

풍력발전기 블레이드의 에어포일 최적 설계 및 그 적용 연구[§]

선민영* · 김동용* · 임재규**†

* 전북대학교 에너지공학과, ** 전북대학교 기계설계학과, 전북대학교 차세대풍력발전연구센터

Study on Optimal Design of Wind Turbine Blade Airfoil and Its Application

Min-Young Sun*, Dong Yong Kim* and Jae Kyoo Lim**†

* Dept. of Energy Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.,

** School of Mechanical Design Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.,
Advanced Wind Power System Research Center, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received June 7 2011 ; Revised February 10, 2012 ; Accepted February 13, 2012)

Key Words: Chord Length(익현길이), Tip Speed Ratio(λ , 주속비), Angle of Attack(받음각), Power Coefficient (C_p , 출력계수) Lift Coefficient/ Drag Coefficient(C_L/C_D , 양항비)

초록: 본 연구는 두 가지 목표를 가지고 수행하였다. 하나는 수치해석과 Design-FOIL Pro.를 이용해 블레이드 에어포일 모델개발이고, 다른 하나는 이 모델을 Folding blade에 적용하는 것이다. 일반적으로 1MW이상 대형풍력터빈용 블레이드는 강풍시에 피칭제어로 풍향에 대해서 평형상태를 유지하여 로터를 회전시키지 않는 방법으로 블레이드의 손상을 방지 하였지만, 소형풍력터빈용 블레이드는 설비비, 유지비등 경제성을 이유로 피칭제어를 채택하지 않아 블레이드의 파손 문제가 심각하다. 그래서 본 연구에서는 유지보수가 필요 없고 강풍에서도 파손이 없는 Spring pack을 이용한 로터를 직접설계(Direct-Design) 방법으로 설계하여, 그 성능을 검증 하고 변화 풍속에 맞는 폴딩각을 이용해 강풍시에도 Wind turbine이 Cut-out 없이 계속발전을 유지할 수 있도록 하는 점에 집중 연구하고자 한다.

Abstract: This study was carried out with two goals. One was the development of a model of a wind turbine blade airfoil and the other was the application of this folding blade. In general, in large-sized (MW) wind turbines, damage is prevented because of the use of a pitch control system. On the other hand, pitch control is not performed in small wind turbines since equipment costs and maintenance costs are high, and therefore, the blade will cause serious damage. The wind turbine proposed in this study does not require maintenance, and the blades do not break during high winds because they are folded in accordance with changes in the wind speed. But generators are not cut-out, while maintaining a constant angle will continue to produce. The focus of this study, the wind turbine is continued by folding blade system in strong winds and gusts without stopping production.

- 기호설명 -

C_L : 양력계수

C_D : 항력계수

C_f : 추력계수

C_p : 출력계수

η_g : 발전기 효율

η_m : 기어박스 효율

r_r : 리딩엣지 반경(LE)

V_r : 정격풍속

λ_d : 설계 주속비

α : 받음각(AoA)

$Re.N$: 레이놀즈수

ρ : 공기밀도

σ : 솔리디티(solidity)

θ : 블레이드 피치각

β : 취부각

ϕ : 블레이드 비틀림 각

a : 축흐름 유도계수(축방향 속도저감율)

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 에너지 및 동력공학부문 춘계학술대회(2011. 6. 2., 한국발전교육원) 발표논문임

† Corresponding Author, jklim@jbnu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

- a' : 회전흐름 유도계수(접선방향)
- C : 코드길이
- D : 블레이드 직경
- Ω : 블레이드 회전 각속도
- F_N : 블레이드 추력
- F_T : 블레이드 회전력
- N_{rpm} : 로터의 회전수
- X_d : 최대 두께비 위치

1. 서론

그 동안 국내 풍력발전기용 블레이드의 설계는 해외 기술사례를 도입하여 사용하거나 그것을 이용하여 역공학적인 방법으로 사용한 반면 본 연구는 각 에어포일의 효율을 검증하고 최적 배치를 통한 직접설계(Direct-Design) 방법으로 에어포일(블레이드 각 단면)의 개발 및 효율검증 등 블레이드의 완성 목표이다.

1.1 설계방법

블레이드는 Span 방향에 대한 각 지점별(r/R)에 에어포일의 형상을 수치해석 및 공력설계 방법으로 형성하고 여기에 구조계산을 검토하여 수행하였다. 다시 말하면 설계는 공력특성이 우수한 익형을 도출한 후에 여기에 성능해석과 병행하여 구조계산을 통해 모든 설계과정이 이뤄지며 이런 과정은 설계 요구사항을 만족할 때까지 수정 반복하게 되는데, 블레이드의 성능특성은 에어포일의 양향비, 블레이드의 길이방향으로 익형의 두께분포, 코드길이 분포, 비틀림각 및 회전직경에 의해 결정된다.⁽²⁾

블레이드의 형상설계는 첫 번째 단계에서 정격출력등 설계의 기저 값을 두고 블레이드의 길이를 먼저 결정하고, 다음 단계에서 블레이드 길이의 임의 위치에서 코드 두께비에 따른 양향비가 우수한 각기 다른 Airfoil을 개발하여 선정하고 그 익형의 최적의 조건을 도출하여 각 위치에서 익형의 코드 길이와 비틀림 각을 결정하여 전체 형상을 완성하였다. 그리고 설계된 값으로부터 하중해석을 수행하고 구조설계를 수행하여 형상설계의 적합성을 검토하는데, 형상설계에서 출력계수를 너무 높게 선정하여 설계하면 블레이드에 작용하는 하중이 증가하여 구조설계가 어려워 질 수 있으므로 형상설계와 구조설계를 반복하면서⁽³⁾ 설계 모두 만족하는 상호간의

최적의 값을 구하였고, 독일의 Dewi-OCC와 공동연구하는 Folding blade(강풍에 블레이드 접이식) 풍력발전시스템 개발제품에 적용하였다. 본 논문에서는 구조설계부분은 제외하고, 형상 설계후 성능테스트를 위한 CFD수행 결과를 다루고자 한다.

1.2 블레이드 설계 과정

익형의 성능은 최대양력계수, 양향비, 실속각 등에 의해 달라지므로 이들을 비교 평가하여 익형 모델을 개발하였고, 그 개발 설계된 익형과 기존 익형들을 CFD를 통해 반복해서 비교해 보고 확정하였다.

본 연구의 풍력터빈 운전영역은 변화풍속에서 Cut-out이 없는 계속발전으로 그 범위가 크기 때문에 양력계수의 변화폭도 커지게 되어 넓은 범위의 양력계수에 대해서 양향비가 큰 익형이 바람직하므로⁽⁴⁾ 풍력용 에어포일의 주요 운전 범위인 레이놀즈수가 2.0×10^6 , 마하수 0.4 이하의 영역(본 연구에서 적용 : Rey.No. $0.3 \sim 1.0 \times 10^6$, Mach No. 0.035~0.04)으로 하였다.

개발하고자 에어포일(Airfoil)의 익현의 길이, 익현 길이에 대한 최대 두께비(Riso기준 = 15~30% 범위⁽⁵⁾)의 익현 길이에 대한 위치(X_d), S형 Tail edge의 형상과 비율 등을 수치해석을 통해 구하고, 다시 2D-모델을 제작하여 전산유체해석을 통해 반복 검증하고, 아래의 Table 1과 같이 설계를 수행하였다.

본 연구에서의 설계 과정은 운동량이론과 익요소이론을 함께 적용하여 우선 설계하고자 하는 출력 성능의 블레이드에 대한 기저설계 값을 결정하고, 좌표형성 공식을 통해 Mean Line상에서 Yt, Yc 및 Xu, Yu, Xl, Yl 의 좌표를 구한⁽⁶⁾ 후 X-foil program에 Import시켜 Thickness, 및 Camber peak를 양향비 대비 최적화 시키고 반복과정을 통해 검증하는 방법으로

Table 1 Flow-chart for optimal blade design

Input data: C_D, C_L vs a and Blade num.	↓
Find a for $C_L/C_D \rightarrow \text{Max}$	↓
Determine tip speed ratio (λ)	↓
Find a, a' satisfying $\partial C_p / \partial a = 0$	↓
Compute solidity(σ), Flow angle(ϕ)	↓
Compute pitch angle(θ) by $\theta = \phi - \alpha$	↓
Compute c/R vs r/R	----- END

익형의 1차 형상을 만들어 가고, 다시 Visualfoil Program에서 CFD 해석하는 방법으로 확정한다.

그리고 앞 단계에서 만들어진 각각의 단면형상에 대하여 전체 스판에 방향으로 형상을 형성하여 CFD를 수행하여 풍속에 대한 블레이드의 Torque (F_T) 출력성능을 확인하고, 이를 다시 Nacelle에 부착된 형태(폴딩각도:28~90°)로 CFD를 재수행하여 그 안전성을 확보하였다.

2. 본 론

2.1 블레이드 수치해석

본 연구개발 모델(SM-series)은 아래 Table 2 와 같은 Design parameter로 설계를 위한 수치해석을 시작하였다.

2.1.1 출력계수(C_p) 계산

최적 블레이드의 형상은 출력이 최대가 되는 형상을 구하기 위해 다음 식 (1)의 출력계수를 최대로 하는 형상을 아래 공식의 $(\partial C_p / \partial a) = 0$ 이 되는 조건을 만족하는 방정식으로 구하였다.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_o^3 [4a(1-a)^2] \quad (1)$$

여기서, $4a(1-a)^2 = C_p$ 로, 축방향유도계수 a 관하여 미분하여 $dC_p/da = 0$ 로 하면 $a = 1/3$ 이 된다. 출력계수 최대 값은 $C_{Pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.593$ 이 되며 이를 베츠(Betz)계수라 하는데, 아래 방정식으로 구한다.

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \text{이다.} \quad (2)$$

Table 2 Flow-chart for optimal blade design

Rated power(kW)	3
Number of blades	3
Rated wind speed(m/s)	10
Rotor diameter(m)	3.5
Re.N.	1.0*10^6
Design TSR	6
Air density(kg/m3)	1.225

2.1.2 블레이드 직경(D) 및 유도계수(a,a')계산

블레이드의 직경 결정은 TSR(λ_d)를 구한후, 정격풍속(Rated wind speed, V_r)를 가정해 구하는 데, 설계주속비(λ_d)의 결정은 부하의 형태에 따라 결정된다.^(3,7) 전기에서의 설계주속비는 4~10 범위에 있다. 설계 주속비 및 블레이드 매수의 일반적인 원론에 따르면 2~3매의 블레이드 매수를 갖는 풍력발전기의 주속비 범위는 5~8로 주어 진다.⁽¹⁾ 여기서는 회전수가 빠른 소형 풍력발전기 의 블레이드 연구이므로 발전기 출력 RPM은 발전기의 성능에 맞추어 300으로 설계하여 아래 ㉞에서 구한 $\lambda_d = 6$ 으로 하였고, 이 주속비와 아래 식 (3)을 이용해 블레이드 로터의 직경을 구하였다.

$$D = \sqrt{8Pr/\eta C_p \rho \pi V_D^3} \quad (3)$$

$$\textcircled{㉞} \lambda_d = \frac{N\pi D}{60 \cdot V} = \frac{300 \times \pi \times 3.5}{60 \cdot 10} \approx 6$$

㉞ a 및 a'에 대한 초기값을 가정한다.⁽⁸⁾

$$(a = \frac{1}{3}, a' = 0)$$

㉞ 상기 값을 식 $\phi = \tan^{-1}(\frac{1-a}{1+a'} \times \frac{1}{\lambda_r})$ 에 대입

하여 ϕ 를 계산한다.

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1}(\frac{1-a}{1+a'} \times \frac{1}{\lambda_r}) \\ &= \tan^{-1}(\frac{2}{3} \times \frac{1}{6}) = \tan^{-1}(0.111) = 6.33^\circ \end{aligned}$$

㉞ $\alpha = \phi - \beta$ ($\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r}$)를 이용해 α 를 계산한다. 피치각($\beta = 0$)으로 할 경우, ㉞에서 구한 $\phi = \alpha = 6.33^\circ$ 이다.

㉞ $C_L(\alpha)$ 의 그래프와 표를 이용하여 C_L 를 계산한다. 여기서는 X-foil에서 구한 값을 적용하였다.

$$C_L = 0.1(\alpha + 4\text{deg})(4\% \text{ chamber}),$$

$$\alpha = \frac{C_L}{0.1} - 4\text{deg}, C_L = 0.833$$

㉞ $\frac{4a}{1-a} = \sigma C_L \frac{\cos\phi}{\sin^2\phi}$ 와 $\frac{4a'}{1-a'} = \frac{\sigma C_L}{\cos\phi}$ 를 이용하여 a와 a'를 계산한다.

$$\sigma = \frac{BC}{2\pi r} = 0.02621, C_L(\alpha : 5^\circ) = 0.792,$$

$a = 0.3001$. $a' = 0.00408$ 이다.

㉔ 상기과정에서 얻어진 a 와 a' 를 ㉒에서 가정한 a 와 a' 와 비교해 수렴할 때까지 반복 계산한다.

2.1.3 로터의 회전수(N) 및 Solidity(σ) 결정

로터 블레이드의 정격회전수의 결정은 풍력터빈의 최대효율을 구하기 위해 동력계수를 축간섭계수 (Interference Factor)로 미분하여 구한 C_p 가 최대가 되는 최적의 깃끝 속도비(TSR)를 설정 적용한 아래 (식)으로 결정하였다.⁽⁹⁾

그러나 Generator power(Kw)를 알고, 그 Generator의 정격 회전수(RPM)를 알고 있다면, 소형 풍력발전기의 경우 설계 블레이드를 기어 박스 없이 발전기의 shaft에 직결되므로, 블레이드의 회전수는 이 발전기의 RPM과 같도록 결정할 수도 있다.

$$N_{rpm} = 60 \left(\frac{V_D}{\pi D} \right) \lambda = 300 \quad (4)$$

블레이드 요소이론(BEMT)으로부터의 식과 다음

$$\frac{W^2}{U_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) = 8\pi \lambda \mu^2 a' (1-a) \quad \text{식}$$

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

$\frac{a}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi}$ 로 전개해 Rotor (국소 위치 r/R)의 Solidity,

$$\sigma = \frac{BC}{2\pi r} = \frac{3 \text{ Blade} \times 9.6}{2 \times \pi \times 3.5/2} = 0.02621 \quad (5)$$

Solidity는 근사식 $\sigma \approx \frac{1}{C_L} \frac{16}{9} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^2$ 으로 구할 수도 있다.⁽¹⁰⁾

1.2.4 Chord length 및 수치계산 결과 정리

블레이드 설계를 위한 각 국부위치(r/R)에서 수치해석의 반복과정을 통해 확보한 익형의 공력특성 데이터는 익형의 최대 양향비(C_L/C_D)를 얻을 수 있는 받음각(α)에서의 블레이드 매수, 설계TSR를 이용하여 아래 식과 같이 각 국부 위치에서 무차원 현의 길이를 계산할 수 있다.

$$\frac{C}{R} = \frac{2\pi}{N\lambda C_l} \times \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + [\lambda\mu(1+a')]^2}} \quad (6)$$

그러나 블레이드 제작 용이성 및 제작비용 절감을

Table 3 The numerical results of airfoil

Airfoil	r/R (20%)	r/R (75%)	r/R (100%)
$Vr(m/s)$	10		
C_p	0.588		
Blade Num.	3		
TSR, λ_d	5.45 \approx 6		
D(mm)	3500		
RPM	300		
Thick. ratio(%)	15	10	8
C(mm)	1682	1186	960
$\lambda_r = \frac{r}{R} \lambda_d$	1.2	4.5	6.0
σ_r	0.2296	0.0432	0.0262
$C_L(AoA:5^\circ)$	1.229	0.929	0.865
$C_D(AoA:5^\circ)$	0.0094	0.0098	0.0098
C_L/C_D	130.7	94.8	88.3
a, a'	0.3001,		0.00408

위해 성능에 큰 영향을 미치는 영역인 허브로부터 70% ~ 90% 사이의 영역을 기준으로 1차 방정식에 의한 선형 근사화를 통해 전체 블레이드 국부 위치에서의 현의 길이 분포를 재구성 한다.

$$C = \frac{8\pi r}{BC_{LD}} (1 - \cos \phi) \quad (7)$$

Chord length는 Span 길이에서 지점별로 구한다.

2.2 블레이드 에어포일 결정 방법

상기 공식으로 구한 에어포일을 Design-FOIL Program의 Standard NACA Construction Method로 해석해 보면 에어포일은 Thickness ratio = 0.15%, Reyn Number = 1.0×10^6 , 마하수(Mach Number) = 0.4, AoA = 5도에서, $C_L(1.108)$, $C_D(0.0090)$, C_L/C_D (123.1)로 수치해석을 통한 양향비(C_L/C_D)와 차이를 보였다. 그래서 Fig. 1과 같이 코드(Chord)에 대한 두께 비 분포, 받음각(AoA), Mach Number(0.04)을 조정해 Virtual Summation Construction Method⁽¹¹⁾로 재시험한 결과 $C_L(1.229)$, $C_D(0.0094)$, $C_L/C_D(130.7)$ 로 양향비가 상승함을 확인하였고, 피칭 모멘텀의 중심은 Chord 길이에 대해 Leading edge로부터 26.5% 지점, 익형의 압력 중심점은 Chord 길이에 대해 37.58% 지점으로써, 이와 같은 C_p 분포를 통하여 설계된 Airfoil의 형상을 대표 형상으로 사용하여 블레

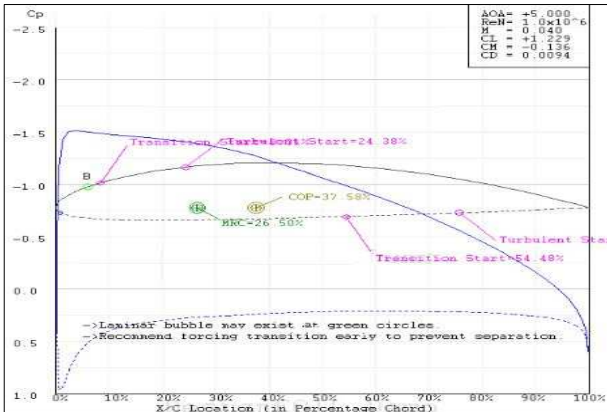


Fig. 1 Virtual wind tunnel analysis(SM20-3715)

이드 전체를 형성하는 기반으로 활용하였다.

그리고 X_d 위치를 Trailing edge(에어포일 후미) 방향에서 Leading edge(에어포일 선단)로 이동시켜 와류시작위치(Turbulent start position)을 당초 32.27%에서 24.38%로 빨리 나타남이 해결해야 할 문제점으로 나타났고, Span 전체 길이방향의 각 지점 (r/R)에서는 이점을 고려하여 두께비(y/C, Thickness Distribution Lower-Y)를 재조정^(10,12)하여 Transition start position을 다시 도출한 결과 동일한 받음각에서 박리시작위치(Transition start position)이 당초 C/X-2.28%에서 C/X-8.31%까지 Trailing edge 방향으로 이동함을 확인하였다. 물론 두께비의 감소에 기인한 문제로 제작과정에서 구조강도에 신중해야 할 필요성이 있었다.

2.3 블레이드 에어포일 CFD 해석

2.3.1 1차 CFD 해석

공력설계를 위한 유동장의 특성을 명확하게 하기 위해 CFD code^(13,14) 통한 airfoil의 공력특성 해석이 신뢰성 측면에서 많이 사용되는데, 대부분의 범용 CFD 코드에서 채택하고 있는 Standard k-ε 난류모델은 에어포일의 받음각(AoA)이 실속각(stall angle) 이상으로 유지되는 경우 박리시작위치(Transition start position)의 부정확한 예측문제 등으로 과도한 양력값으로 나타난다고 잘 알려져 있다^(15,16)는 경계층(boundary layer) 박리에측에 실패한데 기인하는데,⁽⁵⁾ 본 연구에서는 패널법을 기본으로^(17,18) Wilcox 모델,

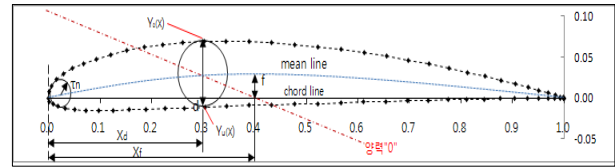


Fig. 2 Max thickness & camber position control

k-ε 모델의 장점만을 취해 개발된 BLM(baseline model)이 탑재된 X-foil Tool(BL Linearization의 백분율(%) 값으로 표현)을 이용해 Lift coefficient calculation option의 값을 Fig. 1과 같이 조정하는 방법과 병행하여 사용하였다.

아래 Fig. 2 및 아래에서 제시하고 있는 (1)~(4) 조건에서처럼 r/R 75% 에어포일의 CFD를 통한 유동해석은 양항비 “0”점인 피칭모멘트의 중심점을 고정된 후 실시한 결과, 앞에서 시뮬레이션한 결과와 Stream line상 Transition start point가 X/C Location에서 유사함을 보였으며, 받음각 6도에서 에어포일 상면의 Turbulent start는 Leading edge로부터 X/C-4.07%에서 미세하게 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 Freestream의 풍속과 시험편 Airfoil의 Angle of attack의 정도에 민감하게 반응하며, 양항비에 크게 영향을 끼침을 확인하였다.

(1) Max. thickness position X_d 의 위치를 Chord에 대해서 Leading edge로부터 30% 범위 이내로 이동하고 두께비를 최소화(8~15% 이하)하여 난류발생 천이점을 최대한 Tail 방향으로 위치 시키도록 하였다.

(2) Max. camber position X_f 를 에어포일 대비 10~15% 정도 Leading edge 방향으로 이동하여 CFD를 수행하였다.

(3) Airfoil thickness ratio 결정의 시발점인 τ_n (Leading edge nose radius)를 에어포일과 외접시킬때, X축 좌표와 Camber가 이루는 각을 변화시켜 가면서 NACA-series와 비교하며 양항비를 검증하였다.

(4) 위 Fig. 2와 같이 양력의 제로 값은 받음각=0에서 두께비 최대원 중심점과 최대캠버 F 위치를 연결한 X좌표상의 점을 연결하는 직선이 Chord와 이루는 각(A)인 양력“0”선을 중심으로 압력분포를 검증해 가며 양항비와의 관계를 분석하고 다시 X-foil에서 재해석 하면 Fig. 3과 같이 주속비에 따른 익형의 양항비 분포로 나타난다.

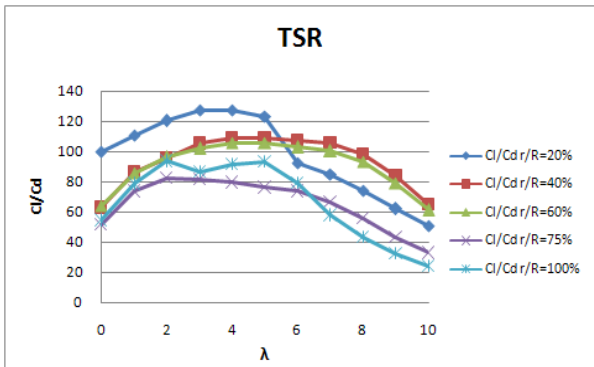


Fig. 3 Tip speed ratio & C_L/C_D

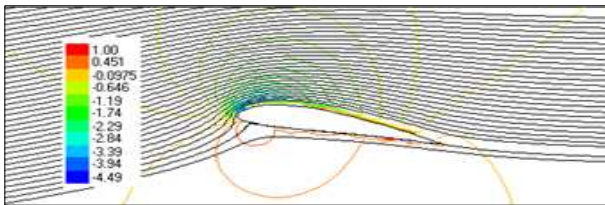


Fig. 4 CDF analysis

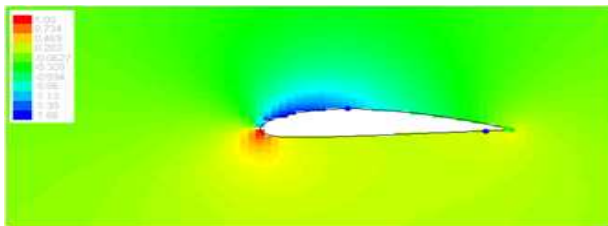


Fig. 5 CDF analysis

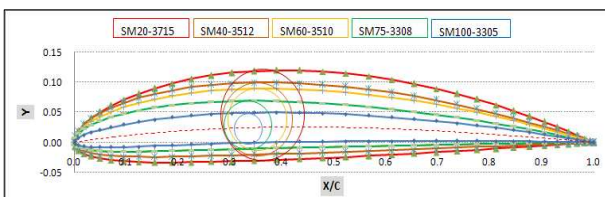


Fig. 6 Airfoil (r/R -20%,40%,60%,75%,100%)

여기서 양항비는 점차적으로 증가하다가 $\lambda=6$ 을 기점으로 급격히 감소함을 알 수 있다.

2.3.2 2차 CFD 해석

Visualfoil Program을 이용해 Fig. 3,4와 같이 다시 NACA-foil 및 Riso-foil 등과 비교하며, 개발모델을 검증하였다.

검증 후, Fig. 6과 같이 r/R 각지점 Airfoil의 개발을 확정하였다.

Table 4 C_L/C_D of camber peak due to adjustment

Camber Peak Position=40%(X/C),2%(Y/C)[조정전]			
AoA	Cl	Cd	Cl/Cd(1)
3	0.681	0.0082	83.04878
4	0.736	0.0090	81.77778
5	0.785	0.0099	79.29293
Camber Peak Position=30%(X/C),2%(Y/C)[조정후]			
AoA	Cl	Cd	Cl/Cd(2)
3	0.699	0.0078	89.61538
4	0.763	0.0088	86.70455
5	0.819	0.0096	85.31250

Table 5 Optimization of C_L/C_D due to AoA

AoA	Cl/Cd				
	$r/R=20\%$	$r/R=40\%$	$r/R=60\%$	$r/R=75\%$	$r/R=100\%$
3	120.366	105.476	101.889	88.481	79.136
4	125.909	108.804	105.670	90.444	84.607
5	130.745	109.109	105.660	94.796	88.265
6	127.264	107.207	102.906	98.491	100.722
7	115.669	105.500	100.472	97.311	93.077

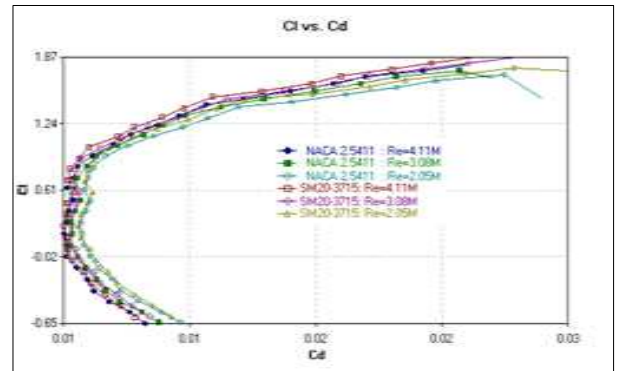


Fig. 7 Airfoil CFD result in visualfoil program

결과적으로, Max camber peak position을 Leading edge 방향으로 Table 2와 같이 이동하고 재검증 했을때 양항비는 Table 4와 같이 약6% 개선됨을 확인하였고, Fig. 7과 같이 NACA2411과 동일조건에서 비교한 결과 성능이 우수함을 확인하였다.

2.4 블레이드 에어포일 결정

같은 방법으로 고유모델 SM-series로 개발하여 대표형상인 r/R 에 대하여 5개 지점의 Airfoil을 받음각에 따른 아래 Fig. 9는 설계된 회전익의 3차원 형

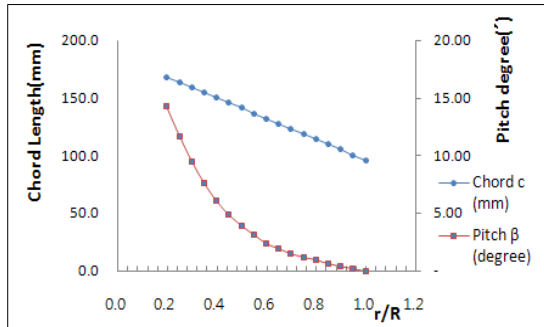


Fig. 8 Chord length & Twist angle to span

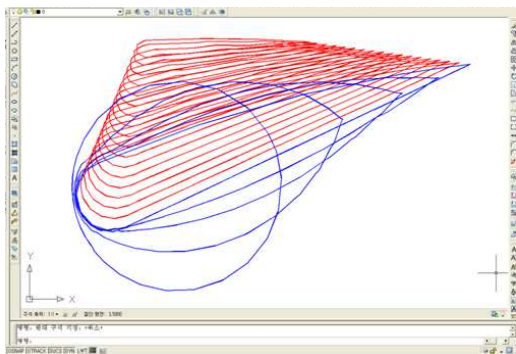


Fig. 9 2D-CAD drawing in hub point

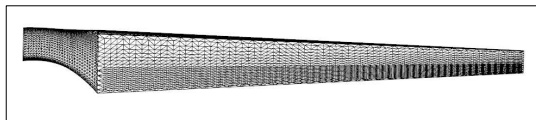


Fig. 10 Blade section

상으로서 비틀림 각에 의한 익형의 변화를 허브에서 본 단면으로 표현하였고, Fig. 10은 완성된 블레이드의 형상이다.

특히, Tip 방향으로 Taping 시켰는데, 이는 Tip shape의 Efficiency losses를 1.5% 이하로 하기 위한 목적이다.^(3,19)

2.6 Folding Blade 성능 테스트

상기에서 형성한 블레이드에 대해 Table 7의 조건 등으로 90도에서 Vortex lattice method 방법으로 CFD를 수행하여⁽²⁰⁾ 계산하고 최적화 시킨 결과, C_P, C_T 는 Fig. 13과 같이 나타났다. C_L/C_D 를 최적화 하여 Table 5에 나타내었다.

2.5 블레이드 최적화 형상 결정

각 Airfoil chord length 및 에어포일의 공력특성을

Table 6 Chord, Twist, Thickness ratio for span

r/R	radius (mm)	Chord (mm)	Pitch (β)	Thick. ratio(%)
0.20	350	168.2	14.30	14.6
0.25	438	163.7	11.60	14.0
0.30	525	159.2	9.40	13.4
0.35	613	154.7	7.60	12.8
0.40	700	150.2	6.10	12.2
0.45	788	145.7	4.90	11.6
0.50	875	141.1	3.90	11.0
0.55	963	136.6	3.10	10.4
0.60	1,050	132.1	2.40	9.8
0.65	1,138	127.6	1.90	9.2
0.70	1,225	123.1	1.50	8.6
0.75	1,313	118.6	1.20	8.0
0.80	1,400	114.1	0.90	7.4
0.85	1,488	109.6	0.60	6.8
0.90	1,575	105.0	0.40	6.2
0.95	1,663	100.5	0.20	5.6
1.00	1,750	96.0	0.00	5.0

Table 7 Main data of the turbine system

Diameter	3.5 m
Blade number	3
Design wind speed	10 m/s
λ - design	6

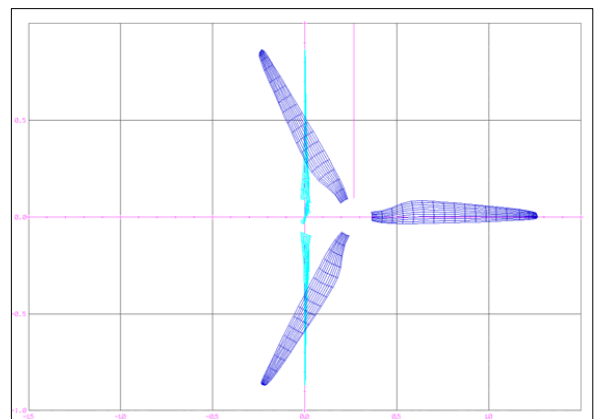


Fig. 11 Vortex model of the blade

최적화⁽¹²⁾하여 Table 6 및 Fig. 8과 같이 각 지점별 (r/R) 형상을 구한 후, Hub로부터 Pitching moment를 일치시켜 배치하였다.

Rotor를 Fig. 11, 12와 같이 inclination angle 90°에

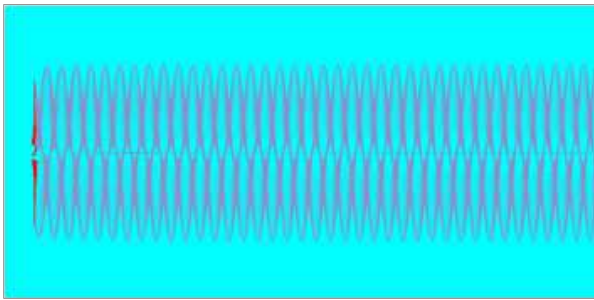


Fig. 12 Vortex grid behind the turbine blade

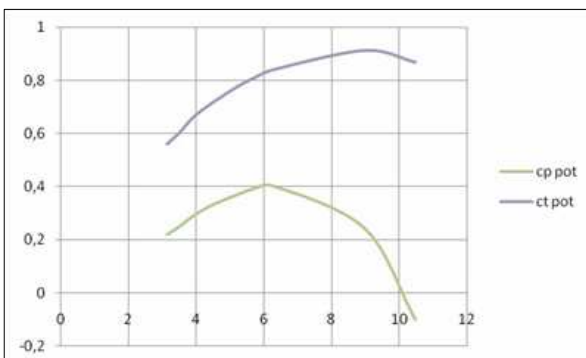


Fig. 13 Results of the optimization



Fig. 14 Folding wind turbine design for CFD

서 Vortex lattice method로 CFD를 수행하여 Fig. 13과 같이 출력계수(C_p), 추력계수(C_T)를 구했고, 다시, Fig. 14와 같이 Folding 각도별 성능테스트를 실시한 결과, 각각의 주속비(Tip speed ratio)에서 각도별로 출력계수(C_p), 추력계수(C_T)를 구한 것을 Fig. 15에 나타냈고, Fig. 16은 변화 풍속에 따른 각도별 Power(P_{kw})과 Torque(T_N)이다.

본 연구에서 중요한 목적중의 하나는 블레이드의 폴딩과 그 폴딩 각도별 출력성능의 정도를 파악하는 것이며, Folding후 다시 Unfolding시에 원심력(Centrifugal force)과 Spring pack(Unfolding을 돕는 역

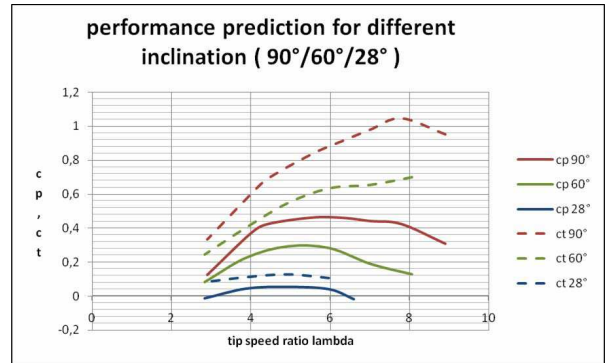


Fig. 15 Calculation results with CFD method /analysis for different blade inclination

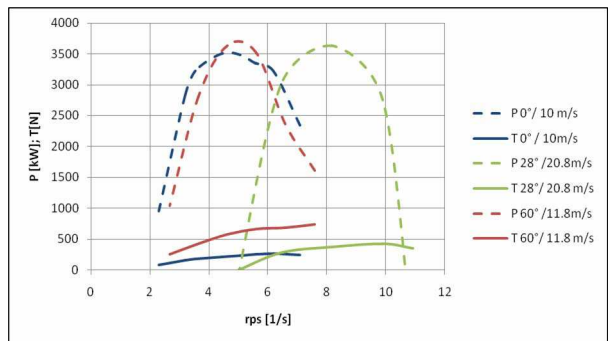


Fig. 16 Performance chart for different inflow speed

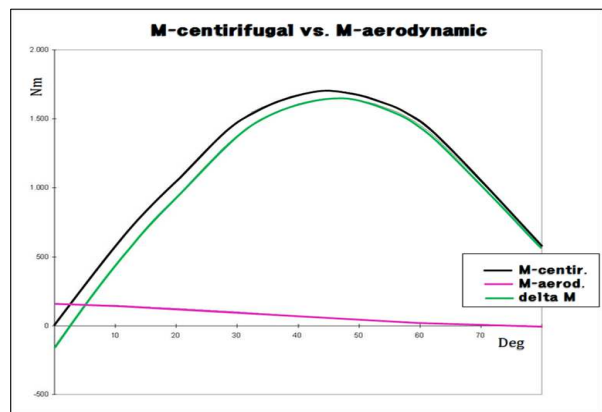


Fig. 17 M-centrifugal vs. M-aerodynamic

할)의 Balancing 문제를 확인하는 것인데, 이를 확인한 결과 풍속 변화에 따른 Aerodynamic Load와 Centrifugal force의 합력이 초기 설정한 Spring pack의 탄성력과 Unbalance로 재조정하여 아래 그림과 같은 결과를 얻었다.

상기 Fig. 17은 폴딩각에 따른 블레이드에 작용하

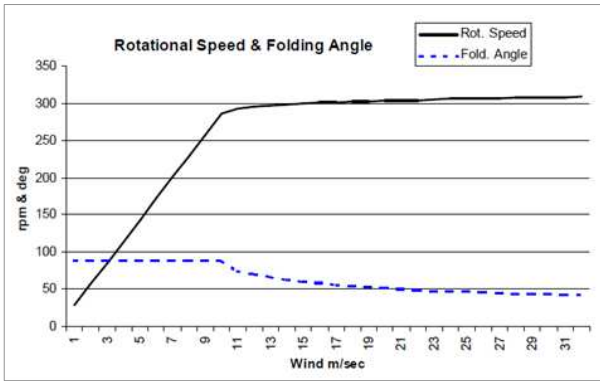


Fig. 18 RPM for rotational speed & Folding angle

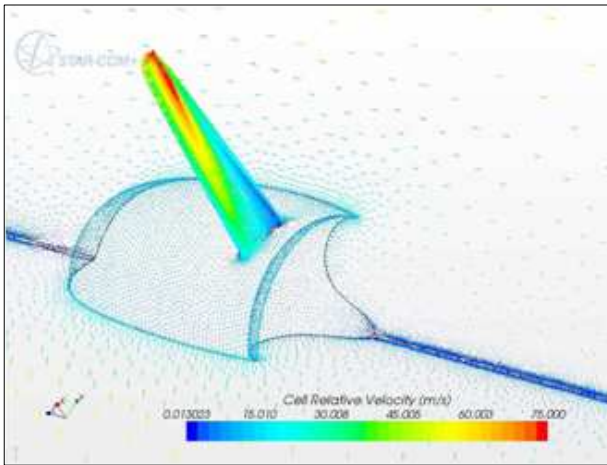


Fig. 19 Flow around the wind turbine

는 풍압과 원심력을 테스트 하였는데, 이는 풍속이 강해서 회전수가 빠를때 폴딩이 가능한지 여부를 테스트하기 위해서 이며, 약 폴딩 45 Dgrees에서 원심력이 가장 강하게 작용하는 것으로 나타났고, 각 풍속에 따른 폴딩각별 출력은 Fig. 18과 같이 정격 풍속 10.5m/s에서 회전속도 285RPM 이상부터 정격출력이 생산되며, Centrifugal force and Aerodynamic loads 합력이 Spring forces와 균형(Balancing)을 유지하다가 이때부터 Foilding됨을 확인할 수 있었다.

아래 Fig. 19는 3D-Tool Pro.를 사용하여 풍하중 테스트 결과로 블레이드의 CFD 적용 구조하중은 1.55Kg으로 하였으며, 구속조건을 Nacelle에 대한 고정으로 하여 수행하였다.⁽²⁰⁾ 이 블레이드의 전체의 무게 중심은 동일한 재료를 충전하였다고 가정하고 표면 두께를 고려하여 계산한 결과 r/R

= 0.92m/1.75m로 계산되었다.

상기 Fig. 19는 블레이드의 안전율을 고려하여 풍속 10 ~ 75m/s까지 테스트한 결과로, 제작상의 문제가 있겠지만 강풍에서도 안전함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 수치해석 및 X-foil Pro., Visualfoil 5.0 prgram을 이용하여 SM-series Airfoil에 대해 CFD 해석을 수행하였으며, 3D-Tool Pro.으로 검증하였고 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 고안된 최적의 에어포일은 제작시 Pitching momentum 등이 약간 달라질 수 있지만, X-foil Simulation에서 Camber peak position을 수차례 반복하며 전체 발전효율을 6%까지 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

(2) 개발한 에어포일을 통해서, 받음각(Angle of Attack)이 커져도 MRC(Pitching moment Reference Center)를 X/C 위치상에 일정하게 고정할 경우 양향비는 Thickness Ratio의 변화 보다 Camber peak location의 변화에 더 민감함을 확인하였다.

(3) 폴딩각에 따른 블레이드에 작용하는 풍압과 원심력의 합력은 Rotor folding 45degrees에서 최고이며, Span 길이 전체의 무게 중심부에 집중 되는 극한하중 작용점을 Root 부분으로 조정해 원심력을 경감시켜 파손에 대비할 수 있음을 확인하였고, 이때 고강도, 경량의 재료를 선택하여야 할 필요성을 확인하였다.

(4) 정격출력(10.5m/s)이상, 285RPM 이상에서 Wind turbine은 Cut-out 없이 계속 발전이 가능하며, Centrifugal force와 Aerodynamic load 합력이 spring force와 균형(balancing)을 유지시켜 블레이드가 파손되지 않음을 확인할 수 있었다.

(5) 본 연구에 적용한 블레이드 Folding System 이 Cut-out speed 이후도 폴딩각(Fig. 14 참조 - 90도, 60도, 28도)에 따라 정격출력을 얻을 수 있음을 확인하였다.

이는 국내 풍황의 특징인 태풍, 돌풍등 난류특성에 맞는 Folding blade Down wind Turbine System 형식에 대한 신뢰성을 어느 정도 확보 할 수 있는 것으로써, 이 분야 특허와 원천기술 확보로 향후 중.

대형으로의 Up-scale의 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 지역혁신인력양성사업의 지원으로 수행된 결과로 관계자 여러분께 감사드리며, 연구에 많은 도움을 주신 교수님들(손충렬, 이영호, 최석우, 강승희)과 공동연구에 참여하여 도움 준 DEWI-OCC, Dierken Engineering GmbH에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Korea Institut of Energy Research, 2003, "A Project for Construction of Wind Turbine Test Field," *Small Wind Turbine Design*, Vol. 5, pp. 104~106.
- (2) Maalawi, K. Y. and Badawy, M.T.S., 2000, "A Direct Method for Evaluating Performance of Horizontal Axis Wind Turbines."
- (3) Ministry of Knowledge Economy(2004-N-WD11-P-05), 2006, "Preparation of a Guide for Permitting and Enhancement of Public Acceptance of Wind Power Development In Korea."
- (4) Kim, B.-S., Kim, M.-E. and Lee, Y.-H., 2005, "A Comparative Study on the Turbulence Models for General CFD Code to Predict the Power Characteristics of a Wind Turbine Blade."
- (5) Fuglsang, P. and Bak, C., 2004, "Development of the Risø Wind Turbine Airfoils" DK-4000 Roskilde.
- (6) Guerrero, J. E., 2009, "Effect of Cambering on the Aerodynamic Performance of Heaving Airfoils," University of Genoa, Italy.
- (7) Korea Institut Of Energy Research(KIER-A36301), 2002, "Develop of Computational Fluid Dynamic Code With Reaction (III)."
- (8) Lanzafame, R. and Messina, M., 2007, "Fluid Dynamics Wind Turbine Design: Critical Analysis, Optimization and Application of BEM Theory."
- (9) Vitale, A.J. and Rossi, A.P., 2007, "Computational Method for the Design of Wind Turbine Blades" Argentina.
- (10) Ameku, K., Nagai, B. M. and Roy, J. N., 2008, "Design of a 3 kW Wind Turbine Generator with Thin Airfoil Blades," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, Issue 8, pp. 1723~1730.
- (11) Thumthae, C. and Chitsomboon, T., 2008, "Optimal Angle of Attack for Untwisted Blade Wind Turbine."
- (12) Henriques, J.C.C., da Silva, F.M., Estanqueiro, A.I. and Gato, L.M.C., 2009, "Design of a New Urban Wind Turbine Airfoil Using a Pressure-Load Inverse Method," Portugal.
- (13) Jureczko, M., Pawlak, M. and Męzyk, A., 2005, "Optimisation of Wind Turbine Blades," pp.464~466
- (14) da Silva, G. F., Marin, J.C. and Barroso, A., 2011, "Evaluation of Shear Flow in Composite Wind Turbine Blades" *School of Engineering, University of Seville, Spain, Shear flow evaluation*, pp.1832~1841
- (15) Kim, B.-S., Kim, M.-E. and Lee, Y.-H., 2006, "Predicting the Aerodynamic Characteristics of 2D Airfoil and the Performance of 3D Wind Turbine using a CFD Code," pp. 1~8.
- (16) Sicot, C., Devinant, P., Loyer, S. and Hureau, J., 2008, "Rotational and Turbulence Effects on a Wind Turbine Blade. Investigation of the Stall Mechanisms," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, Issues 8-9, pp. 1320~1331.
- (17) Korea Institut Of Energy Research, 2006, "Low Speed Wind Turbine Blade Development I," *Composit Manufacturing Process*, Chapter3, pp. 6~18.
- (18) Kim, B.-S., Kim, M.-E. and Lee, Y.-H., 2005, "Basic Configuration Design and Performance Analysis of a 100Kw Wind Turbine Blade using Blade Element Momentum Theory," pp. 1~6.

- (19) Habali, S.M. and Saleh, I.A., 1999, "Local Design, Testing and Manufacturing of Small Mixed Airfoil Wind Turbine Blades of Glass Fiber Reinforced Plastics," Part I: Design of the Blade and Root.
- (20) Dierken, P., 2010, "Anlagenentwicklung WKA 3KW Blattdaten: the Development of a Wind Energy Converter 3KW." Dierken Engineering GmbH, Rostock.
- (21) Ji, S. W., Park, S. K., Kim, T. S., 2010. "A Numerical Study on the Effect of Mountainous Terrain and Turbine Arrangement on the Performance of Wind Power Generation" *Trans of the KSME B*, Vol. 34 No. 10, pp. 907~916.