

## 블레이드요소 운동량 이론에 의한 수평축 조류발전용 터빈 블레이드 설계 및 성능평가 소프트웨어 개발

모장오<sup>1</sup> · 김만응<sup>2</sup> · 현범수<sup>3</sup> · 김유택<sup>4</sup> · 오철<sup>4</sup> · 이영호<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2010년 10월 27일, 원고수정일 : 2010년 12월 18일, 심사완료일 : 2011년 1월 4일)

### Software Development for the Performance Evaluation and Blade Design of a HACT by BEMT

Jang-Oh Mo<sup>1</sup> · Mann-Eung Kim<sup>2</sup> · Beom-Soo Hyun<sup>3</sup> · You-Taek Kim<sup>4</sup> · Cheol Oh<sup>4</sup> · Young-Ho Lee<sup>†</sup>

**요약** : 본 연구에서는 수평축 조류발전용 터빈 블레이드 설계 및 성능평가가 가능하도록 블레이드 끝단 손실모델을 고려한 블레이드요소 운동량 이론을 적용하여 설계를 수행함으로써 관련 설계기법을 확립하였고 최종적으로 설계 및 성능평가를 위한 국산 소프트웨어의 개발을 완료하였다. 개발된 성능평가 소프트웨어인 MCT-Blade V2.0을 통해 2MW급 블레이드 설계 및 성능평가를 수행하였으며, ANSYS FLUENT 상용코드를 이용하여 BEMT에 의한 성능평가 결과의 타당성을 검증하였다. 2.5m/s 정격유속에서 BEMT에 의한 기계적 출력은 2,121kW로써 전기적 출력을 만족하였지만, CFD에 의한 기계적 출력은 1,901kW로써 목표출력에 다소 부족한 결과를 보였다.

**주제어** : 수평축 조류발전용 설계 및 성능평가 소프트웨어, 블레이드요소 운동량 이론, 수평축 조류 터빈, 성능평가, 출력계수, 수중익

**Abstract**: In this study, we have established the design techniques, with which we can design and evaluate performance of blades on a horizontal axis current turbine, by application of blade element momentum theory considering the blade tip's loss model, and finally developed the domestic software(MCT-blade V2.0). We have designed and evaluated performance of blades for the 2MW class by using of the software, and confirmed its calculation results from BEMT by comparing those results from commercial code of ANSYS FLUENT. In a state of rated velocity 2.5m/s, the mechanical power from BEMT' is calculated as 2,121kW, which is considered to satisfy the electrical power, but the value from CFD is calculated as 1,901kW, which is considered a little deficient for the target output.

**Key words**: MCT-Blade V2.0, BEMT, HACT (Horizontal Axis Current Turbine), CFD, Performance evaluation, Power coefficient, Hydrofoil

## 1. 서론

하는 청정 재생에너지 자원인 파랑, 조류, 조석, 수  
해양에너지 변환기술은 해양에 광범위하게 분포  
은 등의 물리적 에너지를 전기적 에너지로 변환하

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, E-mail:lyh@hhu.ac.kr, Tel:051)410-4293)

1 한국해양대학교 해양에너지전문인력양성사업단

2 한국선급 에너지·환경사업단

3 한국해양대학교 조선해양시스템공학부

4 한국해양대학교 기관시스템공학부

는 기술을 말하며, 에너지원의 이용방법에 따라 파력발전, 조류발전, 조력발전 및 해수온도차발전으로 대별된다. 이들 가운데 조류발전은 조류의 흐름이 빠른 지점을 선정하여 그 지점에 터빈을 설치하고, 자연적인 조류의 흐름을 이용하여 설치된 발전기를 가동시켜 발전하는 방식으로, 기상상태나 계절에 관계없이 발전량의 예측이 가능하며 신뢰성 있는 에너지원으로 적용이 가능하다.

현재 해양에너지 발전설비에 대한 설계표준 및 인증을 위해 해양에너지분야 국제표준화 전문회의인 IEC- TC114가 결성되었으며, 미국, 영국, 일본, 캐나다 등 40여명의 전문가와 한국의 (사)한국선급 에너지·환경사업단이 참석하여 공동으로 국제표준화 작업이 진행 중이다.

하지만 아직까지 국내·외적으로 조류발전기용 터빈 블레이드 설계 및 성능평가를 위한 설계기준 및 관련 소프트웨어는 전무한 상황이며, Garrad Hassan사의 GH-Tidal Bladed 등과 같은 외국 상용소프트웨어에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 국내에서도 고효율 저속 블레이드 설계 및 성능평가에 관한 명확한 기준 등이 조속히 수립될 필요가 있으며, 다양한 설계이론과 CFD 등의 예측기법들에 대한 연구를 통해 독자적인 설계 및 성능평가 소프트웨어의 개발이 필요한 시점이다 [1][2][3].

본 연구에서는 실속제어형 수평축 조류발전용 터빈 블레이드 설계 및 성능평가가 가능하도록 블레이드 끝단 손실모델을 고려한 블레이드요소 운동량 이론을 적용하여 터빈 블레이드 설계를 수행함으로써 관련 설계기법을 확립하였고, 최종적으로 성능평가를 위한 국산 소프트웨어 개발을 수행하였다. 개발된 수평축 조류발전용 터빈 블레이드 설계 및 성능평가 소프트웨어인 MCT-blade V2.0을 통해 2MW급 블레이드 설계 및 성능평가를 수행하였으며, 전 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 열유체 코드인 ANSYS CFD 상용코드를 이용하여 BEMT 성능평가 결과의 타당성을 검증하였다.

## 2. 수평축 조류발전용 블레이드 설계 소프트웨어 개발

수평축 조류발전용 블레이드 설계 소프트웨어인 MCT-blade V2.0은 실속제어 블레이드 설계가 가능하도록 개발된 국산용 설계 및 성능평가 소프트웨어이다. Figure 1은 MCT-blade V2.0의 블레이드 설계 주화면을 나타내고 있다. 정격출력, 출력계수, 정격유속, 설계유속, TSR 등의 설계인자와 수중익의 최대양력 및 받음각을 입력하게 되면 블레이드 기본설계가 완성된다. Figure 2는 블레이드 각 단면에서 수중익 공력특성을 일대일 대응시킨 후 블레이드요소 운동량 이론을 통해 해석을 수행한 결과이다. 블레이드 수중익 단면에 미치는 유체역학적 힘과 받음각 그리고 피치각에 대한 정의를 Figure 3에 도식화하여 나타내었다. 로터 블레이드 반경방향 임의의 위치에서 블레이드요소 로터 회전면을 기준으로 국부 받음각  $\beta$ 를 가지게 된다. 회전면에서 축방향 속도  $U\infty(1-a)$ 와 블레이드 반경방향 임의의 위치에서 접선방향 속도  $\Omega r(1+a')$ 의 합성성분은 국부 상대속도와 받음각은  $W$ 와  $\alpha$ 가 된다. 축간섭계수  $a$ , 회전간섭계수  $a'$  및 끝단손실계수  $f$ 를 고려하여 정리하면 다음과 같은 식(1)와 (2)으로 정리된다. 따라서 초기값  $a$ 와  $a'$ 는 식(1), (2)에서 계산된 값과 허용오차 범위 이내로 수렴할 때까지 반복 계산을 수행하게 된다.

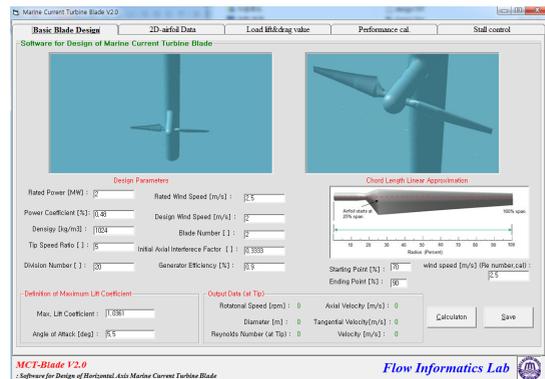


Figure 1: MCT-Blade V2.0 : Blade design GUI

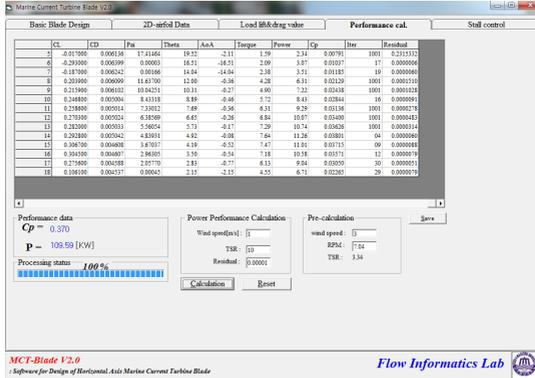


Figure 2: MCT-Blade V2.0 : Performance evaluation GUI

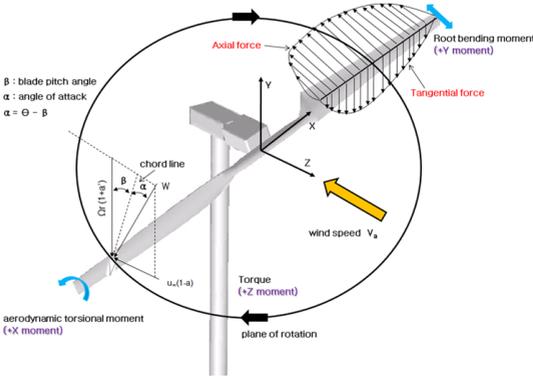


Figure 3: Coordinate system of low velocity and hydrodynamic force

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

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

여기서,

$$C_x = C_L\cos\theta + C_D\sin\theta$$

$$C_y = C_L\sin\theta + C_D\cos\theta$$

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

$N, \mu, R, C_D, C_L$  : 블레이드 수, 무차원 반경길이, 블레이드 반지름, 항력계수, 양력계수를 나타낸다.

### 3. 2MW급 수평축 조류발전용 로터 블레이드 설계 및 형상구현

본 연구에서 설계한 수평축 조류터빈 블레이드는 약 2MW급 정격출력을 발생시키며 실속제어형 방식이다. 블레이드 직경은 27.14m이며, 회전속도는 7.04rpm이고, 2개의 블레이드가 장착된다. 수평축 조류터빈의 자세한 제원을 Table 1에 나타내었다. 조류발전용 터빈 블레이드를 구성하고 있는 수중익은 스웨덴 항공우주국에서 개발된 FFA-W3 계열의 FFA-W3-211, FFA-W3-241, FFA-W3-301의 에어포일이며 블레이드 루트에서 팁까지 순차적으로 구성된다[4]. 블레이드 루트에서 팁으로 갈수록 회전속도가 증가하기 때문에 각 스팬방향 위치에서 정격유속에 대한 최적 유효받음각을 유지하기 위해 팁으로 갈수록 비틀림각은 감소하게 된다. 또한 루트 부분에서는 굽힘하중, 비틀림하중, 원심하중의 3가지 하중이 동시에 작용하며, 구조적으로 이러한 하중들을 견디내기 위해 루트부분에서는 팁에 비해 상대적으로 두꺼운 형상을 유지하고 있다. Figure 4에 설계제원을 이용하여 로터블레이드 형상을 구현하였다.

Table 1: Design specifications of blade for a HACT

Design parameters	Values
Rated power ( $P_R$ )	2 MW
Power coefficient ( $C_p$ )	0.48
Rated velocity ( $V_R$ )	2.5 m/s
Tip speed ratio (TSR)	5
Rotor diameter (D)	27.14 m
Rotational speed ( $\omega$ )	7.04 rpm
Blade number (N)	2
Density ( $\rho$ )	1024 kg/m <sup>3</sup>
Drive train efficiency ( $\eta$ )	0.9
Rotational direction	CCW



Figure 4: Blade shape of a 2MW class HACT

#### 4. 블레이드요소 운동량 이론에 의한 성능평가

본 연구에 사용된 수중익 별 공력계수는 패널법인 X-FOIL를 이용하여 추출하였으며, 실속각 이상에서는 Viterna의 실속 후 공력특성 예측모델을 적용하였다[5]. MCT-blade V2.0를 이용하여 X-FOIL 공력계수 데이터를 읽어드린 후 BEM 해석을 수행하였으며, 이 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 열유체 상용코드인 ANSYS CFD 12.1를 이용하여 CFD 해석을 추가적으로 수행하여 BEM 결과와 비교하였다. CFD 해석조건은 Table 1에 언급된 설계조건과 동일하게 적용하였으며, 해석도메인은 블레이드 반경길이를 기준으로 조류터빈 블레이드로부터 입구까지는 2.5배, 후류방향으로 3.5배, 반경방향으로 3배의 공간해상도를 확보하였다. 또한 강한 역압력 구배에 의한 박리유동의 예측성 향상을 위해 난류전단응력의 전달효과를 고려하여 난류생성항이 소산항보다 과다한 값을 가지지 않도록 개선된 Menter의 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$  모델을 적용하였다[6]. Figure 5는 유속에 따른 기계적 출력을 BEM 코드와 CFD 결과를 비교하여 나타낸 그래프이다. 기계적 출력은 동력전달장치 및 발전기를 거쳐 전기적 출력으로 변환되는데, 이 때 시스템 손실을 고려하면 기계적 출력은 전기적 출력보다 항상 높은 값을 갖는다. 본 연구에서는 정격유속 2.5m/s에서 전기적 출력을 기준으로 2MW 급을 발생시킬 수 있는 블레이드를 설계하였다. 블레이드요소 운동량 이론에 의한 결과 정격유속에서 기계적 출력은 2,121kW로서 2MW 급 전기적 출력을 만족하였다. 하지만 CFD에 의한 기계적 출력은 1,901kW로서 목표출력에 다소 부족한 결과를 보였다. 이는 패널법인 X-FOIL은 수중익의 공력계수를 다소 크게 예측하는 것으로 알려져 있으므로, 이와 같은 결과차이를 보이는 것으로 판단된다[7]. 따라서 향후 보정을 통한 X-FOIL 결과의 신뢰성 확보와 2MW급 목표출력을 만족하기 위한 추가 개선 설계작업이 필요할 것으로 판단된다.

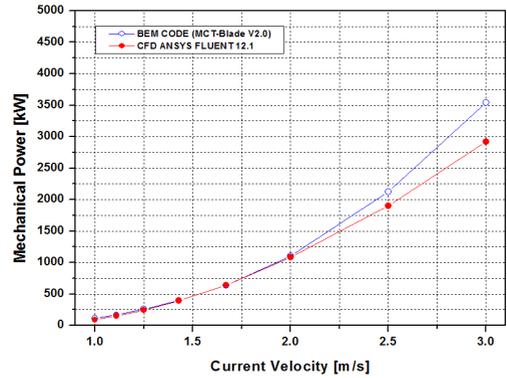


Figure 5: Comparison of mechanical power values from BEMT and CFD

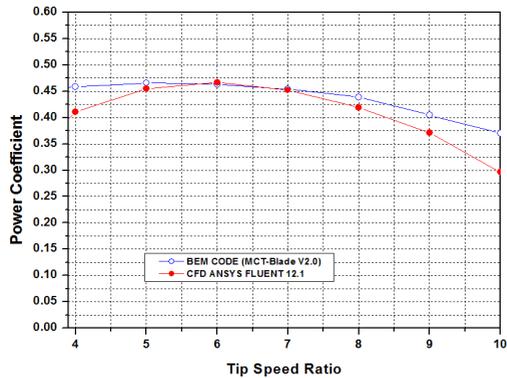


Figure 6: Comparison of power coefficients from BEMT and CFD

Figure 6은 유속에 따른 기계적 출력을 출력계수로 환산하여 나타낸 그래프이다. BEMT 결과인 경우, 유속이 증가할수록 출력계수는 서서히 증가하다가 TSR 5~6 근처에서 최대치를 통과한 후, 그 이후에는 출력계수가 점차 떨어지는 경향을 보이고 있다. 그리고 전체적으로 CFD 해석결과보다 다소 높게 예측을 하고 있다. CFD에 의한 해석의 경우, TSR 값 6에서 최대출력계수는 0.467이며, 전체적으로 포물선 형태의 매끄러운 곡선을 보이고 있다. 출력계수 비교에서도 전체적으로 BEMT에 의한 결과가 다소 높게 예측됨을 알 수 있다. 이는 블레이드가 수중익의 집합체로 구성되어 있으므로 2차원 수중익의 공력특성을 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 따라서 신속하고 빠른 해석코드인 X-FOIL 결과의 신뢰성 확보를 위해 보정식을 통

한 해석기법의 정립이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 BEMT를 적용하여 실속제어형 수평축 조류발전용 블레이드 설계 및 성능평가가 가능한 국산 소프트웨어인 MCT-blade V2.0을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 블레이드요소 운동량 이론을 적용하여 2MW 급 로터 블레이드 설계를 수행함으로써 관련 설계기법을 확립하였고, 최종적으로 성능평가를 위한 MCT-blade V2.0 국산 소프트웨어 개발을 완료하였다.

(2) 수중의 별 공력계수는 패널법인 X-FOIL를 활용하여 성능 데이터를 추출하였으며, 실속각이상에서는 Viterna의 실속 후 공력특성 예측모델을 적용하였다.

(3) 정격유속에서 BEMT에 의한 기계적 출력은 2.121kW로써 전기적 출력을 만족하였지만, CFD에 의한 기계적 출력은 1.901kW로써 목표출력에 비해 다소 부족한 결과를 보였다.

(4) 기계적 출력에 있어 BEM과 CFD의 계산결과 차이는 10.4%이며, 이와 같은 오차를 줄이고 MCT-blade V2.0 설계소프트웨어의 신뢰성을 확보하기 위해서는 X-FOIL 데이터의 보정식을 적용한 해석기법의 정립이 필요하다.

## 참고문헌

- [1] 모장오, 김범석, 김만응, 오철, 이영호, "BEMT를 적용한 피치제어형 수평축 풍력터빈 블레이드 설계 및 성능평가 소프트웨어 개발", (사)한국풍력에너지학회 춘계학술대회, 2010
- [2] 모장오, 수평축 풍력발전용 터빈의 공력성능 및 소음예측에 관한 수치적 연구, 한국해양대학교 공학박사학위논문, 2009
- [3] 김범석, 수평축 풍력발전용 터빈 블레이드 최적 설계 및 공력성능해석에 관한 연구, 한국해양대학교 공학박사학위논문, 2005
- [4] F. Bertagnolio, N. Sørensen, J. Johansen and P. Fuglsang, "Wind Turbine Airfoil Catalogue"
- [5] L. A. Viterna and R. D. Corrigan, "Fixed pitch rotor performance of large horizontal-axis wind turbines," DOE/NASA Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio, July 1981.
- [6] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", AIAA Journal, vol. 32, no. 9, pp. 1598-1605, August 1994.
- [7] W. M. J. Batten, A. S. Bahaj, A. F. Molland, and J.R. Chaplin, "The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines", Renewable Energy (33) pp. 1085-1096, 2008.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 "해양에너지전문인력양성 사업"의 지원사업으로 수행된 연구결과물이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제 (NO. 2009-3021070010 및 NO.2009- 3020070020)입니다.

## 저 자 소 개



모장오(牟奘吾)

1977년 4월생 2001년 한국해양대학교 기계공학과 공학사, 2003년 한국해양대학교 기계공학과 공학석사, 2009년 한국해양대학교 기계공학과 공학박사, 2004년 3월~2009년 10월 에이티에스(주) CFD 컨설팅 사업부 과장, 2010년 3월~현재 한국해양대학교 해양에너지전문인력양성사업단 전임연구원, 관심분야 CFD, 열유체, 풍력발전 및 조류발전용 블레이드 최적설계 및 국산소프트웨어 개발, 공력소음, 해수 온도차 발전 등



**김만응(金晩應)**

1980년 한국해양대 기관공학과 졸업, 2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과(공학박사), 현재 (사)한국선급 에너지환경사업단 단장



**현범수(玄汎洙)**

1979년 서울대학교 조선공학과 졸업(공학사), 1981년 서울대학교 대학원 졸업(공학석사), 1990년 미국 Univ. of Iowa 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 조선해양시스템공학부 교수



**김유태(金由澤)**

1990년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1996년 한국해양대학교 대학원 졸업(공학석사), 2000년 일본 큐슈공업대학 대학원 졸업(공학박사), 2008년~2010년 University of British Columbia 방문교수, 1990년~1993년 SK해운 엔지니어, 2001년~현재 한국해양대학교 재직(해사대학, 기관시스템공학부), 당학회 종신회원



**오 철(吳喆)**

1958년생, 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과졸업(공학석사), 1998년 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수.



**이영호(李英浩)**

1958년 2월 24일생, 1980년 한국해양대학교 기관 공학과 공학사, 1982년 한국해양대학교 기관공학과 공학석사, 1992년 동경대학 공학부 기계공학과 공학박사, 현재 한국해양대학교 기계·에너지 시스템공학부, 교수, (사)한국풍력에너지 학회 부회장, 2010년 사단법인 유체기계공업학회 부회장