

## 표면파 기반의 풍력발전기 블레이드 표면상태 실시간 모니터링에 관한 연구

김경환<sup>1</sup>, 양영진<sup>1</sup>, 김현범<sup>1</sup>, 양형찬<sup>2</sup>, 임종환<sup>3</sup>, 최경현<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 대학원 메카트로닉스 공학과  
제주특별자치도 제주시 제주대학로 102  
<sup>2</sup>한국에너지종합기술(주)  
제주특별자치도 제주시 첨단로 8길 92  
<sup>3</sup>제주대학교 메카트로닉스 공학과  
제주특별자치도 제주시 제주대학로 102

(2016년 8월 10일 접수; 2016년 11월 3일 수정본 접수; 2016년 11월 4일 채택)

## Defect Monitoring of a Wind Turbine Blade Surface by using Surface Wave Damping

Kyung-Hwan Kim<sup>1</sup>, Young-Jin Yang<sup>1</sup>, Hyun-Bum Kim<sup>1</sup>,  
Hyung-Chan Yang<sup>2</sup>, Jong-Hwan Lim<sup>3</sup>, and Kyung-Hyun Choi<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechatronics Engineering, Jeju National University  
102 Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju-do, 690-756, Korea  
<sup>2</sup>KLEM  
92 8Gil Chumdan-ro, Jeju-si, Jeju-do, 2191-1, Korea  
<sup>3</sup>Department of Mechatronics Engineering, Jeju National University  
102 Jejudaehak-ro, Jeju-si, Jeju-do, 690-756, Korea

(Received for review August 10, 2016; Revision received November 3, 2016; Accepted November 4, 2016)

### 요 약

현재 풍력발전은 우리나라에서 가장 주목 받고 있는 신재생에너지 분야로 많은 연구가 진행 중이다. 풍력발전을 구성하는 요소 중 핵심 요소인 블레이드에 손상이 발생할 경우에 발전 효율에 직접적인 영향을 미치므로 효율적인 유지보수를 위해 초기에 결함을 측정하는 기술이 매우 중요한 상태이다. 그러나 기존의 초음파 비파괴 검사 및 열화상 비파괴 검사는 소요시간이 길고 실시간 모니터링이 어려우므로 초기 결함 측정이 불가능하다. 기존의 문제를 보완하고자 본 논문에서는 표면파를 이용한 블레이드 표면상태 실시간 모니터링에 관한 연구를 수행하였다. 압전센서 기반의 시스템을 구성하여 블레이드 표면샘플에 대해 공정 변수 별 기초 성능 실험을 하였고, 소형 블레이드에 대해 공정변수 별 실험을 통해 블레이드의 크랙, 벗겨짐, 장애물 등을 실시간으로 모니터링이 가능한지 연구 하였다.

**주제어** : 풍력 블레이드, 표면파, 초기 결함

**Abstract** : These days much efforts are being dedicated to wind power as a potential source of renewable energy. To maintain effective and uniform generation of energy, defect preservation of turbine blade is essential because it directly takes effects on the efficiency of power generation. For the effective maintenance, early measurements of blade defects are very important. However, current technologies such as ultrasonic waves and thermal imaging inspection methods are not suitable because of long inspection time and non-real time inspection. To supplement the problems, the study introduced a method for real time defect monitoring of a blade surface based on surface wave technology. We examined the effect of various parameters such as micro-cracks and peelings on the propagation of surface wave.

**Keywords** : Wind turbine blade, Surface-wave, Early defect detection

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: khchoi@jejunu.ac.kr; Tel: +82-010-9898-3713; Fax: +82-064-753-3174

doi: 10.7464/ksct.2017.23.1.090 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

풍력 발전은 신재생에너지의 대표적인 청정에너지원으로 서 많은 연구가 진행 중이고 실용화 기술이 국내외적으로 각 광받으며 성장 중이다. 풍력발전기 구성 요소 중 블레이드는 풍력발전기의 가장 핵심적인 요소이나, 고장 빈도가 제일 높고 고장이 날 경우에 발전 효율에 직접적인 영향을 미치기 때문에 유지 보수가 아주 중요하다[1-2]. 그러나 블레이드는 체계적이지 못한 유지보수로 인해 기대수명에 못 미치는 경우가 대부분이다. 풍력 발전기 블레이드의 기대수명은 대략 20년이며 예상되는 유지보수비용은 전체 에너지 생산비용의 25~30%, 투자비용의 75~90%에 달할 정도로 큰 비중을 차지한다[3-4]. 만약 결함발생 초기에 적절한 유지보수를 하지 않을 경우 발전효율이 감소하고 추후 유지보수에 필요한 비용, 인력 및 시간이 상대적으로 상승하기 때문에 실시간으로 풍력발전기 블레이드 상태를 모니터링하여 초기에 결함을 검출하는 기술이 요구되고 있다. 블레이드 상태측정의 대표적인 기술로는 내부 또는 외부 결함을 검출하기 위한 비파괴 검사가 있다[5]. 비파괴 검사 종류로는 초음파 비파괴 검사와 열화상 비파괴 검사가 있다[6]. 그러나 기존의 방법은 결함 검출 시간이 길고 실시간 진단이 불가능하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 비파괴 검사 문제를 보완하기 위하여 실시간 모니터링이 가능한 표면파 기반의 블레이드 결함 검출 시스템을 구성하고 소형 블레이드에 실험 적용 가능함을 확인하였다. 먼저 fiber reinforced plastic (FRP)의 두께, 송·수신부 센서간의 거리, FRP 표면의 상태 순으로 기초 성능 실험을 수행하였고, 소형 블레이드의 표면부 및 접합부 결함 상태를 표면파 기반의 블레이드 결함 검출 시스템을 이용한 실험을 통하여 블레이드 표면상태 실시간 모니터링이 가능함을 보이고자 한다.

## 2. 표면파 기반의 블레이드 상태 측정 원리

표면파 기반의 블레이드 결함 검출 시스템은 송신부에서 송출된 표면파가 표면에 전이된 상태로 구조물을 통해 수신부로 전달되는 표면파의 진폭 및 위상 변화 비교를 통해 이루어진다. 송신부에서 송출된 신호가 블레이드 표면의 크랙, 벗겨짐 등의 장애물을 만날 경우 수신부에서는 Figure 1과 같

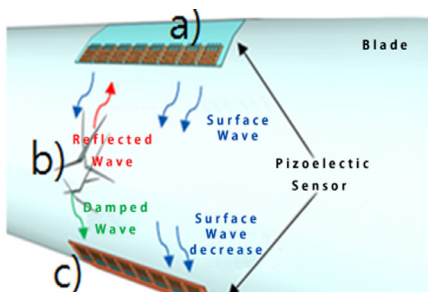


Figure 1. Schematic diagram of wave propagation on a blade surface (a) Transmitter, (b) Cracks on blade surface, (c) Receiver.

이 반사, 감쇠 특성을 갖는 파형으로 전달된다. 수신부에 전달된 감쇠 신호를 통해 수신부에서 파형의 진폭 및 위상 변화를 확인 할 수 있고 블레이드 표면의 상태 측정이 가능하다.

안정적인 표면파 기반의 블레이드 결함 검출 시스템에 Equation (1)과 같이 표현된 표면파를 송신하여 크랙, 벗겨짐 등의 장애물로 인해 진폭, 위상이 변한 수신 표면파를 Equation (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(t) = M_i \sin(\omega t) \quad (1)$$

여기서  $\omega$ 는 주파수,  $M_i$ 은 안정적인 진폭, 위상은 0인 신호를 나타낸다.

$$x(t) = M_0 \sin\left(\frac{\omega t}{\phi}\right) = M_0 < \phi \quad (2)$$

여기서  $\omega$ 는 주파수,  $M_0$ 은 크랙에 의해 변화된 진폭,  $\phi$ 는 크랙에 의해 변화된 위상 신호를 나타낸다. 따라서, 블레이드 결함 검출 시스템에 표면파를 송신하여 크랙, 벗겨짐 등의 장애물로 인해 변경된 수신 신호가 과도상태에서 정상상태가 되었을 때의 송신 신호와 수신 신호의 진폭, 위상 분석을 통하여 블레이드의 표면 상태 및 크랙의 위치를 판단 할 수 있다.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1. 표면파 기반의 결함 검출 시스템 구성

표면파 기반의 결함검출 시스템은 블레이드 표면 상태를 실시간으로 모니터링하여 결함을 검출하는 시스템을 말하는데 Figure 2와 같이 압전 구동이 가능한 송신부와 수신부로 구성 하였다. 송신부는 파형 발생장치(function generator), 송신 신호를 증폭시키는 파워 앰프(power amplifier) 및 실시간 전압 모니터링용 오실로스코프(oscilloscope)로 구성 되어 있는데 일정 주파수의 표면파를 발생시킨다. 수신부는 수신된 신호를 증폭 하는 프리 앰프와 이 신호를 디지털화하여 PC에 기록하는 DAQ (data acquisition)로 구성되어 있으며, 수집된 데이터는 Labview를 기반으로 해석하는 시스템으로 구성 하였다[8].

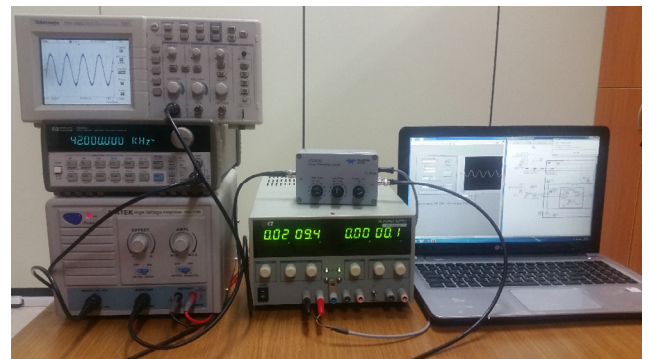


Figure 2. Sensing System Module.

3.2. 실험방법

표면과 기반의 결함검출 시스템의 성능 확인을 위해 FRP와 소형 블레이드를 이용한 성능 실험을 진행하였다. FRP는 블레이드 제작에 사용되는 재료로서 블레이드의 표면 성질과 유사한 특성을 갖고 있기 때문에 이를 이용하여 결함검출 시스템의 기초 성능 실험을 진행 하였다. 또한 실시간 블레이드 표면상태 모니터링의 가능성을 확인하기 위해 소형 블레이드를 이용한 표면과 기반의 결함검출 실험을 진행하였다.

실험을 위한 표면과 발생은 공진주파수 42 kHz인 압전센서를 이용하였다. 기초 성능 실험은 FRP의 두께, 송·수신 센서 간의 거리, FRP의 표면상태 등 3가지를 변수로 하여 진행하였고 실시간 모니터링의 가능성을 확인하기 위한 실험은 소형 블레이드의 표면부 및 접합부의 표면상태에 변화를 주어 수행하였다. 각 변수의 변화에 따라 송신부에서 출력된 기본 파형과 수신부에서 검출된 표면과의 진폭 변화를 검출하여 진폭 감쇠가 발생하는지를 알아봄으로써 실시간으로 블레이드 표면 상태 모니터링이 가능함을 검증 할 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. FRP 표면에서의 기초 성능 실험

표면과 기반의 결함검출 시스템의 성능을 확인하고자 실제 블레이드 제작에 활용되는 FRP 재질을 이용하여 기초 실험을 수행하였다. 공정변수 인 FRP의 두께, 송·수신부 센서간의 거리, FRP 표면의 상태에 따라 수신부의 진폭의 변화 특성을 분석하는 실험을 진행하였다.

4.1.1. FRP의 두께에 따른 특성

FRP의 두께에 따른 진폭 변화 특성을 알아보기 위해 송신 주파수 42 kHz, 진폭의 크기 0.35 mV를 고정변수로 두고 FRP의 두께가 각각 1 mm, 3 mm 및 5 mm일 때의 진폭 변화를 측정하였다. 실험 결과 Figure 3과 같이 두께가 두꺼워질

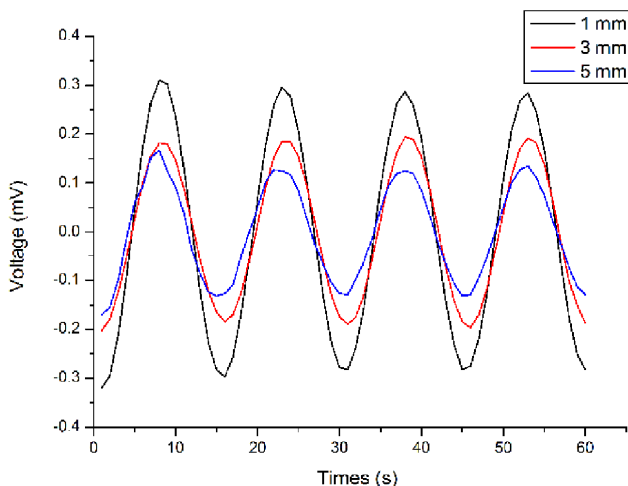


Figure 3. Effect of blade thickness on the magnitude of received signal strength.

Table 1. Effect of distance between transmitter and receiver on the magnitude of received signal strength

Distance (m)	Voltage (mV)				Average (mV)
	1	2	3	4	
0.10	0.3	0.3	0.28	0.3	0.30
0.15	0.28	0.25	0.25	0.27	0.26
0.20	0.27	0.22	0.25	0.25	0.25
0.30	0.25	0.22	0.24	0.2	0.23
0.36	0.22	0.22	0.2	0.2	0.21
0.40	0.20	0.18	0.19	0.19	0.19

수록 진폭이 감쇠가 크게 발생하였다. 따라서 FRP의 두께에 따라 수신 신호가 영향을 받음을 확인 할 수 있다.

4.1.2. 센서 간의 거리에 따른 특성

송·수신부 센서 간의 거리에 따라 표면과 기반의 결함검출 시스템의 성능을 확인하기 위해 송신주파수 42 kHz, 진폭의 크기 0.35 mV, FRP 두께 3 mm를 고정 변수로 두고 센서 간의 거리를 각각 0.1 m, 0.15 m, 0.2 m, 0.3 m, 0.35 m 및 0.4 m로 변화 시켰을 때의 4회 실험 결과 평균을 Table 1에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 송·수신부 센서 간의 거리가 멀어 질수록 진폭의 감쇠가 커지며 따라서 송·수신부 센서 간의 거리에 따라 수신 신호가 영향을 받음을 확인 할 수 있다.

4.1.3. 표면의 상태에 따른 특성

FRP 표면에 크랙이 존재하지 않는 정상상태일 때와 크랙이 존재하는 비정상상태 일 때 송신파의 진폭의 변화가 발생하는지를 확인하기 위해 송신 주파수 42 kHz, 진폭의 크기 0.35 mV를 고정변수로 두고 Figure 4와 같이 두께가 3 mm인 FRP를 이용하여 크랙이 존재하지 않는 정상적인 표면과 각각의 크랙이 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m 존재하는 샘플 5개를 제작하여 실험을 수행하였다. FRP의 상태에 따라 실험 결과 Figure 5와 같이 크랙이 존재하지 않는 정상적인 샘플보다 크랙이 존재하는 비정상적인 샘플에서 진폭이 크게 감쇠 되었다. 따라서 FRP에서 크랙의 유무에 따라 수신 신호의 영향을

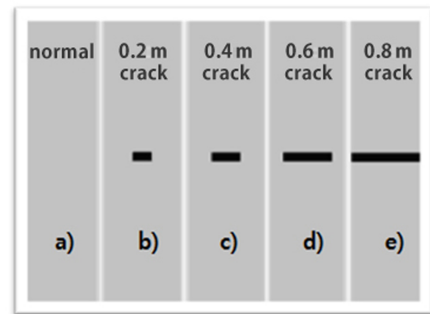


Figure 4. Optical images of blade surface sample showing cracks with variable lengths a) normal b) 0.2 m crack c) 0.4 m crack d) 0.6 m crack e) 0.8 m crack.

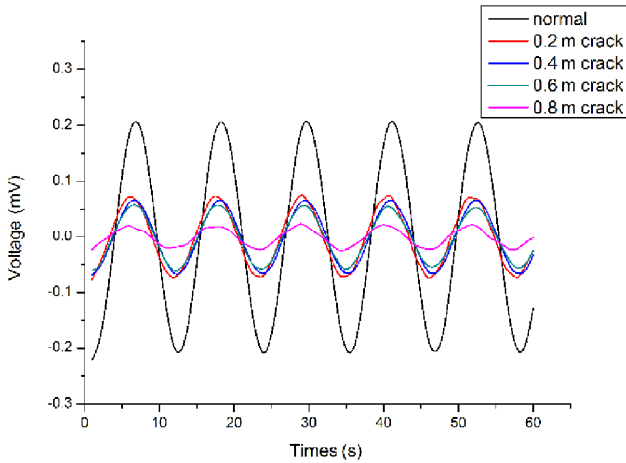


Figure 5. Comparison between the amplitude of received voltage signal with increasing value of crack length.

받음을 확인 할 수 있다. 이와 같은 기초 실험을 통해 소형 블레이드에서 표면파 기반의 결함검출 시스템의 적용가능성을 확인하였다.

#### 4.2. 소형 블레이드에 대한 실험

소형 블레이드에서 공정변수 인 표면부 및 접합부의 상태에 따라 수신부의 진폭의 변화를 분석함으로써 블레이드 표면의 결함을 실시간으로 모니터링이 가능한지를 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

##### 4.2.1. 표면 상태에 따른 특성

블레이드의 표면 상태에 따른 표면파 변화특성을 알아보기 위해 송신 주파수 42 kHz, 진폭의 크기 0.35 mV, 센서 간의 거리를 0.2m로 고정변수로 하고 블레이드 표면부에 Figure 6과 같은 크랙이 존재하지 않는 정상적인 경우와 크랙이 존재하는 비정상적인 표면에 대해 실험을 수행하였다. 실험 결과 Figure 7과 같이 크랙이 존재하지 않는 정상적인 표면에서의 수신 전압 진폭은 약  $\pm 0.3$  mV인 반면에 크랙이 존재하는 비정상적인 표면에서의 수신 전압 진폭은 약  $\pm 0.2$  mV로 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 블레이드 표면부에 크랙이 존재할 때 진폭의 감소됨을 확인하였다.



Figure 6. Optical image of blade surface illustrating a crack.

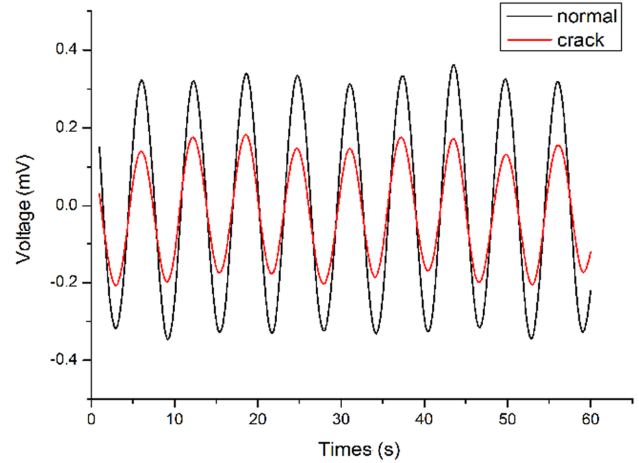


Figure 7. Comparison between the received voltage signal of normal and cracked blade surface.

##### 4.2.2. 블레이드 접합부의 상태에 따른 특성

블레이드는 표면에서보다 접합부에서 크랙 발생의 빈도수가 높다. 따라서 블레이드 접합부 상태에 따른 진폭의 변화를 실험 하였다. 송신 주파수를 42 kHz, 진폭의 크기 0.45 mV로 고정하고 블레이드 접합부 상태를 Figure 8과 같이 정상적인 표면, 크랙의 길이는 40 mm로 동일하지만 폭이 1 mm (minor

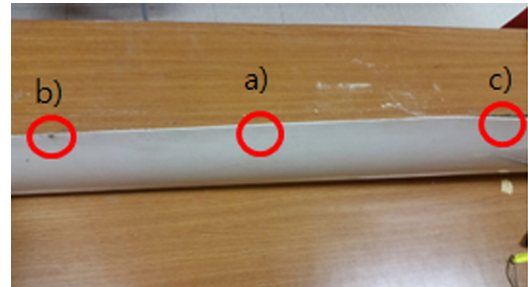


Figure 8. Optical images of blade surface showing cracks with variable lengths a) without crack b) minor crack c) major crack.

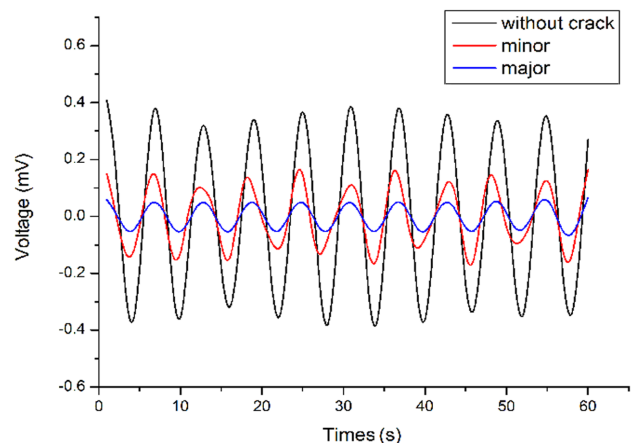


Figure 9. Comparison between the received voltage signal of blade surface.

crack) 및 5 mm (major crack)인 3가지 경우에 대해 실험 하였다. 실험 결과 Figure 9와 같이 정상적인 표면에서의 전압 진폭은 약  $\pm 0.4$  mV, minor crack에서는 약  $\pm 0.15$  mV, major crack에서는 약  $\pm 0.05$  mV로 크랙의 폭이 클수록 진폭 감쇠가 크게 발생 하였다. 따라서 블레이드 접합부에서도 크랙의 크기가 클수록 진폭 감쇠가 크게 발생함을 확인 하였다.

## 5. 결론

본 논문에서는 기존의 블레이드 결함 검출 방법인 초음파 비파괴 검사 및 열화상 비파괴 검사로는 소요시간이 길고 실시간 모니터링의 어려운 문제를 해결하고자 표면과 기반의 블레이드 결함 검출 시스템을 구성하고 블레이드의 표면부 및 접합부의 크랙, 벗겨짐, 장애물 등을 실시간으로 모니터링 가능 여부에 대한 실험을 수행하여 본 연구 범위 안에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

실시간으로 블레이드 표면 상태 모니터링이 가능하도록 표면과 기반의 블레이드 결함 검출 시스템을 구성하였고 FRP의 두께, 송·수신부 센서 간의 거리, FRP 표면의 상태에 따른 기초 실험 결과 FRP의 두께가 두꺼워 질수록, 송·수신부 센서 간의 거리가 멀어질수록, FRP 표면의 크랙이 존재 할 경우에 진폭의 감쇠를 확인 하였다. 이를 바탕으로 소형 블레이드에 대해 블레이드의 표면부 및 접합부의 크랙이 존재하지 않는 정상적인 경우와 크랙이 존재하는 비정상적인 경우를 실험 비교한 결과 크랙의 크기가 클수록 진폭 감쇠가 크게 발생함을 확인 하였다. 따라서 표면과의 진폭감쇠를 측정함으로써 블레이드 표면부 또는 접합부의 크랙, 벗겨짐, 장애물 등을 실시간으로 모니터링이 가능함을 확인 하였다. 표면과 기반의 시스템을 실제 구현하기 위해서는 기존의 시스템을 휴대용이 가능하도록 최소화 시켜야 하며, 센서를 통한 블레이드 표면 상태 검출 데이터를 무선으로 PC에 전송이 가능하도록 시스템을 보완함으로써 변화량에 따른 단계적 상태진단 및 분류 기술 개발이 필요한 상황이다.

## 감 사

이 논문은 2016년도 대한민국 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. NRF-2014R1A2A1A01007699) 과 2016년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의 인력양성 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015H1C1A1035892).

## References

1. Han, B. H., and Yoon, D. J., "Damage Detection Method of Wind Turbine Blade Using Acoustic Emission Signal Mapping," *J. Korean Soc. Nondestructive Testing*, **31**(1), 68-76 (2011).
2. Nam, M. H., Jung, J. Y., and Kim, C. H., "Analysis of Characteristic of the Wind Turbine Blade Damage," *KIEE*, 18-20 (2012).
3. Kim, B. G., et al., "A Surface Adaptive Moving Mechanism for Wind Turbine Blade Maintenance Robot," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **30**(9), 969-975 (2013).
4. Kim, D. G., and Kim, H. J., and Song, M. H., "FBG Sensor System for Condition Monitoring of Wind Turbine Blades," *J. Korean Inst. Illuminating and Electrical Installation Eng.*, **27**(8), 75-82 (2013).
5. Kwon, K. A., et al., "Quantitative Defects Detection in Wind Turbine Blade Using Optical Infrared Thermography," *J. Korean Soc. Nondestructive Testing*, **35**(1), 25-30 (2015).
6. Choi, M. Y., et al., "Defect Detection in Wind Turbine Blade Bonded by Using Infrared Thermography," *KSME*, pp. 168-169 *KSME 13RE-TH01P009* (2013).
7. Song, T. H., "Parametric study of SH-SAW device response to various types of surface perturbations," **138**(2), 408-416 (2009).
8. Kim, J. D., "A Study on the Optical Fiber Measurement System for Monitoring the Blade Condition of Wind Power Generator," Department of Mechanical Engineering, Graduate School Chung-Nam National University Taejon, Republic of Korea, 105-115 (2014).