

# CFD에 의한 1MW 수평축 풍력발전용 로터 설계 및 해석에 관한 연구

김범석\* · 김유탉\*\* · 남청도\*\* · 김진구\*\*\* · 이영호\*\*\*\*

## A Study on the 1MW Horizontal Axis Wind Turbine Rotor Design and 3D Numerical Analysis by CFD

B. S. Kim\*, Y. T. Kim\*\*, C. D. NAM\*\*, J. G. Kim\*\*\* and Y. H. Lee\*\*\*\*

Key Words : CFD(전산유체역학), HAWT(수평축 풍력발전용 터빈), BEMT(블레이드 요소 운동량 이론), CFX

### ABSTRACT

In this paper, a 1MW HAWT(FIL-1000) rotor blade has been designed by BEMT(Blade Element Momentum Theory) with Prandtl's tip loss. Also, a 3-D flow and performance analysis on the FIL-1000 rotor blade has been carried out by using the 3-D Navier-Stokes commercial solver (CFX-5.7) to provide more efficient design techniques to the large-scale HAWT engineers. The rated power and its approaching wind velocity at design point (TSR=7.5) are 1MW and 9.99m/s respectively. The rotor diameter is 54.5m and the rotating speed is 26.28rpm. Airfoils such as FFA W-301, DU91-W-250, DU93-W-210, NACA 63418, NACA 63415 consist of the rotor blade from hub to tip. Recent CFX version, 5.7 was adopted to simulate 3-D flow field and to analyze the performance characteristics of the rotor blade. Entire mesh node number is about 730,000 and it is generated by ICM-CFD to achieve better mesh quality. The predicted maximum power occurring at the design tip speed ratio is 931.45kW. Approaching to the root, the inflow angle becomes large, which causes the blade to be stalled in the region. Therefore, k- $\omega$  SST turbulence model was used to predict the quantitative flow information more accurately. Application of commercial CFD code to optimum blade design and performance analysis was proved to be more effective environment to HAWT blade designers.

### 1. 서론

풍력발전용 로터 블레이드 최적 설계를 위하여 다양한 이론이 제안되고 있으나, 전 세계적으로 가장 보편화된 형상 설계이론은 블레이드 요소 운동량 이론(Blade Element Momentum Theory)이다. 따라서, 본 연구에서는 1MW 수평축 풍력 발전용 터빈의 로터 블레이드 설계과정에 BEMT를 적용하였다.

BEMT에 의한 설계 과정에서 최적 로터 블레이드 형상을 구현하기 위해 블레이드를 구성하는 익형(airfoil)의 정확한 공력특성(aerodynamic characteristics) 데이터의 확보는 필수적이다. 이는 많은 로터 블레이드 설계자들에게 큰 부담으로 작용하며, 실제 다양한 익형의 수많은 조건변화에 대한 정확한 공력특성 데이터를 개개인이 확보하기란 사실상 거의 불가능한 현실이다. 또한, BEMT는 로터 블레이드 설계 및 해석에 많은 도움을 주는 도구임에 틀림없지만, 블레이드 표면 압력분포, 복잡한 3차원 유동현상 등의 정량적·정성적인 정보를 전혀 예측할 수 없는 단점이 있다.

지난 수십년간 컴퓨터 하드웨어의 눈부신 발전으로 개인 PC 사용자 수준에서도 대다수의 물리적인 현상

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학과

\*\*\* 충북과학대 기계·자동차과

\*\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부

E-mail : bum\_suck@pivlab.net

을 전산해석을 통해 구현할 수 있게 되었으며, 이를 바탕으로 CFD 기법은 산업체 전반적인 영역에 대해 급속도로 그 적용범위를 확장해가고 있으며, 다양한 해석결과를 통해 그 신뢰성을 검증받고 있다.

2001년 이후부터 RISO, NASA, NREL 등의 대규모 국가연구소등을 중심으로 CFD를 이용한 풍력발전용 로터 블레이드 3차원 유동해석 및 성능평가에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 몇몇 결과는 상당히 만족스러운 결과를 제시하고 있다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 2차원 익형의 공력성능 해석을 위하여 X-Foil(MIT Aero&Astro)을 이용하였으며, Prandtl의 날개 끝 손실이론을 적용한 BEMT 기법을 활용하여 1MW 로터 블레이드를 설계하였다. TSR(Tip Speed Ratio)의 변화에 따른 3-D 유동해석 및 성능평가를 위해 CFX-5.7을 적용하였다.

## 2. 로터 형상설계

본 연구의 설계 및 해석대상으로 적용된 로터 블레이드는 BEMT에 의해 설계된 1MW 수평축 풍력발전용 로터 블레이드이며, 출력제어를 위해 실속제어(stall control) 방식을 사용한다. 로터 직경은 식 1에 의해 결정되며, 54.5m이다. 여기서, 동력계수(power coefficient)는 0.45, 동력계통장치(power train)의 효율은 0.9로 가정하였다. 정격풍속(rated wind speed)은 12m/s이며, 설계 풍속(design wind speed)는 10m/s로 하였다.

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

로터의 정격회전속도를 결정하기 위하여 식 2를 적용하며, TSR=7.5에서 26.28rpm 이다.

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

블레이드 끝단에서 발생하는 날개 끝 손실을 예측하기 위하여 식 3을 사용하였다.

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

여기서,  $\mu$ 는 블레이드 국부위치를 나타내며 0.05(hub)부터 1(tip)까지 0.05의 등 간격으로 분할된다.

설계과정에서 적용되는 축흐름유도계수(axial flow induction factor)와 회전흐름유도계수(tangential flow induction factor)는 식 4로부터 결정된다.

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

식 4는 항력의 효과를 무시한 BEMT 모델로부터 유도된 수식이며, 일반적으로 항력은 양력에 비해 전체 시스템 성능에 영향을 주는 정도가 미약하므로 초기 설계단계에서 무시되어도 좋다. 그러나, 최종단계에서는 정확한 성능해석 및 형상설계데이터의 확보를 위해 반드시 고려되어야 한다.<sup>(2)</sup>

블레이드 허브로부터 팁까지 국부위치에서의 익형 현의 길이(chord length)를 계산하기 위해 식 5를 적용한다. 이 과정에서 초기에 계산된 현의 길이는 허브로 갈수록 급격히 증가하는 형태를 나타내게 되는데, 일반적으로 중·대형 로터 블레이드의 경우 제작의 편의성 및 재료 절감을 위해 허브로부터 70%~100%의 위치에서 선형근사에 의한 수정된 현의 길이를 적용한다.

현의 길이를 구한 후, 블레이드 국부위치에서의 비틀림 각(twist angle)을 계산하기 위하여 식 6에 의해 상대 유입 유동각(relative inflow angle)을 구하며, 식 7에 의해 쉽게 비틀림 각을 계산 할 수 있다.

$$\frac{C}{R} = \frac{2\pi}{N\lambda C_l} \times \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + (\lambda\mu(1+a'))^2}} \quad (5)$$

$$\tan \phi = \frac{1-a}{\lambda\mu[1+a']} \quad (6)$$

$$\phi = \alpha + \theta \quad (7)$$

최종 블레이드 형상은 식 8, 식 9, 식 10에 의해 정의 되며, 식 10은 항력의 영향을 포함한 BEMT 모델로부터 유도된 수식이다.

최종적으로, BEMT 모델에 의한 형상 설계 후 반복 계산법을 통해 로터 블레이드의 성능해석을 수행한다.

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

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

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

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

Table 1에 이상과 같은 과정으로 설계된 1MW 로터의 형상데이터를 나타내었으며, 설계된 로터블레이드는 FIL-1000으로 명명되었다. Fig. 1에 FIL-1000의 3차원 형상 모델링 결과를 나타내었으며, 가시적 이해를 돕기 위해 너셀(nacelle), 타워(tower) 등을 포함한 전체 시스템 3차원 모델링을 수행하였다.

### 3. 수치해석

#### 3.1. 계산조건

본 연구에서 3차원 정상상태 유동장의 해석을 위해 범용 CFD 해석 툴인 CFX 5.7을 이용하였으며, 너셀과 타워에 의한 블레이드의 공력특성변화는 무시하였다.

입구조건으로써, 균일 속도유입조건을 적용하였으며, 다양한 운전 상태에서 해석조건의 반영을 위하여 TSR의 변화에 따른 계산조건을 설정하였다. TSR의 변화를 반영하기 위해 회전속도는 정격 회전속도를 유지하고 입구유입속도를 5.76m/s에서 36.48m/s까지 변화시키며 계산을 수행하였다.

Table 2에 계산조건을 요약정리 하였다.

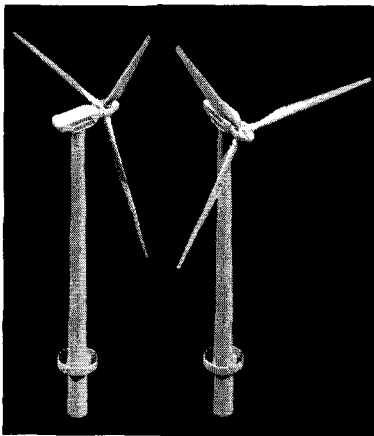


Fig. 1 Full 3-D Modelling of FIL-1000

Table 1. Specification of the FIL-1000 Model

Local position	Twist angle(deg.)	Position (mm)	Chord (mm)
0.2	17.9	5450.0	2629.25
0.25	14.4	6812.0	2524.09
0.30	11.7	8175.0	2418.94
0.35	9.73	9537.0	2313.79
0.40	8.14	10900.0	2208.63
0.45	6.87	12262.0	2103.48
0.50	5.83	13625.0	1998.32
0.55	4.97	14987.5	1893.17
0.60	4.24	16350.0	1788.01
0.65	3.62	17712.5	1682.86
0.70	3.08	19075.0	1577.71
0.75	2.60	20437.5	1472.55
0.80	2.17	21800.0	1367.40
0.85	1.77	23162.5	1262.24
0.90	1.35	24525.0	1157.09
0.95	0.83	25887.5	1051.93
1.00	0.83	27250.0	946.78

Table 2 Calculation Conditions

TSR	Wind speed (m/s)	Rotating speed (rpm)
3	24.98	26.28
4	18.74	26.28
5	14.99	26.28
6	12.49	26.28
7.5	9.99	26.28
9	8.33	26.28
10	7.49	26.28
11	6.81	26.28
12	6.24	26.28
13	5.76	26.28

#### 3.2. 계산격자

계산격자의 생성은 적용 난류모델의 특성에 따라 원활한 수렴 및 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해 y+, 경계층 격자 밀집도, 격자 형태, aspect ratio 등을 신중히 고려해야만 한다. 따라서, 우수한 품질의 계산격자의 확보가 CFD에서 첫 번째 필수적인 요소라 할 수 있다. 그러나, 단일 CPU에 의한 계산 환경에서는 하드웨어의 제한에 의한 충분한 격자 공간해상도를 확보하기가 상당히 까다롭다.

본 연구에서는 블레이드 주위 영역과 블레이드 주위

를 제외한 외부 영역으로 구성된 이중분할 격자계를 구성하였다. 블레이드에서 발생하는 토크(torque)의 정확한 예측을 위해 블레이드 주변영역을 multi-block unstructured hexa 격자계로 구성하였고, 나머지 영역은 tetra-prism 격자계로 구성하였으며, 두 영역의 경계면은 prism 격자로 처리하였다. 해석 도메인은 대칭 조건을 만족하므로 단일 블레이드만을 해석대상으로 하였다. 일반적으로 k- $\epsilon$  모델은 유동박리 현상이 지배적인 유동장의 예측에 있어 해석결과의 정도가 낮다고 평가되고 있으므로, 로터 블레이드 표면으로부터 발생하는 실속현상 등에 의한 복잡한 3차원 유동현상 해석을 위한 적용 난류모델로서 적합하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 k- $\omega$  SST 모델(Menter, 1993)<sup>(3)</sup>을 적용하였다. 블레이드 벽면 경계로부터 첫 번째 지점 격자까지의 거리의 척도인  $Y^+$ 는 20이하로 하였으며, 익형 현의 길이 방향을 따라 모두 180 노드의 격자를 분포시키고 로터 블레이드 반경방향으로 42 노드를 분포시켰다. 로터 블레이드 주위 격자수는 480,000 노드이며, 외부 도메인의 격자수는 250,000 노드이다. 전체 계산격자 수는 730,000 노드이다. 계산격자는 ICEM-CFD 5.0을 이용하여 생성되었다.

Fig. 2에 본 계산에 적용된 계산 격자계의 다양한 형태를 나타내었다.

### 3.3. 경계조건 및 계산시간

외부도메인 출구영역에 averaged static pressure 조건을 부여하였고, 단일 블레이드 계산을 위하여 양쪽 경계면에 periodic 경계면 처리를 하였다.

로터 블레이드로부터 입구까지의 거리는 로터 직경의 3배, 윗면으로 5배, 후방으로 7배를 확보하였으며, 로터 블레이드 벽면은 no-slip 조건으로 처리되었고, 상대회전조건을 부여하였다. 입구 유입조건으로써 균일한 흐름이 유입된다고 가정하였다.

계산은 단일 CPU(Pentium4 3.05GHz)로 수행되었으며, 2GB RAM을 사용하였다. 모든 계산은 100회 반복 계산 이전에 수렴이 되었으며, 수렴 판단 조건은  $10^{-5}$ 이다. 단일 케이스 계산 수행시간은 대략 5-7 시간정도 소요되었다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 블레이드 표면 유선

로터 블레이드 주위로 발생하는 복잡한 3차원 유동

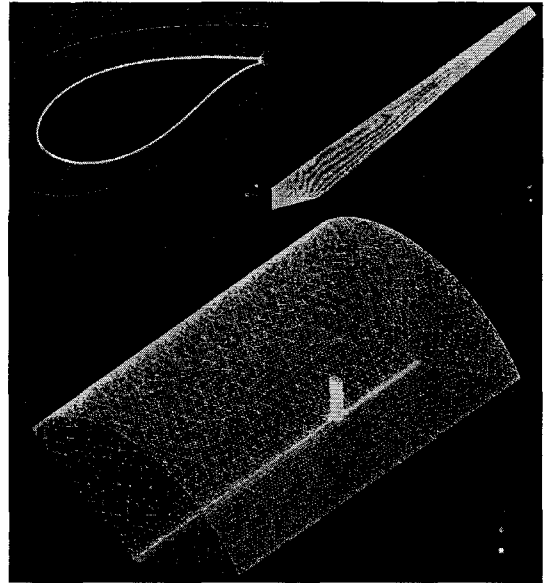
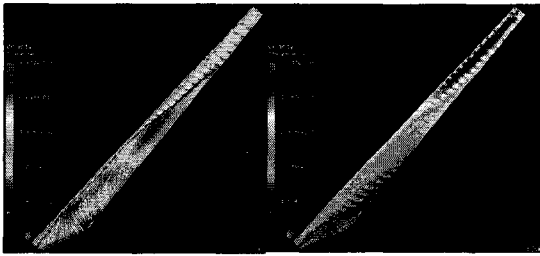


Fig. 2 Computational mesh

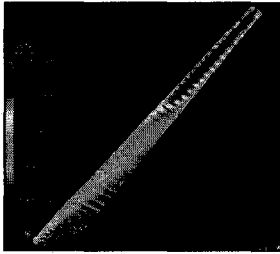
현상 등의 정확한 이해를 위하여 표면 압력분포, 표면 유선, 다양한 중첩된 결과를 TSR의 변화에 따라 대표적으로 나타내었다.

Fig. 3에 TSR 3, 7.5, 10에서 흡입면(suction side)의 표면 유선을 나타내었다. 항공기 날개는 받음각(AOA, angle of attack)의 변화가 익형 공력특성 변화에 지대한 영향을 미치며, 유동박리에 의한 실속현상을 발생시키는 직접적인 원인이 된다. 그러나 풍력발전용 로터 블레이드는 항공기 날개와는 달리 빠른 속도로 회전하고 있는 상태이므로, 원심가속력 (centrifugal acceleration)과 로터 허브-팁 사이의 압력차로 인하여, 허브 근방에서 이탈된 흐름이 블레이드 표면을 따라 팁 방향으로 진행되는 특징을 보인다.<sup>(4)(5)</sup> 이를 반경류(radial flow)라 하며 로터 블레이드 피치각(pitch angle)의 변화에 따른 받음각의 변화와 함께 실속을 초래하는 중요한 원인이 된다.

Fig.3(a)는 TSR=3( $V_{in}=24.98m/s$ )에서 블레이드 표면 흐름을 나타내고 있다. 로터의 회전속도는 고정되어 있으므로, 입구의 유입속도 변화에 따라 블레이드 전연 방향으로 유입되는 상대유입각도는 풍속이 증가할수록 높아진다. 따라서, 비교적 높은 풍속조건인 TSR=3의 경우 블레이드 흡입면에서 상기 기술한 원인들에 의한 영향으로 전체적인 실속이 진행되고 있음을 알 수 있다. Fig.3(b)는 Fig.3(a)의 경우에 비해 많이 안정된 흐



(a) TSR=3 (b) TSR=7.5



(c) TSR=10

Fig. 3 Surface streamline distributions as variation of TSR

름을 보이고 있으며, 허브 근방을 제외한 영역에 대해서 실속현상을 관찰 할 수 없다. 이때의 TSR=7.5 ( $V_{in}=9.99\text{m/s}$ )는 설계 TSR 조건이다.

Fig.3(c)의 경우 TSR=10( $V_{in}=7.49\text{m/s}$ )일 때의 결과를 나타내고 있으며, 반경류에 의한 영향이 지속적으로 감소하고 있음을 제외하고는 Fig.3(b)의 경우와 거의 유사한 형태의 유동장을 관찰 할 수 있다.

#### 4.2. 로터 블레이드 국부 단면 흐름

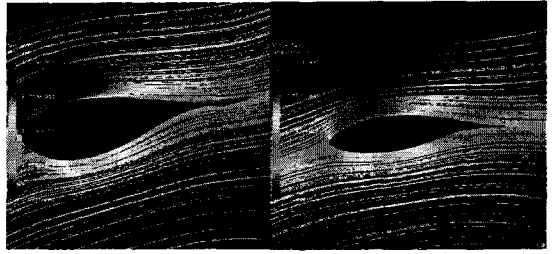
Fig.4에 TSR의 변화에 따른 로터 블레이드 임의의 국부단면 흐름결과를 나타내었다. 결과는 허브로부터 10m, 15m에서의 절단된 단면을 나타낸다.

Fig.4(a), Fig.4(b)의 결과는 TSR=3에서의 결과를 나타낸다. Fig.3(a)의 표면 유선의 형태로부터 이미 TSR=3의 조건은 실속이 진행된 상황임을 알 수 있다.

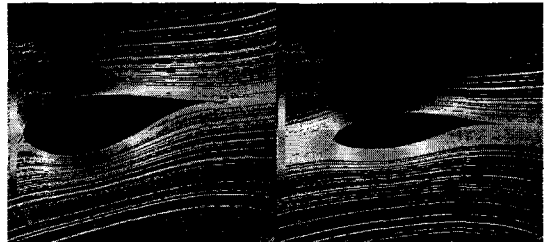
블레이드 단면 10m 위치에서는 전연박리(leading edge separation)가 진행 중이며, 15m위치에서는 후연박리(trailing edge separation)가 서서히 전연박리로 진행되는 형태의 유동장을 관찰 할 수 있다. 익형의 전연박리는 깊은 실속을 뜻하며, 양력의 증가보다 항력의 증가폭이 크게 상승하기 때문에 공력특성은 현저히 저하되고, 이는 결국 전체 시스템의 출력저하로 확장됨을 예상할 수 있다. 이러한 현상은 로터 블레이드가 정격 회전속도 이상으로 회전할 때 적절한 출력을 유지하기 위한 출력제어 도구로 사용될 수 있으며, 이



(a) TSR=3, 10m (from hub) (b) TSR=3, 15m (from hub)



(c) TSR=7.5, 10m (from hub) (d) TSR=7.5, 15m (from hub)

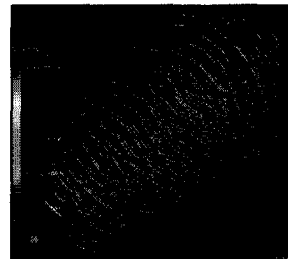


(e) TSR=10, 10m (from hub) (f) TSR=10, 15m (from hub)

Fig. 4 Sectional streamlines as variation of TSR(3, 7.5, 10)



(a) Overlapped image (TSR=3) (b) 3D streramline (TSR=7)



(c) Full 3D wake flow (TSR=7.5)

Fig.5 Various visualization results

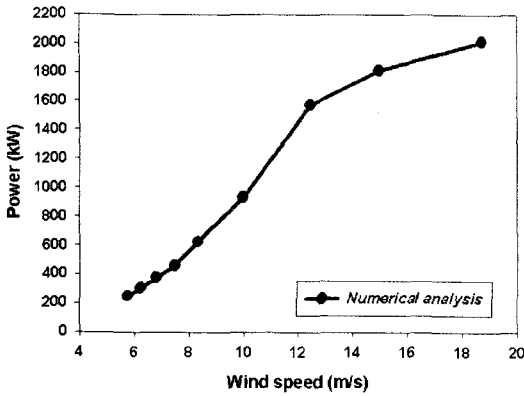


Fig.6 Simulated power predicted curve

를 실속 제어방식이라 한다.

Fig.4(c), Fig.4(d), Fig.4(e), Fig.4(f)는 상당히 안정된 익형주위의 흐름형태를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 반경류 등에 의한 박리현상이 거의 나타나고 있지 않다.

Fig.5(a)는 TSR=3에서 허브로부터 10m 단면에서의 유선과 속도 벡터를 나타낸다. 상기에 언급한 바와 같이 익형의 상면에 발생하는 와류의 속도성분 중 블레이드 반경방향으로 진행되는 속도 성분이 존재하고 있음을 쉽게 확인 할 수 있다.

Fig.5(b)는 TSR=7.5에서의 3차원 유선의 형태를 나타내고 있으며, 블레이드 끝단에서 날개 끝 와류가 발생하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 현상을 줄이기 위하여 다양한 형태의 날개 끝 형상 변형이나, 보조 장치의 장착 등을 고려할 필요가 있다.

### 4.3. 동력곡선

Fig.6에 입구풍속의 변화에 따른 출력특성의 변화를 그래프로 나타내었다. FIL-1000은 TSR=7.5 ( $V_{in}=9.99$  m/s)에서 1MW의 출력을 생산하도록 설계되었다. Fig.6의 결과에서 살펴보면 TSR=7.5에서 FIL-1000은 931.45kW의 출력을 내고 있음을 알 수 있으며 설계목표치와 비교할 때 다소 낮은 출력특성을 나타내고 있지만, 만족스러운 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 Prandtl의 날개끝 손실 모델을 적용한 BEMT 모델을 바탕으로 1MW 수평축 풍력발전용 터

빈인 FIL-1000의 형상설계 및 CFD에 의한 3차원 유동해석, 성능평가 등의 목적으로 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

FIL-1000의 직경은 54.5m이고 TSR 7.5에서 1MW의 출력을 생산하도록 설계되었다.

다양한 입구조건에 따라 CFD에 의한 3차원 유동해석을 수행하였으며, TSR 3, 7.5, 10에서의 결과를 대표적으로 제시하였다. 특히 TSR=3의 경우 허브로부터 반경방향 위치 10m, 15m에서 강한 실속현상이 발생함을 관찰 할 수 있었고, TSR이 감소할수록 입구 속도는 증가하는 특징을 가지므로 블레이드 표면 반경류의 형성 정도가 증가함을 알 수 있다. 이러한 반경류의 형성은 받음각의 증가와 더불어 시스템 출력에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

설계 TSR=7.5의 경우 허브 근방 국부 영역을 제외하고, 상당히 안정된 흐름을 형성하고 있음을 알 수 있으며, 수치해석으로부터 예측된 설계 TSR에서의 출력특성은 931.45kW로써 설계 목표치에 근사하게 도달하고 있음을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지관리공단의 지원으로 수행되었음. (과제번호 2003-N-WD03-P-02-0-000-2003)

## 참고문헌

- (1) Niels N. Sorensen, Jess A. Michlesen, Scott Schreck, 2001, "Detailed Aerodynamic Prediction of the NREL/NASA Ames Wind Tunnel Tests Using CFD," EWEC, Copenhagen, pp. 48-53.
- (2) J. F. Manwell, J. G. McGowan, A.L.Rogers, 2003, "Wind Energy Explained," John Willey&Sons, pp. 113-120.
- (3) Menter F.R., 1993, "Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA-93-2906.
- (4) Gustave P. Corten, 2001, "Inviscid Stall Model," EWEC, Copenhagen, pp. 466-469.
- (5) Gustave P. Corten, 2001, "Flow Separation on Wind Turbine Blade," Ph, D thesis, University of Utrecht.