

풍력터빈용 날개 설계 및 공력해석에 관한 연구

최민선† · 김정환* · 이영호**

(원고접수일 : 2003년 12월 22일, 심사완료일 : 2004년 1월 7일)

A Study on Aerodynamic Analysis and Design of Wind Turbine Blade

Min-Sun Choi† · Jeong-Hwan Kim* · Young-Ho Lee**

Abstract : The wind turbine blade is the equipment converted wind into electric energy. The effect of the blade has influence of the output power and efficiency of wind turbine. The design of blade is considered of lift-to-drag ratio, structure, a condition of process of manufacture and stable maximum lift coefficient, etc. This study is used the simplified method for design of the aerodynamic blade and aerodynamic analysis used blade element method. This process is programed by delphi-language. The program has any input values such as tip speed ratio, blade length, hub length, a section of shape and max lift-to-drag ratio. The program displays chord length and twist angle by input value and analyzes performance of the blade.

Key words : HAWT(Horizontal Axis Wind Turbine), Lift-to-drag ratio(양항비), Aerodynamic characteristics(공력특성), Wind power generation(풍력발전), Blade element method(날개요소이론), Flap(플랩).

1. 서 론

최근 들어 화석연료의 자원감소와 환경적인 문제, 생활 속에서 전력소비가 급격히 늘어남과 동시에 화석연료의 공급단가가 점점 불안정해져 가는 우려 속에서, 전 세계적으로 신 재생 에너지 자원에 대하여 많은 관심을 가지고 꾸준한 연구를 계속하여왔다. 에너지원으로서 바람은 비용이 전

혀 들지 않는 청정에너지 자원이며, 무한한 용량을 가지는 매력적인 에너지 자원으로써 각광을 받고있다. 바람은 수세기동안 배를 나아가게 하고, 곡물을 갈고, 물을 끌어올리는 용도로 사용되어져 왔으며, 이와 같은 천연 에너지 자원인 바람을 이용한 풍력발전은 최근들어 급속히 전 세계적으로 확산되어가고 있는 추세이다. 풍력발전은 어느 곳에서나 산재해 있는 무공해 자원인 바람의 운동에

† 책임저자(목포해양대학교 기관시스템공학부), E-mail : cmscms@mail.mmu.ac.kr, T : 061)240-7081

* (재)한국조선기자재연구원, E-mail : jhkim@komeri.re.kr, T : 051-410-4113

** 한국해양대학교 기계·정보공학부

너지를 이용하여 회전자(rotor)를 회전시키고, 이의 회전력을 이용하여 전력을 생산하므로, 환경친화적인 새로운 대체에너지로써 전 세계적으로 많은 주목을 받고 있다. 기존의 발전방식과 비교하여볼 때 풍력발전기 개별 기기 당 발전단가는 다소 높은 편이나, 이를 극복하기 위하여 풍력자원이 풍부한 연안지역이나 육지에 대규모 풍력발전단지를 조성하여, 전체 발전단가를 기존의 발전방식과 경쟁이 가능한 수준까지 낮추었으며, 이미 많은 선진국가에서 풍력발전이 실용화되고 있다. 현재 국내의 전력수급 상태와 풍황 조건, 여러 가지 지리적 조건을 고려해볼 때, 새로운 대체 에너지 발전방식으로써의 풍력발전은 충분한 가능성을 가지고 있다. 바람의 운동에너지를 이용하여 전력을 생산하는 풍력발전기의 핵심적인 요소는 회전자이며, 회전자의 공력설계(aerodynamic design)는 전체 시스템의 성능을 좌우하는 아주 중요한 부분이므로 신중하게 설계하여야만 한다. 이러한 회전자는 보통 익형(airfoil)으로 구성되며, 풍력발전용 터빈로터에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 Lee 등이 CFD를 이용하여 500 kW 풍력터빈 블레이드에 대한 공력해석을 수행한 바 있다.^{1)~3)} 풍력발전용 회전자를 설계할 때 사용되는 익형은 다양한 종류가 제시되어 있으며, 보통 익형의 표면이 더러워지거나, 표면에 약간의 손상이 가해지더라도 익형의 공력특성이 크게 변하지 않는 종류의 익형을 사용한다. 대표적인 익형으로써 NACA 63618을 들 수 있다. 일반적으로 익형의 공력특성은 양력(lift)과 항력(drag)의 비인 양항비(lift to drag ratio)로써 결정이 되며 지금까지 풍력터빈에서 가장 우수한 성능의 익형이 NACA 시리즈의 6자계열로 알려져 있다. 그래서 풍력터빈의 로터를 설계할 때 NACA 63618을 사용해서 풍력터빈로터를 설계하였으며 고양력시스템으로써 날개 보조 장치인 다양한 각도와 길이의 플랩을 장착하였다.^{4)~7)} 본 연구에서는 우선 한국해양대학교 실정에 맞는 풍력발전용 터빈로터를 설계하였으며 설계와 형상에 대한 공력해석에는 날개요소이론(blade

element method)을 사용하였으며 날개끝 손실(tip loss)에 대해서는 Prandtl 보정계수를 이용하였다. 그리고 이것을 프로그래밍하였으며 프로그램에 사용된 언어는 델파이를 사용하였다.

2. 최적설계 및 공력해석

2.1 날개요소이론

날개요소이론은 블레이드의 임의의 위치에 대해서 2차원 유동실험 및 CFD결과를 이용하여 전체 블레이드에 대해 적분함으로써 공력성능을 예측하는 방법이다. Fig. 1에서는 풍력발전 블레이드의 임의의 위치 r 에서 국부 피치각 θ , 국부 유효영각 α 에 대해서 속도선도를 나타낸 그림이다. 여기서 U 는 자유흐름의 입력 풍속, Ω 는 블레이드 회전속도를 나타낸다. 블레이드 회전면과 상대속도 W 가 이루는 각 ψ 와 유효영각 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \psi - \theta$$

$$\tan \psi = \frac{(1-a)U}{(1+a')r\Omega} \tag{1}$$

여기서 a 와 a' 는 축간섭계수와 회전간섭계수이며 $a = (U - V)/U$, 로 $a' = \omega/(2\Omega)$ 나타낼 수 있다.

Fig. 2에서 원통형 유관을 지나는 유체가 디스크 면을 통과 할 때 미소회전면적 $2\pi r dr$ 에 작용하는 미소추력 dT 와 토크 dQ 는 운동량이론으로부터 다음과 같다.⁸⁾

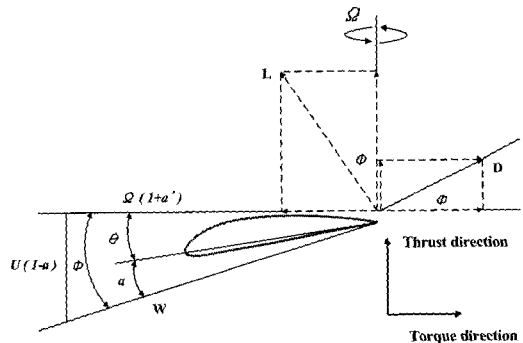


Fig. 1 Blade element and velocity triangle

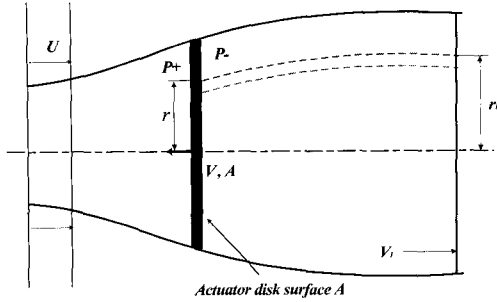


Fig. 2 Streamtube model of the flow through a HAWT rotor

$$dT = \rho \cdot 2\pi r dr \cdot V(U - V_1) \quad (2)$$

$$dQ = \rho \cdot 2\pi r dr \cdot V r^2 \Omega$$

여기서 V 는 풍력터빈의 회전면을 수직으로 통과하는 풍속으로 베르누이 방정식으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V = \frac{(U + V_1)}{2} \quad (3)$$

a , a' 와 식 (3)을 식 (2)에 대입하면

$$\begin{aligned} dT &= 4\pi r \rho U^2 a(1-a) dr \\ dQ &= 4\pi r^3 \rho U(1-a)a' \Omega dr \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)와 동력 $P = \Omega Q$ 로부터 동력계수는 다음과 같다.

$$C_p = \frac{P}{(1/2)\rho A U^3} \quad (5)$$

여기서 $\lambda = \frac{\Omega R}{U}$ 즉 팁 속도비를 나타낸다.

그리고 Fig. 1에서 블레이드 요소에 작용하는 미소추력과 미소토크는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dT &= B \cdot C \left(\frac{1}{2} \rho W^2\right) C_n dr \\ dQ &= B \cdot C \left(\frac{1}{2} \rho W^2\right) C_t r dr \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 C_n 과 C_t 는 각각 다음과 같다.

$$C_n = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi,$$

$$C_t = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi$$

C_L , C_D : 2차원 양력 및 항력계수

B : 블레이드의 개수

C : 익형 코드의 길이

식 (4)과 식 (6)의 각 변수를 일치시키고, 국부회전 면적비 $\sigma_r = \frac{BC}{\pi r}$ 를 정의하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.⁹⁾

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r C_n}{8 \sin^2 \phi} \quad (7)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_t}{8 \sin \phi \cos \phi} \quad (8)$$

2.2 블레이드 최적화 절차

블레이드의 최대 동력계수는 $dC_p/da = 0$ 으로부터 얻어지며, 이를 만족하는 조건은 다음과 같다.¹⁰⁾

$$\lambda_r = (4a-1) \sqrt{\frac{(1-a)}{(1-3a)}} \quad (9)$$

여기서 $\lambda_r = \frac{r\Omega}{U}$ 이다. 이때의 a 와 a' 의 관계식은 다음과 같다.

$$a' = \frac{1-3a}{4a-1} \quad (10)$$

위 식으로부터 주어진 λ 에 대한 a 와 a' 를 구하고 식 (1)에서 ϕ 를 구하며, 식 (7)로부터 σ_r 과 코드길이를 구할 수 있다.

2.3 공력해석 및 프로그램

블레이드에 대한 공력해석을 수행하기 위해서는 다음과 같은 과정을 거쳐게 된다.

- r/R , C , $C_L(a)$, $C_D(a)$, θ , U 입력
- a and a' 가정

- c. ϕ 가정
- d. α 계산
- e. C_L 와 C_D 계산
- f. a 와 a' 계산
- g. a 와 a' 가 수렴되면 계산완료 그렇지 않으면 b단계에서 다시 계산

위의 과정을 토대로해서 델파이 언어를 사용해서 프로그램화 하였다. 그리고 양력계수와 항력계수는 실속이후에서의 영역에 대한 자료가 거의 없기 때문에 실속이후의 영역에 대해서 정확히 계산하기 위해서는 실속 상태에서 양력계수와 항력계수를 계산할 필요가 있다.

본 연구에서는 Viterna-Corrigan이 제안한 식을 사용하여 실속이후의 양력계수와 항력계수를 구하였으며, Fig. 3은 Viterna-Corrigan의 제안식을 토대로 하여 작성한 프로그램의 인터페이스를 나타내고 있다.¹¹⁾ 공력해석 프로그램은 사용자의 요구에 따라 Fig. 4에서와 같이 프로그램 인터페이스에서 익형에 대한 양력과 항력계수의 데이터 파일을 불러 올 수 있게 되었으며 블레이드의 개수, 블레이드의 길이, 허브의 길이, 주속비 등을 자유자재로 입력할 수 있게 되어 있다. 그리고 이 입력값을 토대로 하여 동력계수를 자동 계산할 수 있다.

2.4 고양력장치

고양력장치 중에 하나인 플랩은 익형의 후연 아랫면에 부착되어 익형의 공력특성 향상에 기여하는 장치이다. 보통 이러한 고양력 장치는 항공 산업에서 항공기의 이·착륙시 활주거리를 짧게 하기 위하여 사용되나, 풍력발전에서는 풍황자원이 충분하지 못한 지역에 대하여, 고효율의 로터 블레이드 설계시 이용된다.

보통 플랩의 크기가 코드길이(chord length) 비해서 과다하게 크다면 양력의 증가 범위보다 항력의 증가 범위가 더욱 커지게 되어, 익형 공력특성 지표인 양항비가 나빠지게 되므로, 적절한 플랩의 크기(height)를 찾는 것이 중요하다.

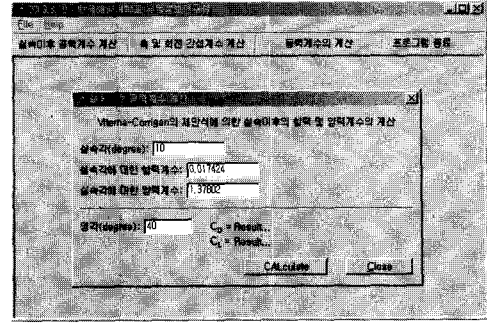


Fig. 3 Dialogue box of Viterna-Corrigan equation

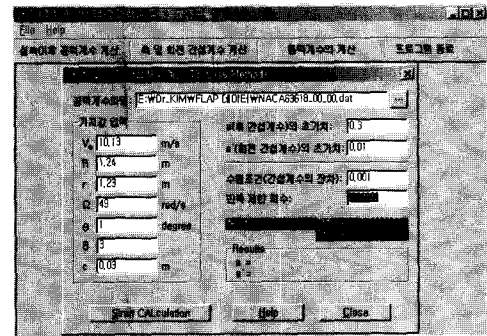
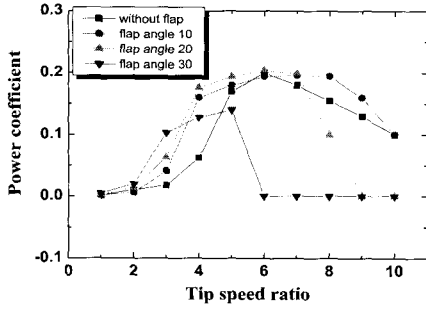


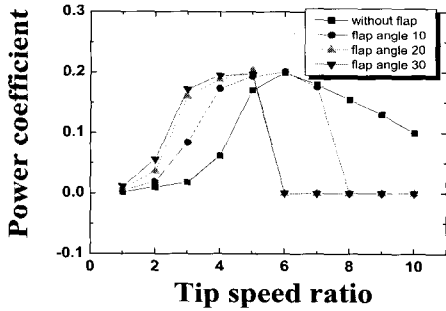
Fig. 4 Dialogue box of Aerodynamic Analysis

3. 결과 및 고찰

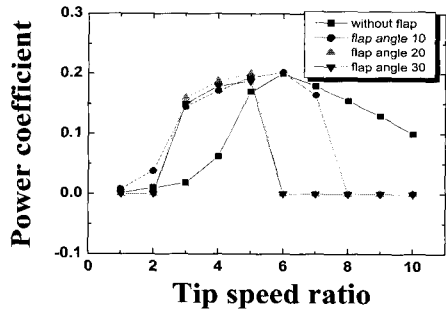
Fig. 5은 날개요소이론을 이용해서 풍력터빈의 동력계수를 구하였다. 그리고 실제로 3차원의 항공기 날개에서는 날개 상면과 하면의 압력차에 의하여 날개끝에서 와류(vortex)가 발생하여 날개 주위의 순환분포가 감소되기 때문에 날개끝 부분에서부터 손실이 발생하며, 풍력터빈에서도 이런 현상이 나타난다. 이를 보통 날개끝 손실이라고 하는데 날개끝 손실을 고려하기 위해서 본 연구에서는 Prandtl과 Goldstein이 제시한 날개끝 손실 이론을 적용하였으며, 그래프에서는 플랩각도의 변화에 따른 주속비에 대한 동력계수 값을 각각 나타내고 있다. 본 계산에서의 모든 플랩길이와 플랩영각에 대해서 주속비 5이하에서는 플랩을 장착하지 않을 때보다는 장착했을 때 높은 동력계수 값들이 나타나다가, 주속비 5이상에서 플랩길이 2%, 플랩각도 10°를 제외하고 동력계수 값이 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다.



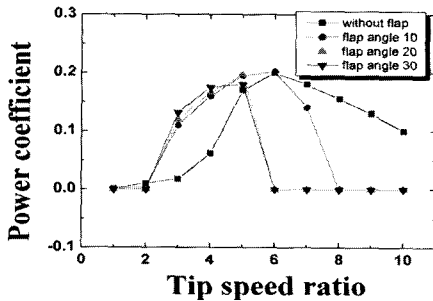
(a) Flap length 2%



(b) Flap length 10%



(c) Flap length 20%



(d) Flap length 30%

Fig. 5 Flap length and flap angle effect for power coefficient curve

그리고 플랩길이 2%, 플랩각도 10°에서는 전영역의 주속비에 대해서 플랩을 장착하지 않은 경우보다 높은 동력계수 값을 나타내고 있는 것을 미루어 짐작할 때 플랩길이 2% 플랩각도 10°이하로 설계했을 때 풍력터빈의 성능을 향상시킬 수 있는 플랩의 형상임을 예측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기역학적 이론을 적용하여 풍력터빈의 블레이드를 설계하였으며, 또한 고양력장치인 플랩을 장착하여 성능해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고양력장치인 플랩을 설치하여 공력성능을 측정 한 결과 5이하의 주속비에서는 플랩이 장착된 경우가 장착되지 않은 경우보다 월등한 성능을 나타내었다.
2. 플랩길이 2%, 플랩각도 10°이하에서는 전체 주속비에 걸쳐서 높은 성능을 나타내고 있었다.
3. 범용 CFD 코드를 이용하여 풍력터빈의 유동 해석 및 성능해석을 수행하는 것이 가능함을 알 수 있었으며, 보다 정확한 예측을 통한 결과는 향후, 풍력터빈 설계자들에게 상당히 효율적인 작업을 가능하게 할 것이라 사료되며 CFD와 PIV실험을 수행하여 익형의 종류와 최적의 플랩의 관계와 유동메카니즘을 규명할 예정이다.

후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국 21사업 및 에너지관리공단학술진흥사업과제지원연구비(2003-03-0049-0-000)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 김유택, 김정환, 김범석, 남철도, 이영호, "CFD에 의한 500kW급 수평축 풍력발전용 터빈의 성능평가 및 유동해석에 관한 연구".

- 유체기계저널, 제5권 제4호, pp. 32~39, 2002.
- [2] B. S. Kim, J. H. Kim, K. Kikuyama, R. Rooij, Y. H. Lee, "3-D Numerical Predictions of Horizontal Axis Wind Turbine Power Characteristics for the Scaled D_뿔 University T40/500 Model", The 5th JSME-KSME Fluids Eng. Conf., pp. 323, 2002.
- [3] 김범석, 김정환, 남청도, 이영호, "수평축 풍력발전용 터빈의 유동해석을 위한 상용 CFD 코드의 적용성 평가에 관한 연구", 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 95~101, 2002.
- [4] 조용욱, 서욱, "비행원리", 도서출판 청연, pp. 112~120, 1995.
- [5] Y. H. Lee, J. H. Kim, B. S. Kim, Y. T. Kim, C. D. Nam, "A Study on the Optimum Design of Turbine Blade with Flap for Wind Power Generation", International Conference on Marine Engineering, BEXCO, Busan, Korea, pp. 389~393, 2001.
- [6] 김정환, 김범석, 이영호 등, "파력발전용 웰즈 터빈의 더블플랩에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 616~621, 2001.
- [7] 김정환, 김범석, 김윤해, 남청도, 이영호, "풍력발전용 공기터빈의 최적설계에 관한 기초연구", (사)한국박용기관학회지, 제25권 제5호, pp. 147~153, 2001.
- [8] D. A. Spera, Wind Turbine Technology ASME Press, 1994.
- [9] V. D. Hunt, Wind power, Van Nostrand Reinhold Company, 1981.
- [10] K. Y. Maalawi, "Direct Method for Evaluating Performance of Horizontal Axis Wind Turbines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 5, pp. 175~190, 2001.
- [11] Viterna, L. A. and Corrigan, R. D., "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio, Inc., 1966.

저 자 소 개



최민선 (崔民善)

1959년 1월 28일생, 1982년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1995년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 현재 목포해양대학교 부교수, 당학회 증신회원



김정환 (金貞煥)

1968년 2월생, 1998년 부경대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2002년~2003년 일본큐슈공업대학 기계시스템공학과 특별연수생(일본 학술진흥재단 지원), 2003년 8월 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2003년~2004년 신진연구자 연수과정(한국과학재단 지원) 현재 (재)한국조선기자재연구원 선임연구원 당학회 정회원. 관심분야 : PIV, CFD, 풍력발전, 파력발전, 유체기계



이영호 (李英浩)

1958년 2월생, 1980년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1986~1989년 일본동경대학 기계공학과(공학박사), 1980~현재, 한국해양대학교근무(기계·정보공학부 교수), 2001. 12~2003. 6. (재)한국조선기자재 연구원 초대원장, 관심분야 : PIV, CFD, 환경에너지, 유체기계