



500kW급 풍력터빈의 성능평가에 관한 수치해석적 연구

Estimate of the power characteristics of the 500kW
wind turbine based on 3D numerical solutions

*김범석[†] · 이진석^{**} · 김정환^{***} · 이도형^{****} · 이영호^{*****}

Beom-Seok KIM, Jeong-Hwan KIM, Jin-Seok LEE, Do-Hyung LEE and Young-Ho LEE

The purpose of this 3-D numerical simulation is to calculate and examine a 500 kW Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) power performance and compare to calculation data(BEM method) from Delft University. The experimental approach, which has been the main method of investigation, appears to be reaching its limits, the cost increasing relate with the size of wind turbines. Hence, the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques and Navier-Stokes Solvers are considered a very serious contender. We has used the CFD software package CFX-TASCflow as a modeling tool to predict the power performance of a wind turbine on the basis of its geometry and operating data. The wind turbine with 40m diameters rotor, it was scaled to compare with the calculation data from delft university. The HAWT, which has eight-rpm variations are investigated respectively. The pitch angle is $+0.5^\circ$ and wind speed is fixed at 5m/s. The tip speed ratio (TSR) of the HAWT ranging from 2.89 to 9.63.

1. 서 론

풍력발전이란 풍력발전 시스템의 로터 블레이드에 의해 바람의 운동에너지를 회전에너지로 변환하고 발전기를 구동시킴으로써 전기에너지를 생산하는 발전방식을 말한다. 1973년 석유파동이라는 최대의 에너지 위기를 겪은 이후 세계적으로 에너지 자원의 안정적인 공급이 국가의 안전보장에 중요한 문제로 대두되었으며, 근본적으로 새로운 대체에너지의 개발이 절실하였다. 이에 따라, 1970년대 초반 미 항공우주국(NASA)이 100kW급 풍력발전 시스템을 개발하는 것을 시작으로 풍력발전 시스템에 대한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되어 현재를 기준으로 약 10,153MW의 전력을 생산하기에 이르렀으며, 이는 전 세계 에너지의 약 0.16%의 에

너지에 해당하는 수치이다.^[1] 지난 수 십년간, 공기역학적인 형상에 대한 설계를 하는 부분에서 상당한 부분에 대해 기류의 흐름을 예측하는 방법에 의존해 왔으며, 특히 항공 산업에서의 CFD (Computational Fluid Dynamics)에 대한 의존도는 지대한 부분을 차지하여 왔으나, 최근 새로운 대체에너지로써 전 세계적으로 주목받고 있는 풍력발전 시스템의 로터 블레이드 성능을 수치적으로 해석하고자하는 시도는 극히 미비한 실정이다. 지금까지 풍력발전 시스템의 성능을 평가하는 부분에 있어서 대부분의 경우 실제 풍동 테스트나, 필드 테스트를 수행하여야만 했다. 이러한 대규모 실험을 하기 위해선 막대한 비용과 시간이 소요되며, 세계적인 풍력발전 연구그룹인 NREL, NASA, NWECC등을 제외하고 각국의 독립적인 소규모 연구그룹에서 이러한 대규모 실험을 수행하기에는 많은 제약이 따른다. 따라서, 이미 다양한 분야, 특히 항공산업에서 이미 항공기의 공력설계 등을 위한 도구로써 널리 이용되고 있는 CFD를 풍력발전시스템의 성능해석에 적용할 필요가 있다. 현재까지 풍력발전 시스템의 성능 평가를 위한 수치해석 기법으

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** 부경대학교 대학원 기계공학과

*** 큐슈공업대학원 기계시스템공학과

**** 부경대학교 기계공학과

***** 한국해양대학교 기계·정보공학부

로 다양한 연구결과들이 제시되고 있으나, 본 연구에서는 상용 CFD 코드를 이용하여 네덜란드 델프트 공과대학(Delft University)의 풍력에너지 연구그룹에서 실제 설계된 직경 40m, 정격출력 500kW급 로터 블레이드를 장착한 풍력발전기에 대하여 성능평가를 수행하였으며, 본 연구에서 제시된 결과는 BEM(Blade Element Method)에 의해 예측된 풍력발전 시스템의 성능과 비교되었다.

2. 수치해석기법

CFX-TASCflow는 3차원 레이놀즈 평균(Reynolds averaged) 나비에 스톡스(Navier - Stokes) 방정식을 적용하며, 지배방정식은 유한체적법에 의하여 이산화 된다. 수치해석은 3차원 비 압축성 정상상태 조건에 의하여 수행되었으며, $k-\omega$ 난류모델을 적용하였다. 일반적으로 상용코드에서 기본으로 제공하는 표준 $k-\epsilon$ 모델의 경우, 표면이나 벽면에서의 유동박리를 정확하게 예측하지 못하는 단점을 가지고 있다. 풍력발전 시스템의 로터 블레이드는 출력제어를 위한 방법으로 보통 블레이드 허브부분에서 서서히 실속을 발생시키는 실속제어방법을 적용하고 있으므로 표준 $k-\epsilon$ 모델을 본 연구의 해석에 적용하기에는 무리가 있다. CFX-TASCflow는 또한 $k-\omega$ 모델을 제공하고 있는데, $k-\omega$ 모델은 일반적으로 심한 유동박리가 발생하는 경우를 제외하고 상당히 정확한 예측을 가능하게 한다고 알려져 있다.^[2] 따라서 블레이드 표면에서 발생하는 유동박리에 대한 영향을 반영하여 해석의 정확도를 확보하기 위해 본 연구에서는 $k-\omega$ 모델을 적용하였으며, 대류항의 이산화 기법으로 2차 정도의 정확도를 가지는 수정(Modified) LPS 기법을 사용하였다.

3. 형상 모델링 및 계산격자

3.1 T40/500 풍력발전용 로터 블레이드

본 계산에 사용된 T40/500 로터 블레이드의 출력제어 방식은 일반적인 풍력발전용 로터 블

레이드의 출력제어방식으로 사용되는 실속제어형(Stall regulated power control)이고, 허브로부터 블레이드 팁 부분까지 DU-91-W-250, DU-93-W-210, NACA 63618의 익형들로 구성되어있으며, 로터직경 40m, 정격출력 500kW를 갖는다. 로터 블레이드를 구성하는 익형의 공력특성(Aero dynamic characteristics)은 전체 풍력발전 시스템의 출력특성을 결정하는 가장 중요한 부분이며, 보다 우수한 공력특성을 가지는 풍력발전용 익형을 설계하기 위한 연구가 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. T40/500 모델에 적용된 익형 중 DU-91-W-250, DU-93-W-210 익형은 실제 풍력발전용으로 델프트 공과대학에서 자체적으로 설계된 익형이다.^[3] 이러한 익형들의 특징은 익형이 높은 받음각(Angle of attack)을 가질 경우 발생하는 실속현상(Stall phenomena)을 서서히 진행시켜 전체 풍력발전 시스템에 대하여, 우수한 출력특성 및 안정성을 확보할 수 있으며, 저 레이놀즈 수에서 높은 양력계수(Lift-coefficient)를 나타내는 특성을 가지고 있다.^[4] 바람의 유입방향으로 블레이드는 허브로부터 팁까지 반경방향을 따라 전체적으로 균일하게 0.5° 의 비틀림 각을 가지며, 회전자의 회전 방향은 반 시계방향이다. 수치해석에 필요한 격자를 생성하기 앞서 실제 해석모델에 대한 정확한 모델링을 하기 위해 블레이드 길이방향으로 10개의 단면을 나누고 정확한 2차원 익형 단면의 좌표점을 가지고 3차원 형상을 생성하였으며, 전체 3차원 형상을 Fig. 1에 나타내었다.



Fig. 1 3-D Rotor blade configuration(T40 500)

3.2 계산격자의 선택

계산에 사용된 격자는 복잡한 형상에 있어 상당히 우수한 격자 질을 확보 할 수 있는 격자생성 전용 툴인 ICEM-CFD를 이용하였으며, 계산 영역의 전체 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 격자를 생성할 때 계산결과에의 정확도를 확보하기 위하여 블레이드 주변에 가능한 격자 점을 집중시켜 분포하였으며, 복잡한 형상에서 더욱 우수한 격자를 형성하기 위하여, 계산영역을 모두 다중으로 분할하여 각각의 분할된 영역에 대하여 격자를 생성하였다. 전체 계산영역의 격자 수는 약 600,000 Cell이며, 정렬 다중격자이다. 계산에 적용된 전체 도메인은 모두 56 블록으로 분할되었다.

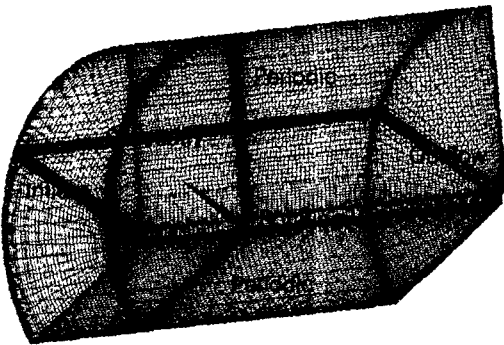


Fig. 2 T40/500 blade, grid generation

4. 계산조건

본 연구의 해석대상인 T40/500 모델 로터 블레이드의 성능평가를 위한 실험이 수행되지 않았으므로, 본 연구에서 제시된 결과는 델프트 공과대학 풍력에너지 연구그룹에 의해 수행된 BEM 방법에 의한 수치해석 결과와 비교되었다. BEM 방법에 의해서 해석된 로터 블레이드는 실제 T40/500의 로터 블레이드를 1:0.23의 스케일로 축소 한 모델이며, 본 연구에서도 동일한 형상의 축소 모델을 가지고 수치해석을 수행하였으며, 축소된 모델의 로터 블레이드 직경은 9.2m 이고, 허브의 직경은 0.522m이다. 일반적으로 풍력발전기의 성능을 나타내는데 있어서 가장 보편화된 방법은 TSR (λ , Tip Speed Ratio)의 변화에 따른 동력계수 (C_p)의 변화를 나타내는 것

이다. TSR란, 로터 블레이드로 불어오는 풍속과 블레이드 팁 부분 속도의 비로 정의되며, 무차원 수이다. 풍력발전용 로터 블레이드의 출력을 구하기 위하여 먼저 수치해석을 통한 전체 블레이드의 토크(torque, T) 값을 계산한 후 블레이드의 회전속도를 곱하여 구하였으며, 아래에 간단한 계산식을 나타내었다. 동력계수는 로터 블레이드에서 추출된 에너지와 로터 블레이드로 유입되는 에너지의 비로써 정의된다.

$$TSR(\lambda) = \frac{R\Omega}{V_i} \quad (1)$$

$$P_w = \Omega \cdot T \quad (2)$$

$$C_p = \frac{P_w}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^3 A} \quad (3)$$

수치해석을 위한 계산조건은 블레이드의 전방으로 유입되는 풍속을 5m/s로 고정하고, 로터 블레이드의 회전 속도를 30~100rpm으로 변화시켜 가면서 모두 8가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 이때 TSR은 2.89~9.63의 범위를 가진다. 계산조건으로 선정한 TSR의 범위는 BEM 에 의해 해석된 조건과 정확히 일치하며, Table. 1에 전체 계산조건을 요약하여 나타내었다.

4.1 계산시간

본 연구에서 수행된 8가지(30, 40, 50, 60, 70, 80 rpm, at $V_{inlet} = 5m/s$) 경우의 정상상태 해석은 모두 1.7 GHz, Pentium 4 (memory : 1Gb) PC(1 CPU)에서 계산되었다. 정상상태 계산은 모두 Iteration이 200 번 정도일 때 수렴을 하였으며, 소요시간은 각 케이스별로 최소 8시간에서 최대 12 시간이 소요되었다. 계산을 수행하기에 앞서 원활한 해의 수렴성과 안정성을 확보하기 위하여, 초기에 약 120,000 Cell의 격자 수를 가지는 도메인을 가지고 계산을 수행한 후 U, V, W 방향의 속도 성분과 대략적인 유동장의 정보를 획득하여, 실제 계산을 하기 위한 초기조건의



값으로 사용하였다. 실제 이러한 과정이 수행되지 않고 계산을 수행한 결과와 단순화된 유동장으로부터 초기 조건을 획득한 후 이를 실제 계산에서의 초기 조건으로 사용한 경우 수렴성을 살펴보면, 후자의 경우가 전자의 경우보다, 수렴성이나 효율적인 측면에서 훨씬 우수하게 나타났다.

Table 1. Calculation conditions

	$V_{inlet}(m/s)$	RPM	TSR
Case 1	5	30	2.89
Case 2	5	40	3.85
Case 3	5	50	4.82
Case 4	5	60	5.78
Case 5	5	70	6.74
Case 6	5	80	7.71
Case 7	5	90	8.67
Case 8	5	100	9.63

5. 결과 및 고찰

5.1 블레이드 표면 3차원 유동박리 현상

실제 풍력발전용 로터 블레이드에서 발생하는 3차원 유동 현상은 상당히 복잡한 특성을 보인다. 로터 블레이드의 허브 쪽에서 발생하는 박리 현상에 의해 분리된 기류는 로터 블레이드의 원심 가속력과 반경방향으로의 압력 분포에 의하여, 블레이드의 허브쪽에서 팁부분으로 이동하게 된다. 이때 원심 가속력은 $\Omega^2 r$ 로 표현되며, 반경방향으로의 압력구배는 임의의 위치에서 익형이 받는 영각의 변화와 국부 속도비 ($\lambda_r = \Omega r / U$)의 변화에 따라 변화하게 된다. 허브쪽에서 분리된 블레이드의 반경방향으로 진행되는 기류는 블레이드 표면에 부착되어 흐르는 기류(θ)를 통과하게 되면서 강제로 블레이드 표면에서 3차원 박리를 발생시키며, 결국 어느 지점에서 θ 방향으로 분리된다. 이러한 반경방향으로 흐르는 기류의 흐름은 블레이드 전체에 걸쳐 익형의 전연과 후연에서도 동일하게 발생하게 되며, 이러한 현상에 대한 데이터를 정량화 하여 제시하기는 상당히 어렵지만, 이에 대한 영향 또한 크다고 보

고되어 있다.^[5] Fig. 4에 본 연구에서 수치계산한 결과를 나타내었다. Fig. 4에 제시된 블레이드 표면에서의 3차원 유동현상은 실제 블레이드에서 발생하는 3차원 유동현상과 상당히 비슷한 특성을 나타내고 있다.

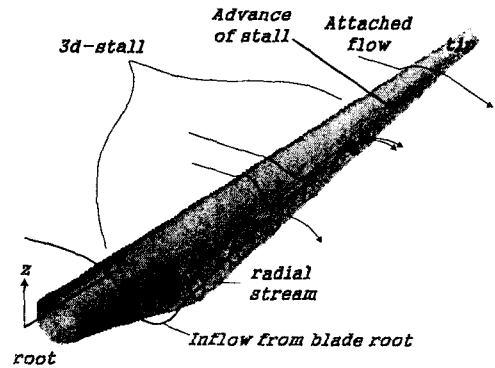


Fig. 3 The 3D separated air flow pattern at rotor blade and θ -Z rotation

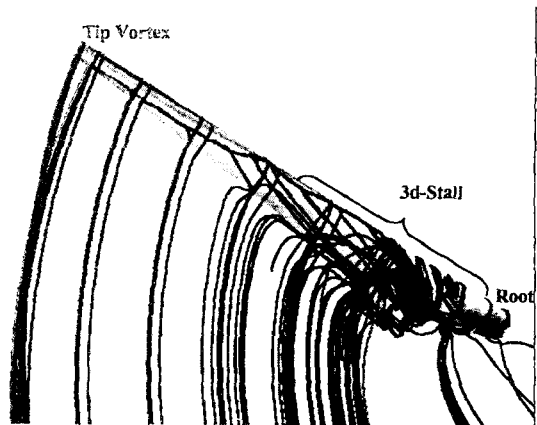


Fig. 4 Calculated 3D separated air flow at rotor blade (40 rpm, $V_{inlet} = 5m/s$)

5.2 T40/500 로터 블레이드의 성능 평가

본 연구에서 수행된 풍력발전용 로터 블레이드에 대한 성능 평가를 수행하기 위하여 다음과 같은 절차를 거쳐 전체적인 풍력발전용 로터 블레이드에 대한 성능 평가를 할 수 있었다.

- 1) CFX-TASCflow를 이용하여 각각의 경우에서의 토크 값을 구한다.
- 2) 토크 값을 구한 경우의 로터 블레이드 회전수를, 계산된 토크 값에 곱한 후 로터 블레이드의 출력을 계산한다.
- 3) 계산된 각각의 경우에서의 출력 값을 동력계수를 구하는 식에 대입하여 동력계수를 구한다.

실제 전체적인 로터 블레이드의 성능을 평가하기 위한 절차에 사용된 계산식은 앞서 제시한 식 (2), (3)에 나타내었다. Fig. 5에 BEM에 의하여 예측된 T40/500 풍력발전 시스템의 전체 출력특성과 CFD에 의하여 예측된 출력을 비교하여 나타내었다. Fig. 5에서 살펴보면, TSR이 약 7.2 인 지점을 기준으로 7.2미만인 경우에는 CFD가 BEM보다 실제 풍력발전 시스템의 출력을 낮게 예측하고 있으며, 7.2 이상인 경우에는 CFD가 BEM 보다 높은 출력을 예측하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 풍력발전 시스템의 출력제어 방식은 크게 실속제어형, 피치제어형으로 나뉘어질 수 있으며, 대다수의 경우, 블레이드의 피치 각을 변화시키기 위하여 유압장치를 구동해야만 하는 피치제어 형 보다 기계적으로 간단한 구조를 가지는 실속제어 형을 출력제어 방식으로 적용한다. 본 연구에서 사용된 T40/500의 출력제어 방식은 실속제어 방식이다. Fig. 5에서 BEM 방법의 경우 TSR이 7.71인 경우에서의 출력이 가장 높게 나타나고 있으며, 이를 기준으로 출력은 점점 감소하는 경향을 보인다. 이는 풍력발전 시스템의 설계 출력을 일정하게 유지하고, 시스템의 안정성을 확보하기 위하여 블레이드 전체에 걸쳐 서서히 실속을 발생시켜 로터 블레이드에 작용하는 토크를 일정 수준 이하로 낮추어 적정 출력을 유지하기 때문이다. 이때 발생하는 실속현상은 강한 3차원 박리 현상을 수반하는 매우 복잡한 유동현상이므로 난류모델을 적용한 수치해석 기법으로 정확한 정량적인 데이터를 제시하는데는 상당한 어려움이 따른다. CFD의 경우 실제 출력은 TSR이 8.67인 경우까지 점점 증가하고 있으며, 8.67을 기준으로 점점 감소하는 경향을 보이며, BEM의 예측결과와 다소 차이를 보인다. 이는 일반적으로 CFD를 이용한 수치해석을 수행할 때 대다수의 경우 난류를 풀기 위해 난류모델을 적용하게 되

는데, 현재까지 개발된 다양한 난류모델들이 블레이드 표면에서 발생하는 강한 3차원 실속현상을 정확하게 예측하기에는 아직 무리가 있기 때문이라고 많은 연구자들에 의하여 보고되었다. 난류모델의 선정에 대한 문제 외에도 해석을 하기 위한 격자 문제를 들 수 있으며, 본 연구에서 사용한 격자의 수는 약 600,000 Cell 정도로써, 실제 3차원 외부 유동장을 해석하는데 있어서 다소 충분하지 않은 수의 격자이다.

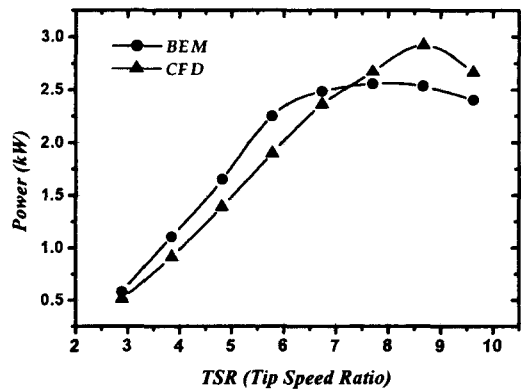


Fig. 5 Comparison of calculated and BEM power characteristics for the scaled T40/500

Fig. 6에는 BEM과 CFD에 의한 풍력발전 시스템의 동력계수를 비교한 그래프를 나타내었다. Fig. 5와 마찬가지로, TSR 7을 기준으로 7미만인 경우에는 CFD가 BEM보다 동력계수를 다소 낮게 예측하고 있으며, TSR이 7이상인 경우에는 CFD가 다소 높게 예측하고 있음을 알 수 있다.

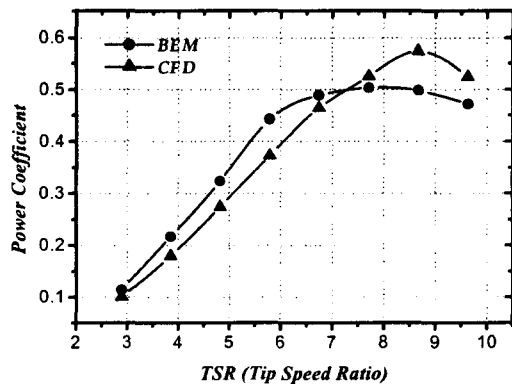


Fig. 6 Comparison of calculated and BEM power coefficient for the scaled T40/500

6. 결 론

본 연구에서는 CFD 기법을 이용하여 T40/500 로터 블레이드에 대하여 입구풍속을 5 m/s로 고정하고 로터 블레이드의 회전수를 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 까지 변화하면서 모두 8가지 경우에 대하여 성능평가를 수행하였으며, BEM과의 비교를 통해 결과를 분석하였다.

일반적으로 알려진 블레이드 3차원 표면 유동 박리 현상과 수치해석을 통한 결과를 비교해볼 때 이론적 해석과 CFD 계산이 상당히 유사한 결과를 보이고 있다.

로터 블레이드의 성능을 평가하는데 있어서 대체적으로 정성적, 정량적으로 BEM과 CFD에 의한 해석 결과가 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있으나, 블레이드에서 강한 실속이 발생하는 지점에 대한 정확한 예측은 할 수 없었으며, 이로 인한 계산결과의 오차는 최대 20% 정도의 범위를 가진다.

블레이드 표면에서 발생하는 3차원 실속현상을 보다 정확하게 예측하기 위해선 다양한 난류 모델과 계산격자를 더욱 최적화하여 검토를 해 볼 필요가 있다.

향후, T40/500의 축소모델을 제작하여, 실험을 통한 수치해석과의 비교 분석을 수행하고, PIV 기법을 적용하여 블레이드 주위의 3차원 유동 흐름을 분석하여, 풍력발전용 시스템의 전체적인 유동특성과 성능을 평가하는 기준을 제시하고자 한다.

참고문헌

- [1] Hau, Erich, "Wind Turbines", Springer Verlag(1999), p. 23-55
- [2] Jess A. Michelsent and Niels N. Sorensen, "Current Developments in Navier-Stokes Modelling of Wind Turbine Rotor Flow", Proceedings of EWEC, Denmark (2001), p.367-372

- [3] <http://www.windenergy.citg.tudelft.nl>
- [4] W.A. Timmer. R.P.J.O.M. van Rooij, "DU 94-W-280, A THICK AIRFOIL WITH A DIVERGENT TRAILING EDGE", Proceedings European Community Wind Energy Conference, Bedford UK (1996), p.737-740
- [5] Gustave P. Corten, "INVISCID STALL MODEL", Proceedings of EWEC, Denmark(2001), p.466-469