

날개요소 운동량 이론을 이용한 피치제어형 수평축 풍력터빈 블레이드 설계 및 성능평가 소프트웨어 개발

모장오* · 김범석** · 김만응** · 최영도*** · 이영호****†

Software Development for the Performance Evaluation and Blade Design of a Pitch-Controlled HAWT based on BEMT

Jang-Oh Mo*, Bum-Suk Kim**, Mann-Eung Kim**, Young-Do Choi***, Young-Ho Lee****†

Key words : BEMT(날개요소 운동량 이론), Stall Control(스톨제어), Pitch Control(피치제어), HAWT(수평축 풍력터빈), CFD(전산유체역학), Performance Evaluation(성능평가), TSR(팁끝단속도비)

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a software for the performance evaluation and blade design of a pitch-controlled HAWT using BEMT(Blade Element Momentum Theory) with Prandtl's tip loss. The HERACLES V2.0 software consist of three major part ; basic blade design, aerodynamic coefficient mapping and performance calculation including stall or pitch control option. A 1MW wind turbine blade was designed at the rated wind speed(12m/s) composing five different airfoils such as FFA-W-301, DU91-W250, DU93-W-210, NACA 63418 and NACA 63415 from hub to tip. The mechanical power predicted by BEMT at the rated wind speed is about 1.27MW. Also, CFD analysis was performed to confirm the validity of the BEMT results. The comparison results show good agreement about the error of 6.5% in rated mechanical power.

1. 서 론

최근에 국제적으로 거론되고 있는 각종 환경관련 국제협약과 기후변화협약에 기초한 교토의정서의 채택으로 인해 환경문제의 심각성에 대한 관심이 상당히 높아지고 있다. 우리 정부도 이러한 상황에 대응하기 위해 신재생에너지에 대한 관심이 급격히 증가하고 있는 실정이며 그 중에서도 풍력 에너지의 높은 가능성에 주목하고 있다. 현재 국내 요소설계 기술수준은 풍력발전용 터빈의 핵심요소기술 중의 하나인 로터 블레이드 설계 기술에 대한 명확한 설계기준이 없는 상황이며, 블레이드 설계 및 성능평가를 위해 BEMT 이론 및 다양한 손실 보정 모델을 적용한 Garrad Hassan 사의 GH-Bladed 등과 같은 국외 상용 소프트웨어에 의존하고 있다. 이러한 국내 실정을 감안할 때, 국내에서도 블레이드 설계 및 성능평가

에 관한 명확한 기준 등이 수립될 필요가 있으며, 다양한 설계 이론과 성능예측 기법들에 대한 연구를 통해 독자적인 설계 및 성능평가 소프트웨어의 개발이 필요한 시점이다.⁽¹⁾⁽²⁾

본 연구에서는 피치제어 블레이드 설계 및 성능평가가 가능하도록 블레이드 손실 모델을 적용한 BEMT 이론을 활용하여 로터 블레이드 최적 설계를 수행함으로써 관련 설계기법을 확립하였고, 최종적으로 성능평가를 위한 국산 소프트웨어의 개발을 수행하였다. 개발된 성능평가 소프트웨어인 HERACLES V2.0을 통해 1MW급 블레이드 설계 및 성능평가를 수행하였으며, CFD FLUENT 상용코드를 이용하여 BEMT 성능평가 결과의 타당성을 검증하였다.

2. 소프트웨어 개발

2.1 HERACLES V2.0 소개 및 구성

HERACLES V2.0은 피치제어 블레이드 설계가 가능하도록 개발된 국산용 수평축 풍력터빈 블레이드 설계 및 성능평가 소프트웨어이다. HERACLES V1.0은 스톱제어방식으로

* 한국해양대학교 해양에너지 전문인력양성사업단
** (사)한국선급 에너지·산업기술센터
*** 목포대학교 기계공학과
**** 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부
† 교신저자, E-mail : lyh@hhu.ac.kr

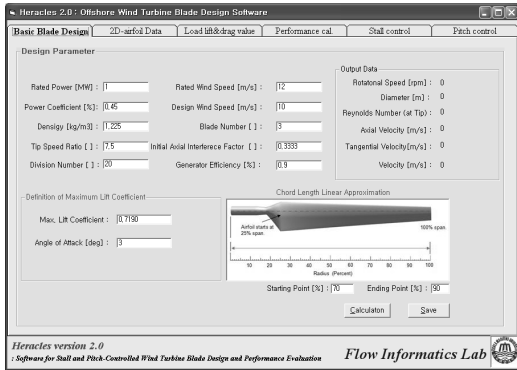


Fig. 1 Blade Design GUI

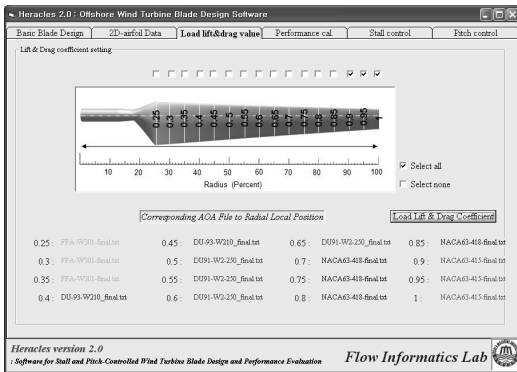


Fig. 2 Aerodynamic coefficient mapping GUI

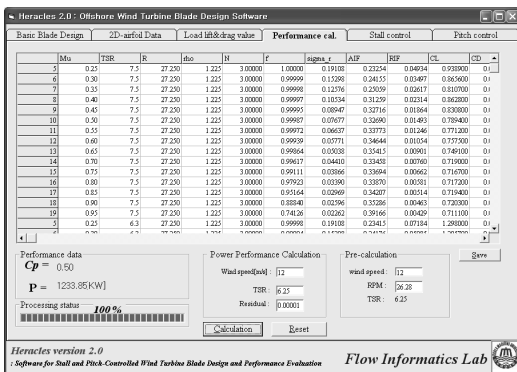


Fig. 3 Performance Calculation GUI

만 기능이 제한된 반면에 HERACLES V2.0에서는 정격풍속 이하와 이상에서 가변회전수와 블레이드 피치각을 고려하여 성능을 예측할 수 있도록 기능면에서 업그레이드 된 버전이다. HERACLES V2.0의 구성은 다음과 같다.

- 1) Basic blade design
- 2) Aerodynamic coefficient mapping
- 3) Performance evaluation
- 4) Stall control ; TSR range setup
- 5) Pitch control ; Generator & Blade pitch control

Fig. 1, 2, 3은 HERACLES V2.0의 기능 별 메인화면을 나타내고 있다. 정격출력, 출력계수, 정격풍속, 설계풍속 그리고 발전기 효율 등의 기본적인 블레이드 설계 파라미터가 결정이 되면 블레이드 반경방향 위치별 형상구현을 위한 설계인자가 생성된다. 그 다음 블레이드 반경방향 위치별 에어 포일 공력성능계수를 대응시키게 된다. 이때 공력성능계수는 MIT 대학에서 개발된 X-FOIL 또는 CFD 결과를 이용 가능하도록 개발되었다. 반복계산 과정시 위치 별 받음각에 대한 공력성능계수가 대응되도록 코드내부에 보간처리 기법을 추가하였다.

풍력발전기의 출력제어기술은 정격풍속보다 큰 풍속에서 정격출력을 유지하는 기술로서, 일반적으로 실속제어와 피치제어로 구분된다. Stall control 메뉴는 TSR 범위, TSR 간격, 회전속도 등을 설정하게 되면 계산된 결과를 이용해 자동적으로 그래프를 생성할 수 있도록 편리하게 구성되어 있다. Pitch control 메뉴에서는 정격풍속 이전 구간에서는 출력 및 최대 효율 지속구간 확장을 위한 발전기 토크제어 기능과 정격풍속 이상의 구간에서 목표출력 제어를 위한 블레이드 피치제어 기능으로 구성되어 있다.

2.2 날개요소 운동량 이론

날개요소 운동량 이론의 기본적인 가정은 블레이드 요소에 작용하는 국부적인 힘은 블레이드를 통과하는 공기의 운동량 변화에 의해 좌우된다는 것이다. 즉 축방향과 회전방향의 운동량 변화에 의해 블레이드에 작용하는 힘들이 결정되며, 이 힘들을 적분함으로써 공력성능 결과를 얻어내는 방법이다.

블레이드 단위 요소에 미치는 공기역학적 힘과 받음각 그리고 피치각에 대한 정의를 Fig. 4에 도식화하여 나타내었다. 로터 블레이드 반경방향 임의의 위치에서 날개요소는 로터 회전면을 기준으로 국부 받음각 β 를 가지게 된다. 회전면에서 축방향 속도 $U_{\infty}(1-a)$ 와 블레이드 반경방향 임의의 위치에서 접선방향 속도 $\Omega r(1+a)$ 의 합성성분은 국부 상대속도 W 가 된다. 익형 코드선을 기준으로 국부 상대속도는 받음각 α 를 가지게 된다. 익형에서 발생하는 단위양력과 단위항력은 식(1)과 (2)로 정의된다.

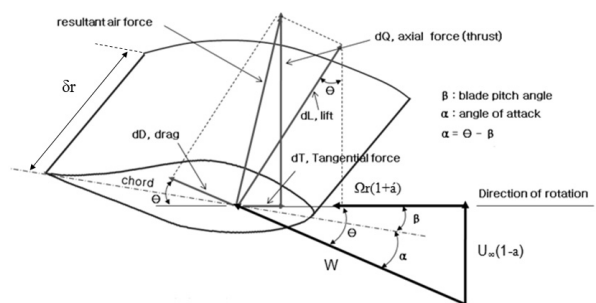


Fig. 4 Blade element velocities and forces

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 C C_L \delta r \quad (1)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 C C_D \delta r \quad (2)$$

(단, ρ , W , C , C_D , C_L 는 밀도, 상대속도, 코드길이, 항력 계수, 양력계수를 나타낸다)

식(3)과 (4)는 축방향과 회전방향 단위힘을 나타낸다.

$$\delta L \cos\theta + \delta D \sin\theta = \frac{1}{2} \rho W^2 N C (C_L \cos\theta + C_D \sin\theta) \delta r \quad (3)$$

$$\delta L \sin\theta + \delta D \cos\theta = \frac{1}{2} \rho W^2 N C (C_L \sin\theta + C_D \cos\theta) \delta r \quad (4)$$

축간섭계수 a , 회전간섭계수 \dot{a} 및 끝단손실계수 f 를 고려하여 정리하면 다음과 같이 식(5)와 (6)으로 정리된다. 따라서 초기값 a 와 \dot{a} 는 식(5), (6)에서 계산된 값과 허용오차 범위내로 수렴할 때 까지 반복계산을 수행하게 된다. 본 연구에서도 허용오차 0.001% 범위 내에서 모든 해석조건이 만족되도록 계산을 수행하였다.

$$\frac{af}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4\sin^2\theta} \left(C_x - \frac{\sigma_r}{4\sin^2\theta} C_y^2 \frac{1-a}{1-af} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\dot{a}f}{1+a} = \frac{\sigma_r C_y}{4\sin\theta \cos\theta} \frac{1-a}{1-af} \quad (6)$$

$$C_x = C_L \cos\theta + C_D \sin\theta$$

$$C_y = C_L \sin\theta + C_D \cos\theta$$

$$\sigma_r = \frac{NC}{2\pi\mu R}$$

(여기서, N , μ , R 은 블레이드 수, 무차원 반경길이, 블레이드 반지름을 나타낸다)

3. 1MW 급 로터 블레이드 설계

본 연구에서 개발된 HERACLES V2.0 소프트웨어를 이용하여 1MW 급 로터 블레이드 설계 및 성능평가를 수행하였다. Table. 1은 1MW 급 로터 블레이드 제원을 나타내고 있다. 1MW 블레이드 설계에 적용된 익형은 FFA-W3-301, DU91-W2-250, DU93-W2-210, NACA63(2)-418, NACA63(2)-415으로 블레이드 루트에서 끝단까지 순차적으로 배치된다.⁽²⁾ 설계풍속에서 블레이드 루트에서 팁까지 레이놀즈 수의 범위는 $4.13 \times 10^6 \sim 5.46 \times 10^6$ 정도이다. Fig. 5는 5종류 익형별 양

Table 1 Specification of 1MW rotor blade

Mu	R[mm]	THETA	Chord[mm]	Airfoil type	Re
0.25	6810	14.99	2544.51	FFA-W3-301	3.70×10^6
0.3	8180	12.35	2444.5	FFA-W3-301	4.13×10^6
0.35	9540	10.32	2344.49	FFA-W3-301	4.53×10^6
0.4	10900	8.74	2244.48	DU91-W2-250	4.89×10^6
0.45	12260	7.47	2144.48	DU91-W2-250	5.20×10^6
0.5	13630	6.43	2044.47	DU93-W2-210	5.47×10^6
0.55	14990	5.56	1944.46	DU93-W2-210	5.70×10^6
0.6	16350	4.84	1844.45	DU93-W2-210	5.87×10^6
0.65	17710	4.21	1744.44	DU93-W2-210	6.00×10^6
0.7	19080	3.67	1644.44	NACA63(2)-418	6.07×10^6
0.75	20440	3.2	1544.43	NACA63(2)-418	6.1×10^6
0.8	21800	2.77	1444.42	NACA63(2)-418	6.07×10^6
0.85	23160	2.36	1344.41	NACA63(2)-418	6.00×10^6
0.9	24530	1.94	1244.4	NACA63(2)-415	5.87×10^6
0.95	25890	1.43	1144.39	NACA63(2)-415	5.69×10^6
1	27250	0.54	1044.39	NACA63(2)-415	5.46×10^6

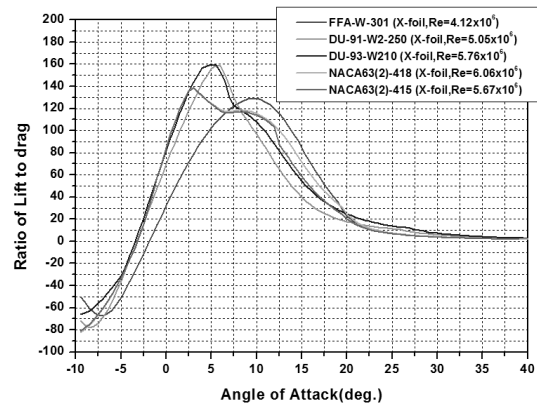


Fig. 5 Comparison of ratio of lift to drag for five different airfoils

항력비를 비교하여 나타낸 그래프이다. 익형별 공력계수는 패널법인 X-FOIL을 활용하여 데이터를 추출하였으며, 실속각 이상에서는 Viterna의 실속후 공력특성 예측모델을 적용하였다.⁽³⁾ DU91-W2-250, DU93-W2-210 익형은 각각 받음각 5.5°, 4.5°에서 최대양항비 159 정도 값을 보였으며, 이외 익형들은 최대양항비가 120~140 정도의 값을 보이고 있다.

4. BEMT에 의한 성능평가

Fig. 6은 풍속에 따른 기계적 출력을 BEM 코드와 CFD 결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 기계적 출력은 동력 구동계 및 발전기를 거쳐 전기적 출력으로 변환되는데, 이때 시스템 손실을 고려하면 기계적 출력은 전기적 출력보다 항상 높은 값을 갖는다. 본 연구에서는 정격풍속 12m/s에서 전기적 출력을 기준으로 1MW 급을 발생시킬 수 있는 블레이드를 설계하였다. BEMT에 의한 결과 정격풍속에서 기계적 출력은 1.27MW로써 1MW 전기적 목표출력을 만족하였다. 또한 BEMT 결과의 타당성을 검토하기 위해 전 세계적으로 가장 널리 이용되고 있는 FLUENT 상용코드를 이용하여 수치해

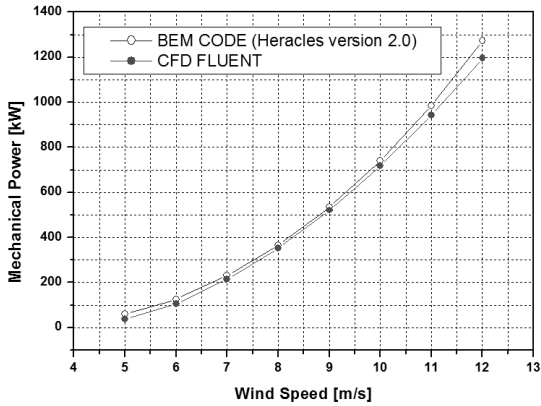


Fig. 6 Comparison of mechanical powers

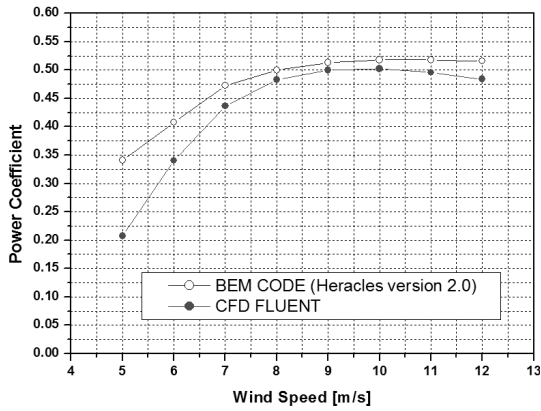


Fig. 7 comparison of power coefficients

석을 수행하였다. CFD 해석조건은 본 설계시 언급된 설계조건과 동일하게 적용하였으며, 해석도메인은 블레이드 반경 길이를 기준으로 조류터빈 블레이드로부터 입구까지는 2.5 배, 후류방향으로 3.5배, 반경방향으로 3배의 공간해상도를 확보하였다. 또한 강한 역압력 구배에 의한 박리유동의 예측성 향상을 위해 난류전단응력의 전달효과를 고려하여 난류 생성항이 소산항보다 과다한 값을 가지지 않도록 개선된 Menter의 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 모델을 적용하였다[6]. 비교결과 정격풍속에서 기계적 출력 기준으로 약 6.5%의 오차범위 내에서 비교적 정확하게 일치하였다. 정격 풍속이하 전영역에 구간에서 두 결과 모두 정성적인 경향은 일치하였으나, 정량적으로는 BEMT 결과가 CFD 결과보다 다소 높은 결과값을 보였다.

Fig. 7은 풍속에 따른 기계적 출력을 출력계수로 환산하여 나타낸 그래프이다. 출력계수의 정의는 식(7)과 같다.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho(\pi R^2) \cdot V_a} \quad (7)$$

여기서 P, ρ, R, V_a 은 각각 기계적 출력, 밀도, 블레이드

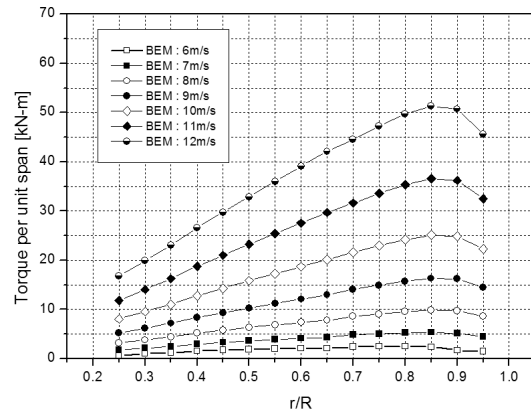


Fig. 8 Comparison of torques by BEM per in unit span according to variation of wind speed

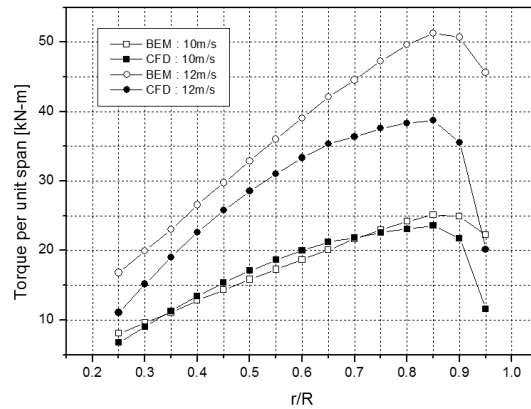


Fig. 9 Comparison of torques between BEM and CFD

반경길이, 유입속도를 나타낸다. BEM 결과인 경우 풍속이 증가할수록 출력계수는 서서히 증가하다가 설계풍속 10m/s 풍속에서 최대값을 통과한 후, 정격풍속 12m/s에서 약간 떨어지는 경향을 보인다. CFD에 의한 해석의 경우 설계풍속에서 최대출력계수 0.502, 정격풍속에서 0.484의 출력계수 값을 보이면서 전체적으로 매끄러운 곡선형태를 보이고 있다. 일반적으로 설계풍속에서 최대 출력계수를 나타내며, 이 점을 기점으로 좌우 포물선 형태의 그래프를 띄게 된다. BEMT 그래프가 CFD 결과에 비해 다소 특이한 곡선을 나타내는 이유는 실속각근처 뿐만 아니라 모든 영역에서 좀 더 정확한 공력계수 값을 필요로 한다는 것을 의미한다. 따라서 2차원 익형의 정확한 공력성능 예측을 위하여 현재 적용된 X-FOIL 결과에 CFD 결과를 응용한 신뢰성 있는 해석기법의 정립이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 풍속변화에 따른 단위스팬당 토크변화를 나타낸 그래프이다. 풍속이 증가할수록 단위스팬당 토크는 증가하는 경향을 보인다. 또한 무차원 반경길이가 증가할수록 단위스팬당 토크는 선형적으로 증가하다가 무차원 반경길이 0.85 지점에서 블레이드 끝단 볼텍스의 영향으로 토크는 감소하기 시작한다.⁽⁴⁾

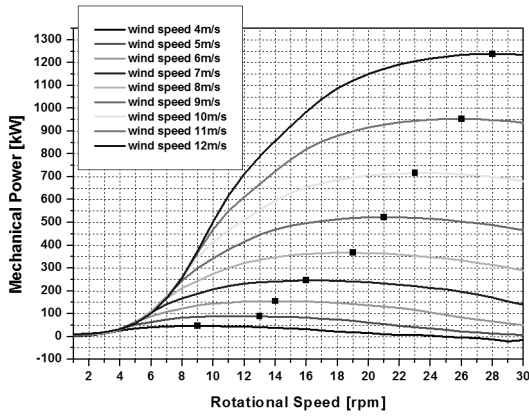


Fig. 10 Rotational speed schedule map

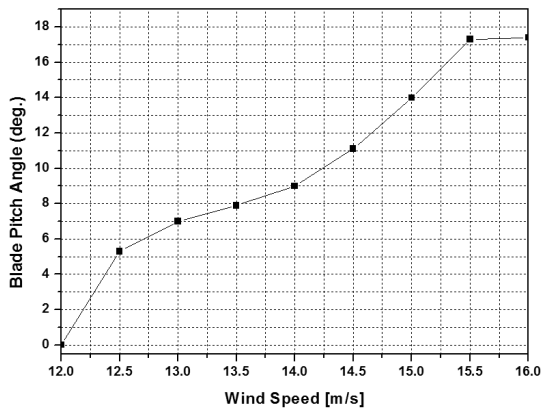


Fig. 11 Pitch schedule map

Fig. 9는 설계풍속 및 정격풍속에서 BEMT와 CFD의 단위 스펠당 토크결과를 비교한 그래프이다. 설계풍속에서 단위 토크를 비교한 결과 모든 위치에서 정성적으로 비슷한 결과를 보이고 있으나 무차원 반경길이 0.85 지점에서 다소 차이가 발생하고 있다. 본 연구에서는 블레이드 끝단 손실모델을 고려하여 BEMT 해석을 수행하였다. 하지만 CFD 해석결과와 비교해 보면 끝단 손실모델을 고려한 BEMT 결과보다 더욱 큰 끝단 손실이 발생하고 있음을 확인 할 수 있다. 따라서 CFD결과를 이용한 블레이드 끝단 손실모델의 수정을 통해서 좀 더 향상된 BEMT 성능예측이 가능 할 것으로 판단된다. 또한 정격풍속에서는 BEMT에 의한 결과가 CFD결과에 비교 전체적으로 높게 나타나고 있다.

Fig. 10은 풍속별 회전수 변화에 따른 기계적 출력을 나타내고 있다. 풍력발전 시스템은 보다 넓은 범위의 저 풍속영역에서 최대 효율을 지속적으로 유지하기 위해 발전기 토크 제어를 실시한다. 최저풍속 4m/s에서 정격풍속까지 회전수를 1rpm에서 30rpm까지 1rpm씩 증가하여 풍속별 기계적 출력 곡선을 나타내었으며, 풍속별 최대출력을 나타내는 특정회전수를 검은색으로 표시하였다. 정격풍속이하에서는 이 점들을 연결함으로써 각 풍속에 대해 최대 출력을 유지하는

가변 회전수가 결정된다.

정격풍속 이상의 구간에서 일정한 목표 출력을 얻기 위한 목적으로 피치제어를 실시한다. Fig. 11은 목표 출력을 얻기 위한 풍속별 블레이드 피치각을 나타내고 있다. 본 연구에서는 블레이드 피치제어를 위해 정격풍속에서 16m/s까지 0.5m/s 씩 8구간으로 나누고, 각 풍속에서 블레이드 피치를 0.5도 간격씩 변화시키며 출력성능 해석을 수행하였다. 그 후 기계적 출력이 1.27MW가 되는 지점의 피치각도를 구하여 피치 스케줄 맵을 작성하였다.

5. 결론

본 연구에서는 BEMT를 적용하여 실속제어 또는 피치제어 블레이드 설계 및 성능평가가 가능한 국산 소프트웨어인 HERACLES V2.0을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) BEMT 이론을 활용하여 1MW 급 로터 블레이드 설계를 수행함으로써 관련 설계기법을 확립하였고, 최종적으로 성능평가를 위한 HERACLES V2.0 국산 소프트웨어 개발을 수행하였다.
- (2) 익형 별 공력계수는 패널법인 X-FOIL을 활용하여 성능 데이터를 추출하였으며, 실속각이상에서는 Viterna의 실속후 공력특성 예측모델을 적용하였다.
- (3) BEMT에 의한 결과 정격풍속에서 기계적 출력은 1.27MW로써 1MW 목표출력을 만족하였다. 또한 BEMT 결과의 타당성을 검토하기 위해 FLUENT 상용코드를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 비교결과 정격풍속에서 약 6.5%의 오차범위 내에서 비교적 정확하게 일치하였다.
- (4) 정격풍속 이하의 저 풍속영역 구간에서 최대 효율을 지속적으로 유지하기 위한 회전수 스케줄 맵을 작성하였다. 풍속별 최대출력을 나타내는 특정회전수를 연결함으로써 각 풍속에 대해 최대 출력을 유지하는 가변 회전수 결정을 완료하였다.
- (5) 정격풍속 이상의 구간에서 기계적 출력이 1.27MW가 되는 지점의 피치각도를 구하여 일정한 목표 출력을 얻기 위한 피치 스케줄 맵을 작성을 완료하였다.

참고문헌

- (1) 모장오, 2009, “수평축 풍력발전용 터빈의 공력성능 및 소음예측에 관한 수치적 연구,” 한국해양대학교 공학박사학위논문.
- (2) 김범석, 2005, “수평축 풍력발전용 터빈 블레이드 최적설계 및 공력성능해석에 관한 연구,” 한국해양대학교 공학박사학위논문.

- (3) Viterna, L. A., and Corrigan, R. D., July 1981, "Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal-Axis Wind Turbines," DOE/NASA Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio.
- (4) 모장오, 이영호, 2009, "NREL Phase VI 수평축 풍력터빈의 공력특성에 관한 수치적 연구," 한국마린 엔지니어링 학회지 제33권 제6호, pp. 886~895.