

풍력 발전 시스템의 회전익 토포크 모델링

부성환* · 임중환** · 허중철** · 김건훈***

Torque Modeling of a Wind Turbine System

Sung-Hwan Boo*, Jong-Hwan Lim**, Jong-Chul Huh** and Kun-Hoon Kim***

ABSTRACT

Torque generated by the blade of a wind turbine is a non-linear function of the wind velocity, the angular velocity of the rotor and the pitch angle. Glauert's theory for propellers, though widely used, is not suited to simulate the performance under variable wind speed and pitch angle. Furthermore, the numerical iteration procedure of the theory restricts the applicability of a real time control of the wind turbine. We suggest a new method of modeling the torque that can be used in a real time control. Based on Glauert's theory, the power coefficient curve is estimated. In the vicinity of the operating point on the curve, a linearized model is extracted in terms of the wind velocity, the angular velocity and the pitch angle. the usefulness of the model is demonstrated with the results produced by sets of experiments.

Key words : Wind turbine system, pitch control, angular velocity

1. 서론

풍력발전시스템이란 바람의 운동에너지를 이용하여 실용화 할 수 있는 전기적인 에너지로 변환시켜주는 기기를 말한다. 다른 자연에너지 이용 시스템과 마찬가지로 시스템 자체가 자연의 기상현상과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 국외에서 개발된 풍력발전 시스템을 도입하여 사용하는 것은 그 신뢰성 면에서 문제가 있다. 특히 제어시스템과 안전장치가 미흡한 소

형의 경우에는 국내풍향에 적용하기가 더욱 어렵다는 것이 과거 여러 연구결과들이 잘 보여주고 있다.¹⁻³⁾ 따라서, 국내의 기상여건 및 여러 환경조건 등을 고려한 국산화 시스템의 개발이 필수 불가결한 것이다.

바람의 에너지를 이용하는데 있어서 가장 큰 문제점은 정상적인 날씨조건하에서는 바람의 출력이 상대적으로 작는데 반하여 강풍시에는 정상치보다 그 출력이 수 백배에 이른다. 그러므로 변화하는 바람에 대해서 출력이 좋은 성능을 유지하며, 신뢰성을 보장하고 운전비용 감소를 위해서는 회전자의 속도 및 출력제어, 풍향추적장치, 돌풍 시 과속방지 제어, 발전기와 연결 및 차단제어 그리고 기타 오동작으로부터 시스템을 보호하는 제어 등 여러 종류의 제어가 필요하다. 이 중 가장 기본이 되는 것이 회전자의 속도 및 출력 제어이다.

* 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.
** 제주대학교 기계공학과, 산업기술연구소
Dept. of Mechanical Eng., Res. Inst. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.
*** 한국에너지 기술연구소
Korea Institute of Energy Research

풍력발전기 회전자는 바람의 운동에너지에 의해 토오크를 발생시키는데 이 토오크는 바람의 변화에 의해 큰 영향을 받는다. 대개 바람은 속도나 방향에 대해서 큰 요동을 가지고 있음으로 여기서 발생하는 토오크도 또한 일정하지 않다. 그러므로 변화하는 바람에 대하여 일정한 토오크 혹은 일정한 출력을 얻기 위하여는 회전익의 속도제어가 필수적이다.

회전익의 회전수 제어는 스톨제어 방식과 피치제어 방식으로 나눌 수 있는데^{4),5)} 스톨제어는 일정 풍속 이상에서 스톨이 발생하게 제작하고 스톨 발생 이상의 풍속에서는 실속이 일어나 회전수가 제어되는 방식으로 원리 및 구조가 단순하지만 정격출력 상태에서 출력에 요동이 발생하는 단점이 있다. 반면에 피치제어 방식은 바람의 속도에 따라 회전익의 피치각을 변화시켜 줌으로써 발생하는 토오크를 조절하여 회전수를 제어하는 방식으로 정격출력 상태에서 그 성능이 스톨 방식보다 양호하다.

피치제어 방식을 이용하기 위해서는 회전익의 공기역학적 모델로부터 바람의 속도, 회전자의 회전속도 및 피치각에 따른 토오크를 도출해야 한다. 회전익의 공기학 이론은 Glauert⁶⁾에 의해 잘 정립되어 있다. 그러나 이 이론은 날개 주위에 발생하는 유도속도와 와류성분을 구하기 위해 반복적인 계산이 필요한 수치해석적 방법으로서 익형 설계에는 유용하지만 실시간 제어에 직접적으로 적용할 수 없다.

이와 같은 단점을 극복하기 위해 Estanqueiro⁷⁾는 토오크를 회전익의 각속도와 바람의 속도 함수로 정의하고 Glauert 이론에 의한 토오크 곡선을 단순화하는 방법을 제시했다. 그러나 발생하는 토오크는 각속도와 바람속도 뿐만 아니라 피치각의 함수가 되므로 피치변화에 대한 토오크 변화를 고려하지 못한 단점이 있다. 또한 Novak⁸⁾은 토오크를 풍속과 각속도의 함수인 주속비로 단순화하여 토오크를 모델링하는 방법을 제안했는데 이 역시 피치각의 변화를 고려하지 못하는 모델이다. 따라서 본 연구에서는 Glauert 이론을 바탕으로 주속비와 피치각을 모두 고려한 회전익의 토오크 모델을 도출하고자 한다. 또한 모형 시스템을 제작하여 실제 실험으로 도출된 토오크식의 타당성을 검증하고자 한다.

II. 공역학적 특성분석

2.1. 회전익의 공역학적 모델링

익형의 성능은 최대양력계수, 양항비, 실속각등으로 대표된다. 풍차의 운전영역은 풍속으로 약4~20m/s로서 그 범위가 크기 때문에 양력계수의 변화폭도 커지게 되어 넓은 범위의 양력계수에 대하여 양항비가 큰 익형이 바람직하므로 본 연구에서는 NACA 4415를 기본 익형으로 선택하였다. Table 1은 날개의 제원을 나타내고, 양각에 따른 양력계수의 변화는 Fig. 1에 나타내었다.

또한 양력과 항력은 다음과 같이 정의된다.

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (1)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2)$$

Table 1. Geometries of the blade

구 분	제 원
Rotor Diameter	84 cm
Number of Blade	2
Type of Blade	NACA 4415
Taper Ratio	0.5
Twist Ratio	0
Root Chord	8.6cm
Tip Chord	4.3cm
Material	Duralumin

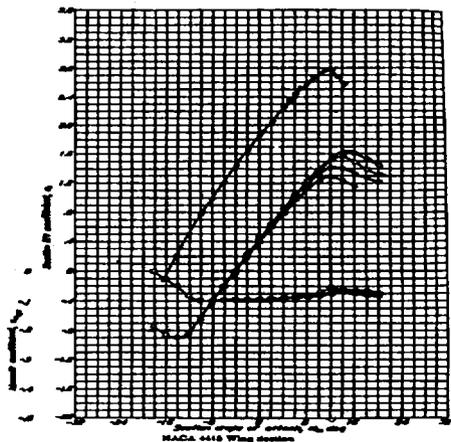


Fig. 1 Characteristic of $C_L-\alpha$ for NACA 4415

여기서 ρ 는 공기 밀도, V 는 바람의 속력 그리고 A 는 날개의 면적이다.

Fig. 2는 날개에 작용하는 속도와 힘의 관계를 나타낸다. Fig. 2에서 θ 는 피치각이고, α 는 양각, Ω 는 날개의 각속도, a 는 축방향 간섭계수, a' 은 와류에 의해 발생하는 회전간섭계수, 그리고 V_0 는 바람의 속도를 나타낸다. 이때, 날개를 회전시키는 회전방향 힘 성분 C_T 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_T = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (3)$$

여기서, $\phi = \tan^{-1} \frac{V_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} = \alpha + \theta$ 이다.

(3)식에서 a 와 a' 은 수치 해석적인 반복계산으로 구해진다.

따라서 회전자에 발생하는 토크(Q)는 날개의 미소요소에 작용하는 토크를 적분하여 구할 수 있다. 즉,

$$Q = \int_0^R BcC_T \frac{1}{2} \rho W^2 r dr \quad (4)$$

여기서, B 는 날개의 개수, c 는 코드 길이, W 는 날개에 대한 바람의 상대 속도, R 은 날개의 반경, ρ 는 공기 밀도이다.

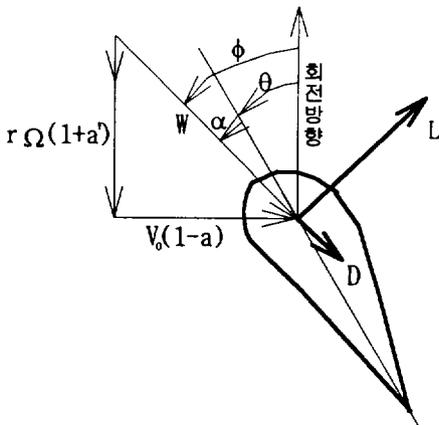


Fig. 2 Relative flow velocities

회전자에서 발생하는 출력계수 (C_p)는 (4)식으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$C_p = \frac{\text{회전자동력}}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} = \frac{Q\Omega}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} \quad (5)$$

무차원 변수인 주속비(Tip Speed Ratio : λ_R)와 국부 주속비 (local speed ratio : λ) 는 (6)식과 같이 정의된다.

$$\lambda_R = \frac{R\Omega}{V}, \quad \lambda = \frac{r\Omega}{V} \quad (6)$$

(4)식과 (5)식에 (6)식을 대입하여 정리하면 회전자에서 발생하는 출력계수(C_p)는 날개의 각속도와 바람의 속도로 나타내는 주속비(λ)와 피치각(θ)의 함수가 되어 다음과 같다.

$$C_p = \frac{8}{\lambda_R} \int_0^{\lambda_R} a' (1-a)^2 \lambda^3 d\lambda \quad (7)$$

여기서, a 는 축방향 간섭계수, a' 은 와류에 의해 발생하는 회전간섭계수로써 피치각(θ)의 함수이다.

Fig. 3은 (7)식에 의해 평가된 본 연구에서 이용한 날개에 대한 성능곡선을 나타내었다.

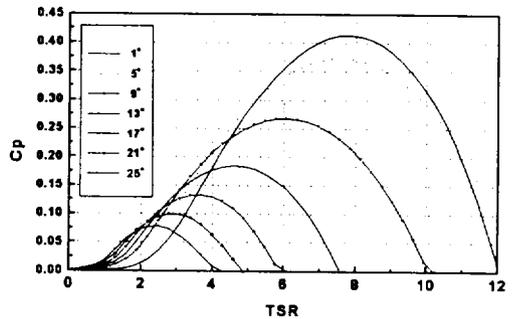


Fig. 3 C_p vs. TSR

2.2. 시스템의 운동방정식

Fig. 4(a)는 풍력발전 시스템의 도안이다. 이들중 회전익은 하나의 외팔보로 간주하여 시스템의 간략화한 도안을 Fig. 4(b)와 같이 나타내었다.

회전익, 주축, 허브, 그리고 구동부 기어축의 회전 중심은 모두 동일한 선상에 있으므로 이들의 관성모멘트들의 합은 J_1 으로 나타낼 수 있다. 종동부 기어축과 발전기 축의 관성모멘트들은 위와 마찬가지로

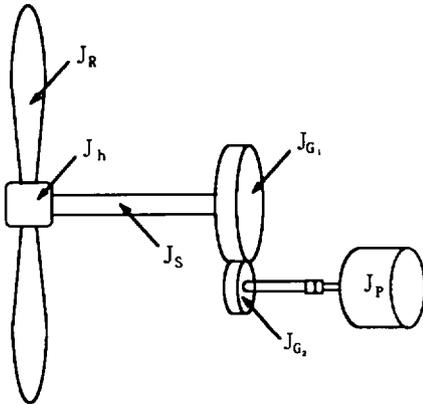
J_2 로 나타내었다. 단 증속된 기어축의 관성 모멘트는 구동부 기어의 관성모멘트와 발전기의 관성모멘트에 비해 매우 작으므로 무시하였다. 각 기어열의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$J_1\theta_1'' + T_1 + b\theta' = Q \quad (8)$$

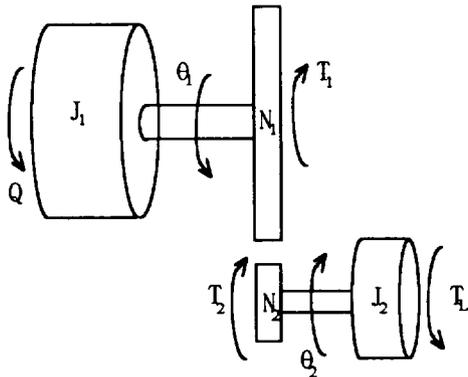
$$J_2\theta_2'' + T_L = T_2 \quad (9)$$

(8)식에서 b 는 구동부의 감쇄계수이며 중동부 감쇄계수는 무시하였다. 주동·중동 기어의 행한 일은 같고, 이송된 회전길이는 같기 때문에 (8)식, (9)식은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$J_{eq}\theta_2'' + (K)^2T_L + b\theta_2' = KQ \quad (10)$$



(a) Physical diagram



(b) Approximate diagram

Fig. 4 Schematic diagram of a wind turbine system

여기서, J_{eq} 는 등가관성 모멘트, K 는 기어의 증속비이다.

회전익의 토크 모델을 도출하기 위하여 발전기 부분을 무시하면 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$J_{eq}\theta_2'' + b\theta_2' = KQ \quad (11)$$

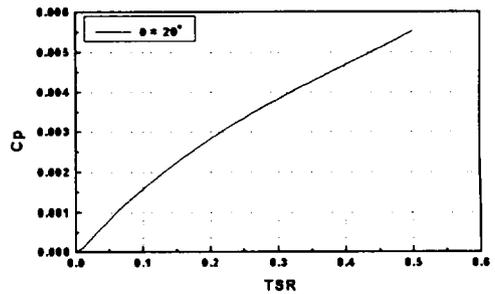
2.2. 토크 모델링

(7)식으로 표현되는 C_p 는 주속비(λ)와 피치각(θ)의 함수 즉,

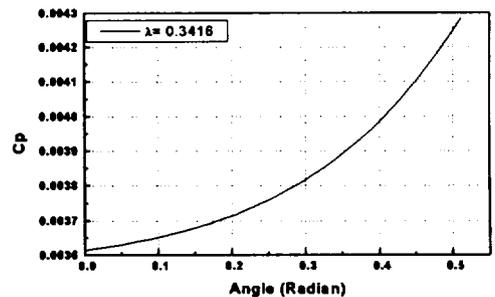
$$C_p = f(\lambda, \theta) \quad (12)$$

으로 정의하고 정격출력시 동작점에서 주속비와 피치각을 각각 $\lambda_o (= R \frac{\Omega_o}{V_o})$, θ_o 로 하고 (12)식을 선형화 하면 다음과 같다.

$$C_p = C_p(\lambda_o, \theta_o) + M_o(\lambda - \lambda_o) + M_1(\theta - \theta_o) \quad (13)$$



(a) C_p vs. TSR (θ : constant)



(b) C_p vs. θ (λ : constant)

Fig. 5 Characteristic of C_p according to various λ and θ

여기서, $M_0 = \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda, \theta}$, $M_1 = \frac{\partial C_p}{\partial \theta} \Big|_{\lambda, \theta}$ 이다.

M_0 와 M_1 은 피치각 일정 즉, $\theta = \theta_0$ 일 때 λ 의 변화에 따른 C_p 곡선과 주속비가 일정 즉, $\lambda = \lambda_0$ 일 때 θ 의 변화에 따른 C_p 곡선에서 구할 수 있으며, Fig. 5의 (a), (b)에 각각 이 곡선을 나타내었다.

이제 (5)식으로부터 토오르크를 구하면,

$$Q = \frac{\rho A V^3 C_p(\lambda, \theta)}{2\Omega} \quad (14)$$

이 된다.

일반적으로 C_p 곡선에서 최대 출력이 발생하는 지점을 정격 출력시 동작점으로 하지만 본 연구에서 제작한 모형시스템은 날개의 직경이 매우 작아 그림 3의 최대 출력점에서 동작할 수 없으므로 정격출력시 풍속을 15%, rpm을 700, 그리고 피치각 20° 를 동작점으로 설정하였다.

이제 Fig. 5의 곡선들을 다항식으로 적합화하고 설정된 동작점의 값들을 대입하여 M_0 , M_1 을 구하면 식(14)을 이용하여 토오르크를 구할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 모형 시스템을 photo. 1에 나타내었다. 피치각, 회전수 및 풍속을 측정하기 위해 변위센서와 타코메타, 그리고 풍속계를 설치하였으며, 측정된 데이터는 인터페이스 카드를 통해 PC에 저장된다. Fig. 6은 단순화된 모델에 의한 토오르크와

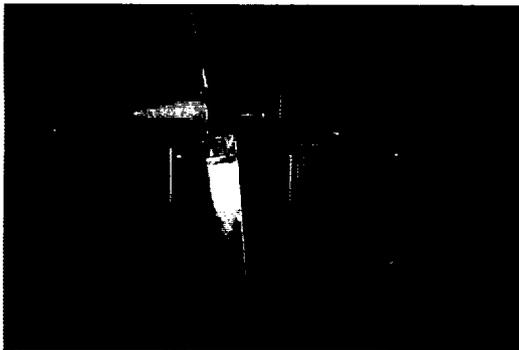
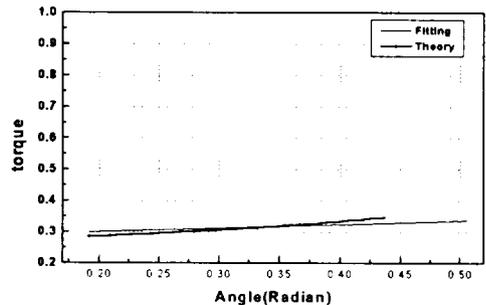


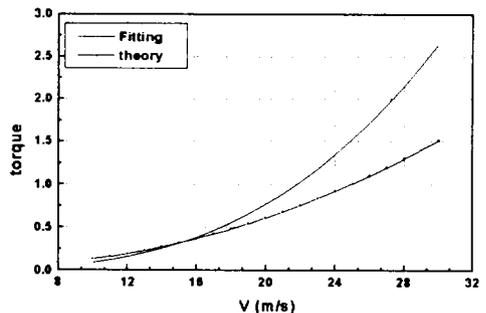
Photo. 1 The model of a wind turbine

Glauert이론에 의한 토오르크를 비교한 것이다. Fig. 6에서 (a)는 λ 가 일정할 때 피치각 변화에 따른 토오르크를 나타낸 것 으로서 θ_0 를 중심으로 $\pm 5^\circ$ 범위에서 최대 토오르크 편차가 9%이다. 또한 (b)는 θ 가 일정할 때 풍속의 변화에 따른 토오르크로서, $V_0 = 15\%$ 에서 $\pm 5\%$ 범위에서 최대 토오르크 편차가 20%임을 보여준다. 따라서 단순화된 모델은 피치각 $\pm 5^\circ$, 풍속 $\pm 5\%$ 범위에서 충분히 이용가능하다고 사료된다.

Fig. 7은 시스템의 정상상태 응답을 나타낸 것이다. (a)는 주속비가 $\lambda_0(0.342)$ 로 일정할 때 피치각에 따른 시스템의 최종 rpm을 나타낸 것이다. θ_0 에 $\pm 5^\circ$ 범위에서 최대 오차는 200rpm 정도로 정격 rpm(700)에 대해서 29% 정도의 오차를 보였다. 이 결과는 Fig. 6의 (a)의 결과와 상당한 오차를 보이는데 이것은 모형 시스템의 물성치오차 및 측정오차 등에 기인된 것으로 사료된다.



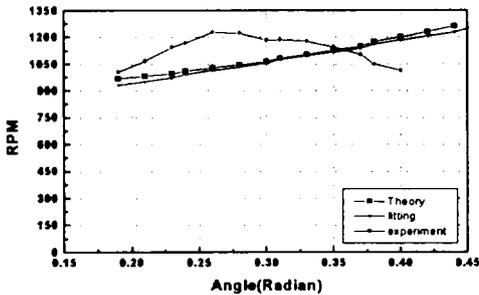
(a) Q vs. θ when $\lambda = \lambda_0$.



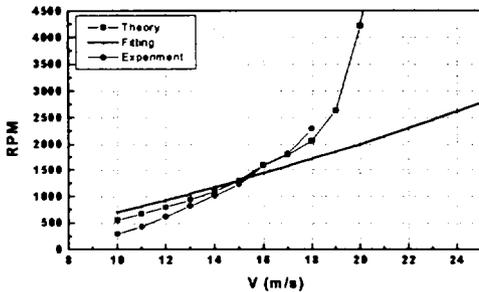
(b) Q vs. V when $\theta = \theta_0$.

Fig. 6 Comparison of the torques

(b)는 피치각이 20° 로 일정 할 때 풍속의 변화에 따른 시스템의 최종 rpm을 나타낸 것으로서 (a)의 경우보다 상당히 큰 rpm오차가 발생했음을 관측할 수 있다. 그 이유는 제어되지 않은 상태에서는 rpm도 시간에 따라 크게 변하므로 주속비가 Fig. 6의 (b)경우보다는 더 큰 범위로 변하기 때문이다. 만약 rpm이 제어되어 Ω_0 근처로 유지된다면 풍속의 변화에 따른 λ 의 변화폭이 적어 rpm 오차도 크게 줄어들 것으로 사료된다.



(a) RPM vs. Q when λ is fixed



(b) RPM vs. V when θ is fixed

Fig. 7 Steady state response of the system

IV. 결 론

본 연구에서는 수평축 풍력터빈의 실시간 제어를 위한 토크 모델링 방법을 제시하고 모형을 제작하여 실험치와 비교를 통한 검증작업을 진행하였다. 즉,

Glauert 이론을 바탕으로 동작점 부근의 출력계수를 예측하고 그 곡선을 선형화 하여 단순화된 토크 모델을 도출하였다. 기존 모델이 풍속과 각속도만을 고려한 것임에 비해 이 모델을 주속비와 피치각을 모두 고려한 것으로서 좀더 안정적인 제어성능을 보장할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 남준우 외, 1976, 제주도 중산간 지대의 전파 및 지하수 양수용 풍력 발전기의 개발연구, 한국과학기술 연구소, BS J-772-2.
- 2) 이정오 외, 1975, 풍력 이용에 관한 종합 연구, 과학기술처, STF-74-2.
- 3) 이정오 외, 1977, 풍력발전 개발연구, 과학기술처, STF-76-2.
- 4) Viterna, L. A. & Corrigan, R. D., 1966, "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines," DOE/NASA Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio.
- 5) Miley, S. J., 1982, A Catalog of Low Reynold Number Airfoil Data for Wind Turbine Application. Prepared for International Corp., Energy System Group, Rocky Flats Plant.
- 6) David M. Egglestmn & Forrest S. Stoddard, 1987, *Wind Turbine Engineering Design*, Van Nostrand Reinhold Company Inc. pp.19-20.
- 7) A. I. Estanqueiro, J. M. Ferreira de Jesus, J. A. Gil Saraiva, 1991, WECS Unsteady Power Output Simulation, Wind Energy : Technology and Implementation, Amsterdam EWEC '91, pp.618-622.
- 8) P. Novak, T. Ekelund, I. Jovik, and B. Schmidtbauer, 1995, Modeling and Control of variable-speed Wind-turbine Drive-System Dynamics, IEEE control systems, vol.15, No4, pp.28-38.