 타워 최상부가 1, 머드라인 부가 0이고 그 사이의 위치는 0과 1사이의 수로 치환하여 나타내었다. Table 2 위치에서의 강성을 계산한 후 중간 값은 보간법으로 구한다.

해저 지반의 조건은 Jonkman et al.[11]에서 사용된 조건을 사용하였다. 즉, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 모노파일은 머드라인부터 지반으로 36 m 깊이로 관입

Table 1 NREL 5MW reference wind turbine

Rating	5 MW
Rotor orientation, configuration	Upwind, 3 bladed
Rotor, hub diameter	126 m, 3 m
Hub height	90 m
Rated speed	11.4 m/s
Rotor mass	110,000 kg
Nacelle mass	240,000 kg
Tower mass	347,460 kg

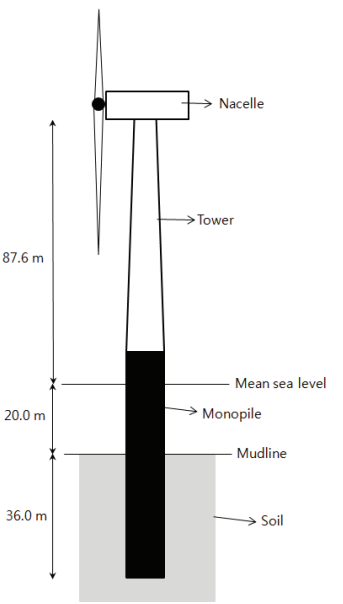


Fig. 3 Configuration of support structure

되어 있으며, API(American petroleum institute)에 의하여 정의된 반복하중 조건의 모래 지반에 대한 p-y 모델이 적용되었다. 이때 사용된 지반특성으로, 유효중량(effective weight) γ=10.0 kN/m^3, 내부마찰각(angle of internal friction) ϕ'는 Fig. 4에 보인 바와 같이 깊이에 따라 각각 33.0˚, 35.0˚ 및 38.5˚가 적용되었다.

개발되어 있는 대부분의 해상풍력발전기 해석 프로그램들에서는 p-y 모델의 비선형성 및 깊이에 따른 특성변화를 고려한 지반-파일 상호작용을 구체적으로 반영하지 못하고 있고, 동적해석에 적합한 단순화된 선형 모델을 적용하고 있으며, 다음 3가지의 선형 모델이 제안되고 있다[11]. 첫째, 기초부 모노파일의 특성과 길이를 변경하여 전체 모노파일을 캔틸레버 보로 이상화하는 유효고정길이 모델(effective fixity length model) 둘째, 기초부를 횡방향 및 회전 자유도를 동시에 가지는 스프링으로 모델링하는 연성 스프링 모델(coupled spring model) 셋째, 기초부 모노파일을 지반 깊이 방향으로 분포되는 횡방향 스프링을 가지는 보로 이상화하는 분포 스프링 모델(distributed spring model)이다. 분포 스프링 모델에서는 머드라인 하부 모노파일의 특성 및 관입길이는 변경이 없으며, 지반 스프링 상수는 깊이에 따른 값이고 p-y 모델을 이용하여 구한다. 위 세 가지 방법 중 분포 스프링 모델이 실제 모노파일의 형태를 가장 근사하게 모델링하며, 가장 정확한 모드특성을 계산할 수 있다[12]. 이 연구에서는 Fig. 5와 같이 분포 스프링 모델을 적용하여 지지구조물의 모드특성을 구하였으며, 깊이에 따른 지반 스프링 상수는 Bir and Jonkman[12]에서 사용된 값을 이용하였다.

Table 2 Section properties of support structure

Location	Mass per unit length(kg/m)	Stiffness(N.m^2)
0.00000	9517.14	1037.13E9
0.27881	9517.14	1037.13E9
0.27882	4306.51	474.49E9
0.35094	4030.44	413.08E9
0.42306	3763.45	357.83E9
0.49517	3505.52	308.30E9
0.56729	3256.66	264.08E9
0.63941	3016.86	224.80E9
0.71153	2786.13	190.06E9
0.78365	2564.46	159.49E9
0.85576	2351.87	132.77E9
0.92788	2148.34	109.54E9
1.00000	1953.87	89.49E9

한편, 지지구조물의 모드특성을 구하기 위해서는 모노파일의 접수효과에 의한 부가수질량을 고려해야한다. 반경 a를 가지는 원주가 유체 속에서 운동할 경우 단위길이당 부가수질량은 다음 식과 같다. 이는 무한장의 원주가 유체 속에서 운동할 경우 2차원 원형단면에 대한 부가수질량 계산식이다.

$$\overline{m} = \pi \rho a^2 \tag{1}$$

여기서 ρ는 유체의 밀도이다. 우선, 식 (1)을 이용하여 부가수질량을 계산한 후, 3차원 효과를 고려한 수정계수를 근사적으로 적용하여 부가수질량을 수정하였고 이를 모드특성 계산 시 적용하였다.

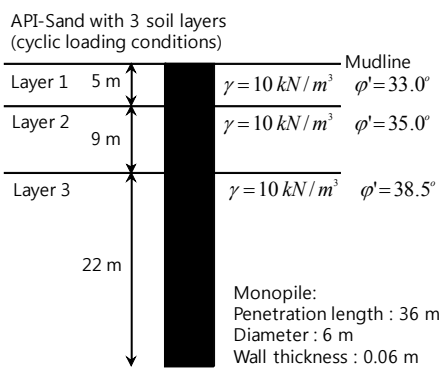


Fig. 4 Soil profile

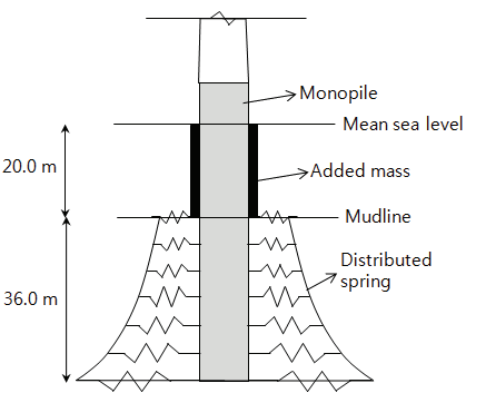


Fig. 5 Simplified model of monopile foundation

3. 지지구조물의 모드특성 추정

Fig. 3에 보인 대상 지지구조물의 고유주파수와 모드형상을 BModes 프로그램[13]을 이용하여 구하였다. 이 프로그램은 풍력발전기의 블레이드 및 타워와 같이 길이 방향으로 구조특성이 분포가 되는 구조물의 모드특성을 계산하는 유한요소 코드이다. 앞에서 언급된 지반의 강성 및 부가수질량의 영향을 살펴보기 위하여, 기초부가 머드라인에서 고정되어 있는 경우와 분포 스프링 모델을 적용한 경우에 대하여 각각 부가수질량을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 고유주파수와 모드형상을 계산하였다. 즉, 4가지 경우의 바람방향 고유주파수를 Table 3에 비교하였으며, 기초부가 고정된 경우와 분포 스프링 모델을 적용한 2가지 경우(부가수질량 고려)의 모드형상을 Fig. 6에 비교하였다.

기초부 고정조건에서 분포 스프링 모델을 적용함으로써 고유주파수가 감소함을 알 수 있다. 한편, 2가지 조건에서 고유주파수는 부가수질량의 영향에 의하여 모두 감소하고 특히 고차 모드일수록 영향이 큰 것을 알 수 있다. 그러나 기초부 고정의 경우 감소비율은 분포 스프링 모델의 경우에 비해 미미함을 알 수 있다. 또한, 기초부 고정여부에 따른 모드형상의 차이도 고차 모드일수록 크게 나타나며, 분포 스프링 모델을 적용하였을 때 머드라인에서 모달 변위가 발생함을 알 수 있다. 손상추정을 위한 지지구조물 모드특성 추정에서는 Fig. 5와 같이 부가수질량을 고려하고 분포 스프링 모델을 적용하였다.

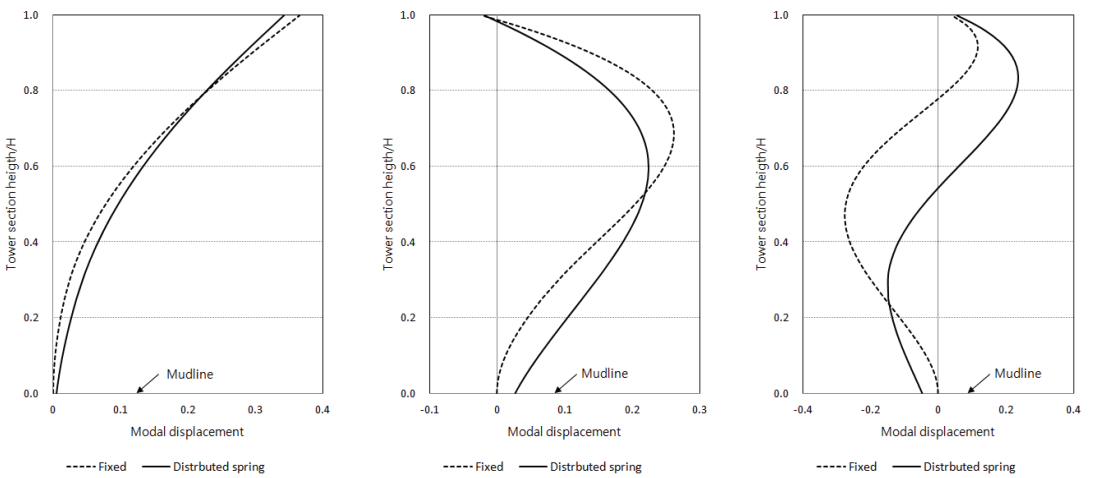
Table 3 Natural frequencies of support structure(Hz)

Mode no.	Fixed		Distributed spring	
	No added mass	Added mass	No added mass	Added mass
1	0.285	0.284	0.244	0.243
2	1.873	1.847	1.523	1.377
3	3.880	3.629	3.230	2.730

4. 지지구조물의 손상추정

4.1 신경망기법

이 연구에서 사용된 다중 퍼셉트론 신경망(multi-layer perception neural networks)은 다수의 입력과 출력의 관계를 표현하는 일종의 선형 또는 비선형 함수로 볼 수 있으며, 이 때 입출력 관계는 인접한 두 층에 존재하는 뉴런간의 관계를 설정하는 연결강도(synaptic weight)에 의해 결정된다. 따라서, 연결강도가 변화하면 입출력 관계도 함께 변화한다. 이러한 연결강도를 주어진 패턴으로 훈련시켜 개선시키는 과정을 학습(training or learning algorithm)이라 하며, 보편적으로 이용되는 역전파 학습방법이 적용된다. 다중 퍼셉트론 신경망에서 입력층은 측정



(a) First mode (b) Second mode (c) Third mode

Fig. 6 Mode shapes of support structure

된 데이터로부터 얻은 구조물의 거동을, 출력층은 추정할 손상지수로 각각 구성할 수 있다.

4.2 손상위치 및 손상정도 추정

모노파일에 발생할 수 있는 대표적인 결함형태는 2.1절에서 언급된 부식 및 피로균열이다. 부식은 결국 부재 단면적을 감소시키는 효과가 있으며 이로 인하여 부재의 강성이 저하된다. 피로균열도 균열발생 위치에서 부재의 강성저하를 야기하므로, 모노파일에서 발생할 수 있는 대표적인 결함형태인 부식과 균열손상은 손상전후 강성비율을 활용하여 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 이 연구에서는 손상전후 강성의 비율을 나타낼 수 있도록 다음과 같이 강성지수(α_j) 및 손상정도(d_j)를 정의하였다.

$$\alpha_j = \frac{(EI)_j^d}{(EI)_j^o} \text{ and } d_j = 1 - \alpha_j \quad (2)$$

여기서 j는 Table 2의 지지구조물 단면 위치, 'o'와 'd'는 각각 건전상태와 손상상태를 의미한다. 또한 E는 영계수, I는 단면이차모멘트이며 EI는 휨강성이다.

대상 지지구조물에 대하여 우선 12,000셋의 손상위치 및 손상정도를 무작위로 샘플링한 후 이에 대한 지지구조물의 고유주파수와 모드형상을 BModes 프로그램을 이용하여 각각 구하였다. 이때 모드형상은 Fig. 7에 보인 9개 위치에서 가속도를 측정하는 것으로 가정하여 그 위치에서의 모달 변위로 구하였다.

각각의 손상경우에 대하여 변화된 1차, 2차 및 3차 고유진동수와 모드형상을 구하였다. 이후 손상전후 고유진동수의 비율과 벡터 놈(norm)으로 노멀라이징(normalizing)한 모드형상으로 12,000셋의 훈련패턴을 생성하였다. 즉, 각각의 훈련패턴은 3개의 손상전후 고유진동수 비율, 27개의 모드형상 성분 및 이에 해당하는 손상위치와 손상정도로 구성된다.

손상위치 및 정도 추정을 위한 신경망의 구조를 Fig. 8에 나타내었다. 신경망 입력자료는 30개로써 1차, 2차 및 3차 고유진동수 비율과 모드형상 성분들이고 출력층은 13개 위치(Table 2 참조)에서의 강성지수(α_j)로 구성하였다. 한편, 23개 및 17개의 노드를 가지는 2개의 은닉층을 구성하였다. 생성된 훈련패턴을 이용하여 신경망을 학습시켰으며 이때, 안정된 추정오차를 위하여 훈련패턴의 순서를 무작위로 하여 100회의 반복학습을 수행하였다.

학습이 종료된 후 Table 4에 보인 10가지 손상경우에 대한 고유진동수와 모드형상을 학습된 신경망에 입력하여 손상위치 및 정도를 추정하였다. 이때 Table 4에서의 위치는 Table 2에서 강성이 정의된

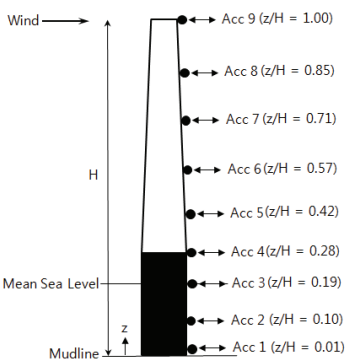


Fig. 7 Locations of modal displacement

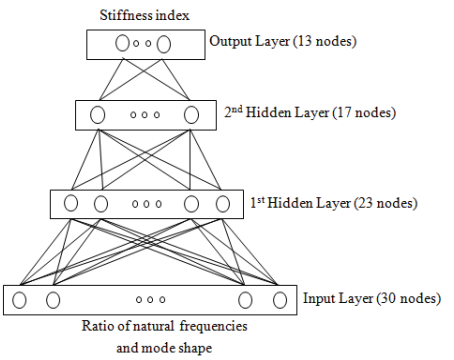
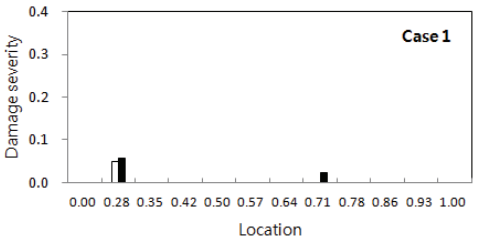


Fig. 8 Structure of neural networks

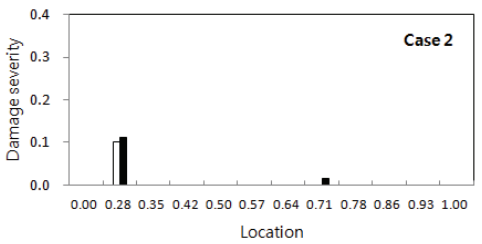
Table 4 Damage cases

Case	Damage severity(%)	
	0.000(location)	0.279(location)
1	-	5
2	-	10
3	-	20
4	-	30
5	20	-
6	30	-
7	10	5
8	10	20
9	20	30
10	30	20

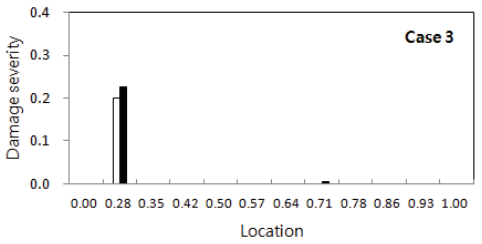
위치이며 손상정도는 식 (2)에서 정의되었다. 모노파일 하단의 머드라인 부분이 모멘트 하중을 크게 부담하고, 모노파일과 타워의 연결부는 단면이 불연속이기 때문에 손상이 발생할 확률이 높은 것으로 판단하여, Table 4의 손상 경우를 결정할 때 의도적으로 이 2부분의 손상을 설정한 후 제안된 기법을 활용



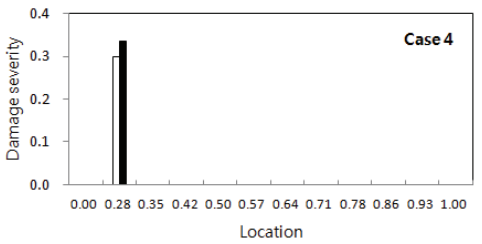
(a) Case 1



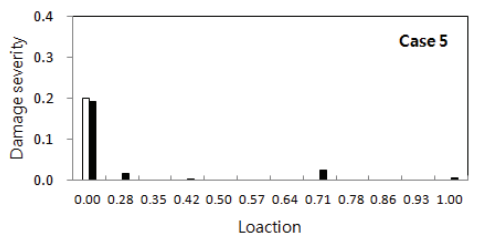
(b) Case 2



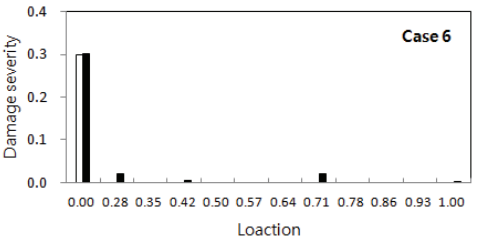
(c) Case 3



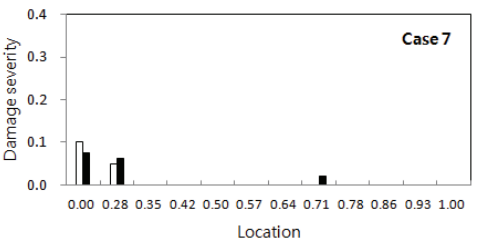
(d) Case 4



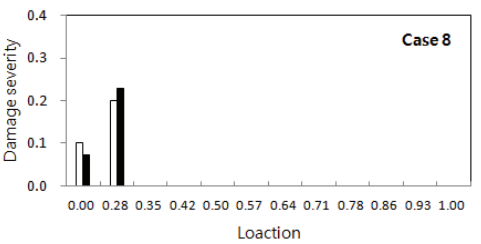
(e) Case 5



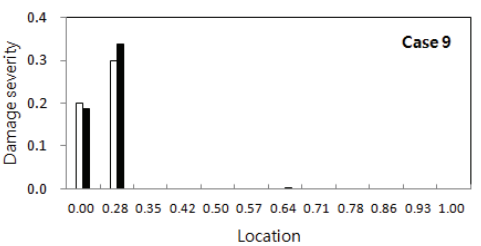
(f) Case 6



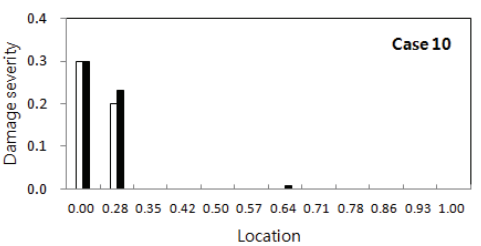
(g) Case 7



(h) Case 8



(i) Case 9



(j) Case 10

Fig. 9 Results of damage estimation(□: accurate, ■: estimated)

Table 5 Damage severity and estimation error

Case	0.000 (location)			0.279 (location)		
	Accurate (%)	Estimated(%)	Error (%)	Accurate (%)	Estimated (%)	Error (%)
1	-	-	-	5	5.7	14.0
2	-	-	-	10	11.1	11.0
3	-	-	-	20	22.6	13.0
4	-	-	-	30	33.5	11.7
5	20	19.3	-3.5	-	-	-
6	30	30.2	0.7	-	-	-
7	10	7.5	-25.0	5	6.2	24.0
8	10	7.3	-27.0	20	22.9	14.5
9	20	18.8	-6.0	30	33.7	12.3
10	30	30.0	0.0	20	23	15.0

하여 손상 추정을 수행하였다.

손상추정결과를 Fig. 9에 나타내었는데, x축은 Table 2에서 설명된 지지구조물의 위치로써, 최상부가 1, 최하부가 0이고 그 사이의 위치는 0과 1사이의 수로 치환되었다. y축은 식 (2)에서 설명된 손상정도이며, 하얀색 막대는 Table 4에서 설정한 손상정도(정확해)이고 검정색 막대는 제안된 기법을 이용하여 추정한 손상정도(추정치)이다. Table 5는 각 손상 경우별 손상추정 결과와 추정오차를 정리하였다. 추정오차에서 음수는 손상을 과소 추정한 경우이고 양수는 과대 추정한 경우이다.

모든 손상 경우에 대한 평균 추정오차는 약 12.8 %로써 비교적 정확하게 손상위치 및 정도를 추정할 수 있었다. 또한, case 7 ~ 10까지의 복수 손상 경우에는 손상정도가 적을 때(case 7 및 8) 추정오차가 증가하지만, 합리적으로 손상을 추정함을 알 수 있다. 실용적 측면에서 보면, 손상위치를 합리적으로 추정할 수 있다면 손상정도 추정의 정확성은 상대적으로 중요성이 적어질 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 향후 손상추정의 정확성을 개선시키기 위한 연구가 진행되어야할 것으로 판단된다. 예를 들어, 이 연구에서는 신경망의 입력 자료로 지지구조물의 모드특성만을 활용하였지만, 신경망 기법의 특성 상 모드특성에 추가하여 변형률, 경사 및 변위 등 다양한 계측자료를 함께 사용할 수 있다. 즉, 다양한 입력 자료를 함께 활용함으로써 추정결과를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 신경망 기법 외에 다른 기법을 병행하여, 손상추정을 복수로 수행한다면 손상에 대한 추정 결과의 정확성과 신뢰성을 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

이 연구에서는 해상풍력발전기 지지구조물의 건전성 감시를 위하여 지지구조물의 고유진동수 및 모드형상을 이용한 손상추정기법을 제안하였다. 이를 위하여 모노파일 형식 해상풍력발전기 지지구조물을 대상으로, 해저지질조건을 고려하여 모드특성을 추정하였다. 손상에 의한 지지구조물의 고유진동수와 모드형상의 변화를 이용하여 신경망을 훈련시키고, 이를 통하여 10가지 손상경우에 대해 손상위치 및 손상정도를 추정하였다. 모든 손상 경우에 대해 비교적 정확하게 손상위치와 손상정도를 추정할 수 있었으며, 복수 손상 경우에 대해서도 합리적으로 손상을 추정함을 알 수 있었다.

향후, 신경망에 다양한 입력 자료를 함께 활용함으로써 추정결과를 좀 더 향상시킬 필요가 있을 것으로 판단되며, 제안된 기법을 응용하여 다른 형식의 해상풍력발전기 지지구조물에 대한 건전성 감시에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업(융합원천)인 “서남해 2.5 GW 해상풍력을 위한 실증단계 연구(과제번호 : 20113040020010)”과제의 세부연구 일부 내용임을 밝히는 바이며, 연구수행에 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Wybren de Vries, W., 2011, Final Report WP 4.2 Support Structure Concepts for Deep Water Sites, Delft University of Technology.

(2) Durstewitz, M., 2009, Research Goes Offshore Alpha Ventus Ready for Rave Research Activities, European Offshore Wind 2009 Conference & Exhibition, Stockholm, Sweden.

(3) Lee, J. W., Bang, J. S., Kim, S. R. and Han, J. W., 2012, Damage Estimation Method for Wind Turbine Tower Using Modal Properties, Journal of the Korean Institute for Structural Maintenance and

Inspection, Vol. 16, No. 2, pp. 87~94.

(4) Pieraccini, M., Parrini, F., Fratini, M., Atzeni, C. and Spinelli, P., 2008, In-service Testing of Wind Turbine Tower Using a Microwave Sensor, Renewable Energy, Vol. 33, pp. 13~21.

(5) Lee, J. W., 2010, Damage Detection of Plate Using Long Continuous Sensor and Wave Propagation, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 20, No. 3, pp. 272~278.

(6) Oh, J. W., Heo, G. H. and Jung, E. T., 2010, Experimental Study for Characteristics of Assessment of Neural Networks for Structural Damage Detection, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 15, No. 5, pp. 179~186.

(7) Park, S. H., Lee, J. J., Yun, C. B. and Roh, Y., 2005, Application of Lamb Waves and Probabilistic Neural Networks for Health Monitoring of Joint Steel Structures, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 53~62.

(8) Musial, W., 2005, Overview: Potential for Offshore Wind Energy in the Northeast, Offshore Wind Energy Collaborative Workshop, Resolve, Washington D. C..

(9) Son, C. U., Lee, K. S., Kim, M. E., Hwang, B. S., Lee, G. H., Shin, Y. J., Kroening, J. and Gsaenger, S., 2010, Offshore Wind Turbine Technology, A-JIN, Korea.

(10) Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G., 2009, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report, NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory.

(11) Jonkman, J., Butterfield, S., Passon, P., Larsen, T., Camp, T., Nichols, J., Azcona, J. and Martinez, A., 2008, Offshore Code Comparison Collaboration within IEA Wind Annex XXIII: Phase II Results Regarding Monopile Foundation Modeling, Conference Paper, NREL/CP-500-42471, National Renewable Energy Laboratory.

(12) Bir, G. and Jonkman, J., 2008, Modal Dynamics of Large Wind Turbines with Different Support Structures, Conference Paper, NREL/ CP-500-43045, National Renewable Energy Laboratory.

(13) Bir, G. S., 2007, Users Guide to BModes (Software for Computing Rotating Beam Coupled Modes), National Renewable Energy Laboratory.