

가속도 및 경사 계측자료를 이용한 풍력 터빈 상부 변위 추정

Estimation of Displacement of Wind Turbines at Hub Height Using Acceleration and Inclination Measurement Data

박종웅* · 정병진** · 이진학*

Park, Jong-Woong, Jung, Byung-Jin, and Yi, Jin-Hak

1. 서 론

본 연구에서는 Park *et al.*(2013)이 제안한 변형률과 가속도를 융합하여 변위를 추정하는 방법을 기반으로 하여, 경사 응답자료를 가속도 응답자료와 융합하여 변위를 추정하는 식을 제안하였다. 이를 위해서 먼저 가속도 및 경사 응답의 융합을 위한 최적화 목적함수를 제안하고, 제원이 공개되어 있는 NREL 5 MW급 풍력 터빈의 수치 시뮬레이션 결과에 적용하여 상부 변위 추정의 적용성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 경사계를 통한 변위 추정

Foss and Haugse(1995)에 의하여 제안된 모드 형상과 소수의 계측된 변형률을 이용하여 변위를 구하는 방법과 Lee *et al.*(2010)이 제안한 가속도 응답으로부터 변위를 구하는 방법, 그리고 Park *et al.*(2013)이 제안한 변형률과 가속도 응답을 융합하여 변위를 구하는 방법 등을 기반으로 하여 이 연구에서는 다음과 같이 가속도 계측응답 a 와 경사 계측응답 θ 를 융합하여 변위 u 를 구하는 식을 제안하였다.

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

여기서, u_θ 는 경사 계측자료 θ 로부터 변환한 변위

† 교신저자; 한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부
E-mail : yijh@kiost.ac

Tel : 031-400-7811 , Fax : 0.1-408-5823

* 어바나 샴페인 소재 일리노이 주립대학

** 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

($u_\theta = \alpha \phi_d (\phi_\theta^T \phi_\theta^{-1} \phi_\theta^T \theta)$)이며, 이 식에서 α , ϕ_d 및 ϕ_θ 는 각각 보정계수, 변위 모드형상, 그리고 경사모드형상을 의미한다. 그리고 λ 는 Tikhonov 정규화 상수로 이 연구에서는 Lee *et al.*(2010)이 제안한 값을 적용하였다. 한편, L_a 는 가중치 대각행렬로 처음과 끝에 $1/\sqrt{2}$ 를 갖고, 나머지는 1을 갖는 행렬이며, L_c 는 이차미분연산 행렬로 2차 중앙차분식을 적용하였다.

최종적으로 식 (1)을 풀어 u 에 관하여 전개하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$u = (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} (L^T L_a a \Delta t^2 + \lambda^2 \alpha D \theta) \quad (2)$$

$$= [C_a \Delta t^2 \ C_\theta] \begin{bmatrix} a \\ \theta \end{bmatrix}$$

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

3. 수치적 검증

3.1 수치 시뮬레이션 개요

제안된 방법의 수치적 검증을 위해 다음과 같이 단순화시킨 풍력 터빈 모형을 대상으로 수치해석을 실시하였다. 수치 모델은 미국 NREL (National Renewable Energy Laboratory)에서 공개한 바 있는 5 MW급 풍력 터빈의 제원을 참고로 하여 모델링하였다(Jonkman *et al.*, 2009). 풍력 터빈 타워의 높이는 90 m이며, 저차 3개 모드의 고유주파수는 각각 0.33 Hz, 3.44 Hz, 10.33 Hz 이다. 풍력 터빈의 상부는 블레이드와 낫셀(nacell)의 무게를 포함하여 집중질량으로 모델링하였으며, 상부에 작용하는 추력(thrust force)은 NREL에서 개발한 풍력 터빈 시

플레이션 프로그램인 FAST를 이용하여 구하였다 (Jonkman and Buhl, 2005). 생성된 풍속 자료를 바탕으로 FAST를 통하여 풍력 터빈의 추력(thrust force)을 먼저 구하고, 바람이 불지 않는 조건에서 점차 빠른 바람으로 성장했다가 다시 줄어드는 조건에서의 추력 시계열을 얻기 위하여 시간영역에서의 해닝 윈도우를 적용하여 이를 수치해석에 적용하였다.

3.2 변위 추정 결과

경사계의 성능에 따른 결과의 정확성을 비교하기 위하여 경사계의 최대 잡음 수준을 0.0001°, 0.001°, 0.01°, 0.1°, 1°로 증가시켜가면서 변위를 추정한 결과를 Table 1에 정리하였다. 또한, 사용된 경사계 및 모드 수에 따른 제안 방법의 성능을 분석하기 위하여 경사계의 수를 각각 1개, 3개, 5개 그리고 15개로 증가시킨 경우 변위 추정 결과를 Table 2에 정리하였다. 한편 계측 주파수를 50 Hz에서 1 Hz까지 계측 주파수를 낮춰 가면서 제안 방법을 적용하여 변위를 추정한 결과를 Table 3에서 정리하였다.

Table 1 Estimation errors according to noise levels

	Noise level in inclinometer	Proposed method	Single use of Inclinometer
Case1	0.0001°	0.02751	0.02875
Case2	0.001°	0.02757	0.02890
Case3	0.01°	0.02835	0.03641
Case4	0.1°	0.05567	0.2382
Case5	1°	0.3907	1.8380

Table 2 Accuracy by the number of sensors

Case	Used No. of sensor	RMS Error	Difference between maximum values (%)
Case1	1	0.034825	0.506126
Case2	3	0.060808	4.689939
Case3	5	0.049516	2.462041
Case4	15	0.048746	4.680479

Table 3 Estimation errors according to noise levels

	Sampling Rate (Hz)	RMS error
Case 1	50	0.0130
Case 2	10	0.0265
Case 3	5	0.0333
Case 4	2	0.0670
Case 5	1	0.3128

4. 결론

NREL 5MW 급 풍력 터빈 모델을 활용하여 수치적 검증을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 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, 제안된 방법을 사용함으로써 잡음이 0.1°인 경우에도 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

(3) 변위 추정을 위한 계측 주파수는 고유주파수와 Nyquist 주파수를 고려하여 최소 2 Hz 이상이어야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원 기관고유사업(PE99274)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Foss, G. and Haugse, E. (1995). Proceeding of 13th International Model Analysis Conference, Nashville, Tennessee, pp. 112-118.
- (2) 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.
- (3) Jonkman, J. M., and Buhl, M. L. (2005) "FAST User's Guide." Technical Report NREL/EL-500-38230.
- (4) Lee, H. S., Hong, Y. H., and Park, H. W. (2010). Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 82, No. 4, pp. 403-434.
- (5) Park, J-W., Sim, S-H., and Jung, H-J. (2013). ASME/IEEE transactions on Mechatronics, Vol.18, No.6, pp. 1675-1682