

BEMT에 의한 100kW 풍력터빈 블레이드 기본설계 및 출력 성능해석

김범석† · 김만응* · 이영호**

(원고접수일 : 2008년 3월 17일, 원고수정일 : 2008년 7월 30일, 심사완료일 : 2008년 8월 12일)

Basic Configuration Design and Performance Analysis of a 100kW Wind Turbine Blade using Blade Element Momentum Theory

Bum-Suk Kim† · Mann-Eung Kim* and Young-Ho Lee**

Abstract : In this study, mathematical expressions based upon the conventional BEMT(blade element momentum theory) was applied to basic 100kW wind turbine blade configuration design. Power coefficient and related flow parameters, such as Prandtl's tip loss coefficient, tangential and axial flow induction factors of the wind turbine were analyzed systematically. X-FOIL was used to acquire lift and drag coefficients of the 2-D airfoils and Viterna-Corrigan formula was used to interpolate the aerodynamic characteristics in post-stall region. Also, aerodynamic characteristics, measured in a wind tunnel to calculate the power coefficient was applied. The comparative results such as axial and tangential flow factors, power coefficients were presented in this study. Power coefficient, calculated by in-house code was compared with the GH-Bladed result. The difference of the aerodynamic characteristics caused the difference of the performance characteristics as variation as TSR.

Key words : BEMT(Blade Element Momentum Theory, 날개요소운동량이론), Shape design (형상설계), Wind turbine(풍력터빈), Performance analysis(성능해석), CFD(전산 유체역학)

1. 서 론

현재 서부 텍사스유 기준으로 국제 원유가격은 배럴당 약 100 달러 수준으로 급등하였으며, 국제 사회에서 에너지 문제는 국가안보 및 장기발전 전략과 직결되는 중요한 이슈가 되고 있다. 또한, 그동안 실효성 논란을 야기한 교토의정서가 2004년

러시아의 비준서 제출에 따라 발효조건이 충족되면서 2005년 2월 정식으로 발효되었다. 이에 따라 유럽 및 미주 등 일부 선진국을 중심으로 환경 및 에너지 문제에 대한 대책의 일환으로 풍력에너지 산업에 대한 투자가 활발히 이루어지고 있으며, 현재 발전단가 하락 및 수익성 증대를 위한 관련요소 기술 개발이 활발히 진행 중이다.

† 교신저자(한국전급, 에너지·산업기술센터, E-mail:bskim@krs.co.kr, Tel: 042)869-9384).

* 한국전급 에너지·산업기술센터

** 한국해양대학교 기계·정보공학부

풍력터빈 구성요소 중 로터 블레이드는 바람의 운동에너지를 회전력으로 변환하는 핵심적인 요소이며, 효율적인 설계기법의 확립이 절실히 요구되는 요소기술이다. 그러나 이론적 최적설계에 관한 참고문헌의 부재와 선진 국가에서 핵심 설계기술의 공개를 회피하는 실정으로 최적화된 풍력터빈 로터 블레이드 형상 설계기법의 확보는 상당히 어려운 실정이다.

본 연구에서는 날개요소 운동량이론(BEMT)을 이용하여 100kW 풍력터빈 블레이드에 대한 형상 기본설계를 수행하였으며, 설계된 풍력터빈은 최종적으로 출력계수 값의 평가를 통해 블레이드 기본 형상설계 검토를 행하였다. 출력성능 평가를 위해 기존에 수행된 연구를 통해 개발된 BEMT 기반의 풍력터빈 출력성능 해석 소프트웨어를 사용하였으며, 결과 검토를 위해 풍력터빈 산업에서 인증 및 성능평가 표준 도구로써 사용되고 있는 GH-Bladed의 해석 결과와 비교하였다.

2. 100kW 블레이드 형상 기본설계

풍력발전용 로터 블레이드 설계는 풍력터빈이 설치될 장소에서 다년간의 풍향풍속 데이터 측정을 통한 신뢰성 있는 정격풍속 (rated wind speed, V_r) 및 설계풍속(design wind speed, V_D)의 결정으로부터 시작된다. 정확한 설계풍속의 결정과 신뢰성 있는 형상설계를 위해서는 설치 입지에서 다년간의 기상 데이터를 바탕으로 한 풍황자원 조사가 필수적으로 선행되어야만 하나, 본 연구는 블레이드 기본형상 설계에 관한 연구로서 설치지역 및 대상지역에 대한 장기간 풍황자원 조사는 불가능한 실정이므로, 정격풍속을 10m/s로 임의 설정하였다. 정격풍속은 설계풍속보다 통상 1.3~1.5배 크게 결정되므로 설계풍속은 8m/s로 결정하였다.

다음으로 로터 블레이드 직경 결정을 위해 식 (2.1)을 이용하였으며, 추정 동력계수(C_p)는 0.45, 동력전달 장치(power train)와 발전기(generator)의 효율(η)은 0.9로 가정하였다. 공기밀도는 1.225kg/m^3 으로 하였다.

$$D = \sqrt{\frac{8P_r}{\eta C_p \rho \pi V_D^3}} \quad (2.1)$$

로터 블레이드의 정격 회전수를 결정하기 위하여 식 (2.2)를 적용 하였으며, 설계 TSR(tip speed ratio)은 6으로 설정 하였다.

$$N_{rpm} = 60 \left(\frac{V_D}{\pi D} \right) \lambda \quad (2.2)$$

Table 1에 100kW 풍력터빈 블레이드 기본 형상설계를 위한 계산 값을 나타내었다. 회전하는 로터 블레이드는 날개 끝 와류(tip vortex)의 발생으로 인해 순환(circulation)분포가 감소하게 되고, 이로 인한 날개 끝 손실(tip loss)이 발생한다. 이를 예측하기 위한 해석적인 방법으로 1919년에 Ludwig Prandtl⁽¹⁾이 제안한 식 (2.3)과 같은 날개 끝 손실 예측모델을 적용하였다. 여기서, μ 는 허브로부터 팁까지 블레이드 국부 위치를 무차원화한 변수를 나타내며, 0.05(허브)부터 1.0(팁)까지 0.05 간격으로 균일하게 설정되었다. 따라서, 블레이드는 허브부터 팁까지 모두 20 요소로 구획된다. Fig.1에 블레이드 국부위치 변화에 따른 날개 끝 손실계수 변화 값을 나타내었다. 날개 끝 손실의 발생은 블레이드 국부위치에서의 축 흐름 유도계수 변화를 초래하므로, 이를 반영한 축 흐름 유도계수와 회전 흐름유도계수를 계산하기 위하여 BEMT로부터 유도된 식 (2.4)에서 항력 항을 무시하고 식 (2.3)의 날개 끝 손실 계수를 적용하면 식 (2.5)과 같이 표현된다. 여기서 σ_r 은 블레이드 솔리디티(solidity)를 말하며, C_x, C_y 는 각각 아래와 같다.

Table 1 General design parameters

Rated power(kW)	100
Rated wind velocity(m/s)	10
Design TSR	6
Rotor diameter(m)	22.65
Rotational speed(rpm)	40.46
Air density(kg/m ³)	1.225

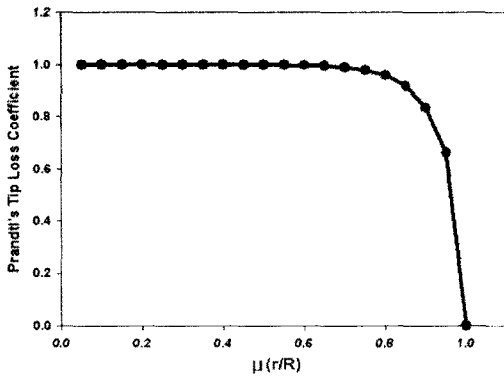


Fig. 1 Prediction of tip loss coefficient

$$f_{(\mu)} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} [e^{-\{((N/2)(1-\mu)/\mu)\sqrt{1+(\lambda\mu)^2+(1-a)^2}\}}] \quad (2.3)$$

식 (2.5)를 이용하여 블레이드 국부위치 변화에 따른 축 흐름 유도계수 및 회전 흐름 유도계수를 다시 계산할 수 있으며, 식(2.5)는 TSR이 3 이상인 설계조건에 한해 유효하다.

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} [C_x - \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} C_y^2]$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \quad (2.4)$$

$$C_L \cos \phi + C_D \sin \phi = C_x, \quad C_L \sin \phi - C_D \cos \phi = C_y$$

$$a = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}f - \frac{1}{3}\sqrt{1-f+f^2}, \quad a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \quad (2.5)$$

계산된 축 흐름유도계수 및 회전 흐름유도계수 값을 Fig. 2에 나타내었다.

다음으로, 블레이드 스패방향 국부위치에서 무차원 현(chord)의 길이의 계산이 필요하다. 이 과정에서는 블레이드 출력발생을 주로 담당하는 영역(허브로부터 70%-100% 영역)에 사용될 에어포일의 선정이 필요하며, 본 연구에서는 NACA 63(2)-415V 프로파일을 적용하였다. NACA 63(2)-415V 에어포일의 최대 공력특성 점에서의 데이터를 table 2에 나타내었다. 식 (2.6)으로부터 계산된 국부 위치에서의 블레이드 현의 길이변

화 값을 Fig. 3에 나타내었으며, 블레이드의 효율적인 제작 및 제작비용 절감 등의 목적으로 풍력터빈 출력의 대부분을 발생시키는 허브로부터 70% 위치에서 100% 위치까지의 현의 길이분포 정보를 바탕으로 재구성 되었다^[2].

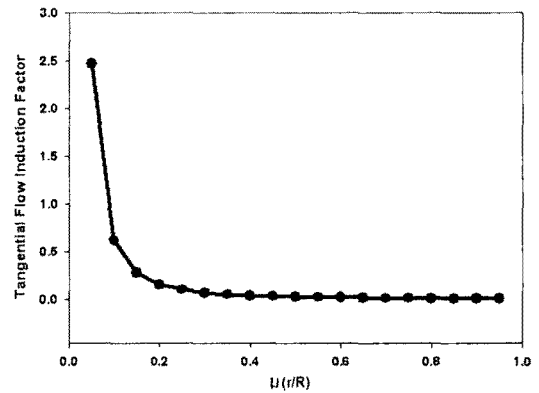
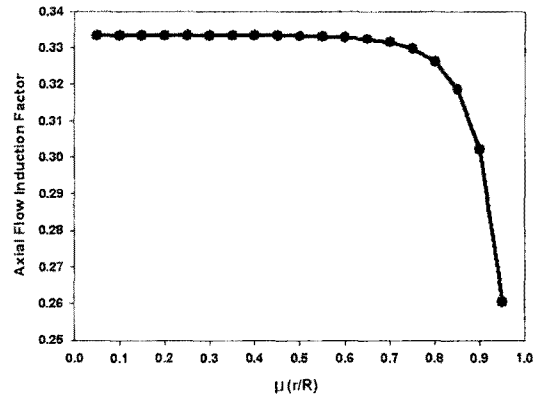


Fig. 2 Flow induction factor

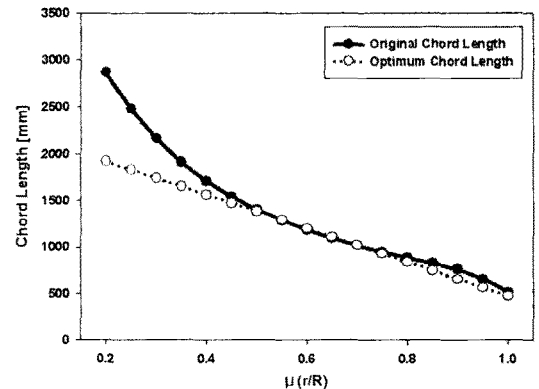


Fig. 3 Chord length distribution

Table 2 NACA 63(2)-415V

Re	α	C_L	C_D	$C_{L/D}$
1.6×10^6	4.39	0.799	0.011	72.618

$$\frac{C}{R} = \frac{2\pi}{N\lambda C_t} \times \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\sqrt{(1-a')^2 + [\lambda\mu(1+a')]^2}} \quad (2.6)$$

$$\tan \phi = \frac{1-a'}{\lambda\mu(1+a')} \quad (2.7)$$

$$\theta = \phi - \alpha \quad (2.8)$$

비틀림 각의 계산을 위해 식 (2.7), 식 (2.8)을 이용하였으며, Fig. 4에 계산된 비틀림 각 분포를 나타내었다.

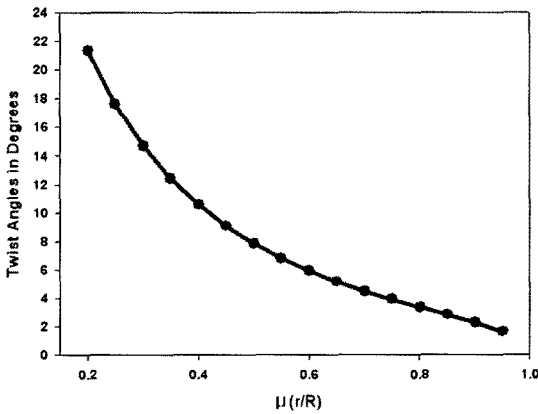


Fig. 4 Twist angle distribution

일반적으로 100kW 이상의 풍력터빈에 대해서는 효율적인 출력특성의 확보를 위해 풍력터빈 출력에 큰 영향을 미치는 구간인 날개 끝부분에서 30% 위치까지 NACA 5, 6자리계열 에어포일을 사용하고, 그 이하의 영역에서는 구조적 안정성, 높은 받음각 변화, 에어포일 표면 거칠기 등의 변화에도 공력특성의 변화가 급격히 발생하지 않는 두꺼운 에어포일 시리즈를 주로 사용한다. 그러나, 본 연구에서는 풍력터빈 블레이드 기본 형상 설계기법의 확보 및 성능검토만을 목적으로 하므로 단일 에어포일을 사용한 블레이드 기본형상 설계를 행하였다.

Fig. 5, Fig. 6에 양력계수, 항력계수에 관한 풍동 실험결과 및 수치해석 데이터의 비교결과를 나타내었다. 제공받은 풍동 실험결과의 경우, 실속 영역 이전의 경우에 해당하는 공력특성 데이터만을 포함하고 있어, 실속 후 영역의 공력특성 데이터 획득을 위해 Viterna-Corrigan 보정식을 적용하였다^[3]. 수치해석 데이터의 경우, 실속영역 이전 공력특성 데이터는 X-FOIL에 의해 예측되었으며, 실속 후 공력특성데이터는 실험데이터와 마찬가지로 Viterna-Corrigan의 보정식을 사용하였다. 실속 이전영역에 대한 공력특성 데이터의 경우 X-FOIL에 의해 예측된 데이터와 실험에 의해 예측된 데이터의 결과가 정량적으로 잘 일치 하고 있음을 알 수 있으며, 실속이 발생한 후 부터 X-FOIL에 의해 예측된 데이터가 실험 데이터보다 다소 높

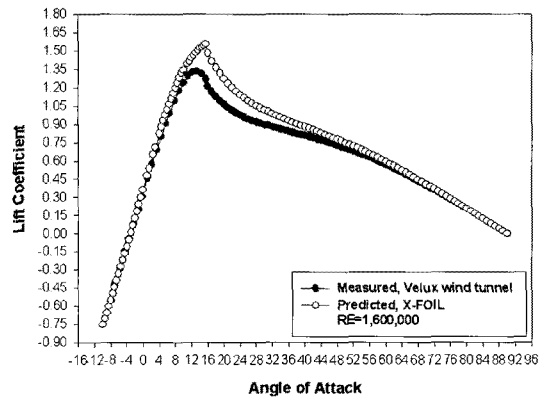


Fig. 5 Lift coefficient, NACA 63(2)-415V

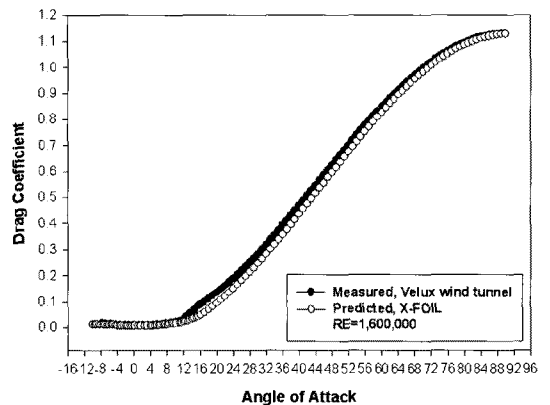


Fig. 6 Drag coefficient, NACA 63(2)-415V

은 양력계수 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 항력계수 또한, 실속이전의 영역에 대해 실험결과와 수치 해석 결과가 정량적으로 잘 일치 하고 있음을 알 수 있으며, 실속이 발생한 후부터 미소한 값의 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Summarization of design parameters

Local position	Twist angle(deg)	Position(mm)	Chord length(mm)	Airfoil series
0.20	21.31	2286	197.95	NACA632-415V
0.25	17.63	2632.5	192.12	NACA632-415V
0.30	14.72	3399	1736.29	NACA632-415V
0.35	12.47	3965.5	1648.45	NACA632-415V
0.40	10.58	4537	1588.62	NACA632-415V
0.45	9.08	5098.5	1468.79	NACA632-415V
0.50	7.84	5665	1378.96	NACA632-415V
0.55	6.80	6231.5	1269.12	NACA632-415V
0.60	5.92	6798	1199.29	NACA632-415V
0.65	5.16	7364	1109.46	NACA632-415V
0.70	4.48	7931	1019.63	NACA632-415V
0.75	3.90	8497.5	929.79	NACA632-415V
0.80	3.36	9064	839.96	NACA632-415V
0.85	2.83	9630.5	750.12	NACA632-415V
0.90	2.29	10197	660.29	NACA632-415V
0.95	1.64	10763.5	570.46	NACA632-415V
1.00	1.04	11330	480.63	NACA632-415V

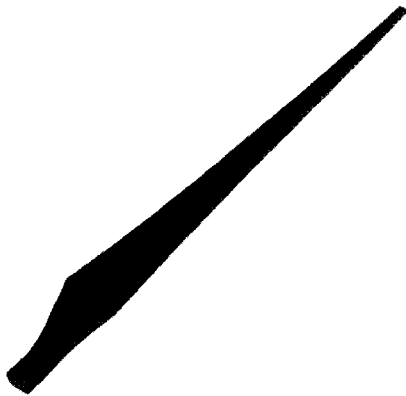


Fig. 7 Isometric view of 3D blade model

최종 계산된 블레이드 기본형상 설계변수들을 Table 3에 나타내었으며, 블레이드 3차원 형상 모델링 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

3. BEMT에 의한 블레이드 성능해석

Fig. 8에 본 연구에서 수행된 BEMT를 이용한 성능해석 순서도를 나타내었으며, 이와 같은 과정을 통해 풍력터빈 성능평가를 위한 출력계수, 흐름 유도계수, 받음각 분포 등의 계산 결과 값들을 얻을 수 있다.

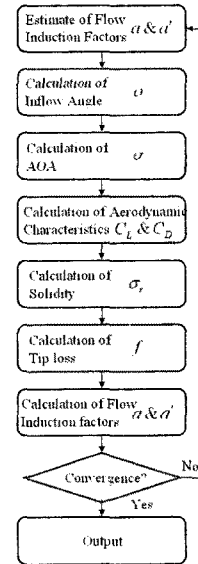
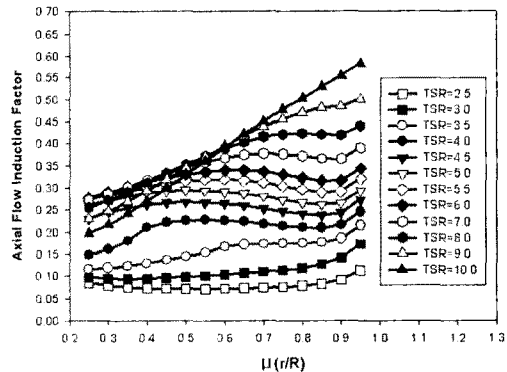
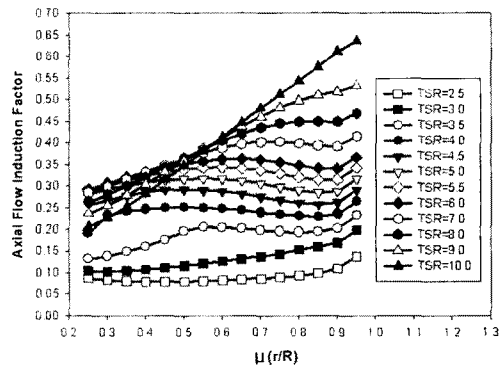


Fig. 8 Performance calculation procedure



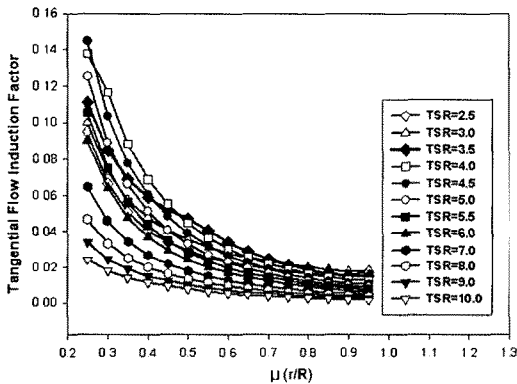
(a) Use of measured aerodynamic characteristics



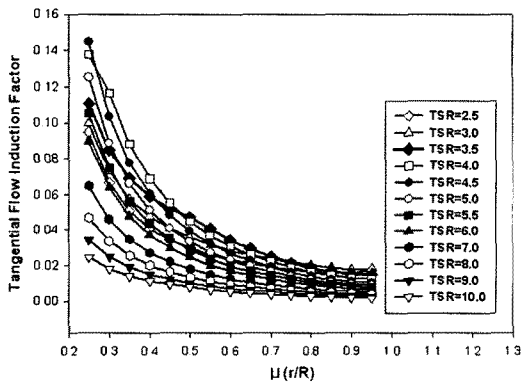
(b) Use of calculated aerodynamic characteristics

Fig. 9 Distributions of axial flow induction factors

Fig. 9(a), Fig. 9(b)는 실험과 수치해석에 의해 예측된 블레이드 반경방향 위치변화에 따른 축 흐름유도계수의 변화를 나타내고 있다. 실험결과에 의해 예측된 축 흐름 유도계수의 경우 최적 성능을 나타내는 설계TSR 영역 부근의 TSR=6에서 이상적인 축흐름유도계수의 조건 ($a=1/3$)에 거의 근접하는 영역에 형성되고 있으며, 수치해석에 의해 예측된 공력특성을 사용한 경우도 마찬가지로 이상적인 조건 범위에 근접하여 그래프가 형성되고 있음을 알 수 있다. 대체로 두 결과는 서로 유사한 특징을 보이나 TSR 변화에 따른 미소한 값의 차이가 존재한다. 이는 에어포일 공력특성 데이터의 차이에 의해 발생하며, 결과적으로 풍력터빈의 성능변화에 영향을 미치게 된다.



(a) Use of measured aerodynamic characteristics



(b) Use of calculated aerodynamic characteristics

Fig. 10 Distributions of tangential flow induction factors

Fig. 10(a), Fig. 10(b)에 실험과 수치해석에 의해 예측된 블레이드 반경방향 위치변화에 따른 회전 흐름유도계수의 변화를 나타내었다. 실험과 수치해석 데이터를 각각 적용한 해석 결과는 대체로 서로 잘 일치하고 있으나, Fig. 5, 6에서 나타난 공력특성 데이터의 차이로 인해 미소한 값의 차이가 나타나고 있다. Fig. 11에 100kW 풍력터빈 블레이드의 출력계수 결과를 나타내었다. 출력계수 결과 값은 자체 개발한 BEMT 성능해석 코드⁽⁴⁾를 이용하여 계산하였고, 결과 비교를 위해 풍력터빈 산업에서 설계평가 표준도구로 자리잡고 있는 Garrad-Hassan 사의 GH-Bladed 해석 값과 비교되었다. 실선은 GH-Bladed에 의해 예측된 성능계수 값이고, 파선은 in-house 코드에 의해 예측된 성능계수 값을 나타낸다. 그래프에서 원형 기호는 BEMT 해석을 위해 사용된 2D 에어포일의 공력특성 데이터가 X-Foil을 통해 얻어진 결과를 나타내며, 정사면체 기호는 실험을 통해 확보된 공력특성 데이터를 적용하여 해석된 결과를 나타낸다. 모든 공력특성 데이터는 실속 후 공력특성 예측을 위해 Viterna-Corrigan 제안 식을 적용하였다. GH-Bladed와 in-house 코드의 결과를 각각 비교해보면 대부분의 범위에서 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으나, 일부 구간에서 예측 값의 오차가 존재하고 있다. 일반적으로 풍력터빈 블레이드 구조적 지지부인 0~0.25위치는 출력성능 변화에 큰 영향을 미치지 않는다는 판단 하에 in-house 코드는 허브로부터 무차원 거리 0.25~1.00에 이르는 구간만을 해석에 포함하도록 개발된 반면, GH-Bladed는 0~1.00 구간을 모두 포함하는 성능해석이 수행되도록 개발되어있다. 이러한 차이와 보다 최적화된 GH-Bladed의 성능해석 알고리즘 등의 영향으로 인해 두 결과는 근소한 차이를 보인다고 판단된다. GH-Bladed, in-house 코드 모두, X-Foil에 의해 예측된 공력특성 데이터를 사용한 경우가, 풍동 실험에 의한 공력 특성 데이터를 사용한 경우보다 다소 높은 출력을 나타내고 있다. 이는 Fig. 5, Fig. 6에 제시된 결과와 같이 수치해석에 의해 예측된 에어포일의 양력계수 값이 실험값에 비해 다소 높게 예측되

었고, 항력계수 값은 낮게 예측되었기 때문에 발생하는 문제이다. BEMT 해석에 의한 성능평가 절차에 있어 가장 중요한 과정은 블레이드 스팬방향 국부위치에서의 정확한 에어포일 공력특성의 입력이므로, 정확한 시스템의 출력 특성을 예측하기 위해서는 정확한 에어포일 공력특성 데이터의 확보가 필수적이다.

4. 결 론

1) 100kW 풍력발전용 블레이드 형상 기본설계를 완료하였으며, 초기설계 과정에서 가정된 $TSR=6$ 의 조건에서 전체 블레이드 영역에 걸쳐 흐름유도계수 값들은 이상적인 범위에 걸쳐 형성되고 있으므로, 목표로 하는 출력성능 확보를 위한 형상 기본설계는 성공적으로 완료되었다.

2) 자체 개발된 BEMT 코드와 GH-Bladed 코드를 이용한 공력성능해석이 성공적으로 수행되었으며, $TSR=6$ 의 조건에서 최대 출력계수 값은 0.475이다.

3) BEMT 해석에서 출력성능에 결정적인 영향을 미치는 인자는 에어포일 공력특성 데이터이며, 정확한 성능예측을 위해서는 정확한 공력특성 데이터의 사용이 필수적이다.

후 기

이 연구는 Sea Grant 시범대학 연구개발사업의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Betz A., "Schrauben propeller mit geringen term energie verlust," Gottinger Nachr. 1919.
- [2] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, "Wind energy handbook," John Willy & Sons, pp. 73-74, 2001.
- [3] T. Tanger, David Kokurek, "Wind

turbine post stall airfoil performance characteristics guidelines for blade element momentum methods," NREL/CP-500-36900, 2003.

- [4] 김범석, "수평축 풍력발전용 터빈 블레이드 최적설계 및 공력성능해석에 관한 연구," 공학박사 학위논문, 한국해양대학교, 2005.

저 자 소 개



김범석(金範錫)

1975년 11월 21일생, 2001년 한국해양대학교 기계공학과 졸업(공학사), 2003년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 (사)한국선급 에너지·산업기술센터 근무



김만응(金晩應)

1980 한국해양대 기관공학과 졸업, 2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 현재 (사)한국선급 에너지·산업기술센터 팀장



이영호(李英浩)

1980 한국해양대 기관공학과 졸업, 1986~1989 동경대 기계공학과(공학박사), 1980~현재 한국해양대 교수, 2001~2003 (재)한국조선기자재연구원 초대원장. 연구분야 : 신재생에너지(풍력, 소수력, 파력, 조류발전 등), 유체기계 CFD설계(펌프, 환, 터빈 등), 홈페이지 : <http://www.pivlab.net>