

CFD를 이용한 풍력발전 터빈의 3차원 유동해석 및 성능평가에 관한 연구

김범석*, 김정환**, 남청도***, 이영호****

A Study on Three-Dimensional Flow Characteristics and Power Performance of HAWT(Horizontal Axis Wind Turbine) by CFD

Beom-Seok Kim*, Jeong-Hwan Kim**, Chung-Do Nam*** and Young-Ho Lee****

Key Words : Horizontal Axis Wind Turbine(수평축 풍차), CFD(전산유체역학), TSR(Tip Speed Ratio, 날개끝 속
도비), Power Coefficient(동력계수), 3-D Stall(3차원 실속), Pitch Angle(비틀림각도)

Abstract

The purpose of this 3-D numerical simulation is to calculate and examine a 500 kW Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) power performance and 3-D rotor flow characteristics, which are compared to calculation data 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 is considered a very serious contender. We has used the CFD software package CFX-TASCflow as a modeling tool to predict the power performance and 3-D flow characteristics 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. 서론

풍력발전이란 바람이 가지는 운동에너지를 이용하여 로터 블레이드를 회전시키고, 이때 발생하는 회전력의 공기역학적(aerodynamic) 특성을 이용하여 발전기를 구동시켜 전기에너지를 생산하는 청정 무공해 에너지발전 방식이다. 1970년대 초반 석유과동이라는 최대의 에너지 위기를 겪은 이후 전 세계적으로 안정적인 에너지의 공급을 위한 대책 마련이 절실히 필요하였으며, 오랫동안 화석연료에 크게 의존해오던 에너지 공급원에 대한 새로운 대안이 필요하게 되었다. 이에 따라, 1970년대 초반부터 각 국의 연구기관들은 신 대체 에너지에 대한 연구를 본격적으로 시작하였으며, NASA에 의해 100kW급 풍력발전 시스템이 설계된 것을 시작으로 풍력발전 시스템에 대한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되어 현재 약 10,153MW의 전력을 생산하기에 이르렀으며, 이는 전 세계 에너지생산량의 약 0.16%에 해당한다.^[1] 한편, CFD는 지난 수 십년간 다양한 분야에서 사용되어 왔으며, 풍력발전 시스템을 구성하는 핵심 요소인 로터 블레이드(rotor blade)의 유동해석에도 사용되기 시작하는 추세이나, 3차원 유동구조 및 성능평가에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 풍력발전용 터빈의 3차원 유동에 대한 해석 및 성능평가를 목적으로, 네덜란드 델프트 대학(Delft University)의 풍력에너지 연구그룹^[2]에 의해 설계된 500 kW급 풍력발전용 로터 블레이드(T40/500)를 대상으로 하였고, CFD 코드는 CFX-TASCflow를 이용하여 계산하였다.

이드(rotor blade)의 유동해석에도 사용되기 시작하는 추세이나, 3차원 유동구조 및 성능평가에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 풍력발전용 터빈의 3차원 유동에 대한 해석 및 성능평가를 목적으로, 네덜란드 델프트 대학(Delft University)의 풍력에너지 연구그룹^[2]에 의해 설계된 500 kW급 풍력발전용 로터 블레이드(T40/500)를 대상으로 하였고, CFD 코드는 CFX-TASCflow를 이용하여 계산하였다.

2. 형상 모델링 및 계산격자

2.1 T40-500 로터 블레이드 3-D 모델링

본 연구의 수치해석 대상으로 사용된 로터 블레이드는 직경이 40 m 이고 정격출력이 500 kW인 3 블레이드 수평축 풍력발전용 터빈(HAWT)이다. T40/500의 출력제어 방식은 실속제어형(stall regulated)이며, 이는 현재 상용화되고 있는 풍력발전기의 대다수가 정격풍속 이상의 바람이 불어 올 경우, 안정성을 확보하기 위하여 블레이드 허브부분으로부터 서서히 3차원 실속을 발생시켜 전체 시스템의 출력을 제어하는 방식이다. 계산 격자를 생성하기 위한 초기 모델링 작업은 실제 모델의 3차원 좌표 점을 통해 이루어졌으며, 계산의 정확성을 고려하여 블레이드를 허브로부터 팁 부분까지 모두 10개의 단면으로 분할 한 후, 분할된 2차원 단면을 스플라인(spline)으로 연결하여 3차원 블레이

* 한국해양대학교 대학원, bum_suck@pivlab.net

** 부산공업대학교, jhkim@vortex.mse.kyutech.ac.jp

*** 한국해양대학교 기관시스템공학부,

kmunam@hanara.kmaritime.ac.kr

**** 한국해양대학교 기계·정보공학부, lyh@pivlab.net

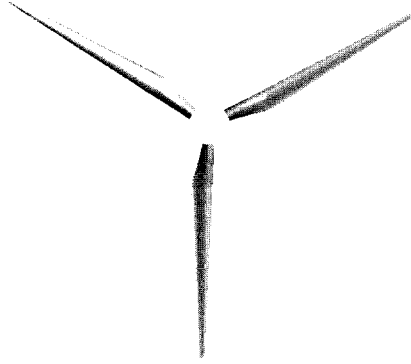


Fig. 1 3-D Rotor blade configuration (T40/500)

드를 생성하였다. 실제 풍력발전용 로터 블레이드의 In-board section은 전체적인 시스템의 출력특성에 큰 영향을 미치지 않으므로, 수치적 방법을 이용한 출력특성을 예측하는 부분에 있어서는 고려대상이 되지 않는 것이 일반적이다. 하지만, 보다 정확한 풍력발전 시스템의 출력특성을 예측하고, 블레이드 전체에 걸쳐 작용하는 복잡한 구조의 3차원 유동현상을 정확하게 예측하기 위하여 본 연구에서는 In-board section을 포함한 전체 블레이드에 대한 수치해석을 수행하였다. 블레이드를 구성하는 익형의 형태는 블레이드의 Out-board 부분의 허브 부분 으로부터 팁 부분까지 DU-91-W-250, DU-93-W-210, NACA 63618 등의 익형으로 구성되어 있다. 격자생성을 위한 로터 블레이드의 3차원 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 계산격자의 생성

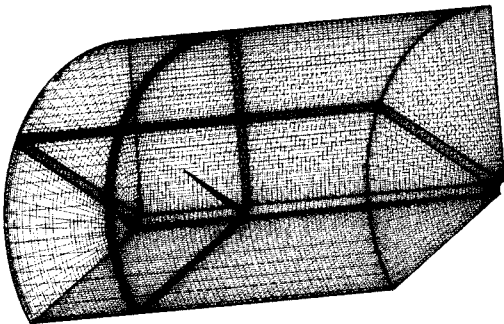


Fig. 2 Computational grid

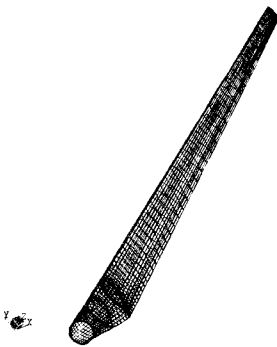


Fig. 3 Computational grid near the rotor

수치해석을 하는데 있어서 해의 정확도를 좌우하는 가장 중요한 부분의 하나가 계산격자이며, 우수한 품질의 격자를 생성하기는 그리 쉽지가 않다. 본 연구에서는 격자를 생성하는 과정에서 복잡한 형상에 대하여 상당히 우수한 3차원 정렬격자를 생성할 수 있는 ICEM-CFD Hexa 모듈을 이용하였다. 격자를 생성하는 과정에서 블레이드 주위에서 우수한 격자를 확보하기 위하여 전체 도메인을 56 블록으로 나누었으며, 해석결과의 신뢰성을 고려하여 블레이드 주위에 격자를 집중 배치하였다. 전체 도메인의 격자 수는 약 800,000 cell 이며, Fig. 2와 Fig. 3에 생성된 격자를 나타내었다.

3. 수치해석 기법

CFX-TASCflow는 3차원 레이놀즈 평균(Reynolds averaged) 나비에 스톡스(Navier - Stokes) 방정식을 적용하며, 지배방정식은 유한체적법에 의하여 이산화 되며, 수치해석은 3차원 비압축성 정상상태 조건에 의하여 수행되었다. 일반적으로 상용코드에서 기본으로 제공하는 표준 k-ε 모델의 경우, 표면이나 벽면에서의 유동박리를 정확하게 예측하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 블레이드 표면에서 발생하는 3-D 실속현상에 대한 영향을 반영하여 해석 결과의 정확도를 확보하기 위해 k-ω 모델을 적용하였다.^[3] 대류항의 이산화 기법으로는 2차 정도의 정확도를 가지는 수정(Modified) LPS 기법을 사용하였다.

4. 계산조건

본 연구의 수치해석 모델로써 채택된 T40/500 에 대한 실험은 아직 수행되지 않은 실정이며, 현재 델프트 대학 풍력에너지 연구그룹에 의해 1: 0.23으로 축소된 모델에 대하여, BEM (Blade Element Method)법에 의한 수치 해석 결과만이 제시되어 있는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 최종적으로 수치해석을 통해 얻은 로터 블레이드의 성능을 BEM으로 해석한 결과와 비교해 보고자 1:0.23의 스케일로 동일하게 축소된 T40/500 모델을 사용하였다. 이때 축소된 모델의 로터 블레이드 직경은 9.2m이고, 허브 직경은 0.522m이며, +0.5°의 피치 각을 가진다. 일반적으로 풍력발전기의 성능을 나타내는데 있어서 가장 보편화된 방법은 TSR(Tip Speed Ratio, λ)의 변화에 따른 동력계수 (C_p)의 변화를 나타내는 것이다. TSR란, 로터 블레이드로 불어오는 풍속 (V_i)과 블레이드 팁 부분에서의 속도 ($R\Omega$, 단 R : 블레이드 반경 길이, Ω : 회전각속도) 비로 정의되며, 무차원 수이다.

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

실제로 풍력발전 시스템의 로터 블레이드는 유입풍속의 변화에 따라 로터 블레이드의 회전속도가 변하지만, 이와 같은 상황을 고려하여 수치해석을 하려면, 실제 로터 블레이드의 풍속 변화에 따른 회전속도 변화를 실험을 통해 얻어야만 하는 불편이 있다. 따라서, 본 연구에서는 무차원 수인 TSR을 이용하여 유입 풍속을 고정하고 로터 블레이드의 회전속도만 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하였다. 유입 풍속은 5m/s이며, 회전 속도는 30 ~ 100rpm으로 변화시켜, 모두 8가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 이때 TSR은 2.89 ~ 9.63의 범위를 가진다. 계산조건으로 선정된 TSR의 범위는 BEM에 의해 해석된 TSR 범

Table 1 Calculating conditions

	$V_i(m/s)$	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

위와 정확히 일치하며, Table 1에 전체 계산조건을 요약하여 나타내었다. 모든 계산은 Pentium 4 PC (1.7 GHz, 1Gb)에서 수행되었다. 정상상태 계산은 모두 Iteration이 200 번 정도일 때 수렴하였으며, 계산 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 기본정보를 획득하여, 실제 계산을 하기 위한 초기조건의 값으로 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 블레이드 표면 3차원 실속

일반적으로, 실속(stall)은 대부분의 경우, 반드시 피해야만 할 문제로서 생각되고 있으나, 풍력발전에 있어서는 이러한 실속이 출력을 제어하는 방법의 하나로 이용된다. 이러한 방법을 실속 제어형이라 하며, 풍력발전용 터빈의 운전범위가 정격출력을 넘어서게 될 때, 블레이드의 표면에 강한 3차원 실속을 발생시키게 하여, 안전한 회전수 내에서 최적의 출력을 낼 수 있게 제어하는 방법이다. 실제, 풍력발전용 로터 블레이드에서 발생하는 3차원 유동은 그림 4에서 스케치 한 것처럼 상당히 복잡하다. 로터 블레이드의 허브 쪽에서 발생하는 박리에 의해 분리된 기류는 로터 블레이드의 원심력과 반경방향으로의 압력 분포에 의하여, 블레이드의 허브쪽에서 팁부분으로 이동하게된다. 이러한 기류가 Outboard-Section의 블레이드 표면에 부착되어 θ 방향으로 흐르는 기류를 통과하는 동안 3차원 실속을 발생시키며, 임의의 지점에서 θ 방향으로 분리된다. 반경방향으로 흐르는 기류는 블레이드 전체에 걸쳐 익형의 전연과 후연에서도 발생 할 수 있으며, 그 발생원인에 대한 정량적인 데이터의 제시는 거의 불가능하지만, 익의 전·후연에서 발생하는 기류의 영향 또한 크다고 보고되어 있다.^[5]

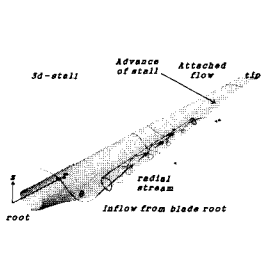


Fig. 4 Sketch of 3-d stall at blade surface

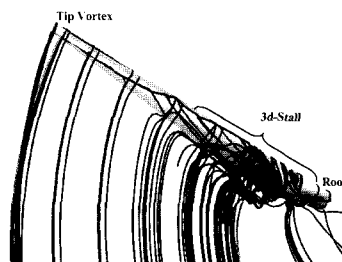


Fig. 5 Example of calculated 3d stall [TSR : 3.85]

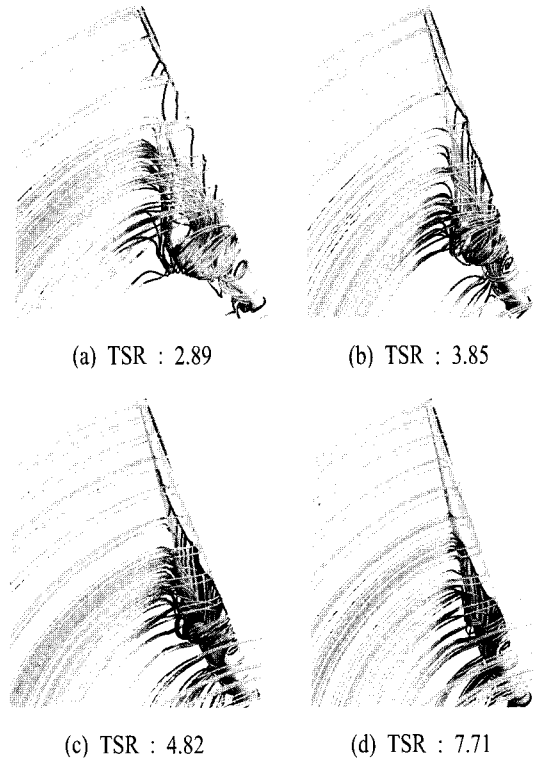
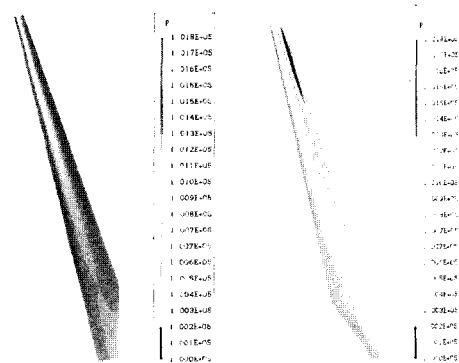


Fig. 6 3-D stall phenomena near blade

Fig. 5는 TSR이 3.85인 경우 블레이드 표면에서의 계산결과이며, Fig. 4와 상당히 유사함을 알 수 있다. Fig. 6에 블레이드의 TSR이 변화하는 경우에 대해 표면에서 발생하는 3차원 실속영역의 범위 및 유동패턴을 나타내었다. TSR이 증가할수록 블레이드 표면 쪽으로 3차원 실속영역이 점점 축소되고 있음을 알 수 있다.

5.2 블레이드 표면 압력분포

Fig. 7에 한 예로써 TSR이 3.85인 경우 블레이드 표면에서의 압력분포를 나타내었다. 로터 블레이드로 유입되는 바람을 직접 받는 압력면(pressure side)에서의 압력이 블레이드 팁 부분으로 갈수록 높은 분포를 보이고 있고, 익형의 전연(leading edge) 부분에서 대체적으로 높은 압력 분포를 나타내고 있다. 블레이드의 흡입 면(suction side)에서의 압력분포는 허브에서 팁 방향으로 갈수록 익형의 전연 부분에서 낮은 압력분포를 보이고 있다.



(a) Pressure side (b) Suction side
Fig. 7 Pressure distributions at TSR : 3.85

5.3 T40/500 로터 블레이드의 성능 평가

본 연구에서의 성능평가는 다음의 순서로 하였다.

- 1) CFX-TASCflow를 이용하여 각각의 경우에서의 토크 값(T)을 구한다.
- 2) 토크 값을 구한 경우의 로터 블레이드 회전수를, 계산된 토크 값에 곱한 후 로터 블레이드의 출력(P_w)을 계산한다.

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

- 3) 계산된 각각의 경우에서의 출력 값을 동력계수(C_p)를 구하는 식에 대입하여 동력계수를 구한다.

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

단, 여기서 ρ 는 밀도를, A 는 블레이드 단면적을 의미한다.

Fig. 8에 BEM에 의하여 예측된 T40/500 풍력발전 시스템의 전체 출력특성과 본 계산결과에 의하여 예측된 출력을 비교하여 나타내었다. TSR이 약 7.2인 지점을 기준으로 7.2미만인 경우에는 본 계산결과가 BEM보다 출력을 낮게 예측하고 있으며, 7.2 이상인 경우에는 본 계산결과가 BEM 보다 출력을 높게 예측하고 있음을 알 수 있다. 전체적인 BEM에 의한 수치해석 결과와 본 연구에서의 결과 값은 대부분의 TSR에 있어서 10 % 내에서 일치하였다. 블레이드에서 발생하는 실속은 강한 3차원 박리를 수반하는 매우 복잡한 유동현상이므로 난류모델을 적용한 수치해석 기법으로 정확한 정량적인 데이터를 제시하는데는 상당한 어려움이 따른다. 본 계산결과와 실제 출력은 TSR이 8.67인 경우까지 점점 증가하고 있으며, 8.67을 기준으로 점점 감소하는 경향을 보이며, BEM의 예측결과와 다소 차이를 보인다. 현재까지 개발된 다양한 난류모델들이 블레이드 표면에서 발생하는 강한 3차원 실속현상을 정확하게 예측하기에는 아직 무리가 있기 때문이라고 많은 연구자들에 의하여 보고되고 있다. 난류모델의 선정에 대한 문제 외에도 해석을 하기 위한 격자 문제를 들 수 있으며, 본 연구에서 사용한 격자의 수는 약 800,000 cell 정도로써, 실제 3차원 외부 유동장을 해석하는데 있어서 다소 충분하지 않은 수의 격자이다.

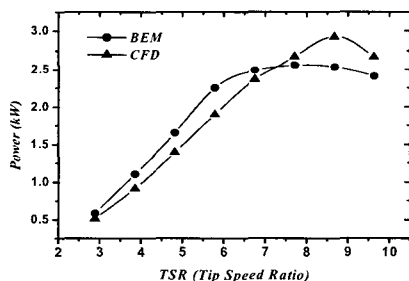


Fig. 8 Comparison of calculated and BEM power characteristics for the scaled T40/500

따라서, 보다 정확한 성능예측을 가능하게 하기 위하여, 다양한 난류모델을 적용하여 최적의 모델을 검토 할 필요가 있으며, 계산에 사용된 격자를 생성하는데 있어, 보다 우수한 품질을 가지는 격자를 적용 할 필요가 있고, 격자 수를 조정하여 반복 계산을 수행 할 필요가 있다.

6. 결론

본 연구에서는 네덜란드 델프트 대학에서 자체적으로 설계된 T40/500 로터 블레이드에 대한 수치해석을 통하여 블레이드 주위에서 발생하는 복잡한 3차원 유동특성을 파악하였으며, T40-500 모델에 대한 성능평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이론적으로 제시된 풍력발전용 로터 블레이드 표면에서의 3-D 실속 현상은 수치계산을 통해 제시된 결과와 서로 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있었으며, 블레이드의 회전속도가 빨라질수록 허브근방에서 발달되는 3-D 실속영역은 블레이드 표면쪽으로 점점 축소된다.
2. 블레이드 압력면에서의 압력분포는 팁쪽으로 갈수록 높게 나타나고있으나, 흡입면에서는 팁쪽으로 갈수록 낮은 분포를 나타내고 있다. 전체적으로 블레이드 팁쪽으로 갈수록 압력면과 흡입면에서 발생하는 압력차는 커진다.
3. 풍력발전용 로터 블레이드의 성능을 평가할 수 있었으며, BEM에 의한 해석 결과와 비교해볼 때 정성적, 정량적으로 유사하게 나타났다.

참고문헌

- [1] Erich Hau, Wind turbines, Springer Verlag (2000).
- [2] <http://windenergy.citg.tudelft.nl>
- [3] 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.
- [4] Erich Hau, Wind turbines, Springer Verlag (2000), pp. 69 ~ 76.
- [5] Gustave P. Corten, INVISCID STALL MODEL, Proceedings of EWEC, Denmark (2001), pp. 466 ~ 469.