

경사 및 가속도 계측자료 융합을 통한 풍력 터빈의 변위 추정

박종웅* · 심성한** · 정병진*** · 이진학****

Park, Jong-Woong*, Sim, Sung-Han**, Jung, Byung-Jin***, Yi, Jin-Hak****

Study on Combined Use of Inclination and Acceleration for Displacement Estimation of a Wind Turbine Structure

ABSTRACT

Wind power systems have gained much attention due to the relatively high reliability, good infrastructures and cost competitiveness to the fossil fuels. Advances have been made to increase the power efficiency of wind turbines while less attention has been focused on structural integrity assessment of structural sub-systems such as towers and foundations. Among many parameters for integrity assessment, the most perceptive parameter may be the induced horizontal displacement at the hub height although it is very difficult to measure particularly in large-scale and high-rise wind turbine structures. This study proposes an indirect displacement estimation scheme based on the combined use of inclinometers and accelerometers for more convenient and cost-effective measurements. To this end, (1) the formulation for data fusion of inclination and acceleration responses was presented and (2) the proposed method was numerically validated on an NREL 5 MW wind turbine model. The numerical analysis was carried out to investigate the performance of the propose method according to the number of sensors, the resolution and the available sampling rate of the inclinometers to be used.

Key words : Wind turbine, Indirect displacement estimation, Structural health monitoring, Measurement data fusion, Parametric study

초 록

신재생 에너지 개발에 대한 사회적 요구가 증가하면서 경제성 및 기술 성숙도가 높은 풍력발전이 많은 관심을 받고 있다. 대규모 에너지 생산을 위해 풍력 터빈의 대형화와 해상풍력 단지 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 운영 및 관리(O&M, Operation and Management) 측면에서의 구조적 안전성 평가 및 유지관리의 중요성 또한 지속적으로 증가하고 있다. 안전성 평가를 위한 여러 항목 중 터빈 상부 측, 허브 높이에 서의 변위는 구조물의 강성에 의해 지배되는 직접적인 지표로, 구조물의 건전상태를 쉽게 평가할 수 있는 지표라 할 수 있다. 그러나 풍력 터빈과 같은 대형 구조물의 변위 측정은 장비의 한계로 직접적으로 측정하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 이 연구에서는 (1) 경사와 가속도의 동적 계측응답 자료를 융합하여 간접적으로 변위를 추정하는 방법을 제안하고, (2) 제안된 방법을 제원이 공개되어 있는 NREL 5 MW급 풍력 터빈에 적용하여 경사계의 수, 경사계의 잡음 수준 및 계측 주파수에 따른 변위 추정의 정확도를 평가하였으며, 실제 변위 측정을 위한 매개변수 연구를 수행하였다.

검색어 : 풍력 터빈, 간접적 변위 추정, 구조물 건전성 모니터링, 계측자료 융합, 매개변수 연구

* 미국 일리노이 주립대학 박사후연구원, 공학박사 (University of Illinois at Urbana-Champaign · smart.jwp@gmail.com)

** 정회원 · 울산과학기술대학교 도시환경공학부 조교수, 공학박사 (Ulsan National Institute of Science and Technology · ssim@unist.ac.kr)

*** 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 석사과정 (Korea Maritime and Ocean University · bjung@kiost.ac)

**** 정회원 · 교신저자 · 한국해양과학기술원 연안공학연구본부, 공학박사

(Corresponding Author · Korea Institute of Ocean Science and Technology · yjih@kiost.ac)

Received March 12, 2014/ revised May 21, 2014/ accepted December 23, 2014

1. 서론

지구의 급격한 온난화와 석유 수급의 불균형을 해소하고 국가 에너지 안보(national energy security)를 강화하기 위한 대안으로 신재생 에너지 개발에 대한 관심이 급증하고 있으며, 특히 다른 에너지원에 비하여 기술적 성숙도가 높고, 경제성이 뛰어난 풍력발전이 주목 받고 있다. 현재 대규모 에너지 생산을 위한 풍력 터빈의 대형화와 해상풍력 발전단지 개발을 위한 연구가 진행되고 있으며, 향후 이러한 대형 풍력단지의 효율적 운영 및 관리(O&M, operation and management)를 위하여 풍력 터빈의 구조적 안전성 확보 및 평가에 대한 기술개발 또한 더욱 중요해질 것으로 예상되고 있다.

계측을 통하여 구조적 안전성을 평가하기 위한 여러 항목 중, 터빈 상부의 변위는 구조물의 외력에 대한 상태를 가장 직관적으로 표현해 줄 수 있는 요소이다. 그러나 풍력 터빈과 같은 대형 구조물의 변위 측정은 매우 제한적으로 이루어지고 있으며, 현재 이와 같은 대형 구조물의 변위 측정을 위하여 적용 가능한 방법으로는 영상기반 방법(vision-based method), LDV (Laser Doppler Vibrometer) (Nassif et al., 2005) 그리고 GPS (Global Positioning System) (Celibi, 2000) 등이 있다. 영상기반 방법은 카메라 등 영상장비를 이용하여 취득한 구조물의 움직임에 대한 영상자료를 변위로 변환하는 기법이다. 이 방법은 구조물의 2차원 면내 동적인 움직임을 포착할 수 있다는 큰 장점이 있으나, 영상장비와 구조물 사이의 거리가 멀어질수록 오차가 커지게 되며, 또한 광학을 이용한 장비의 특성상 날씨에 큰 영향을 받는다는 단점이 있다. LDV는 레이저를 이용하여 측정 구조물 표면의 변위를 측정하는 방법으로 높은 해상도를 가지는 장점이 있으나, 이와 같은 뛰어난 성능에도 불구하고 상대적으로 고가인 장비가격으로 인해 현장적용이 쉽지 않은 단점이 있다. 또한 영상처리 및 LDV를 이용한 변위 측정은 기본적으로 장비를 설치하기 위한 고정점이 필요하며 따라서 장비 설치가 어려운 환경에서는 적용 또한 어려울 수 있다. 이와 달리 GPS는 위성을 통해 GPS 수신기의 절대적인 좌표를 측정하는 방법으로, 측정하고자 하는 위치에 GPS 수신기를 설치하여 변위를 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 측정 해상도(measurement resolution)가 상대적으로 낮을 뿐만 아니라, 풍력 터빈의 경우 블레이드의 회전으로 인한 다중 패스(multipath) 효과로 변위 측정에 큰 오차가 발생할 수 있다(Berg and Zayas, 2001).

이러한 직접적인 변위 측정 방법과 달리 가속도, 변형률 및 경사 등 상대적으로 계측이 용이한 물리량을 변위로 환산하는 간접적인 변위 추정방법에 관한 연구가 또한 지속적으로 이루어지고 있다. 가속도를 이용한 방법은 설치가 쉽고, 계측이 용이하나, 변위를 구하기 위한 수치적분 과정에서 측정 잡음으로 인하여

저주파수 대역에서의 변위가 왜곡되는 단점이 있다. 변형률을 이용한 방법은 저주파수 대역에서의 변위를 비교적 왜곡 없이 추정할 수 있다는 장점이 있으나 상대적으로 측정 정확도가 낮은 단점이 있다. 이에 반해 경사의 경우 최근 MEMS 기술을 이용하여 저가이면서도 동적계측이 가능한 경사계가 상용화되고 있어 이러한 변위 추정에 용이하게 적용될 수 있을 것으로 기대되고 있다. 현재 시중에 판매되는 경사계의 일반적인 해상도 범위는 1° ~ 0.001° 이며, 또한 측정 가능한 주파수 범위는 대부분 1 Hz에서 10 Hz 사이의 대역의 저주파로 가속도계와는 달리 유사정적 성분의 저주파 기울기를 계측할 수 있다(Lee et al., 2012).

본 연구에서는 Park et al. (2013)이 제안한 변형률과 가속도를 융합하여 변위를 추정하는 방법을 기반으로 하여, 변형률 대신 경사 응답자료를 가속도 응답자료와 융합하여 변위를 추정하는 식을 제안하였다. 이 방법을 적용함으로써 저주파수 대역에서의 변위는 경사응답을 통하여 주로 추정하고, 상대적으로 높은 정확도를 요구하는 고주파수 대역에서의 변위는 가속도를 통해 주로 추정하게 되며, 이를 통해 상대적으로 낮은 정확도를 가지는 경사계를 통해서도 높은 정확도를 가지는 변위를 추정할 수 있도록 하였다.

이를 위해서 먼저 가속도 및 경사 응답의 융합을 위한 최적화 목적함수를 제안하였다. 경사응답을 통해 변위를 추정하는 식과 가속도로부터 변위를 구하는 식을 이용하여 목적함수를 구성하였으며, 이러한 과정에서 Tikhonov 정규화 기법을 적용하여 두 목적함수식을 하나의 식으로 연결하였다. 제안 방법을 제원이 공개되어 있는 NREL 5 MW급 풍력 터빈의 수치 시뮬레이션 결과에 적용하여 상부 변위 추정의 적용성을 평가하였다. 또한 수치 시뮬레이션 결과를 이용하는 과정에서 (1) 사용된 계측 센서의 수, (2) 경사계의 잡음 수준, 그리고 (3) 계측 주파수에 따른 변위 추정 정확도에 대하여 매개변수 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 경사계를 통한 변위 추정

Foss and Haugse (1995)는 모드 형상과 소수의 계측된 변형률을 이용하여 변위를 구하는 방법을 제안한 바 있으며, 이 연구에서는 이들이 제안한 식을 이용하여 풍력 터빈의 경사로부터 변위 추정을 위해 모드 형상과 측정 경사의 관계식을 다음의 Eq. (1)과 같이 제안하였다.

$$u_{\theta} = \phi_d (\phi_{\theta}^T \phi_{\theta})^{-1} \phi_{\theta}^T \theta \quad (1)$$

여기서, ϕ_{θ} 와 ϕ_d 는 각각 경사 및 변위에 대한 모드 형상을 의미하고, θ 와 u_{θ} 는 각각 계측된 경사와 경사로부터 구한 변위를 의미한다.

그러나 Eq. (1)에서 필요한 경사 및 변위에 대한 모드 형상의 경우, 실제 구조물을 수치 모델로 구성하는 과정에서 고려하지 못한 모델링 오차 등으로 인하여 실제 구조물의 모드 형상과 일치하지 않을 수 있다. 실제 구조물은 이상적인 가진이 어려우므로 정확한 모드형상을 추출하기 쉽지 않을 뿐 아니라, 질량에 대한 정보를 얻기 힘들기 때문에 최대 모드크기에 대해 정규화된 형상을 주로 사용한다. 이 연구에서는 실제 기울기 모드형상과 변위 모드형상의 크기 및 오차를 보정하기 위해 보정계수를 제안하였다.

먼저 가속도를 통해 추정된 변위 u_{acc} 와 기울기 θ 에 대해 1차 모드가 지배적인 정상상태 응답에 대해 기술하면 Eq. (2) 와 같다.

$$[u_{acc} \theta] = [\phi_{d1} \phi_{\theta 1}] \times \cos(\omega_1 t + \beta) \quad (2)$$

여기서, ϕ_{d1} , $\phi_{\theta 1}$, ω_1 , β 는 각각 1차 변위모드 형상, 1차 기울기 모드 형상, 1차 고유진동수 그리고 위상차를 나타낸다.

가속도 기반 변위 u_{acc} 와 기울기 θ 의 주파수영역에서의 파워스펙트럼의 크기를 계산하면 Eq. (3)과 같이 표현된다

$$[S_{u_{acc}} S_{\theta}] = [\phi_d^2 \phi_{\theta}^2] \times \left\{ \frac{\delta(\omega - \omega_1) + \delta(\omega + \omega_1)}{2} \right\}^2 \quad (3)$$

여기서 $S_{u_{acc}}$ 와 S_{θ} 는 u_{acc} 와 θ 의 파워스펙트럼이며, δ 는 Dirac Delta함수이다. 또한 w 는 주파수를 의미한다.

보정계수 α 는 Eq. (3)에서 ω 에 ω_1 을 대입하여 얻을 수 있으며 Eq. (4)로 표현된다.

$$\alpha = \frac{\phi_{d1}}{\phi_{\theta 1}} = \sqrt{\frac{S_{u_{acc}}(\omega_1)}{S_{\theta}(\omega_1)}} \quad (4)$$

Eq. (4)를 이용하여 Eq. (1)을 Eq. (5)와 같이 간략하게 정리할 수 있다.

$$u_{\theta} = \frac{\phi_{d1}}{\phi_{\theta 1}} \phi_{dN} (\phi_{\theta N}^T \phi_{\theta N})^{-1} \phi_{\theta N}^T \theta = \alpha D \theta \quad (5)$$

여기서 $D = \phi_{dN} (\phi_{\theta N}^T \phi_{\theta N})^{-1} \phi_{\theta N}^T$ 이며, α 는 보정계수이다. ϕ_{dN} , $\phi_{\theta N}$ 은 모드의 최대 크기가 1로 정규화된 변위 및 기울기 모드형상을 의미한다. 계측 결과에서 입력하중의 영향으로 ω_1 보다 낮은 주파수인 ω_s ($\omega_s < \omega_1$)에서 응답 파워스펙트럼의 정점이 더 크게 나타난다면, Eq. (4)에서 ω_1 에서의 파워스펙트럼 값($S_{u_{acc}}(\omega_1)$, $S_{\theta}(\omega_1)$)을 ω_s 에서의 파워스펙트럼 값($S_{u_{acc}}(\omega_s)$, $S_{\theta}(\omega_s)$)으로 대체하여 사용할 수 있다.

2.2 데이터 융합을 위한 제안식

경사응답을 이용하여 변위를 추정하는 경우, 측정 가능한 주파수 범위를 초과하는 주파수 영역에서의 동적 변위를 추정하기 어렵고 또한 수치적으로 구한 모드 형상의 오차로 인해 추정값에 상당한 수준의 오차가 발생할 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 서로 다른 물리량인 경사 응답과 가속도 응답을 Eq. (6)에서와 같이 Tikhonov 정규화 기법을 적용하여 융합하는 방법을 제안하였다.

$$\text{Min}_u \Pi = \frac{1}{2} \| L_a (L_c u - \Delta t^2 a) \|_2^2 + \frac{\lambda^2}{2} \| u - u_{\theta} \|_2^2 \quad (6)$$

여기서, u 는 가속도와 경사를 융합하여 추정한 변위이며, u_{θ} 는 경사응답으로부터 구한 변위, 그리고 a 는 측정된 가속도이다. 그리고 $\| \cdot \|$ 은 벡터의 2차 놈(norm)이며, λ 는 Tikhonov 정규화 상수(regularization factor)로 이 연구에서는 Lee et al. (2010)이 제안한 값을 적용하였다(Eq. (7)). Eq. (7)에서 N_d 는 첫 번째 고유주기를 표현할 수 있는 자료 개수이다.

$$\lambda = 46.81 N_d^{-1.95} \quad (7)$$

한편, Eq. (6)에서 L_a 는 가중치 대각행렬로 처음과 끝에 $1/\sqrt{2}$ 를 갖고, 나머지는 1을 갖는 행렬이며, L_c 는 이차미분연산 행렬로 아래의 Eq. (8)과 같이 2차 중앙차분식(2nd-order central difference equation)을 적용하였다.

$$L_c = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & & \\ & 1 & -2 & 1 & & 0 \\ & & \vdots & & & \\ 0 & & & 1 & -2 & 1 \\ & & & & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Eq. (6) 우변의 첫 번째 항은 최종 예측되는 변위의 이차미분값 ($L_c u / \Delta t^2$)과 가속도 계측값(α)과의 차이가 최소가 되도록 동적 변위를 추정하는 것이며, 또한 두 번째 항은 최종 예측된 변위(u)와 경사로부터 추정되는 변위(u_{θ})의 차이가 최소가 되도록 변위를 추정하는 항이다. 이와 같이 서로 다른 계측응답으로부터 자료 융합(data fusion)을 통하여 구한 최종 변위(u)는 동적 및 정적인 변위를 모두 정확하게 표현할 수 있다. 최종적으로 Eq. (6)를 풀어 u 에 관하여 전개하면 다음과 같은 Eq. (9)을 얻을 수 있다.

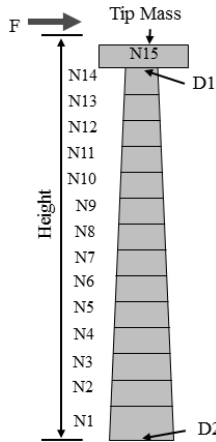
$$\begin{aligned} u &= (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} (L^T L_a \Delta t^2 + \lambda^2 \alpha D \theta) \\ &= [C_a \Delta t^2 \quad C_{\theta}] \begin{bmatrix} a \\ \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $L = L_c L_a$, $C_a = (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} L^T L_a$ 그리고 $C_\theta = (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} \alpha \lambda^2 D$ 와 같다.

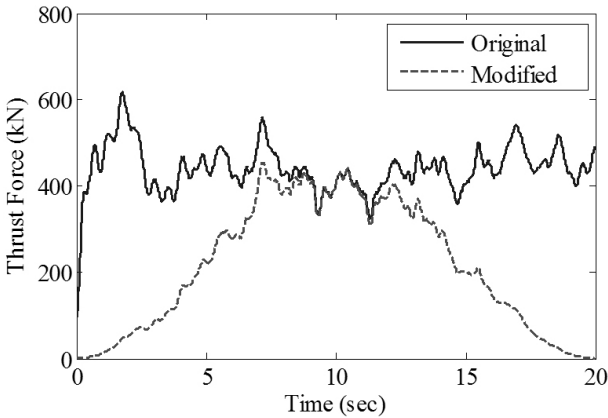
3. 수치적 검증

3.1 개요

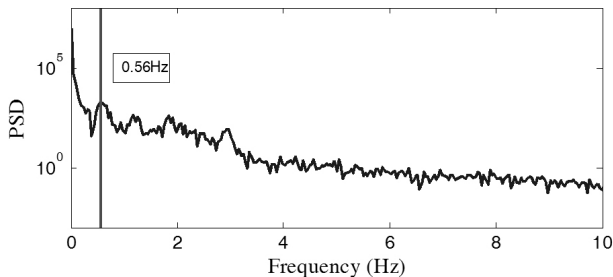
제안된 방법의 수치적 검증을 위해 다음과 같이 단순화시킨 풍력 터빈 모형을 대상으로 수치해석을 실시하였다. 수치 모델은 미국 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 공개



(a) 5MW Wind Turbine Model



(b) Thrust Force



(c) Frequency Spectrum of Input Thrust Force

Fig. 1. Numerical Model for Simulation

한 바 있는 5 MW급 풍력 터빈의 제원을 참고로 하여 Fig. 1(a) and Table 1에서와 같이 모델링 하였다(Jonkman et al., 2009). 풍력 터빈 타워의 높이는 90 m이며, 저차 3개 모드의 고유주파수는 각각 0.33 Hz, 3.44 Hz, 10.33 Hz이다. 풍력 터빈의 상부는 로터 (rotor)와 너셀(nacelle)의 무게를 포함하여 집중질량으로 모델링하였으며, 상부에 작용하는 추력(thrust force)은 NREL에서 개발한 풍력 터빈 시뮬레이션 프로그램인 FAST를 이용하여 구하였다 (Jonkman and Buhl, 2005). 평균 풍속이 20 m/s인 조건에서 난류 생성 코드인 TurbSIM을 이용하여 로터를 중심으로 150 m × 150 m 면에 대한 시공간적(temporal and spatial) 난류 영향을 고려한 풍속 자료를 생성하여 적용하였다(Jonkman and Kilcher, 2012).

생성된 풍속 자료를 바탕으로 FAST를 통하여 풍력 터빈의 추력(thrust force) (Fig. 1(b) 실선 참조)을 먼저 구하였다. 그러나 추력의 크기가 평균 풍속에 의한 추력을 중심으로 변동하여, 점진적으로 증가하고 감소하는 터빈 상부의 변화를 발생시킬 수 없었기 때문에 추력에 시간영역에서의 해닝 윈도우(Hanning window)를 적용하여 점차적으로 증가하고 감소하는 추력을 모사하였으며 이를 수치해석에 적용하였다(Fig. 1(b) 점선 참조). Fig. 1(c)는 추력의 주파수 성분을 분석한 결과로, 유사정적 성분인 0 Hz 성분을 포함한 저주파 성분이 강하게 나타났으며, 동적 성분은 0.56Hz에서 가장 크게 존재함을 확인할 수 있었다.

센서의 성능에 따른 결과의 정확성을 비교하기 위하여 경사계의 최대 잡음 수준을 0.0001°, 0.001°, 0.01°, 0.1°, 1°로 증가시키면서 변위를 추정하였다. 이때 가속도 응답에는 RMS 수준으로 5%의 계측오차를 고려하였다. 또한 경사계의 측정 가능 주파수 범위를 고려하여 계측 주파수를 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz로 감소시키면서 변위를 추정하였다.

3.2 경사 및 가속도 데이터

수치해석으로 구한 풍력 터빈 상부에서의 가속도와 경사를 Fig. 2에서 제시하였다. 경사 응답의 경우, 잡음의 크기를 0.0001°에서 1°까지 고려하여 잡음 수준에 따른 결과를 비교하였다. Fig. 2(a)의 경사에 대한 시계열을 통하여 잡음의 크기에 따라 경사값이 크게

Table 1. Properties of NREL 5 MW Wind Turbine Model

Height	90 m
t ₁ /t ₂ (thickness at bottom and top section)	19/27 mm
D ₁ /D ₂ (diameter at bottom and top section)	3.87 / 6 m
Tip Mass	251.2 ton
Density	7,850 kg/m ³
Natural Frequency	0.33 Hz, 3.4 Hz, 10.1 Hz

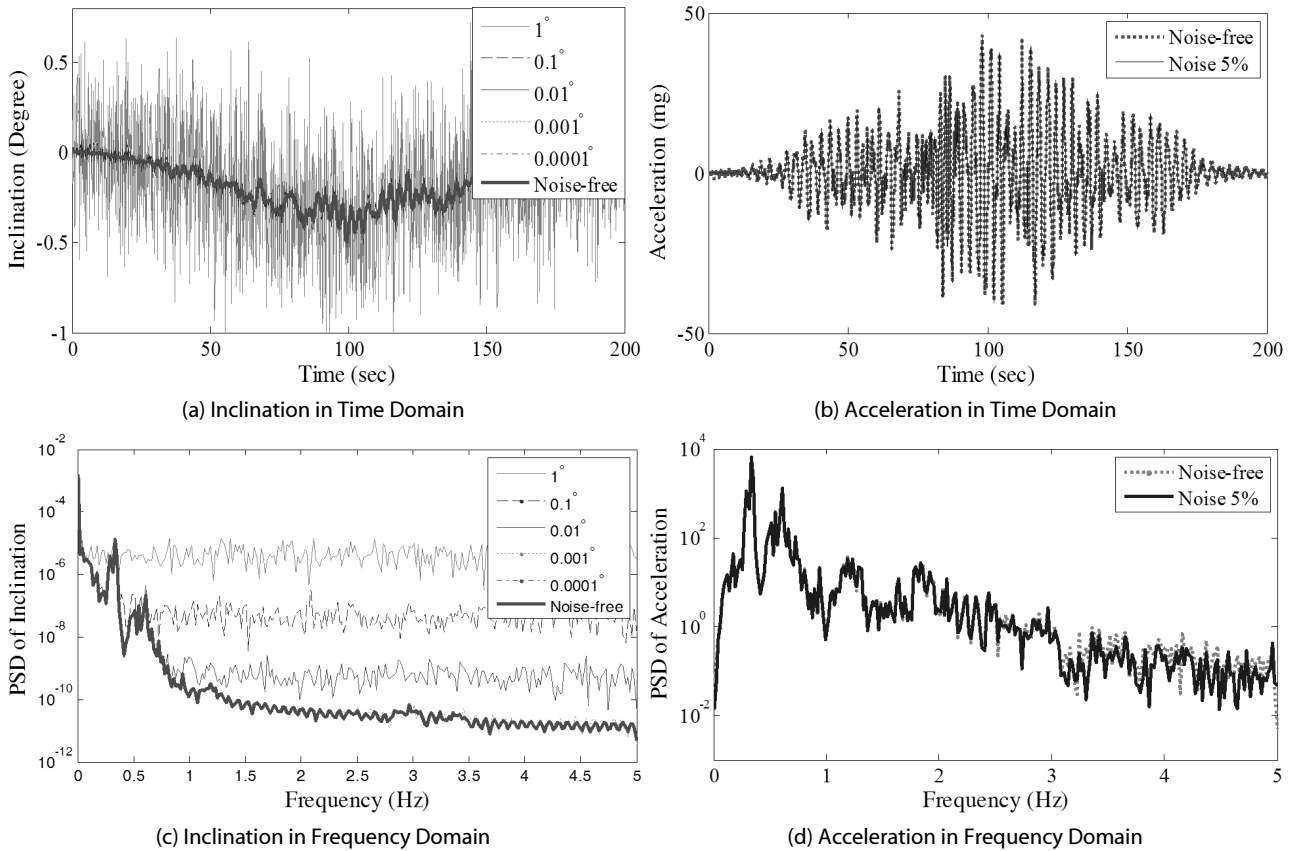


Fig. 2. Measured Inclination and Acceleration Responses

영향을 받음을 알 수 있고, 이러한 현상을 주파수 영역에서 분석하여 보면 Fig. 2(c)와 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 잡음의 크기에 따라 주파수 영역에서도 잡음층이 높아지는 현상을 관찰할 수 있으며 특히 잡음의 크기가 가장 큰 경우에는 1차 모드의 위치가 잡음의 영향으로 불명확해짐을 알 수 있다. 가속도의 경우, 5%의 RMS 잡음을 적용하였으며, 그 결과를 Figs. 2(b) and (d)에서 제시하였다. 가속도의 경우 5%의 잡음을 고려한 경우에도 1차 모드인 0.33 Hz 부근에서 1차 모드의 정점(peak)을 명확하게 확인할 수 있다.

3.3 사용된 경사계 수에 따른 오차

사용된 경사계 및 모드의 수에 따른 제안 방법의 성능을 분석하기 위하여 Table 2와 같이 네 가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 각각의 경우에서 사용된 센서의 수는 각각 1개, 3개, 그리고 15개이며, 이 때 사용된 모드의 수는 각각 1개, 3개, 5개이다. 수치해석 시 가속도 오차는 5%의 RMS 오차로, 경사계의 경우 해상도를 0.001°로 고려하였으며, 샘플링 주파수 50 Hz로 200 초의 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 2. Location of Sensors

Case (No of sensors)	Sensor Location (Height (m))
Case1 (1 sensor)	N15 (90)
Case2 (3 sensors)	N1, N7N15 (6, 42, 90)
Case3 (15 sensors)	N1~N15 (Every 6m)

세 경우에 대해 Eq. (9)의 센서 융합 기법을 사용하여 변위를 추정한 결과는 Fig. 3 and Table 3과 같고, Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 추정된 변위는 사용된 경사계의 수와 모드 수에 상관없이 정확해와 매우 유사함을 알 수 있다. 다만 Fig. 3(b)에서와 같이 변위가 최대값을 가지는 구간을 확대하여 분석할 경우 해석결과와 각 Case에서 추정된 변위 사이에 약 1.2-2.8%의 절대 오차가 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 오차는 공학적으로 무시 가능한 수준의 오차로 고려할 수 있다.

사용된 경사 계측 수에 따른 오차의 크기를 Table 3에서 Eq. (10)의 RMS (Root Mean Square) 오차로 정리하였다.

$$Err = E \left[\frac{\sigma(d_{estimated} - d_{reference})}{\sigma(d_{reference})} \right] \quad (10)$$

경사계의 수가 1개 일 때 RMS 오차가 0.02 미만이며, 5개와 15개의 센서 사용시 0.024653과 0.027585의 오차를 얻었다. 센서를 많이 사용할수록 오차가 감소할 것으로 예상하였으나, 본 수치해석의 경우 경사계의 수와 정확도 사이의 일정한 경향은 드러나지 않았고, 오히려 센서를 많이 사용할수록 오차가 어느 정도 증가하는 현상을 찾아볼 수 있었는데 이에 대해서는 추후 보다 세밀한 분석이 필요한 것으로 사료된다. 다만 이러한 현상 자체는 실제 풍력 터빈의 변위 추정을 위하여 제안 방법을 적용함에 있어 매우 의미 있는

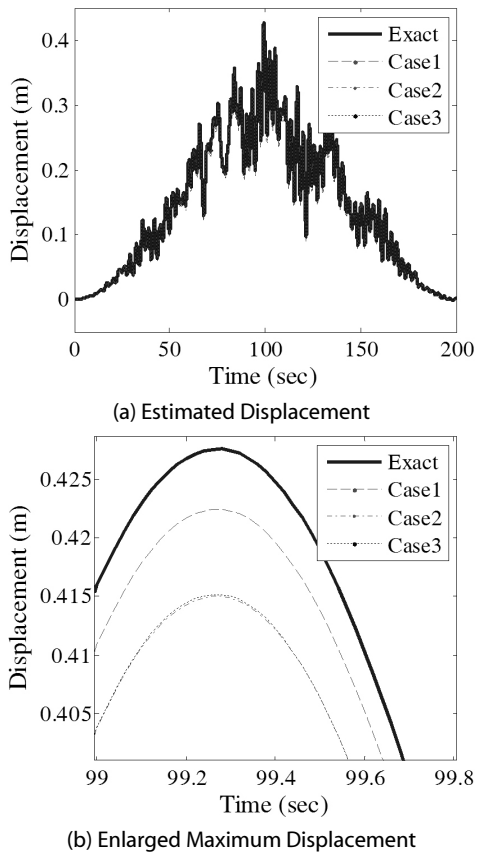


Fig. 3. Comparison of Estimated Displacement

Table 3. Estimation Accuracy with Respect to the Number of Sensors

Case	No. of installed sensors	RMS Error
Case1	1	0.01612
Case2	3	0.02465
Case3	15	0.02758

결과로, 실제 풍력 터빈의 경우 풍향에 따라 로터가 회전하게 되며, 이 경우 터빈 상부 허브에서의 풍향에 따른 변위를 추정하기 위하여 허브 내부에 최소 수량의 가속도계와 경사계를 설치함으로써 변위를 간접적으로 추정할 수 있음을 의미한다.

3.4 경사계의 잡음에 따른 오차

경사계와 가속도계의 잡음에 따른 영향을 관찰하기 위해서 경사의 경우 최대 잡음의 크기를 0.0001~1°의 범위로 고려하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 경사계의 수에 따른 오차 결과를 토대로 가장 정확도가 높았던 최상단에서 1개의 가속도와 1개의 경사계를 이용하여 변위를 추정하였다. 변위 추정 결과를 Table 4에

Table 4. RMS Error with Respect to Noise in Inclination Responses

	Maximum noise level in inclinometer	Proposed method (Eq. 7)	Single use of Inclinometer (Eq. 1)
Case1	0.0001°	0.01395	0.02015
Case2	0.001°	0.01612	0.10003
Case3	0.01°	0.07826	1.0098
Case4	0.1°	0.6131	7.8869
Case5	1°	1.0636	8.2805

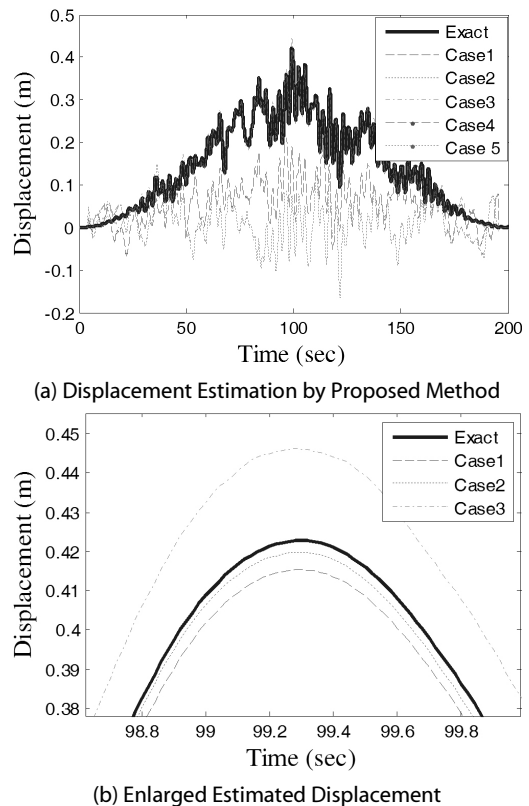


Fig. 4. Comparison of Estimated Displacement by Noise Amplitude

정리하였으며, 결과를 보면 잡음 수준이 증가함에 따라 오차가 증가하는 추세를 보였으나, 경사계만 이용하여 추정하는 경우보다는 제안 방법으로 추정한 결과가 더 정확함을 알 수 있다.

특히 잡음의 크기가 0.01°까지는 제안 방법과 경사계만 사용한 경우의 오차가 비슷하지만 0.1° 이상이 되는 경우는 오차의 차이가 급격하게 증가함을 알 수 있다. Fig. 4는 잡음의 크기에 따른 변위 추정의 결과를 나타낸 그래프이며, 이를 통하여 제안된 방법의 경우 Case 5를 제외하고는 참값과 상당히 일치함을 알 수 있다. 결론적으로 최대 변위가 0.4 m 수준인 풍력 터빈에 대하여 제안 방법을 적용하는 경우 경사계의 잡음 수준이 0.1°인 경우까지 상당히 정밀한 변위추정이 가능함을 확인할 수 있다.

3.5 계측 주파수에 따른 오차

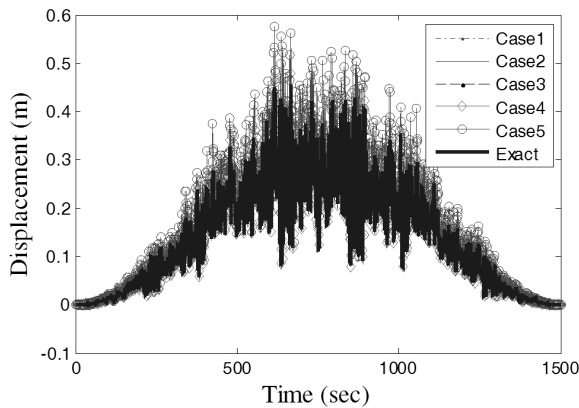
계측 주파수에 따른 영향을 조사하기 위하여 50 Hz에서 1 Hz까지 계측 주파수를 감소시켜 변위를 추정하였고, 그 결과를 RMS 오차로 Table 5에서와 같이 정리하였다. 제시된 바와 같이 계측 주파수가 감소함에 따라 오차가 증가하는 경향이 있으며, 특히 Case 4와 Case 5의 경우 오차가 급격하게 증가하는 것을 알 수

있다.

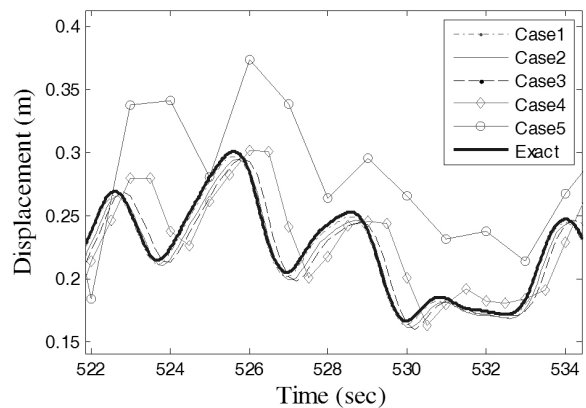
Fig. 5는 이들 다섯 가지 경우에 대한 수치해석 결과를 시간 및 주파수 영역으로 표현한 그래프이다. 추정된 변위를 시계열에서 비교한 Fig. 5(a)의 경우 차이가 명확하지 않으나, 이를 확대한 Fig. 5(b)에서는 Case 5의 경우 위상이 매우 상이함을 확인할 수 있다. 주파수영역에서 비교한 결과 Fig. 5(c)에서 보는 바와 같이 계측 주파수가 낮을수록 잡음이 크음을 알 수 있고, 특히 Case 5의 경우 신호가 존재하는 0.5 Hz 이상의 주파수 성분은 정확하게 추정할 수 없음을 확인할 수 있다. 즉, 수치해석 결과를 통해 최소

Table 5. RMS Error with Respect to the Sampling Rate

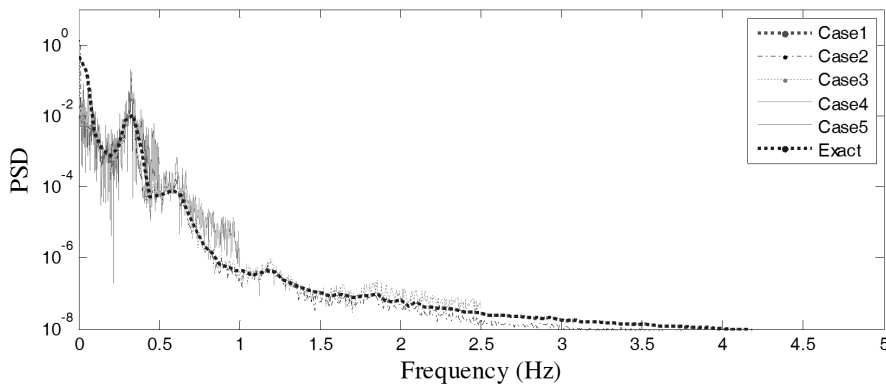
	Sampling Rate (Hz)	RMS error
Case 1	50	0.01612
Case 2	10	0.02981
Case 3	5	0.03687
Case 4	2	0.08226
Case 5	1	0.42657



(a) Displacement Estimation



(b) Enlarged Estimated Displacement



(c) Estimated Displacement in Frequency Domain

Fig. 5. Comparison of Estimated Displacement by Sampling Rate

2 Hz 이상을 유지하는 것이 바람직함을 알 수 있는데, 이는 곧 구조물의 1차 고유주파수인 0.33 Hz보다 7배 이상 높은 계측 주파수를 가져야 함을 의미하고, 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency) 측면에서 보면 1차 고유주파수보다 3배 이상 높은 나이퀴스트 주파수를 갖도록 계측하여야 함을 의미한다.

4. 결론

변위는 구조물의 안전성 평가에 매우 중요한 물리량이다. 특히 상시 높은 수준의 풍하중을 받는 풍력 터빈의 경우 변위를 통한 안전성 관리가 매우 효과적일 수 있다. 본 연구에서는 풍력 터빈의 상시 변위 계측을 위해 경사계와 가속도를 융합하여 변위를 추정하는 식을 제안하고 수치해석을 통해 타당성을 검증하였다. 제원이 공개되어 있는 NREL 5 MW 급 풍력 터빈 모델을 활용하여 수치적 검증을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 경사계의 수량에 따른 변위 추정 정확도 비교를 수행하였으며, 이를 통해 하나의 경사계와 가속도계 융합하는 경우에도 높은 정확도를 갖는 변위 추정이 가능함을 확인하였다. 이는 풍력 터빈 허브 내부에 경사계와 가속도를 설치함으로써, 간편하게 허브 높이에서의 변위를 추정할 수 있음을 의미한다.
- (2) 경사계의 잡음 수준에 따른 변위 추정결과를 비교하였으며, 경사계 단독만 사용하는 경우 잡음의 최대 크기가 0.1° 이상인 경우에 급격한 오차가 발생하였지만 제안된 방법을 사용함으로써 잡음이 0.1°인 경우에도 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.
- (3) 계측 주파수에 따른 변위 추정의 오차를 알아보기 위해 50 Hz에서 1 Hz까지 총 5가지 경우에 대하여 제안 방법을 적용하여 변위를 추정하였다. 추정된 결과를 주파수 영역에서 분석하였을 때, 변위의 성분이 분포가 1차 고유주파수를 포함하는 1 Hz 이내의 대역에 집중적으로 분포하였으며, 따라서 계측 주파수는 나이퀴스트 주파수를 고려하여 최소 2 Hz 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

추후 연구로는 센서 수가 증가할 때 오차가 오히려 증가하는 현상에 대한 추가적인 분석과 함께 실제 이러한 방법을 운영 중인 풍력 터빈에 적용함으로써 현장 적용성과 현장에서의 정확도 등을 평가하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 이공분야 학문후속세대양성사업의 연구비 지원(과제번호 NRF-2013R1A6A3A03065877) 및 한국 에너지기술평가원의 연구비 지원(해상풍력신뢰성 해석 및 설계프로그램 개발(20123030020110))에 의해 수행되었습니다.

References

- Berg, D. and Zayas, J. (2001). "Accurate time-linked data acquisition system field deployment and operational experience." *Proceedings of the 2001 ASME Wind Energy Symposium*, Reno, Nevada, pp. 153-161.
- Celibi, M. (2000). "GPS in dynamic monitoring of long-period structures." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 477-483.
- Foss, G. and Hauge, E. (1995). "Using modal test results to develop strain to displacement transformations." *Proceeding of 13th International Model Analysis Conference*, Nashville, Tennessee, pp. 112-118.
- Jeon, H., Bang, Y. and Myung, H. (2011). "A paired visual servoing system for 6-DOF displacement measurement of structures." *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 4, 045019.
- Jonkman, B. J. and Kilcher L. (2012). *TurbSim User's Guide: Version 1.06.00*. NREL Technical Report September 2012.
- Jonkman, J. M. and Buhl, M. L. (2005). *FAST User's Guide*. Technical Report NREL/EL-500-38230 August 2005.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G. (2009). *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*. Technical Report NREL/TP-500-38060 February 2009.
- Lee, H. S., Hong, Y. H. and Park, H. W. (2010). "Design of an FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 82, No. 4, pp. 403-434.
- Lee, J. J. and Shinozuka, M. (2006). "A vision-based system for remote sensing of bridge displacement." *NDT & E International*, Vol. 39, No. 5, pp. 425-431.
- Lee, J. J., Ho, H. N. and Lee, J. H. (2012). "A vision-based dynamic rotational angle measurement system for large civil structures." *Sensors*, Vol. 12, No. 6, pp. 7326-7336.
- Nassif, H. H., Gindy, M. and Davis, J. (2005). "Comparison of laser doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration." *NDT&E International*, Vol. 38, No. 3, pp. 213-218.
- Park, J.-W., Sim, S.-H. and Jung, H.-J. (2013). "Displacement estimation using multimetric data fusion." *ASME/IEEE transactions on Mechatronics*, Vol. 18, No. 6, pp. 1675-1682