

24GHz 도플러 레이더를 이용한 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델에 대한 측정 및 분석

김용빈*, 최영재**, 최인식***

Measurement and Analysis for Scale Model of Wind Turbine Blade Using 24GHz Doppler Radar

Yong-Bin Kim*, Young-Jae Choi**, and In-Sik Choi***

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구(개별)에 의해 지원되었음(과제번호: R19X001-50).
이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07041496).

요 약

본 논문에서는 풍력 발전기 블레이드의 동작 상태를 모니터링하기 위해서 축소 모델에 대한 시뮬레이션과 측정 결과 사이의 비교 및 분석을 수행하였다. 측정 시 클러터 잡음 신호를 줄이기 위해 전파흡수체를 사용하여 실내 측정 시스템을 설계하였으며 획득한 데이터는 시간-주파수 분석 방법인 short time Fourier transform (STFT)으로 분석하였다. 획득된 스펙트로그램 영상으로부터 블레이드 끝 부분의 도플러 주파수를 추출하였고 이를 이론적인 값과 비교하여 상대 오차를 계산하였다. 실험 결과, 시뮬레이션과 측정에 의한 스펙트로그램 영상으로부터 추출된 최대 도플러 주파수와 회전수가 최대 3.5% 오차 이내로 이론값과 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we performed the analysis and comparison between the simulation and measurement results to monitor the operation status of wind turbine blade for the scale model. To suppress the clutter noise at the measurement, the indoor measurement system is designed by using the microwave absorber and the obtained data is analyzed by the short time Fourier transform (STFT) which is the time-frequency analysis method. The Doppler frequencies of the blade tip were extracted from the produced spectrogram images and relative errors were calculated by comparing with their theoretical values. Experiment results show that the maximum Doppler frequencies and revolution rates extracted from the spectrogram images by the simulation and measurement are matched with the theoretical values very well within the maximum relative errors of 3.5%.

Keywords

doppler frequency, short time Fourier transform, wind turbine blade, indoor measurement system

* 한남대학교 전기전자공학과 석사과정
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6636-5465>
** 한남대학교 전기전자공학과 박사과정
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8632-5265>
*** 한남대학교 전기전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8210-0843>

• Received: Apr. 16, 2020, Revised: Jun. 10, 2020, Accepted: Jun. 13, 2020
• Corresponding Author: In-Sik Choi
Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hannam University, 70
Hannam-ro, Daeduk-gu, Daejeon, 34430, Korea
Tel.: +82-42-629-8568, Email: recog@hnu.kr

1. 서 론

풍력 발전기는 바람 에너지를 이용하여 전기를 생산하는 장비이다. 풍력 발전기는 바람 에너지를 전기 에너지로 변환하기 위해 외부에 노출된 블레이드를 사용하므로 블레이드가 손상될 위험이 있다. 블레이드가 손상이 되면 전력 생산에 문제가 발생하므로 조기에 블레이드의 손상을 확인하여 수리하는 것이 중요하다. 이러한 이유로 풍력 발전기 블레이드의 손상을 조기에 발견하기 위해 광센서를 이용하여 모니터링 하는 연구, 자이로 센서를 이용하여 모니터링 하는 연구 등이 있었다[1][2]. 이러한 방법들은 각각의 풍력 발전기 블레이드에 센서를 설치하기 때문에 제작비용이 비싼 단점이 있다. 이를 보완하기 위한 방법으로 비접촉식으로 풍력 발전기 블레이드의 고장을 진단하는 시도들이 있었다. 카메라를 이용하여 블레이드를 촬영한 후, 머신러닝 기법인 SVM(Support Vector Machine)을 통해 블레이드 상태를 모니터링 하는 연구가 있었다[3]. 표 1은 풍력 발전기 블레이드의 모니터링에 있어 기존 연구들과 레이더의 장단점을 정리한 것이다.

표 1. 기존 연구들과 레이더 시스템의 비교
Table 1. Comparison of previous researches and radar system

Sensor type	Advantage	Disadvantage
Optical sensor	Easy to find fault location by installing inside	Difficult to install, expensive
Gyro sensor	Easy to find fault by comparing balance	
Camera	Possible to inspect the entire blade	Difficult to monitor at night and bad weather condition
Radar	Possible to monitor at night and bad weather condition	Difficult to analyze the obtained data

표 1에서 레이더와 카메라는 풍력 발전기에 설치되는 센서들과 달리 블레이드 전체의 움직임의 외부에서 관찰 가능하다는 장점이 있다. 그러나 카메라는 광원의 영향을 받으므로 기상 조건이 나쁘거나 야간에는 사용하기 어렵다는 제한이 있다. 레이

더는 이러한 한계에서는 비교적 자유로우나 카메라에 비해 취득되는 정보량이 적어서 데이터를 분석하여 필요한 정보를 얻어내는 것이 비교적 어려운 측면이 있다. 그러나 이러한 장점만 극복할 수 있다면 레이더는 풍력 발전기 블레이드의 모니터링에 이상적인 조건을 갖추고 있다.

레이더를 이용한 풍력 발전기 블레이드 감시와 관련된 연구로는 스펙트로그램 분석을 통해 파손된 풍력 발전기 블레이드와 정상적인 풍력 발전기 블레이드의 차이를 분석한 연구와 풍력 발전 단지가 레이더의 측정 결과에 주는 영향성에 대한 연구들이 있다[4]-[7]. 이 외에도 도플러 레이더를 이용해 풍력 발전기 블레이드를 측정하여 스펙트로그램 영상을 획득한 연구가 있다[8]. 특히 참고문헌 [4]에서는 레이더를 이용하여 풍력 발전기 블레이드의 스펙트로그램 영상을 획득한 후 이것을 분석하여 블레이드의 상태 정보를 얻는 방법을 제시하고 있다. 그러나 이 연구는 이론적인 데이터에 대해서만 검증되어 있고 실제 측정 데이터에 대한 검증은 이루어져 있지 않다.

본 논문의 주요한 기여는 회전 속도 및 블레이드 파손과 같은 상태 변화에 대한 제어가 가능한 축소 표적의 측정을 수행하고 측정 데이터의 시간-주파수 영상을 참고문헌 [4]의 방법으로 분석하여 추출된 정보의 정확성을 검증한 것이다. 이러한 연구 결과는 국내외적으로 사례를 찾아볼 수 없는 새로운 시도이다. 또한 실제 환경에서는 사실상 측정이 불가능한 날개가 파손된 채로 회전하는 풍력 발전기 블레이드의 시간-주파수 영상 측정 결과를 처음으로 제시하였다.

II. 신호 분석 이론

2.1 도플러 주파수

도플러 레이더로 회전하는 풍력 발전기 블레이드를 바라보았을 때 가장 높은 도플러 주파수는 블레이드의 끝 부분에서 발생한다. 그림 1은 회전하는 풍력 발전기 블레이드의 형상과 운동 상태를 보여준다.

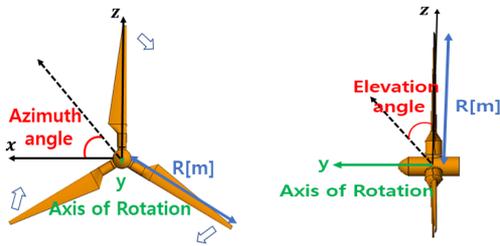


그림 1. 풍력 발전기 블레이드의 3차원 CAD 모델
Fig. 1. 3D CAD model of wind turbine blade

그림 1에서 블레이드의 중심축에서 날개 끝 부분까지의 거리는 R 이고 블레이드는 y 축을 중심으로 회전한다. 그림 1과 같은 풍력 발전기 블레이드를 관찰하였을 때, 발생하는 가장 높은 도플러 주파수와 블레이드 팁의 속도 사이의 관계는 식 (1)과 같다[10].

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2fv_r}{c} \quad (1)$$

여기서 f_d 는 도플러 주파수를 나타내며, f 는 레이더의 송신 주파수, c 는 빛의 속도, λ 는 파장을 의미한다. v_r 은 블레이드 끝 부분의 속도이며 식 (2)와 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$v_r = 2\pi R X \quad (2)$$

여기서 X 는 풍력 발전기 블레이드의 1초당 회전 수(rps: revolutions per second)이다.

식 (1)과 식 (2)를 통해 풍력 발전기 블레이드로부터 관찰되는 도플러 주파수의 값은 블레이드의 길이와 회전수에 비례하는 것을 알 수 있다. 이러한 도플러 주파수는 블레이드가 레이더에 가까워지면 양의 값을 가지고 블레이드가 멀어지게 되면 음의 값을 갖게 된다.

2.2 시간-주파수 분석 및 수치해석 시뮬레이션

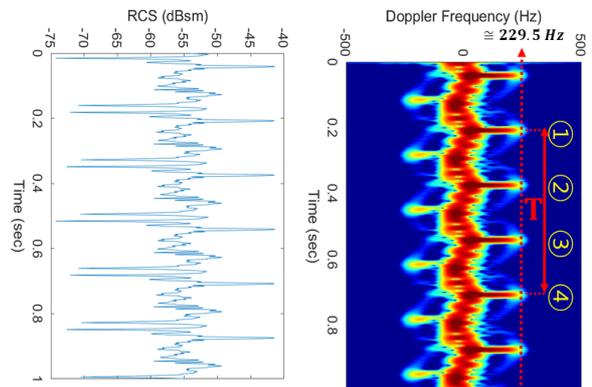
풍력 발전기 블레이드는 시간에 따라 도플러 주파수가 변하므로 푸리에 변환(Fourier transform)으로 주파수 스펙트럼을 얻는 것보다 시간-주파수 기법을 이용해 스펙트로그램 영상을 얻는 것이 좋다. 따

라서 획득한 데이터에 STFT(Short Time Fourier Transform)를 적용하여 스펙트로그램 영상을 얻어 블레이드의 상태를 확인하였다[11]. STFT는 Non-stationary 신호를 해석하기 위한 기법으로 시간 영역 신호를 작은 세그먼트로 나누어서 해당 세그먼트 동안에는 신호가 stationary하다고 가정하고 푸리에 변환을 한다[11]. 세그먼트는 일반적으로 윈도우 함수를 사용하고 일정한 해상도를 가진다[11]. 윈도우의 길이에 따라 시간-주파수 해상도가 정해지며, 시간 영역의 해상도와 주파수 영역의 해상도는 반비례하므로 용도에 따른 적절한 값을 선택해야 된다. 본 논문에서 사용한 STFT의 식은 아래와 같다 [11].

$$STFT(\tau, \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} [f(t)\omega(t-\tau)] \exp(-j\Omega t) dt \quad (3)$$

여기서 $f(t)$ 는 시간 영역의 신호이며, $\omega(t)$ 는 윈도우 함수이다. τ 는 윈도우가 시간 영역에서 움직이는 시간 인덱스, Ω 는 $2\pi f$ 이며 f 는 주파수를 의미한다. 본 논문에서는 Gaussian 윈도우를 사용하였다.

그림 2는 그림 1의 3D CAD 모델을 표 2의 파라미터로 시뮬레이션 하여 얻은 동적 RCS와 스펙트로그램 영상이다. 본 논문에서는 RCS 해석을 위하여 고주파 수치해석 방법인 PO(Physical Optics)를 사용하였다.



(a) Dynamic RCS (b) Spectrogram
그림 2. 시뮬레이션으로 획득한 동적 RCS와 스펙트로그램

Fig. 2. Dynamic RCS and spectrogram obtained by simulation

표 2. 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
Frequency (f)	24 GHz
Elevation angle	0 deg
Start of azimuth angle	0 deg
Observation time	1 sec
Revolution rate (X)	2 rps
# of azimuth angle points	10,000
Blade length (R)	0.11 m

그림 2(a)의 동적 RCS에서는 주기적인 패턴을 확인할 수 있지만 블레이드의 최대 도플러 주파수를 확인하기 어려워 블레이드의 동작 상태 확인에 어려움이 있다. 그런데 그림 2(b)와 같이 스펙트로그램 영상을 획득하면 블레이드의 최대 도플러 주파수를 확인하기가 수월해져 블레이드의 상태를 분석하기 편리해진다. 그림 2(b)의 스펙트로그램 영상으로부터 얻은 도플러 주파수는 229.5Hz이며 식 (1)을 이용하여 도플러 주파수의 이론값을 구하면 약 221.168Hz이다. 이렇게 구한 시뮬레이션 결과값과 이론값에 대한 오차를 구하여 정확도를 확인하였다. 오차는 아래 식 (4)와 같다.

$$E = \frac{|P - M|}{P} \times 100\% \quad (4)$$

여기서 E 는 오차이고 P 는 도플러 주파수의 이론값이며 M 은 측정 및 시뮬레이션의 도플러 주파수이다. 식 (4)를 이용해 이론값과 결과값 사이의 도플러 주파수의 오차를 구하게 되면 3.767%이기 때문에 이론과 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 스펙트로그램 영상을 보게 되면 블레이드가 3개이므로 풍력 발전기 블레이드가 1회전을 하게 되면 블레이드의 최대 도플러 주파수가 3번 나오게 된다. 그러므로 그림 2(b)의 ④번째 최대 도플러 주파수는 ①번째 블레이드가 1회전을 한 후 다시 레이더에 다가오는 블레이드의 도플러 주파수임을 알 수 있다. 이러한 방법으로 구한 T 의 역수를 취하게 되면 블레이드의 1초당 회전수를 구할 수 있게 된다. T 사이의 간격은 0.499sec이므로 $\frac{1}{T}$ 을 취하게 되면 2.005[rps]가 나오게 된다. 표 2의 초당회전속도 파라미터인 X 와 일치하므로 스펙트

로그램 영상을 이용해 해당 풍력 발전기 블레이드의 1초당 회전수를 구할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이런 방법을 이용하면 블레이드가 파손이 되어도 스펙트로그램 영상으로 블레이드의 동작 상태를 알 수 있다. 만약 블레이드가 파손이 되면 블레이드의 길이가 줄어들기 때문에 스펙트로그램 영상에서 구한 최대 도플러 주파수가 정상적인 값에 비해 작아지므로 블레이드의 동작 상태를 예측할 수 있다.

III. 측정 실험 및 결과 분석

3.1 실내 측정 시스템

그림 3은 논문에서 구축한 실내 측정 시스템의 개요를 보여준다. 포지셔너는 공기와 거의 유사한 유전율을 가지는 스티로폼을 이용하였으며, 측정 시 벽에서 반사되는 다중 반사 신호를 줄이기 위해 표적 뒤에 전파흡수체를 설치하였고, I/Q 데이터가 출력되는 레이더 모듈을 이용하여 DAQ(Data Acquisition)로 데이터를 획득하였다.

바닥에서 반사되는 다중 반사의 영향을 줄이기 위하여 축소 모델을 포지셔너 위에 설치하였고 Background 다중 반사를 줄이기 위해 표적의 뒤쪽에 전파 흡수체를 설치하였다. 포지셔너는 그림 4와 같이 높이가 1m, 윗면 지름이 60cm, 아랫면 지름이 80cm이며 몸체로부터의 반사 신호를 최소화 하기 위해 공기의 유전율과 흡사한 스티로폼으로 제작하였다. 전파 흡수체는 나무 판넬 3개 위에 부착하여 제작하였으며, 포지셔너 주위에 설치하였다.

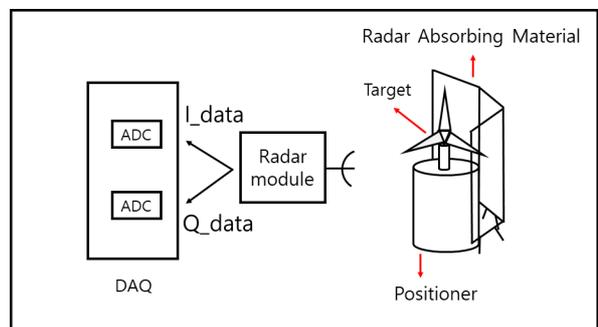


그림 3. 실내 측정 시스템의 개념도
Fig. 3. Conceptual drawing of the indoor measurement systems

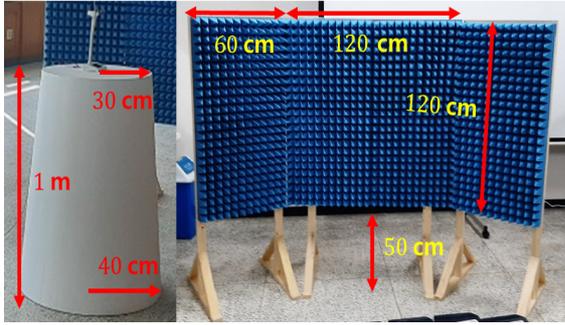


그림 4. 포지셔너와 전파흡수체의 크기와 사진
Fig. 4. Pictures showing dimensions of positioner and microwave absorber

판넬 3개는 지면으로부터 50cm 위에 있고 세로 길이가 120cm이다. 양 옆에 있는 판넬은 가로가 60cm이며 가운데 판넬은 가로가 120cm이다.

레이더 모듈은 그림 5와 같은 InnoSenT(社)의 IPS-937 모델을 사용하였다. 24 GHz의 단일 주파수를 가지고 있으며 IQ 데이터를 아날로그 값으로 출력하는 특징이 있어 DAQ로 원시 데이터(raw data) 획득이 가능하다. 샘플링 주파수는 측정된 도플러 주파수에 의해 식 (5)와 같이 결정된다[12].

$$2f_d \leq f_{sampling} \quad (5)$$

나이퀴스트 샘플링 이론에 의해 샘플링 주파수는 획득한 블레이드의 끝 부분에서 발생하는 도플러 주파수의 최소 두 배 이상이 필요하다. 이와 같은 샘플링 주파수를 확보하기 위해 그림 5와 같은 LabJack(社)의 LabJack T7 제품을 이용하였다[13].



그림 5. 측정에 사용한 도플러 레이더 모듈과 DAQ 모듈
Fig. 5. Doppler radar module and DAQ module used in measurements

이와 같은 도구와 장비들을 이용하여 그림 6과 같은 실내 측정 시스템을 구축한 후 레이더 모듈을 삼각대에 고정시켜 표적과 높이를 맞추고 측정실험을 수행하였다.

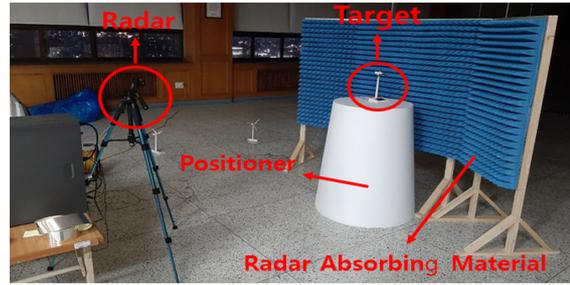


그림 6. 실내 측정 환경
Fig. 6. Indoor measurement environment

측정용 표적은 정상적인 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델과 블레이드가 파손된 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델을 사용하였다. 또한 축소 모델과 같은 형상을 가지는 3D CAD 모델을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 실내 측정과 시뮬레이션 결과의 비교

그림 7은 정상적인 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델과 3D CAD 모델을 크기와 함께 보여준다. 표 3은 측정과 시뮬레이션에 사용한 파라미터이다.

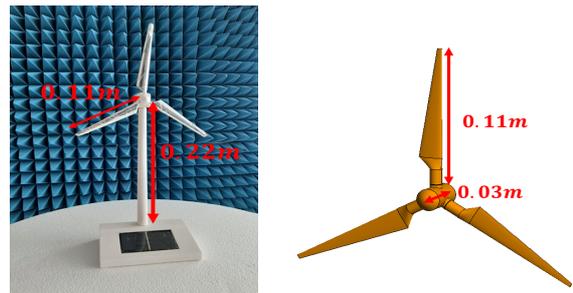


그림 7. 정상적인 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델과 3D CAD 모델

Fig. 7. Scale model and 3D CAD model of normal wind turbine blade

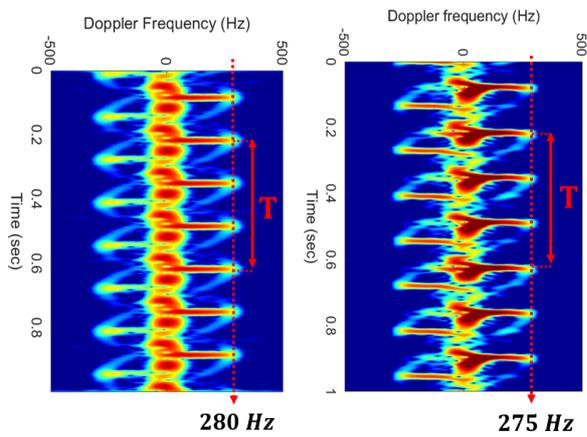
표 3. 축소 모델에 대한 측정 및 수치 해석 시뮬레이션 파라미터

Table 3. Measurement and numerical simulation parameters of the scale model

Parameter	Value
Frequency	24 GHz
Sampling frequency	10 kHz
Observation time	1 sec
# of time sampling points	10,000
Revolution rate (X)	2.5 rps
Blade length (R)	0.11 m

그림 8은 측정과 시뮬레이션으로 얻은 수신 데이터의 스펙트로그램을 보여주고 있다. 그림 8의 두 스펙트로그램 영상을 비교하면 서로 비슷한 패턴을 가진 것을 알 수 있다. 그림 8의 스펙트로그램 영상을 통해 측정된 최대 도플러 주파수 및 풍력 발전기 블레이드의 회전 속도는 표 4와 같다.

표 4에서 Doppler frequency는 스펙트로그램에서 관찰되는 최대 도플러 주파수를 의미한다. 식 (1)을 통해 구한 도플러 주파수와 오차 값을 보면 수치 해석 시뮬레이션이 1.28%, 측정 데이터가 0.528%로 측정 시의 오차가 근소하게 작는데 이것은 스펙트로그램에서 최대 도플러 주파수를 선택할 때 발생한 오류에서 기인한 것으로 판단된다. Revolution rate는 도플러 측 방향으로 길게 뻗은 신호 성분인 플래시 사이의 간격으로부터 계산한 풍력 발전기 블레이드의 1초당 회전수이다.



(a) Numerical data (b) Measurement data
 그림 8. 축소 모델의 스펙트로그램 (정상 날개)
 Fig. 8. Spectrogram of the scale model (normal blade)

표 4. 정상적인 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델에 대한 측정 및 수치 해석 시뮬레이션 결과
 Table 4. Measurement and numerical simulation result of the normal wind turbine blade

Parameters	Numerical	Measurement	Theory
Doppler frequency	280 Hz	275 Hz	276.46 Hz
Error of doppler frequency	1.28%	0.528%	-
Revolution rate (X)	2.5 rps	2.472 rps	2.5 rps
Error of revolution rate	0%	1.12%	-

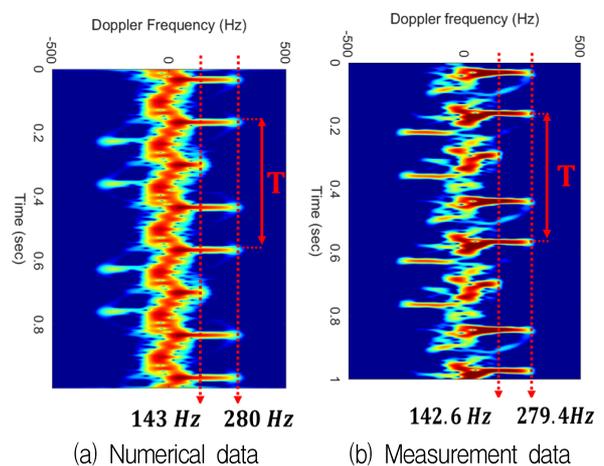
수치해석 데이터에서 계산한 결과가 이론값과 완벽하게 일치하였으며 측정 데이터가 1.12%의 오차를 보여주었다. 이러한 오차가 발생할 수 있는 요인으로는 풍력 발전기 모형의 회전속도의 오차가 주된 요인으로 판단된다.

다음은 블레이드 3개 중 1개가 파손된 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델을 사용하여 측정 실험을 수행하였다. 그림 9는 측정에 사용한 블레이드가 파손된 축소 모델과 그것의 3D CAD 모델이다. 3D CAD 모델은 수작업으로 직접 만들었기 때문에 축소 모델과 완벽히 일치할 수는 없었지만 최대한 유사하게 만들었다. 이러한 한계로 인해 시뮬레이션과 측정 결과 사이에는 약간의 오차가 날 수 밖에 없다.

블레이드가 파손된 축소 모델에 대해서도 표 2의 조건을 사용하여 실내 측정과 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10은 블레이드 1개가 파손된 축소 모델의 스펙트로그램 영상이다.



그림 9. 파손된 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델과 3D CAD 모델
 Fig. 9. 3D CAD and scale model of the broken wind turbine blade



(a) Numerical data (b) Measurement data
 그림 10. 축소 모델의 스펙트로그램 (파손된 날개)
 Fig. 10. Spectrogram of the scale model (broken blade)

표 5의 Doppler frequency(broken)은 3개의 블레이드 중 파손된 블레이드의 최대 도플러 주파수이다. 이론적인 최대 도플러 주파수와 오차는 수치해석의 경우 3.471%, 측정의 경우 3.182%로 표 4의 경우와 비교하였을 때 더 크게 나타났다. 1초당 회전수는 수치해석의 경우 0%, 측정의 경우 0.8%로 오차의 크기에 유의미한 변화가 나타나지는 않았다.

표 5. 파손된 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델에 대한 측정 및 시뮬레이션 결과

Table 5. Measurement and simulation result of the broken wind turbine blade

Parameters	Numerical	Measurement	Theory
Doppler frequency (broken)	143 Hz	142.6 Hz	138.2 Hz
Error of doppler frequency	3.471%	3.182%	-
Revolution rate (X)	2.5 rps	2.48 rps	2.5 rps
Error of revolution rate	0%	0.8%	-

그림 8과 그림 10을 비교하면 파손된 블레이드의 최대 도플러 주파수는 정상적인 블레이드의 최대 도플러 주파수에 비해 낮게 나오며 그에 따라 스펙트로그램의 형상이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다.

IV. 24GHz 도플러 레이더를 이용한 풍력 발전기 블레이드 측정의 타당성

본 논문에서는 수행한 24GHz 도플러 레이더 기반의 측정 실험은 실제 풍력 발전기에 비해 크기가 매우 작은 축소 표적을 측정했다는 것에 그 한계가 있다. 실제 풍력 발전기는 더 크고 레이더로부터 먼 곳에 위치하기 때문에 본 논문에서 사용한 24GHz 레이더 측정 시스템을 활용하여 실제 풍력 발전기를 측정하기 위해서는 시스템이 크게 두 가지의 성능을 만족하여야 한다. 첫째로는 풍력 발전기 블레이드로부터 충분한 수신신호를 얻을 수 있는 수준의 출력이고 둘째는 풍력 발전기 블레이드에서 발생하는 높은 도플러 주파수를 측정할 수 있을 정도로 충분히 높은 시간 샘플링 주파수이다. 15rpm의

속도로 회전하는 직경 81m의 풍력 발전기 블레이드를 가정했을 때, 식 (1)과 식 (5)를 사용하여 계산하면 $f_s \geq 20.358 kHz$ 를 만족해야 함을 알 수 있다. 그림 5에서 사용된 것과 같은 DAQ 모듈은 이러한 성능을 충분히 만족한다[13]. 또한 24GHz 도플러 레이더를 이용하여 풍력 발전기 블레이드를 측정할 사례는 많이 있기 때문에 24GHz 도플러 레이더를 이용한 실외 풍력 발전기 블레이드의 측정 및 모니터링은 충분한 기술적 타당성을 갖추었다고 판단된다[14][15].

V. 결 론

본 논문에서는 풍력 발전기 블레이드의 동작 상태를 모니터링하기 위해 축소 모델에 대한 시뮬레이션과 실내 측정에 의한 결과를 비교 분석하였다. 24GHz의 레이더 모듈을 이용하여 I/Q 데이터를 수신한 후, 10kHz의 샘플링 주파수로 데이터를 획득하였으며, STFT 기법을 적용하여 스펙트로그램 영상을 얻었다. 또한 축소 모델(프라모델)과 크기와 형상이 비슷한 3D CAD 모델을 제작한 후, FEKO를 통해 데이터를 획득하고 STFT로 스펙트로그램 영상을 얻어 두 개의 스펙트로그램 영상을 가지고 비교 및 분석을 수행하였다. 표적은 정상적인 풍력 발전기 블레이드의 축소 모델과 블레이드 1개가 파손된 축소 모델을 이용해 실내 측정과 시뮬레이션을 진행하였다. 실험 결과, 두 스펙트로그램 영상의 최대 도플러 주파수와 회전수가 최대 3.5% 오차 이내로 잘 일치함을 확인하였다.

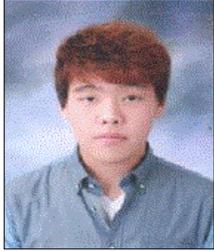
본 논문은 스펙트로그램이라는 잘 알려진 분석 방법을 통하여 풍력 블레이드의 스케일 모델에 대한 측정 데이터로부터 추출된 정보에 대한 정확성을 검증하였다는 것과 파손된 풍력 블레이드에 대한 실험을 최초로 실시하였다는 것에 의미를 찾을 수 있다. 왜냐하면 파손된 풍력 블레이드에 대한 실제 풍력 블레이드 실험은 사실상 쉽지 않기 때문이다. 향후에는 이러한 측정 시스템과 분석 기법을 활용하여 풍력 블레이드의 고장 유무 진단과 고장 유형 판단 등에 대한 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] C. C. Ciang, J. R. Lee, and H. J. Bang, "Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods", *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, No. 12, pp. 1-20, Oct. 2008.
- [2] B. J. Kim, S. J. Kang, and J. Y. Park, "Statistical Blade Angular Velocity Information-based Wind Turbine Fault Diagnosis Monitoring System", *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, Vol. 2, No. 4, pp. 619-625, Dec. 2016.
- [3] B. J. Kim, S. P. Chen, and S. J. Kang, "Motion Estimation and Machine Learning-based Wind Turbine Monitoring System", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 66, No. 10, pp. 1516-1522, Oct. 2017.
- [4] Y. J. Choi and I. S. Choi, "Dynamic RCS Analysis by Damage Status of Wind Turbine Blade", *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 17, No. 7, pp. 75-82, Jul. 2019.
- [5] J. H. Jung, K. B. Kang, M. Kim, J. Y. Kim, and S. H. Park, "Extraction and analysis of doppler frequency of wind turbines and effect on radar signals", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 39, No. 9, pp. 947-952, Nov. 2015.
- [6] M. Kim, K. B. Kang, S. H. Park, and J. H. Jung, "Measurement and Analysis of Radar Shielding and Doppler Effects by the Wind Farm", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 27, No. 8, pp. 742-749, Aug. 2016.
- [7] K. B. Kang, J. H. Jung, M. Kim, and S. H. Park, "Analysis of Effect of Wind Turbines in the Mountainous Area on Accuracy of Tracking Radar", *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 33-41, Mar. 2016.
- [8] J. Muñoz-Ferreras, Z. Peng, Y. Tang, R. Gómez-García, D. Liang, and C. Li, "Short-Range Doppler-Radar Signatures from Industrial Wind Turbines: Theory, Simulations, and Measurements", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 65, No. 9, pp. 2108-2119, Sep. 2016.
- [9] F. Kong, Y. Zhang, R. Palmer, and Y. Bai, "Wind Turbine radar signature characterization by laboratory measurements", *2011 IEEE RadarCon (RADAR)*, Kansas City, MO, USA, pp. 162-166, May 2011.
- [10] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", McGraw-Hill, pp. 104-106, Dec. 2000.
- [11] S. J. Lee and I. S. Choi, "Performance Comparison for Radar Target Classification of Monostatic RCS and Bistatic RCS", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 21, No. 12, pp. 1460-1466, Dec. 2010.
- [12] A. J. Jerri, "The Shannon sampling theorem—Its various extensions and applications: A tutorial review", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 65, Vol. 11, pp. 1565-1596, Nov. 1977.
- [13] T-Series Datasheet, <https://labjack.com/sites/default/files/LabJack-T-Series-Datasheet-Export-20200228.pdf>. [accessed: Mar. 20, 2020].
- [14] J. Muñoz-Ferreras, Z. Peng, Y. Tang, R. Gómez-García, and C. Li, "Doppler-radar-based short-range acquisitions of time-frequency signatures from an industrial-type wind turbine", *2017 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet)*, Phoenix, AZ, pp. 5-7, Jan. 2017.
- [15] F. Kong, Y. Zhang, and R. D. Palmer, "Wind Turbine Radar Interference Studies by Polarimetric Measurements of a Scaled Model", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 49, No. 3, pp. 1589-1600, Jul. 2013.

저자소개

김 용 빈 (Yong-Bin Kim)



2020년 2월 : 한남대학교
전자공학과(공학사)
2020년 3월 ~ 현재 : 한남대학교
전기전자공학과(공학석사)
관심분야 : 레이더 신호 측정 및
분석, 레이더 신호처리

최 영 재 (Young-Jae Choi)



2013년 2월 : 한남대학교
전자공학과(공학사)
2018년 2월 : 한남대학교
전자공학과(공학석사)
2018년 3월 ~ 현재 : 한남대학교
전기전자공학과 박사과정
관심분야 : RADAR 신호처리, RCS
해석 및 분석, 특성 벡터 추출

최 인 식 (In-Sik Choi)



1998년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학사)
2000년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2003년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학박사)
2003년 ~ 2004년 : LG전자

선임연구원
2004년 ~ 2007년 : 국방과학연구소 선임연구원
2007년 ~ 현재 : 한남대학교 전기전자공학과 교수
관심분야 : 레이더 신호처리, RCS 해석 및 분석, 레이더
시스템 설계