

# 풍력발전기 블레이드 상태 모니터링을 위한 질량 불균형 감지방법

Sensing Technique of Mass Imbalance for Condition Monitoring of Wind Turbine Blade

이 종 원<sup>1)\*</sup>

Lee, Jong Won

## Abstract

A method to detect rotor mass imbalance, which is one of the typical faults of wind turbine, is presented for effective condition monitoring of wind turbine. Dynamic analysis for a three-bladed horizontal-axis wind turbine was carried out with adding mass to a blade for inflicting the rotor mass imbalance. It has been found that the added mass induce a resulting centrifugal force to nacelle and this leads to a transverse (relative to the rotor axis) oscillation of the nacelle. It has been also found that the amplitude of the oscillation is almost linearly increased as the added mass is increased.

**Keywords** : Mass imbalance, Wind turbine, Condition monitoring, Transverse oscillation, RMS

## 1. 서론

현재 풍력발전기에 대한 시장의 중요한 요구 중 하나는 대용량화이며 이에 따른 구조물 및 기계요소들의 대형화가 수반되어야 한다. 예를 들어 5MW급 풍력발전기의 블레이드 로터 지름과 타워의 높이는 약 120m이며, 이러한 대형화에 따른 기술적 문제점 등이 부각되는 한편 구조물 및 부품들의 유지관리 문제가 대두되고 있다. 한편, 협소한 국토 및 민원문제 등으로 인한 육상풍력발전의 한계점들을 극복하고 해상 고품질 풍력자원을 이용하기 위하여 해상풍력발전기에 대한 개발이 요구되고 있다. 해상풍력발전기 건설에 대한 비용을 절감하기 위해 발전기의 대용량화가 더욱 요구되고 있으며, 접근성 제약으로 인한 효과적 유지관리 및 신뢰성 확보 등을 위한 기술개발이 필요하다. 이에 따라 대용량 풍력발전기에서는 상태 모니터링 시스템 적용을 통한 효과적인 유지관리기술 개발의 중요성이 증가하고 있다. 특히, 해상 풍력발전기에 있어서는 접근의 제한성, 고신뢰성 요구 및 대형화로 인하여 상태 모니터링은 필수 기술이 될 것으로 예측되고 있다. 상태 모니터링이란 기계부품의 거동을 센서로 측정하여 현재의 상태를 평가하는 것이다. 특히, 실시간 상태 모니터링은

운용 중 기계의 상태를 상시 모니터링하면서 센서로부터 측정되는 데이터를 지속적으로 제공하며 이들 데이터를 처리하고 해석한 결과를 제공한다. 즉, 상태 모니터링 시스템을 설치하여 장기간에 걸쳐 누적되는 부품의 노후화 정도 및 갑작스런 이상발생을 항시 감시할 필요가 있다.

블레이드는 풍력발전기의 핵심부품으로서, 풍력발전기가 대형화되면서 가격이나 중량 면에서 블레이드가 차지하는 비중이 증가하고 있다. 따라서 이에 대한 유지관리의 중요성이 부각되고 있으며, 상태 모니터링을 통한 상태기반 유지관리에 대한 기술개발이 활발히 진행되고 있다.

블레이드에 발생할 수 있는 손상의 종류는 다음과 같다 (Caselitz and Giebhardt, 2005).

- 1) 아이싱, 오염, 기공, 박리 등에 의한 표면 거칠음 (surface roughness)
- 2) 아이싱, 균열을 통한 수분 침투 등으로 인한 질량 불균형 (mass imbalance)
- 3) 블레이드 피치각 불일치, 공력학적 프로필의 제작 공차, 운전 중 프로필의 변형 등으로 인한 공력학적 비대칭 (aerodynamic asymetry)
- 4) 유리섬유 또는 탄소섬유 강화 플라스틱 구조의 박리

1) 정회원, 남서울대학교 건축공학과 조교수

\* Corresponding author : jwlee@nsu.ac.kr 041-580-2761

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2011년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

(delamination)

### 5) 표면균열 및 내부균열

공력학적 비대칭과 질량 불균형은 전기출력의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density) 분석기법을 이용하여 비대칭에 의한 로터 속도의 변화를 추정하여 검출할 수 있고(Hyers et al., 2006) 불균형에 의해 주기적 하중이 나셀에 전달이 되므로 나셀의 횡방향 진동을 측정하여 스펙트럼 해석을 통해 추정할 수 있다(Caselitz and Giebhardt, 2005). 즉, Caselitz and Giebhardt(2005)는 상태 모니터링 시 질량 불균형에 대한 경고 기준치를 제안하고, 실제 풍력발전기에서 진동신호를 측정 후 스펙트럼 해석 결과를 이용하여 개발한 알고리즘을 적용하였다. Giebhardt(2006)는 퍼지 로직(fuzzy logic) 및 유전자 알고리즘을 이용하여 정상상태, 공력학적 비대칭, 질량 불균형 및 그외 손상 상태를 식별할 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 표면 거칠음은 풍속과 출력과의 관계에 대한 통계적 평가를 통하여 감지할 수 있다(Caselitz and Giebhardt, 2005). 한편, 광섬유 센서를 이용한 블레이드의 스트레인 측정을 통하여 하중 이력 및 진동을 측정하고 피로 손상을 평가할 수 있으며 수명 또한 예측할 수 있다. 예를 들어, ECN(Energy research Center of the Netherlands)에서는 FOS WindPower와 공동으로 FBG(fiber Bragg grating) 센서를 이용한 블레이드 상태 모니터링 시스템을 개발하였다(Rademakers et.al., 2004). 개발한 시스템을 실제 대형 풍력발전기에 설치하여 측정된 1년여 간의 데이터를 이용하여 주파수 스펙트럼 해석, 하중 스펙트럼 및 등가하중 산출 등을 수행하였다. 또한 Schroede 등(2006)은 안전성 모니터링, 블레이드의 제어, 하중 모니터링 및 피로하중 산정 등을 위하여 FBG 스트레인 센서를 이용하여 센서 시스템을 구축하였으며, 53 m의 블레이드에 실제 장착하여 성능을 평가하였다. 분포형 광섬유 센서를 이용하여 풍력발전기 장대 구조물의 기계적 부하를 측정하고 손상을 모니터링하기 위한 연구도 수행되었다(이종원 등, 2007).

본 논문에서는 풍력발전기에 대한 동역학 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 풍력발전기의 거동특성을 파악하고, 효과적인 상태 모니터링을 위하여 대표적 손상형태 중 하나인 로터의 질량 불균형으로 인한 이상상태를 감지할 수 있는 기법을 제안한다.

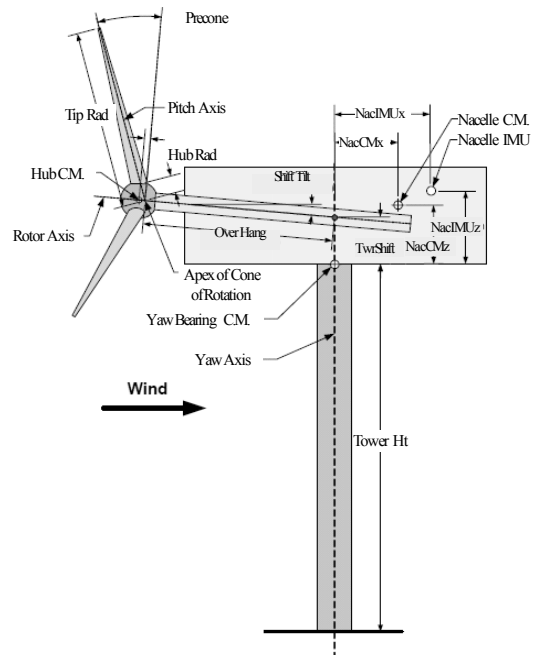


Fig. 1 Layout of a conventional, upwind, three-bladed turbine

## 2. 풍력발전기 모델링

풍력발전기 전체 해석을 위해서는 기계 서브시스템, 공력학 서브시스템, 전기 서브시스템 및 피치 시스템 등을 각각 모델링 한 후 이를 통합하여야 한다. 본 연구에서는 풍력발전기의 비선형운동방정식의 해를 구할 수 있는 FAST 프로그램(Jonkman and Buhl Jr., 2005)을 이용하여 풍력발전기에 대한 전체 해석을 수행하였다. 이 프로그램을 이용하면 풍력발전기에 대한 강체역학 및 유연체역학 해석이 가능하고, 바람하중이 작용하는 상태에서 시간에 대한 공력학 및 구조 응답을 구할 수 있다. FAST 프로그램에서 대상으로 하는 수평축 업윈드(upwind) 3-블레이드 풍력발전기의 레이아웃을 Fig. 1에 나타내었으며, 프로그램에서 적용하는 풍력발전기 전체에 대한 비선형 공탄성 운동방정식은 다음과 같다.

$$M(\underline{q}, \underline{u}, t)\ddot{\underline{q}} + \underline{f}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}, \underline{u}, \underline{u}_d, t) = \underline{0} \quad (1)$$

여기서  $M$ 은 질량행렬,  $\underline{f}$ 는 비선형 하중함수벡터,  $\underline{q}$ 는 변위벡터,  $\dot{\underline{q}}$ 는 속도벡터,  $\ddot{\underline{q}}$ 는 가속도벡터,  $\underline{u}$ 는 제어입력 벡터,  $\underline{u}_d$ 는 바람 교란(disturbance) 벡터,  $t$ 는 시간이다.

식(1)의 운동방정식에서는 3-블레이드 풍력발전기의 경우 지반, 기초, 베이스 플레이트, 나셀, 회전자, 기어, 허

Table 1 Model specification

| No. of blades | Rotor Diameter (m) | Rated power (kW) | Control method                 | Generator type   |
|---------------|--------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
| 3             | 70                 | 1500             | Variable speed & pitch control | Simple-induction |

브 등을 강체로, 타워, 블레이드 및 주축을 유연체로 모델링하였다. 즉, 다물체 동역학 및 모드해석이 조합된 형식이며 총 24개의 자유도를 적용한다. 지반은 기초를 통하여 타워와 연결되며 타워 상단은 베이스 플레이트와 고정되고, 베이스 플레이트는 요 베어링과 나셀을 지지한다. 나셀은 기어박스과 발전기가 내장되며 주축을 통하여 로터와 연결된다. 로터는 허브와 블레이드로 구성된다. 이중 타워는 기초에 고정되는 캔틸레버 보의 유연체로 모델링되어 모드해석이 가능한데, 바람 방향 1, 2차 모드형상 및 횡방향 1, 2차 모드형상을 구할 수 있다. 또한, 블레이드는 허브에 고정되는 캔틸레버 보의 유연체로 모델링되어 역시 모드해석이 가능하며, 플랩(flap)방향 1, 2차 모드형상 및 엣지(edge)방향 1차 모드형상을 구할 수 있다. 기초는 3 방향 병진운동 및 3 방향 회전운동이 가능하고, 타워는 바람 방향 및 횡방향으로 각각 2 자유도를 가지며, 나셀의 요운동이 1 자유도를 가진다. 발전기 방위각 및 드라이브트레인의 컴플라이언스가 각각 1 자유도를 가지며 이는 가변속 로터의 속도 및 주축의 유연성을 표현할 수 있다. 블레이드 선단에서 플랩 방향 1, 2차 모드에 대하여 각각 3 자유도를 가지며, 엣지 방향 1차 모드에 대하여 3 자유도를 가진다.

### 3. 정상상태 거동특성

풍속변화에 따른 풍력발전기의 응답, 블레이드의 하중 및 변형 등 거동특성을 파악하기 위하여 Table 1에 나타난 제원의 1.5MW용량의 수평축 업윈드 풍력발전기에 대하여, FAST 프로그램을 이용하여 동역학 시뮬레이션을 수행하였다.

해석대상 블레이드의 길이는 33.25m, 블레이드 1개의 질량은 3912.59kg, 위치에 따른 블레이드 단면의 주요 특성은 Table 2와 같다. 한편, 해석대상 타워의 높이는 82.39m, 질량은 123003.39kg, 풍력발전기 전체 질량은 201059.156kg, 위치에 따른 타워 단면의 주요 특성은 Table 3에 나타내었다.

Fig. 2~7에는 풍속변화에 따른 로터 회전수, 출력, 블

Table 2 Blade section properties

| Location | Mass per unit length (kg/m) | Flapwise Stiffness (N.m <sup>2</sup> ) | Edgewise Stiffness (N.m <sup>2</sup> ) |
|----------|-----------------------------|--|--|
| Root     | 180.85                      | 1.112E+09                              | 1.140E+09                              |
| Center   | 130.51                      | 6.886E+07                              | 2.369E+08                              |
| Tip      | 17.77                       | 1.661E+06                              | 1.522E+07                              |

Table 3 Tower section properties

| Location | Mass per unit length (kg/m) | Stiffness (N.m <sup>2</sup> ) |
|----------|-----------------------------|-------------------------------|
| Bottom   | 2426.48                     | 2.208E+11                     |
| Center   | 1536.83                     | 8.843E+10                     |
| Top      | 711.91                      | 1.919E+10                     |

레이드 가속도 및 모멘트의 변화를 풍속변화와 함께 나타내었다. 가변속 제어방식을 적용하였으므로 로터 회전수는 풍속변화에 추종함을 알 수 있고, 풍속의 증감에 따라 출력도 증가 또는 감소함을 알 수 있다. 블레이드 선단 가속도는 바람방향인 플랩방향으로는 약 10m/sec<sup>2</sup>를 중심으로 진동하는데, 이는 바람하중에 의하여 블레이드에 플랩방향 모멘트가 작용되는 상태에서 진동하기 때문이다. 엣지방향으로는 약 0m/sec<sup>2</sup>를 중심으로 플랩방향보다 적은 수준의 가속도로 진동하는 경향을 보인다. 한편, 블레이드 루트 모멘트는 플랩방향으로는 바람하중에 의하여 약 1,000kN.m를 중심으로 변화하며, 엣지방향으로는 약 0kN.m를 중심으로 플랩방향보다 적은 수준의 모멘트로 변화하는 경향을 보인다.

### 4. 로터 질량 불균형에 의한 이상상태

균열과 같은 손상으로 인한 수분 등의 침투 및 블레이드 표면의 아이싱 등으로 인하여 블레이드 간 질량 비대칭이 발생할 수 있다. 이러한 로터의 질량 불균형은 풍력발전기 구조물 및 부품에 과도한 진동을 발생시켜 고장의 원인이 될 수 있다. 따라서 효과적인 상태 모니터링을 통하여 질량 불균형 상태를 감지하고 적절한 관리를 수행할 필요가 있다.

Fig. 8은 3-블레이드 로터의 단순 모델이다. 여기서  $m_i$ 는 각 블레이드의 질량,  $r_i$ 는 로터 회전축에서 각 블레이드 무게중심까지의 거리이다. 정상상태에서는 각 블레이드의 질량과 무게중심까지의 거리는 동일하고 이를 각각  $m_a$ ,  $r_a$  라고 하면

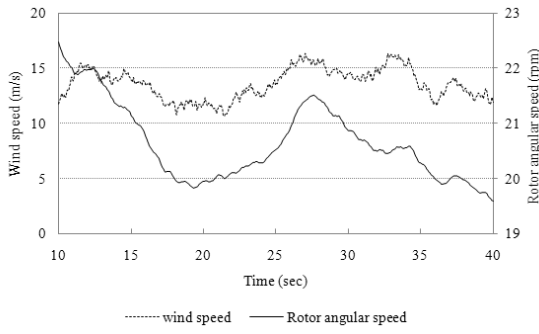


Fig. 2 Rotor angular speed

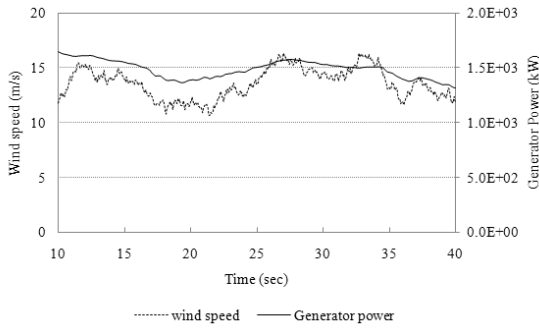


Fig. 3 Generator power

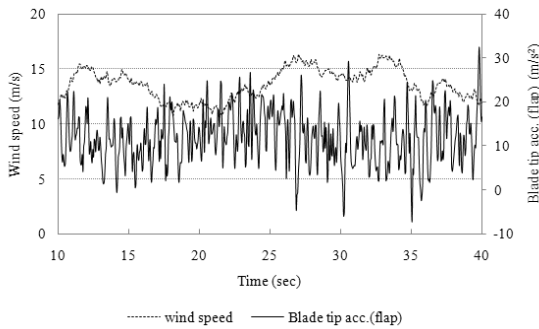


Fig. 4 Blade tip acceleration (flap-wise)

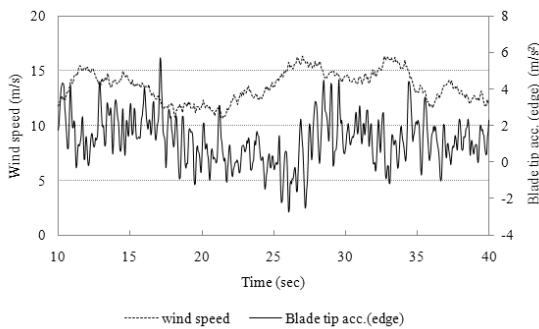


Fig. 5 Blade tip acceleration (edge-wise)

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_a \quad (2)$$

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_a \quad (3)$$

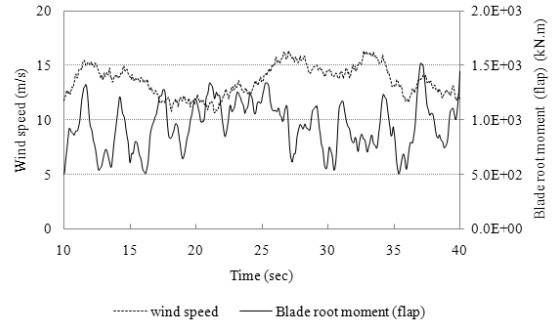


Fig. 6 Blade root moment (flap-wise)

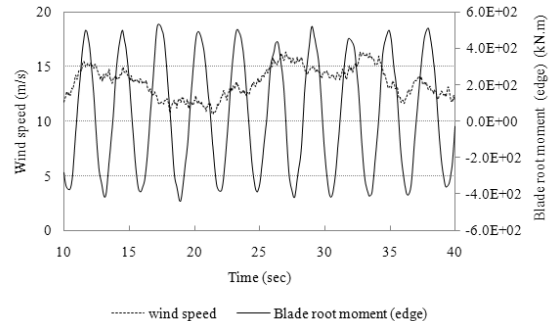


Fig. 7 Blade root moment (edge-wise)

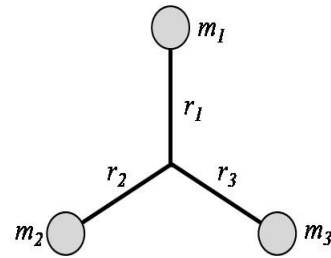


Fig. 8 Simplified model of rotor

이다. 한편 각 블레이드에서 발생하는 원심력은 다음과 같다.

$$F_{c1} = F_{c2} = F_{c3} = m_a a_c \quad (4)$$

$$a_c = r_a \omega^2 \quad (5)$$

$$F_{c1} = F_{c2} = F_{c3} = m_a r_a \omega^2 \quad (6)$$

여기서  $a_c$ 는 원심 가속도이며,  $\omega$ 는 각속도이다. 질량 불균형이 없는 정상상태에서는 각 블레이드에서 발생하는 원심력의 크기는 동일하고 블레이드의 위치는 대칭이므로 3개의 블레이드에서 발생하는 원심력의 합은 영이 된다.

만약 1개의 블레이드에 질량이 추가되어 질량 불균형

이 발생되고, 부가되는 질량을  $m_b$ 라고 하면

$$m_1 = m_a + m_b \quad (7)$$

$$m_2 = m_3 = m_a \quad (8)$$

$$F_{c1} = m_a r_a \omega^2 + m_b r_b \omega^2 \quad (9)$$

$$F_{c2} = F_{c3} = m_a r_a \omega^2 \quad (10)$$

따라서 부가질량  $m_b$ 에 의한 원심력은 다음과 같다.

$$F_{cb} = m_b r_b \omega^2 \quad (11)$$

여기서  $r_b$ 는 회전축에서 부가질량 무게중심까지의 거리이다. 이 원심력은 로터의 회전축으로부터 나셀이나 지지구조물로 전달된다. 즉, 질량 불균형으로 인한 원심력은 로터 회전축에 대한 횡방향 나셀 진동을 유발하며, 이 진동의 진폭은 질량 불균형이 심할수록 커진다.

로터의 질량 불균형과 나셀 횡방향 진동의 관계를 파악하기 위하여 Table 1에 나타난 제원의 풍력발전기에 대하여, 블레이드 1개의 질량을 각각 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20% 증가시키면서 로터의 질량 불균형 조건을 구현한 후 전체 풍력발전기에 대한 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 나셀의 로터 회전축에 대한 수평 횡방향 가속도 결과를 구하였다.

블레이드 1개의 질량이 각각 3, 5, 10% 증가하였을 때 나셀 횡방향 가속도의 시계열을 정상상태와 비교하여 Fig. 9에 나타내었으며, Fig. 10에는 이들의 푸리에 변환 결과를 나타내었다. 또한 Fig. 11에는 블레이드 1개 질량의 증가에 따른 나셀 횡방향 진동의 실효값(RMS) 변화를 나타내었다.

Fig. 9와 Fig. 10에서와 같이, 3개의 블레이드 중 1개 블레이드의 질량이 증가하여 질량 불균형이 발생하면, 부가질량에 의한 원심력에 의하여 나셀의 횡방향 진동이 발생함을 알 수 있다. 또한 부가질량의 크기가 커질수록 나셀 횡방향 진동의 진폭이 커지며 이는 풍력발전기 구조물이나 부품 고장의 원인이 될 수 있다. 한편, 블레이드 1개의 부가질량 크기와 나셀 횡방향 진동의 실효값과 관계를 Fig. 11에서 살펴보면, 실효값의 크기는 부가질량의 크기

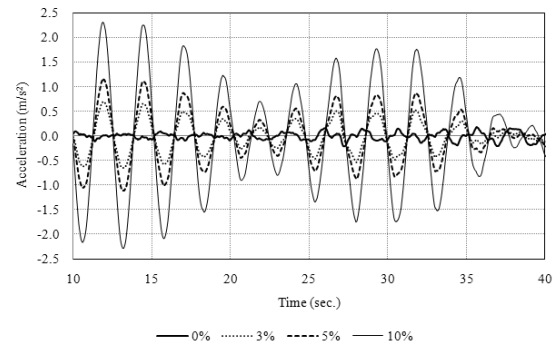


Fig. 9 Time history of transverse acceleration at nacelle

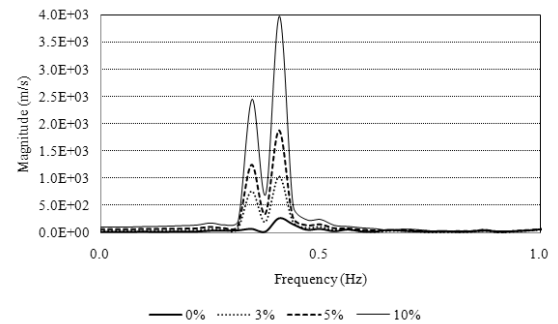


Fig. 10 Fourier transform of transverse acceleration at nacelle

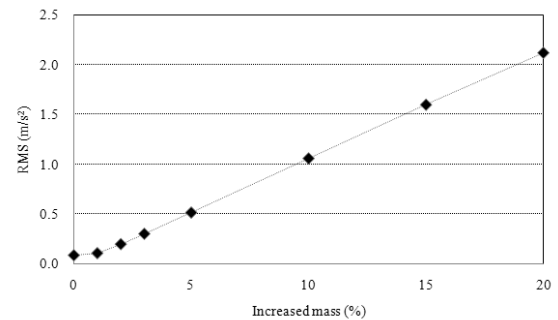


Fig. 11 Relationship between increased mass and RMS

에 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 나셀 횡방향 진동의 실효값을 모니터링 하여 로터의 질량 불균형 발생여부 및 불균형 정도를 판정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 효과적인 풍력발전기 상태 모니터링을 위하여 대표적 손상형태 중 하나인 로터의 질량 불균형으로 인한 이상상태를 감지할 수 있는 기법을 제안하였다. 이를 위하여 1.5 MW 용량의 수평축 업윈드 3-블레이드 풍력발전기를 대상으로, 블레이드 1개의 질량을 증가시키면서 로터의 질량 불균형 조건을 구현한 후 전체 풍력발

전기에 대한 동력학 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 나셀의 로터 회전축에 대한 수평 횡방향 가속도 결과를 구하여 부가질량의 크기와 진동특성과의 관계를 조사하였다.

로터의 질량 불균형이 발생하면 부가질량에 의한 원심력에 의하여 나셀의 횡방향 진동이 발생하고, 부가질량의 크기가 커질수록 나셀 횡방향 진동의 진폭이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 따라서 나셀 횡방향 진동의 실효값을 모니터링 하여 로터의 질량 불균형 발생여부 및 불균형 정도를 판정하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

신뢰성 있는 상태 모니터링을 위해서는 우선 정상상태 풍력발전기에 대한 해석 및 현장실험 결과를 비교하여, 해석 시 적용된 변수 및 가정사항 등을 개선(updating)시킬 필요가 있다. 개선된 해석결과를 이용하여 질량 불균형 정도와 진동신호와의 관계를 파악하고, 운용 중 계측된 신호와 비교함으로써 질량 불균형 정도의 정확한 판정이 가능할 것으로 판단된다. 즉, 본 연구는 블레이드 질량 불균형에 대한 상태 모니터링을 위한 전체 과정 중 일부의 과정에 대한 연구이며, 제안된 기법은 상태 모니터링에 직접 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

향후, 진동신호를 이용하여 질량이 부가된 특정 블레이드를 추정하고 부가질량의 크기를 판정할 수 있는 연구를 수행할 계획이며, 실험을 통하여 질량 불균형에 대한 상태 기법을 통합하고 검증할 계획이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2009년 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

#### 참고문헌

1. 이종원, 허영철, 남용운, 이근호, 김유성, 이용배, "분포형 광섬유 센서를 이용한 풍력발전기의 기계적 부하 측정 및 모니터링", 한국소음진동공학회논문집, 제17권 11호, 2007, pp.1028-1036.
2. Caselitz, P. and Giebardt, J., "Rotor Condition Monitoring for Improved Operational Safety of Offshore Wind Energy Converters", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 127, 2005, pp.253-261.
3. Giebardt, J., "Evolutionary Algorithm for Optimisation of Condition Monitoring and Fault Prediction Pattern Classification in Offshore Wind Turbines", Proceedings of European Wind Energy Conference, Paper 75, Athens, Greece, 2006.
4. Hyers, R. W., McGowan, J. G., Sullivan, K. L., Manwell, J. F., and Syrett, B. C., "Condition Monitoring and Prognosis of Utility Scale Wind Turbine", Energy Material, Vol. 1, No.3, 2006, pp.187-203.
5. Jonkman, J. M. and Buhl Jr., M. L., FAST User's Guide, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/EL-500-38230, 2005.
6. Rademakers, L. W. M. M., Verbruggen, T. W., van der Werff, P. A., Korterink, H., Richon, D., Rey, P., and Lancon, F., "Fiber Optic Blade Monitoring", Proceedings of European Wind Energy Conference, London, UK, 2004.
7. Schroeder, K., Ecke, W., Apitz, J., Lembke, E. and Lenschow, G., "A Fibre Bragg Grating Sensor System Monitors Operational Load in a Wind Turbine Rotor Blade", Measurement Science and Technology, Vol. 17, 2006, pp.1167-1172.

(접수일자 : 2010년 7월 27일)

(수정일자 : 2010년 10월 13일)

(심사완료일자 : 2010년 10월 20일)

#### 요 지

본 연구에서는 효과적인 풍력발전기 블레이드의 상태 모니터링을 위하여 대표적 손상형태 중 하나인 로터의 질량 불균형으로 인한 이상상태를 감지할 수 있는 기법을 제안하였다. 이를 위하여 수평축 3-블레이드 풍력발전기를 대상으로, 블레이드 1개의 질량을 증가시키면서 로터의 질량 불균형 조건을 구현한 후 전체 풍력발전기에 대한 동력학 시뮬레이션을 수행하였다. 질량 불균형이 발생하면 부가질량에 의한 원심력에 의하여 나셀의 로터 회전축에 대한 횡방향 진동이 발생하고, 부가 질량의 크기가 커질수록 나셀 횡방향 진동의 진폭이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

**핵심 용어** : 질량불균형, 풍력발전기, 상태모니터링, 횡방향 진동, 실효값