

CFD에 의한 500kW급 수평축 풍력발전용 터빈의 성능평가 및 유동해석에 관한 연구

김유택* · 김범석** · 김정환*** · 남청도* · 이영호****

A Study of Performance Estimate and Flow Analysis of the 500 kW Horizontal-Axis Wind Turbine by CFD

Y. T. Kim*, B. S. Kim**, J. H. Kim***, C. D. Nam*, Y. H. Lee****

Key Words: HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine, 수평축 풍력발전 터빈), CFD (전산유체역학), TSR (Tip Speed Ratio, 날개끝 속도비), 3D-Stall (3차원 실속), Power Coefficient (동력계수)

ABSTRACT

The purpose of this 3-D numerical simulation is to calculate and examine the complex 3-D stall phenomena on the rotor blade and wake distribution of the wind turbine. The flow characteristics of 500kW Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) are compared with the calculated 3-D stall phenomena and wake distribution. We used the CFX-TASCflow to predict flow and power characteristics of the wind turbine. The CFD results are somewhat consistent with the BEM (Blade Element Momentum) results. And, the rotational speed becomes faster, the 3-D stall region becomes smaller. Moreover, the pressure distribution on the pressure side that directly gets the incoming wind grows high as it goes toward the tip of the blade. The pressure distribution on the blade's suction side tells us that the pressure becomes low in the leading edge of the airfoil as it moves from the hub to the tip. However, we are not able to precisely predict on the power coefficient of the rotor blade at the position of generating complex 3-D stall region.

1. 서 론

풍력발전이란 바람이 가지는 운동에너지를 이용하여 로터 블레이드를 회전시키고, 이때 발생하는 회전력의 공력특성을 이용하여 발전기를 구동시켜 전기에너지를 생산하는 청정 무공해 에너지발전 방식이다. 1970년대

초반 석유판동이라는 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 각국의 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⁾.

* 한국해양대학교 기관시스템공학부

** 한국해양대학교 대학원 기계공학과

*** 규슈공업대학원 기계시스템공학과

**** 한국해양대학교 기계·정보공학부

E-mail : * kimyt@hanara.kmaritime.ac.kr

한편, CFD 기술은 지난 수 십년간 다양한 분야에서 사용되어 왔으나, 헬리콥터나 풍력 터빈 등의 회전체 외부 유동장에 대한 실제적 적용은, 현재의 기술수준으로써는 상당한 시간과 비용 등의 노력이 필요하게 된다. 이와 같은 회전체 외부 유동장에 대한 CFD 기법의 적용성 평가에 대한 연구가 McCroskey⁽²⁾와 Ladgreb⁽³⁾에 의해 수행되었다. Earl P.N Duque 등은 풍력터빈 로터 유동특성과 성능평가에 대하여 상용 CFD 코드를 이용한 수치해석적 적용가능성을 검토하였으며⁽⁴⁾, J. Gordon Leishman 등은 풍력터빈의 비정상 3차원 성능 특성을 정확하게 예측하는데 있어서, 현재 설계자들이 주로 사용하는 기법인 BEM 법과 최근 시도되고 있는 CFD 기법 등에 대한 평가를 하였으며, 비정상 후류 모델을 위한 와류법 등 다양한 수학적 모델 기법들을 제시하고 있다⁽⁵⁾. 또한, Gustave P. Corten은 수학적 모델을 통한 접근으로, 로터 블레이드 표면에서 발생하는 3차원 실속현상의 유동메커니즘을 규명하고자 하였다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 풍력발전용 터빈의 3차원 유동해석 및 성능평가와 그 적용가능성을 목적으로, 네덜란드 델프트 대학 (Delft Univ.)의 풍력에너지 연구그룹⁽⁷⁾에 의해 설계된 500kW급 풍력발전용 로터 블레이드 (T40/ 500)를 수치해석 대상으로 하였고, 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 40m이고 정격출력이 500kW인 3 블레이드 수평축 풍력발전용 터빈 (HAWT)이다.

T40/500의 출력제어 방식은 실속제어형 (stall-regulated)이며, 이는 현재 상용화되고 있는 풍력발전기의 대다수가 채택하고 있는 제어방식이다. 계산 격자를 생성하기 위한 초기 모델링 작업은 실제 모델의 3차원 좌표점을 통해 이루어졌으며, 계산의 정확성을 고려하여 블레이드를 허브로부터 팁 부분까지 모두 10개의 단면으로 분할 한 후, 분할된 2차원 단면을 스플라인 (spline)으로 연결하여 3차원 블레이드를 생성하였다.

실제 풍력발전용 로터 블레이드의 Inboard 부분은 보통 허브로부터 15% 지점까지의 부분으로 정의되며, 설계단계에서 구조적 설계에 중점을 두는 부분이고, Outboard 부분은 15% 지점에서부터 팁 부분 끝단까지

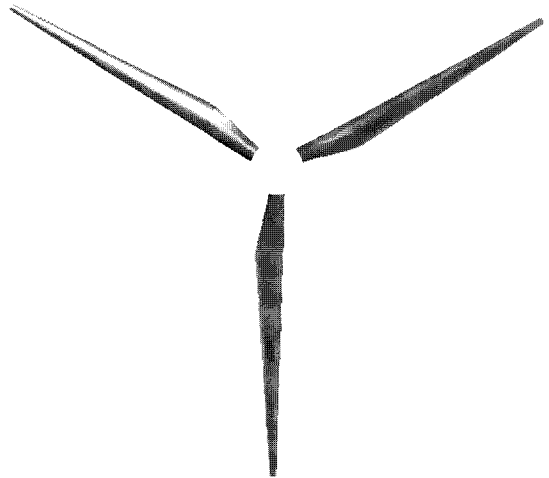


Fig. 1 3-D Rotor blade configuration(T40/500)

의 영역으로 정의되며, 전체 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 부분이며, 풍력설계에 중점을 두는 부분이다. Inboard 부분은 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 Inboard 부분을 포함한 전체 블레이드에 대한 수치해석을 수행하였다. 블레이드를 구성하는 익형의 형태는 블레이드의 Outboard 부분의 허브 부분으로부터 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

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, 해석결과와 신뢰성을 고려하여 블레이드 주위에 격자를 집중 배치하였다. 전체 도메인의 격자 수는 약 800,000이며, Fig. 2와 Fig. 3에 생성된 격자를 나타내었다.

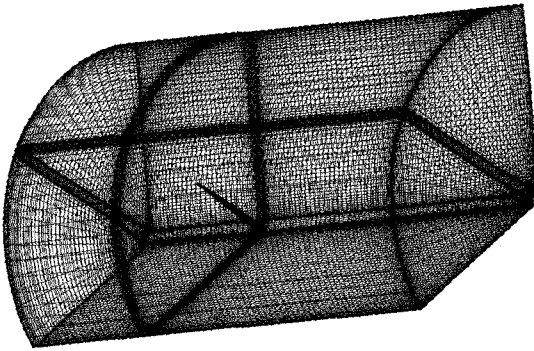


Fig. 2 Computational grid

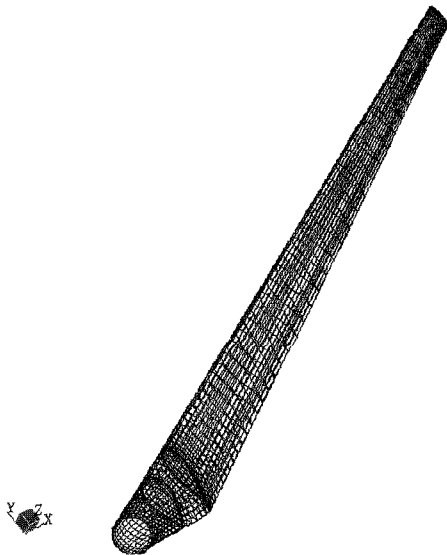


Fig. 3 Computational grid near the rotor

3. 수치해석 기법 및 경계조건

3.1 수치해석 기법

CFX-TASCflow는 3차원 레이놀즈평균 (Reynolds averaged) 나비에 스톱스(Navier-Stokes) 방정식을 적용하며, 지배방정식은 유한체적법(FVM)에 의하여 이산화된다. 수치해석은 3차원 비압축성 정상상태 조건에 의하여 수행되었으며, 블레이드 표면에서 발생하는 3차원 실속현상에 대한 영향을 반영하여 해석 결과의 정확도를 확보하기 위해 $k-\omega$ 모델^[8]을 적용하였으며, 대류항의 이산화 기법으로 2차 정도의 정확도를 가지는 MLPS (Modified Linear Profile Skewed Upstream Differencing Scheme) 기법을 사용하였다.

3.2 경계조건

계산영역 내 입구경계조건은 균일 유입속도조건을 주었으며, 원통좌표계로 정의된다. 출구경계조건은 유체가 전체 계산영역의 경계면을 빠져나가는 것으로 정의되며, 동일 압력조건을 부여하였다. 로터 블레이드에는 no-slip 조건 및 회전 조건을 부여하였으며, 본 연구에서는 효율적인 계산을 위하여 유동이 정상적이고 주기적이라는 가정하에, 하나의 블레이드 계산영역을 대상으로 하였다. 단일 계산영역의 주기 경계면은 주기조건으로 처리하였다.

4. 계산조건

본 연구의 수치해석 모델로써 채택된 T40/500에 대한 실험은 아직 수행되지 않은 상태이며, 현재 델푸트 대학 풍력에너지 연구그룹에 의해 1:0.23으로 축소된 모델에 대하여, BEM (Blade Element Momentum)법에 의한 수치 해석 결과만이 제시되어 있는 상태이다. 본 연구에 사용된 로터의 형상정의를 위해 제공받은 3차원 CAD 데이터는 1:0.23으로 축소된 모델이며, 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. TSR이란, 로터 블레이드로 불어오는 풍속 (V_i)과 블레이드 팁 부분에서의 속도 비로 정의되며, 무차원 수이다.

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

(단, R : 블레이드 반경길이, Ω : 회전각속도)

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 유입풍속을 고정하고 로터 블레이드의 회전속도만 변화시켜 가면서 수치해석을 수행하였다. 유입풍속은 5m/s이며, 회전 속도는 30~100rpm으로 변화시켜, 모두 8가지 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 이때 TSR은 2.89~9.63의 범위를 가진다. 계산조건으로 선정된 TSR

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

의 범위는 BEM에 의해 해석된 TSR의 범위와 정확히 일치하며, Table 1에 전체 계산조건을 요약하여 나타내었다. 모든 계산은 Pentium 4 PC (1.7GHz, 1Gb)에서 수행되었다. 정상상태 계산은 모두 반복계산이 200번 정도일 때 수렴하였으며, 계산 소요시간은 각 케이스 별로 최소 8시간에서 최대 12시간이 소요되었다.

계산을 수행하기에 앞서 원활한 해의 수렴성과 안정성을 확보하기 위하여, 초기에 약 120,000의 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.

5. 결과 및 고찰

5.1 Wake 구조에 대한 유동해석

로터 블레이드로 유입되는 바람은 회전하는 블레이드에 대한 영향으로 하류(downstream)쪽으로 발달되는 후류를 발생시키게 된다. 이때 발생하는 후류는 허브

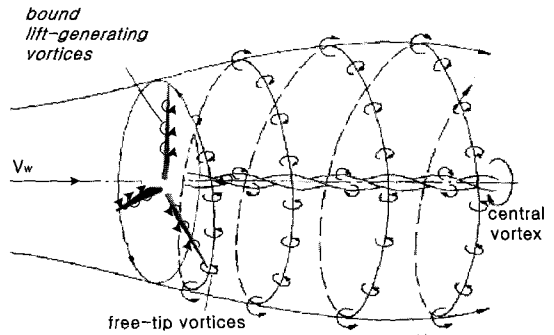


Fig. 4 Sketch of wake distribution⁽¹⁾

와 가까운 위치에서 발달하는 중심와류 (central vortex)와 팁 부분에서 발생하는 팁 와류 (tip vortex)의 두 가지로 구분된다. 일반적으로 로터 블레이드 후방으로 발달되는 후류 구조는 로터의 회전 속도가 빨라질수록 팁 와류의 간격이 점점 좁아지게 되며, 상당히 복잡한 구조의 3차원 와류를 발생시키게 된다⁽¹⁾. Fig. 4에 이론적으로 제시된 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 거동을 그림으로 나타내었다.

Fig. 5에 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 구조와 속도분포를 TSR의 변화 (2.89, 3.85, 4.82)에 따라 나타낸 것이다. Fig. 5에 유선으로 나타낸 후류의 구조는, Fig. 4에서 제시된 이론적인 구조와 잘 일치함을 알 수 있으며, 복잡한 3차원 후류를 정성적, 정량적으로 명확하게 보여주고 있다. 회전하는 로터 블레이드를 통과해 빠져나가는 기류의 속도 성분은, 회전 축 방향의 속도 성분과 로터의 회전방향 속도 성분의 합력으로 나타내어질 수 있다. Fig. 5에 제시된 결과들로 각각의 속도 성분을 정확하게 예측 할 수는 없지만, 각각의 결과의 우측에 위치한 값들을 통하여, TSR 값이 증가할수록 후방으로 발달하는 후류의 최고속도 성

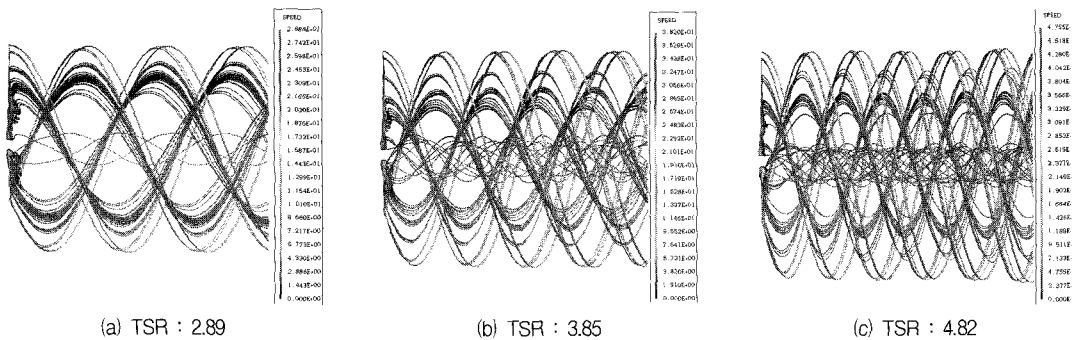


Fig. 5 Calculated wake distribution (view from side of downstream)

분 값은 점점 증가하고 있음을 알 수 있다. TSR이 증가한다는 의미는, 로터 블레이드의 회전 속도가 증가한다는 것이므로, 회전방향으로의 속도성분은 점점 증가한다. 따라서, TSR이 증가할수록 후류의 최고 속도 값은 증가하고 있으므로축 방향 성분보다 회전방향 속도 성분의 증가율이 더 크게 되므로 블레이드 후방으로 발달하는 후류의 주기가 점점 짧아지고 있음을 알 수 있으며, 허브에 근접한 부분으로부터 발달되는 중심와류는 TSR이 증가함에 따라, 더욱 복잡한 3차원 유동패턴을 보임을 알 수 있다.

5.2 블레이드 표면 3차원 실속

일반적으로, 실속 (stall)은 대부분의 경우, 반드시 피해야만 할 문제로써 생각되고 있으나, 풍력발전에 있어서는 이러한 실속이 출력을 제어하는 방법의 하나로 이용된다. 이러한 방법을 실속제어형이라 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 Fig. 6에서 스케치한 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 부분의 블레이드 표면에 부착되어 θ 방향으로 흐르는 기류를 통과하는 동안 3차원 실속을 발생시키며, 임의의 지점에서 θ 방향으로 분리된다. 반경 방향으로 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 있다⁶⁾. Fig. 7은 TSR 3.85인 경우 블레이드 표면에서의 계산결과이며, Fig. 6과 상당히 유사함을 알 수 있다. Fig. 8에 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.

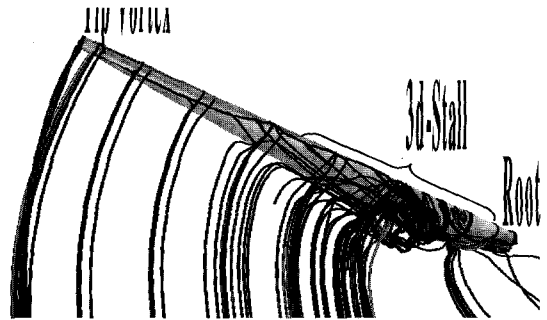


Fig. 7 Example of calculated 3d stall near blade [TSR : 3.85]

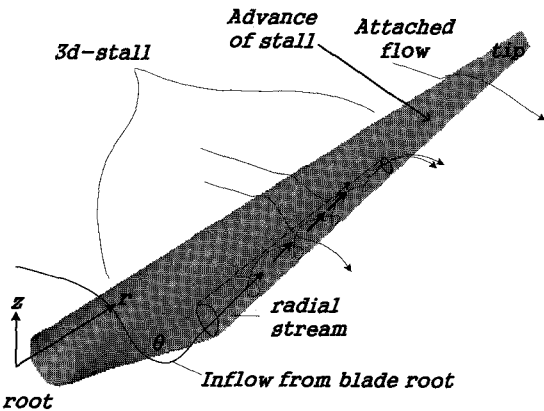
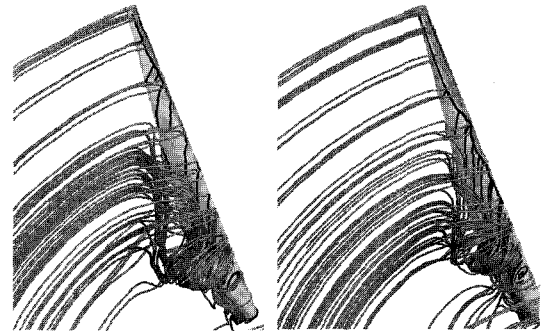
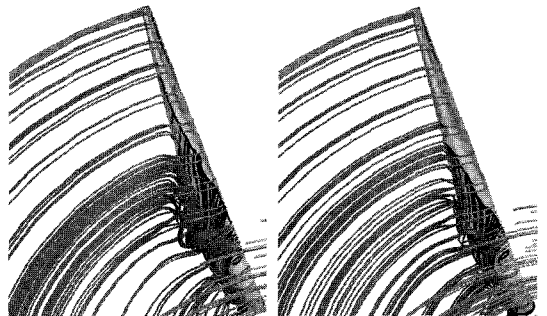


Fig. 6 Sketch of 3-d stall at blade surface⁶⁾



(a) TSR : 2.89

(b) TSR : 3.85



(c) TSR : 4.82

(d) TSR : 7.71

Fig. 8 3-D stall phenomena near blade

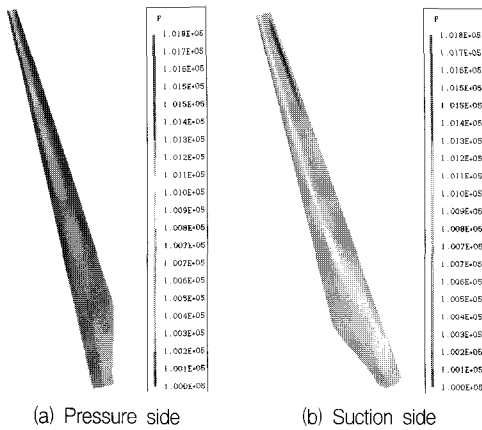


Fig. 9 Pressure distributions at TSR : 3.85

5.3 블레이드 표면 압력분포

Fig. 9에 한 예로서 TSR이 3.85인 경우의 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. 로터 블레이드로 유입되는 바람의 속도와 블레이드 회전속도의 합력인 상대속도 (relative speed)는 임의의 영각 (angle of attack, α)을 가지고 블레이드의 전연으로 향하게 되고, 이때 블레이드의 압력 면과 흡입 면에서 발생하는 압력 차에 의하여 양력이 발생하여 블레이드가 회전하게 된다. 블레이드 각 부분에서의 2차원 익형 단면으로 유입되는 속도가 빠를수록 압력 차가 더 크게 발생하게 되는데, 수치해석을 통한 결과를 살펴보면 블레이드 팁 쪽으로 갈수록 압력 면과 흡입 면에서의 압력 차가 증가하는 것을 알 수 있다.

5.4 T40/500 로터 블레이드의 성능 평가

CFD 기법은 이미 수많은 익형의 공력 특성을 예측하는데 있어 많은 적용가능성을 보여왔으며, 보다 우수한 수치적 기법들의 개발과 우수한 품질의 격자를 통하여 실속 후 공력특성까지 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 풍력발전용 터빈을 설계함에 있어서 가장 핵심적인 요소인 로터 블레이드의 설계에 필요한 신뢰

성 있는 2차원 익형의 공력특성은 필수적이며, 지금까지는 주로 실험에 의한 데이터에만 의존하여 왔으나, 설계자들의 입장에서는 상당히 까다롭고 많은 시간과 비용을 초래하는 작업이므로, 기존에 제공되는 데이터 외의 실제 적용될 새로운 데이터를 얻기란 거의 불가능한 일이다. 따라서, 다양한 수치기법들의 개발 등에 의한 CFD 기법의 발달로, 설계에 필요한 기초 데이터를 얻기 위해 이를 적용하는 단계이며, 상용 CFD 코드의 적용성을 평가하는 단계이다. 이 모든 것을 종합해 볼 때, 전체적으로 로터 블레이드 설계자들이 가장 관심을 가지고 있는 부분은, 현재의 CFD 기술로써 얼마나 정확하게 터빈의 성능을 예측할 수 있는지이며, 이는 TSR의 변화에 따른 터빈의 출력 특성을 나타냄으로써 제시할 수 있다.

본 연구에서의 성능평가는 다음과 같은 순서로 이루어졌다.

- 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. BEM 법은 블레이드 국부 위치에서의 2차원 익형단면의 공력특성인 양력과 항력의 신뢰성 있는 데이터를 바탕으로, 로터가 비틀림 각(yaw-angle)을 가지지 않는다는 가정과, 입구로부터 유입되는 바람이 균일한 분포를 가진다는 가정 하에 상당히 신뢰성 있는 결과를 예측할 수 있다⁽⁹⁾. 엄격히 말하자면 BEM법은 2차원적 이론이기 때문에 블레이드 팁 손실, 실속이 발생하는 경우 등의 3차원적인 영향을 정확하게 반영하지 못하고, 설계초기단계에서 많은 가정을 통해야 함에도 불구하고, 로터 블레이드에 작용하는 하중과 공력특성을 예측하는데 상당히 신뢰성 있는 설계 기초

데이터를 제공하며, 설계자들이 로터 블레이드를 설계하는데 필요한 형상 및 최적 비틀림 각도 등의 설계 데이터 등을 제시하기도 한다⁽¹⁰⁾. 따라서, CFD에 의한 해석결과와 BEM에 의한 해석 결과의 비교는 충분한 의미가 있다.

Fig. 10에 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 BEM 보다 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 유동 현상이므로 난류모델을 적용한 수치해석 기법으로 정확한 정량적인 데이터를 제시하는 데는 상당한 어려움이 따른다. 본 계산결과와 경우 실제 출력은 TSR이 8.67인 경우까지 점점 증가하고 있으며, 8.67을 기준으로 점점 감소하는 경향을 보이며, BEM의 예측결과와 다소 차이를 보인다. 이는 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 정도로써, 실제 3차원 외부 유동장을 해석하는데 있어서 다소 충분하지 않은 수의 격자이다. 따라서, 보다 정확한 성능예측을 가능하게

하기 위하여, 다양한 난류모델을 적용하여 최적의 모델을 검토할 필요가 있으며, 계산에 사용된 격자를 생성하는데 있어, 보다 우수한 품질을 가지는 격자를 적용할 필요가 있고, 격자 수를 조정하여 반복계산을 수행할 필요가 있다.

6. 결론

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

1. 이론적으로 제시된 풍력발전용 로터 블레이드 후방으로 발달하는 후류 분포와 3차원 실속 현상은 수치계산을 통해 제시된 결과와 서로 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있었으며, 블레이드의 회전속도가 빨라질수록 3차원 실속영역은 점점 작아진다.
2. 블레이드 압력면에서의 압력분포는 팁쪽으로 갈수록 높게 나타나고 있으나, 흡입면에서는 팁쪽으로 갈수록 낮은 분포를 나타내고 있다. 전체적으로 블레이드 팁쪽으로 갈수록 압력면과 흡입면에서 발생하는 압력차는 커진다.
3. 상용 CFD 코드를 이용한 풍력 발전용 로터 블레이드의 성능을 평가할 수 있었으며, BEM과 CFD 결과는 오차범위 10% 내에서 서로 일치하고 있음을 알 수 있었다. 수치해석에 사용된 모델의 실험 결과가 없는 관계로 BEM과 CFD 기법 중 어느 기법의 예측 결과가 더 정확인지에 대한 평가는 할 수 없었으나, CFD 기법을 이용하여 보다 정확한 성능을 예측하기 위해선 계산격자의 최적화 및 다양한 난류모델의 검토 등이 필요할 것이다.

참고문헌

- (1) Hau, E., Wind turbines, Springer Verlag, 2000.
- (2) McGrowskey, W. J., "Vortex Wakes of Rotorcraft", Paper 95-0530, 33rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 1995.
- (3) Landgrebe, A. J., 1994, New Directions in Rotorcraft Computational Aerodynamics Research in the U.S., AGARD CP-552.

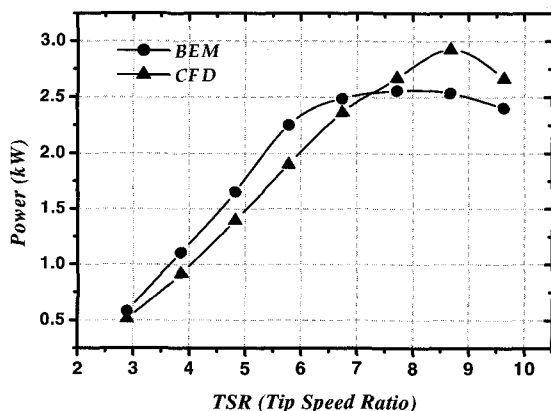


Fig. 10 Comparison of calculated and BEM power characteristics for the scaled T40/500

- (4) Duque, E. P.N., Johnson, W., van Dam, C.P., Cortes, R., and Yee, K., 2000, "Numerical Predictions of Wind Turbine Power and Aerodynamic Loads for the NREL Phase II Combined Experiment Rotor," AIAA 38th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January, 10-13.
- (5) Leishman, J. G. and Glenn, L., 2000, "Challenges in Modelling the Unsteady Aerodynamics of Wind Turbines," 21st ASME Wind Engineering Symposium and the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV.
- (6) Corten, G. P., 2001, "Inviscid Stall Model," Proceedings of the EWEC, Copenhagen, Denmark, pp. 466~469.
- (7) <http://windenergy.citg.tudelft.nl>
- (8) Michelsen J. A. and Sorensen, N. N., "Current Developments in Navier-Stokes Modelling of Wind Turbine Rotor Flow," Proceedings of EWEC, 2001, Denmark, pp. 367~372.
- (9) DNV/RISO, 2001, Guidelines for Design of Wind Turbines, DSI Grafisk Service, pp. 61~66.
- (10) Hanse. A. C. and Butterfield, C. P., 1993 "Aerodynamics of Horizontal Axis Wind Turbines," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 25, pp. 115~149.