

## 풍력 블레이드의 파손 상태에 따른 동적 RCS 분석

최영재\*, 최인식\*\*

### Dynamic RCS Analysis by Damage Status of Wind Turbine Blade

Young-Jae Choi\*, In-Sik Choi\*\*

---

본 연구는 2019학년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습니다.

---

#### 요 약

풍력 발전은 널리 사용되고 있는 친환경 발전 방법이다. 풍력 발전기는 발전 시스템이 외부에 노출되어 있기 때문에 다른 발전 방식에 비하여 발전기와 블레이드의 파손이 자주 발생한다. 따라서 풍력 발전기의 발전 효율을 높이기 위해서는 풍력 발전기의 파손 여부를 빠르게 확인하는 것이 매우 중요하다. 본 논문의 목적은 레이더를 사용하여 원격지에서 풍력 발전기의 파손 여부를 판단하는 방법을 제안하는 것이다. 물리광학법을 이용하여 블레이드가 파손된 풍력 발전기와 정상적인 풍력 발전기의 동적 RCS를 계산하였으며, 동적 RCS의 분석을 위하여 시간-주파수 분석과 사이노그램 분석을 사용하였다. 시간-주파수 영상과 사이노그램의 분석 결과 파손된 풍력 발전기와 정상적인 풍력 발전기 사이에서 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다.

#### Abstract

Wind power generation is an eco-friendly power generation method which is widely used. Since the power generation system of the wind turbine is exposed to the outside, the generators and the blades often break down as compared with other power generation systems. Thus, it is very important to quickly check the damage of the wind turbine in order to improve the power generation efficiency of the wind turbine. Our goal is to propose a method checking the damage of wind turbine by using remote radar sensing. The dynamic RCS of a wind turbine which blade has been broken down and a normal wind turbine were calculated using physical optics. Time-frequency analysis and sinogram analysis were used to analyze dynamic RCS. Analysis of time-frequency images and sinogram shows a clear difference between the damaged wind turbine and the normal wind turbine.

#### Keywords

radar, micro-doppler, dynamic RCS, wind turbine

---

\* 한남대학교 전기전자공학과  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8632-5265>  
\*\* 한남대학교 전기전자학과 교수(교신저자)  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8210-0843>

• Received: Mar. 21, 2019, Revised: May 07, 2019, Accepted: May 10, 2019  
• 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](mailto:recog@hnu.kr)

## I. 서 론

풍력 발전은 바람으로부터 전력을 얻는 방식이므로 일단 설치하고 나면 운영비용이 크지 않으며 공해를 일으키지 않는다는 장점이 있다. 그러나 바람이라는 자연 현상을 이용하기 때문에 풍력 발전기를 설치하여 운영할 수 있는 장소가 제한적이라는 어려움이 있다. 따라서 풍력 발전은 제한된 지역에 다수의 풍력 발전기를 설치하여 운영하는 풍력 발전 단지의 형태로 운영된다[1]. 풍력 발전기는 블레이드와 발전기가 외부 환경에 노출되어 있으며 다수의 발전기가 한꺼번에 운영되기 때문에 외부 환경에 의한 파손이나 부품의 마모에 의한 고장이 자주 발생하게 된다. 이러한 이유로 풍력 발전기 모니터링 시스템에 대한 연구와 개발은 매우 많이 이루어져 왔으며 실제 상용화되어 운영되고 있는 시스템도 많이 존재한다. 가장 많이 사용되는 방법은 풍력 발전기에 센서를 설치하고 통신으로 모니터링하는 방식이다[2]-[7]. 이러한 방식들은 높은 신뢰성을 갖지만 풍력 발전기의 외관을 관찰할 수 없으며 각각의 풍력 발전기마다 센서를 설치해 주어야 하는 어려움이 있다. 다른 한 가지 접근 방식은 카메라를 사용한 모니터링 방식이다. 카메라를 이용하는 경우 풍력 발전기의 외관을 관찰할 수는 있으나 기상과 관측 시간의 영향을 많이 받는다. 이를 극복하기 위하여 블레이드에 LED 조명을 설치하는 방법이 제안되었다[8]. 풍력 발전기에 대한 레이더 수신 신호의 특성을 분석한 많은 연구들이 있으며 [9]-[12], 특히 참고문헌 [10]-[12]에서는 풍력 발전기에 대한 레이더 수신 신호로부터 스펙트로그램(Spectrogram), 사이노그램(Sinogram), 역합성개구레이더(Inverse synthetic aperture radar)와 같은 레이더 영상들을 얻는 방법들과 그 결과들을 보여준다[10]-[12]. 이러한 연구 결과들로부터 레이더를 이용한 풍력발전기 모니터링 기술의 가능성을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 블레이드가 파손된 풍력 발전기와 정상적인 풍력 발전기의 동적 RCS(Radar Cross Section)를 시뮬레이션을 통하여 계산한다. 계산된 동적 RCS 데이터의 스펙트로그램과 사이노그램을 구하여 블레이드가 파손된 풍력 발전기와 정상적인 풍력 발전기의 차이를 분석한다.

## II. 풍력 발전기의 동적 RCS 계산

본 절에서는 물리광학법을 이용하여 복잡한 움직임을 갖는 3차원 풍력 발전기 모델의 동적 RCS를 계산하는 방법을 설명한다. 그림 1은 풍력 발전기의 3차원 CAD 모델과 레이더의 배치에 대한 구조를 보여주고 있다.

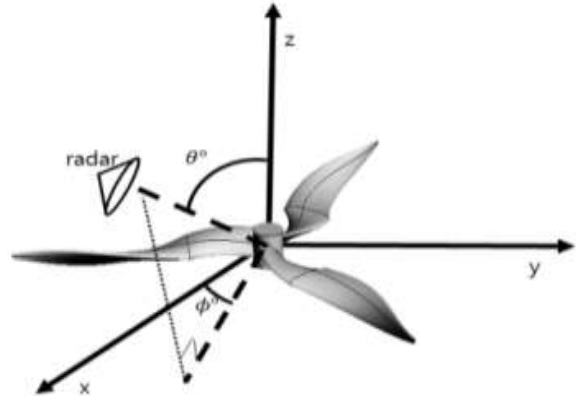


그림 1. 동적 RCS 시뮬레이션에 대한 구조  
Fig. 1. Geometry of dynamic RCS simulation

풍력발전기의 3차원 모델의 표면을 한 변의 길이가  $\lambda/8$ 보다 작은 삼각형 패치로 분할한 것을 메쉬(Mesh)라고 한다. 여기서  $\lambda$ 는 레이더 송신 주파수의 파장을 의미한다. 메쉬는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M = [X_1 \cdots X_k \cdots X_K] \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 메쉬를 이루는 삼각형 패치의 총 개수이며  $X_k$ 는  $k$  번째 삼각형 패치로써 식 (2)와 같이 표현된다.

$$X_k = [\vec{V}_1 \ \vec{V}_2 \ \vec{V}_3] \quad (2)$$

여기서  $\vec{V}_i = [v_i^x \ v_i^y \ v_i^z]^T$ 는 삼각형 패치를 이루는 하나의 점의 3차원 위치벡터이다. 메쉬  $M$ 에서 블레이드의 중심이 원점에 있고 블레이드가  $z$  축을 중심으로 회전한다면 오일러 회전 행렬을 이용하여 시간이  $t_n$ 일 때의 메쉬를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$M_n = T_n M \quad (3)$$

여기서  $n = 1, 2, \dots, N$ 은 시간 샘플링 인덱스이며,  $N$ 은 총 시간 샘플링 개수이다. 회전 행렬  $T_n$ 은 식 (4)와 같다.

$$T_n = \begin{bmatrix} \cos \Omega_n & \sin \Omega_n & 0 \\ -\sin \Omega_n & \cos \Omega_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $\Omega_n = \omega t_n$ 는 시간  $t_n$ 에서의 블레이드의 회전 각을 의미하고  $\omega$ 는 블레이드의 초당 회전 각속도이다. 이와 같이 계산된 메쉬  $M_n$ 의 RCS는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$E_q^n = PO(\theta, \phi, M_n, f_q) \quad (5)$$

여기서  $PO(\cdot)$ 는 주어진 조건에서 물리광학법을 이용하여 메쉬  $M_n$ 의 RCS를 구하라는 의미이며  $\theta, \phi$ 는 그림 1에 표시된 것과 같은 레이더의 고도각과 방위각이고  $q = 1, 2, \dots, Q$ 는 주파수 샘플링 인덱스이며  $Q$ 는 주파수 샘플링 개수이다. 본 논문에서는 상용 전자파 수치해석 소프트웨어인 FEKO를 사용하여 RCS를 계산하였다. 특정 주파수  $f_q$ 에 대한 동적 RCS는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$DRCS_q = [E_q^1 E_q^2 \dots E_q^n \dots E_q^N] \quad (6)$$

그림 2는 블레이드가 파손된 풍력 발전기와 정상적인 풍력 발전기의 3차원 CAD 모델을 보여주며, 표 1은 시뮬레이션 파라미터를 보여준다.

그림 3은 이에 대한  $f_1$ 인 경우의 동적 RCS를 보여준다. 파손된 표적의 경우 정상적인 표적에 비하여 블레이드 하나의 길이가 짧기 때문에 그림 3에서 두 표적의 동적 RCS는 서로 다르다. 그러나 동적 RCS가 변화하였다는 사실은 표적의 형상이나 측정된 배경에 어떠한 변화가 있었다는 정보만을 알려줄 뿐, 표적의 어떠한 형상 변화가 이러한 동적 RCS의 변화의 원인이 되었는지는 알려주지 못한다.

### III. 동적 RCS 분석

#### 3.1 사이노그램 분석

사이노그램은 시간에 따른 거리 프로파일의 나열로 표현할 수 있다.

$$SG = [\overrightarrow{RP_1} \overrightarrow{RP_2} \overrightarrow{RP_n} \dots \overrightarrow{RP_N}] \quad (7)$$

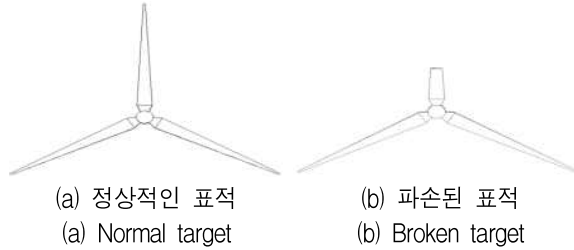


그림 2. 풍력 발전기의 3차원 CAD 모델  
Fig. 2. 3D CAD models of wind turbine

표 1. 레이더 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameters of radar

Symbol	Value	Description
$\theta$	$60^\circ$	Angle between blade rotation axis and the radar line of sight
$\phi$	$0^\circ$	Target aspect angle
$Q$	128	Number of frequency sampling points
$f_1$	100 MHz	Start frequency
$f_Q$	130 MHz	End frequency
$PRF$	240 Hz	Pulse repetition frequency
$N$	721	Number of observation time samples
$t_N$	3 sec	Observation time
$T$	3 sec	Period of the rotating blade

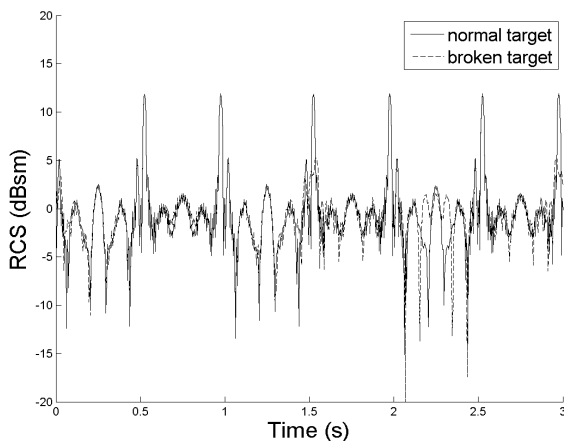
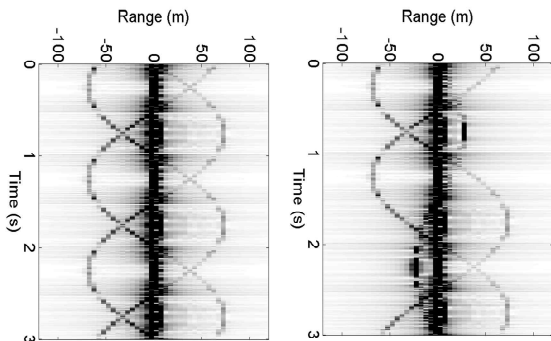


그림 3. 풍력 발전기의 동적 RCS  
Fig. 3. Dynamic RCS of wind turbine

여기서  $\overrightarrow{RP}_n = |IFFT([E_1^n E_2^n E_q^n \dots E_Q^n]^T)|$ 는 특정 시간에서의 거리프로파일이며,  $IFFT(\cdot)$ 는 주어진 벡터에 대한 역푸리에변환(Inverse Fourier transform)을 의미한다.

그림 4는 정상적인 표적과 블레이드가 파손된 표적의 사이노그램을 보여준다. 그림 4의 사이노그램으로부터 얻을 수 있는 풍력 발전기에 대한 정보는 블레이드의 회전각속도, 블레이드의 길이, 그리고 블레이드 형상의 변화이다. 사이노그램은 거리프로파일을 사용하므로 표적이 0m에 위치하고  $\theta = 90^\circ$  때, 블레이드 길이는 산란점의 위치와 표적의 중심 사이의 최대 거리와 일치한다. 사이노그램의 패턴은 블레이드가 한 바퀴 회전할 때마다 동일한 패턴이 반복되므로 풍력 발전기 블레이드의 초당 회전 각속도는  $\omega = 2\pi/\tilde{T}$  rad/s와 같이 계산할 수 있다. 여기서  $\tilde{T}$  sec는 패턴의 반복 주기이다. 또한 사이노그램에서 거리 방향으로 나타나는 패턴들은 블레이드의 형상에 의존한다. 따라서 하나의 블레이드가 파손될 경우 그림 4(b)와 같이 다른 블레이드의 패턴들과 형태가 불일치하는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 사용한 표적에서는 사이노그램의 패턴이 정현파의 형태로 나타났으나 기존의 연구 결과들은 블레이드의 형상에 따라 사이노그램의 패턴이 다양한 형태로 나타날 수 있다는 것을 보여준다 [11][12]. 사이노그램의 세로축에 해당하는 거리축의 해상도와 레이더의 대역폭은  $\Delta R = \frac{c}{2B}$  와 같은 관계를 갖는다. 여기서  $c = 3 \times 10^8$  m/s는 진공에서의 빛의 속력이며  $B$ 는 레이더 신호의 대역폭이다.



(a) 정상적인 표적 (b) 파손된 표적

그림 4. 3차원 캐드 모델의 사이노그램

Fig. 4. Sinogram of 3D CAD model, (a) Normal target, (b) Broken target

사이노그램의 가로축에 해당하는 시간축의 해상도는 레이더 펄스 송신 반복 주기인 pulse repetition interval(PRI)에 의존한다. 따라서 사이노그램을 사용하여 풍력 발전기를 모니터링 하기 위해서는 PRI가  $\tilde{T}$ 에 비하여 충분히 커야 하고 레이더의 대역폭이 블레이드의 움직임을 표현하기에 충분한 거리 해상도를 제공하여야 한다. 따라서 사이노그램은 블레이드의 길이가 길고 비교적 회전 각속도가 느린 대형 풍력 발전기의 분석에 유리한 방법으로 볼 수 있다.

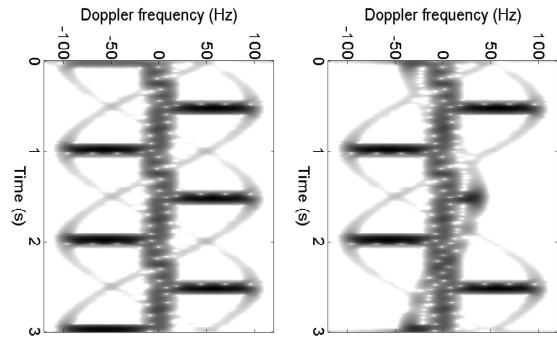
### 3.2 스펙트로그램 분석

스펙트로그램은 특정 주파수에 대한 동적 RCS 데이터인  $DRCS_q$ 에 아래와 같은 STFT(Short Time Fourier Transform)를 적용하여 구할 수 있다.

$$STFT(f_a, m) = \sum_{n=1}^N E_q^n w[n-m] e^{-j2\pi f_a n} \quad (8)$$

여기서  $w[\cdot]$ 는 윈도우 함수이다. 본 논문에서는 32 포인트 길이의 Gaussian 윈도우를 사용하였다.

그림 5는 3차원 모델의 100MHz 주파수에 대한 스펙트로그램을 보여준다. 그림 5의 스펙트로그램으로부터 얻을 수 있는 풍력 발전기에 대한 정보는 블레이드의 회전각속도, 블레이드의 길이, 그리고 블레이드 형상의 변화이다. 그림 5에서는 도플러 측 방향으로 팔을 뻗은 것과 같은 형상이 일정한 시간마다 반복적으로 나타난다. 이러한 패턴은 블레이드의 형상에 따라 다르게 나타날 수 있다[9][10].



(a) 정상적인 표적 (b) 파손된 표적

그림 5. 3차원 캐드 모델의 스펙트로그램

Fig. 5. Spectrogram of 3D CAD model, (a) Normal target, (b) Broken target

레이더의 입장에서 바라본 블레이드 끝 부분에 의해 발생하는 도플러 주파수는 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$f_d^{tip} = -f \frac{4\pi l}{cT} \sin\theta = -\frac{2v^{tip}}{\lambda} \sin\theta \quad (9)$$

여기서  $l$ 은 블레이드의 길이이고,  $\lambda = c/f$ 이며  $v^{tip} = (2\pi l)/T$ 는 블레이드 끝 부분의 이동속도다. 또한 도플러 축 방향으로 뺀 팔의 형상은 블레이드의 형상에 의존하기 때문에 하나의 블레이드가 파손될 경우 그림 5(b)와 같이 대응되는 팔의 형상이 변화함을 확인할 수 있다. 스펙트로그램의 세로축에 해당하는 도플러 주파수의 최대값과 레이더의 시간 샘플링 간격은 식 (10)과 같은 샘플링 이론을 만족하여야 한다.

$$2f_d^{tip} \leq f^{sampling} \quad (10)$$

여기서  $f^{sampling}$ 는 레이더의 샘플링 빈도이다.

### 3.3 표적의 변화에 따른 스펙트로그램 분석

이전 절에서는 표적의 종류와 레이더의 관측각  $\theta$ 가  $60^\circ$ 로 고정된 상황에 대하여 시뮬레이션 및 분석을 수행하였다. 본 절에서는 레이더의 관측각  $\theta$ 가 변화하거나 표적의 형상이 변화할 경우에 대한 시뮬레이션 및 스펙트로그램 분석을 수행하였다.

그림 6은 그림 2와 다른 블레이드 형상의 풍력

발전기 3차원 모델을 보여준다. 그림 6의 표적은 블레이드의 형상에 굴곡이 추가되었다.

그림 7과 그림 8은 그림 6의 표적에 대한 관측각도 별 스펙트로그램 영상을 보여준다. 팔의 형태가 곧게 뻗어있는 그림 5와 달리 그림 7과 그림 8의 영상은 팔의 형태가 굴곡져 나타난다. 이로부터 스펙트로그램의 팔의 형태가 블레이드의 형상에 의존함을 알 수 있다.

또한 그림 5와 달리 그림 7과 그림 8의 스펙트로그램에서는 정현파 형태의 포락선이 관찰되지 않는다. 이러한 결과는 블레이드의 형상에 따라 정현파 형태의 포락선이 나타나지 않을 수 있음을 보여주며 기존의 연구 결과들과도 일치한다[9][10]. 그림 7과 그림 8은 레이더의 관측각이 풍력 발전기의 회전축으로부터  $\theta$ 가 각각  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 로 기울어져 있을 때의 스펙트로그램을 보여준다. 관측각의 기울기가 커져서 레이더가 풍력발전기의 측면을 바라보게 되면 스펙트로그램의 팔의 길이가 길어진다.



(a) 정상적인 표적 (a) Normal target (b) 파손된 표적 (b) Broken target

그림 6. 풍력 발전기의 3차원 CAD 모델 Fig. 6. 3D CAD models of wind turbine

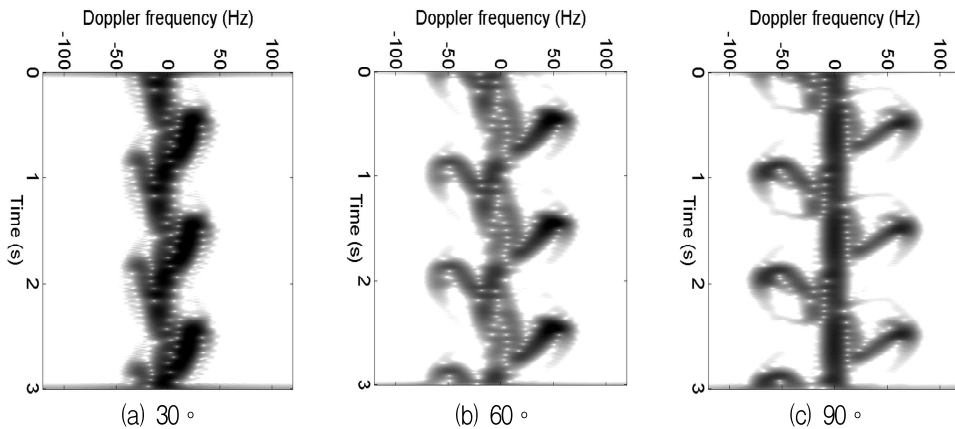


그림 7. 관측 각도에 따른 스펙트로그램 (정상) Fig. 7. Spectrogram according to observation angle (normal)

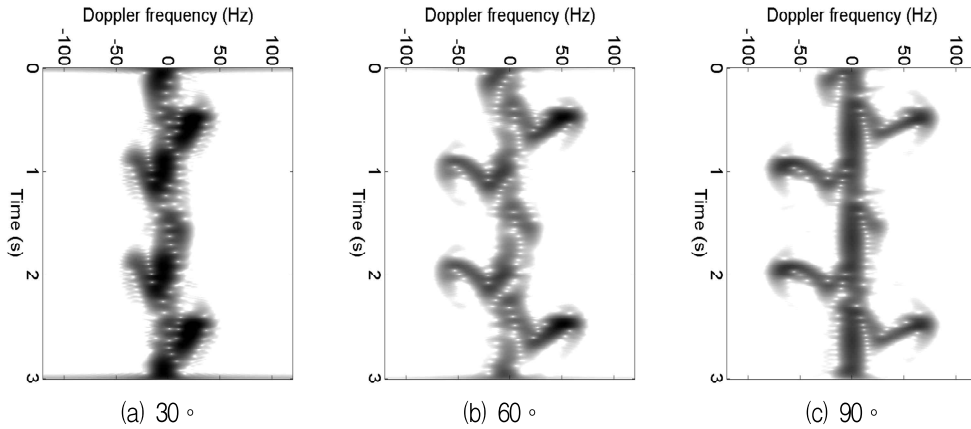


그림 8. 관측 각도에 따른 스펙트로그램 (파손)  
 Fig. 8. Spectrogram according to observation angle (broken)

그러나 팔의 길이가 변화함에도 불구하고 팔의 기하학적인 형상은 거의 변화하지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 결과들은 스펙트로그램을 분석함으로써 블레이드의 형상의 변화나 레이더의 관측각  $\theta$  를 추정할 수 있다는 가능성을 보여준다. 많은 풍력 발전기가 블레이드의 회전수를 제어하기 위하여 회전축이 바라보는 각도를 조정하는 요잉(yawing) 제어와 바람을 받는 블레이드의 각도를 조절하는 피칭(pitching) 제어를 수행한다는 점을 고려할 때 이는 매우 중요한 정보이다.

#### IV. 매개변수 계산

##### 4.1 사이노그램

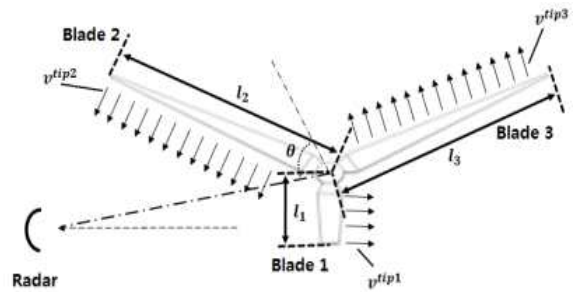
앞에서 구한 스펙트로그램과 사이노그램의 결과로부터 풍력 블레이드의 정보를 담고 있는 각종 매개변수들을 계산할 수 있다. 그림 9는 그림 2에서 소개한 파손된 표적의 형상과 관측각  $\theta = 60^\circ$  에서의 사이노그램을 보여준다.

그림 9(b)의 사이노그램에서 신호가 강하게 나타나는 산란점들의 포락선이 3개가 나타나며 각각의 포락선들은 블레이드 하나에 대한 성분이다. 이러한 사이노그램으로부터 각 블레이드의 길이  $l_1, l_2, l_3$  와 블레이드의 회전 주기  $T$ 를 구할 수 있다.

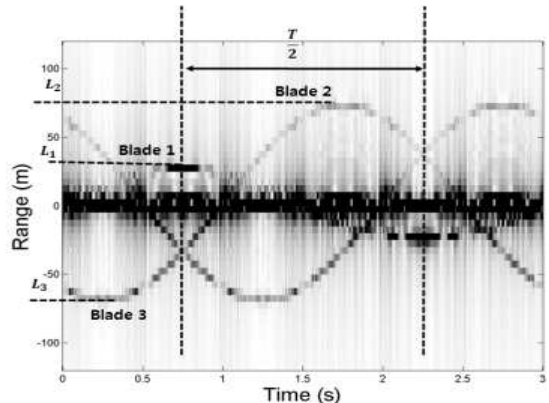
표 2는 시뮬레이션에 사용한 표적의 실제 파라미터 ( $l_k^{act}$ )와 사이노그램으로부터 추정된 파라미터 ( $l_k^{est}$ )를 비교한 것이며,  $l_k = L_k / \sin\theta$ 의 관계를 가

지고 있다. 여기서 RE는 Relative Error로써 식 (11) 과 같이 정의된다.

$$RE(\%) = \left| \frac{X_{actual} - X_{estimated}}{X_{actual}} \right| \times 100 \quad (11)$$



(a) 파손된 블레이드의 형상  
 (a) Shape of the broken blade



(b) 파손된 블레이드의 사이노그램  
 (b) Sinogram of broken blade

그림 9. 파손된 블레이드의 형상과 사이노그램의 관계  
 Fig. 9. Relation between broken blade and its sinogram

표 2. 파라미터 비교 (사이노그램)

Table 2. Parameter comparison (sinogram)

Blade number (k)	Actual ( $l_k^{act}$ )	Sinogram ( $L_k$ )	Sinogram ( $l_k^{est}$ )	RE
1	29.25 m	27.5 m	31.75 m	8.54 %
2	81.5 m	72.5 m	83.71 m	2.71 %
3	81.5 m	72.5 m	83.71 m	2.71 %

4.2 스펙트로그램

그림 10은 파손된 블레이드에 대한 스펙트로그램과 표적의 매개변수들의 관계를 보여준다. 그러나 그림 10과 같이 스펙트로그램에 표시된 도플러 주파수를 그대로 사용하게 되면 스펙트로그램의 해상도 문제에 의하여 계산 값에 오차가 발생한다.

그림 11은 동일한 조건에서 DC 신호에 대하여 구한 스펙트로그램이다. 스펙트로그램에 표시되는 도플러 성분의 최대/최소값과 중앙값 사이에 15Hz의 차이가 존재함을 확인할 수 있다.

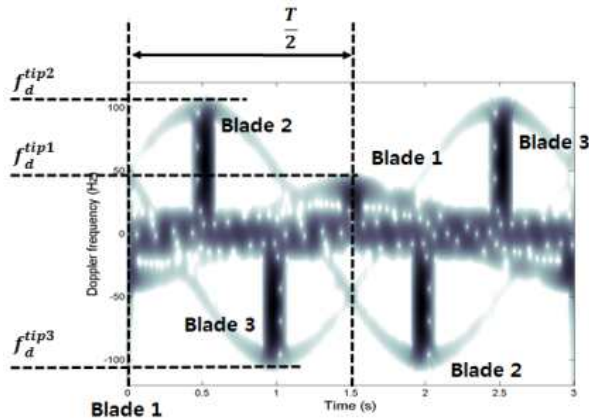


그림 10. 파손된 블레이드의 스펙트로그램(윈도우 길이: 32)  
Fig. 10. Spectrogram of broken blade(window length: 32)

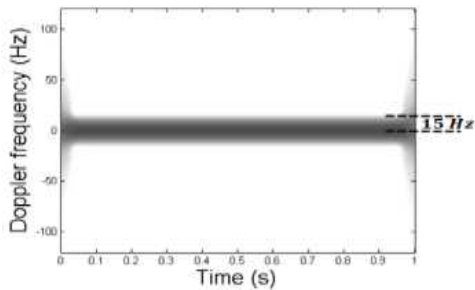


그림 11. 스펙트로그램의 중앙값과 최대값의 차이  
Fig. 11. Difference between median and maximum value in spectrogram

표 3에서  $T$ ,  $f_d^{tip1}$ ,  $f_d^{tip2}$ ,  $f_d^{tip3}$ 는 스펙트로그램에서 구한 최대/최소값을 중앙값으로 바꾸어 사용한다. 이것을 식  $v^{tip} = -\frac{cf_d^{tip}}{2f\sin\theta}$ 에 대입하여  $v^{tip1}$ ,  $v^{tip2}$ ,  $v^{tip3}$ 을 계산한다. 또한,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ 은  $l = \frac{v^{tip}T}{2\pi}$ 로 계산한다.

표 3에서 스펙트로그램으로부터 추정된 매개변수들은 실제 값과 2.6% 이내의 근소한 오차를 보인다.

표 3. 파라미터 비교 (스펙트로그램)

Table 3. Parameter comparison (spectrogram)

Symbol	Actual	Spectrogram	RE(%)
$T/2$	1.5 sec	1.5 sec	-
$f_d^{tip1}$	35.36 Hz	35.00 Hz	1.01
$f_d^{tip2}$	98.54 Hz	96 Hz	2.57
$f_d^{tip3}$	98.54 Hz	96 Hz	2.57
$v^{tip1}$	61.24 m/s	60.62 Hz	1.01
$v^{tip2}$	170.67 m/s	166.27 m/s	2.57
$v^{tip3}$	170.67 m/s	166.27 m/s	2.57
$l_1$	29.24 m	28.94 m	1.02
$l_2$	81.5 m	79.38 m	2.6
$l_3$	81.5 m	79.38 m	2.6

VI. 결 론

본 논문에서는 레이더를 이용하여 블레이드가 파손된 풍력 블레이드를 관측하는 상황을 시뮬레이션하고 수신된 레이더 신호를 사이노그램 및 스펙트로그램을 사용하여 분석하였다. 두 방법을 통하여 풍력 블레이드의 각종 매개변수를 구하고 그 정확도를 비교하였다. 두 방법들 중 스펙트로그램을 이용한 방법이 풍력 블레이드의 상태에 대한 더 많은 정보를 정확하게 얻을 수 있는 것으로 판단된다. 또한 단일 주파수를 사용하기 때문에 측정을 위한 시스템의 구축에 드는 비용을 절감할 수 있을 것으로 보인다. 향후에서는 실제 측정 시스템을 구축하여 본 논문에서 제안한 방법을 검증하고 발전시키는 연구를 수행할 것이다.

References

[1] S. J. Lee, "Limitations of and Improvements for



Korea's Renewable Energy Policy on Wind Power", Environmental Law and Policy, Vol. 15, pp. 1-32, Sep. 2015.

[2] W. Yang, P. J. Tavner, and M. R. Wilkinson, "Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine synchronous generator drive train", IET Renewable Power Generation, Vol. 3, No. 1, pp. 1-11, Mar. 2009.

[3] Wenxian Yang, P. J. Tavner, C. J. Crabtree, and M. Wilkinson, "Cost-Effective Condition Monitoring for Wind Turbines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 1, pp. 263-271, Jan. 2010.

[4] W. Yang, P. J. Tavner, C. J. Crabtree, Y. Feng, and Y. Qiu, "Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges: Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges", Wind Energy, Vol. 17, No. 5, pp. 673-693, May 2014.

[5] J. Y. Han and S. H. Lee, "Implementation of Aerogenerator Remote Individual Monitoring and Braking System", Korea Institute of Information Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 27-33, Apr. 2013.

[6] S. J. Park and D. S. Kang, "Implementation of Real-time Monitoring System using the Neural Network for Automatic Failure Diagnosis of Offshore Wind Turbine", Korea Institute of Information Technology, Vol. 10, No. 7, pp. 193-198, Jul. 2012.

[7] F. P. G. Márquez, A. M. Tobias, J. M. P. Pérez, and M. Papaalias, "Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods", Renewable Energy, Vol. 46, pp. 169-178, Oct. 2012.

[8] M. Ozbek, D. J. Rixen, O. Erne, and G. Sanow, "Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry", Energy, Vol. 35, No. 12, pp. 4802-4811, Dec. 2010.

[9] D. Jenn and C. Ton, "Wind Turbine Radar Cross Section", International Journal of Antennas and

Propagation, Vol. 2012, Article ID 252689, pp. 1-14, Dec. 2012.

[10] A. Naqvi, S. T. Yang, and H. Ling, "Investigation of Doppler Features From Wind Turbine Scattering", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 9, pp. 485-488, May 2010.

[11] B. Kent et al., "Dynamic Radar Cross Section and Radar Doppler Measurements of Commercial General Electric Windmill Power Turbines Part 1: Predicted and Measured Radar Signatures", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 50, No. 2, pp. 211-219, Apr. 2008.

[12] C. Li, S. T. Yang, and H. Ling, "In-Situ ISAR Imaging of Wind Turbines", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 64, No. 8, pp. 3587-3596, Aug. 2016.

저자소개

최 영 재 (Young-Jae Choi)



2013년 2월 : 한남대학교  
전자공학과(공학사)  
2018년 2월 : 한남대학교  
전자공학과(공학석사)  
2018년 3월 ~ 현재 : 한남대학교  
전기전자공학과 박사과정  
관심분야 : 레이더 신호처리

최 인 식 (In-Sik Choi)



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

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