

BEMT를 적용한 수평축 풍력터빈 성능해석 소프트웨어의 개발

김범석*, 이영호

Software Development for the Performance Analysis of the HAWT based on BEMT

BeomSeok Kim, YoungHo 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 lift and the drag coefficient of S-809 airfoil were predicted via X-FOIL and also the post stall characteristics of S-809 were estimated by the Viterna's equations. All the predicted aerodynamic characteristics are fairly well agreed with the wind tunnel test results, performed by Sommers in Delft university of technology. The rated power of the testing rotor is 20kW(FIL-20) at design conditions. The experimental aerodynamic parameters and the X-FOIL data were used for the power prediction of the FIL-20 respectively. The comparison results shows good agreement in power prediction.

Key words

HAWT(수평축 풍력발전용 터빈), BEMT(남개요소-운동량이론), power coefficient(동력계수), post stall model(실속 후 모델), tip loss theory(팁 손실 이론)

* 한국해양대학교 기계·정보공학부 유동정보연구실

■ E-mail : bum_suck@pivlab.net ■ Tel : (051)410-4940 ■ Fax : (051)403-0381

subscripts

l, \max : maximum lift force
 d, \max : maximum drag force
 r : local radius

Nomenclature

a : axial flow induction factor
 C : chord length, coefficient
 f : tip loss coefficient R : radius, m
 D : rotor diameter, m α : angle of attack
 μ : non-dimensional local position σ_r : local solidity

1. 서론

최근 전 세계적으로 화석에너지를 대신할 새로운 에너지원의 확보에 많은 관심을 기울이고 있으며, 정부차원의 과감한 지원을 통해 각 국가별로 다양한 대체 에너지원에 대한 연구개발 프로그램이 진행되고 있다. 국내에서도 환경친화적인 대체 에너지원으로써 풍력발전의 가능성을 검토 중이며, 다양한 연구가 국가지원 하에 유관업체 및 연구기관들 주도하에 진행되고 있다.

현재 국내 요소설계 기술수준은 풍력 발전용 터빈의 핵심요

소기술 중의 하나인 로터 블레이드 설계 기술에 대한 명확한 설계기준이 없는 상황이며, 블레이드 설계 및 성능평가를 위해 BEMT(Blade Element Momentum Theory) 이론 및 다양한 손실 보정 모델을 적용한 Garrad Hassen 사의 Bladed for Windows 등과 같은 국외 상용 소프트웨어에 의존하고 있다. 이러한 국내실정을 감안할 때, 국내에서도 블레이드 설계 및 성능평가 기술에 대한 명확한 기준 등이 수립될 필요가 있다.

또한, 다양한 설계 이론과 성능예측 기법들에 대한 연구를 통해 독자적인 설계 및 성능평가 소프트웨어의 개발이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 블레이드 손실 모델을 적용한 BEMT 이론을 활용하여 로터 블레이드 최적 설계를 수행함으로써 관련 설계 기법을 확립하였고, 최종적으로 성능평가를 위한 국산 소프트웨어의 개발을 수행하였다. 개발된 성능평가 소프트웨어본 연구에서는 블레이드 손실 모델을 적용한 BEMT 이론을 활용하여 로터 블레이드 최적 설계를 수행함으로써 관련 설계기법을 확립하였고, 최종적으로 성능평가를 위한 국산 소프트웨어의 개발을 수행하였다. 개발된 성능평가 소프트웨어는 POSEIDON으로 명명되었다.

2. 소프트웨어 개발

BEMT에 의한 설계 및 성능평가는 초기에 “로터 블레이드 반경 방향으로 진행되는 흐름은 없다”라는 균일 순환조건의 가정으로부터 출발한다. 즉, 로터 블레이드 상류에서 유입되는 흐름의 축 방향 성분은 축 방향으로 항상 일정하게 유지된다는 것이다. 그러나, 불 균일 순환조건에서는 로터 블레이드 반경 방향의 상호작용과 블레이드 요소를 통과하는 흐름 사이에서 운동량 교환이 발생하므로, 로터 블레이드 단면의 압력강하 발생 원인이 되는 블레이드 요소를 통과하는 흐름에 대해 반경방향 흐름에 대한 영향이 없고 축 방향 흐름만이 작용한다는 초기 가정은 이론적인 문제점을 내포한다. 그러나, 실제로는 날개 끝 속도비(Tip Speed Ratio, TSR)가 3 이상의 범위를 가지는 경우에서 실험 데이터와 BEMT에 의해 계산된 성능특성의 오차 범위가 상당히 작기 때문에 초기 가정의 적용성에 대한 문제가 없다고 알려져 있다.^[1]

BEMT 이론은 현재 풍력발전 산업에서 설계 및 성능해석의 표준으로 인식되고 있으며, 보다 정확한 성능예측을 위해

Prandtl's tip loss 이론 등과 같은 손실 모델을 적용하여 최적화된다.

Figure 1에 BEMT 이론에 의한 성능해석 과정의 순서도를 나타내었다.

식 1, 식 2에 BEMT에 의해 유도된 흐름유도계수들의 계산식을 나타내었다.

식 1, 식 2는 Prandtl's tip loss 이론에 의해 계산된 날개 끝 손실의 영향을 포함한 BEMT로부터 유도된 식이다. 일반적으로 BEMT 이론을 통한 성능해석 과정에 적용되는 2차원 익형의 공력특성 예측 정확도에 따라 실험결과와 BEMT 해석결과의 성능특성 오차범위가 크게 달라지므로 정확한 공력성능 데이터의 확보가 필수적이다. 그러나, 실제 설계자의 입장에서 실험적인 기법을 통해 수많은 종류의 익형 공력특성 데이터를 확보하기란 상당히 까다로운 문제이다.

현재, 많은 설계자들은 X-FOIL, Visual FOIL 등과 같은 2차원 익형 공력성능 예측 소프트웨어를 활용하여 효과적으로 공력성능을 예측하고는 있으나, 근본적으로 이러한 소프트웨

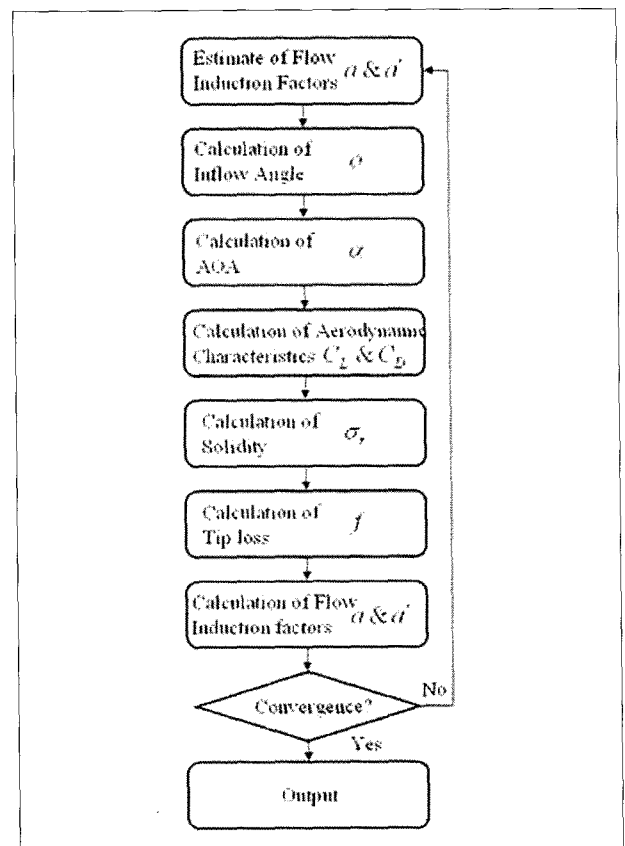


Fig. 1 Algorithm procedure of the POSEIDON

어는 Pannel 법에 근거하므로 실속 후 공력특성에 대한 정확한 예측이 불가능한 단점을 가진다.^[2]

BEMT 모델에 대한 적용을 위해 Viterna는 실속 후 공력특성 예측 모델을 적용하였으며, MOD-0, MOD-1 터빈의 성능 해석을 위해 풍동 실험으로부터 획득한 실험데이터와 실속 후 모델에 의해 예측된 데이터를 적용한 연구를 수행하였다. Viterna의 실속 후 공력특성예측 모델은 식 3, 식 4, 식 5에 나타내었다.

$$\frac{af}{1-a} = \frac{\delta r}{4\sin^2\phi} \left(C_x - \frac{\delta r}{4\sin^2} C_y^2 \right) \frac{1-a}{1-af} \quad (1)$$

$$\frac{a'f}{1-a'} = \frac{\delta r C_y}{4\sin\phi\cos\phi} \frac{1-a}{1-af} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} C_x &= C_l \cos\phi + C_d \sin\phi \\ C_y &= C_l \sin\phi + C_d \cos\phi \end{aligned} \quad \delta r = \frac{NC}{2\pi\mu R}$$

$$C_{dMax} = 1.11 + 0.018AR \quad (3)$$

$$C_d = B_1 \sin\alpha + B_2 \cos\alpha \quad (4)$$

$$C_l = A_1 \sin 2\alpha + A_2 \frac{\cos^2\alpha}{\sin\alpha} \quad (5)$$

3. 20kW 블레이드 설계

본 연구를 통해 BEMT법에 의한 20kW 로터 블레이드 설계를 수행하였으며, 개발된 소프트웨어를 적용하여 TSR 변화에 따른 출력특성을 예측하였다. 블레이드 프로파일의 형상화를 위해 사용된 익형은 S-809이며, 익형의 양·항력 데이터의 확보를 위해 X-FOIL을 이용한 수치해석을 수행하였다. 해석결과와 신뢰성을 위해 Sommers에 의해 수행된 RE=1,000,000의 풍동실험 결과와 비교하였으며, 실험결과와 상당히 잘 일치하는 결과를 얻었다.

Fig. 2에 S-809 양력계수 비교데이터를 대표적으로 나타내었다. 설계된 로터 블레이드는 FIL- 20으로 명명되었으며, 자세한 설계사양은 Table 1에 요약하여 나타내었다.

Fig. 3 2에 FIL-20의 3차원 형상 모델링 결과를 나타내었다.

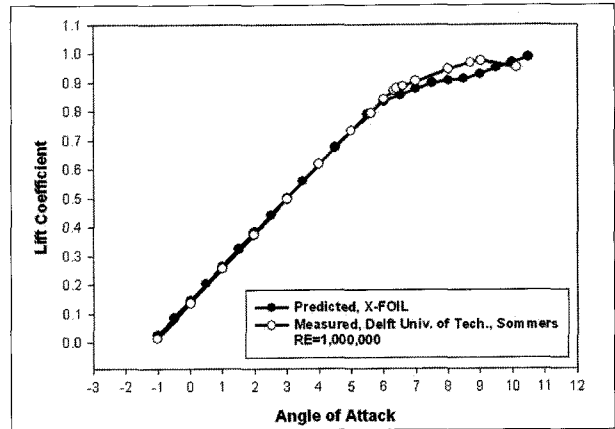


Fig. 2 Lift coefficient comparison (S809)

Table.1 Specification of FIL-20 Rotor

Local position	Twist angle(deg)	Position(mm)	Chord length(mm)	Airfoil series
0.20	19.54	1014.00	689.23	S809
0.25	15.66	1267.50	662.54	S809
0.30	12.95	1521.00	635.86	S809
0.35	10.66	1774.50	609.17	S809
0.40	8.61	2028.00	582.48	S809
0.45	7.31	2281.50	555.80	S809
0.50	6.07	2535.00	529.11	S809
0.55	5.00	2788.50	502.43	S809
0.60	4.15	3042.00	475.74	S809
0.65	3.39	3295.50	449.05	S809
0.70	2.72	3549.00	422.37	S809
0.75	2.13	3802.50	395.68	S809
0.80	1.59	4056.00	369.00	S809
0.85	1.06	4309.50	342.31	S809
0.90	0.62	4563.00	315.62	S809
0.95	-0.12	4816.50	288.94	S809
1.00	-0.12	5070.00	262.25	S809

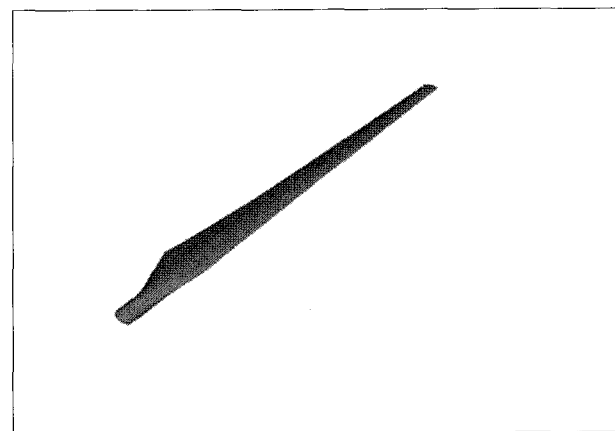


Fig. 3 Isometric view of FIL-100 Type1

4. 성능해석

로터 블레이드 성능 평가를 위해 Delft university of technology의 풍동에서 Sommers에 의해 수행된 공력특성 결과를 사용하였으며, X-FOIL에 의해 예측된 수치해석 데이터를 비교목적으로 사용하였다. 실험 및 수치해석의 레이놀즈수는 106이다. 수치해석 공력특성의 경우 실속 후 공력특성 예측을 위해 Viterna-Corrigan 모델을 사용하였으나, 실험데이터에 대한 보정은 행하지 않았다. Fig. 4, Fig. 5에 실험 공력특성 및 수치해석 데이터를 사용해 예측된 FIL-20의 축 흐름 유도계수 변화를 나타내었다.

Fig. 6, Fig. 7에 회전 흐름유도계수의 변화를 나타내었다. 두 경우 모두 실험결과와 수치해석 결과가 비슷한 분포를 나타

내고 있으나 국부적으로 미소한 차이를 나타내고 있다. 이는 실험과 수치 해석 사이에 발생하는 공력특성 데이터의 오차에 기인한다. Fig. 8에 FIL-20의 성능계수 비교결과를 나타내었다. 실험데이터의 경우 실속 후 보정을 행하지 않았으므로, 수치해석 데이터와 TSR 6, 7, 8, 9의 경우에 한해 비교되었다. 비교결과 TSR 6, 9의 경우 실험결과와 수치해석 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있었으나, TSR=8, 9의 경우 미소한차이가 나타나고 있다. 이는 Fig. 2의 양력계수 비교결과에서 받음각의 범위 7°부터 10°까지의 영역에서 공력특성 데이터가 서로 미소한 차이를 나타내는 것과 일치한다. 실제로, TSR=8, 9의 경우 BEMT에 의한 해석과정에서 참조 값으로 사용되는 공력특성 데이터의 범위가 약 6.5°부터 10° 사이에서 결정되고 있기 때문에 이 범위의 공력특성 데이터 오차의 영향이 최종 성능예측에 반영되었다고 할 수 있다. TSR=6, 10의 경우 실험결과와

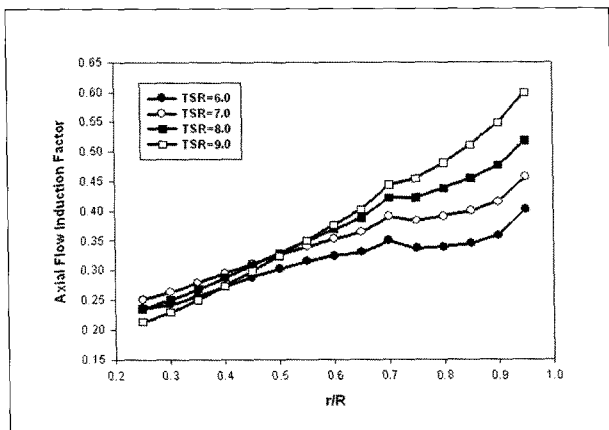


Fig. 4 Axial flow induction factors (using measured lift & drag coefficient)

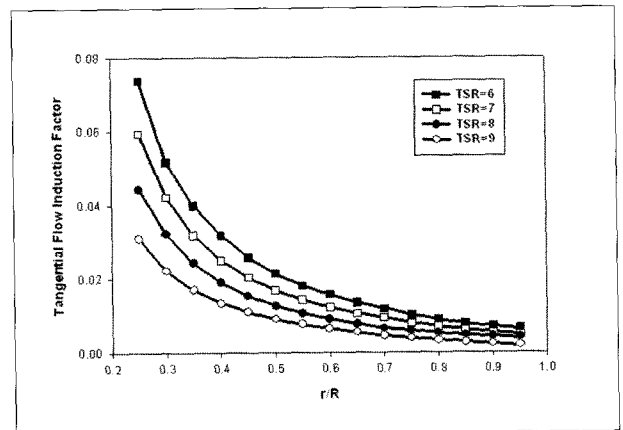


Fig. 6 Tangential flow induction factors (using measured lift & drag coefficient)

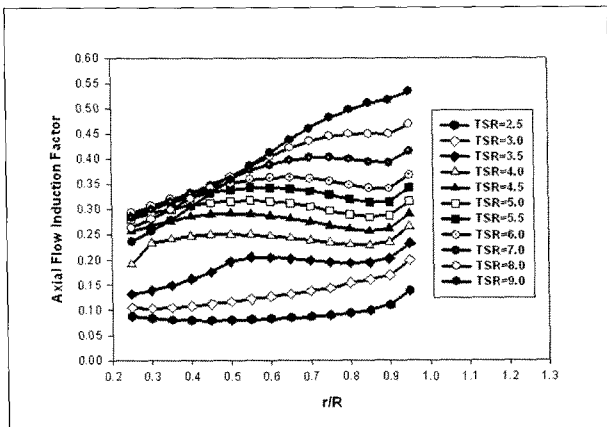


Fig. 5 Axial flow induction factors (using predicted lift & drag coefficient)

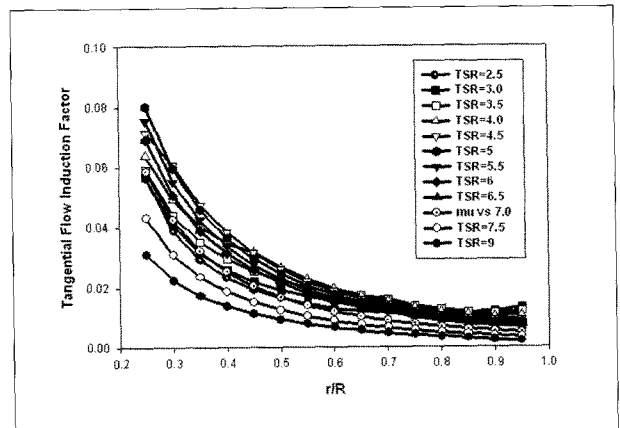


Fig. 7 Tangential flow induction factors (using predicted lift & drag coefficient)

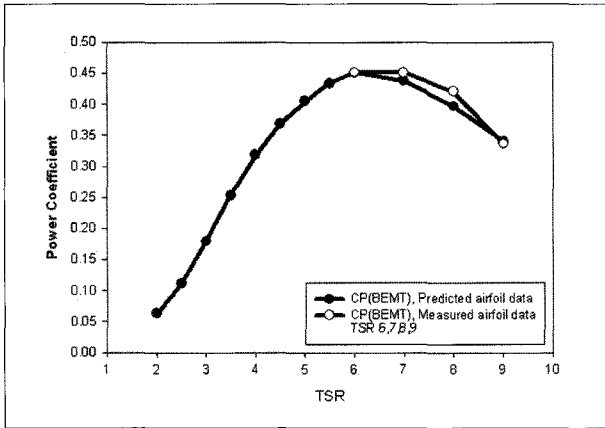


Fig. 8 Comparison of the power coefficient on the FIL-20

수치해석결과가 서로 잘 일치하는 특징을 나타내고 있으며, 이 범위에서 성능예측에 참조되는 익형 공력특성 예측 정도가 높기 때문이라 사료된다.

5. 결론

1. Prandtl's tip loss 이론을 적용한 BEMT 법에 의한 로터 블레이드 설계 및 성능평가 소프트웨어를 개발하였다.
2. 2차원 익형 공력특성 데이터의 효율적인 획득을 위해 X-Foil을 적용하였으며, 실속 후 공력특성의 정확한 예측을 위해

Viterna-Corrigan의 실속 후 보정식을 적용하였다. 실험 데이터와 비교결과 정량적으로 서로 잘 일치 하고 있음을 알 수 있었다.

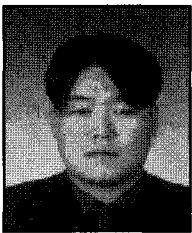
3. 20kW 로터 블레이드인 FIL-20의 설계 및 성능평가를 수행하였다. 수치해석에 의해 예측된 양력계수, 항력계수는 실험에 의해 측정된 데이터에 비해 받음각 $6.5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 의 범위에서 다소 낮은 값을 예측하기 때문에 수치해석에 의해 예측된 공력 특성 데이터를 사용한 경우가 실험 데이터를 사용한 경우보다 TSR 7, 8의 위치에서 다소 낮은 출력특성을 나타낸다.

4. 향후, BEMT 법에 의해 정확한 출력성능 특성을 예측하기 위해서는 신뢰할 수 있는 2차원 익형 공력특성 데이터의 사용이 필수적이다.

References

- (1) Kim B.S, Kim J.H, Lee Y.H, A Study on the 3D Flow Characteristics and the Performance Analysis of an 1MW HAWT by CFD, the 3rd WWEC, 2004
- (2) Kim B.S, A Study on the optimum blade design and the aerodynamic analysis for the HAWT, Doctoral thesis, Korea Maritime University, 2005

김범석



2001년 한국해양대학교 기계공학과 공학사
2003년 한국해양대학교 기계공학과 공학석사
2005년 한국해양대학교 기계공학과 공학박사

현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 박사후과정연구원
(E-mail : bum_suck@pivlab.net)

이영호



1980년 한국해양대학교 기관공학과 공학사
1982년 한국해양대학교 기관공학과 공학석사
1989년 동경대학 공학부 기계공학과 공학박사

현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 교수
(E-mail : lyh@pivlab.net)