

# 서남권 도서지역에 적합한 1kW급 수평축 풍력터빈 로터 블레이드 설계 및 유동해석

이준용\* · 최낙준\*\* · 윤한용\*\*\* · 최영도\*\*\*\*

## Design and Flow Analysis on the 1kW Class Horizontal Axis Wind Turbine Rotor Blade for Use in Southwest Islands Region

Jun-Yong Lee\*, Nak-Joon Choi\*\*, Han-Yong Yoon\*\*\*, Young-Do Choi\*\*\*\*

Key Words : Horizontal axis wind turbine(수평축 풍력터빈), Rotor blade(로터 블레이드), Flow analysis(유동해석), BEMT(날개요소 운동량 이론), Power coefficient(출력계수)

### ABSTRACT

This study is to develop a 1kW-class horizontal axis wind turbine(HAWT) rotor blade which will be applicable to relatively low wind speed regions in southwest islands in Korea. Shape design of 1kW-class small wind turbine rotor blade is carried out using a blade profile with relatively high lift to drag ratio by blade element momentum theory(BEMT). Aerodynamic analysis on the newly designed rotor blade is performed with the variation of tip speed ratio. Power coefficient and pressure coefficient of the designed rotor blade are investigated according to tip speed ratio.

### 1. 서론

우리나라 서남권 연안에는 다수의 섬들이 존재하며, 특히 신안군에는 1000개 이상의 섬이 분포하고 있다. 이 도서지역에서 72개의 섬은 주민들이 실제 거주하는 유인도이며, 지역 주민들의 인구수는 해마다 감소하고 있지만, 생활수준이 향상되어 편의시설이 증가함에 따라서 전력사용량은 해마다 증가하는 경향을 나타내고 있다.<sup>(1,2)</sup>

또한, 최근에는 이 지역에서 생산되는 수산물의 부가가치를 높이기 위한 수산물 가공시설의 증설이 추진되고 있으며, 무인도를 포함한 도서지역의 관광자원을 개발하기 위한 지자체의 계획도 수립 중에 있기 때문에, 전력계통망이 연계되기 어려운 비교적 작은 규모의 섬들의 경우 디젤발전설비를 기본으로 하는 자가발전시설의 확충에 의한 더 많은 발전량의 요구가 예상된다.

그러나 이러한 도서지역에서의 매년 증가하는 전력사용량

에 대해서 디젤발전설비에 의한 전력공급은 그 한계가 존재하며, 전력계통망을 거주 인구수가 적은 도서지역까지 연계하기에는 실제적으로 막대한 설치비용으로 인한 현실적인 어려움이 존재한다.

따라서 기존의 화석연료에 의한 발전시설과 더불어 최근 크게 활성화되고 있는 풍력 및 태양광 발전 등의 신재생에너지 자원을 함께 활용하는 복합발전시스템<sup>(3,4)</sup>을 구축하게 된다면 청정에너지의 생산에 의한 친환경적인 지역 이미지가 구축되어 관광산업 진흥에도 크게 기여할 수 있고, 한층 더 효율적이고 안정적인 전력 공급이 가능하게 되어 주민들의 생활환경이 크게 개선될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 서남권 도서지역에 적합한 1kW급 소형풍력발전용 로터 블레이드를 개발하기 위해서 이 지역의 전력사용량 및 풍황자원에 대해서 조사하였고, 날개요소 운동량 이론(Blade Element Momentum Theory)을 적용한 최적 로터 블레이드 형상 설계를 수행하였다. 또한, 로터 블레이드의 공력특성을 검토하기 위하여 CFD해석을 수행하였으며, 출력계수 및 압력계수에 대해서 상세하게 검토하였다.

\* 목포대학교 대학원

\*\* (주)디엔디이

\*\*\* 목포대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : ydchoi@mokpo.ac.kr

## 2. 서남권 도서지역 전력사용량 및 풍향 분석

### 2.1 전력사용량 분석

Fig. 1은 신안군 지역의 거주 인구수 및 연평균 전력사용량<sup>(1,2)</sup>을 나타내고 있으며, 거주 인구수는 매년 감소하고 있지만, 전체 전력사용량은 매년 증가하고 있기 때문에 1인당 전력사용량이 매년 크게 증가하고 있는 것으로 확인되었다.

특히, Fig. 2는 신안군 흑산도의 용도별 전력사용량을 나타내고 있다. 흑산도 전체 전력사용량 중 일반용(공공용 및 영업용)은 연중 내내 가장 많이 사용하고 있으며, 농사용은 가을 수확 시기에 상대적으로 많은 전력 사용을 보이고 있는 반면, 그 외 용도별 사용량은 연중 내내 계절에 상관없이 대체적으로 일정한 사용량을 나타내고 있다.

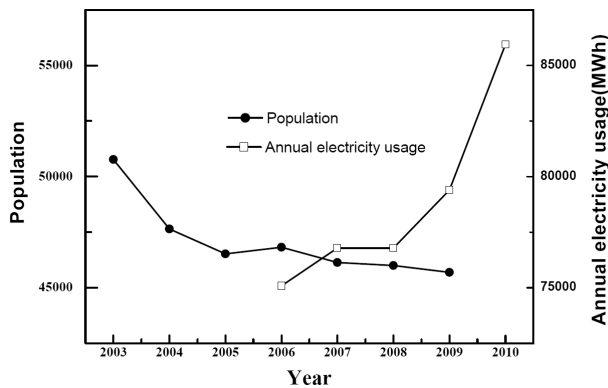


Fig. 1 Population and Annual electricity usage in Shinan-gun

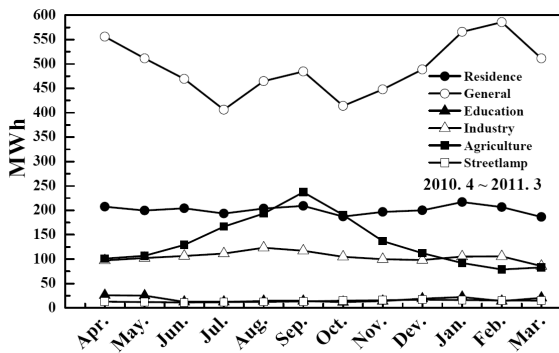


Fig. 2 Averaged electricity usage in Heuksan island

Table 1 Comparison of regional electricity usage

Average daily electricity usage (per household)	
Gwangju Metropolitan city(in 2005)	8.06 kWh
Jeollanam-do(in 2005)	6.56 kWh
Shinan-gun	4.7 kWh
Heuksan Island in Shinan-gun	2.8 kWh

Table 1은 광주광역시, 전라남도, 신안군, 신안군 흑산도의 단위 지자체별 가구당 하루 평균전력사용량에 대해서 조사한 결과이며,<sup>(2)</sup> 신안군 흑산도의 하루 평균 전력사용량은 광주광역시 하루 평균전력 사용량과 비교해서 2배 이상의 큰 차이로 적은 사용량을 나타내고 있다. 이러한 결과는 대도시에서의 용도별 전력사용량과 중소도시 및 도서지역에서의 전력사용량에서 차이가 나기 때문으로 판단된다.

한편, 신안군 흑산도는 육지지역과의 전력망이 연계 되어 있지 않기 때문에 디젤발전기에 의한 자가발전시설에 의해 서민 전체 주민들의 사용전력량을 공급하고 있고, 향후 증가 추세에 있는 전기 사용량을 감안할 경우 안정적인 전력공급 시스템의 추가적인 확보가 요구되고 있다.

### 2.2 풍향 분석

풍력발전시스템을 설치하기 위해서는 설치지점에서의 다년간에 걸친 풍향과 풍속에 대한 풍향 데이터 측정을 통해서 정확한 설계풍속의 결정과 신뢰성 있는 블레이드 형상설계가 요구되기 때문에 설치지점에서의 풍향자원 조사가 필수적으로 선행되어야 한다.

Fig. 3은 우리나라 육·해상에 산재한 기상청 기상관측소, 무인관측소, 국토해양부 등대관측소 및 해상부이 등 540여 측정지점의 5년간(1999년~2003년) 기상자료를 김현구 등<sup>(5)</sup>에 의해 수합 및 정리된 분포지도이다. 서남권 지역의 원으로 표시된 영역이 신안군 도서지역을 포함하고 있으며, 도서지역이 위치한 해상에서 비교적 높은 풍속을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 신안군 흑산도에서 측정된 연중 풍속을 나타내고 있으며, 지상 10m의 관측탑에서 측정한 결과 평균풍속이 약 5.6 m/s를 나타내었고, 여름철보다는 겨울철 풍속이 상대적으로 높게 나타났다.<sup>(6~8)</sup>

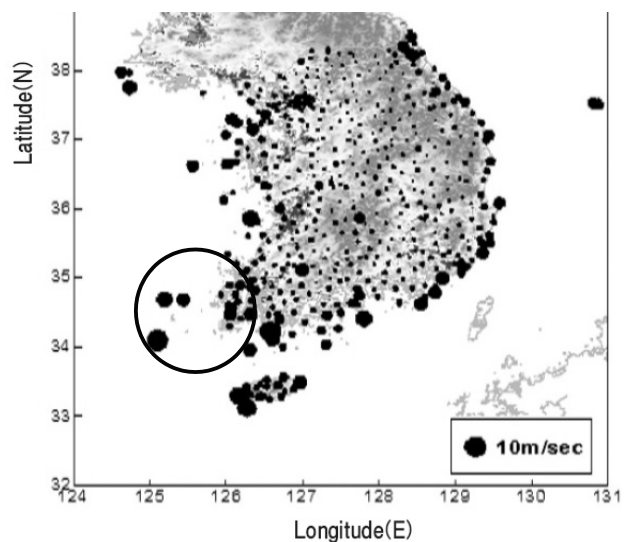


Fig. 3 Mean wind speed at the observation sites

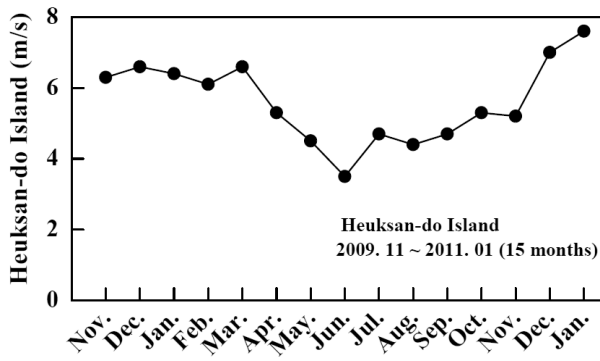


Fig. 4 Wind speed measured at Shinan-gun Heuksan Island (elevation 10m) regions

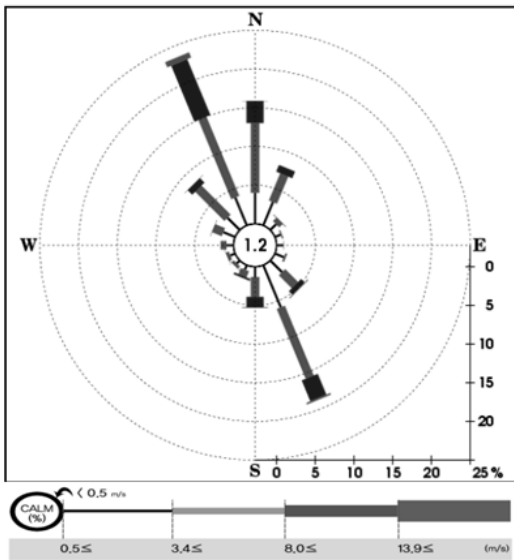


Fig. 5 Wind rose measured at Shinan-gun Heuksan Island region (elevation 10m)

Fig. 5는 신안군 흑산도에서 측정된 풍향 데이터를 이용하여 작성한 바람장미도를 나타내고 있다.<sup>(9)</sup> 전반적인 주풍향이 겨울철의 북서풍과 여름철의 남동풍으로 이루어져 있기 때문에 이 지역에 풍력발전시스템을 설치할 경우 일정한 풍향으로부터 안정적인 풍력발전이 가능할 것으로 예상된다.

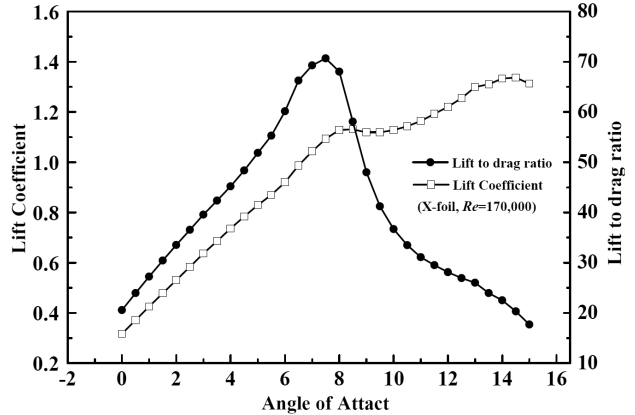
### 3. 1kW급 수평축 풍력터빈 로터 블레이드 설계

#### 3.1 1kW급 로터 블레이드 익형 선정

서남권 신안군의 풍향을 고려하여 이 지역에 적합한 1kW급 소형수평축 풍력터빈 로터 블레이드를 설계하기 위하여 익형상에 대해서 검토하였다. Fig. 5에서 검토된 바와 같이 신안군 도서지역에서는 북서풍과 남동풍이 겨울철과 여름철에 일정하게 불어오기 때문에 비교적 안정적인 유입 풍향 및 풍속을 기대할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 Selected rotor blade (a) profile, (b) lift coefficient and lift to drag ratio of NACA 63(2)-415

따라서, 본 연구에서는 로터 블레이드의 설계 운전조건에서 최대양력계수가 높고, 넓은 받음각 범위에서 양항비가 높은 값을 가질 수 있는 익형의 선정을 목표로 하였으며, 신안군 도서지역의 풍향을 고려하여 익형의 공력특성이 비교적 잘 알려진 NACA 시리즈의 익형 중에서 NACA 63(2)-415 익형을 선정하였다.

Fig. 6은 NACA 63(2)-415 익형과  $X-Foil^{(10)}$ 에 의해 계산된 양력계수와 양항비 분포를 보이고 있다. 정확한 익형의 공력성능을 예측하기 위해서는 블레이드 국부 위치에서의 익형 공력특성을 양력계수와 양항비로 나타낼 필요성이 있으며, 양항비가 높게 결정될 수 있도록 하는 점이 우수한 출력성능 확보를 위해 중요하다.<sup>(11)</sup>

본 연구에서 선정한 NACA 63(2)-415 익형은  $Re=170,000$  영역에서 받음각이  $\alpha=7.5deg$ . 일 경우 최대양항비가 약 70으로 상대적으로 매우 높은 값을 나타내고 있으며, 받음각  $\alpha=4 \sim 9deg$ . 의 비교적 넓은 범위에서 50 이상의 높은 양항비를 가지기 때문에 전체적으로 상당히 우수한 성능을 가지는 블레이드 설계가 가능할 것으로 판단된다.

#### 3.2 1kW급 로터 블레이드 설계

양력계수 및 양항비가 상당히 높은 NACA 63(2)-415 익형을 적용하여 1kW급 로터 블레이드의 설계를 수행하였으며, Table 2는 본 연구에서 설정한 설계점 풍속 등을 나타내고 있다.

신안군 흑산도에서 측정된 풍속데이터를 참조할 경우 지상 10m 정도의 비교적 낮은 위치에서는 풍속이 상대적으로

Table 2 Decision of wind velocity for blade design

Designed wind velocity	$V_D=9\text{m/s}$
Cut-in wind velocity	$V_{Cut,in}=3\text{m/s}$
Cut-out wind velocity	$V_{Cut,out}=25\text{m/s}$

Table 3 Optimum design parameters of 1kW class rotor blade by BEMT at 75% of blade spanwise location from hub

Axial flow induction factor	$\alpha=0.331$
Tangential flow induction factor	$\alpha'=0.008$
Inflow angle	$\phi=6.38\text{deg.}$
Angle of attack	$\alpha=7.5\text{deg.}$
Lift coefficient	$C_L=1.094$
Draf coefficient	$C_D=0.015$
Solidity	$\sigma=0.033$
Tip loss	$f=0.988$
Tip speed ratio	$\lambda=7$
Twist angle	$\theta=-1.12\text{deg.}$
Radius	$R=1250\text{mm}$
Blade number	$N=3$
Rotational speed	$n=500\text{min}^{-1}$

낮게 나타나고 있기 때문에 설계점 운전조건도 이러한 풍황 조건에 맞추어 결정해야 할 필요성이 있다. 일반적으로, 1kW 급 수평축 풍력터빈의 로터 블레이드 설치 높이는 약 10~20 m 정도이기 때문에 서남권 도서지역에서 측정된 풍속<sup>(6~8)</sup>을 고려할 경우, 풍력터빈 로터 블레이드 설치 높이에서의 평균 풍속을 약 6 m/s 정도로 예상할 수 있다.

따라서, 설계점 풍속의 경우 출력  $P$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 유입풍속의 3승에 비례하기 때문에 식(2)로 정의되는 주속비(TSR)  $\lambda=7$ 에서 최대출력을 얻을 수 있도록 발전기 회전수를 고려하여 설계풍속을 평균풍속보다 높게 설정하여  $V_D=9\text{m/s}$ 로 하였다.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_{\infty}} \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기밀도,  $A$ 는 수평면적,  $V_{\infty}$ 는 유입 풍속이다.

한편, 본 연구에서는 설치지점의 풍황조건을 고려한 로터 블레이드의 최적설계를 위하여 날개요소 운동량 이론(Blade Element Momentum Theory, BEMT)<sup>(12)</sup>을 적용하였다.

Table 3은 출력이 가장 많이 발생하는 로터블레이드 스패น 방향 길이 75% 지점에서의 기본적인 설계점 인자를 나타내고 있으며, 신안군 도서지역의 풍황조건을 고려하여 저풍속에서도 성능특성이 양호하도록 최적설계인자를 결정하였다.

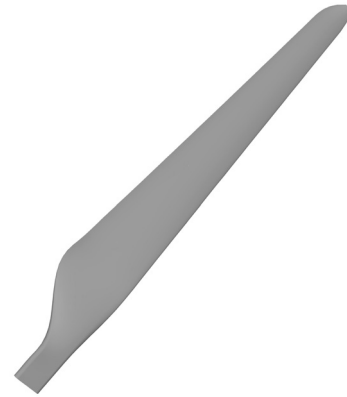


Fig. 7 Schematic view of 1kW class optimized rotor blade model



Fig. 8 Numerical grid of 1kW HAWT rotor blade

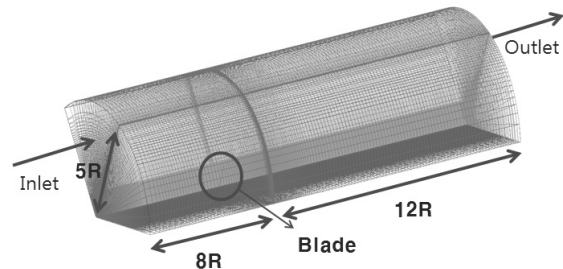


Fig. 9 Total grid system of 1kW HAWT

Fig. 7은 본 연구에서 설계한 1kW급 소형 수평축 풍력터빈 로터 블레이드의 외형도를 나타내고 있으며, 로터 블레이드의 전체 길이방향에 대하여 동일한 익형인 NACA 63(2)-415를 사용하여 설계하였다. 블레이드 반경은  $R=1250\text{mm}$ 이고, 전체 3매의 날개로 구성되며, 설계회전수는  $n=500\text{min}^{-1}$ 로 설정하였다.

## 4. 수치해석 방법

### 4.1 계산격자

Fig. 8과 9는 본 연구에서 설계된 1kW 수평축 풍력터빈 로터 블레이드에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 구성된 로터 블레이드 및 전체유동장에 대한 각각의 계산격자를 보이고 있다. 전체 계산격자수는 계산기의 용량 및 계산시간을



고려하여 약 400만 노드로 생성하였으며, 계산의 수렴성을 높이고 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 hexahedral 구조격자를 사용하여 구성하였다.

블레이드 표면에서 발생하는 실속에 의한 복잡한 유동흐름을 잘 예측하기 위하여 블레이드 표면 주변은 O-grid를 사용하여 블레이드 주위의 유동장보다 격자밀도가 높게 구성하였으나, 계산의 효율성을 고려하여 블레이드 외부는 H-type 격자로 구성하였다.

Fig. 9의 전체유동장에서 계산격자계의 입구 경계면으로부터 로터 블레이드 압력면까지의 거리는 블레이드 반경의 8배, 블레이드 팁 부분부터 뒷면까지는 5배, 블레이드 부압면으로부터 출구 경계면까지 12배의 거리를 확보하였다.

#### 4.2 계산조건

1kW급 수평축 풍력터빈 로터 블레이드의 성능 및 유동에 대한 수치해석을 위해서 본 연구에서는 solver로서 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX<sup>(13)</sup>를 사용하였다. 계산조건으로서 Table 4에 보이는 바와 같으며, 계산유동장의 경계조건으로서, 입구에서는 평균속도 일정, 출구에서는 압력 일정한 조건을 설정하였다. 작동유체로서는 15 °C의 공기를 사용하였으며, 정상상태의 계산을 수행하였다. 난류모델에 대해서는 복잡한 형상의 유동장 벽면에서 발생하는 박리와 와의 예측 및 주류의 흐름을 비교적 잘 표현할 수 있는 것으로 알려진 *k- $\omega$*  SST모델을 적용하였다. 유동장내의 로터 블레이드 회전영역과 고정영역을 동시에 포함하는 유동해석 기법 중 유동 데이터를 두 영역에 서로 전달하기 위한 경계 조건으로 ANSYS CFX에서 지원하는 GGI 기법 중 Frozen Rotor Interface 기법을 적용하였다.

Table 4 Calculation conditions

Condition	Value (designed)
Inlet velocity	6~32 m/s (TSR : 2~10)
Outlet pressure	0 Pa
Revolution speed	500 min <sup>-1</sup>
Turbulence model	<i>k-<math>\omega</math></i> SST

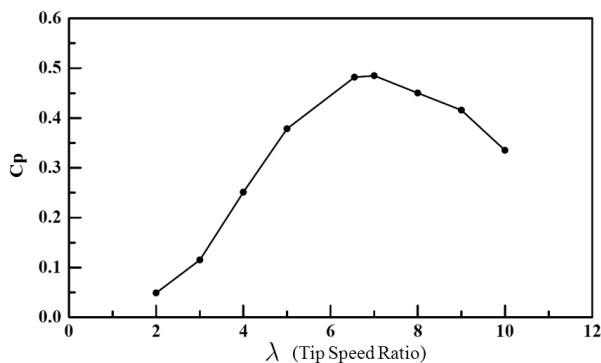


Fig. 10 Power coefficient curve

## 5. 계산결과 및 고찰

### 5.1 출력계수

Fig. 10은 본 연구에서 설계한 1kW급 수평축 풍력터빈 로터 블레이드에 대한 수치해석 결과로부터 출력계수( $C_p$ )에 의한 성능곡선을 주속비( $\lambda$ ) 변화에 따라 나타낸 것이며, 출력계수는 다음의 식(3)으로 정의된다.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A V_\infty^3} \quad (3)$$

$\lambda=7$ 에서 출력계수는  $C_p=0.48$ 의 최대값을 나타내고 있음을 알 수 있다.  $\lambda=7$ 에 해당하는 입구 풍속이 9.3 m/s이고, 표준 대기압 공기밀도 조건에서 약 1.2 kW의 정격 출력이 발생하였기 때문에 본 연구에서 도입한 BEMT에 의한 로터 블레이드 설계법의 신뢰성이 확보된 것으로 판단된다.

한편,  $\lambda=7$  이하의 영역에서는 주속비(TSR)  $\lambda$ 의 정의에 따라 로터 블레이드 상류로부터 접근하는 유속의 범위가 설계 출력이 발생하는 풍속 범위보다 높은 값을 가지므로 블레이드 전연으로 유입되는 상대유입각도가 증가하고, 동시에 실속각 이상으로 받음각이 증가하면서 급격한 실속에 의한 공력특성 저하가 예상된다. 따라서 이 범위의 주속비에서 상당히 낮은 출력특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한  $\lambda=7$  이상의 영역에서는 입구 유속이 설계 출력을 내는 범위보다 감소함에 따라 상대적으로 블레이드 전체 영역에 걸쳐 낮은 범위의 받음각이 형성되고 받음각의 범위가 낮아짐에 따라 적정 받음각의 분포에 비해 익형 공력특성이 저하되므로 출력특성은 점점 감소하는 경향을 보인다.

### 5.2 로터 블레이드 표면 압력계수

Fig. 11과 12는 수치해석에 의한 1kW급 수평축 풍력터빈 로터 블레이드의 공력특성을 검토하기 위하여 블레이드 압력면과 부압면 사이의 압력 차이를 압력계수( $C_{pressure}$ )값을 이용하여 블레이드 반경방향 곡소반경비 및 주속비에 따라서 정량적으로 비교하였다. 그래프 횡축의  $X/C$ 는 무차원 코드길이를 나타내며,  $X$ 는 에어포일의 앞전에서부터 뒷전까지 길이이고,  $C$ 는 코드길이이다. 압력계수는 식(4)를 이용하여 구하였다.

$$C_{pressure} = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty (V_\infty^2 + (rw)^2)} \quad (4)$$

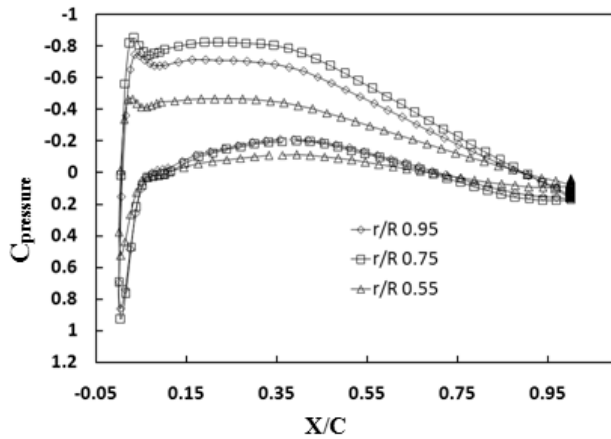


Fig. 11 Pressure coefficient at TSR  $\lambda=7$

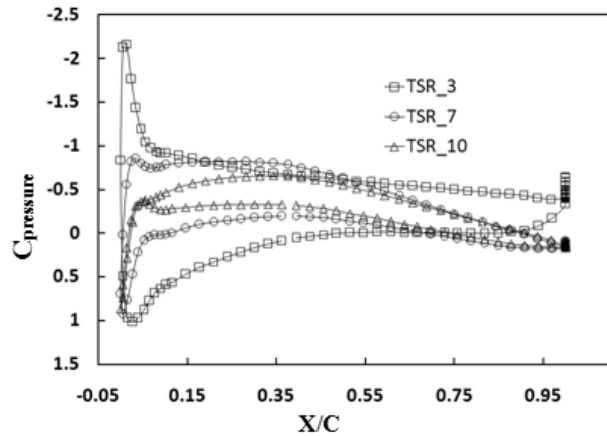


Fig. 12 Pressure coefficient at  $r/R=0.75$

여기서,  $p$ 와  $p_\infty$ 는 로터 블레이드 표면과 유동장 유입측의 정압을 나타내고,  $\rho_\infty$ 는 유입측 흐름의 공기밀도,  $r$ 은 로터 블레이드 해당 스패んに에 대한 블레이드 국소반경방향의 거리,  $\omega$ 는 로터 블레이드의 회전 각속도이다.

Fig. 11에서 주속비를  $\lambda=7$ 로 고정하고 블레이드 반경방향 각 국소반경비에서의 압력계수를 나타내고 있으며, 국소반경비  $r/R=0.75$ 에서 블레이드 압력면과 부압면 사이의 압력계수 차이가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 BEMT에 의한 블레이드 설계에서는 블레이드의 반경방향 국소반경비  $r/R=0.75$  부근에서 가장 큰 출력이 발생하도록 설계되기 때문이다.

또한, Fig. 12에서는 국소반경비  $r/R=0.75$ 에서 주속비 (TSR)가 변화할 경우의 압력계수 분포를 보이고 있다. 주속비가  $\lambda=3$ 에서 블레이드 압력면과 부압면 사이 압력계수 전체 면적이 가장 넓게 나타나고 있지만, 전 절에서 설명되었듯이, 주속비  $\lambda$ 가 상대적으로 낮을 경우, 블레이드 상류로부터 접근하는 유속의 범위가 설계 출력이 발생하는 풍속 범위보다 높은 값을 가지므로 블레이드 전연으로 유입되는 상대

유입각도의 증가에 따라서 급격한 실속에 의한 공력특성 저하가 예상된다.

### 5.3 블레이드 표면 유선분포

Fig. 13과 14에서 주속비의 변화에 따른 블레이드 압력면과 부압면에서의 유선을 보이고 있다.

주속비가  $\lambda=7$ 에서는 블레이드 압력면과 부압면의 반경방향 국소반경비  $r/R=0.75$  부근에서 매우 높은 유속이 흐

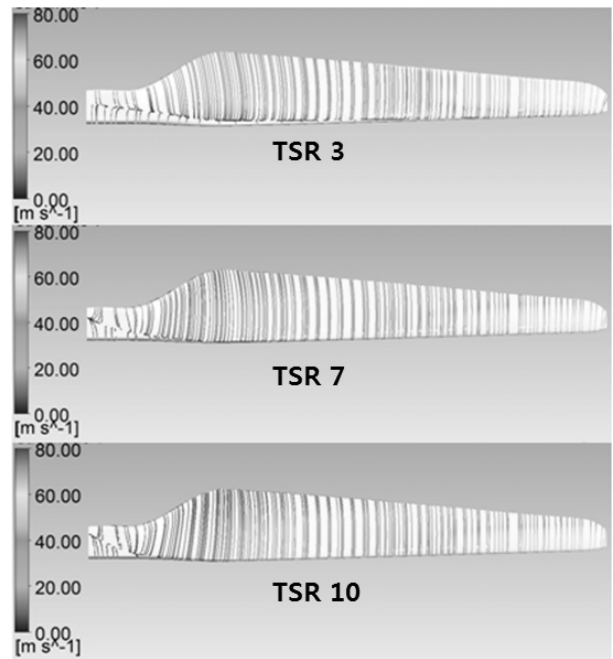


Fig. 13 Streamlines on blade surface of pressure side

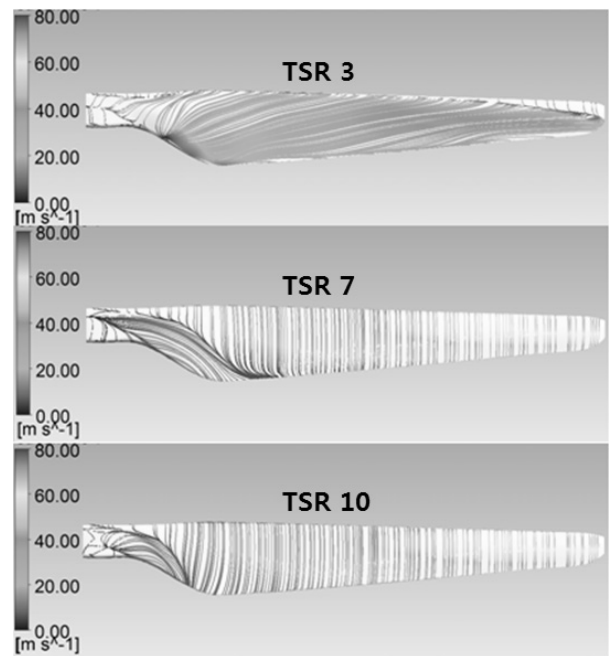


Fig. 14 Streamlines on blade surface of suction side

름 방향으로 나타나고 있으며,  $\lambda=3$ 과 10에서의 결과와 비교하여 상대적으로 넓은 면적에 걸쳐서 높은 유속이 나타나고 있다.

한편, 주속비가  $\lambda=3$ 에서는 블레이드 압력면과 부압면 모두에서 반경방향 2차흐름인 반경류가 매우 크게 나타나고 있다. 원심가속력 및 압력차에 의해 발생한 반경류는 주속비가 낮아짐에 따라 허브로부터 팁 방향으로 진행되고 있으며, 주속비가 낮을수록 팁 방향으로 상당부분 진행되고 있음을 알 수 있다. 이러한 반경류의 형성은 블레이드 국부 단면 에어포일의 공력특성 변화에 큰 영향을 미치며, Fig. 10에서 보이는 바와 같이 상대적으로 매우 낮은 출력계수의 원인이 된다.

## 6. 결 론

도서지역의 풍황에 적합한 풍력터빈 블레이드를 설계하기 위하여 서남권 연안 및 도서지역의 풍속 및 풍향을 검토하여 1kW급 수평축 풍력터빈 로터 블레이드에 대한 설계 및 유동해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 서남권 도서지역에서는 겨울철에 북서풍, 여름철에 남동풍이 일정하게 불고 있으며, 흑산도에서는 계측높이 10 m에서 평균풍속이 5.61 m/s로 나타남에 따라 국내에서는 비교적 바람자원이 우수한 것으로 평가된다.
2. 서남권 도서지역의 풍황조건을 고려하여 1 kW급 수평축 풍력터빈 로터 블레이드를 설계하였으며, 수치해석 결과  $\lambda=7$ 에서 출력계수값이  $C_p=0.48$ 의 최대값을 나타내고, 이때의 출력이 1.2kW를 나타냄에 따라 설계법의 신뢰성을 확보할 수 있었다.
3. 로터 블레이드의 수치해석결과로부터 주속비가  $\lambda=7$ 에서는 블레이드 압력면과 부압면의 반경방향 국소반경비  $r/R=0.75$  부근에서 상대적으로 넓은 면적에 걸쳐서 높은 흐름방향 유속이 나타나고 있으며, 이러한 흐름방향의 높은 유속으로부터 최대출력이 발생하는 것을 확인하였다.
4. 주속비가  $\lambda=3$ 에서는 블레이드 압력면과 부압면 모두

에서 반경방향 2차흐름인 반경류가 매우 크게 나타나고 있으며, 이러한 반경류의 형성은 블레이드 국부 단면 에어포일의 공력특성 변화에 큰 영향을 미치며, 상대적으로 매우 낮은 출력의 원인이 된다.

## 후 기

본 연구 결과는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

## 참고문헌

- (1) 신안군, 2009, “2009 신안통계연보,” 제49회.
- (2) 한국전력공사 목포지점, 2011, “광주-전남지역 전력판매량 통계자료,” 한국전력공사 내부자료.
- (3) 조동훈, 배철오, 박영산, 2007, “목포해안지역의 10kW급 풍력과 최적의 태양광 복합발전시스템에 관한 연구,” 해양환경안전학회, 제13권, 제1호, pp. 69~73.
- (4) 권병국, 이승철, 박찬업, 2002, “태양광-풍력 복합발전 시스템의 최적구성에 관한 연구,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1306~1308.
- (5) 김현구, 최재우, 이화운, 정우식, 2005, “한반도 바람지도 구축에 관한 연구(I. 원격탐사자료에 의한 종관 바람지도 구축),” 신재생에너지, Vol. 1, No. 1, pp. 1~10.
- (6) 기상청, 2009, “기상월보,” <http://www.kma.go.kr/>
- (7) 기상청, 2010, “기상월보,” <http://www.kma.go.kr/>
- (8) 기상청, 2011, “기상월보,” <http://www.kma.go.kr/>
- (9) 기상청, 2009, “기상연보,” <http://www.kma.go.kr/>
- (10) <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>
- (11) 김범석, 2005, “수평축 풍력발전용 터빈 블레이드 최적설계 및 공력성능해석에 관한 연구,” 한국해양대학교 공학박사 학위논문.
- (12) Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, 2001, “Wind Energy Handbook,” John Wiley & Sons, Ltd, pp. 41~65.
- (13) ANSYS Inc., 2010, “ANSYS CFX Documentation,” Ver. 12, <http://www.ansys.com>.