



비접촉 변위 센서 기반 풍력발전기 운전 중 블레이드 중대 손상 탐지 기술 개발

서윤호^{1)*} · 김동준²⁾ · 김상렬¹⁾ · 박선호³⁾ · 정재호⁴⁾

Development of Damage Detection of Wind Turbine Blade Using Non-Contact Displacement Sensor during Operation

Yun-Ho Seo^{1)*} · Dongjoon Kim²⁾ · SangRyul Kim¹⁾ · Sun-Ho Park³⁾ · Jae-Ho Jeong⁴⁾

Received 11 July 2025 Revised 8 August 2025 Accepted 21 August 2025 Published online 16 September 2025

ABSTRACT As the size of offshore wind turbines continue to increase, the development of technologies for monitoring severe blade damage has become increasingly critical. In this study, a non-contact displacement sensor was utilized to directly measure blade displacement, thus enabling real-time fault diagnosis during turbine operation. The proposed technique was initially validated in a laboratory using a scaled-down model to test data-acquisition and signal-processing methods. Subsequently, it was applied to a commercial kilowatt-scale wind turbine, where the acceleration and displacement data of the blades were obtained over a six-month period, thus demonstrating the applicability of the developed method in the actual field. Virtual blade damage was realized by variations in the pitch angle; thus, the loading condition was changed. The time-domain features of the displacement successfully differentiated between normal and damaged blade states, although the measured acceleration failed to detect. Because the sensor is mounted on a stationary nacelle, the proposed method offers high reliability and is expected to be suitable for real-world applications. Although current technology cannot detect small cracks or minor defects in large blades in real time, it is effective for monitoring catastrophic blade failures and supporting immediate maintenance actions.

Key words Wind turbine(풍력발전기), Blade(블레이드), Damage detection(결함탐지), Displacement sensor(변위 센서)

1. 서론

전 세계적으로 탄소중립 달성을 위한 에너지 전환이 가속화됨에 따라, 대형 해상 풍력발전 단지가 빠르게 확산되

고 있다. 이에 따라 풍력발전 설비의 핵심 구성 요소인 블레이드(blade)는 길이 100 m를 초과하는 초대형 구조물로 진화하고 있으며, 바람, 파랑, 우박, 낙뢰, 피로 하중 등 다양한 외란 환경에 장기간 노출된다. 이로 인해 블레이드에는 균열, 박리(delamination), 내면 손상 등의 결함이 수시로 나타나는 것으로 보고되고 있으며, 이 결함이 발전하여 비산, 결손 등의 중대 결함이 발생하여, 풍력발전기 시스템 전체의 구조적 붕괴로 이어질 수 있는 심각한 리스크를 초래한다. 특히 해상 환경에서는 유지보수 접근이 제한되고, 블레이드 교체 비용이 막대하기 때문에, 중대 손상의 조기

1) Principal Researcher, Korea Institute of Machinery & Materials

2) Senior Researcher, Korea Institute of Machinery & Materials

3) Principal Researcher, Korea Electric Power Corporation

4) Professor, Chung-ang University

*Corresponding author: yhseo@kimm.re.kr

Tel: +82-42-868-7533

Fax: +82-42-868-7440

탐지와 상태 기반 정비(condition-based maintenance)를 위한 실시간 감시 기술 확보는 풍력발전 시스템의 경제성과 안정성을 결정짓는 핵심 요소로 부상하고 있다.

풍력발전기 블레이드의 손상 감시를 위한 다양한 비파괴 기반 기술이 제안되어 왔다. 유도파 기반 기술은 구조 표면의 이상을 감지하는 데 효과적이며, 음향방출(acoustic emission, AE) 기반 기법은 내부 결함의 조기 탐지에 유리하다. 특히, 웨이블릿(wavelet) 변환 및 주성분 분석(principal component analysis, PCA)을 통해 특징을 추출하고, 서포트 벡터 머신(support vector machine, SVM) 등의 머신러닝 기법을 활용하여 진흙이나 오염과 같은 외부 손상을 분류한 연구^[1]와, AE 이벤트를 시공간적으로 맵핑하여 균열 및 박리와 같은 내부 손상의 위치와 심각도를 시각적으로 표현한 연구^[2]가 대표적이다. 또한, 3차원 디지털 이미지 상관법을 이용한 비접촉식 고해상도 영상 계측,^[3] 드론 기반의 AI 영상 인식 시스템,^[4] 무선 센서를 활용한 구조 건전성 모니터링,^[5] 칼만(Kalman) 필터를 활용한 잔여 수명예측 기법^[6] 등 다양한 영상 및 센서 기반 기술이 개발되었다. 이와 더불어, 주파수 응답을 활용한 진동 기반 패턴 인식 기술, 낙뢰·박리·불균형을 포함한 손상 유형 분류^[7~9] 연구, 고유진동수 기반의 진단 기법,^[10] 축소 모델 기반의 손상 추정 연구^[11] 등도 병행되었으며, 각각의 기술은 다양한 손상 시나리오에 따라 강점을 보여주었다.

그러나 대부분의 기존 기술은 무선 센서 기반으로 회전하는 블레이드에 대한 온라인 실시간 적용에 한계를 가지며, 복잡한 환경의 영향으로 신뢰도 높은 데이터를 확보하는 데 제약이 있어 주로 축소 실험 모델을 활용한 검증에 머무르고 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 비접촉식 변위 센서를 유선 방식으로 상시 설치하고, 신호 처리를 통해 유의미한 블레이드 응답 신호를 추출하여 중대 손상의 유무를 진단하는 기술을 개발하였다. 회전체 특성상 다량의 데이터를 확보하기는 어렵지만, 중대 손상에 대한 감시 기능은 충분한 성능을 보였으며, 유선 기반 고신뢰 시스템으로서 향후 실제 대형 풍력터빈에 적용 가능성을 제시한다.

2. 축소 모형 이용 블레이드 변위 측정

2.1 축소 모형 구축

회전하는 블레이드의 변위 측정의 가능성을 확인해 보기 위하여, 길이 450 mm이며, 3개의 블레이드를 갖는 축소 모형을 구축했다. 실제 블레이드의 공력 성능 및 그에 따르는 단면 형상은 고려에서 제외하고, 실제 회전 및 공력에 의한 가진 및 진동을 확인하기 위한 형태로 설계되었다. 일반적으로 블레이드의 플랩(flapwise) 방향의 굽힘 강성이 에지(edgewise) 방향의 굽힘 강성보다 매우 작기 때문에, 이를 구현하기 위하여 종횡비가 큰 직사각형 단면(폭 15 mm, 두께 3 mm)의 시편을 제작했다. 실제 블레이드는 받음각(angle of attack)이 존재하여, 공력 가진에 의하여, 플랩 방향과 에지 방향으로 모두 가진력 및 응답이 존재하지만, 강성이 상대적으로 작은 플랩 방향의 변위 응답을 측정하는 것을 목표로 축소 소형을 설계했다.

실제 풍력발전기 블레이드는 회전 중에 지속적으로 공력(aerodynamic) 가진력을 받고 있으며, 타워 부분을 지날 때 급격한 가진력의 변화를 경험한다. 이를 모사하기 위하여, 축소 모형의 하단부에 압축공기 분사 노즐을 배치하여, 공력 가진의 급격한 변화를 모사했다. 압축공기는 레귤레이터를 통해 일정 압력, 일정 유량으로 제어되며, 급격한 변화의 효과를 극대화하기 위하여, 블레이드 끝단에 배치하였다.

축소 모형 시험에서 사용된 센서는 측정 변위의 범위를 고려하여 아래와 같은 제원을 갖는 비접촉식 레이저 센서

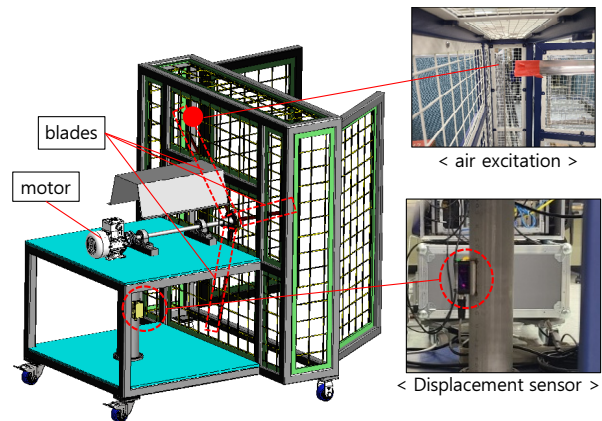


Fig. 1. Laboratory experimental apparatus of wind turbine

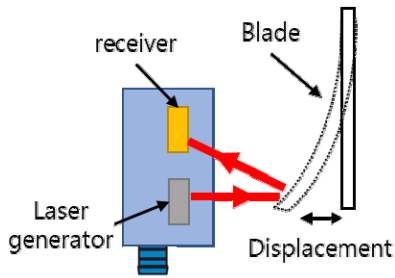


Fig. 2. Principle of measuring displacement by laser sensor

Table 1. Specification of displacement sensor in laboratory

Manufacturer	Baumer
Model	OM70-L1500
Measuring distance	150 ~ 1,500 mm
Resolution	13 ~ 125 μ m
Response delay	0,8 ms

를 선정했다. 센서 설치 위치는 블레이드 끝단에 대한 측정이 용이하도록 블레이드와 마주 보는 지점에 설치했다.

2.2 축소 모형 손상 모사 및 데이터 획득

정상 블레이드와 중대 손상 블레이드를 모사하기 위하여, 블레이드 루트(root)부에 아래 그림과 같이 끝단에서 50 mm 이격된 부분에 폭 2 mm, 깊이 1.5 mm의 인위적인 가공을 실시하여, 굽힘 강성이 현저히 낮아지도록 시편을 제작했다. 즉, 정상적인 블레이드 3개(ref)와 손상을 모사한 블레이드 3개(case 2)를 각각 설치하여, 정상 조건과 이상 조건을 모사한 시험을 진행했다.

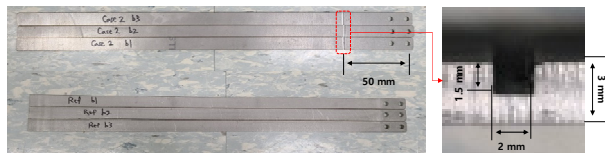


Fig. 3. Damage of blades in laboratory

상용 kW급 발전기의 회전 속도와 유사하게 블레이드 모형을 일정 회전속도(2 Hz, 120 rpm)으로 회전시키고, 획득되는 변위 신호는 Fig. 4와 같다. 레이저 변위 센서 특성으로 인해 대부분의 경우 일정한 전압(10V)의 신호가 나타나, 블레이드가 레이저 변위 센서의 측정 부분을 통과할

때, 변위 측정이 수행되어 Fig. 4와 같이 충격 신호와 같은 신호가 나타난다. 이 때, 실제 회전하는 블레이드의 변위는 그림의 파란색 점으로 표시된 지점이다. 이에 이 부분을 확대해 보면, 블레이드가 통과하는 시간동안 변위가 측정된 것을 확인할 수 있다.

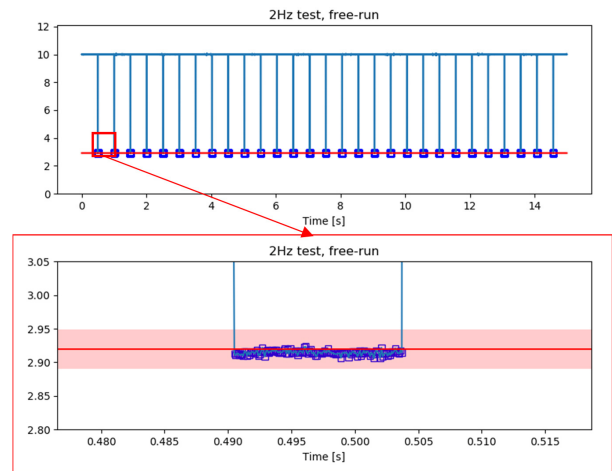


Fig. 4. Signal of displacement sensor

2.3 축소 모형 데이터 분석

Fig. 4에서 보듯이 블레이드의 센서 측정 지점 통과 시간이 0.01초 정도로 매우 짧아서, 이를 이용한 주파수 분석 또는 포락선 분석과 같은 신호 처리 기법을 적용하기 어렵다. 하지만, 짧은 시간이나마 블레이드 변위의 변화를 확인할 수 있기 때문에, 시간 영역 신호의 특징(feature)으로서 많이 알려진, 절대 평균(absolute mean), 실효치(root mean square), 왜도(skewness), 첨도(kurtosis)와 파고율(crest factor)을 각각 비교해 보았다.^[12]

Fig. 5는 손상 없는 정상 블레이드(ref)와 손상을 모사한 블레이드(case2)에 대해서, 공력 가진 모사 없는 경우(free run)과 2기압(bar) 압력으로 공력 가진 모사한 경우(2 bar)의 조합한 총 4가지 경우에 대해서, 시간 영역 특징을 도시한 그림이다. 세로축은 시험의 조건을 의미하며, 마지막 숫자는 반복 시험 횟수를 의미한다. 각각의 점은 20초간의 획득 데이터를 처리하여 계산된 특징 1개를 의미한다.

각각의 조건에 대해서, 측정 결과가 상당한 분포를 갖는 것을 확인할 수 있으며, 블레이드 손상 유/무에 따라 크게 구별되는 특징이 없는 것을 볼 수 있다. 이는 각각의 시험

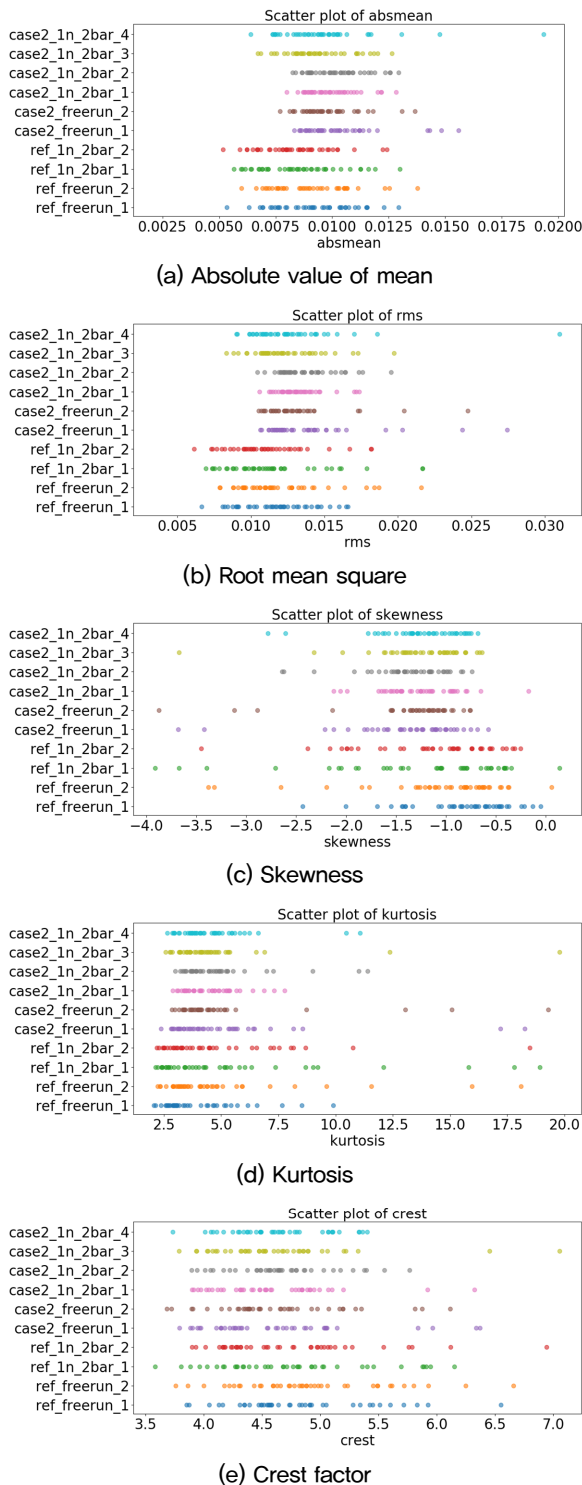


Fig. 5. Time domain feature of displacement for lab scale test

조건에서 불확실성이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 이 불확실성이 손상 유/무라는 물리적인 차이보다 변위 응답에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 다만, 정적 변위를

의미하는 절대 평균값과 동적 응답의 크기를 의미하는 실효치는 손상 유/무에 대한 변화가 다른 특징들에 비하여 좀더 현저하다. 현재 축소 모형 시험에서는 실제적인 불규칙한 바람에 의한 공력 가진을 모사하지 않았기 때문에, 블레이드 손상 유/무에 따른 특징의 변화가 미미하게 보이나, 실제 불규칙적인 공력 가진이 존재하는 블레이드에서는 위 2가지 특징이 진단에 유리할 것으로 예상된다.

축소 모형 시험을 통해서, 변위 측정에 의한 블레이드 이상 진단의 가능성을 확인했지만, 실제 블레이드의 중대 손상 여부는 확인할 수 없었다. 하지만, 비접촉식 변위 센서에 의한 블레이드 응답 측정이 가능함을 확인했으며, 손상 모사 유무에 따라 미세하게 정적 변위와 동적 변위의 크기가 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

3. 20 kW 풍력발전기 블레이드 이상진단

3.1 센서 선정 및 데이터 획득

비접촉식 블레이드 변위 측정에 의한 블레이드 이상 진단을 확인하기 위하여, 상용으로 가동되고 있는 20 kW 풍력발전기에 센서 및 데이터 획득 장치를 설치했다. 설치된 센서는 블레이드의 변위를 길이 방향으로 각각 다른 2개 지점에서 측정하기 위한 센서 2개와 타워 진동을 측정할 수 있는 가속도 센서 2개이다. 블레이드의 손상은 불평형 외력 또는 편심을 촉발하여, 타워 진동을 유도하고, 이로부터 타워 진동을 측정을 통해 블레이드 이상 진단이 가능함을 기존 연구를 통해서 확인할 수 있다. 이에 따라 이 논문에서 다루는 변위 센서와의 성능 비교를 위하여, 가속도 센서도 변위 센서와 같이 설치되어, 동시에 데이터를 획득했다.

대상 풍력발전기는 바람 방향에 따라 능동형 요(yaw) 제어가 적용되어 있으며, 2단계 회전 속도 제어를 통해, 바람의 세기에 따른 제어를 수행하는 방식이다. 이에 따라, 비접촉식 변위 센서를 나셀 하부에 설치하여, 요 방향 변화에 관계 없이 블레이드 변위를 측정할 수 있도록 했으며, 가속도계는 나셀 내부의 메인 베어링에 설치하여, 타워 진동을 측정할 수 있도록 설치했다. 변위 센서가 나셀에 설치됨에 따라 길이 약 6.5 m의 블레이드 끝단의 변위를 측정하기 위해서, 최대 10 m까지 측정이 가능한 비접촉식 레이저 변

Table 2. Specification of displacement sensor

Manufacturer	Sick
Model	DT50-2B215252
Measuring distance	200 ~ 30,000 mm, 90% remission 200 ~ 17,000 mm, 18% remission 200 ~ 10,000 mm, 6% remission
Resolution	100 μm
Response delay	0,83 ms

Table 3. Specification of accelerometer

Manufacturer	PCB
Model	352C34
Measuring range	50 g
Resolution	up to 10 kHz

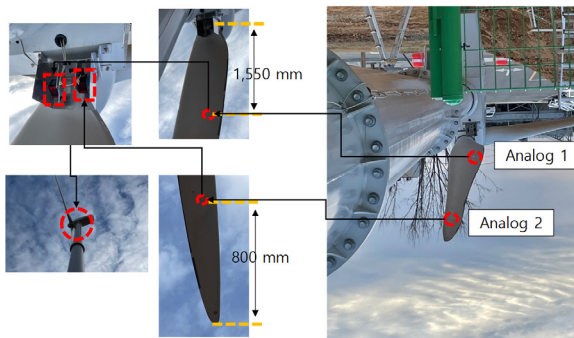


Fig. 6. Installation of displacement sensors

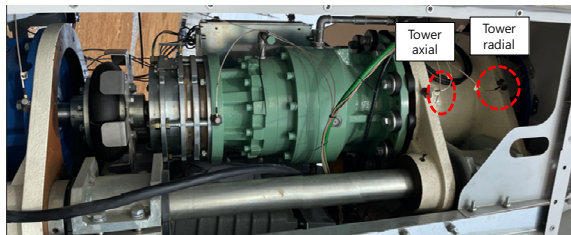


Fig. 7. Installation of accelerometers



Fig. 8. Installation of data acquisition system

위 센서를 선정했으며, 최대 50 g까지 측정이 가능한 가속도계를 설치했다. 이와 같은 3개의 센서는 풍력발전기 옆에 설치된 데이터획득 장치에 연결되고, 샘플링 주파수 25.6 kHz로 측정을 실시했다. 풍력발전기가 정지 중에는 측정을 실시하지 않고, 회전하기 시작하면 측정하여, 한번 측정에 60초간 측정을 지속했다.

3.2 블레이드 중대손상 모사

블레이드 이상 진단이 가능함을 확인하기 위해서는 실제 블레이드에 대한 중대 손상의 모사가 필요하다. 대형 사고로 이어질 수 있는 중대 손상은 작은 박리(delamination)나 균열(crack)과는 달리, 블레이드 외형이 크게 변화되는 대형 손상을 의미한다. 이를 모사하는 시험은 실제 사고가 발생할 수 있는 가능성을 가지고 있기 때문에, 이에 대한 대안으로 블레이드에 작용되는 하중에 변화를 주는 방법으로 중대 손상을 모사했다. 대상 풍력발전기는 피치(pitch) 각도가 고정된 풍력발전기로서, 다른 제어 부분의 변경 없이 피치 각도를 변경하게 되면, 설계 하중과 다른 하중이 블레이드에 작용하게 된다. 이를 해석적으로 검토해 보기 위하여, 통합 하중 해석 소프트웨어인 Bladed를 이용하여, 피치 각도에 따른 출력 및 블레이드에 작용하는 하중을 각각 해석했다.

설치 현장 주로 바람의 크기가 10 m/s 이하이며, 이 경우에는 위 표에 나타난 것과 같이 출력은 낮아지는 반면, 플랩 방향인 y방향 모멘트 하중이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 블레이드의 플랩 방향 변형을 더 크게 유발시킬 것이며, 이와 같은 변형의 증가가 중대 손상과 유사하

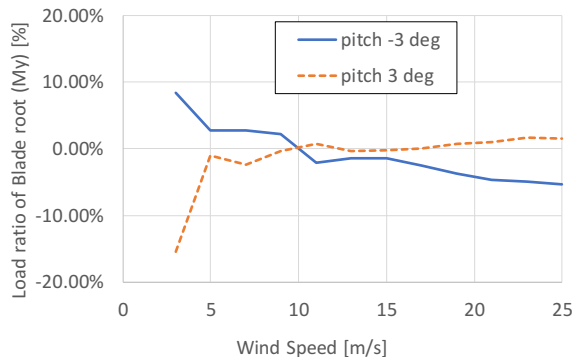


Fig. 9. Flapwise moment of blade root

다고 가정했다. 예지 방향의 하중도 미미하게 증가하는 경향을 가지고 있으며, 이에 따라 피치 각도 증가(+3도)에 의한 중대 손상 모사를 실시했다.

피치 변경은 Fig. 10과 같이 블레이드와 허브(hub) 연결하는 판의 볼트 구멍의 위치를 변경하여, 인위적으로 피치 각도가 변경된 형태로 블레이드 재조립을 실시했으며, 안전상의 이유로 3개의 블레이드에 모두 일정한 +3도의 피치 각도 변경을 적용했다.

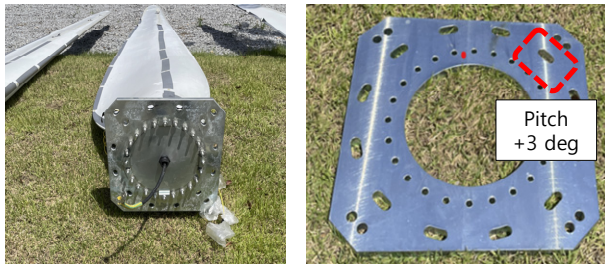


Fig. 10. Installation plate for changing pitch angle

2024년 1월부터 6월까지 약 5개월간 정상적인 블레이드 설치 조건에서 데이터를 획득했으며, 2024년 7월부터 약 2달간 인위적인 피치 각도 변경 조건에서 데이터 획득을 실시했다. 앞서 언급한 것과 마찬가지로 피치 각도 이외에 다른 조건은 모두 동일한 상태로 데이터 획득을 실시했다.

3.3 가속도 신호 분석

20 kW 풍력발전기에서 취득된 가속도 데이터를 앞서 축소 모형에서 사용한 시간 영역 특징으로 변환한 결과는 Fig. 11과 같다. 정상과 중대 손상 모사 경우에 대해서, 각각의 특징들의 변화가 미미한 것을 확인할 수 있다. 즉, 명확한 기준을 통해서, 정상과 중대 손상을 판단할 수 있는 기준을 제시할 수 없으며, 이에 따라 타워 가속도가 효과적인 측정 물리량이 아님을 확인할 수 있다.

3.4 변위 신호 분석

Fig. 11과 12는 변위 센서의 2개의 신호에 대한 각각의 시간 영역 특징을 보여주고 있다. 블레이드 중간 부분(analog 1) 신호의 경우, 정상과 이상 사이에 미세한 정적인 변화가 보이나, 동적인 흔들림을 보여주는 실효치, 왜도, 첨도는

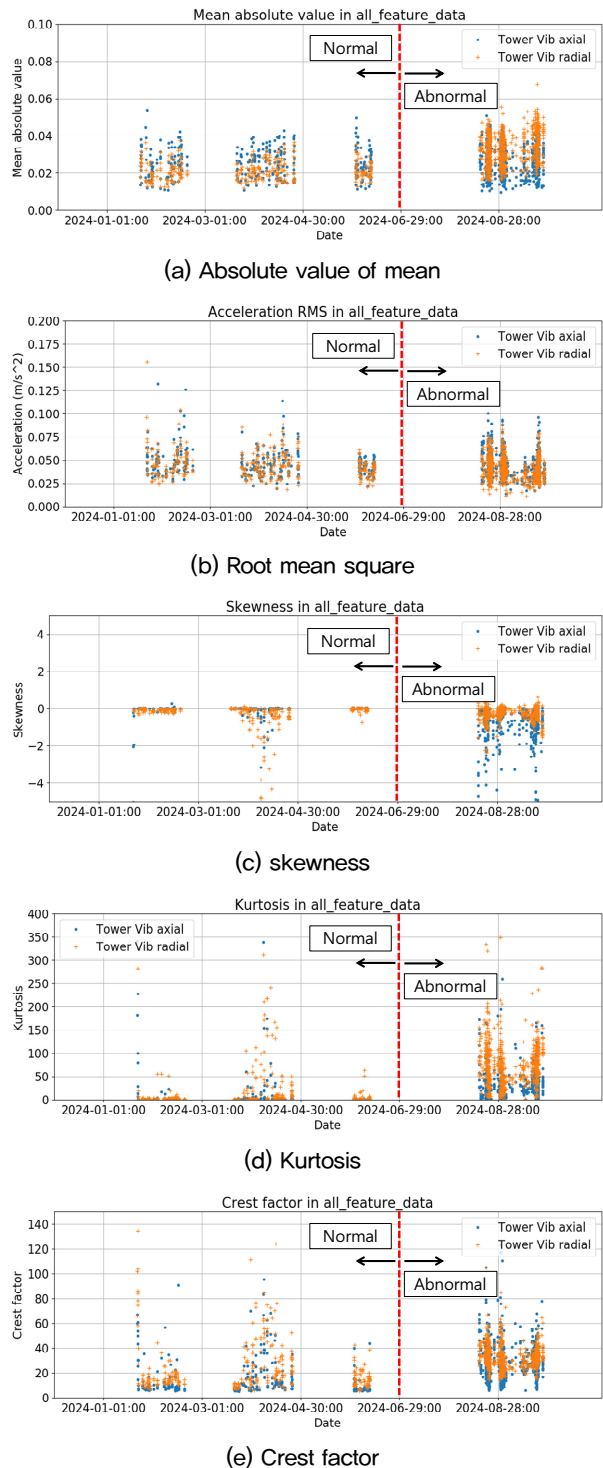
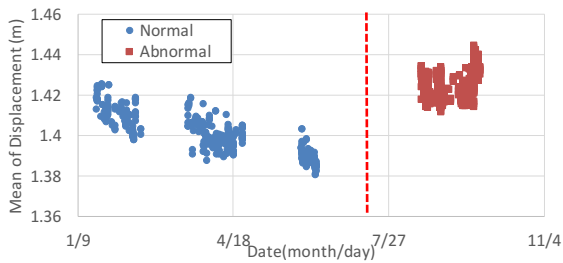
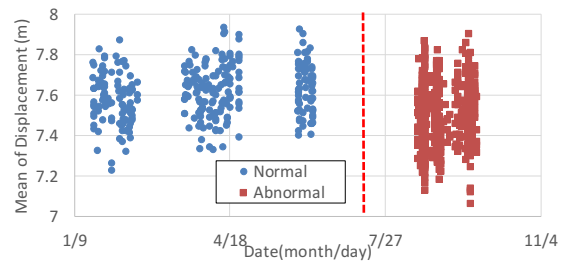


Fig. 11. Time domain feature of acceleration for 20 kW wind turbine

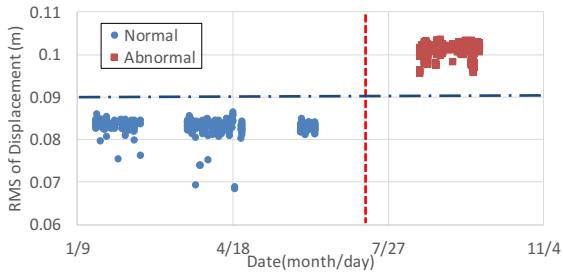
크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 이상 모사로 인해, 미세한 정적인 하중 변화가 발생하고, 비교적 큰 동적인 변화가 발생한다는 것을 의미한다. 즉, 실제 블레이드



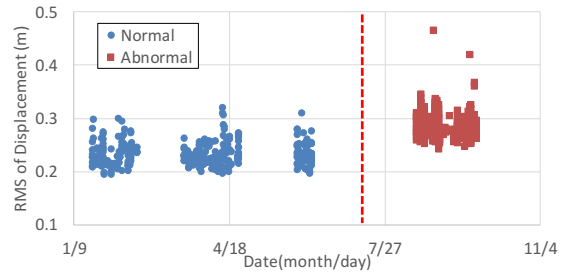
(a) Absolute value of mean



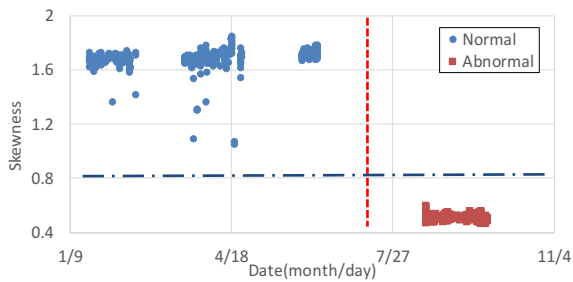
(a) Absolute value of mean



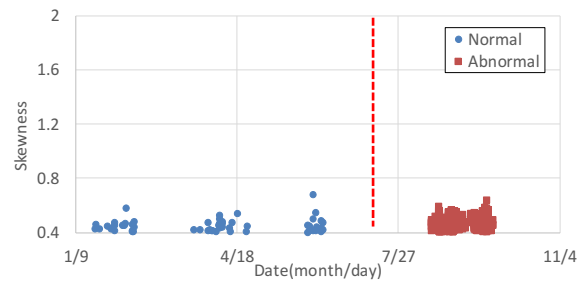
(b) Root mean square



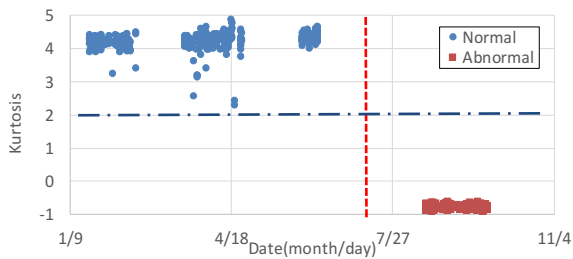
(b) Root mean square



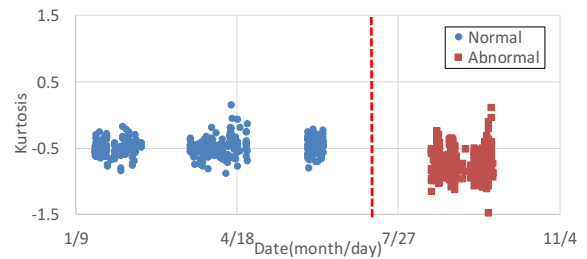
(c) skewness



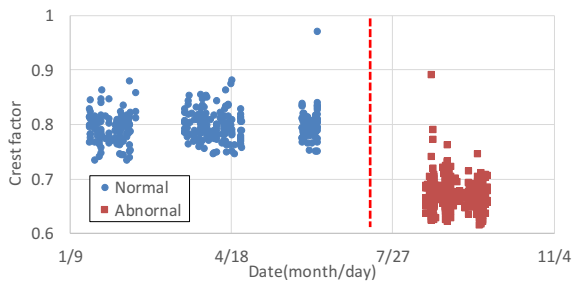
(c) skewness



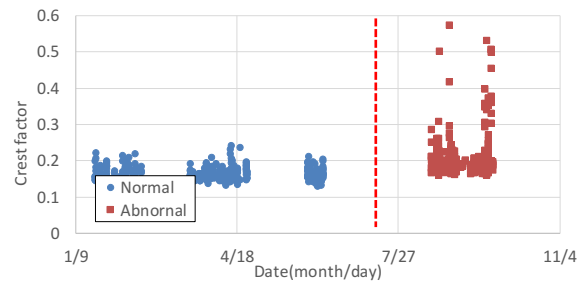
(d) Kurtosis



(d) Kurtosis



(e) Crest factor



(e) Crest factor

Fig. 12. Time domain feature of displacement for 20 kW wind turbine: Analog 1

Fig. 13. Time domain feature of displacement for 20 kW wind turbine: Analog 2

에 중대 손상이 발생하는 경우, 시간 영역의 동적인 특징들을 지속적으로 감시함으로써 진단을 수행할 수 있다.

이에 비해, 블레이드 끝단(analog 2)의 신호는 정적인 응답과 동적인 응답 모두 다 크게 변화가 없는 것으로 보인다. 일반적인 블레이드 끝단의 응답이 가장 크고, 그에 따라 블레이드 이상 진단에도 의미있는 데이터로 사용이 가능할 것으로 알려져 있는데, 이와는 다른 결과이다. 즉, 실제 상용 풍력발전기에서도 블레이드 끝단보다 감시에 최적인 지점이 중간에 존재한다는 것을 의미하여, 이는 본 논문에서 개발한 기술의 실제 적용할 때, 센서 측정 범위의 축소가 가능하여 실현장 적용성을 높여주는 역할을 할 것으로 판단된다. 이와 같이, 블레이드 중간 부분의 감시 효과가 높은 것은 실제 회전 중 블레이드의 동적 변형 형상(operation deflection shape)이 고유진동의 3차 모드(2차 플랩방향 모드)의 형상^[10]과 유사하여, 이와 같은 결과가 나온 것으로 추정되나, 동적 변형 형상에 대한 상세한 측정이 수반되어야 하는 내용이므로, 향후 연구에서 다루어야 할 문제로 판단된다.

4. 결론

해상 풍력발전기의 초대형화에 따라 블레이드의 중대 손상에 대한 감시 기술 개발이 중요해지고 있다. 이에 따라, 블레이드의 변위를 직접적으로 측정하는 비접촉식 변위 센서를 이용하여, 운전 중 블레이드의 이상 진단을 위한 기술을 개발했다. 회전하는 블레이드 축소 모형을 제작하여, 비접촉 변위 센서를 이용한 블레이드 변위 데이터 획득 및 신호 처리 기술을 확인했다. 그 후, 실제 kW급 상용 풍력발전기에 비접촉 변위 센서 및 가속도계를 각각 설치하고, 6개월 동안 운전 중 데이터를 취득했다. 그 기간 중 피치 각도 변경을 통한 중대 손상에 대한 모사를 실시하였으며, 비접촉 변위 센서에 기반한 특징이 블레이드의 정상과 중대 손상 상태를 확실히 구분해 낼 수 있는 것을 보였다. 개발된 기술은 비접촉 변위 센서를 정지되어 있는 나셀에 설치하는 기술로서, 측정 데이터의 신뢰성이 높고, 현장 적용성이 높을 것으로 예상되어, 블레이드의 중대한 파손의 실시간 감시에 효과적으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20213030020120 해상풍력발전 블레이드의 전주기 신뢰성 향상을 위한 생산품질 및 유지관리 기술 개발) 및 2025년도 한국기계연구원 기본사업(NK254H, NK257A)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Jimenez, A.A., Munoz, C.Q., and Marquez, F.P.G., 2019, "Dirt and mud detection and diagnosis on a wind turbine blade employing guided waves and supervised learning classifiers", *Reliab. Eng. Syst. Safe.*, **184**, 2-12.
- [2] Han, B.H., and Yoon, D.J., 2011, "Damage detection method of wind turbine blade using acoustic emission signal mapping", *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, **31**(1), 68-76.
- [3] Wu, R., Zhang, D., Yu, Q., Jiang Y., and Arola, D., 2019, "Health monitoring of wind turbine blades in operation using three-dimensional digital image correlation", *Mech. Syst. Signal Process.*, **130**, 470-483.
- [4] Yang, X., Zhang, Y., Lv, W., and Wang, D., 2021, "Image recognition of wind turbine blade damage based on a deep learning model with transfer learning and an ensemble learning classifier", *Renew. Energy*, **163**, 386-397.
- [5] Iftimie, N., Steigmann, R., Danila, N.A., Rosu, D., Barsanescu, P.D. and Savin, A., 2017, "Wireless Sensors for Wind Turbine Blades Monitoring", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **209**, 012055, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/209/1/012055>.
- [6] Muto, K., Namura, N., Ueki, Y., and Takeda, N., 2021, "Digital twin for load monitoring of wind turbine blade", https://rd.hitachi.com/_ct/17703355.
- [7] Dervilis, N., Choi, M., Taylor, S.G., Barthorpe, R.J., Park, G., Farrar, C.R., and Worden, K., 2014, "On damage diagnosis for a wind turbine blade using pattern recognition", *J. Sound Vib.*, **333**(6), 1833-1850.
- [8] Tesauro, A., Pavese, C., and Branner, K., 2014, "Rotor

- blade online monitoring and fault diagnosis technology research”, DTU Wind Energy, DTU Wind Energy E-0042, https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/118191498/Rotor_blade_online_monitoring.pdf.
- [9] Lee, J.W., “Sensing Technique of Mass Imbalance for Condition Monitoring of Wind Turbine Blade”, 2011, J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp., **15**(1), 209-214.
- [10] Kim, H.G., Jang, Y.J., Kim, B.S., and Kang, K.W., 2019, “Evaluation for of the Natural Frequency according to the Debonding Damage at the Trailing Edge and Spar-Web Joint of Large-scale Wind Turbine Composite Blade”, *New. Renew. Energy*, **15**(1), 18-25, <https://doi.org/10.7849/ksnre.2019.3.15.1.018>.
- [11] Kim, D.J., Seo, Y.H., Ma, P.S., and Woo, J.H., “Reduced Order Model Construction for Vibration-based Fault Diagnosis of Offshore Wind Turbine Blade”, *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, **33**(6), 652-662, <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2023.33.6.652>.
- [12] Randall, R.B., 2011, “Vibration-based condition monitoring”, John Wiley & Sons, Ltd.