

WT Nacelle 의 진동 변위 추정 Estimation of a Nacelle Movement of Wind Turbine

*#남윤수¹, 윤태준²

*#Yoonsu Nam(nys@kangwon.ac.kr)¹, Tai Jun Yoon²

¹강원대학교 공과대학 기계·메카트로닉스공학부, ²강원대학교 대학원 메카트로닉스 전공

Key words : Wind turbine, Estimation of nacelle movement, Kalman filter, Lumped parameter model

1. 서론

WT(wind turbine)은 바람 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기계장치이다. 바람이 갖는 파워는 풍속에 3-승에 비례한다[1]. 만약 WT 의 나셀(nacelle)이 진동한다면, 이 효과를 고려하여 풍속을 산정하여야 한다. 즉, WT 이 맞는 실제적인 풍속은 WT 으로 불어오는 풍속(v_w)에서 타워 진동에 의한 나셀의 운동속도($\dot{y}(L,t)$)를 고려한 상대속도이어야 한다. 그러나, WT 나셀 운동의 변위나 속도를 직접적으로 측정할 수 있는 센서는 일반적으로 구하기 어렵다. 특별한 방법을 사용해야 하는데, 보통 이러한 작업은 그 비용이 고가이면서, 사용상에 여러 제약을 받게 될 것이라 예상된다. 본 논문에서는 타워 진동에 의한 WT 나셀의 운동을 추정하는 방법을 제안한다. 또한, 제시된 알고리즘의 효용성을 검증하기 위하여 소형 실험장치를 제작하였고, 이를 사용한 실험 결과를 분석하기로 한다.

2. WT 타워 모델과 나셀 운동 추정기

WT 타워의 운동 모델을 세우기 위하여, 집중 파라미터 방법(lumped parameter method)과 Euler-Bernoulli 빔 이론이 적용되었다. 두 모델의 정확성은 ANSYS 에 의한 FEM 해석 결과와 비교하였다. Fig. 1 은 WT 구조를 간략하게 묘사한 모델이다. WT 의 나셀 부분과 3개 회전 날개는 집중 질량 M 으로 표현되었고, 타워는 중공단면(hollow section) 길이 L 의 기둥이다. 나셀의 운동을 추정하기 위하여 두 개의 센싱 시스템이 사용되었다. 즉, 나셀의 바람 방향과 이에 직교된 방향으로의 가속도를 측정하는 2축 가속도계, 그리고 타워 지지부에서의 2-방향 스트레인을 측정하는 2-축 full bridge 스트레인 게이지 회로가 사용되었다. 각 방향으로 측정된 가속도 정보로부터 나셀의 변위와 속도 관계식을 상태공간 식 표현을 사용하여 기술할 수 있다. 즉,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\ddot{y} + n_a) \quad (1)$$

여기서, $x = [y(L,t) \ \dot{y}(L,t)]^T$
 $n_a =$ 가속도계 노이즈

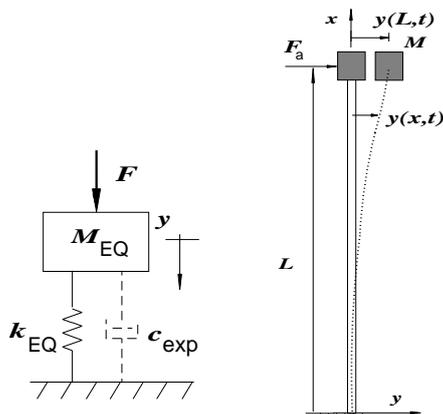


Fig. 1 Block diagram of a simplified model

스트레인 게이지 회로의 출력(mV/V)은 아래의 식으로 표현된다.

$$v_{OUT} = S_g \varepsilon = S_g \left(\frac{M_b R_T}{EI} \right) = S_g \left(\frac{k_{EQ} y(L,t) R_T}{EI} \right) \quad (2)$$

$$= S_g \frac{3R}{L^2} y(L,t)$$

여기서, $S_g =$ 스트레인 게이지의 게이지 상수
 $EI =$ 타워의 Young 계수 및 면적 모멘트
 $k_{EQ} = \frac{3EI}{L^3}$
 $R_T =$ 타워의 외측 반경

식 (2)를 상태공간 식을 이용하여 다시 쓰면 아래와 같다.

$$y = v_{OUT} = \begin{bmatrix} S_g \frac{3R}{L^2} & 0 \end{bmatrix} x \quad (3)$$

Euler-Bernoulli 빔 이론[2]과 식 (4)의 한정모드 해석법(assumed mode method)를 사용하면, 식 (2)와 (3)은 아래의 식으로 변환된다.

$$\ddot{y}(L,t) = \sum_{i=1}^3 \phi_i(L) \ddot{q}_i(t)$$

$$= \begin{bmatrix} \phi_1(L) & \phi_2(L) & \phi_3(L) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{Bmatrix} = \Phi \ddot{q} \quad (4)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{Bmatrix} 0 \\ \Phi^T (\Phi \Phi^T)^{-1} \end{Bmatrix} (\ddot{y}(L,t) + n_a) \quad (5)$$

$$y = v_{OUT} = S_g \varepsilon = S_g R_T \sum_{i=1}^3 \phi_i''(x_0) q_i(t) = S_g R_T [\Phi \ 0] x$$

이제 식 (2)와 (3), 그리고 식 (4)와 (5)로 표현되는 동적 시스템에 대하여, Kalman 필터를 적용 함으로서, 상태변수 벡터, x (즉, WT 나셀의 변위와 속도)를 추정하여 보자. 위에서 유도된 상태공간 식들은 아래와 같은 이산 상태공간 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$x_k = \Phi x_{k-1} + \Upsilon u_k + G \zeta_k \quad (6)$$

$$y_k = C x_k + \eta_k$$

Fig. 2 에 도시되어 있듯이, Kalman 필터는 식 (7)과 (8)의 2개 스텝으로 이루어진다[3].

시간 보정(time update):

$$\hat{x}_k^- = \Phi \hat{x}_{k-1} + \Upsilon u_k$$

$$P_k^- = E \{ (x_k - \hat{x}_k^-)(x_k - \hat{x}_k^-)^T \} = \Phi P_{k-1} \Phi^T + G R_\xi G^T \quad (7)$$

측정 보정(measurement update):

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + L_k (y_k - C \hat{x}_k^-)$$

$$L_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_\eta)^{-1} \quad (8)$$

$$P_k = E \{ (x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T \} = (I - L_k C) P_k^-$$

여기서, $R_\xi =$ 입력신호(즉, 가속도계)의 분산
 $R_\eta =$ 출력신호(즉, 스트레인 게이지 출력)의 분산

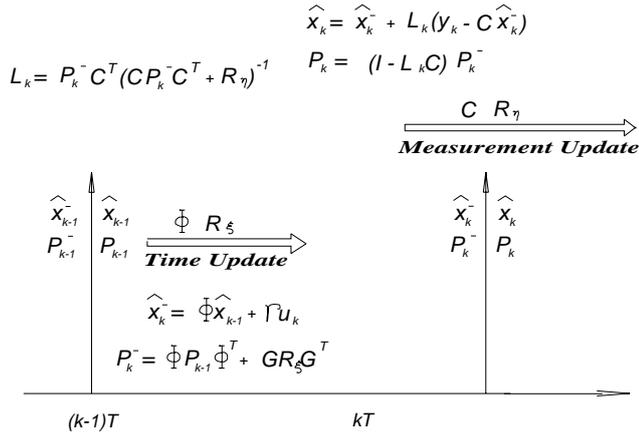


Fig. 2 Structure of a discrete Kalman filter

3. 축소 모형을 사용한 실험 결과

Fig. 1 과 유사하게 환형 단면을 갖는 길이 1 미터의 봉 (rod)과 10kg 의 집중 질량을 사용하여 WT 타워 구조물의 축소 모형을 제작하였다. 집중 질량 내부에 2-축 가속도계, 그리고 환봉 지지부에 가깝게 2-축 스트레인 게이지를 설치하였다. 제안된 나셀 운동 추정기의 성능을 평가하기 위하여, 집중 질량의 2-축 변위가 껍 센서와 레이저 변위센서에 의하여 측정되었다. Fig. 3 는 실험 장치에 충격을 가했을 때 측정된 변위와 가속도 계 출력 신호를 나타낸다. 충격 방향을 Y-축, 그리고 이 방향과 직교된 방향을 X-축으로 나타낼 때, Fig. 3 의 실험결과는 위부터 차례로 X-축, Y-축 변위(mm), 그리고 X-축, Y-축 가속도(g)를 나타낸다. X-방향으로는 맥놀이 현상이 크게, 그리고 Y-축으로는 약하게 나타나고 있다. 이것은 X, Y 축 방향으로의 고유 진동수가

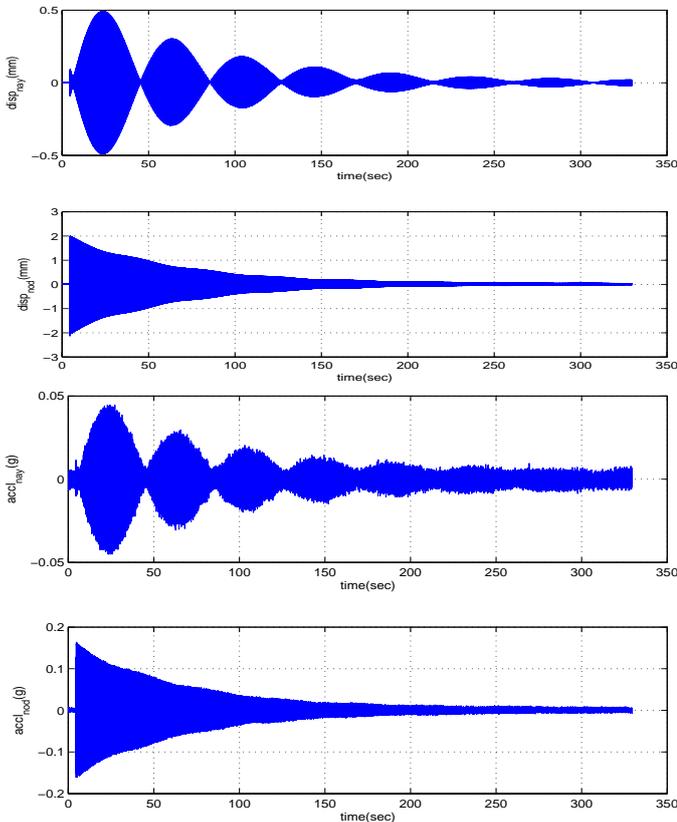


Fig. 3 Experimental results for X- and Y-axis displacement and acceleration

Table 1 Comparison of modal frequency(Hz)

Mode	Experiment	E-B Model	ANSYS
1-st modal freq in X	4.126	4.5831	4.515
1-st modal freq in Y	4.10		4.5148
2-nd modal freq in X		144.028	98.93
2-nd modal freq in Y			98.237

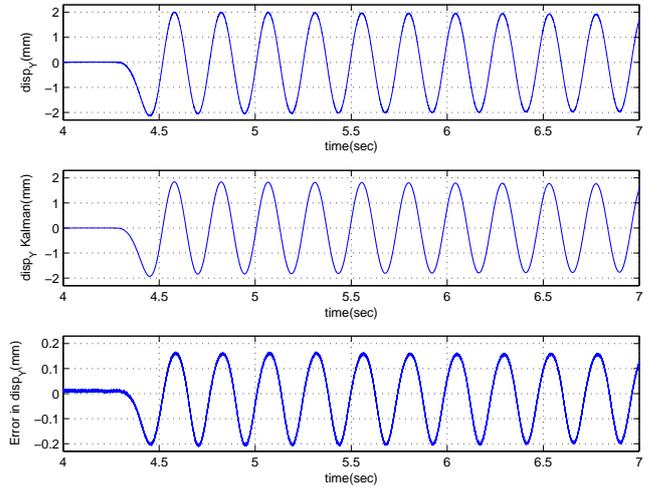


Fig. 4 Estimation results (Y-axis displacement)

서로 다르기 때문에 발생된 것이다. 이는 Table 1 의 데이터에서도 확인된다. 이 테이블에서 볼 수 있듯이 Euler-Bernoulli 모델에 의한 모달 주파수가 2 차 굽힘 모드, 그리고 그 이상의 모드 (Table 1 에 나타내지 않았지만)에서는 FEM 해석결과와 큰 차이를 보인다. 따라서, 식 (4)와 (5)를 사용한 추정결과는 지면상 여기에 포함시키지 않았지만, 만족스럽지 않게 나타나게 된다. Fig. 4 는 (2)와 (3)에 의거한 Kalman 필터링에 의한 Y-축 변위 추정 결과이다. 대략 10%정도의 오차를 보이고 있다. 이런 오차는 식 (3)이 너무 간략화된 모델에 대한 것이기 때문이라 판단된다.

4. 결론

WT 의 나셀 운동상태를 추정할 수 있는 알고리즘이 제시되었다. 2 개 모델, 즉 집중 파라미터 모델과 Euler-Bernoulli 모델에 근거한 Kalman 필터가 사용되었다. Euler-Bernoulli 모델에 근거한 추정기는 타워 단면이 가는 빔 (slender beam)이 아니기에 제대로 작동하지 않는다. 집중 파라미터 모델에 근거한 추정 결과는 10%정도의 오차를 보이고 있다. FEM 결과를 사용하는 추정기 설계와 이의 검증 실험이 계속될 예정이다.

후기

본 결과물은 지식경제부의 출연금으로 수행한 풍력핵심연구센터 사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. E. Hau, "Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics," Springer, 2nd Ed., 2006.
2. L. Meirovitch, "Elements of Vibration Analysis," McGraw-Hill Publishing Comp., 1986, pp. 300-342.
3. A. Gelb, "Applied Optimal Estimation," The MIT Press, 1979..