

CFD에 의한 NREL Phase IV 풍력터빈 성능해석

김범석*, 김만응**, 이영호***

Performance Analysis of the NREL Phase IV Wind Turbine by CFD

Bum-suk Kim*, Mann-eung Kim** and Young-ho Lee***

Key Words : Wind turbine(풍력터빈), CFD(전산유체역학), Transitional turbulence model(천이 난류모델), Fully turbulence model(완전난류모델), Power prediction(성능예측), NREL Phase IV wind turbine

Abstract

Despite of the laminar-turbulent transition region co-exist with fully turbulence region around the leading edge of an airfoil, still lots of researchers apply to fully turbulence models to predict aerodynamic characteristics. It is well known that fully turbulent model such as standard k- ϵ model couldn't predict the complex stall and the separation behavior on an airfoil accurately, it usually leads to over prediction of the aerodynamic characteristics such as lift and drag forces. So, we apply correlation based transition model to predict aerodynamic performance of the NREL (National Renewable Energy Laboratory) Phase IV wind turbine. And also, compare the computed results from transition model with experimental measurement and fully turbulence results. Results are presented for a range of wind speed, for a NREL Phase IV wind turbine rotor. Low speed shaft torque, power, root bending moment, aerodynamic coefficients of 2D airfoil and several flow field figures results included in this study. As a result, the low speed shaft torque predicted by transitional turbulence model is very good agree with the experimental measurement in whole operating conditions but fully turbulent model(k- ϵ) over predict the shaft torque after 7m/s. Root bending moment is also good agreement between the prediction and experiments for most of the operating conditions, especially with the transition model.

1. 서론

현재 서부 텍사스유 기준으로 국제 원유가격은 배럴당 약 100 달러 수준으로 급등하였으며, 국제사회에서 에너지 문제는 국가 안보 및 장기발전 전략과 직결되는 중요한 이슈가 되고 있다. 또한, 그동안 실효성 논란을 야기한 교토의정서가 2004년 러시아의 비준서 제출에 따라 발효요건이 충족되면서 2005년 2월 정식으로 발효되었다. 이에 따라 유럽 및 미주 등 일부 선진국을 중심으로 환경 및 에너지 문제에 대한 대책의 일환으로 풍력 에너지 산업에 대한 투자가 활발히 이루어지고 있으며, 현재 발전단가 하락 및 수익성 증대를 위한 관련요소기술 개발이 진행 중이다.

공기역학적 최적 설계를 요구하는 대부분의 풍력발전용 블레이드는 효율 증대 및 성능향상을 위해 1차적으로 유동장의 특성을 명확하게 이해 할 필요가 있다. 최적설계인자의 도출을 위해서는 신뢰성 있는 실험을 통한 방대한 유동특성 및 성능특성 결과의 확보가 요구되나, 많은 비용과 시간이 소요되는 문제로 인해 현실적으로 쉽게 접근 할 수 없다. 따라서, 보다 효율적인 블레이드의 유동 및 성능특성 파악을 위해, wake code, aero-elastic code, performance code, CFD code 등을 이용한 다양한 수치해석

적 연구가 시도되고 있다.

CFD를 통한 airfoil 공력특성 해석결과의 신뢰성 측면에서, 대부분의 범용 CFD 코드에서 채택하고 있는 standard k- ϵ 난류모델은 airfoil의 받음각(angle of attack)이 실속각(stall angle) 이상으로 유지되는 경우 박리(separation)지점의 부정확한 예측 및 실속 지연 등의 문제가 발생함에 따라 과도한 양력 값을 예측한다고 잘 알려져 있다. 이는 점성저층(viscosity sub-layer) 영역에서의 경계층 박리 예측에 실패한데 기인하며, 점성저층영역의 벽면전단 응력 예측정도를 향상시키고자 하는 목적으로 Wilcox 모델, Wilcox 모델과 k- ϵ 모델의 장점만을 취해 개발된 BSL(baseline model) 모델, 난류전단응력 수송항을 계산하는 SST(shear stress transfer) 모델 등이 개발되어 적용되고 있다. 특히 SST 모델의 경우 역 압력구배에 의해 발생하는 와류의 크기와 박리 점을 비교적 정확하게 예측한다고 평가 받고 있다. Airfoil 유동장의 경우 층류-천이-난류 영역이 동시에 존재하며, 받음각이 증가함에 따라 천이 지점이 전연(leading edge)부로 이동하는 특징을 보인다. 그러나, 이러한 난류모델을 적용한 해석결과는 유동장을 완전난류(fully turbulent)라고 가정하는데 문제가 있다.

일반적으로 층류 경계층에서의 유동박리는 난류경계층에서의 유동박리보다 빠르게 진행되는 특징이 있으며, 이러한 현상은 층류-천이 영역을 고려하지 않는 fully turbulent 모델에 의한 해석결과가 실제 실험결과와 차이를 발생케 하는 중요한 원인이 된다. 특히 airfoil의 집합체로 구성되는 풍력터빈 블레이드의 유

* 한국전급 에너지·산업기술센터, bskim@krs.co.kr

** 한국전급 에너지·산업기술센터

*** 한국해양대학교 기계·정보 공학부

동 및 성능 예측 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 보다 정확한 공력특성 해석결과의 확보를 위해서는 laminar separation bubble 및 turbulent reattachment 현상을 정확히 예측 할 수 있는 고급 난류모델의 적용을 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 3D 풍력터빈 출력특성 해석을 위해 층류-천이 영역에 대한 모사가 가능한 correlation based transition 모델⁽¹⁾과, 일반적으로 공학적인 수준에서의 해석정도만 요구되는 분야에 광범위하게 적용되고 있는 standard k-ε 모델을 fully turbulent 모델의 대표로 선정하여 비교분석 하였다. 수치해석 결과는 NREL이 NASA Ames Wind tunnel에서 수행한 실험결과와 비교 분석되었다.

2 Phase VI 풍력터빈

NREL(National Renewable Energy Laboratory)은 2000년 5월에 NASA Ames Research Center의 wind tunnel(24.4m×36.6m)에서 연구용 풍력터빈인 Phase IV에 대한 실험을 성공적으로 완료하였다.⁽²⁾ 그 후 즉시, NREL은 세계 각국에서 개발되고 있는 다양한 해석코드들의 해석능력 검증에 위한 목적으로 “blind comparison”을 진행하였으며, 이 비교검증 테스트를 위해 NASA Ames Research Center에서 수행된 실험결과와 블레이드 형상 정보를 웹상에 공개한바 있다. 본 연구에서는 공개된 블레이드 형상 정보를 바탕으로 정확한 형상구현이 가능하고, 비교적 쉽게 신뢰성 있는 실험결과와 확보가 가능한 Phase IV 풍력터빈 블레이드를 CFD 해석 대상으로 선정 하였다. Phase IV 풍력터빈은 20kW의 정격출력을 발생시키며 실속제어형 이다. 블레이드 직경은 10.058m이며, 회전속도는 71.63rpm이고 2매의 블레이드가 장착된다. 자세한 풍력터빈 제원을 table 1에 나타내었다.

블레이드 프로파일은 S809 airfoil로 구성된다. S809 airfoil은 21%의 두께를 가지며 실속 제어형 풍력터빈의 출력성능 향상을 위해 전연부의 표면 거칠기에 비교적 덜 민감하도록 설계되었다. (1989, somers)

Fig. 1에 S809 airfoil 형상을 나타내었으며, Fig. 2에 Phase IV 풍력터빈 블레이드 3D 형상을 나타내었다.

2 계산조건 및 경계조건

Phase IV 풍력터빈 해석의 경우 correlation based transition 모델, k-ω SST 모델 그리고 공학적 수준에서의 결과 확보를 목적으로 널리 적용되며, 대다수의 CFD 코드에서 기본 난류모델로 채택하고 있는 standard k-ε 모델을 각각 선정하여 결과비교를 수행하였다. 입구풍속은 7m/s, 10m/s, 13m/s, 15m/s, 20m/s, 25m/s로 설정하였으며 CFD 해석 결과는 NREL에 의해 NASA Ames wind tunnel에서 수행된 결과와 비교되었다.

모든 전산해석은 ANSYS-CFX code를 통해 수행되었으며, 2nd order high resolution scheme을 사용하였다. 수렴판정을 위해 RMS residual을 10⁻⁵로 설정하였으며, 신뢰성 있는 수렴판정 결과의 확보를 위해 블레이드 토크 값을 모니터링 하였다.

풍력터빈 블레이드 해석과정은 정상상태 해석을 수행한다 하

Table 1 Specification of the Phase IV

| | |
|----------------------|-----------------|
| Number of blade | 2 |
| Rotor diameter | 10.058m |
| Hub height | 12.192m |
| Rotational speed | 71.63rpm |
| Cut-in wind speed | 6m/s |
| Power regulation | stall |
| Rated power | 19.8kW |
| Rotational direction | CCW |
| Global pitch angle | 4.775° (tip=3°) |

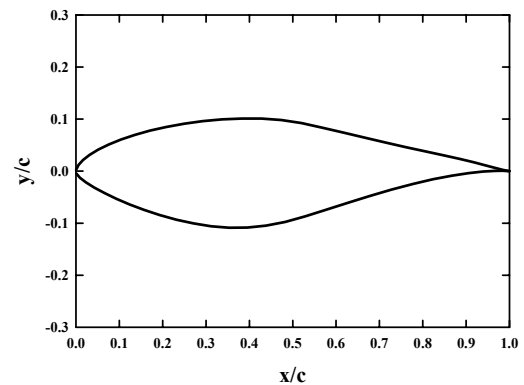


Figure 1 S809 airfoil profile



Figure 2 Configuration of the NREL Phase IV blade

더라도 입구 풍속이 증가 할수록 periodic separation 및 와 방출 (vortex shedding) 현상 등에 의한 영향으로 토크 값은 반복계산 과정에서 주기적으로 진동하는 특성을 보인다. 따라서, 이러한 경우 수렴판정을 위해 주기적인 진동특성이 발생하는 지점으로부터 500 step의 반복계산 결과 평균 값을 torque 값의 수렴치로 사용하였다.

Transition 난류모델의 적용을 통한 정밀한 층류 및 난류 경계층 해석을 위해서는 벽면 근방 격자 공간해상도가 $y^+ < 1$ 의 조건을 만족해야만 신뢰성 있는 해석 결과의 확보가 가능하다. 그러나, k-ε 모델의 경우 일반적으로 $y^+ > 30$ 의 조건을 만족 할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 계산격자 생성단계에서 적용 난류모델의 특징을 가장 잘 반영할 수 있는 벽면 근방 격자 밀집도를 고려하였으며, transition 모델의 경우 $y^+ < 1$, k-ε 모델의 경우 $y^+ > 30$ 의 조건을 만족하도록 하였다. 계산격자는 격자전용 생성도구인 ICEM-CFD를 사용하였으며, Fig. 3에 나타내었다. 전체 격자수는 약 7,500,000 node이며, 완전한 O type HEXA 격자계로 구성되었다.

경계조건으로 외부 도메인 출구영역에 pressure 조건을 부여하였고, 단일 블레이드만을 해석대상에 포함하기 위해 periodic 조

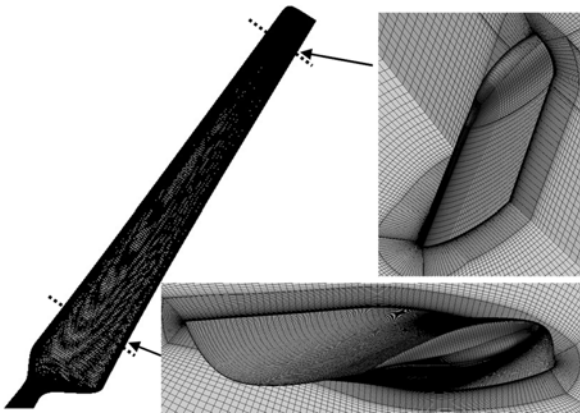


Figure 3 Computational grid for the NREL wind turbine simulation

건을 부여하였다. 본 연구는 블레이드 출력변화 예측만을 목적으로 하므로, 로터 블레이드부터 입구까지의 거리는 로터 직경의 2배, 후류방향으로 3배, 반경방향으로 2배의 공간해상도를 확보하였다. 블레이드 벽면은 점착조건(no-slip)으로 처리하였고, 입구 유입조건으로 균일유입속도 조건을 부여하였다. 입구 측 유입 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%이다. 계산은 quad core CPU 10개를 사용하였으며, 각 CPU 당 메모리는 4Gb이다. 각 case가 완전히 수렴하는데 필요한 소요시간은 약 24hrs/case가 소요되었다.

3 결과 및 고찰

Fig. 4는 transitional turbulence 모델을 적용한 결과이며, 입구 풍속 변화에 따른 블레이드 흡입 면(suction side)에서의 turbulent intermittency 결과를 7m/s~20.13m/s의 순으로 나타내었다.

각각의 결과에서 붉은색은 난류영역, 푸른색은 층류영역을 의미하고, 25.06m/s 결과는 fully turbulent 영역에 해당하는 20.13m/s의 결과와 거의 동일하여 나타내지 않았다.

7m/s 결과의 경우 팁 근방영역과 허브 주변부에 걸쳐 비교적 넓은 층류영역이 존재 하고 있다. 팁 근방에서는 전연으로 부터 $x/chord=0.5$ 위치까지 층류영역이 존재하고 있으나, 입구풍속이 증가함에 따라 블레이드 국부 스팬 위치에서의 받음각 변화에 따른 영향으로 층류영역은 전연 및 팁 근방으로 점차 축소되고 있다. 입구풍속이 15.1m/s에 이르면 팁 부근 전연의 일부 협소한 영역에 한해서만 층류영역이 존재하며, 20.13m/s에 이르러 블레이드 흡입 면은 비로소 완전난류 상태에 놓이게 된다.

로터로 유입되는 풍속이 증가하면, 축 방향(axial velocity) 속도와 접선방향속도(tangential velocity)의 상호작용에 따라 블레이드 국부 스팬위치에서의 받음각이 증가하고, laminar separation 및 역 압력 구배의 영향으로 흡입 면에서 복잡한 실속현상이 발생한다. 따라서, 이러한 실속현상에 의한 공력특성 변화를 정확히 예측하기 위해서는 경계층 내부의 laminar separation 및 역 압력 구배의 발생으로 인한 separation 위치 및 크기의 정확한 예측이

필요하다. 현재 주로 사용하고 있는 eddy-viscosity 모델 중 standard k-ε 모델은 attached flow가 형성되는 경우에 비교적 정확한 결과 값을 얻을 수 있는 반면, 역 압력구배에 의한 separation이 발생하는 조건에서는 전단응력의 수송을 고려하지 않으므로 와점성을 과도하게 예측하여 박리 지점 및 크기의 부정확한 예측 및 실속 지연 등의 문제가 있다. 이를 보완하기 위해 1994년에 Menter 등에 의해 k-ω SST 모델이 개발되었다. 이 난류모델은 k-ε 모델에 비해 역 압력 구배에 의해 발생하는 separation 지점 및 크기를 비교적 잘 예측 한다고 알려져 있으나, 풍력터빈 블레이드 등에서 발생하는 laminar separation 예측이 불가능하다. 일반적으로 층류경계층이 난류경계층에 비해 박리가 쉽게 발생한다고 잘 알려있으며, 정확한 경계층 박리지점 예측의 실패는 박리 영역의 축소 및 확대, 부정확한 박리지점의 예측 등과 같은 결과를 초래하여, 결국 블레이드에서 발생하는 토크 값이 과대 혹은 과소평가되는 결과를 초래한다.

현재 대다수의 CFD 코드들이 기본으로 채택하고 있는 fully turbulent model인 k-ε 모델의 경우 post-stall 영역에 대해 정확한 공력특성 예측에 실패한다는 것은 잘 알려진 사실이며, 이는 결국 경계층을 벽 법칙(wall function)으로 처리하여 유동박리 현상을 반영하지 못하기 때문이다. 따라서, transition 모델을 사용하지 않은 해석 결과의 경우 풍력터빈 블레이드가 부착류(attached flow)가 형성되는 운전조건에서는 실험결과와 비교적 잘 일치하는 경향을 보일지는 모르나, 실속이 발생하는 운전범위에서의 정확한 출력 값을 예측하는 것은 불가능하다는 결론을 얻을 수 있다. Fully turbulent model (k-ε)의 부정확한 공력특성의 예측에 관한 문제는 Walter P. Wolfe 등⁽³⁾에 의해 수행된 S-809 airfoil 공력특성해석에 관한 연구에 잘 나타나 있다.

Fig. 5, Fig. 6에 걸쳐 블레이드 흡입 면에서의 입구풍속변화 (7m/s, 10.02m/s, 20. 13m/s)에 따른 표면 유선분포를 대표적으로 나타내었다.

Fig. 5는 laminar-transition 해석결과이며, Fig. 6은 standard k-ε 모델을 적용한 결과이다.

Fig. 5, 7m/s 결과의 경우, 허브 근방의 협소한 영역에 걸쳐 제한적으로 나타나는 실속을 제외하고, 블레이드 대부분의 영역에서 부착류가 형성되고 있다. Fig. 6의 결과 또한, Fig. 5의 결과와 마찬가지로 허브 부근 국부영역을 제외하고는 전체 블레이드에 걸쳐 안정된 부착류가 형성되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5, 10.02m/s 결과는 7m/s와는 달리 블레이드 팁으로부터 약 35% 지점까지 부착류가 형성되고 있으나, 그 이후부터 허브까지 실속영역이 관찰된다. 허브로부터 박리된 유동은 원심 가속력(centrifugal acceleration) 및 압력차(pressure difference)에 의한 영향으로 블레이드 표면을 따라 팁 방향으로 이동하는 특징을 보인다.⁽⁴⁾ 그러나, Fig. 6의 10.02 m/s 결과는, 블레이드 전연 근방에서 부착류가 거의 그대로 유지 되고 있으며, 허브 근방 후연 일부영역을 제외하고는 상당히 넓은 범위에 걸쳐 부착류가

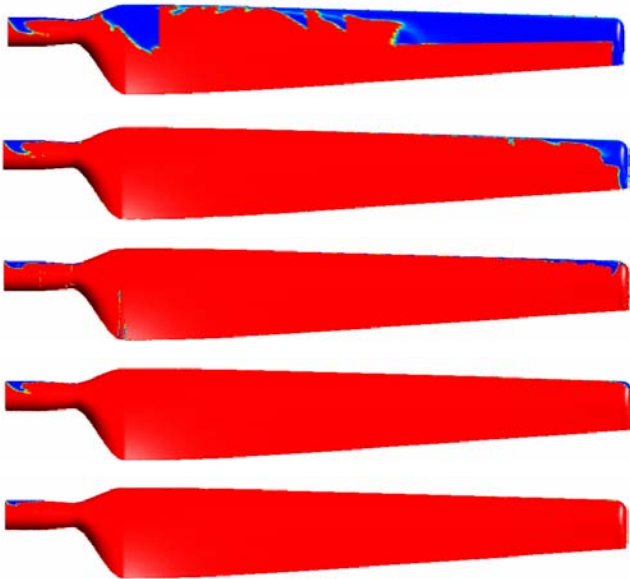


Fig. 4 Suction side intermittency contour, 7m/s, 10.02 m/s, 13.05m/s, 15.1m/s, and 20.13m/s(from top to bottom, transition model)

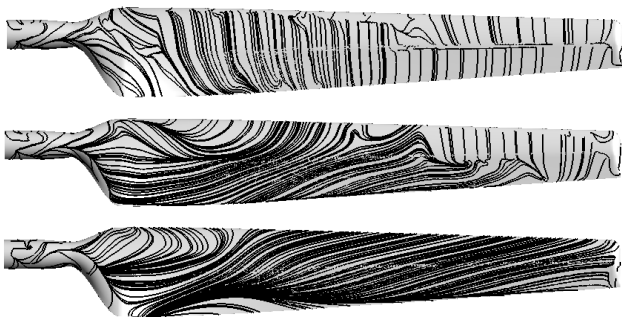


Fig. 5 Suction side surface streamlines, 7m/s, 10.02 m/s, and 20.13m/s(from top to bottom, transition model)



Fig. 6 Suction side surface streamlines, 7m/s, 10.02 m/s, and 20.13m/s(from top to bottom, k-ε model)

유지되고 있다. 동일한 풍속조건에서 두 모델의 예측결과는 서로 다른 특징을 보이며, 부착류가 더 큰 영역에 걸쳐 유지되고 있는 Fig. 6의 결과가 Fig. 5의 결과에 비해 더 큰 출력을 발생할 것이라는 예상을 할 수 있다.

Fig. 7은 NREL에 의해 NASA-Ames wind tunnel에서 수행된 토크(torque) 실험결과를 수치해석 결과와 비교한 그래프이다. Transition 모델에 의해 예측된 토크 값은 실험결과와 거의 정확

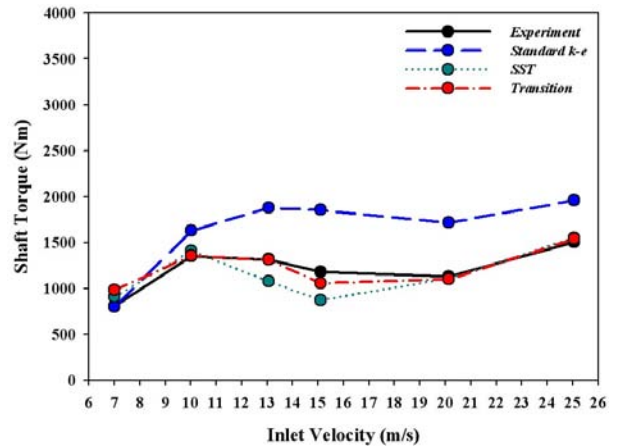


Fig. 7 Comparison of the predicted and measured low speed shaft torque

히 일치하고 있으며, 특히, 풍속 10.02 m/s 이상의 극심한 실속이 블레이드 흡입면 전 영역에 걸쳐 발생하는 운전조건에 대해서도 실험결과와 수치해석결과는 정확히 일치한다. 반면 standard-k-ε 모델의 결과는 대체로 과도한 출력특성을 보이며, SST 모델 결과는 k-ε 모델 결과에 비해 실험결과와 잘 일치하고 있으나, 10m/s-20m/s 구간에서 실험결과와의 차이를 보이고 있다.

4 결론

본 연구에서는 NREL PhaseIV 모델에 대한 3차원 CFD 해석을 수행하였으며, 실험결과와 transition 모델, SST 모델, k-ε 모델 결과를 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Transition 모델에 의해 예측된 토크는 실험결과와 정확히 일치하는 반면, k-ε 모델에 의해 예측된 결과는 실속이전 조건인 7m/s의 경우를 제외하고 모든 경우에 대해 과도한 토크 값을 예측하며, SST 모델의 경우 13.05m/s, 15.01m/s 조건에서 실험결과와 차이를 보인다.
- 2) 실속영역 범위 및 박리 지점에 대한 정확한 예측이 필요한 문제에 있어 fully turbulent 모델은 신중히 적용될 필요가 있으며, transition 모델의 적용이 필요하다.

참고문헌

- (1) Langtry, P.R.B., Menter, F.R., "Transitional Modeling for General CFD Applications in Aero-nautics", AIAA Paper 2005-522, 2005
- (2) D. Simms, S. Schreck, M. Hand, L.J. Fingersh, "NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements", NREL/TP-500-29494, 2001
- (3) Walter P. Wolfe, Stuart S. Ochs, "CFD Calculations of S809 Aerodynamics Characteristics I", AIAA-97-0973, 1997
- (4) 김범석, "수평축 풍력발전용 터빈 블레이드 최적 설계 및 공력성능해석에 관한 연구", 한국해양대학교 공학박사 학위논문, 2005.