

부유형 풍력 터빈의 블레이드 불균형 회전에 대한 시뮬레이션 및 측정결과 비교

김영민*, 최인식**

Comparison of Simulation and Measurement for Imbalance Rotation of Floating Wind Turbine

Young-Min Kim*, In-Sik Choi**

이 논문은 2021년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R111A3043120)

요 약

본 논문은 부유형 풍력 블레이드가 외부환경으로 인해 무게가 증가하여 불균형 회전하는 상태를 레이더를 이용하여 모니터링하는 연구이다. 전자파 수치해석 시뮬레이션, 실내측정, 실외측정 3가지 방법을 이용하여 RCS(Radar Cross Section) 데이터를 획득하고 이를 분석하였다. 바다의 파도와 비슷한 움직임을 묘사하기 위해 시뮬레이션에서는 Coning motion을 적용하고, 실내측정에서는 3D 모션 플랫폼을 이용하며 실외측정은 바다 위에 측정환경을 구성하여 각각의 동적 RCS를 획득하였다. 획득한 RCS 데이터에 STFT(Short Time Fourier Transform)을 적용하여 시간-주파수 영상(스펙트로그램)을 획득하였고, 블레이드에 의해 나타나는 임펄스 형태의 신호인 플래시(Flash)와 도플러 주파수를 관찰하여 정상회전상태와 불균형회전상태의 차이점을 확인하였다. 그 결과 3가지 방법 모두 두 가지 상태에서 공통적인 차이점을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

Abstract

This paper deals with the monitoring technology using radar for the imbalance rotation of the floating wind turbine because of the weight increase by the surrounding environment. The numerical simulation, indoor measurement, and outdoor measurement are used for obtaining Radar Cross Section(RCS) data which will be analyzed. In the numerical simulation, we apply the coning motion describing the wave motion. In the indoor measurement, we used the 3D motion platform and in the outdoor measurement the turbine is directly located on the sea. The spectrogram is obtained by applying the Short Time Fourier Transform(STFT) to the RCS data. The normal and imbalance rotation can be identified by observing the flash signal which looks like impulse function by blades and Doppler frequency. Results show that three methods have the common difference between normal rotation and imbalance rotation.

Keywords

floating wind turbine, imbalance rotation, motion platform, radar cross section

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

· Received: Jan. 02, 2023, Revised: Feb. 08, 2023, Accepted: Feb. 11, 2023
· 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

I. 서 론

현재 화석 연료는 고갈되어 가고 있어 이를 대체하기 위해 재생에너지에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 재생에너지 중 하나인 풍력발전은 바람을 통하여 풍력 블레이드를 회전시키고 블레이드의 회전 운동을 통하여 전기를 생산한다.

풍력발전에는 육상풍력발전과 해상풍력발전이 있는데 육상풍력발전은 공사 기간이 짧고 설치비용과 운영 및 관리가 수월하다는 장점을 갖고 있지만, 주변 거주민들에게 저주파 소음으로 인한 피해와 적절한 부지를 찾기 어려워 대단지 조성하기 힘들다는 단점이 있다. 또한, 풍력발전기 블레이드에 붙어있던 얼음이 날아가 주변의 비닐하우스에 피해를 주는 사례도 존재한다. 이러한 육상풍력발전의 단점에서 자유로운 해상풍력발전은 육지보다 해상에서의 풍속이 빠르고 풍력단지를 대규모로 조성할 수 있어 많은 관심을 받고 비중이 매년 증가하는 추세이다. 하지만 해상풍력발전은 설치와 관리 및 운영에 있어 비용적으로 부담스럽다는 단점이 있고 해상에 위치하여 환경의 영향으로 풍력 블레이드에 얼음이나 소금 결정 등이 부착되어 각각의 블레이드 무게가 다르게 증가할 수 있다. 그 결과 무게가 무거운 블레이드는 중력이 크게 작용하여 가속이 붙고 이는 불균형회전을 초래하게 된다.

블레이드의 불균형회전은 전력손실을 일으키고 장시간 이어지면 고장으로 이어지므로 실시간 블레이드의 상태를 관측하는 연구는 국외에서도 많이 진행되었으며 주로 풍력 발전기 내부에 센서를 설치하는 방법을 이용하였다[1][2]. 최근에는 날씨나 기상의 영향이 적고 유지보수에 유리하여 다양한 분야에서 활용되고 있는 레이더를 이용하여 블레이드의 상태를 모니터링하는 연구가 활발하게 진행 중이다[3][4]. 선행연구 [5]에서는 풍력 블레이드의 동작 상태를 추정하기 위한 특성 벡터의 추출 방법을 제시하였다. 선행연구 [6]에서는 합성곱 신경망을 이용하여 구분기를 설계하여 풍력 블레이드의 상태를 구분하는 연구를 진행하였다. 하지만 선행연구 [5][6]에서는 육상풍력발전에 대하여 풍력 블레이드의 상태를 구분하였고, 해상풍력 블레이드의 경우는 연구가 수행되지 않았다.

본 논문에서는 RCS 시뮬레이션 및 coning 모션 생성방법, 실내측정 방법, 실외측정 방법을 설명하고 시뮬레이션과 실내측정, 실외측정 3가지 방법을 통해서 부유형 풍력 블레이드의 상태를 진단하여 3가지 방법의 결과가 유사함을 증명하였다.

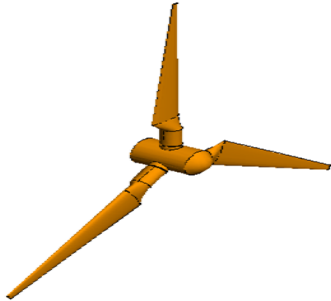
II. 관련 이론

2.1 RCS 시뮬레이션 방법

레이더를 이용하여 풍력 블레이드를 관측하였을 때 RCS는 블레이드의 상태를 진단할 수 있는 정보를 담고 있다. 풍력 블레이드는 정지상태가 아닌 회전 운동을 하는 물체이므로 블레이드의 움직이는 상태를 관측하기 위해서 동적 RCS를 계산하여야 한다. 동적 RCS를 계산하기 위해서 TSM-RT(Two Scale MODEL-Ray Tracing) 기법을 이용한 광선추적법을 이용하였다[7]. 상용 소프트웨어인 FEKO를 이용하여 동적 RCS 계산이 가능하지만 부유형 풍력 터빈은 해상에 위치하여 파도의 움직임을 고려해야 하는데 이러한 표현은 FEKO에서 불가능하다. 따라서 부유형 풍력 터빈의 흔들리는 정도를 고려하여 동적 RCS를 계산하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 우선 표적의 모델을 3D CAD(Computer Aided Design)로 모델링 하여 그림 1과 같이 블레이드 부분과 기둥 부분을 생성하고 FEKO에서 두 모델을 조립하여 풍력 터빈 모델을 구성하였다. 이렇게 완성된 3D CAD 모델은 FEKO를 이용하여 메쉬 데이터로 변환할 수 있다. 변환된 메쉬 데이터를 TSM-RT를 이용한 RCS 해석 코드에서 불러온 후, RCS 계산을 수행하게 된다.

그런데 부유형 풍력 터빈의 동적 RCS를 계산하기 위해서는 시간에 따른 표적의 3차원 움직임을 표현해야 한다[8]. 표적의 3차원 움직임을 표현하기 위해 본 논문에서는 다음과 같은 Coning motion을 가정하였다. Coning은 물체의 회전축이 단일한 원 궤적을 그리며 움직이는 운동이다. 전자파 수치해석 시뮬레이션을 수행하며 실제 바다의 파도와 같은 환경을 구성하기 위하여 이와 유사한 운동을 하는 Coning motion을 적용하였다. Coning을 표현하기 위해 블레이드와 기둥을 메쉬로 변환시켜 얻은 삼각

형 패치의 각 Vertex 벡터값에 회전행렬을 곱하여 좌표변환을 수행하였다. 그림 2는 메쉬 과정을 통해 얻은 삼각형 패치의 Vertex를 보여주고 있다.



(a) 블레이드의 3D CAD 모델
(a) 3D CAD model of blade



(b) 기둥의 3D CAD 모델
(b) 3D CAD Model of pole

그림 1. 블레이드와 기둥의 3차원 CAD 모델
Fig. 1. 3D CAD model of blade and pole

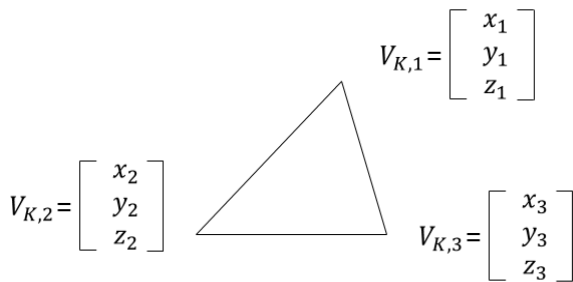


그림 2. k번째 삼각형 패치에 대한 3개의 Vertex
Fig. 2. Three vertexes of kth triangular patch

우선 Coning을 표현하기 위해 z축으로부터 회전축을 기울여야 한다. 삼각형 패치 행렬인 V에 각도 θ 만큼을 기울인 상태를 적용하면 다음과 같다.

$$V_{coning} = R_{\theta}^x V \quad (1)$$

$$\text{where } R_{\theta}^x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\theta) & \sin(-\theta) \\ 0 & -\sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix}$$

물체를 기울인 후에는 z축을 중심으로 ϕ 만큼 회전을 시킨다. 회전시킨 후의 Vertex의 좌표는 다음과 같다.

$$V_{coning} = R_{\phi}^z R_{\theta}^x V \quad (2)$$

$$\text{where } R_{\phi}^z = \begin{bmatrix} \cos(-\phi) & \sin(-\phi) & 0 \\ -\sin(-\phi) & \cos(-\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

회전하는 과정에서 좌표변환으로 인해 Coning에 적용되지 않는 Spinning이 발생하게 된다. 따라서 이와 반대 방향인 역방향 Spinning을 먼저 적용하여 적절한 보상을 해준 후, Coning을 적용한 Vertex의 좌표는 다음과 같다.

$$V_{coning} = R_{\phi}^z R_{\theta}^x R_{-\phi}^z V \quad (3)$$

$$\text{where } R_{-\phi}^z = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

그림 3은 Coning motion에서 z축으로부터 기울어진 각도 θ 와 z축을 중심으로 회전하는 각도 ϕ 그리고 궤적을 나타낸다.

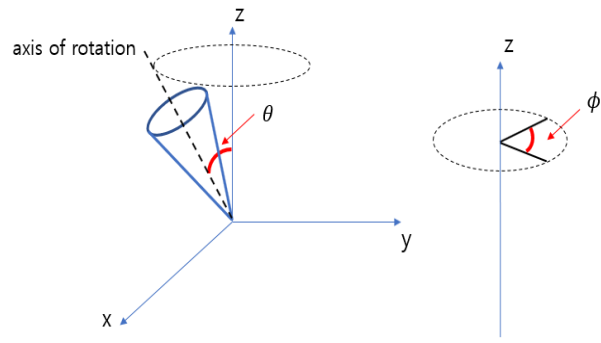


그림 3. Coning motion의 각도와 궤적
Fig. 3. Angle and circular path of coning motion

2.2 실내 및 실외 측정방법

실내측정에서는 선행연구 [9]와 같이 24GHz의 주파수 대역을 갖는 도플러레이더와 데이터수집장치인 DAQ(Data Acquisition)를 사용하여 RCS 데이터를 획득하였다. 측정환경에 사용할 풍력 블레이드의 scale model은 정상상태와 불균형 회전하는 상태 두 가지를 사용하였다.

그림 4와 같이 불균형 회전하는 scale model의 블레이드 날개 중 1개는 무게추(Weight)를 추가하여 무게를 추가함으로써 불균형 회전을 구현하였다.

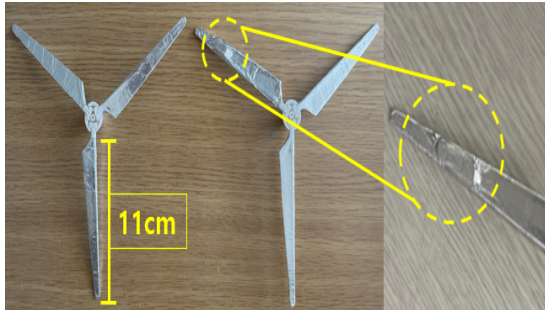


그림 4. 축소 모델의 정상 및 불균형 상태 블레이드
Fig. 4. Blade shapes of normal and imbalance models

실내측정 시 부유형 풍력 터빈의 회전상태를 관측하기 위해 시뮬레이션과 같이 바다의 파도와 같은 환경이 요구된다. 따라서 Coning과 유사한 Motion을 갖는 3D 모션 플랫폼을 제작하여 사용하였다[6]. 그림 5는 제작한 3D 모션 플랫폼을 나타낸다.



그림 5. 완성된 3D 모션 플랫폼
Fig. 5. Completed 3D motion platform

동작 원리는 PWM 제어를 통해 Motion의 주기를 조정할 수 있으며 Delay를 조정하면 원판이 기울어지는 각도를 조정할 수 있다. 실내측정환경을 구성하기 위해 측정장치인 도플러레이더와 DAQ를 포함하여 3D 모션 플랫폼, 풍력 블레이드의 스케일 모델을 사용하였고, 실내측정 환경에서는 벽이나 바닥 등에서 레이더 신호 외 잡음 신호가 수신될 수 있으므로 전파흡수체를 바닥과 물체의 뒤쪽에 설치하여 이를 최소화 시켜 그림 6과 같이 실내측정환경을 구성하였다.

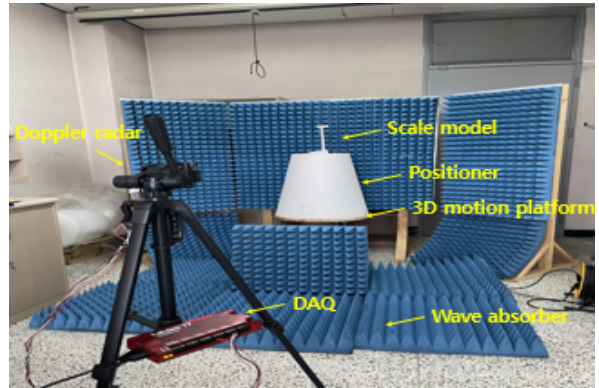


그림 6. 실내측정환경
Fig. 6. Indoor measurement environment

실외측정은 그림 7과 같이 바다 위에 스티로폼을 띄워 파도에 의한 움직임에 따라 자연스러운 모션을 구현하였으며, 실내측정에서 사용한 것과 같은 도플러레이더와 DAQ를 이용하여 레이더 신호를 획득하였다.

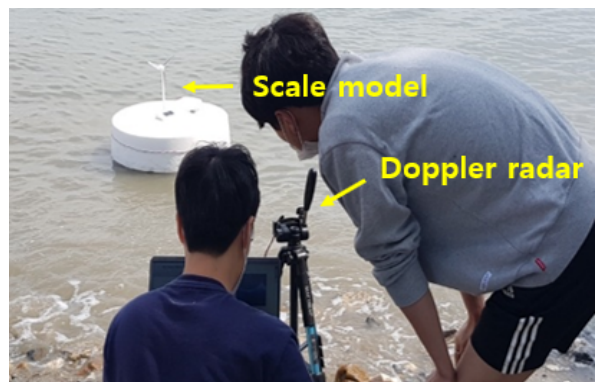


그림 7. 실외측정사진
Fig. 7. Photo of outdoor measurement

III. 실험 결과

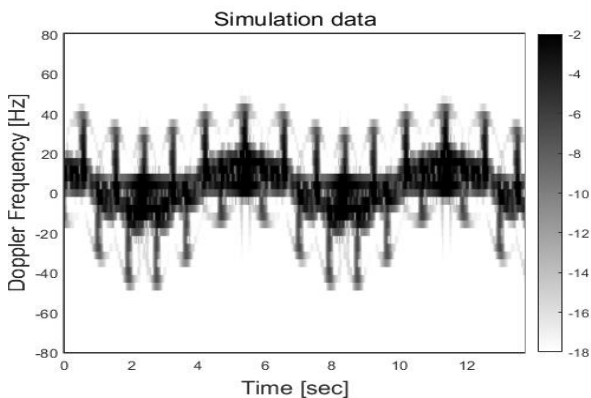
전자파 수치해석 시뮬레이션과 실내측정, 실외측정을 통해 얻은 데이터는 STFT를 적용하여 시간-주파수 영역의 스펙트로그램 영상을 획득하였다. 스펙트로그램 영상에서 도플러 주파수와 플레시의 간격을 확인함으로써 블레이드의 회전상태를 예측할 수 있다. 시뮬레이션에서 사용한 파라미터 값은 표 1과 같이 적용하였다. 방위각은 풍력 터빈의 옆면을 바라볼 때 0도이며 rpm(Revolution per minute)은 블레이드의 분당 회전수를 나타낸다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters

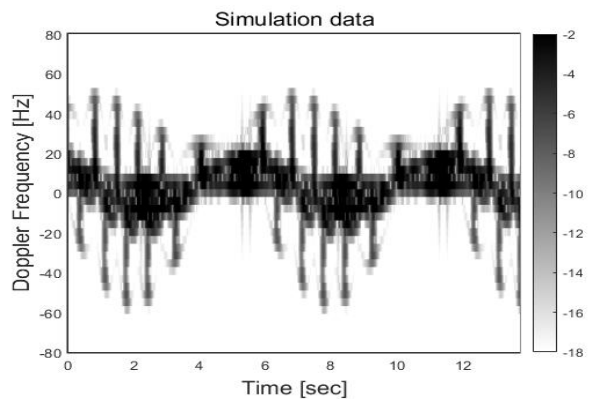
Parameter	Value
Azimuth angle[degree]	30
Revolution rate[rpm]	10
Center frequency[GHz]	24
Sampling frequency[Hz]	1000
Coning angle[degree]	20

풍력 블레이드의 정상상태와 불균형상태 시뮬레이션을 통해 얻은 RCS 데이터를 신호처리 후 얻은 스펙트로그램 영상은 그림 8과 같다. 스펙트로그램 영상에서 중심주파수의 형태가 정현파 신호처럼 나타나는 것은 coning에 의해 블레이드의 중심과 기둥에서 나타나는 신호이다. 정상상태와 불균형상태의 스펙트로그램 영상에는 차이점이 나타나게 되는데 첫 번째로 도플러 주파수 값의 차이이다.



(a) 정상회전

(a) Normal rotation



(b) 불균형 회전

(b) Imbalance rotation

그림 8. 시뮬레이션 데이터의 스펙트로그램 영상

Fig. 8. Spectrogram of simulation data

블레이드에 의한 도플러 주파수는 식 (4)와 같고

여기서 v 는 블레이드의 회전속도, R 은 블레이드의 길이, rps 는 블레이드의 초당 회전수, λ 는 레이더 신호의 파장이다.

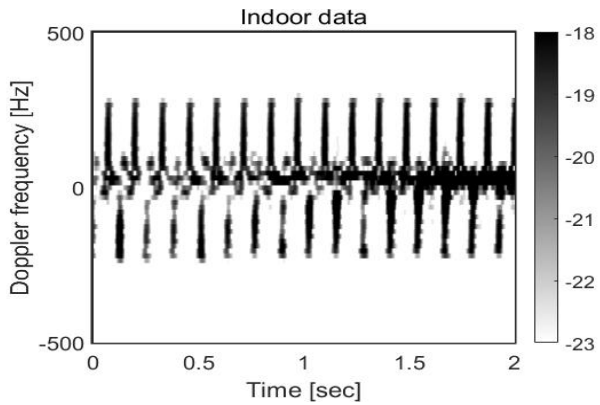
$$f_d = \frac{-2v}{\lambda} = \frac{-2 \times (2 \times \pi \times R \times rps)}{\lambda} \text{ [Hz]} \quad (4)$$

무게가 추가된 블레이드는 중력가속도로 인해 아래로 회전할 때 속도가 증가하고 위로 회전할 때 속도가 감소하게 된다. 그리하여 도플러 주파수는 최댓값이 증가하고 최솟값이 감소하게 된다. 플래시 신호의 최댓값이 그림 8(b)에서 그림 8(a)보다 크게 나타나고 최솟값은 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 두 번째로 플래시의 간격을 관측해 보면 정상상태의 블레이드는 일정하게 나타나지만, 불균형상태의 블레이드는 간격이 일정하지 않은 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션을 방법 이용한 결과 정상상태와 불균형상태의 블레이드를 2가지의 차이점으로 확인하였다.

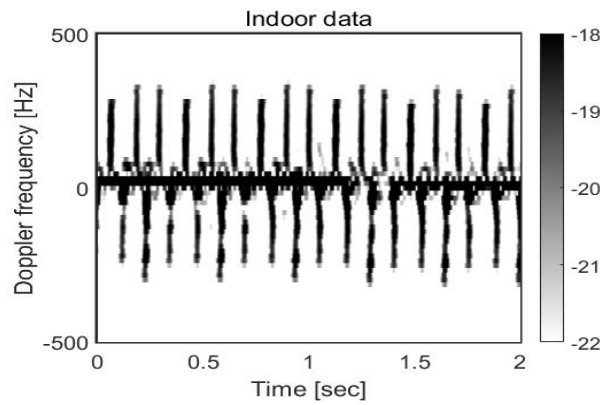
실내측정의 정상상태와 불균형상태의 스펙트로그램 영상은 그림 9와 같다. 시뮬레이션에서는 Coning에 의해 정현파 형태의 포락선 신호가 나타났는데, 실내측정의 경우 3D 모션 플랫폼의 움직임에 의한 포락선 신호가 나타나지 않는 것은 플래시 신호를 정밀하게 관찰하기 위해 관측시간을 2[sec]로 설정하였기 때문이다. 실내측정의 스펙트로그램 영상에서는 플래시의 간격의 차이를 눈으로 구분하는 것은 어렵다.이런 경우에는 플래시 사이의 간격을 추출하여 플래시 간격 그래프를 통하여 블레이드 상태 구분이 가능하다[10]. 하지만 실내측정에서도 시뮬레이션과 같이 불균형상태에서 무게가 추가된 블레이드와 추가되지 않은 블레이드에 나타나는 플래시 신호의 도플러 주파수는 차이가 나타난다.

그림 10은 실외측정에서의 각 상태에 대한 스펙트로그램 영상을 나타낸다. 실외측정도 실내측정과 같이 파도의 움직임이 중심주파수에 나타나지만, 플래시 관측을 위해 관측시간을 감소하였다. 실외측정의 불균형상태의 스펙트로그램 영상은 플래시의 간격이 정상상태보다 일정하지 않은 것을 육안으로도 확인할 수 있고, 실내측정과 마찬가지로 무게가 추

가된 블레이드가 나타내는 플래시 신호의 도플러 주파수는 무게를 추가하지 않은 블레이드의 플래시 신호와 차이가 나타나는 것을 확인하였다.

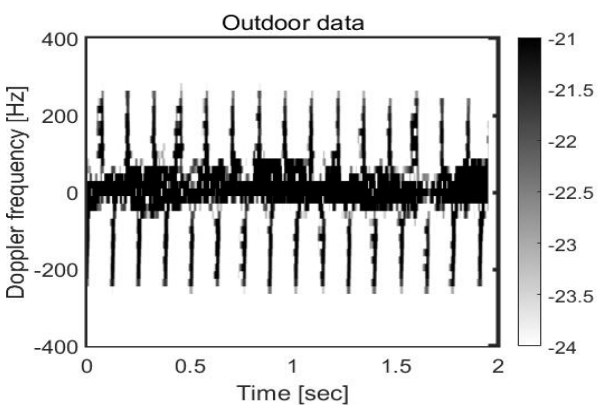


(a) 정상회전
(a) Normal rotation

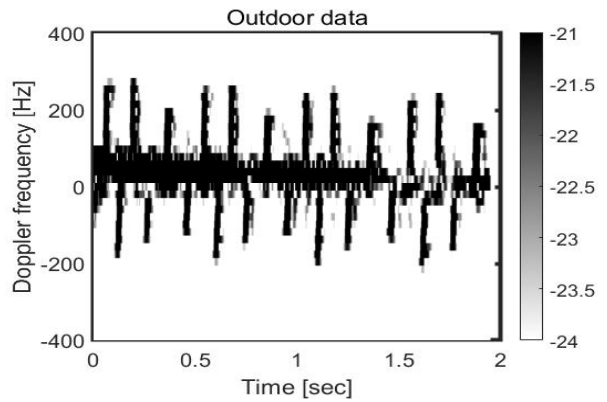


(b) 불균형 회전
(b) Imbalance rotation

그림 9. 실내측정 데이터의 스펙트로그램 영상
Fig. 9. Spectrogram of indoor measurement data



(a) 정상회전
(a) Normal rotation



(b) 불균형 회전
(b) Imbalance rotation

그림 10. 실외측정 데이터의 스펙트로그램 영상
Fig. 10. Spectrogram of outdoor measurement data

IV. 결 론

본 논문에서는 부유형 풍력 블레이드의 회전상태를 확인하기 위해 전자파 수치해석 시뮬레이션, 실내측정, 실외측정 방법을 통하여 얻은 RCS 데이터를 신호처리하여 분석하였다. 3가지 방법 모두 도플러 주파수 값의 변화와 플래시 신호의 간격을 확인하여 정상상태와 불균형상태를 구분할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 각각의 방법은 유사한 결과를 갖는 것을 확인하였다. 향후 연구에서는 실내측정과 실외측정 데이터를 충분히 획득하고 이를 CNN(Convolutional Neural Network)을 이용한 구분기를 통해 구분성능을 확인할 예정이다.

Acknowledgement

본 논문은 2022년 개최된 한국정보기술학회 하계 종합학술대회 논문 “부유형 풍력 블레이드에 대한 수치해석과 실내측정 결과 비교[11]”와 2022년 한국전자과학회 하계종합학술대회 논문 “부유형 풍력 블레이드에 대한 실내측정과 실외측정 결과 비교 [12]”을 확장한 것이다.

References

[1] B. Lu, Y. Li, X. Wu, and Z. Yang, "A review of recent advances in wind turbine condition

- monitoring and fault diagnosis", IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, Lincoln, NE, USA, pp. 1-7, 2009. <https://doi.org/10.1109/PEMWA.2009.5208325>.
- [2] S. A. Saleh and C. R. Moloney, "Development and testing of wavelet packet transform-based detector for ice accretion on wind turbines", Digital Signal Processing and Signal Processing Education Meeting(DSP/SPE), Sedona, AZ, USA, pp. 72-77, 2011. <https://doi.org/10.1109/DSP-SPE.2011.5739189>.
- [3] Y. B. Kim and I. S. Choi, "Analysis of measured radar signal depending on the weather for wind turbine blade", 2021 KIEE Spring Conference, pp. 121-123, May 2021.
- [4] K. Oh, J. Park, J. Lee, B. I. Epureanu, and J. Lee, "A novel method and its field tests for monitoring and diagnosing blade health for wind turbines", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 64, No. 6, pp. 1726-1733, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2381791>.
- [5] Y. B. Kim and I. S. Choi, "Feature Vector Extraction and Classifier Design for State Classification of Wind Turbine Blade", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 19, No. 6, pp. 89-97, Jun. 2022. <http://doi.org/10.14801/jkiit.2021.19.6.89>.
- [6] S. W. Ryu, Y. M. Kim, Y. M. Kim, Y. B. Kim, and I. S. Choi, "Design and Fabrication of 3D Motion Platform with Coning motion", Proc. of Microwave and Wireless communication conference, Vol. 22, No. 1, pp. 38-39, Oct. 2021.
- [7] Y. J. Choi and I. S. Choi, "Dynamic RCS Calculation of Wind Turbine Blade Using GPU-Based TSM-RT", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 31, No. 3, pp. 245-252, Mar. 2020. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.3.245>.
- [8] Y. J. Choi, "A Study on the feature extraction of the target motion using a continuous wave radar", Ph. D. dissertation of Hannam University, pp. 34-54, Feb. 2021.
- [9] Y. B. Kim, "Measurement and state classification of wind turbine blade using Doppler radar", Master thesis of Hannam University, pp. 5-10, Feb. 2022.
- [10] Y. J. Choi and I. S. Choi, "Imbalance Detection of Rotor Rotational Speed Using Doppler Radar", Journal of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 21, No. 2, pp. 111-118, Apr. 2021. <https://doi.org/10.26866/jees.2021.21.2.111>.
- [11] Y. M. Kim and I. S. Choi, "Comparison of numerical analysis and indoor measurement for floating wind turbine Blade", Proc. of KIIT Conference, Jeju, Korea, pp. 311-312, Jun. 2022.
- [12] E. B. Kim, Y. M. Kim, and I. S. Choi, "Comparison of Indoor Measurement and Outdoor Measurement for Floating Wind Turbine Blade", The Proc. of the Korea Electromagnetic Engineering Society, Vol. 10, No. 1, pp. 232 Aug. 2022.

저자소개

김 영 민 (Young-Min Kim)



2017년 3월 ~ 현재 : 한남대학교
전기전자공학과 학사과정
관심분야 : 레이더 신호 추정 및
분석, 레이더 신호처리

최 인 식 (In-Sik Choi)



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

선임연구원

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