

10kW 풍력발전기 블레이드 형상 개념 설계 및 타당성 검증

유철¹ · 손은국^{1,†} · 황성목¹ · 김대진² · 김석우¹¹한국에너지기술연구원, 풍력연구실²한국에너지기술연구원, 시스템융복합연구실

10kW wind turbine blade aerodynamic design and verification

Cheol Yoo¹, Eunkuk Son^{1,†}, Sungmok Hwang¹, Daejin Kim², Seokwoo Kim¹¹Wind Energy Laboratory, Korea Institute of Energy Research²System Convergence Laboratory, Korea Institute of Energy Research

Abstract

A 10kw wind turbine blade aerodynamic design was carried out using the self-developed program AeroDA. The concept, basic shape, and optimization were designed and verified. A performance analysis was carried out and the key factors in each design stage are summarized. In addition, a guide for the placement of cross-section airfoils constituting the blades is presented, and the importance of the stall margin test as a method of verifying aerodynamic design is summarized. In order to verify the design program AeroDA, we compared the results of the performance analysis with a specialized program DNVGL_Bladed.

초 록

풍력 발전기 블레이드 공력 설계 프로세스를 정리하고 자체 개발한 프로그램을 이용하여 10kw 블레이드 공력 형상 설계를 진행하였다. 개념설계, 기본 형상 설계, 최적화 설계, 설계 검증 및 성능 해석 순으로 진행하였으며, 각 설계 단계에서 중요한 설계 인자에 대해서 정리하였다. 또한 블레이드를 구성하는 단면 익형의 배치에 대한 가이드를 제시하였으며, 공력 설계를 검증하는 방법으로 stall margin 확인의 중요성에 대해서 정리하였다. 자체 개발한 설계 프로그램의 결과를 BEMT 기반의 전문 프로그램 DNVGL Bladed의 성능 해석 결과와 비교하여 제시하였다.

Key Words : Wind Turbine Blade(풍력발전기 블레이드), Aerodynamic design(공력설계), Performance analysis(성능 해석), Stall margin(실속 여유)

1. 서 론

전 세계적으로 지구 온난화 및 원전 사고 위험에 대한 위기의식이 점차 고조되어 신재생 에너지에 대한 관심이 증가하고 있는 상황에서, 상대적으로 발전 시스템의 경제성이 우수하고, 대용량 발전이 가능한 풍력 발전에 대한 투자가 점차 확대되고 있다. 그러나

바람 자원이 우수한 지역의 육상 풍력 시장은 점차 포화 상태에 근접하고 있고, 중국 저가 터빈의 공격적인 시장 진입이 격화됨에 따라서, 시스템 업체 간에 생존을 위한 과다 경쟁이 발생하여 터빈 판매 가격은 지속적인 하락 하고 있다[1]. 해외 선진 업체 대비 핵심 부품에 대한 독자 기술력이 부족하고, 중국 업체 대비해서 가격 경쟁력이 열세인 국내 시스템 업체의 어려움이 지속적으로 커지는 이유이다. 핵심 부품을 해외 업체에 의존하고, 시스템 최적화 설계의 자립도가 낮은 지금까지의 방식으로는 더 이상 기술 및 가격 경쟁력을 확보할 수 없는 상황에 이미 도달하였으므로, 자

Received: Oct. 26, 2017 Revised: Nov. 30, 2017 Accepted: Dec. 04, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-10-2763-9953, E-mail: eunkuk.son@kier.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

체 개발 역량 확보를 위한 연구 노력이 시급한 상황이다. 블레이드 형상 설계 및 성능 해석은 항공기 회전익 분야에서 개발되었으나, 풍력 분야에서 오랜 기간 적용되면서 유효성이 입증된 BEMT(Blade Element Momentum Theory)에 이론적 기반을 갖는다. BEMT 관련하여 여러 참고 문헌이 있으나[2-4], 이론 위주의 단순한 기본 형상 생성 방법에 대한 언급이 국한되기 때문에 블레이드 설계에 바로 적용하기 어려운 한계를 갖는다. 본 논문에서는 BEMT의 이론적 설명보다는 블레이드 공력 설계 절차 및 최적화 기법에 대하여 10kW 블레이드 공력 설계를 진행하면서 상세히 정리 하였다. BEMT에 기반을 둔 전체적인 블레이드 공력 설계 프로세스는 Fig.1에 나타내었다.

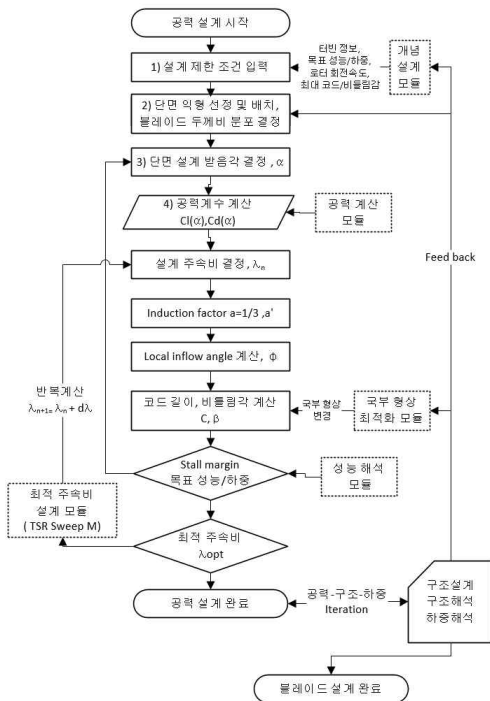


Fig. 1 Blade Design Process

공력 설계 순서는 단면 익형의 선정, 각 단면의 설계 받음각(a) 설정, 설계 주속비(λ, tip speed ratio) 결정, flow induction factor (a, a') 계산, 시위 길이(c, chord length) 계산, 비틀림 각(β, twist angle) 계산 및 성능 해석 순으로 이루어진다. 관련 수식은 Eq.1-6에 표시하였다[2]. Ω는 블레이드 회전속도, μ는 무차원 단면 위치, B는 블레이드 수를 나타낸다. 공력 설계 단계에서는 a=1/3으로 가정하고 Eq.3을 통하여 시

위길이를 계산하고, 성능 해석 단계에서는 설계 단계에서 결정된 시위길이를 기준으로 Eq.3을 통하여 a를 계산한다.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty} \tag{1}$$

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \tag{2}$$

$$c = \frac{2\pi R}{B\lambda C_l} \frac{4\lambda^2 \mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + (\lambda\mu(1+a'))^2}} \tag{3}$$

$$\tan\phi = \frac{1-a}{\lambda\mu(1+a')} \tag{4}$$

$$\alpha = \phi - \beta \tag{5}$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{1-a}{\lambda\mu(1+a')}\right) - \alpha \tag{6}$$

공력 설계는 자체 개발한 통합 설계 및 성능 해석 프로그램 AeroDA를 사용하여 진행하였다(Fig.2). 프로그램 구성은 개념설계 ConD 모듈, 전처리 PreP 모듈, 공력 설계 AeroD 모듈, 성능 해석 AeroA 모듈로 구성 된다.

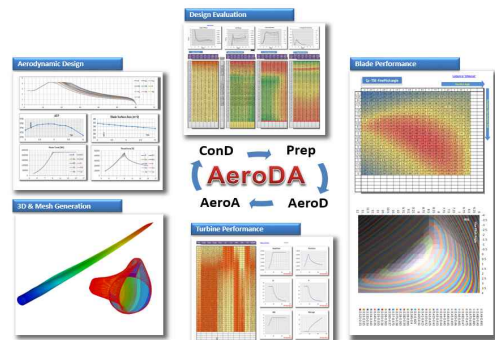


Fig. 2 AeroDA

2. 공력 설계

2.1 개념 설계

10kW급 블레이드 공력 설계를 진행하기 위해서 먼저 동급의 터빈 사양 조사를 수행하여 Fig.3에 정리하였다. 3개의 블레이드를 가지는 수평축 풍력발전기(Horizontal Axis Wind Turbines)가 일반적이었으며, 평균 로터 직경은 8m이다. AeroDA 개념 설계 모듈을 이용하여 Fig.3과 같이 경쟁사 터빈의 성능을 예측 평

가하고, 성능 경쟁력을 확보 가능한 목표 출력 곡선을 Fig.4와 같이 도출하여 이후 설계 단계의 참고 자료로 사용 하였다.

maker	Turbine	Rated Power	Turbine Type	Cut-in Wind Speed	Rated wind Speed	Cut-out wind Speed	Rotor Dia.	Rated Rotor Speed	Hub height
AEOLUS	DK Aeolos-H-10kw	10kW	HAWT Upwind 3Blade	3m/s	10m/s	14m/s	8m	180RPM	12m 18m
Osirisenergy	CH Osiris 10	10kW	HAWT Upwind 3Blade	2.5m/s	9.5m/s	17m/s	9.7m	120RPM	12m 15m
Australian wind & solar	AUS AWS - H 10KW	10kW	HAWT Upwind 3Blade	3m/s	10m/s	14m/s	8m	180RPM	16m 24m 30m
Hummer	CH H8-10kw	10kW	HAWT Upwind 3Blade	3m/s	10m/s	25m/s	8m	-	-
Aircon GmbH	GER Aircon GmbH-10	9.8kW	HAWT Upwind 3Blade	2.5m/s	11m/s	25m/s	7.5m	130RPM	12m 24m 30m
Zenia Energy	DK Zenia Energy 10	10kW	HAWT Upwind 3Blade	3m/s	-	30m/s	7.1m	110RPM	18m

Fig. 3 10kW wind turbines

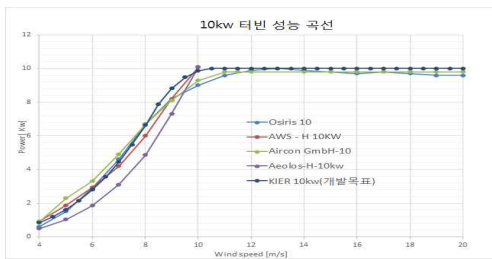


Fig. 4 Power Curves of 10kW wind turbines

익형의 개발 및 검증은 많은 시간이 필요하다. 따라서 초기의 풍력 블레이드는 오랜 기간 검증이 완료된 NACA 익형을 사용하여 설계를 진행하였다. 풍력 블레이드의 저속 운전 특성에 적합한 NACA 63 계열의 18%~15% 두께비 익형이 주로 사용되었고[5], 블레이드 루트 부 설계에 필요한 두꺼운 익형은 얇은 익형의 두께를 단순히 증가시켜 사용하였다. 이로 인하여 블레이드 루트 및 중간 부분에서의 공력 성능 감소가 발생하였고, 이는 Fig.5와 같이 풍력 블레이드에 운전 요구 조건에 특화된 두꺼운 익형 개발의 필요성을 야기하였다. 가장 먼저 네덜란드 Delft University 에서 두께비 40%, 35%, 30%, 25%의 DU series 익형을 개발 완료하고 모든 기술 자료를 공개한 이후로 여러 풍력 블레이드 용 두꺼운 익형이 공개되었다[6-7]. 추가적으로 블레이드 팁 부분에 사용하기 위한 18%, 15%의 얇은 DU 익형도 공개되었으나, 아직까진 두꺼운 DU 익형과 얇은 NACA 익형의 조합이 가장 널리 사용되고 있다[8-9]. 본 논문에서는 Fig.6과 같이 DU 계열 익형과 NACA-63 계열 익형을 조합하여 공력

설계를 진행하였다.

	Inboard	Mid span	Outboard
Thickness Ratio	30% >	25% ~ 21%	<18%
High Max. L/D	○	○○	○○○
High stall angle	○○	○	
Low sensitivity to roughness		○○	○○○
Low Noise		○○	○○○

Fig. 5 Design goal of wind turbine airfoil

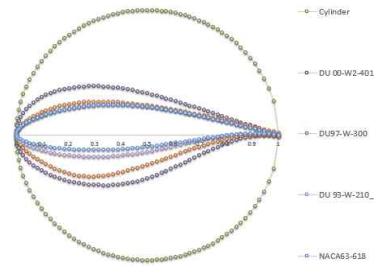


Fig. 6 Airfoils of 10kW Blade

블레이드의 자체 공력 성능(Cp, Power coefficient) 보다는 장착될 시스템의 전력생산량(AEP)을 최대화 하고, 개발비를 최소화 가능 하도록 시스템에 최적화된 블레이드 설계를 진행하는 것이 매우 중요하다. 따라서 터빈 사양 및 개발 목표 등에 따라서 다양한 최적 공력 형상이 도출된다. 본 논문은 블레이드 설계 기법에 대한 연구이므로, 10kW 터빈 조사를 통하여 표준 사양을 Fig.7에 정의하고, 정의된 시스템에 최적화된 블레이드 공력 설계를 진행하였다. 성능 목표는 Cp =0.47 이상, 정격 출력 도달 풍속은 10m/s 이내로 선정 하였다.

Design Input		
Value	Name	Description
HWAT	Type	HAWT / VAWT
Up Wind	Tupe	Upwind/Downwind
3	NumBlade	Number of blades.
3.95	RotorRad	Rotor radius [m].
0.4	HubRad	Hub radius[m]
0	PreCone	Precone angle, positive downwind [deg].
0	Tilt	Shaft tilt [deg].
0	Yaw	Yaw error [deg].
12	HubHt	Hub height [m].
10000	RatedPower	RatedPower[kW]
0	NoLoadLoss	No Load Power loss
0.95	E_Efficiency	Eleetric Efficiency
1	M_Efficiency	Mechanical Efficiency
149.888	RatedRPM	RatedRPM

Fig. 7 Turbine Information for Blade Design

2.2 기본 설계

블레이드 기본 설계는 선정된 익형들의 길이 방향 위치 결정, 각 단면의 목표 받음각(Angle of Attack) 결정, 단면 시위(Chord) 길이 및 비틀림(Twist) 각도 계산 순으로 이루어진다(Fig.1). 선정된 익형의 배치는 공력 성능 뿐 아니라 블레이드 두께비 분포 및 익형 구조 효율에 영향을 주기 때문에 매우 중요한 설계 과정이다. 초기 단면 위치는 공력 설계 단계에서 결정하고, 구조 설계 및 하중해석 단계에서 발생하는 여러 요구 사항들을 반영하여 최종 확정 하는 것이 일반적인 절차이다. 초기에 이러한 요구사항들을 미리 반영한다면 반복 설계 횟수를 최소화하여 전체 설계를 크게 단축할 수 있다.

NREL(미)에서 공개한 5MW 블레이드[10] 자료와 2.3MW, 2.7MW 및 해상용 7MW 블레이드 설계를 진행하면서 습득한 노하우 및 자료를 분석하여 무차원 단면 위치에 따른 두께비 분포를 Fig. 8와 같이 정리하여, 초기 익형 배치의 참고 자료로 제시하였다. 이에 따른 10kW 블레이드 초기 두께비 분포는 Fig.9에 나타내었다.

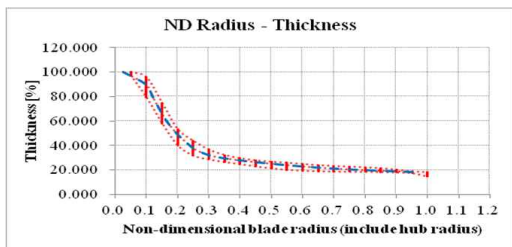


Fig. 8 Airfoil placement and thickness ratio distribution guide

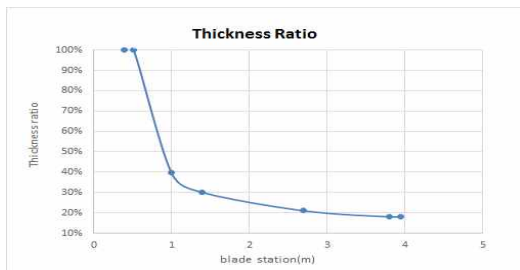


Fig. 9 Initial Airfoil Placement

단면 익형 배치가 결정되면 각 단면의 설계 받음각을

결정한다. 이는 블레이드 공력 성능 및 형상 결정에 가장 중요한 절차이다. 익형의 공력 계수는 받음각 증가에 따라 증가하게 된다. 따라서 설계 받음각을 크게 설정하여 성능을 증대하거나, 동일 성능에서 단면의 시위 길이 감소를 유도할 수 있다. 그러나 받음각이 증가하여 실속(Stall)이 발생하게 되면, 급격한 공력 성능의 하락 및 급격한 힘의 변동을 야기하므로, Fig.10 과 같이 실속 받음각 이하로 설계 받음각을 결정하는 것이 중요하다.

터빈 성능의 극대화를 위해서 풍속이 증가함에 따라 블레이드 회전속도가 특정 비율로 증가하게 되고, 블레이드 단면 받음각은 설계 받음각으로 유지 된다. 그러나 회전 속도가 무한히 증가할 수 없고 소음 등의 이슈로 정격 회전 속도에 도달하게 되면 풍속은 증가하나 회전 속도는 일정하게 유지되는 구간이 발생하게 된다. 이 구간에서는 받음각이 설계 받음각 이상으로 증가하게 된다. 따라서 받음각 증가 구간을 고려하여 설계 받음각과 실속 받음각 사이에 여유를 두는 것이 중요하다. 여러 블레이드 설계 경험을 바탕으로 초기에 3~5도 정도의 여유를 주는 것을 추천한다. 그러나 받음각 증가량은 블레이드 길이, 정격 회전속도, 터빈 정격 출력 등에 따라 변하기 때문에 설계를 진행하면서 지속적인 실속 발생 유무의 확인이 필요하다.

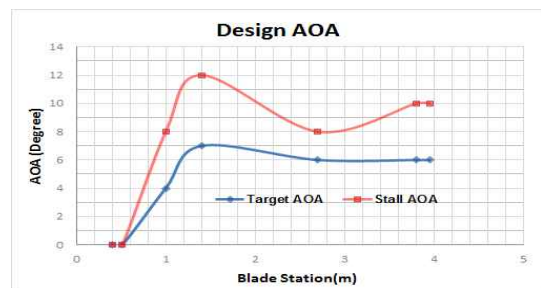


Fig. 10 Design AOA of 10kw Blade

단면 익형 선정, 위치 선정, 설계 받음각 선정이 완료 되면 Fig.11과 같이 각 단면에서의 블레이드 시위 길이 및 비틀림 각 설계를 진행하게 된다. 단면 비틀림 각은 블레이드 운전 중에 각 단면에서의 받음각이 설계 받음각으로 유지되도록 결정되며, 시위 길이는 설계 받음각에서의 단면 공력 계수의 영향을 받는다.

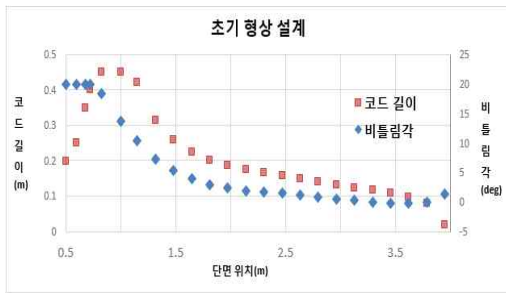


Fig. 11 Initial Chord length & Twist angle

2.3 최적 설계

단면 시위 길이 분포 변화에 따른 성능 및 공력 하중 해석을 수행하고, 개발 목표 성능을 만족하는 최적 형상을 도출한다. 최적화 연구는 개발된 AeroDA의 최적화 모듈을 사용하였다. 블레이드 형상을 대표하는 주된 설계 인자는 주속비(TSR, Tip Speed Ratio)이다. 최적 주속비를 찾기 위해서 주속비를 4~10 사이에서 1간격으로 수행하여 최적점이 6~8 사이임을 확인 하였다. 이후에 Fig.12와 같이 주속비를 6~8 사이에서 0.2 간격으로 세분화하여 형상 설계 및 성능 해석을 수행하였다.

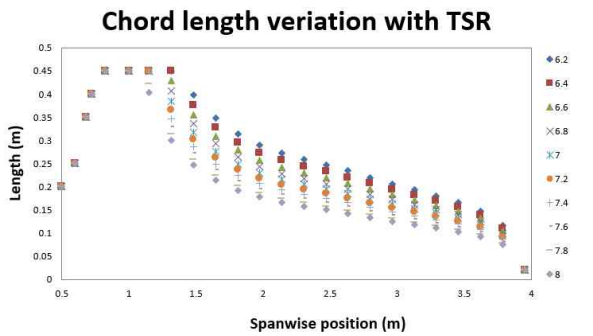


Fig. 12 variation of chord length with TSR

주속비에 따른 블레이드 Cp, 전력 생산량(AEP) 및 공력 하중 해석 결과를 Fig.13-15에 정리하였다. 블레이드 성능 지표인 Cp는 주속비 8 이상에서 최대 값이 도출되며, 터빈 성능 지표인 AEP(연간 전력 생산량)는 주속비 7.6 에서 최대화 된다. 블레이드 설계 최종 목표는 전력 생산량 최대화이기 때문에 주속비를 7.6를 1차 선정하고, 블레이드 루트 하중 특성을 비교 하였다. 공력 하중은 주속비가 증가함에 따라서 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 주속비 7.6과

7.8을 비교하여, AEP 감소량은 0.1% 이내이지만, 블레이드 루트 공력 하중 감소량은 3% 정도 크게 발생하기 때문에 시스템에 가해지는 하중을 최소화하기 위해서 주속비를 7.8로 최종 결정 하였다.

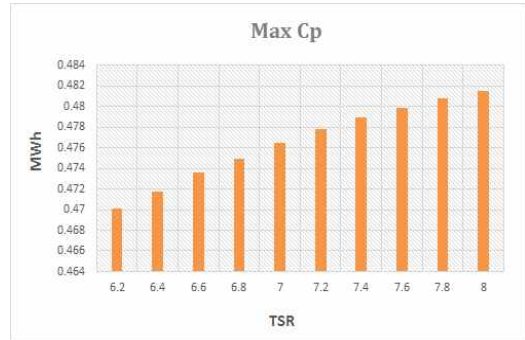


Fig. 13 Blade Cp

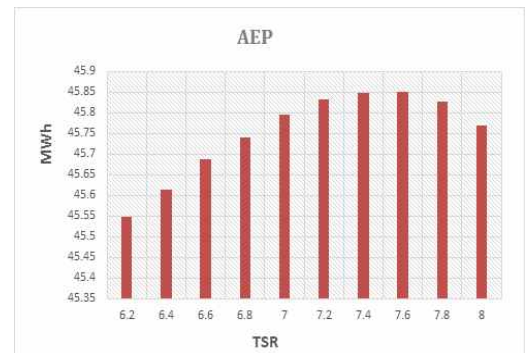


Fig. 14 Annual energy production(AEP)

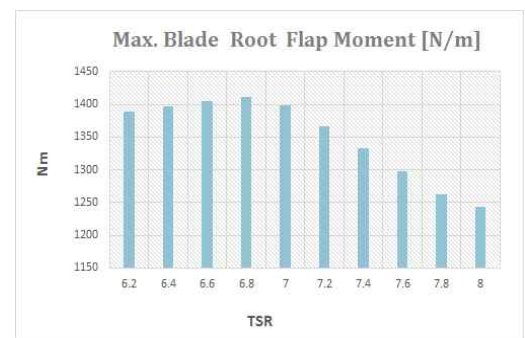


Fig. 15 Blade root moment

최종 선정된 주속비 7.8 기준으로 Fig.15-17과 같이 상세 형상 설계를 진행하였다. 3차원 형상은 AeroDA 3D 형상 설계 모듈을 사용하여 생성 하였다.

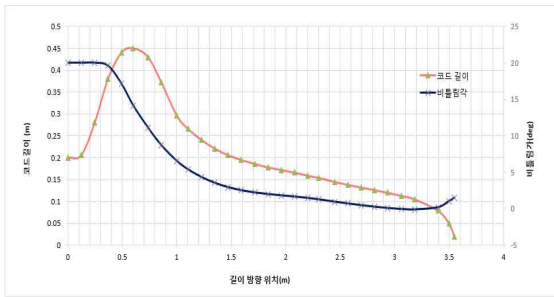


Fig.16 Final Chord Length & Twist Angle



Fig. 17 Final Blade Shape

Distance along Pitch Axis	Chord (m)	Twist (deg)	Thickness (%)	X(m)	Y(m)	x(%)	y(%)	Afile_s	Afile_e	WFS
0	0.2	20	100	0	0	0	50	1	1	1
0.122	0.206	20	99.4	0	0	0	50	1	2	0.983
0.245	0.28	20	86.7	0	0	0	40	1	2	0.73
0.367	0.38	19.597	68.9	0	0	0	35	1	2	0.479
0.49	0.44	17.145	51.1	0	0	0	33	1	2	0.226
0.6	0.45	14.11	39.6	0	0	0	33	2	2	1
0.734	0.43	11.122	33.1	0	0	0	33	2	4	0.665
0.857	0.372	8.698	31.3	0	0	0	33	2	4	0.358
1	0.298	6.526	30	0	0	0	33	4	4	1
1.102	0.266	5.388	28.5	0	0	0	33	4	6	0.922
1.224	0.241	4.341	27.1	0	0	0	33	4	6	0.828
1.347	0.221	3.536	25.9	0	0	0	33	4	6	0.733
1.469	0.206	2.943	24.9	0	0	0	33	4	6	0.639
1.591	0.195	2.516	24.1	0	0	0	33	4	6	0.545
1.714	0.186	2.211	23.5	0	0	0	33	4	6	0.451
1.836	0.178	1.989	22.9	0	0	0	33	4	6	0.357
1.959	0.172	1.81	22.4	0	0	0	33	4	6	0.262
2.081	0.166	1.645	21.9	0	0	0	33	4	6	0.168
2.203	0.159	1.456	21.4	0	0	0	33	4	6	0.075
2.3	0.154	1.267	21	0	0	0	33	6	6	1
2.448	0.145	0.951	20.3	0	0	0	33	6	8	0.882
2.571	0.138	0.7	19.9	0	0	0	33	6	8	0.783
2.693	0.132	0.467	19.5	0	0	0	33	6	8	0.686
2.816	0.126	0.254	19.1	0	0	0	33	6	8	0.597
2.938	0.12	0.076	18.8	0	0	0	33	6	8	0.49
3.06	0.113	-0.055	18.6	0	0	0	33	6	8	0.392
3.183	0.105	-0.115	18.3	0	0	0	33	6	8	0.294
3.4	0.079	0.188	18	0	0	0	33	8	8	1
3.5	0.05	1.037	18	0	0	0	33	8	8	1
3.55	0.02	1.496	18	0	0	0	33	8	8	1

Fig. 18 Final Geometry Data of 10kW Blade

3. 설계 평가

3.1 성능 해석

최종 선정된 블레이드 형상에 대하여, AeroDA 성능 해석 모듈과 상용 전문 프로그램 Bladed를 이용하여 성능 해석을 각각 수행하고 결과를 비교 하였다. 블레이드 운전 주속비 변화에 따른 블레이드 성능 Cp를 Fig.19에 나타내었다. 블레이드 Cp는 터빈 효율 등을 고려하지 않은 블레이드 자체 공력 성능을 나타내는 지표이며, 최대 0.48로 설계 목표인 0.47 이상을 만족 하였다.

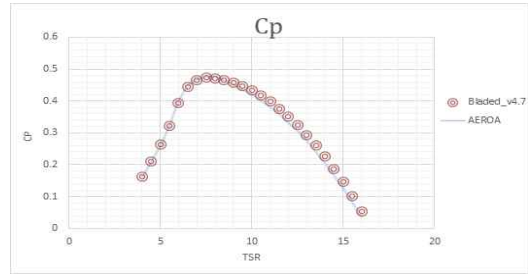


Fig. 19 Cp-TSR

블레이드가 장착된 터빈 성능해석 결과는 Fig.19-20, 풍속에 따른 블레이드 회전속도 및 피치 각도를 Fig 21-22에 표시하였다. AeroDA 와 Bladed 결과가 모든 조건에서 1% 이내로 정확히 일치하는 것을 확인 하였다. 대상 터빈 정격 용량은 10kW, 허브를 포함한 로터 직경은 7.9m, 정격 로터 회전속도는 150rpm 이다. 개념 설계 단계에서 경쟁사 터빈 성능 분석을 통하여 도출한 개발 목표 출력 곡선과 비교하여 모든 풍속에서 동등 이상으로 목표를 만족했음을 Fig.20을 통하여 확인하였다. 정격 출력 10kw 도달 풍속은 9.5m/s로 설계 목표인 10m/s 이내를 만족하였다.

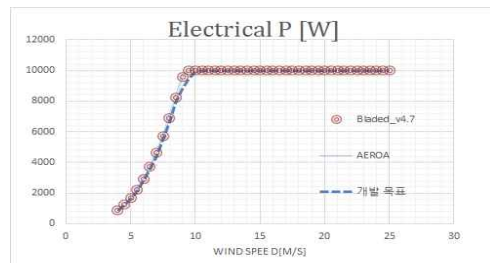


Fig. 20 Power Curve

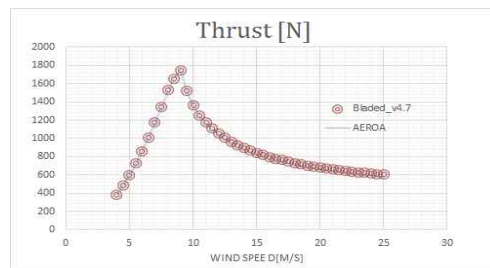


Fig. 21 Thrust Curve

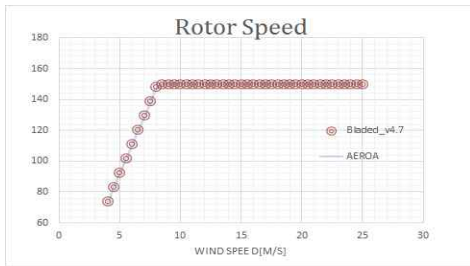


Fig. 22 Blade Rotating Speed

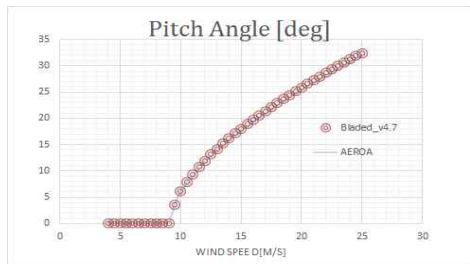


Fig. 23 Blade Pitch Angle

3.2 단면 받음각 해석

블레이드 각 단면에서의 공력 해석을 수행하고, 유입 풍속에 따른 받음각 변화를 Fig.24 에 나타내었다.

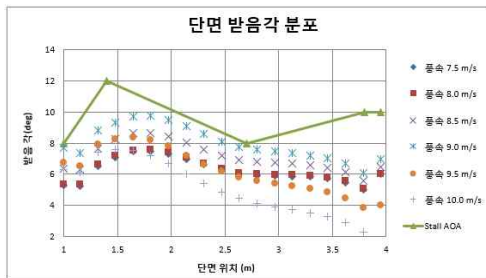


Fig. 24 Blade Section AOA

풍속이 증가함에 따라 로터 회전 속도가 같이 증가하는 8m/s 풍속 이하에서는 모든 단면에서 설계 받음각으로 일정하게 유지된다. 블레이드 끝단속도 제한으로 블레이드 회전 속도가 고정되는 8.5m/s 이후 단면 받음각은 점차 증가하다가 정격 풍속 9.5m/s 이후 피치 제어기의 작동으로 받음각이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 받음각이 가장 크게 발생하는 정격 출력 이전을 포함해서 모든 구간에서 실속 받음각 보다 낮게 유지

되는 것을 확인할 수 있다. 소음 등의 문제로 로터 회전 속도의 제한은 필요하고 이로 인하여 받음각의 증가하는 풍속 영역이 불가피 하게 발생하게 된다. 따라서 본 논문과 같이 모든 운전 구간에서 실속이 발생하지 않도록 설계 받음각을 결정해야 한다.

4. 결 론

풍력 발전기 블레이드 형상 설계는 항공 회전의 분야에서 개발된 BEMT를 이론적 기반으로 한다. BEMT를 풍력 발전기 블레이드 설계에 적용하는 많은 참고 문헌들이 존재하나, 이론 설명 위주의 1개 익형만을 사용한 단순 형상 설계 방법에 대한 언급에 국한되기 때문에, 다수의 익형 조합을 사용하는 실질적인 블레이드 설계에 바로 적용하기 어려운 한계를 갖는다. 본 논문에서는 자체 개발한 설계 프로세스 및 최적화 프로그램을 사용하여 10kW 풍력발전기 블레이드 공력 설계를 단계별로 진행하면서 설계 방법에 대하여 자세 히 기술하였다. 또한 설계 프로그램 AeroDA의 결과를 풍력 분야에서 가장 널리 사용되어지는 상용 프로그램 Bladed 성능 해석 결과와 비교한 결과 그 유용성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(B7-2443). 또한 2017년도 산업통상 자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.(No. 20143030021130)

References

[1] Wiser, R. ,Bolinger, M. , “2015 Wind Technologies Market Report, p.51-52, U.S. Department of Energy, 2015.
 [2] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi. *Wind energy handbook*. p.39-65, Wiley, 2011.
 [3] Moriarty, P. J. and Hansen, A. C., *AeroDyn Theory*

Manual, National Renewable Energy Laboratory, 2005.

- [4] K.J. Jackson, M.D. Zuteck, C.P. van Dam, K.J. Standish, D. Berry, Innovative design approaches for large wind turbine blades, *Wind Energy volume 8*, p.141-171. *John Wiley & Sons*, 2005.
- [5] Miley, S.J. A Catalog of Low Reynolds Number Airfoil Data for Wind Turbine Applications. College Station, TX: Texas A&M University, 1982.
- [6] W.A. Timmer, R.P.J.O.M. van Rooij, Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoil, AIAA-2003-0352 Jan-2003, Reno, USA
- [7] Bertagnolio F., Sorensen N., Johansen J., Fuglsang P., Wind Turbine Airfoil Catalogue, Riso-R-1280, 2001
- [8] W. A. Timer, "An overview of NACA 6-digit airfoil series characteristics with reference to airfoils for large wind turbine blades," *AIAA Paper No. 2009-268*, 2009
- [9] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., Definition of 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, NREL/TP-500-38060, 2009.
- [10] Resor, B. R., "Definition of a 5MW/61.5m Wind Turbine Blade Reference Model," Sandia National Laboratories: SAND2013-2569, 2013.