

## BEMT를 적용한 20kW 수평축 풍력터빈 형상설계 및 성능해석

강호근\* · 김범석† · 남청도\*\* · 이영호\*\*\*

(원고접수일 : 2006년 8월 5일, 심사완료일 : 2006년 9월 15일)

### A Study on the Configuration Design and the Performance Analysis of the 20kW HAWT based on BEMT

Ho-Keun Kang\* · Beom-Seok Kim† · Cheong-Do Nam\*\* and Young-Ho Lee\*\*\*

**Abstract** : The optimum design and the performance analysis software called *POSEIDON* for the HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) is developed by use of BEMT, which is the standard computational technique for prediction of power curves of wind turbines. The Prandtl's tip loss theory is adopted to consider the blade tip loss. The lift and the drag coefficient of S-809 airfoil are predicted via X-FOIL and the post stall characteristics of S-809 also are estimated by the Viterna's equations.<sup>[13]</sup> 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 are used for the power prediction of the FIL-20 respectively. The comparison results shows good agreement in power prediction.

**Key words** : Horizontal axis wind turbine(HAWT, 수평축 풍력발전용 터빈), Blade element momentum theory(BEMT, 날개요소-운동량이론), Power coefficient(동력계수), Post stall model(실속 후 모델), Prandtl's tip loss theory(Prandtl 팁 손실 이론)

#### Nomenclature

	$N$	number of blade
	$N_{rpm}$	rotating speed
$a$		axial flow induction factor
$a'$		tangential flow induction factor
$C$		chord length, coefficient
$D$		rotor diameter, $m$
$f$		tip loss coefficient
	$P_r$	Power, $kW$
	$R$	radius, $m$
	$V_R$	wind speed, $m/s$
	$C_p$	power coefficient

† 책임저자(CFX코리아), bum\_suck@pivlab.net, Tel: 051)410-4940

\* 경상대학교 해양산업연구소

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부

\*\*\* 한국해양대학교 기계정보공학부

## Greek symbols

$\alpha$	angle of attack
$\alpha_{stall}$	stall angle
$\eta$	efficiency of power
$\lambda$	tip speed ratio, TSR
$\mu$	non-dimensional local position
$\rho$	density of air, $kg/m^3$
$\sigma_r$	local solidity

## Subscript

$l,max$	maximum lift force
$d,max$	maximum drag force
$r$	local radius

## 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 환경친화적인 대체 에너지원으로써 풍력발전의 가능성을 검토 중이며, 다양한 연구가 국가지원 하에 유관업체 및 연구기관들 주도하에 진행되고 있다.

한편, 대관령, 제주 및 포항 등지에 구성된 실증 연구단지에서 운용중인 풍력터빈은 모두 국외에서 수입해온 모델들로 앞으로 우리나라가 본격적인 풍력발전 시장에 진입하여 선진 국가들과 경쟁하기 위해서는 풍력터빈 요소설계기술의 확보를 통한 국산 모델의 개발이 시급한 실정이다. 풍력터빈은 크게 나누어 로터 블레이드, 나셀(nacelle), 타워(tower) 등으로 구분되며, 바람의 운동에너지를 효율적으로 흡수하여 구동장치(drive train)로 전달하는 로터블레이드의 최적설계 기법은 관련된 핵심 요소기술 중의 하나이다. 현재 로터블레이드 설계를 위하여 YAWDYNN<sup>(1)</sup>이나 BLADED<sup>(2)</sup>와 같은 로터 설계 소프트웨어가 미국이나 유럽 국가들을 중심으로 사용되고 있으며,

국내의 경우 (주)UNISON<sup>(3)</sup>이 2003년도에 750kW급 수평축 풍력터빈의 설계를 수행한 바 있다. 또한 Kim등<sup>(4),(5)</sup>은 500kW급 및 1MW 수평축 풍력발전용 로터블레이드 유동해석 및 성능평가를 위해 상용 CFD 코드(CFX-TASCflow)를 이용하여 터빈의 최적공력설계에 관한 연구를 수행한 바 있다.

현재 국내 요소설계 기술수준은 풍력 발전용 터빈의 핵심요소기술 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* 등<sup>(2)</sup>과 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 성능 예측 기법들에 대한 연구를 통해 독자적인 설계 및 성능평가 소프트웨어의 개발이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 블레이드 손실 모델을 적용한 BEMT 이론을 활용하여 20kW 로터 블레이드 최적 설계를 수행함으로써 관련 설계기법을 확립하였고, 최종적으로 성능평가를 위한 국산 소프트웨어의 개발을 수행하였다. 즉, 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 *POSEIDON*으로 명명되었다.

## 2. 로터 블레이드 설계

## 2.1 로터 블레이드 직경 및 회전수 결정

로터 블레이드 직경( $D$ )의 결정을 위하여 다음식을 이용하였으며, 추정 동력계수(assumed power coefficient,  $C_p$ )는 0.45, 동력전달 계통장치(power train)와 발전기의 효율은 각각 0.9로 가정하였다.

$$D = \sqrt{\frac{8P_r}{\eta C_p \rho \pi V_R^3}} \quad (1)$$

여기서,  $P_r$ 는 정격출력,  $\eta$ 는 효율(동력전달장치 × 발전기),  $V_R$ 는 정격풍속 및  $\rho$ 는 공기의 밀도를 나타내며, 정격출력이 1MW이고 설계풍속이 10m/s인 경우 로터의 직경  $D$ 는  $D=54.5m$ 가 된다. 로터블레이드의 정격회전수를 결정하기 위하여 식(2)를 적용하였으며, 날개끝 속도비(TSR)는  $TSR=7.5$ 로 하였다.

$$N_{rpm} = 60 \left( \frac{V_{Design}}{\pi D} \right) \lambda \quad (2)$$

따라서, 1MW 풍력터빈 회전자 경우 정격회전수( $N$ )는  $N_{rpm} = 26rpm$ 이 된다.

## 2.2 날개 끝 손실계수 모델의 적용

회전하는 로터 블레이드는 날개 끝 와류(tip vortex)의 발생으로 인한 순화분포의 감소에 의한 영향으로 날개 끝 손실(tip loss)이 발생한다. 이를 예측하기 위한 해석적 방법으로 Prandtl의 날개 끝 손실 예측모델<sup>(6),(7)</sup>을 적용하였다.

$$f(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ e^{-((N/2)(1-\mu)/\mu) \sqrt{1+(\lambda\mu^2)/(1-a)^2}} \right] \quad (3)$$

여기서,  $\mu=r/R$ 는 블레이드 국부위치(blade local position)를 나타내며, 0.05(hub)부터 1(tip)까지 등간격으로 0.05씩 증가한다. 이때 로터블레이드는 허브(hub)부터 팁(tip)까지 모두 20등분으로 구획되었다.  $\lambda$ 는 팁 속도비( $=\Omega R/U_\infty$ )를,  $N$ 은 블레이드 개수를 나타낸다.

식(3)에 사용되는 축흐름 유도계수  $a$ 는 초기 설계단계에서 BEMT에 의한 예측이 불가능하므로 공력학적 항력에 의한 손실이 없고 블레이드 날개수가 무한하다고 가정한 운동량 이론으로부터 유도할 수 있는 풍력터빈의 이론적 최대효율을 얻을 수 있는 값인 1/3을 적용하여 설계에 반영한다. 이는 Betz 이론으로부터 유도되는 값과 정확하게 일치한다. 블레이드 각 부 위치에서의 손실계수 값을 Fig. 1에 나타내었다. 이때, 날개 끝 손실의 발생은

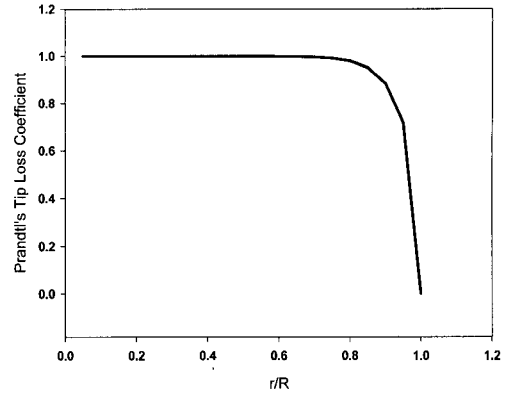


Fig. 1 Tip loss coefficient

블레이드 국부위치에서 축 흐름유도계수(axial flow indication factor,  $a$ )의 변화를 초래하므로 이를 반영한 축 흐름유도계수와 회전 흐름유도계수(tangential flow induction factor,  $a'$ )를 계산하기 위하여 앞에서 계산된 날개 끝 손실계수를 적용하고 BEM이론으로부터 유도된 수식의 항력 항을 무시하고 흐름유도계수를 구한 식을 유도하면 다음과 같다.

$$a = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}f - \frac{1}{3}\sqrt{1-f+f^2} \quad (4)$$

$$a' = \frac{a(1-a/f)}{\lambda^2 \mu^2} \quad (5)$$

위의 식(4) 및 (5)를 이용하면, 블레이드 국부위치 변화에 따른 축흐름유도계수  $a$  및 회전흐름 유도계수  $a'$  값을 구할 수가 있으며, 날개 끝 속도비(tip speed ratio, TSR)가 3 이상인 경우 비교적 정확한 결과를 예측할 수 있다.

## 2.3 현의 길이 결정

블레이드를 구성하는 익형의 국부위치 무차원 현의 길이를 결정하기 위해서 우선 블레이드 날개 끝 부분에 사용할 익형을 선정한다. 결정된 날개 끝 익형의 공력특성 데이터에서 최대 양향비를 나타내는 지점에서의 양력계수, 이미 새로 계산된 축간섭계수와 회전 간섭계수, 블레이드 개수, 설계 주속비 등을 이용하여 현의 길이를 각각 계산한다.

$$\frac{C}{R} = \frac{2\pi}{N\lambda C_l} \times \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + (\lambda\mu(1+a'))^2}} \quad (6)$$

식(6)에 의해 계산된 현의 길이는 블레이드 허브 부분으로 갈수록 급격히 증가하는 특징을 나타내고 있으나, 로터블레이드 성능을 크게 좌우하는 영역은 날개 끝으로부터 약 30% 정도에 지나지 않으며, 이 영역에 대한 정확한 형상 설계 데이터의 반영만 이루어지면 된다. 허브로부터 30%까지의 영역은 성능을 고려한 설계보다는 구조적으로 안정된 블레이드의 지지를 위한 구조적 설계방법을 고려하여야 하는 부분이다. 따라서 우수한 성능을 확보하기 위한 설계적 관점에서 실제로는 식(6)으로부터 얻은 데이터를 바탕으로 블레이드를 제작하여야 하나, 블레이드 제작의 용이성 및 비용의 절감을 위해 허브로부터 70~90% 사이의 영역을 기준으로 직선의 방정식에 의한 선형 근사화를 통해 전체 블레이드 국부위치에서의 현의 길이를 재계산한다.

한편, 입구유입 유동각  $\phi$ 은 다음식을 통해 결정할 수가 있다.

$$\tan\phi = \frac{1-a}{\lambda\mu(1+a')} \quad (7)$$

## 2.4 로터 블레이드 형상의 최적화

BEMT에 의한 설계 및 성능평가는 초기에 “로터 블레이드 반경방향으로 진행하는 흐름은 없다”라는 균일 순환조건의 가정으로부터 출발한다<sup>(7)</sup>. 즉, 로터 블레이드 상류에서 유입되는 흐름의 축방향 성분은 축방향으로 항상 일정하게 유지된다는 것이다. 그러나 불균일 순환조건에서는 로터블레이드 반경방향의 상호작용과 블레이드 요소를 통과하는 흐름 사이에서 운동량 교환이 발생된다. 따라서 로터블레이드 단면에서 압력강하를 발생시키는 원인이 되는 블레이드 요소를 통과하는 흐름에 대해 반경방향 흐름에 대한 영향은 없고 축방향 흐름만이 작용한다는 초기가정은 이론적인 문제점을 내포한다. 그렇지만 실제로는 날개 끝 속도비가  $TSR \geq 3$ 의 범위를 가지는 경우에는 실험 데이터와 BEMT에 의해 계산된 성능특성의 오차범위가 상당히 작기 때문에 초기가정의 적용성에 대한 문제가 없다

고 알려져 있다<sup>(4)</sup>. 이러한 BEMT이론은 현재 풍력 발전 산업에서 설계 및 성능해석의 표준으로 인식되고 있으며, 보다 정확한 성능예측을 위해 Prandtl's tip loss 이론 등과 같은 손실 모델을 적용하여 최적화된다.

식(8), (9)는 Prandtl's tip loss 이론에 의해 계산된 날개 끝 손실의 영향을 포함한 BEMT로부터 유도된 식이다<sup>(8)-(11)</sup>.

$$\frac{af}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4\sin^2\phi} \left( C_x - \frac{\sigma_r}{4\sin^2\phi} C_y^2 \right) \frac{1-a}{1-af} \quad (8)$$

$$\frac{a'f}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4\sin\phi \cos\phi} \frac{1-a}{1-af} \quad (9)$$

일반적으로 BEMT이론을 통한 성능해석 과정에 적용되는 2차원 원형의 공력특성 예측 정확도에 따라 실험결과와 BEMT 해석결과의 성능특성에서 오차범위가 크게 달라지므로 정확한 공력특성 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 공력특성 예측 소프트웨어를 활용하여 효과적으로 공력특성을 예측하고 있으나, 근본적으로 이러한 소프트웨어는 Pannel 법에 근거하므로 실속 후 공력특성에 대한 정확한 예측이 불가능하다는 문제점을 가진다. BEMT 모델에 대한 적용을 위해 Viterna등<sup>(12)</sup>은 실속 후 공력특성 예측모델을 적용하였으며, MOD-0, MOD-1 터빈의 성능해석을 위해 풍동실험으로부터 획득한 실험데이터와 실속 후 모델에 의해 예측된 데이터를 적용한 연구를 수행하였다. 또한, Tangler등<sup>(13)</sup>은 Viterna의 방법에 기초해 실속 후의 3-D 공력특성들에 관한 실험적 연구를 수행하여 BEMT에 필요한 제반변수들을 검토하였다. Viterna의 실속 후 공력특성 예측 모델은 식(10)-(19)에 나타나 있다.

$$C_x = C_l \cos\phi + C_d \sin\phi \quad (10)$$

$$C_y = C_l \sin\phi + C_d \cos\phi \quad (11)$$

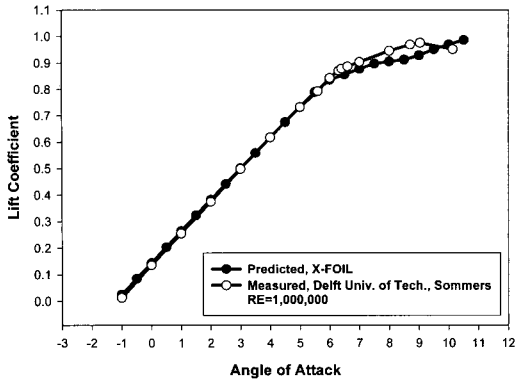


Fig. 2 Lift coefficient comparison with S-809

$$C_{d,max} = 1.11 + 0.018AR \quad (\alpha = 90^\circ) \quad (12)$$

$$C_d = B_1 \sin^2 \alpha + B_2 \cos \alpha \quad (\alpha = 15^\circ \text{ to } 90^\circ) \quad (13)$$

$$B_1 = C_{d,max} \quad (14)$$

$$B_2 = \frac{C_{d, stall} - C_{d,max} \sin^2 \alpha_{stall}}{\cos \alpha_{stall}} \quad (15)$$

$$C_l = A_1 \sin 2\alpha + A_2 \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \quad (\alpha = 15^\circ \text{ to } 90^\circ) \quad (16)$$

$$A_1 = B_1/2 \quad (17)$$

$$A_2 = (C_{l, stall} - C_{d,max} \sin \alpha_{stall} \cos \alpha_{stall}) \frac{\sin \alpha_{stall}}{\cos^2 \alpha_{stall}} \quad (18)$$

$$\sigma_r = \frac{NC}{2\pi\mu R} \quad (19)$$

### 3. 20kW 블레이드 설계

정확한 형상설계 및 성능예측을 위해서는 로터블레이드를 구성하는 익형의 신뢰성이 있는 공력특성 데이터를 반드시 확보해야만 한다. 수많은 종류의 익형에 대한 실험 공력특성 데이터를 확보하기는 매우 힘든 실정이다. 따라서 설계자는 신속한 피드백(feedback)에 의한 효율적인 설계기법의 확립을 위해서는 다양한 익형의 공력특성 데이터를 쉽게 얻을 수 있어야 한다. 풍력 선진국가에서는 보통 X-FOIL과 Visual FOIL과 같은 소프트웨어를 활

용하여 2차원 익형의 공력특성을 예측하며 최근 CFD기법을 활용한 사례도 활발히 적용되고 있다<sup>(14)</sup>. X-FOIL과 Visual FOIL은 2차원 panel 법을 기본으로 하며, CFD에 비해 매우 신속한 해석이 가능하기 때문에 실속(stall) 이전의 영역에 대해 비교적 신뢰성이 있는 공력특성 데이터의 확보에 상당한 도움이 된다.

본 연구를 통해 BEMT법에 의한 20kW 로터블레이드 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 Somers<sup>(15)</sup>에 의해 수행된  $Re = 10^6$ 의 풍동실험 결과와 비교하였으며, 실험결과와 잘 일치하는 결과를 얻었다.

Table 1 Specification of FIL-20 Rotor

ROOT ●	Local position	Twist angle(deg)	Position(m)	Chord length(m)	Airfoil series
	0.20	19.54	1.0140	0.68923	S809
	0.25	15.86	1.2675	0.66254	S809
	0.30	12.95	1.5210	0.63586	S809
	0.35	10.65	1.7745	0.60917	S809
	0.40	8.81	2.0280	0.58248	S809
	0.45	7.31	2.2815	0.55580	S809
	0.50	6.07	2.5350	0.52911	S809
	0.55	5.03	2.7885	0.50243	S809
	0.60	4.15	3.0420	0.47574	S809
	0.65	3.39	3.2955	0.44905	S809
	0.70	2.72	3.5490	0.42237	S809
	0.75	2.13	3.8025	0.39568	S809
	0.80	1.59	4.0560	0.36900	S809
	0.85	1.06	4.3095	0.34231	S809
	0.90	0.52	4.5630	0.31562	S809
	0.95	-0.12	4.8165	0.28894	S809
TIP ●	1.00	-0.12	5.0700	0.26225	S809

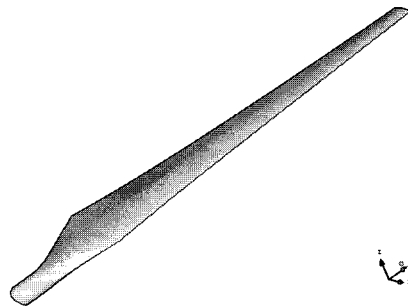


Fig. 3 Isometric view of FIL-20 type

Fig. 2는 S-809를 이용한 양력계수를 나타내고 있다. 설계된 로터블레이드는 FIL-20으로 명명되었으며, 자세한 설계사양은 Table 1에 요약하여 나타내었다. Fig. 3에 FIL-20의 3차원 형상 모델링의 결과를 나타내고 있다.

#### 4. 성능해석

로터 블레이드 성능 평가를 위해 Delft university of technology의 풍동에서 Somers<sup>[15]</sup>에 의해 수행된 공력특성 결과를 사용하였으며, X-FOIL에 의해 예측된 수치해석 데이터를 비교목적으로 사용하였다. 실험 및 수치해석의 레이놀즈수는  $10^6$ 이다. 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.

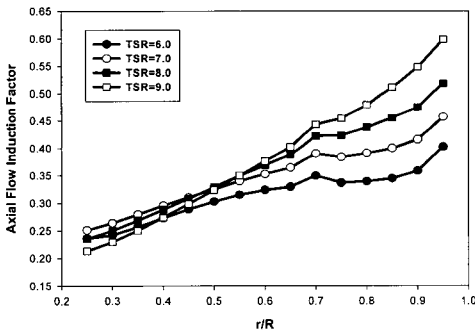


Fig. 4 Axial flow induction factors (using measured lift and drag coefficient)

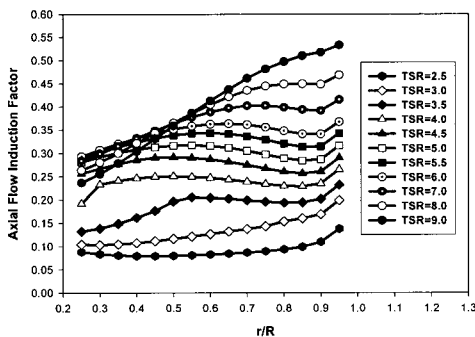


Fig. 5 Axial flow induction factors (using predicted lift and drag coefficient)

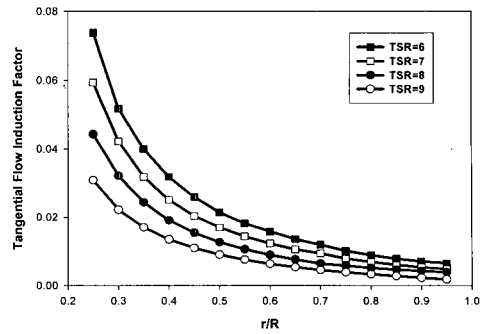


Fig. 6 Tangential flow induction factors (using measured lift and drag coefficient)

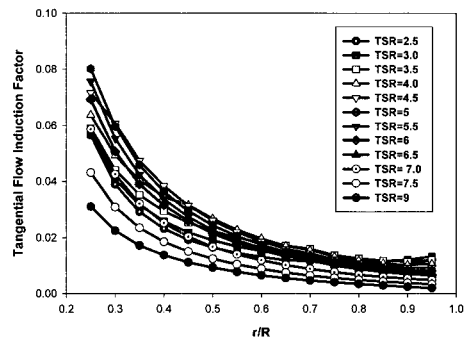


Fig. 7 Tangential flow induction factors (using predicted lift and drag coefficient)

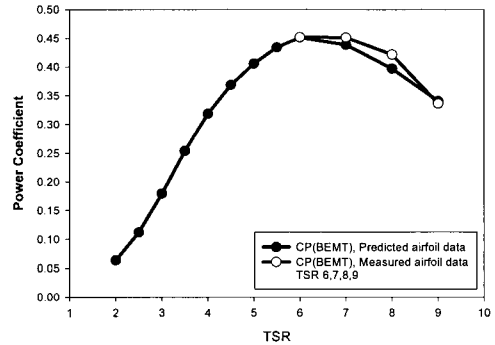


Fig. 8 Comparison of the power coefficient on the FIL-20

Fig. 6, Fig. 7에 회전 흐름유도계수의 변화를 나타내었다. 두 경우 모두 실험결과와 수치해석 결과가 비슷한 분포를 나타내고 있으나 국부적으로 미소한 차이를 나타내고 있다. 이는 실험과 수치해석 사이에 발생하는 공력특성 데이터의 오차에 기인한다. Fig. 8에 FIL-20의 성능계수 비교

결과를 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 일치 하고 있음을 알 수 있었으나, TSR = 8, 9의 경우 미소한 차이가 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, 9의 경우 실험결과와 수치해석결과가 서로 잘 일치하는 특징을 나타내고 있으며, 이 범위에서 성능예측에 참조되는 익형 공력특성 예측 정도가 높기 때문이라 사료된다.

## 5. 결 론

로터 블레이드의 기초설계변수의 도출을 위하여 손실 모델을 적용한 BEMT 이론을 도입하여 20kW 로터 블레이드인 FIL-20의 최적설계 및 성능평가를 수행하여 관련 설계기법을 확립하였으며, 얻어진 결론들은 다음과 같다.

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-Corrigan<sup>[12]</sup>의 실속 후 보정식을 적용하였다. 실험 데이터와 비교결과 정량적으로 서로 잘 일치 하고 있음을 알 수 있었다.

3. 수치해석에 의해 예측된 양력계수, 항력계수는 실험에 의해 측정된 데이터에 비해 받음각 6.5°~10°의 범위에서 다소 낮은 값을 예측하기 때문에 수치해석에 의해 예측된 공력특성 데이터를 사용한 경우가 실험 데이터를 사용한 경우보다

TSR 7, 8의 위치에서 다소 낮은 출력특성을 나타낸다.

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

## 후 기

본 연구는 Sea Grant 시험대학사업단 및 에너지관리공단 에너지자원 기술개발사업(과제번호: 2004-12-01 28-3-001)에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/yawdyn/>
- [2] <http://www.garradhassan.com/products/ghbladed/>
- [3] (주)유니슨, 750kW급 Gearless형 풍력발전기 개발(2차년도 연구보고서), 산업자원부, 2003.
- [4] B.S. Kim, J.H. Kim and Y.H. Lee, "A Study on the 3D Flow Characteristics and the Performance Analysis of an 1MW HAWT by CFD", the 3rd WREC, 2004.
- [5] B.S. Kim, "A Study on the Optimum Blade Design and the Aerodynamic Analysis for the HAWT", Doctoral Thesis, Korea Maritime University, 2005.
- [6] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, Wind Energy, Wiley: Chichester, 2001.
- [7] J. Martinez, L. Bernabini, O. Probst and C. Rodriguez, "An Improved BEM Model for the Power Curve Prediction of Stall-regulated Wind Turbines", Wind Energy, Vol.8, pp. 385-402, 2005.

- [8] D.A. Spera (ed.), Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering. ASME Press: New York, 1998.
- [9] M.O.L. Hansen, Aerodynamic of Wind Turbines: Rotors, Loads and Structure. James & James: London, 2000.
- [10] M. Magnusson and A.S. Sedman, "Air Flow Behind Wind Turbines", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.80, pp. 169-189, 1999.
- [11] D.M. Eggleston and F.S. Stoddard, Wind Turbine Engineering Design. Van Nostrand Reinhold: New York, 1987.
- [12] 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, pp. 69-85, 1981.
- [13] J.L. Tangler, "The Nebulous Art of Using Wind Tunnel Aerofoil Data for Predicting Rotor Performance", Wind Energy, Vol.5, pp. 245-257, 2002.
- [14] N.N. Sorensen, J.A. Michlesen and S. Schreck, Detailed Aerodynamic Prediction of the NREL/NASA Ames Wind Tunnel Tests Using CFD, European Wind Energy Conference, Copenhagen, pp. 48-53, 2001.
- [15] D.M. Somers, "Design and Experimental Results for the S809 Airfoil", NREL/SR-440-6918, 1997.

## 제 자 소개



### 강호근 (姜鎬根)

1969년생, 1992년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1997년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사), 2001년 Kobe Univ. 기계공학과 졸업(박사), 현재 경상대학교 해양산업연구소 학술연구교수



### 김범석 (金範錫)

1975년 11월생. 2001년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 2003년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 2005년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 현재 CFX 코리아 연구원



### 남청도 (南靑都)

1949년 10월생. 1972년 한국해양대학교 기관공학과 졸업. 1987년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1992년 동대학원 기계공학과 졸업(박사). 1997 ~ 1998 영국웨일즈 대학교 교환교수. 1984~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수. 당학회 기획이사. 관심분야: 풍력발전



### 이영호 (李英浩)

1958년생. 1986~1989년 일본 동경대학 기계공학과 졸업(공학박사) 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 교수.