

# 모드특성을 이용한 풍력발전기 타워의 손상추정기법

## Damage Estimation Method for Wind Turbine Tower Using Modal Properties

이 종 원<sup>1)\*</sup>      방 제 성<sup>2)</sup>      김 상 렬<sup>2)</sup>      한 정 우<sup>2)</sup>  
Lee, Jong Won      Bang, Je Sung      Kim, Sang Ryul      Han, Jeong Woo

### Abstract

A damage estimation method of wind turbine tower using natural frequency and mode shape is presented for effective condition monitoring. Dynamic analysis for a wind turbine was carried out to obtain the response of tower from which modal properties were identified. A neural network was learned based on training patterns generated by the changes of natural frequency and mode shape due to various damages. The changes of modal property were calculated using a program for modal parameter estimation. Damage locations and severities could be successfully estimated for 10 damage cases including multi-damage cases using the trained neural network. The damage severities for very small damages generally tends to be slightly under-estimated however, the identified damage locations agreed reasonably well with the accurate locations. Enhancement of the estimation result for very small damage and verification of the proposed method through experiment will be carried out by further study.

**Keywords** : Tower, Wind Turbine, Damage Estimation, Natural Frequency, Mode Shape

### 1. 서론

현재 풍력발전기에 대한 시장의 중요한 요구 중 하나는 대용량화이며 이에 따른 구조물 및 기계요소들의 대형화가 수반되어야 한다. 또한, 협소한 국토 및 민원문제 등으로 인한 육상풍력발전의 한계점 들을 극복하고 해상 고 품질 풍력자원을 이용하기 위하여 해상풍력발전기에 대한 개발이 요구되고 있다. 이러한 해상풍력발전기 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.

이러한 대형 풍력발전기의 효과적 유지관리를 위해서는 상태 모니터링 기술의 개발 및 적용이 필요하다. 즉, 대형 풍력발전기의 구조적 안전성 확보 및 지속적 운전을 위한 효과적인 유지관리를 위해서는 정기점검이 필수적이나, 이것만으로 안전성을 충분히 보장할 수 없기 때문

에 상태 모니터링 시스템을 설치하여, 구조물 및 기계부품의 현 상태를 항시 모니터링하고 장기간에 걸쳐 누적되는 구조물 및 기계의 노후화 정도 및 갑작스런 고장이나 손상을 항시 감시할 필요가 있다.

타워는 블레이드를 통하여 전달되는 바람하중과 나셀 및 블레이드의 무게를 지지하는 역할을 하는 풍력발전기의 핵심 구조물로서, 풍력발전기가 대형화되면서 가격이나 중량 면에서 타워가 차지하는 비중이 증가하고 있다. 즉, 타워는 풍력발전기 제작비용의 약 20~25%를 차지하는 고가의 구조물이며 풍력발전기의 구성요소 중에서 가장 무겁고 크기가 큰 요소이다. 최근 세계적으로 풍력발전기 시장의 큰 부분을 차지하는 2 MW급 혹은 3 MW급 풍력발전기에 사용되는 타워의 경우에는 발전단지에 따라 다르지만 약 80~100 m의 길이와, 나셀과 블레이드를 포함한 구조물의 무게인 약 100톤 이상의 무게를 지탱할 수 있도록 설계되어야한다(황병선, 2009). 따라서 타워에 대한 유지관리의 중요성이 부각되고 있으며, 상태 모니터링을 통한 상태기반 유지관리에 대한 기술개발이 요구되고 있다.

1) 정회원, 남서울대학교 건축공학과 조교수, 교신저자  
2) 정회원, 한국기계연구원 기계시스템안전연구본부 선임연구원

\* Corresponding author : jwlee@nsu.ac.kr 041-580-2761  
• 본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

타워의 손상 및 붕괴는 풍력발전기 운용을 중단시켜 막대한 비용손실을 초래하고, 안전상의 문제도 야기한다. 풍력발전기 고장의 원인 중 타워의 손상 및 붕괴가 차지하는 비율이 약 12%로 조사된 바 있으며, 그 원인은 폭풍, 강풍, 재료의 피로, 용접불량 등 다양한 것으로 보고된 바 있다(Chou and Tu, 2011). 풍력발전기 상태 모니터링 시스템(condition monitoring system)을 인증받기 위해서는 타워에 대한 계측이 포함되어야 한다. 예를 들어, 대표적인 인증기관 중 하나인 GL(Germanischer Lloyd)의 풍력발전기 상태 모니터링 시스템에 대한 인증 가이드라인에서는 타워의 바람방향 및 횡방향 진동계측을 최소 요구사항으로 제시하고 있다(Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, 2007). 한편, 원격 계측이 가능한 마이크로웨이브 간섭계를 이용하여 풍력발전기 타워의 진동을 계측하고 이를 이용하여 동적해석을 수행하여, 풍력발전기 운용 중 타워의 상태를 추정하는 연구가 진행된 바 있다(Pieraccini et. al., 2008).

한편, 본 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 건전성감시에 널리 활용되고 있다. 예를 들어, 보 구조물에 대한 순차적 손상추정을 위하여 시간-모달 특성과 인공신경망을 이용하였으며(Parka et. al., 2009), 폐지 신경망과 데이터 퓨전기법을 활용한 2단계 손상추정기법을 개발하여 7층 건물에 적용하였다(Jiang et. al., 2011). 또한, 신경망에 다양한 동적응답을 적용하는데 있어 신경망 손상평가법의 일반적인 특성과 적용의 문제점이 연구되었고(오주원 등, 2010), 구조물 손상에 의한 고유진동수의 감소율로 훈련된 인공신경망을 활용하여 손상을 추정하였으며(최혁, 이규원, 2006), 신경망을 구조해석기로 사용하여 최적화에 의한 모델 업데이트를 이용한 손상평가기법이 제안되었다(조효남 등, 2003).

본 연구에서는 풍력발전기 타워의 고유진동수 및 모드형상을 이용하여 손상을 추정할 수 있는 기법을 제안한다. 이를 위하여 풍력발전기에 대한 동력학 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 타워의 거동을 해석하고, 결과를 처리하여 모드특성을 추정한다. 또한 손상에 의한 타워의 고유진동수와 모드형상의 변화를 이용하여 손상위치 및 손상정도를 추정하기 위하여 신경망기법을 사용한다.

## 2. 풍력발전기 타워의 모드특성 추정

### 2.1 풍력발전기 모델링 및 해석

본 연구에서는 실제 풍력발전기 타워에 대한 계측을 수행하기 전에 우선 동력학 해석 프로그램을 이용하여 타워의 거동을 시뮬레이션하고, 여기서 얻어진 응답을 이용하여 타워의 모드특성을 추정한다. 타워의 거동을 구하기 위해서는 풍력발전기 전체에 대한 해석을 수행해야 하며, 이를 위해서는 기계 서브시스템, 공력학 서브시스템, 전기 서브시스템 및 피치 시스템 등을 각각 모델링 한 후 통합하여야 한다. 본 연구에서는 풍력발전기의 비선형운동방정식의 해를 구할 수 있는 FAST 프로그램(Jonkman and Buhl Jr., 2005)을 이용하여 풍력발전기에 대한 전체 해석을 수행하였다. 이 프로그램을 이용하면 풍력발전기에 대한 강체역학 및 블레이드와 타워에 대한 유연체역학 해석이 가능하고, 바람하중이 작용하는 상태에서 시간에 대한 공력학 및 구조 응답을 구할 수 있다. 이에 대한 자세한 설명은 이종원(2011)을 참조할 수 있다.

타워의 모드특성을 추정하기 위하여, Table 1에 나타난 제원의 1.5 MW용량 수평축 업윈드 3-블레이드 풍력발전기에 대하여 FAST 프로그램을 이용하여 동력학 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 풍력발전기에 적용할 바람을 생성하기 위하여 TurbSim 프로그램(Jonkman, 2009)을 이용하였다. 30분간의 바람데이터를 생성하여 시뮬레이션을 수행하였으며 평균풍속은 10 m/sec으로 설정하였다. 해당 풍력발전기의 정격풍속은 12 m/sec이며, 가변속 제어방식이므로 정격풍속 이하에서는 풍속 증가에 따라 로터 회전수 및 출력이 증가하고, 정격풍속 이상에서는 출력이 정격출력으로 일정하게 제어된다. 본 연구에서는 보다 다양한 로터 회전수에 대한 거동에 대해 시뮬레이션을 수행하고 이를 분석하기 위하여 정격풍속보다 약간 낮은 10 m/sec를 평균풍속으로 설정하였다.

Fig. 1에는 동력학 시뮬레이션을 수행을 위하여 생성된 바람의 시간이력을 나타내었다.

Table 1 Model specification

No. of blades	Rotor Diameter (m)	Rated power (kW)	Control method	Generator type
3	70	1500	Variable speed & pitch control	Simple-induction

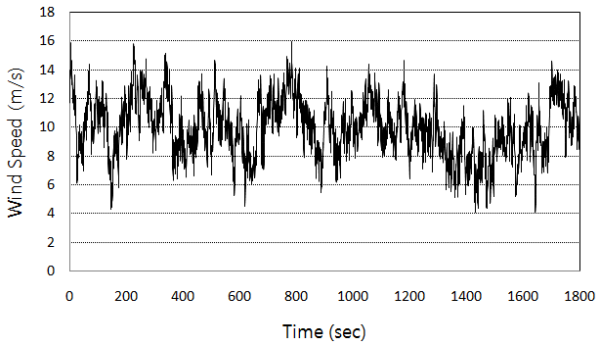


Fig. 1 Time history of the wind for dynamic analysis

Table 2 Tower section properties

Location	Mass per unit length (kg/m)	Stiffness (N.m <sup>2</sup> )
0.000	2549.74	2.4306e+011
0.111	2275.82	1.9366e+011
0.222	2017.46	1.5220e+011
0.333	1774.66	1.1779e+011
0.444	1547.43	8.9570e+010
0.556	1335.75	6.6753e+010
0.667	1139.64	4.8601e+010
0.778	959.09	3.4430e+010
0.889	794.10	2.3610e+010
1.000	644.67	1.5566e+010

해석대상 타워의 높이는 82.39 m, 질량은 123003 kg, 블레이드와 나셀을 포함한 타워 상부의 질량은 780566 kg이며 풍력발전기 전체 질량은 201059 kg이다. 높이에 따라 단면이 변화하며, 위치에 따른 타워 단면의 주요 특성을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 위치는 타워 최상부가 1, 최하부가 0이고 그 사이의 위치는 0과 1사이의 수로 치환하여 나타내었다. 또한, 타워의 강성은 다음 식 (1)을 이용하여 구하고, Table 2에 보인 위치에서의 강성을 계산한 후 중간 값을 보간하여 구한다.

$$EI = \iint E(x,y) x^2 dx dy \quad (1)$$

여기서  $E(x,y)$ 는 탄성계수이며  $x$  및  $y$ 는 각각 타워 단면의 도심에서 바람방향 단면요소 및 횡방향 단면요소까지의 거리이다.

한편, 타워의 고유주파수와 모드형상을 구하기 위하여 Fig. 2에 보인 5개 위치에서 바람방향 가속도(Acc 1 ~ Acc 5)를 시뮬레이션 결과로부터 구하였으며 이에 대한 시간이력을 Fig. 3에 나타내었다. 즉, Fig. 3은 대상 풍력발전기의 기계 서브시스템, 공력학 서브시스템, 전기 서

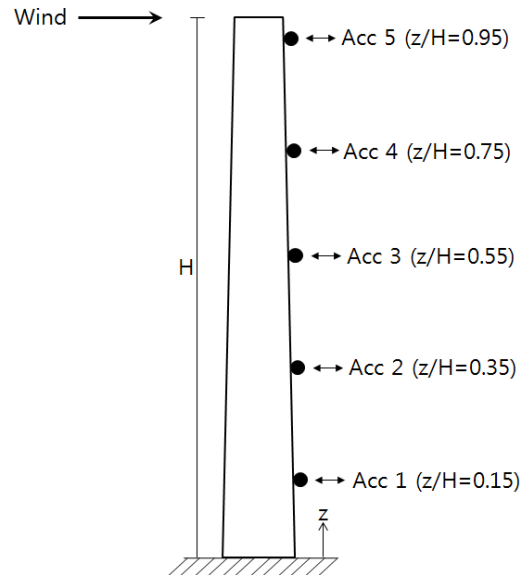


Fig. 2 Measurement locations

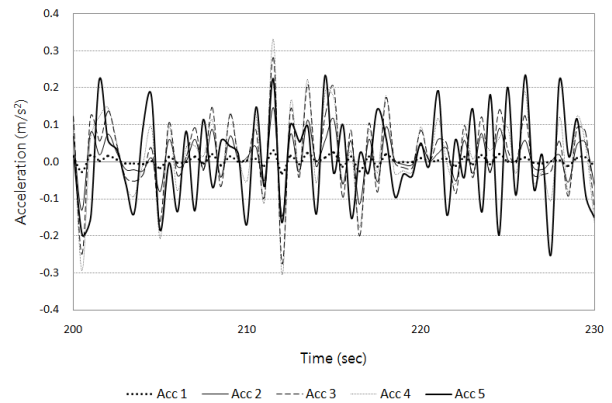


Fig. 3 Acceleration time histories

브시스템 및 피치 시스템 등의 효과를 모두 고려하여 동력학 시뮬레이션을 수행한 후 얻어진 타워의 가속도 응답이다.

## 2.2 타워의 모드특성 추정

본 연구에서는 주파수 영역 분해 기법(frequency domain decomposition method)을 이용하여 타워의 고유주파수와 모드형상을 구하였다(Brinker et. al., 2000). 이 방법에서는 각 측정자료로부터 구한 스펙트럼 밀도 함수(spectral density function)를 특이치 분해(singular value decomposition)하여 구해지는 행렬에서 고유주파수와 이에 해당하는 모드형상을 추정할 수 있다. 즉, N개

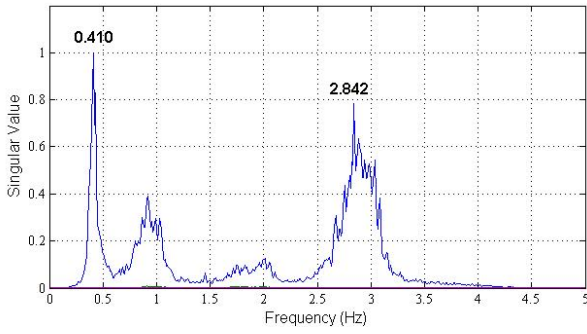


Fig. 4 Natural frequencies

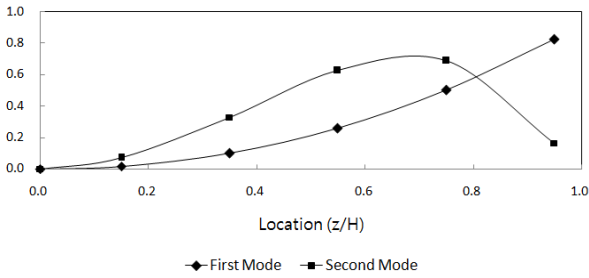


Fig. 5 Mode shapes

의 계측자료 ( $x(t) \in \mathbf{R}^N$ )에 대하여 구조응답의 스펙트럼 밀도 함수 행렬 ( $\mathbf{S}_{xx}(\omega) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ )을 각 계측자료의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)와 크로스 스펙트럼 밀도(cross spectral density)로부터 구할 수 있으며, 이를 다음 식 (2)와 같이 특이치 분해하여 대각행렬  $\mathbf{s}(\omega)$ 와 유니타리행렬(unitary matrix)  $\mathbf{U}(\omega)$ 와  $\mathbf{V}(\omega)$ 를 구할 수 있다.

$$\mathbf{S}_{xx}(\omega) = \mathbf{U}(\omega)^T \mathbf{s}(\omega) \mathbf{V}(\omega) \quad (2)$$

이때, 특이치의 피크가 발생하는 주파수  $\omega_k$ 에서  $\mathbf{U}(\omega_k)$ 의 열벡터를 취함으로써  $k$ 번째 모드형상을 구할 수 있다.

앞에서 구한 5개 위치에서의 바람방향 가속도(Acc 1 ~ Acc 5)로부터 주파수 영역 분해 기법을 이용하여 구한 고유주파수와 모드형상을 2차모드까지 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 즉, 1차 고유주파수는 0.410 Hz, 2차 고유주파수는 2.842 Hz로 계산되었다. 한편, 동력학 시뮬레이션 결과, 로터의 평균 회전속도는 18.2 rpm이며, 3-블레이드 풍력발전기에 대한 가변속 제어방식이므로 Fig. 4의 약 0.9 Hz 근방의 주파수 성분이 블레이드 회전 에 의한 타워의 진동성분인 것으로 추정된다.

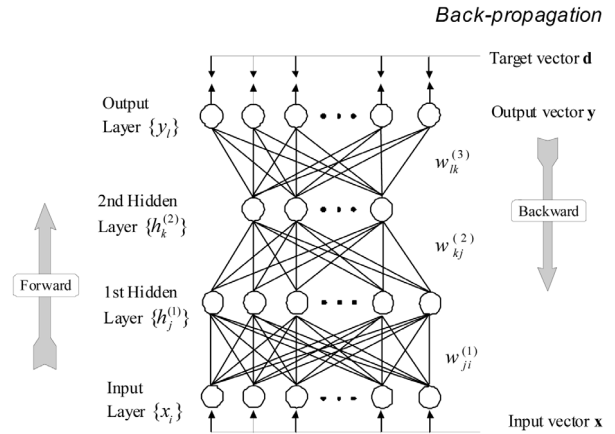


Fig. 6 Back-propagation neural networks

### 3. 타워의 손상추정

#### 3.1 신경망기법

본 연구에서 사용된 다중 퍼셉트론 신경망(multi-layer perception neural networks)은 Fig. 6에 보이는 바와 같이 다수의 입력과 출력의 관계를 표현하는 일종의 선형 또는 비선형함수로 볼 수 있으며, 이 때 입출력 관계는 인접한 두 층에 존재하는 뉴런(neuron) 간의 관계를 설정하는 연결강도(synaptic weight)에 의해 결정된다(Haykin, 1994). 따라서, 연결강도가 변화하면 입출력 관계도 함께 변화한다. 이러한 연결강도를 주어진 패턴으로 훈련시켜 개선시키는 과정을 학습(training or learning algorithm)이라 하며, 보편적으로 이용되는 역전파(back-propagation) 학습방법이 적용된다. 다중 퍼셉트론 신경망에서 입력층은 측정된 데이터로부터 얻은 구조물의 거동을, 출력층은 추정할 손상지수로 각각 구성할 수 있다.

#### 3.2 손상위치 및 손상정도 추정

손상추정을 위하여 다음과 같이 강성지수( $\alpha_j$ ) 및 손상정도( $d_j$ )를 정의하였다.

$$\alpha_j = \frac{(EI)_j^d}{(EI)_j^o} \text{ and } d_j = 1 - \alpha_j \quad (3)$$

여기서  $j$ 는 Table 2의 타워 단면 위치, 'o'와 'd'는 각각 건전상태와 손상상태를 의미한다.

우선 4000셋의 손상위치 및 손상정도를 무작위로 샘플

링한 후 이에 대한 고유진동수와 모드형상을 BModes 프로그램(Bir, 2007)을 이용하여 각각 구하였다. 이 프로그램은 풍력발전기의 블레이드 및 타워와 같이 길이 방향으로 구조특성이 분포가 되는 구조물의 모드특성을 계산하는 유한요소 코드이다. 모드특성은 구조물 고유의 성질로써 외부하중인 바람에 의한 풍력발전기 전체의 동력학 시뮬레이션 수행 과정을 생략하고 구할 수 있다. 즉, 신경망 기법을 이용하기 위해서는 다양한 손상 경우 대한 타워의 모드특성을 해석적으로 계산해야하는데, 4000셋의 모든 경우에 대하여 동력학 시뮬레이션을 수행하는 것은 비효율적이며, 손상경우에 대한 모드특성 추정 프로그램을 이용하는 것이 합리적이라 판단된다.

각각의 손상경우에 대하여 변화된 1차 및 2차 고유진동수와 가속도 응답이 구해지는 5개 위치(Fig. 2 참조)에서의 1차 및 2차 모드형상을 구하였다. 이후 손상전후 고유진동수의 비율과 벡터 놈(norm)으로 노멀라이징(normalizing)한 모드형상으로 4000셋의 훈련패턴을 생성하였다. 즉, 각각의 훈련패턴은 2개의 손상전후 고유진동수 비율, 10개의 모드형상 성분 및 이에 해당하는 손상위치와 손상정도로 구성된다.

손상위치 및 정도 추정을 위한 신경망의 구조를 Fig. 7에 나타내었으며, 신경망 입력자료는 12개로써 1차 및 2차 고유진동수 비율과 1차 및 2차 모드형상 성분들이고 출력층은 10개 위치(Table 2 참조)에서의 강성지수( $\alpha_j$ )로 구성하였다. 한편, 11개 및 10개의 노드를 가지는 2개의 은닉층을 구성하였다. 생성된 훈련패턴을 이용하여 신경망을 학습시켰으며 이때, 안정된 추정오차를 위

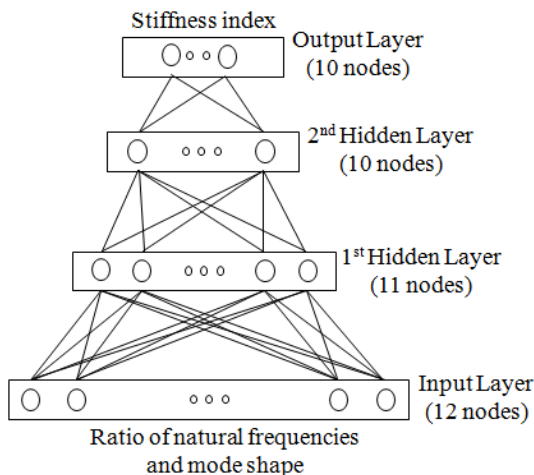


Fig. 7 Structure of neural networks

하여 훈련패턴의 순서를 무작위로 하여 100회의 반복학습을 수행하였다.

학습이 종료된 후 Table 3에 나타난 10가지 손상경우에 대한 고유진동수와 모드형상을 학습된 신경망에 입력하여 손상위치 및 정도를 추정하였으며, 이때 Table 3에서의 위치는 Table 2에서 강성이 정의된 위치이며 손상정도는 식 (3)에서 정의되었다. 타워 최하단 부분이 바람에 의한 모멘트 하중을 가장 크게 부담하고, 개구부의 영향 등으로 인하여 손상이 발생할 확률이 높다. 이를 고려하여, Table 3의 손상 경우를 결정할 때 의도적으로 타워 최하단의 손상을 크게 설정한 후 제안된 기법을 활용하여 손상 추정을 수행하였다.

손상추정결과를 Fig. 8에 나타내었는데, x축은 Table 2에서 설명된 타워의 위치로써, 최상부가 1, 최하부가 0이고 그 사이의 위치는 0과 1사이의 수로 치환되었다. y축은 식 (3)에서 설명된 손상정도이며, 하얀색 막대는 Table 3에서 설정한 손상정도(정확해)이고 검정색 막대는 제안된 기법을 이용하여 추정한 손상정도(추정치)이다. Table 4에는 각 손상 경우별 손상추정 결과와 추정오차를 정리하였다. 추정오차에서 음수는 손상을 과소 추정한 경우이고 양수는 과대 추정한 경우이다.

모든 손상 경우에 대한 평균 추정오차는 약 8.8%로써 비교적 정확하게 손상위치와 손상정도를 추정할 수 있었다. 또한, Case 6 ~ 10까지의 복수 손상 경우에 대해서도 성공적으로 손상을 추정함을 알 수 있다. 그러나 미소 손상의 경우 즉, 손상정도가 3%인 단일 손상의 경우(Case 1), 손상이 약간 과소 평가됨을 알 수 있다. 미소 손상에 대한 과소 평가의 경향은 복수 손상 경우에도 나타나는데, 손상정도가 3% 및 5%인 경우(Case 6 및 7)

Table 3 Damage cases

Case	Damage severity(%)	
	0.000(location)	0.222(location)
1	3	-
2	5	-
3	10	-
4	20	-
5	30	-
6	5	3
7	10	5
8	20	10
9	20	30
10	30	20

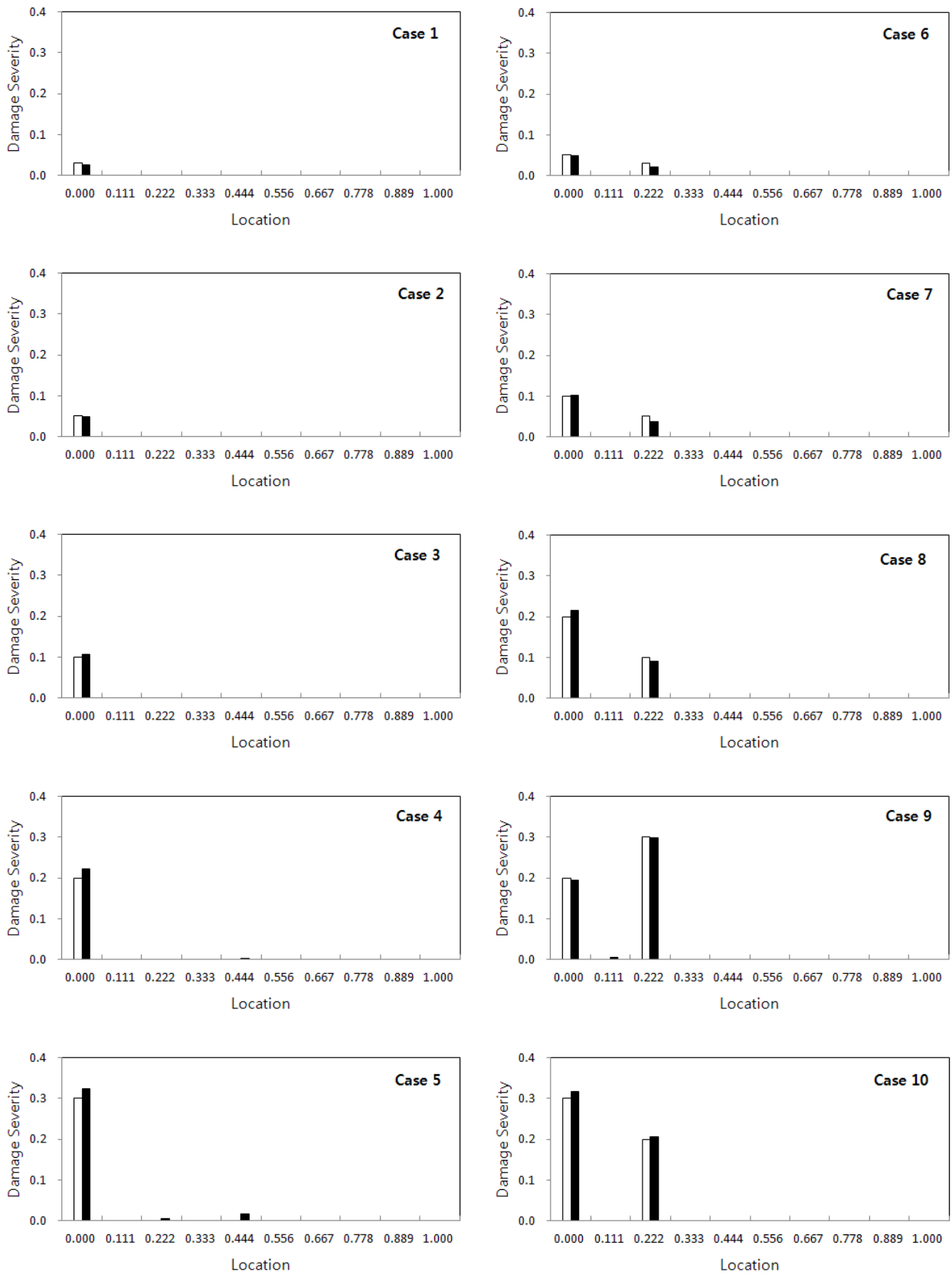


Fig. 8 Results of damage estimation (□: Accurate, ■: Estimated)

Table 4 Results of damage estimation

Case	Damage severity and estimation error					
	0.000(location)			0.222(location)		
	Accurate severity (%)	Estimated severity (%)	Error (%)	Accurate severity (%)	Estimated severity (%)	Error (%)
1	3	2.6	-13.3	-	-	-
2	5	4.9	-2.0	-	-	-
3	10	10.6	6.0	-	-	-
4	20	22.3	11.5	-	-	-
5	30	32.4	8.0	-	-	-
6	5	4.8	-4.0	3	2.1	-30.0
7	10	10.2	2.0	5	3.7	-26.0
8	20	21.6	8.0	10	9.1	-9.0
9	20	19.4	-3.0	30	29.8	-0.7
10	30	31.7	5.7	20	20.6	3.0

손상정도가 과소 평가됨을 알 수 있다. 그러나 미소 손상의 경우에도 손상위치는 성공적으로 추정됨을 알 수 있다. 실용적인 측면에서 보면, 손상위치를 합리적으로 추정할 수 있다면 손상정도 추정의 정확성은 상대적으로 중요성이 적어질 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 미소 손상에 대한 과소 평가 문제는 향후 중요하게 해결되어야 할 문제라고 판단된다. 본 연구에서는 신경망의 입력 자료로 타워의 모드특성만을 활용하였지만, 신경망 기법의 특성상 모드특성에 추가하여 스트레인, 경사 및 변위 등 다양한 계측자료를 함께 사용할 수 있다. 즉, 다양한 입력 자료를 함께 활용함으로써 미소 손상에 대한 추정결과를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 신경망 기법 외에 다른 기법을 병행하여, 손상추정을 복수로 수행한다면 미소 손상에 대한 추정 결과의 정확성과 신뢰성을 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.

실제 풍력발전기에 제안된 손상추정기법을 적용하기 위한 절차를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 건전상태 타워의 가속도를 측정 후 2장에서 설명된 방법을 이용하여 모드특성을 추정한다.
- 2) 모드특성 추정 프로그램을 이용하여 건전상태 타워 해석에 적용되는 구조특성을 개선(updating)함으로써 해석 및 측정 모드특성을 일치시킨다.
- 3) 개선된 구조특성을 기반으로 모드특성 추정 프로그램을 이용하여 해석적으로 신경망 훈련패턴을 생성한다.
- 4) 풍력발전기 운용 중 타워의 가속도를 계측하고, 2장에서 설명된 방법을 이용하여 모드특성을 추정한다.

5) 추정된 모드특성을 훈련된 신경망에 입력하여 손상지수를 구하여 손상위치 및 손상정도를 판정한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 풍력발전기 타워의 효과적인 상태 모니터링을 위하여 타워의 고유진동수 및 모드형상을 이용한 손상추정기법을 제안하였다. 이를 위하여 풍력발전기에 대한 동력학 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 타워의 거동을 시뮬레이션하고 결과를 처리하여 모드특성을 추정하였다. 손상에 의한 타워의 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 있었다. 단, 미소 손상의 경우 손상정도가 약간 과소평가되는 경향이 있었지만 손상위치는 성공적으로 추정되었다. 실용적인 측면에서 보면, 손상 위치를 합리적으로 추정할 수 있다면 손상정도 추정의 정확성은 상대적으로 중요성이 적어질 수 있을 것으로 사료된다.

추후, 미소 손상 추정결과와 정확성을 개선하고, 바람방향 이외의 모드도 함께 고려한 기법을 개발하며, 실제 풍력발전기 또는 모의 실험체에 대하여 제안된 기법을 적용하고 검증할 계획이다. 본 연구에서 제안된 기법을 활용하여, 풍력발전기 운용 중 타워의 상태를 모니터링하고 손상을 조기에 감지함으로써 타워에 대한 안전성을 확보하고 손상발생에 따른 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2011-0003524).

#### 참고문헌

1. 오주원, 허광희, 정의태, "구조물의 손상평가용 신경망의 특성 평가에 관한 실험적 연구", 구조물진단학회지, 제14권 5호, 2010, pp.179-186.
2. 이종원, "풍력발전기 블레이드 상태 모니터링을 위한 질량 불균형 감지기법", 구조물진단학회지, 제15권 1호, 2011, pp.209-214.
3. 조효남, 최영민, 이성철, 이광민, "신경망 및 모델업데이팅에 기초한 구조물 손상평가", 한국구조물진단학회, 제7권 4호, 2003, pp.121-128.

- 
4. 최혁, 이규원, “고유진동수의 감소율과 신경망을 이용한 보의 손상평가”, 한국구조물진단학회, 제10권 2호, 2006, pp.153-164.
  5. 황병선, 최신풍력터빈의 이해, 도서출판 아진, 서울, 2009.
  6. Bir, G. S., Users Guide to BMoes (Software for Computing Rotating Beam Coupled Modes), National Renewable Energy Laboratory, Golden, 2007.
  7. Brinker, R. Zhang, L. and Andersen, P., “Modal Identification from Ambient Response Using Frequency Domain Decomposition”, Proceedings of 18th International Modal Analysis Conference, 2000, pp.625-630.
  8. Chou, J. S. and Tu, W. T., “Failure Analysis and Risk Management of a Collapsed Large Wind Turbine Tower”, Engineering Failure Analysis, vol. 18, Issue 1, 2011, pp.295-313.
  9. Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines, Germanischer Lloyd, Hamburg, 2007.
  10. Haykin, S., Neural Networks—a Comprehensive Foundation, Macmillan, 1994.
  11. Jiang, S. F., Zhang, C. M. and Zhang, S., “Two-stage Structural Damage Detection Using Fuzzy Neural Networks and Data Fusion Techniques”, Expert Systems with Applications, vol. 38, 2011, pp.511-519.
  12. Jonkman, B. J., TurbSim User’s Guide: Version 1.50, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-500-46198, Golden, 2009.
  13. Jonkman, J. M. and Buhl Jr., M. L., FAST User’s Guide, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/EL-500-38230, Golden, 2005.
  14. Otte, D., Van de Ponselee P. and Leuridan, J., “Operational Shapes Estimation as a Function of Dynamic Loads”, Proceedings of 8th International Modal Analysis Conference, 1990, pp.413-421.
  15. Parka, J. H., Kim, J. T., Hong, D. S., Hoa, D. D. and Yi, J. H., “Sequential Damage Detection Approaches for Beams Using Time-modal Features and Artificial Neural Networks”, Journal of Sound and Vibration, vol. 323, 2009, pp.451-474.
  16. Pieraccini, M., Parrini, F., Fratini, M., Atzeni, C. and Spinelli, P., “In-service Testing of Wind Turbine Tower Using a Microwave Sensor”, Renewable Energy, vol. 33, 2008, pp.13-21.
- (접수일자 : 2011년 10월 30일)  
(수정일자 : 2012년 2월 21일)  
(심사완료일자 : 2012년 3월 8일)

---

## 요 지

본 연구에서는 풍력발전기 타워의 효과적인 상태 모니터링을 위하여 타워의 고유진동수 및 모드형상을 이용한 손상추정기법을 제안하였다. 풍력발전기에 대한 동력학 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 타워의 거동을 시뮬레이션하고 결과를 이용하여 타워의 모드특성을 추정하였다. 다양한 손상에 의한 타워의 고유진동수와 모드형상의 변화를 모드특성 추정 프로그램을 이용하여 해석적으로 구하여 훈련패턴을 생성하고 이를 이용하여 신경망을 훈련시켰다. 복수 손상 경우를 포함한 10가지 손상경우에 대한 모드특성을 훈련된 신경망에 입력하여 손상을 추정하였으며, 모든 손상 경우에 대하여 비교적 정확하게 손상위치와 손상정도를 판정할 수 있었다. 단, 미소 손상의 경우 손상정도가 약간 과소평가되는 경향을 보였으나 손상위치는 합리적으로 추정됨을 알 수 있었다. 향후, 미소 손상 추정결과의 정확성을 개선하고, 실험을 통하여 제안된 기법을 검증할 계획이다.

**핵심 용어** : 타워, 풍력발전기, 손상추정, 고유진동수, 모드형상

---