

# BEMT를 이용한 5 kW급 수평축 풍력발전용 로터 블레이드 형상 최적설계에 관한 연구

김 문오<sup>1)</sup>, 이 민우<sup>2)</sup>, 김 창구<sup>1)</sup>, 김 태형<sup>3)</sup>, 이 영호<sup>4)</sup>

## Study on the Optimum Rotor Blade Design of the 5 kW HAWT by BEMT

\*Mun Oh KIM, \*\*Min Woo LEE, \*Chang Goo KIM, \*\*\*Tae Hyung Kim, \*\*\*\*Young Ho LEE

**Abstract** : The optimum design and the performance analysis software called POSEIDON for the HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) was developed by use of BEMT. The Prandtl's tip loss theory was adopted to consider the blade tip loss. The aerodynamic characteristics of NACA 63415 airfoils were predicted via X-FOIL and the post stall characteristics were estimated by the Viterna's equations. All the predicted aerodynamic characteristics are fairly well agreed with the Velux wind tunnel test results. The rated power of the testing rotor is 5kW at design conditions. The power, estimated by use of predicted lift and drag coefficient via X-FOIL becomes a little higher than experimental one.

**Key words** : HWAT(수평축 풍력발전용 터빈), BEMT(날개요소-운동량이론), power coefficient (동력계수), post stall model(실속 후 모델), tip loss theory(팁 손실 이론), aerodynamic characteristic (공력특성)

### Nomenclature

A : Swept area  
 a : Axial flow induction factor  
 a' : Tangential flow induction factor  
 C : chord length  
 $C_L$  : Lift coefficient  
 $C_D$  : Drag coefficient  
 $C_L/C_D$  : Lift to drag ratio  
 $C_p$  : Power coefficient  
 D : rotor diameter, m  
 $f_{\mu}$  : Local tip loss coefficient  
 N : Blade number  
 R : Radius  
 $\alpha$  : Angle of attack  
 $\lambda$  : Tip Speed Ratio (TSR)  
 $\sigma_r$  : Local solidity

### 1. 서론

바람의 운동에너지를 변환시켜 실생활에 유용한 에너지로 공급하는 풍력에너지의 변환형태는 크게 풍력발전, 풍력양수, 풍력열변환 등으로 나눌 수 있으나, 현재 전 세계적으로 가장 널리 개

발되고 보급되었으며 고급의 에너지형태로 공급하는 풍력발전은 특히 국내에는 많은 미전화 도서지방이 산재해 있는 주로 남 서해안에 분포되어 있다. 이들 섬들은 내륙에서 멀리 떨어져 있어 전 계통선을 직접 이용하기는 매우 어려운 실정이다. 소형 풍력 발전시스템은 이러한 지역과 일반 가정용 단위 전원 공급용으로 사용하기에는 적합한 것으로 판단된다. 소형 풍력 발전기란 용량의 크기가 100kW 이하 또는 10kW 이내로 정확한 규정이나 범위가 명확하지 않지만 수평축(Horizontal

- 
- 1) 한국해양대학교 대학원  
E-mail : kmo@pivlab.net  
Tel : (051)403-1214
  - 2) 영진전문대학 컴퓨터응용기계계열  
E-mail : mwlee@yjc.ac.kr  
Tel : (053)940-5205 Fax : (053)940-5217
  - 3) 한국해양대학교 대학원  
E-mail : cg0511@pivlab.net  
Tel : (051)403-1214
  - 4) 한국에너지 기술 평가원  
E-mail : thkim.ketep.re.kr  
Tel : (02)3469-8459
  - 5) 한국해양대학교 기계 정보공학부  
E-mail : lyh@hhu.ac.kr  
Tel : (051)410-4293 Fax : (051)403-0381

axial wind turbine)에서는 구조적으로 꼬리 날개(Tail vane)를 이용하여 풍향을 추종하는 시스템을 소형이라 할 수 있다. 또 다른 분류로 IEC에서는 로터 회전면적  $40m^2$ (로터직경 7.1m)이하를 소형풍력 발전으로 정의해 왔지만 2000년부터 로터 회전면적  $200m^2$ (로터직경 16m)이하로 정의 범위가 확대되었다.<sup>1)</sup> 국내의 미전화지역과 일반가정에서 풍력에너지 지원을 적극 활용 개발하기 위해서 설계 시 고려사항과 공기역학적 설계 및 구성요소의 특성에 대해 연구함으로써 추후 보급형 풍력발전 시스템의 개발에 필요한 설계 기술을 확립하여야 한다. 풍력터빈 블레이드의 공기역학적 특성은 구조설계와 제어설계에 필요한 정보를 제공함으로써 풍력발전시스템 설계의 기본이 되는 부분이다.

본 연구에서는 블레이드 손실 모델을 적용한 BEMT 이론을 활용하여 로터 블레이드 최적 설계를 수행하여 개발된 X-FOIL과 국산 소프트웨어인 POSEIDON을 사용하였다.

### 3. 소형 로터 블레이드(5kW) 설계

본 연구를 통해 BEMT법에 의한 5kW 로터 블레이드 설계를 수행 하였으며, 개발된 소프트웨어를 적용하여 TSR 변화에 따른 출력 특성을 예측하였다. 설계 된 로터 블레이드는 FIL-5 Type1으로 명명되었으며, 관련설계 제반 수식에 의해 결정된 로터 블레이드 직경은 4.716m이며, 공기밀도는  $1.225kg/m^3$ 이다. 정격풍속은 12m/s로 결정하였으며 설계 풍속은 10m/s이다. 설계 TSR은 6이며, 로터 블레이드 정격회전 속도는 486rpm으로 결정하였다. 이상의 초기 설계 사항을 요약하면 Table 1과 같다.

Table 1 General design parameters(5kW)

Rated power(kW)	5
Rated wind velocity(m/s)	12
Design TSR	6
Rotor blade diameter(m)	4.716
Rated rotational speed(RPM)	486
Air density( $kg/m^3$ )	1.225

Fig. 8과 같은 알고리즘으로 개발된 소프트웨어 화면 구성을 나타내었다.

Fig. 9은 성능해석을 위한 기본 설계정보를 입력하는 화면이며, 사용자는 로터블레이드 초기 형상 설계정보를 확보하고 있어야 한다.

Fig. 10은 익형 공력특성 입력 화면을 나타내었다.

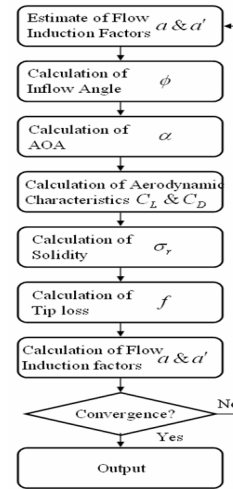


Fig. 8 Algorithm procedure of the POSEIDON

사용자로부터 초기입력 변수로써 블레이드 형상 정보를 입력 받은 후, TSR, 블레이드 반경, 블레이드 개수, 밀도, 유입속도 등의 정보를 입력 받는다.

설계변수의 입력이 끝나면, 블레이드 각각의 단면을 정의하는 익형공력특성데이터를 입력하며, 익형공력특성 데이터입력화면은 모두 15 단면에서 각각의 공력특성 데이터를 입력 받을 수 있도록 구성하였으며, 이는 블레이드 전체 공력 특성을 예측함에 있어 적분오차를 줄이고자 하는 목적이다.

익형 공력특성 데이터의 입력 후 메인 페이지에서 실행버튼을 클릭하면 Fig. 8과 같은 순서를 통해 관련된 모든 정보에 관한 반복계산을 수행하며, 해의 수렴 후 계산된 정보를 Fig. 11의 화면과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 12은 입력 받은 공력 특성 데이터를 그래프로 나타낸 화면이며, 실제 성능계산에 참조된 공력특성 데이터 범위를 표시하여 나타낼 수 있다

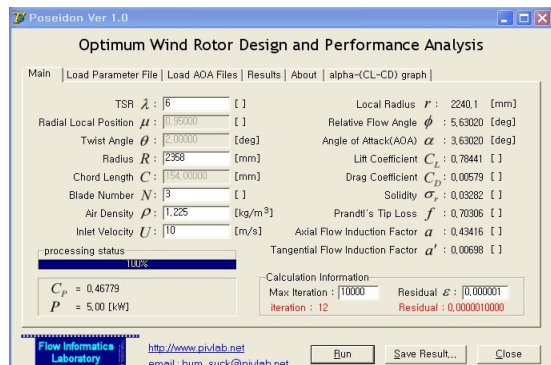


Fig. 9 Main input screen

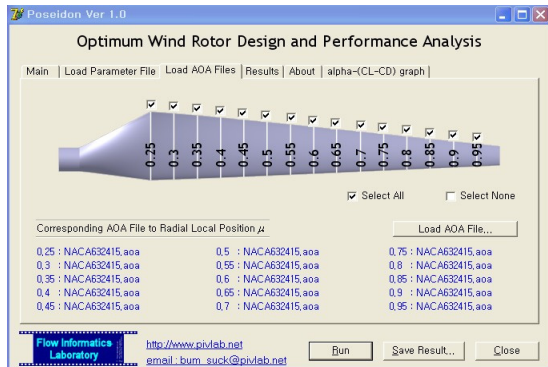


Fig. 10 Aerodynamic loading page

	r	phi	alpha	CL	CD	sigma <sub>z</sub>	f	s	a'
1	588.50	24.070	6.070	1.03013	0.00943	0.22951	0.99998	0.27248	0.08577
2	707.40	20.461	5.481	0.97160	0.00849	0.22614	0.99995	0.28648	0.06131
3	825.30	17.842	4.842	0.90932	0.00734	0.18745	0.99990	0.29320	0.04564
4	943.20	15.513	4.513	0.87732	0.00672	0.15693	0.99981	0.30988	0.03939
5	1061.10	13.413	4.413	0.86711	0.00660	0.13319	0.99971	0.33705	0.02959
6	1179.00	12.092	4.092	0.83373	0.00621	0.11420	0.99942	0.34744	0.02407
7	1296.50	10.926	3.926	0.81624	0.00604	0.09830	0.99899	0.35019	0.02005
8	1414.80	9.853	3.853	0.80838	0.00598	0.08538	0.99797	0.36407	0.01707
9	1532.70	9.475	3.475	0.76758	0.00567	0.07445	0.99497	0.33997	0.01407
10	1650.60	8.975	3.975	0.77843	0.00574	0.06509	0.99101	0.35887	0.01238
11	1768.50	7.736	3.736	0.75265	0.00568	0.05937	0.98385	0.38193	0.01100
12	1886.40	7.544	3.544	0.77519	0.00572	0.04961	0.96241	0.35830	0.00941
13	2004.30	6.802	3.802	0.80291	0.00593	0.04336	0.93046	0.38648	0.00854
14	2122.20	6.650	3.550	0.77573	0.00572	0.03780	0.84933	0.37536	0.00751
15	2240.10	5.630	3.630	0.78441	0.00579	0.03282	0.70306	0.43416	0.00698

Fig. 11 Numerical result output

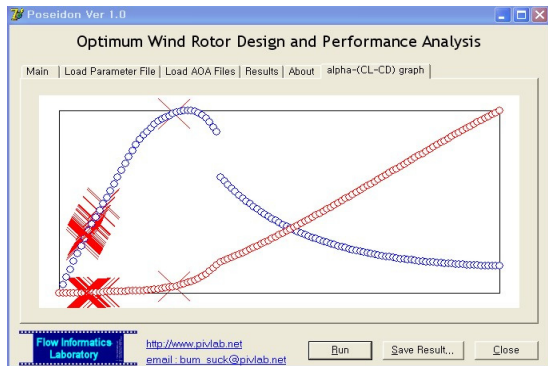


Fig. 12 Aerodynamic plotting page

#### 4. NACA 63415 공력특성 해석

정확한 로터 블레이드 형상설계 및 성능예측을 위해서는 로터 블레이드를 구성하는 익형의 신뢰성 있는 공력특성 데이터의 확보가 필수적이나, 수많은 종류의 익형에 대한 신뢰성 있는 실험 공력 특성 데이터의 확보가 현실적으로 거의 불가능한 실정이다. 신속한 피드백(feed back)에 의한 효율적인 설계의 진행을 위해 설계자는 다양한 익형의 공력 특성 데이터를 쉽게 확보 할 수 있어야

한다. 풍력 선진 국가에서는 일반적으로 X-Foil<sup>7)</sup> (MIT Aero&Astro)등과 같은 수치해석 소프트웨어를 이용하여 2차원 익형 공력 특성 데이터를 확보하고 있으며, 최근 들어 전산해석 기법의 발달에 힘입어 CFD 기법을 활용한 사례들도 활발히 보고되고 있다.<sup>8)</sup>

본 연구에 사용된 FIL-5은 5kW 수평축 풍력 터빈이며 블레이드를 구성하는 익형으로써 NACA 63415를 사용하였다. 실험과 수치해석 공력특성의 오차에 의한 출력계수의 변화를 파악하고자 Velux wind tunnel test를 통해 얻은 실험 공력특성과 X-FOIL과 Viterna-Corrigan 실속 후 공력특성에 의해 예측 및 보정된 공력특성 두 가지를 비교대상으로 하였다. 제공 받은 풍동실험 결과의 경우, 실속 영역 이전의 경우에 해당하는 공력 특성 데이터만을 포함하고 있어 Viterna, L. A. & Corrigan, R. D.의 보정식을 적용하였다. 실속이전 영역의 경우 X-FOIL에 의해 예측된 데이터와 실험 데이터의 결과가 정량적으로 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 실속 후 특정 받음각의 범위에서 예측 데이터가 실험 데이터 보다 다소 높은 특성을 나타내고 있다.

NACA63415의 양력과 항력계수를 Fig. 13 과 Fig. 14에 그래프로 나타내었다. 항력계수의 경우 실험 결과와 수치해석 결과가 실속이전의 영역에 대해 정량적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 마찬가지로 실속 후 영역에 대해 특정 범위에서 미소한 값의 차이를 나타내고 있다.

전체적으로 실속 이후 특정 받음각 범위에서 실험데이터와 비교할 때 다소 오차가 발생한다. 일반적으로 실험데이터와 수치해석 데이터의 오차 범위는 익형의 표면 경계층 박지점 및 천이영역의 부정확한 예측에 의한 수치해석 기법상의 특징에 의해 발생되며, 이로 인해 수치해석 데이터는 실속현상이 지연되는 특징을 나타냄에 따라서, 실속 영역 이후의 공력 특성 데이터들은 실험데이터

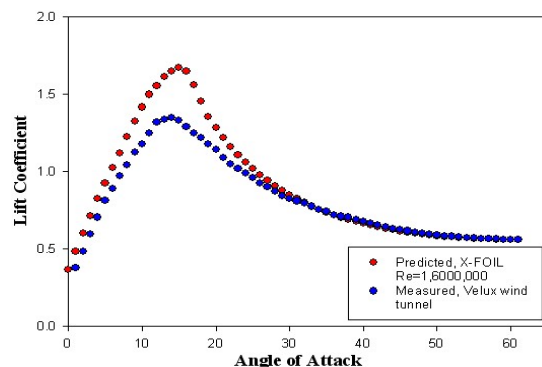


Fig.13 Comparison of lift coefficient

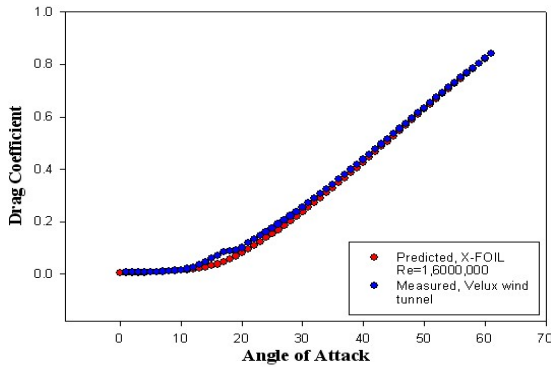


Fig. 14 Comparison of drag coefficient

와 비교했을 때 비교적 정확하지 못한 값을 예측하는 것이 일반적이다. 따라서 BEMT 해석에 있

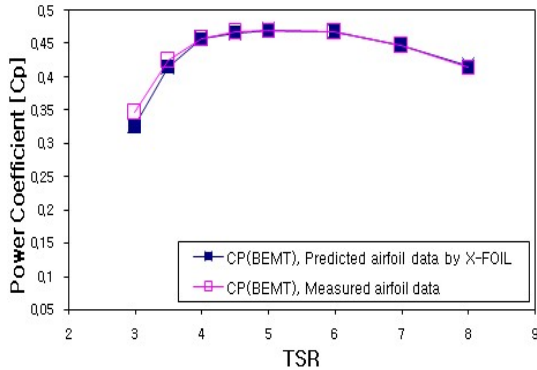


Fig. 15 Power coefficient of the FIL-5 type1

어 정확한 익형 공력특성 데이터의 사용은 시스템의 출력 특성을 예측함에 있어서 중요한 변수가 됨을 알 수 있다.

Fig. 15 는 출력성능 그래프로서 실험 공력 데이터를 사용해 예측된 출력계수와 수치 해석 공력 데이터를 사용해 예측된 결과를 나타낸다.

## 6. 결론

본 연구에서는 BEMT법을 기반으로 한 수평축 풍력발전용 터빈의 최적 설계 및 성능해석 소프트웨어를 사용하여, 5kW 로터블레이드인 FIL-5 Type 1에 대한 설계 및 성능평가를 수행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. Prandtl's tip loss 이론을 적용한 BEMT 이론을 적용하여 최적의 로터 블레이드 형상 설계 기법을 확립하였음.
2. 2차원 익형의 효율적인 공력특성 예측을

위해 X-Foil, Poseidon을 사용하여 설계된 5kW 터빈의 예측 공력특성과 실험 공력특성에 대한 비교 성능 평가를 수행 하였음.

3. 예측 공력 특성과 실험 공력 특성의 최대 출력 계수(Cp) 0.47로 정량적으로 일치하였음.
4. 향후 상용 CFD 코드를 이용한 풍력발전용 로터 블레이드 3차원적 유동특성 및 성능 해석에 대한 연구를 수행 할 예정임.

## 후 기

이 연구는 (사)한국선급 김범석박사가 박사과정 중 개발한 풍력 터빈 성능해석 프로그램인 POSEIDON을 이용하여 수행되었기에 사의를 표합니다.

## References

- [1] Yanug J.W, 2008, On-site test of small power generator for roof-top of building, Master's thesis, Korea Maritime University.
- [2] Kim J.H, 2003, A Study on Aerodynamic Analysis and 3-Dimensional Flow Characteristics of HAWTs, Master's thesis, Korea Maritime University.
- [3] Bets A.,1919, Schraubenpropeller mit geringstem energieverlust, Gottinger Nachr.
- [4] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, 2003, Wind Energy Explained, John Willey & SonsLtd, pp.113-120.
- [5] Kim B.S, Kim J.H, Lee Y.H, 2004, A Study on the 3D Flow Characteristics and the Performance Analysis of an 1MW HAWT by CFD, 3rd World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition.
- [7] M. Drela, 2001, X-Foil 6.94 User Guide.
- [8] Kim B.S, 2003, A Study on 3-D Flow Characteristics and Power Performance for HAWT, Master's thesis, Korea Maritime University.