

1 MW 풍력터빈 블레이드 형상기본설계 및 성능해석

김범석* · 김만응* · 이영호**†

Basic Configuration Design and Performance Prediction of an 1 MW Wind Turbine Blade

Bum-suk Kim*, Mann-eung Kim*, Young-ho Lee**†

Key Words : BEMT(Blade Element Momentum Theory, 날개요소운동량이론), shape design(형상설계), wind turbine (풍력터빈), performance analysis(성능해석)

ABSTRACT

In modern wind power system of large capacity above 1MW, horizontal axis wind turbine(HAWT) is a common type. And, the optimum design of wind turbine to guarantee excellent power performance and its reliability in structure and longevity is a key technology in wind industry. In this study, mathematical expressions based upon the conventional BEMT(blade element momentum theory) applying to basic 1MW 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 analyzed systematically. X-FOIL was used to acquire lift and drag coefficients of the 2-D airfoils and we use Viterna-Corrigan formula to interpolate the aerodynamic characteristics in post-stall region. In order to predict the performance characteristics of the blade, a performance analysis carried out by BEMT method. As a results, axial and tangential flow factors, angle of attack, power coefficient investigated in this study.

1. 서론

현재 서부 텍사스유 기준으로 국제 원유가격은 배럴당 약 100 달러 수준으로 급등하였으며, 국제사회에서 에너지 문제는 국가안보 및 장기발전 전략과 직결

되는 중요한 이슈가 되고 있다. 또한, 그동안 실효성 논란을 야기한 교토의정서가 2004년 러시아의 비준서 제출에 따라 발효요건이 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 관련요소기술 개발이 활발히 진행 중이다.

풍력터빈 구성요소 중 로터 블레이드는 바람의 운

* 한국전급 에너지·산업기술센터

** 한국해양대학교 기계·정보공학부

† 교신저자, E-mail : lyh@hhu.ac.kr

동에너지를 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 설계기법의 확보는 상당히 어려운 실정이다.

본 연구는 운동량방정식(momentum theory)과 날개 요소이론(blade element theory)을 결합하여 유도된 날개요소 운동량이론(BEMT)을 이용하여 1 MW 풍력터빈 블레이드 형상 기본설계를 수행하고, 흐름 유도계수(flow induction factor) 및 스패(span) 방향 국부위치 변화에 따른 받음각(angle of attack, AOA) 변화 등의 검토를 통한 공력성능 평가를 목적으로 한다.

2. 1 MW 블레이드 형상 기본설계

풍력발전용 로터 블레이드 설계는 풍력터빈이 설치될 장소에서 다년간의 풍향·풍속 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 연구로써 설치지역 및 대상지역에 대한 장기간 풍황자원 조사는 불가능한 실정으므로, 정격풍속을 12 m/s로 임의 설정하였다. 정격풍속은 설계풍속보다 통상 1.3~1.5 배 크게 결정되므로 설계풍속을 10 m/s로 결정하였다.

다음으로 로터블레이드 직경 결정을 위해 식 (2.1)을 이용하였으며, 추정 출력계수(C_p)는 0.45, 동력전달장치(power train)와 발전기(generator)의 효율(η)은 0.9로 가정하였다. 정격출력(P_r)은 1 MW, 공기밀도는 1.225 kg/m³으로 하였다.

$$D = \frac{\sqrt{8P_r}}{\sqrt{\eta C_p \rho \pi V_D^3}} = 54.5m \quad (2.1)$$

로터 블레이드의 정격회전수(N_{rpm})를 결정하기 위하여 식 (2.2)를 적용 하였으며, 설계 TSR(λ)은 7.5로 설정 하였다.

$$N_{rpm} = 60 \left(\frac{V_D}{\pi D} \right) \lambda = 26rpm \quad (2.2)$$

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^[2]이 제안한 식 (2.3)과 같은 날개 끝 손실 예측 모델을 적용하였으며, 블레이드 국부위치의 함수인 f 로 표현된다.

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

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. 식 (2.3)에서 사용되는 축 흐름 유도계수 a 는 초기설계 단계부터 반복계산을 통해 결정 할 수 없으므로 공기역학적 항력에 의한 손실이 없고 블레이드 날개 수가 무한하다는 가정으로부터 유도되는 운동량 이론에서 풍력터빈이 이론적 최대효율을 얻을 수 있는 경우의 축 흐름 유도계수 값($a=1/3$)을 설계에 반영한다. 이 값은 Betz의 이론으로부터 유도되는 이상적인 값과 동일하다.

날개 끝 손실의 발생은 블레이드 국부위치에서의 축흐름유도계수 변화를 초래하므로, 이를 반영한 축 흐름 유도계수와 회전흐름유도계수(a')를 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.

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

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

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

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

식 (2.5)를 이용하여 블레이드 국부위치 변화에 따른 축 흐름 유도계수 및 회전 흐름 유도계수를 다시 계산할 수 있으며, 식(2.5)는 TSR (날개끝 속도비, tip speed ratio)가 3 이상인 경우에 한해 유효하다.

스팬방향 국부위치에서 무차원 현(chord)의 길이를 각각 결정하기 위해서는 우선 블레이드 날개 끝 부분에 사용될 익형의 선정이 필요하다. 그 후, 선정된 날개 끝 익형의 공력특성 데이터를 확보하고 익형의 최대 양항비(lift to drag ratio)를 나타내는 받음각에서의 양력계수, 축 흐름유도 계수, 회전 흐름유도계수, 블레이드 개수, 날개끝 속도비 등을 입력하여 식 (2.6)을 통해 국부 위치에서의 무차원 현의 길이를 각각 계산할 수 있다.

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

본 연구에서 사용된 날개 끝 익형은 NACA 63(2)-415이며 최대 양항비를 나타내는 지점에서의 양력계수와 항력계수 값들을 table 1 에 나타내었다.

식 (2.6)에 의해 계산된 현의 길이분포는 블레이드 허브 부분으로 갈수록 급격히 증가하는 특징을 나타내고 있으나, 로터 블레이드 성능을 크게 좌우하는 영역은 허브로부터 70% 위치에서 블레이드 팁 까지, 약 30% 정도의 영역에 지나지 않으므로, 이 영역에 대한 정확한 형상설계 데이터의 반영만 이루어지면 된다.^[31]

통상 허브로부터 약 30% 까지의 영역은 성능을 고려한 설계법 보다는 구조적으로 안정된 블레이드 지지를 위한 설계방법을 고려하여야 하는 부분이다. 따라서 이상적인 성능확보 측면에서는, 식(2.6)으로부터 얻은 현의 길이분포를 정확하게 반영한 블레이드를 제작하는 것이 바람직하지만, 블레이드 제작 용이성 및 제작비용 절감을 위해 성능에 큰 영향을 미치는 영역인 허브로부터 70%~90% 사이의 영역을 기준으로 현의 길이 분포를 재구성 할 필요가 있다.

계산된 최종 로터 블레이드 현의 길이 분포를 Fig. 1에 나타내었다.

입구유입 유동각(inflow angle) ϕ 는 식 (2.7)을 통해 결정될 수 있으며 비틀림 각(θ , twist angle)의 계산에 사용된다. 비틀림 각은 앞서 계산된 ϕ 와 받음각 α 와 의 관계를 통해 식 (2.8)에 의해 간단히 계산될 수 있다. 계산된 비틀림 각 분포를 Fig. 2에 나타내었다.

설계가 완료된 블레이드는 식(2.4) 의해 기본설계 검토를 위한 성능평가 과정을 거치게 된다.

기본 형상설계가 완료된 1 MW 블레이드 설계정보를 table 2에 나타내었다.

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

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

Table 1 Aerodynamic characteristics(NACA63₂₁-415)

Re	α	C_L	C_D	$C_{L/D}$
3×10^6	3.5°	0.7704	0.00568	135.6338

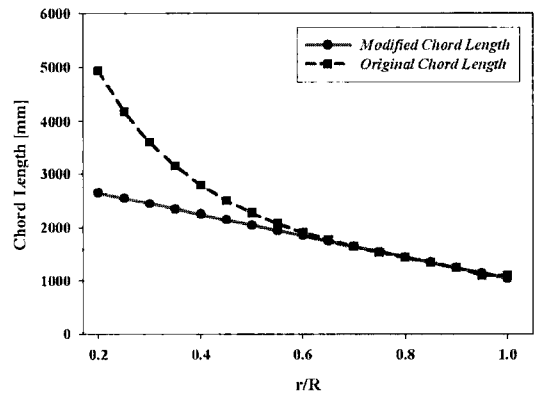


Fig. 1 Distributions of chord length at each section

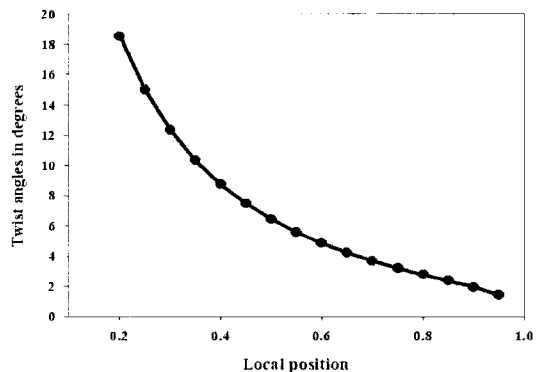


Fig. 2 Twist angle distribution

Table 2 Summarization of 1MW blade design parameter

Local Position	Twist(deg)	Position(mm)	Chord (mm)	Airfoil series
0.20	17.9	5466	2625.27	FFA-W-301
0.25	14.4	5812	2524.99	FFA-W-301
0.30	11.7	6175	2418.94	FFA-W-301
0.35	9.73	6537	2319.79	FFA-W-301
0.40	8.14	10900	2208.83	DU9-1-W2-260
0.45	6.87	12262	2103.48	DU9-1-W2-260
0.50	5.83	13625	1998.32	DU9-3-W2-210
0.55	4.97	14987.5	1893.17	DU9-3-W2-210
0.60	4.24	16350.0	1788.01	DU9-3-W2-210
0.65	3.62	17712.5	1682.96	DU9-3-W2-210
0.70	3.08	19075.0	1577.71	NACA63(2)-418
0.75	2.60	20437.5	1472.55	NACA63(2)-418
0.80	2.17	21800.0	1367.4	NACA63(2)-418
0.85	1.77	23162.5	1262.24	NACA63(2)-418
0.90	1.35	24525.0	1157.09	NACA63(2)-415
0.95	0.83	25887.5	1051.93	NACA63(2)-415
1.00	0.83	27250.0	946.78	NACA63(2)-415

3. 에어포일 공력특성 예측

로터 블레이드 형상설계 및 정확한 성능예측을 위해서는 로터 블레이드를 구성하는 에어포일에 대한 신뢰성 있는 공력특성 데이터 확보가 필수적이나, 수많은 종류의 에어포일에 대한 신뢰성 있는 실험 공력특성 데이터의 확보는 현실적으로 거의 불가능 한 실정이다.

신속한 피드백(feed back)에 의한 효율적인 설계의 진행을 위해 설계자는 다양한 익형의 공력특성 데이터를 쉽게 확보 할 수 있어야 한다. 따라서, 현재 많은 설계자들은 일반적으로 X-Foil 등과 같은 패널코드(panel code) 기반 수치해석 소프트웨어를 이용하여 2차원 익형 공력특성데이터를 확보한다.

본 연구에서는 날개 끝단으로부터 NACA 63(2)-415, NACA 63(2)-418, DU 93W2-210, DU 91W2-250, FFA W-301의 순서로 배치하였다.

보통 풍력발전용 에어포일은 효율적인 출력특성의 확보를 위해 풍력터빈 출력에 큰 영향을 미치는 구간인 날개 끝부분에서 30% 위치까지 NACA 5, 6자리 계열 익형을 사용하고, 그 이하의 영역에서는 구조적 안정성, 높은 받음각, 익형 표면 거칠기 등의 변화에도 공력특성의 변화가 급격히 발생하지 않는 두꺼운 에어포일 시리즈를 주로 사용한다. 본 설계에 사용된 익형의 받음각 변화에 따른 양력계수 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 실험데이터와 수치해석 데이터의 오차범위는 익형의 표면 경계층 박리시점 및 천이 영역의 부정확한 예측에 의한 수치 해석 기법상의 특징에 의해 발생되며, 이로 인해 수치해석 데이터는 실속현상이 지연되는 특징을 나타냄에 따라, 실속영역 이후의 공

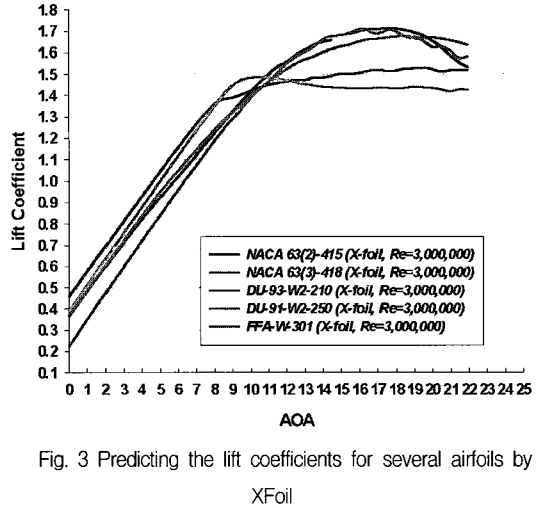


Fig. 3 Predicting the lift coefficients for several airfoils by X-Foil

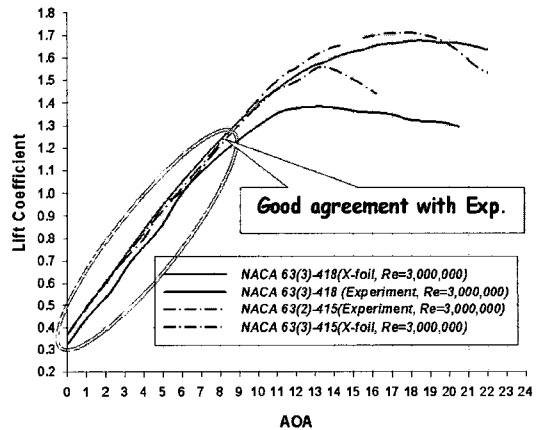


Fig. 4 Comparison of lift coefficient

력 특성 데이터들은 실험데이터와 비교했을 때 비교적 정확하지 못한 값을 예측하는 것이 일반적이다.^[4]

Fig. 4에 NACA 시리즈 에어포일 양력계수 값 대한 수치해석과 실험결과를 비교하였다. 두 결과는 실속 전 해당 받음각 영역 내에서 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있고, 로터 블레이드 설계 및 성능해석 과정에서 X-Foil에 의한 수치해석 데이터를 사용하여도 충분한 신뢰성을 확보할 수 있을 것이라 사료되며, 이를 통해 설계자는 신속하게 다양한 에어포일 공력특성 데이터를 확보할 수 있고 효율적인 설계를 진행할 수 있다.

4. BEMT에 의한 블레이드 공력성능 해석

본 연구를 통해 설계된 1MW 풍력터빈 블레이드

성능평가를 위해 Fig. 5와 같은 절차로 진행되는 BEMT 해석코드를 개발하여 수행하였다. 실속 후 영역에 대한 공력특성 보정은 Viterna-Corrigan^[5]의 실속 후 예측 모델을 사용하여 받음각 범위 60°까지 양력계수, 항력계수에 대한 데이터를 0.5° 간격으로 획득하였으며, 이를 초기 입력데이터로 사용하였다.

Fig. 6에 블레이드 국부 위치에서의 받음각 변화를 TSR 변화에 따라 나타내었다. 1 MW 기본 형상설계에 사용된 에어포일의 실속각은 약 13° 부근에서 형성되고 있으며, TSR=5, 6, 7, 8, 9의 경우 블레이드 전 영역에 걸쳐 거의 대부분의 받음 각이 실속 각 범위 내에서 결정되고 있으므로, 블레이드는 설계시 가정된 1MW 출력을 유지할 것이라고 예상 할 수 있다.

TSR =2, 3, 4의 경우 받음각이 실속각을 크게 벗어난 범위에서 결정되고 있으므로, 이 범위에서의 출력 특성은 다소 낮게 나타날 것임을 예측할 수 있다.

Fig. 7에는 블레이드 국부 위치에서의 Prandtl의 날개 끝 손실 변화를 TSR에 따라 비교한 그래프를 나타내었다. 대부분의 TSR 영역에 대해 날개 끝 손실은 허브로부터 날개 팁까지 진행될수록 점점 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, TSR=9인 경우에 날개 끝 손실이 가장 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 날개 끝 손실은 시스템의 전체 출력에 영향을 미치는 변수이며, Fig. 6의 결과와 마찬가지로 TSR=5 이하인 영역에서

날개 끝 손실이 블레이드 전 영역에 걸쳐 발생하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 설계된 1MW 블레이드는 초기 설계 TSR=7.5의 경우에서 최적의 공력특성을 확보 할 수 있는 받음각 영역이 결정되고 있으며, 이

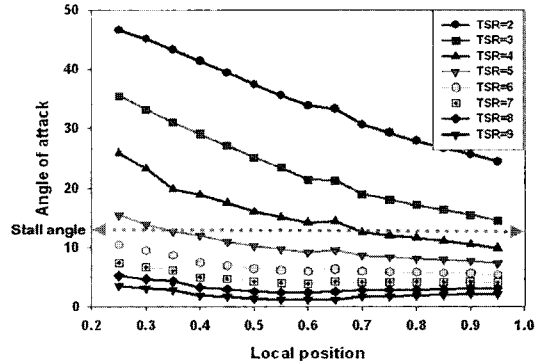


Fig. 6 Comparison of AOA according to TSR variation

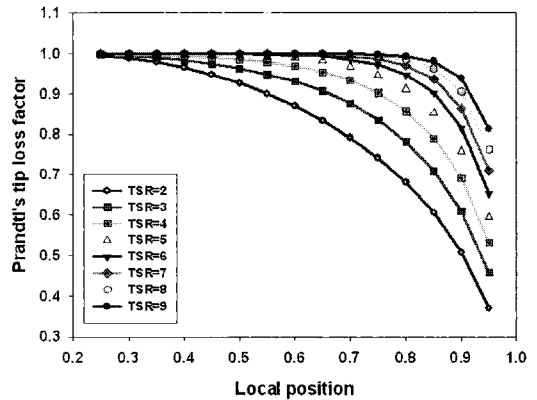


Fig. 7 Comparison of Prandtl's tip loss coefficient

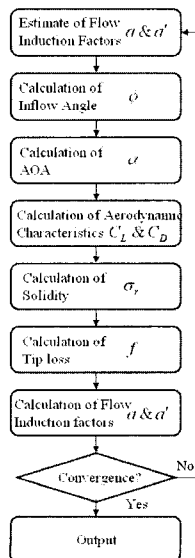


Fig. 5 Performance calculation procedure

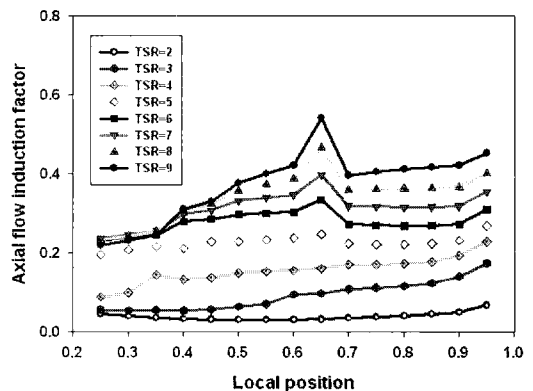


Fig. 8 Comparison of axial flow induction factors

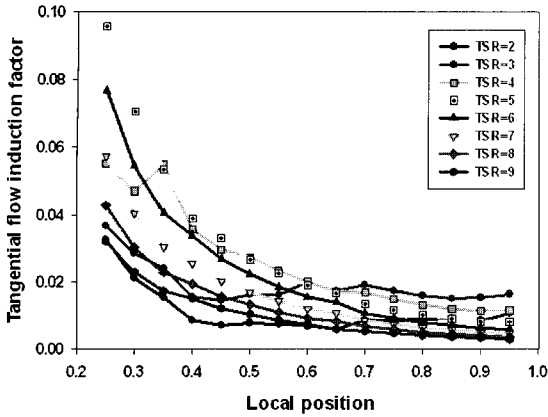


Fig. 9 Comparison of tangential flow induction factors

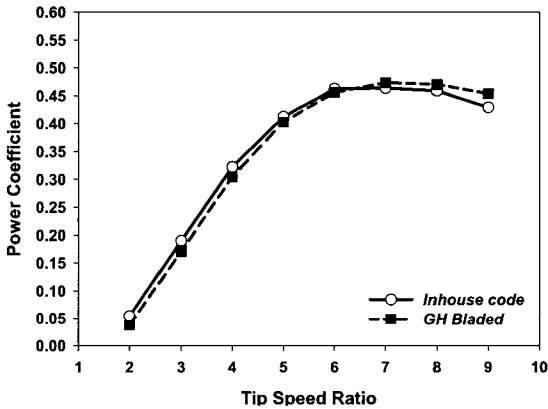


Fig. 10 Power coefficient according to TSR variation

범위에서 날개 끝 손실도 비교적 낮게 유지되고 있다.

Fig. 8, Fig. 9에 축흐름유도계수와 회전흐름유도계수 변화를 TSR 변화에 따라 각각 나타내었다. 항력의 효과를 무시한 운동량 방정식으로부터 유도되는 가장 이상적인 조건에서의 축 흐름유도계수의 값은 1/3 이다. 따라서, 최종적인 성능해석을 통한 축 흐름유도계수 결과 값이 이상적인 조건에 근접할수록 설계된 로터 블레이드의 출력특성은 우수한 출력특성을 갖게 된다. Fig. 8의 결과에서, TSR=2, 3, 4, 5의 경우 이상적인 축 흐름 유도계수 값에 비해 상당히 낮은 분포의 값을 나타내고 있으며, 이 범위에서는 높은 출력특성을 기대하기 어렵다고 판단된다. TSR =6, 7, 8의 경우 대체적으로 결과 값의 범위가 이상적인 조건 근방에 형성되고 있음을 알 수 있으므로, 이 범위의 TSR에서 우수한 출력특성을 나타낼 것임을 알 수 있다. TSR=9

의 경우 다소 높은 결과분포를 나타내고 있으므로, TSR=6, 7, 8의 결과보다 다소 낮은 출력을 나타낼 것이라 예상되나, TSR=5 이하의 범위보다는 상대적으로 우수한 출력 특성이 나타날 것임을 예상할 수 있다. Fig. 10에 출력성능곡선을 TSR의 변화에 따라 나타내었다. 자체개발된 BEMT 해석코드의 결과는 풍력터빈 성능해석 코드인 GH-Bladed와 비교 검토되었다. 기본 형상설계가 완료된 1MW 풍력터빈은 TSR=6, 7에서 가장 좋은 성능 특성을 나타내고 있음을 알 수 있으며, TSR=6 이전 영역은 TSR의 정의에 따라 블레이드 상류로부터 접근하는 유속의 범위가 정격출력을 발생하는 풍속범위 보다 높은 값을 가지므로, 블레이드 전연으로 유입되는 상대유입 각도가 증가하고, 동시에 실속각 이상으로 받음각이 증가하면서 급격한 실속에 의한 공력특성 저하가 예상된다. 따라서, 이 범위의 TSR에서 상당히 낮은 출력특성이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, TSR=7 이후는 입구유속이 정격출력을 발생하는 범위보다 낮게 유지됨에 따라 상대적으로 블레이드 전체영역에 걸쳐 실속이전의 낮은 받음각이 형성되고, 받음각의 범위가 낮아짐에 따라 적정 받음각의 분포에 비해 익형 공력특성이 저하되므로 결과적으로 출력특성은 점점 감소하는 경향을 보인다.

5. 결론

- 1) 1MW 블레이드 형상 기본설계 완료 후 BEMT에 의한 공력성능해석이 성공적으로 수행되었으며, TSR=7의 조건에서 출력계수 값은 0.47이다.
- 2) 개발된 성능해석코드에 의해 예측된 블레이드 출력계수는 상용해석코드인 GH-Bladed의 결과와 잘 일치한다.
- 3) 초기설계 과정에서 가정된 TSR에서 받음각 분포는 우수한 공력특성이 발생하는 범위에서 결정되고 있고, 흐름유도계수 값들 또한 전체 블레이드 영역에 걸쳐 이상적인 범위에 형성되고 있으므로, 원하는 출력을 확보하기 위한 목적에서의 형상 기본설계는 성공적으로 완료되었다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Guanpeng Xu, 2001, "Computational Studies of

1 MW 풍력터빈 블레이드 형상기본설계 및 성능해석

- Horizontal Axis Wind Turbines,” Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology.
- (2) Betz A., 1919, “Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust,” Gottinger Nachr.
- (3) Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, 2001, “Wind energy handbook,” John Wiley&Sons, pp. 73~74.
- (4) R.B. Langtry, J.Gola, F.R. Menter. 2006, “Predicting 2D Airfoil and 3D Wind Turbine Rotor Performance using a Transition Model for General CFD Codes,” AIAA 2006-0395.
- (5) T. Tanager, David Kokurek, 2003, Wind turbine post stall airfoil performance characteristics guidelines for blade element momentum methods, NREL/CP 500-36900.