

## BEMT를 이용한 1 kW급 수평축 풍력발전용 로터 블레이드 형상 최적설계에 관한 연구

이민우† · 김정환\* · 김정렬\*\*

(원고접수일 : 2007년 4월 18일, 심사완료일 : 2007년 5월 18일)

### Study on the Optimum Rotor Blade Design of the 1 kW HAWT by BEMT

Min-Woo Lee† · Jeong-Hwan Kim\* · Jung-Ryul Kim\*\*

**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 63-415 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 1 kW 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)

### 1. 서 론

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 환경 친화적인 대체에너지 원으로써 풍력발전의 가능성을 검토 중이며, 다양한 연구가 국가지원 하에 유관업체 및 연구기관들 주도하에 진행되고 있다. 현재 국내 요소설계 기술

수준은 풍력발전용 터빈의 핵심요소기술 중의 하나인 로터 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 국의 상용소프트웨어에 의존하고 있다. 이러한 국내실정을 감안할 때, 국내에서도 블레이드 설계 및 성능 평가 기술에 대한 명확한 기준 등이 수립될 필요가 있다. 또한 다양한 설계이론과 성능예측 기법들에 대한 연구를 통해 독자적인 설계 및 성능평

† 교신저자(한국조선기자재연구원), E-mail : mwlee420@komeri.re.kr, Tel : (051) 405-6880

\* 한국조선기자재연구원

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

가 소프트웨어의 개발이 필요한 시점이다.

본 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 명명하였다.

## 2. 소프트웨어 개발

BEMT에 의한 설계 및 성능평가는 초기에 "로터 블레이드반경 방향으로 진행되는 흐름은 없다"라는 균일 순환조건의 가정으로부터 출발한다.

즉, 로터 블레이드상류에서 유입되는 흐름의 축방향 성분은 축 방향으로 항상 일정하게 유지된다는 것이다. 그러나 불균일 순환조건에서는 로터블레이드 반경방향의 상호작용과 블레이드요소를 통과하는 흐름사이에서 운동량 교환이 발생하므로, 로터블레이드 단면의 압력강하 발생 원인이 되는 블레이드 요소를 통과하는 흐름에 대해 반경방향

흐름에 대한 영향이 없고 축방향 흐름만이 작용한다는 초기 가정은 이론적인 문제점을 내포한다. 그러나 실제로는 날개 끝 속도비(Tip Speed Ratio, TSR)가 3이상의 범위를 가지는 경우에서 실험 데이터와 BEMT에 의해 계산된 성능특성의 오차 범위가 상당히 작기 때문에 초기 가정의 적용성에 대한 문제가 없다고 알려져 있다<sup>(1)</sup>.

BEMT 이론은 현재 풍력발전 산업에서 설계 및 성능해석의 표준으로 인식되고 있으며, 보다 정확한 성능예측을 위해 Prandtl's tip loss 이론등과 같은 손실 모델을 적용하여 최적화된다<sup>(2)</sup>.

Figure 1 에 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.

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

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

$$C_x = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi$$

$$C_y = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi$$

$$\sigma_r = \frac{NC}{2\pi\mu R}$$

그러나, 실제 설계자의 입장에서 실험적인 기법을 통해 수많은 종류의 익형 공력특성 데이터를 확보하기란 상당히 어려운 문제이다. 현재, 많은 설계자들은 X-FOIL, Visual FOIL 등과 같은 2차원 익형 공력성능 예측 소프트웨어를 활용하여 효과적으로 공력성능을 예측하고는 있으나, 근본적으로 이러한 소프트웨어는 Pannel 법에 근거하므로 실속 후 공력특성에 대한 정확한 예측이 불가능한 단점

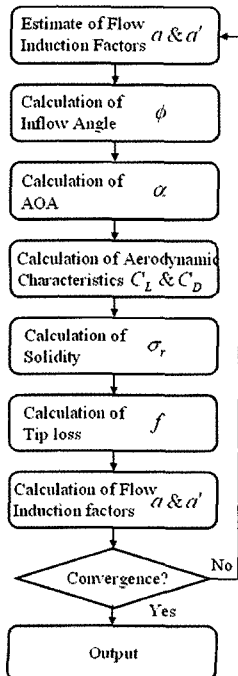


Fig. 1 Algorithm procedure of the POSEIDON

을 가진다<sup>(3)</sup>.

BEMT 모델에 대한 적용을 위해 Viterna는 실속 후 공력특성 예측 모델을 적용하였으며, MOD-0, MOD-1 터빈의 성능해석을 위해 풍동실험으로부터 획득한 실험데이터와 실속 후 모델에 의해 예측된 데이터를 적용한 연구를 수행하였다<sup>(4)</sup>.

Viterna의 실속 후 공력특성예측 모델<sup>(5)</sup>은 식 3, 식 4, 식 5에 나타내었다.

$$C_{d,Max} = 1.11 + 0.018AR \quad (3)$$

$$C_d = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha \quad (4)$$

여기서

$$B_1 = C_{d,Max}$$

$$B_2 = \frac{C_{d, stall} - C_{d,Max} \sin^2 \alpha_{stall}}{\cos \alpha_{stall}}$$

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

여기서,

$$A_1 = \frac{B_1}{2}$$

$$A_2 = (C_{l, stall} - C_{d,Max} \sin \alpha_{stall} \cos \alpha_{stall}) \frac{\sin \alpha_{stall}}{\cos^2 \alpha_{stall}}$$

Fig. 1과 같은 알고리즘으로 개발된 소프트웨어 의화면 구성을 Fig. 2~Fig. 5에 나타내었다.

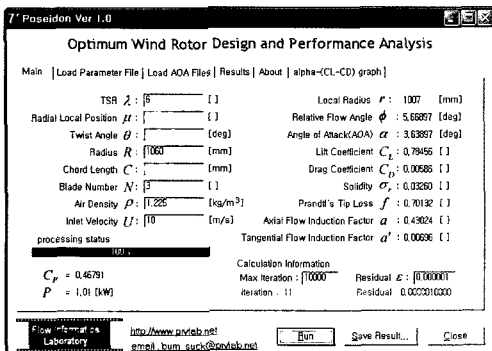


Fig. 2 Main input screen

Fig. 2는 성능해석을 위한 기본 설계정보를 입력하는 화면이며, 사용자는 로터블레이드 초기 형상 설계정보를 확보하고 있어야 한다.

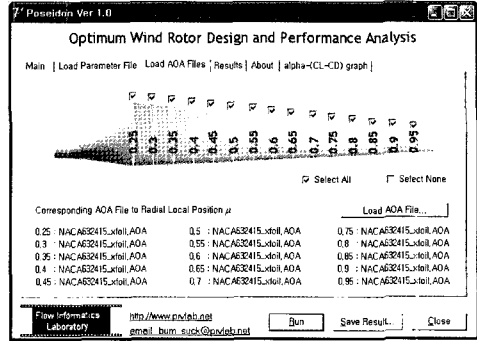


Fig. 3 Aerodynamic loading page

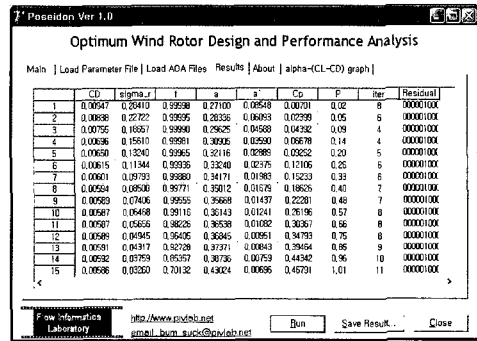


Fig. 4 Numerical result output

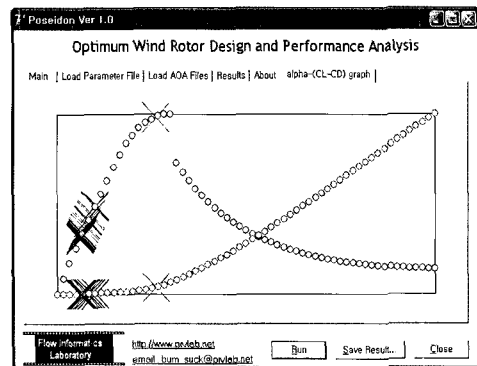


Fig. 5 Aerodynamic plotting page

사용자로부터 초기입력 변수로서 블레이드형상 정보를 입력 받은 후, TSR, 블레이드 반경, 블레이드 개수, 밀도, 유입속도 등의 정보를 입력받는다.

설계변수의 입력이 끝나면, 블레이드 각각의 단면을 정의하는 익형공력특성데이터를 입력하며, Fig. 3에 익형 공력특성 입력 화면을 나타내었다. 익형공력특성 데이터 입력화면은 모두 15 단면에서 각각의 공력특성 데이터를 입력 받을 수 있도록 구성하였으며, 이는 블레이드전체 공력특성을 예측함에 있어 적분오차를 줄이고자 하는 목적이다.

익형 공력특성 데이터의 입력 후 메인 페이지에 실행버튼을 클릭하면 Fig. 1과 같은 순서를 통해 관련된 모든 정보에 관한 반복계산을 수행하며, 해의 수렴 후 계산된 정보를 Fig. 4의 화면과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 5는 입력 받은 공력특성 데이터를 그래프로 나타낸 화면이며, 실제 성능계산에 참조된 공력특성 데이터 범위를 표시하여 나타낼 수 있다.

### 3. 1kW급 로터 블레이드 설계

본 연구를 통해 BEMT법에 의한 1 kW 로터 블레이드 설계를 수행하였으며, 개발된 소프트웨어를 적용하여 TSR 변화에 따른 출력특성을 예측하였다. 설계된 로터 블레이드는 FIL-1 Type1 으로 명명되었으며, 자세한 설계사양은 Table 1에 요약하여 나타내었다.

Table 1 Specification of FIL-1 Type1

Local Position	Radial Distance(mm)	Chord length(mm)	Twist angle(deg)	Airfoil series
0.20	212	164	22	NACA 63-415
0.25	265	158	18	NACA 63-415
0.30	318	151	15	NACA 63-415
0.35	371	145	13	NACA 63-415
0.40	424	139	11	NACA 63-415
0.45	477	132	9	NACA 63-415
0.50	530	126	8	NACA 63-415
0.55	583	120	7	NACA 63-415
0.60	636	113	6	NACA 63-415
0.65	689	107	6	NACA 63-415
0.70	742	101	5	NACA 63-415
0.75	795	94	4	NACA 63-415
0.80	848	88	4	NACA 63-415
0.85	901	81	3	NACA 63-415
0.90	954	75	3	NACA 63-415
0.95	1007	69	2	NACA 63-415
1.00	1060	62	2	NACA 63-415

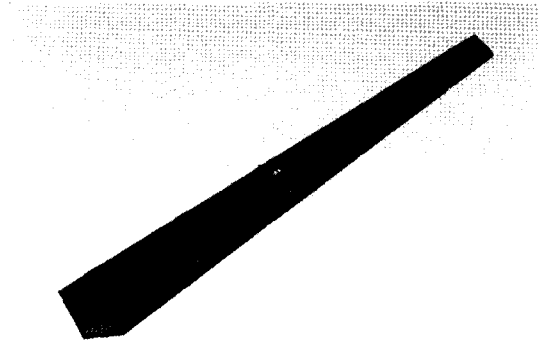


Fig. 6 Isometric view of FIL-1 Type1

Fig. 6에 FIL-1 Type1의 3차원 형상 모델링 결과를 나타내었다.

### 4. NACA 63-415 공력특성 해석

FIL-1은 1 kW 수평축 풍력터빈이며 블레이드를 구성하는 익형으로써 NACA 63-415를 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. NACA 63-415의 양력계수 변화 비교 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

제공 받은 풍동실험 결과의 경우, 실속 영역 이전의 경우에 해당하는 공력특성 데이터만을 포함하고 있어 Viterna-Corrigan의 보정식을 실험치와 예측치에 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.

Fig. 8에 항력계수 변화 비교결과를 나타내었다. 항력계수의 경우 실험 결과와 수치해석 결과가 실속 이전의 영역에 대해 정량적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 마찬가지로 실속 후 영역에 대해 특정 범위에서 미소한 값의 차이를 나타내고 있다.

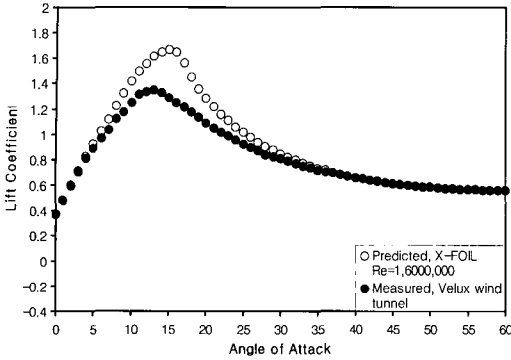


Fig. 7 Comparison of lift coefficient

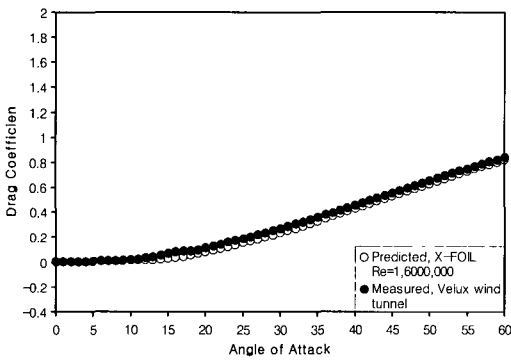


Fig. 8 Comparison of drag coefficient

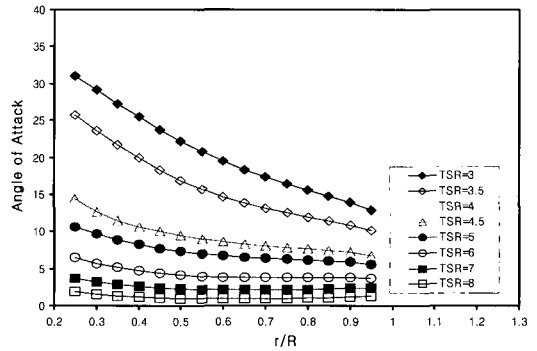
### 5. 로터 블레이드 성능해석

Fig. 9(a)에 실험공력특성 데이터(양력계수, 항력계수)를 사용한 경우의 블레이드 반경방향 위치 변화에 따른 받음각 변화를 TSR 변화에 따라 나타내었다. NACA 63-415 익형의 실속발생 받음각은 약 13°이며 TSR 5부터 TSR 10까지의 범위에서 실속 이전 영역에서 받음각이 형성되고 있음을 알 수 있다.

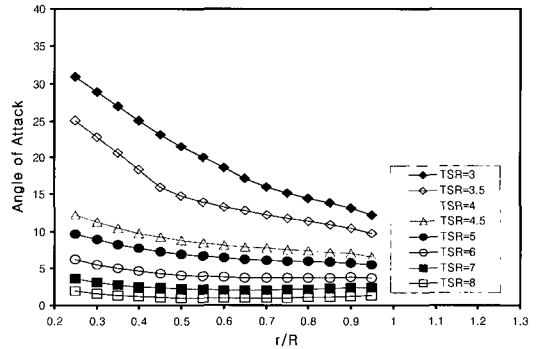
Fig. 9(b)는 4장의 수치해석에 의해 예측된 공력특성 데이터를 사용한 경우를 나타내며, 받음각의 형성 범위가 Figure 9(a)의 경우와 대체로 유사한 특징을 나타내고 있으나, TSR 4.5의 경우까지 비 실속 영역에 포함되고 있음을 알 수 있다.

수치해석에 의해 예측된 공력특성 데이터를 사용한 경우의 받음각 형성범위가 실험공력특성 데이터를 사용한 결과보다 대체로 비 실속 영역에서 최적

공력성능을 나타내는 범위에 근접하고 있다. 이러한 미소한 차이는 실험과 수치해석 사이에 발생하는 미소한 공력특성 데이터 예측 오차에 근거하며, 성능특성을 결정하는 흐름유도계수 값의 변화를 초래 할 것으로 사료된다.



(a) Measured aerodynamic characteristics



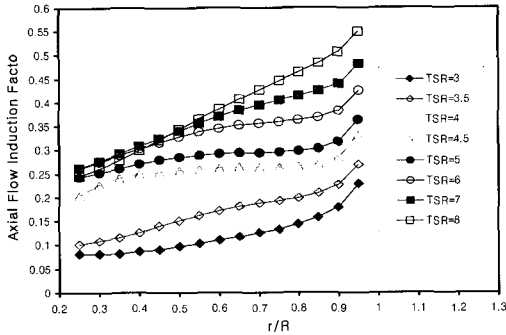
(b) Predicted aerodynamic characteristics

Fig. 9 Variation of AOA according to r/R

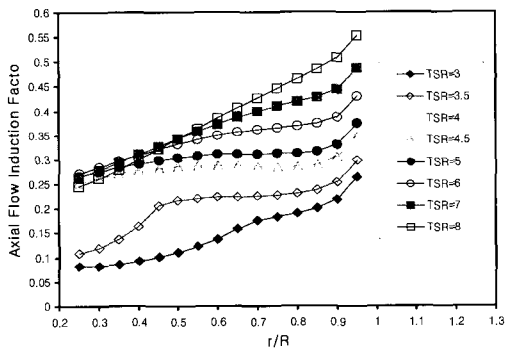
Fig. 10(a), Fig. 10(b)는 실험과 수치해석에 의해 예측된 블레이드 반경방향 위치변화에 따른 축 흐름유도계수의 변화를 나타내고 있다.

실험결과에 의해 예측된 축 흐름유도계수의 경우, 최적 성능을 나타내는 설계 TSR 영역 부근의 TSR=5, 6에서 이상적인 조건(ideal condition =0.333)에 비해 다소 낮은 영역에 걸쳐 형성되고 있으며, 수치해석에 의해 예측된 공력특성을 사용한 경우, 이상적인 조건 범위에 더욱 근접하여 그래프가 형성되고 있음을 알 수 있다. 이는 결국 Fig. 9에서와 같은 받음각의 미소 변화에 따른 영

향이 반영된 결과이며, 결과적으로 풍력터빈의 출력 성능특성 예측결과에 영향을 미칠 것이라 예상된다.



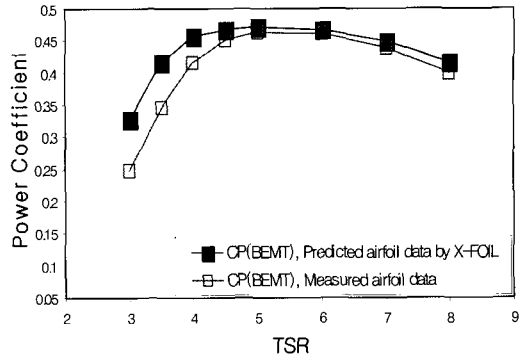
(a) Measured aerodynamic characteristics



(b) Predicted aerodynamic characteristics

**Fig. 10 Variation of axial flow induction factor**

최종적으로 FIL-1 Type 1의 출력성능특성 그래프를 Figure 10에 나타내었다. 실선은 실험공력 특성 데이터를 사용해 예측된 출력계수를 나타내고, 파선은 수치해석 공력특성 데이터를 사용해 예측된 결과를 나타낸다. 전체적으로 수치해석에 의해 예측된 풍력터빈의 출력특성이 실험 공력특성을 사용한 경우보다 다소 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 7, Fig. 8에서와 같이 수치해석에 의한 공력특성 데이터 값이 실험값 보다 다소 과도하게 예측되었기 때문에 발생하는 문제이다. 따라서 BEMT 해석에 있어 정확한 공력특성 데이터의 사용은 시스템의 출력 특성을 정확히 예측함에 있어 매우 중요한 부분이며 신중히 고려할 필요가 있다.



**Fig. 11 Power coefficient of the FIL-1 type1**

## 6. 결 론

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

1. Prandtl's tip loss 이론을 적용한 BEMT법에 의한 로터 블레이드설계 및 성능평가 소프트웨어를 개발하였다. (소프트웨어명: POSEIDON)

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 비교 결과 정량적으로 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

3. 1 kW 로터 블레이드인 FIL-1 Type1의 설계 및 성능평가를 수행하였다. 수치해석에 의해 예측된 양력계수, 항력계수는 실험에 의해 측정된 값보다 다소 높은 공력특성을 예측하고 있기 때문에 수치해석에 의해 예측된 공력특성 데이터를 사용한 경우가 실험 데이터를 사용한 경우보다 다소 높은 출력계수를 나타내고 있었다.

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

## 참고문헌

- [1] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, 2003, Wind Energy Explained, John Willey & Sons Ltd, pp.113-120.
- [2] 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.
- [3] M. Drela, 2001, X-Foil 6.94 User Guide.
- [4] J. Tanger, J. David Kocurek, 2005, Wind Turbine Post-Stall Airfoil Performance Characteristics Guidelines for Blade-Element Momentum Methods, 43rdAIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- [5] Kim B.S. 2003, A Study on 3-D Flow Characteristics and Power Performance for HAWT, Master's thesis, Korea Maritime University.
- [6] F. Bertagnolio, N. Sorensen, J. Johansen, 2001, Wind Turbine Airfoil Catalog, Riso National Laboratory, pp.49-54. 3145

## 저자 소개

**이민우(李敏雨)**

1973년생, 1996년 부산대학교 조선해양공학과 졸업, 1998년 부산대학교 대학원 조선해양공학과 졸업(공학석사), 2006년~현재 한국해양대학교 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국조선기자재연구원 연구개발센터 선임연구원

**김정환(金貞煥)**

1968년생, 1998년 부경대학교 기계공학과 졸업, 2000년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2003년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2003년 九州工業大學 기계공학과 특별연구원, 현재 한국조선기자재연구원 연구개발센터 팀장

**김정렬(金正烈)**

1961년 9월, 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과 졸업(공학석사), 1998년 일본 나고야대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1988년 8월~1993년 2월 현대중공업 엔진사업부 근무, 1993년 3월~현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 부교수.