

전산유체역학을 이용한 풍력터빈 축소효과 수치해석

박 영민¹⁾, 장 병희²⁾

Numerical Analysis of Wind Turbine Scale Effect by Using Computational Fluid Dynamics

Young Min Park, Byeong-Hee Chang

Key words : Wind turbine(풍력터빈), Scale effect(축소효과), Wind tunnel(풍동), CFD(전산유체역학)

Abstract : Numerical analysis of wind turbine scale effect was performed by using computational fluid dynamics. For the numerical analysis of wind turbine, Three dimensional Navier-Stokes solver with various turbulence models was tested and realizable k-ε turbulence model was selected for the simulation of wind turbines. To validate the present method, performance of NREL (National Renewable Energy Laboratory) Phase VI wind turbine model was analyzed and compared with experiment and blind test data. Using the present method, numerical simulations for various size of wind tunnel model were carried out and characteristics were observed in detail. The power loss due to the interference between wind turbine and nacelle was also computed for relatively larger nacelle installation in wind tunnel test. The present results showed good correlations with experimental data and reasonable trends of scale effect of wind turbine.

1. 서론

기술발전과 더불어 풍력터빈은 점차 대형화 추세로 진화하고 있으며 이는 풍력터빈의 지상 설치 비용 절감 및 효율적인 지상풍 이용 측면에서 우수하다. 이러한 대형화 추세로 본다면 그림 1에서 보는 바와 같이 현재 최대직경이 약130m 인 풍력터빈은 향후 2010년 경 약 180m에 이를 전망이다⁽¹⁾. 풍력터빈 설비가 대형화 되면 비용을 고려한 최적 구조설계 그리고 대규모 풍력단지 경제성 해석 관점에서 정확한 풍력터빈의 성능해석이 필요하다.

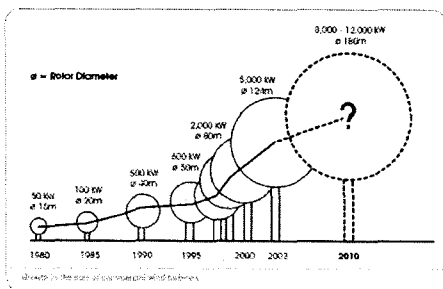


Fig 1. Trends of wind turbine size

풍력터빈의 성능해석은 Free-wake method, BEM, CFD 등 다양한 성능해석 도구를 주로 이용하

나 회전효과, 3차원 효과, 실속 및 실속지연 효과 등 복잡한 유동특성으로 인하여 예측이 쉽지 않다. 이는 NREL 시험을 기준으로 한 Blind Test 결과를 보면 알 수 있으며 성능예측 오차는 20% 이상까지 이르고 있다^(2,3).

이와 달리 풍동시험은 비교적 정확한 데이터를 제공하고 있으며 NREL과 같은 기관은 성능해석 과정에서 검증할 수 있도록 NASA Ames 80ft x 120ft 풍동에서 수행한 결과를 바탕으로 표준 데이터를 제공하고 있다⁽⁴⁾. 그러나 실제 운용되는 풍력터빈은 수십 m에서 100m 이상 까지 이므로 이들에 대한 실제 스케일 풍동시험은 불가능 하며 축소모델을 통한 풍동시험만이 가능하다.

축소 모델을 시험하는 경우 보통 TSR(Tip Speed Ratio)를 실제의 풍력터빈과 동일하게 설정하여 시험을 수행한다. 그러나 풍동시험은 로터의 크기가 감소하므로 실제와 동일한 Reynolds 상사성을 유지할 수가 없다. 가장 일반적인 보정 방법으로 블레이드의 앞전에

1) 선임연구원, 공력성능그룹, 한국항공우주연구원
E-mail: ympark@kari.re.kr

Tel : (042)860-2692 Fax : (042)860-2604

2) 책임연구원, 공력성능그룹, 한국항공우주연구원

E-mail : cbh@kari.re.kr

Tel : (042)860-2313 Fax : (042)860-2604

transition dot를 부착, 강제로 천이현상을 발생시켜 실제와 유사한 유동을 모사하는 방법이 있으나 고정익과 달리 회전효과가 있고 실속특성도 변하므로 이를 적용하기가 쉽지 않다. 이러한 transition dot를 이용한 실험은 유럽의 MEXICO 프로젝트에 의해 이루어질 예정이다⁽²⁾. 이외에 블레이드 단면을 확장하여 축소효과를 보정하는 방법이 있으며 헬리콥터 풍동시험⁽⁵⁾에 사용되기도 하였다. 풍력터빈의 경우 본 연구 이전에 축소 효과에 관해서 일부 연구가 이루어진바 있다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 이러한 풍력터빈의 축소효과를 관찰하기 위하여 전산유체역학을 이용 유동을 해석하였다. 해석모델은 NREL Phase VI 로 설정하여 실험값과 비교 검증하였고 이를 이용하여 다양한 축소모델에 대한 성능을 해석하였다. 최종적으로 코드확장에 따른 보정기법을 설명하고 이를 NREL Phase VI 풍력터빈에 적용하여 가능성을 살펴보았다.

2. 수치적 기법

본 연구에 사용된 유동해석 도구로는 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하였다. 해석 과정에서는 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식 해법을 이용하였으며 계산은 모두 2차의 공간정확도 조건으로 하였다. 또한, 계산시간을 고려하여 유동장을 모두 정상(steady) 유동으로 가정하였다.

경계조건은 유입유동의 경우 속도를 고정하는 velocity inlet 조건을 사용하였고 유출유동의 경우 대기압과 동일한 pressure outlet 조건을 사용하였다.

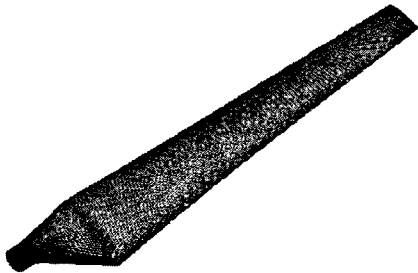


Fig. 2 Blade surface mesh distribution of NREL Phase VI wind turbine.

그림 2는 계산에 사용된 NREL Phase VI 블레이드의 표면격자를 보이고 있다. 블레이드 표면은 정렬사각 격자를 이용하였으며 점성계산을 위한 사각기둥을 층으로 생성하였다. 원방경계 영역은 격자를 효율적으로 이용하기 위하여 정렬격자를 이용하였고 블레이드와 원방경계의 사이(buffer zone)는 비정렬 사면체 격자로 공간을 생성하였다. 격자의 수는 총 330만개 정도이며 이중 절반

이 블레이드 격자와 중간영역(buffer zone)에 해당한다.

그림 3은 계산에 사용된 격자의 주기경계면(periodic boundary)을 도시하고 있으며 계산은 한 블레이드에 대하여만 수행하였다. 사용된 격자는 로터 회전 및 끝단 와류부근에 격자를 밀집시킴으로써 블레이드로 인한 끝단와류가 잘 포착되도록 하였다.

그림 4는 계산에 사용된 격자를 바탕으로 끝단와류를 도시한 그림으로 블레이드 후방으로 와류가 전달되어 가는 것을 관찰할 수 있다. 루트부근에서 두개의 와류가 관찰되는 이유는 블레이드 어깨(shoulder)로 인하여 나타나는 현상이다. 와류의 세기는 받음각이 비교적 큰 루트에서 가장 강하며 이는 그림에서 확인이 가능하다.

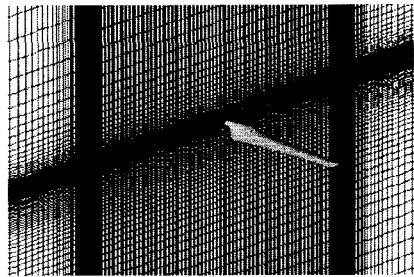


Fig. 3 NREL Phase VI wind turbine blade and periodic boundary

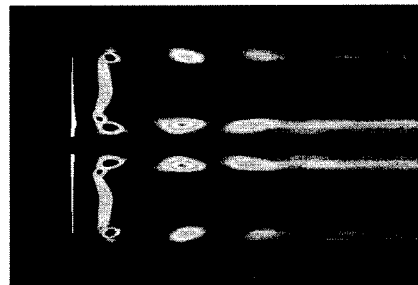


Fig 4. Vorticity convection from turbine blade

난류모델은 K-e, K-w, Spalart-Allmaras 등 다양한 모델에 대하여 여러 풍속에 대한 계산을 먼저 수행하고 이 중에서 NREL Phase VI 결과와 가장 유사한 모델을 선정하여 수치해석에 사용하였다.

3. 계산 결과 및 토론

위에 언급한 방법을 이용하여 먼저 여러 난류 모델에 대한 유동해석을 수행하고 NREL Phase VI 결과와 비교하였다. 다음으로 6m/s~25m/s 풍속 조건에서 NREL 시험결과⁽³⁾와 비교하였으며 최종적으로 여러 축소 모델에 대한 해석을 수행하였

다. 이때 풍력터빈의 피치각 및 요각 조건은 각각 3도와 0도이다.

3.1 난류모델 선택

풍력터빈의 유동장은 대부분 실속영역이나 이에 준하는 영역에서 운용되므로 천이점을 정확히 예측하고 post-stall 해석능력이 우수한 난류모델을 선택해야 한다. 따라서 본 연구에서는 k-e, k-w, Spalart-Allmaras 난류 모델 등 다양한 난류모델을 이용하여 유동을 해석하고 NREL 시험결과와 가장 유사한 모델을 축소효과 해석에 활용하였다.

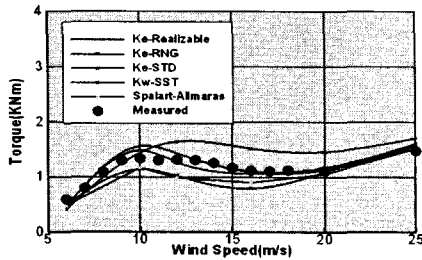


Fig 5. Shaft torque characteristics for various turbulence model.

그림 5는 난류모델에 대한 축토크를 도시한 그림으로 k-e 계열이 가장 실험값과 유사한 특성을 보였다. 반면 Spalart-Allmaras 모델이나 k-w의 경우 서로 유사하며 조기에 실속에 돌입하여 성능이 낮게 예측하였다. 계산결과 k-e Realizable 모델이 가장 유사했으며 k-e RNG 모델도 비교적 근접한 결과를 보였다. 따라서, 향후에는 K-e RNG 모델을 이용한 상세해석도 시도해 볼 필요가 있다.

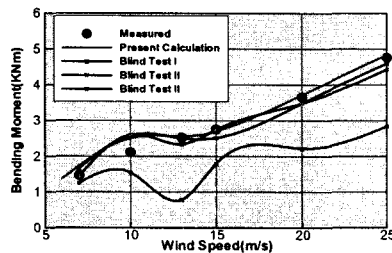
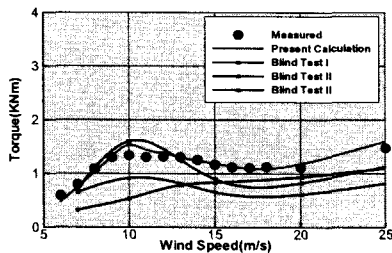


Fig 6. Shaft torque and bending moment comparison with blind test results.

3.2 NREL Phase VI 해석결과 및 검증

그림 6은 NREL Phase VI 풍력터빈의 풍동시험결과 및 Blind test 결과를 본 해석결과와 비교 도시한 그림으로 타 연구기관의 결과와 비교하여 비교적 정확하게 예측함을 알 수 있다. 다만 풍속 10m/s 조건에서는 사용된 난류모델이 실속을 다소 늦게 예측하여 토크는 약간 높게 예측하였으나 전반적으로 NREL 시험결과와 일치한다. Bending 모멘트 역시 풍속 10m/s 조건에서 다소 높지만 비교적 잘 예측하고 있어 본 방법이 풍력터빈의 해석에 무리 없이 사용할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 축소효과 수치해석

NREL Phase VI 모델의 축소효과를 관찰하기 위하여 5%, 10% 20% 40% 그리고 60% 모델에 대한 해석을 수행하였다. 해석 방법은 피치각 3도, 풍속 10m/s 조건에 대하여 해석하였으며 비교가 용이하도록 상대적인 파워계수 및 추력계수를 비교하였다.

그림 7은 이를 도시한 그림으로 두 가지 계수에 대한 특성을 바로 확인할 수 있다. 그림을 보면 파워의 경우 모델의 축소에 민감하게 반응하나 추력은 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 특히 20% 까지는 선형적으로 파워계수가 감소하나 20% 이하의 모델에서는 급격하게 비선형적으로 감소하고 있어 이에 대한 보정이 쉽지 않음을 예측할 수 있다. 이러한 성능계수의 변화특성은 아래의 그림 8로 해석할 수 있다.

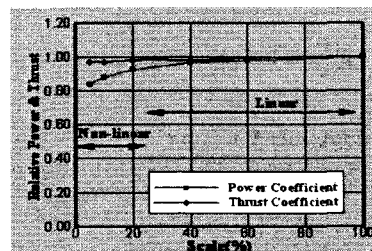


Fig 7. Torque and thrust coefficient comparison for various scale models.

그림 8은 풍력터빈 단면에서의 공력계수를 개념적으로 도시한 그림으로 추력계수와 파워계수의 변화를 설명하고 있다. 그림을 보면 파워계수는 단면의 양력과 항력의 차이에 비례하고 추력계수는 두 계수의 합에 비례한다. 따라서 양력이 감소하고 항력이 증가하는 축소모델의 경우 파워의 감소가 확연하게 나타나고 추력계수는 어느 정도 상쇄하므로 차이가 별로 없다. 따라서 축소효과 보정은 파워 즉 토크에 대하여 주로 이루어

저도 무방하다고 볼 수 있다. 그러나 축소비가 너무 큰 경우 이러한 특성을 그대로 유지한다고 볼 수 없으므로 이 부분은 추가해석이 필요하다.

그림 9는 6m/s~25m/s 조건에서 NREL Phase VI 풍력터빈의 실제 사이즈 및 12% 모델에 대하여 수치해석을 수행하고 축토크를 비교한 그림이다.

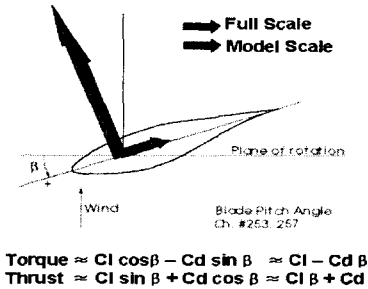


Fig 8. Torque and thrust of wind turbine cross section for full and scaled model.

그림을 보면, 축소모델 축토크의 경우 실제 형상보다 최고 토크값이 약간 작고 위치 또한 약 1m/s 정도 후방에 위치하고 있어 일반적인 2차원 에어포일의 특성과 유사하다. 축소에 따른 이러한 차이를 보정하기 위해서는 10m/s 이전 영역에 대한 토크 기울기와 최고 토크에 대한 값이 서로 일치하도록 하도록 보정기법을 적용하면 된다.

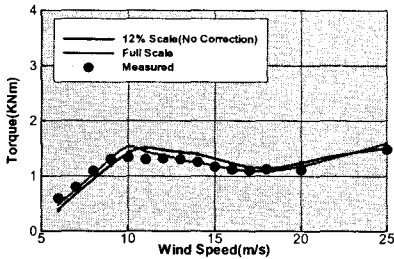


Fig 9. Shaft torque for full scale and 12% scaled NREL Phase VI wind turbine.

3.4 나셀 축소효과

실제의 풍력터빈과 달리 축소 모델은 계측장비 및 구동 모터 등의 장비를 포함하고 보다 규모가 큰 장비의 실험을 위해서 나셀의 크기가 상대적으로 커질 수 있다.

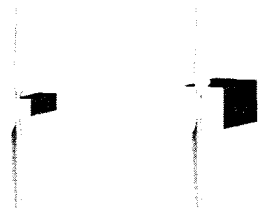


Fig 10. NREL Phase VI full scale nacelle and model scale nacelle for 12% model.

그림 10은 NREL Phase VI 나셀과 KARI에서 시험할 12% NREL Phase VI 형상에 대한 나셀을 상대적으로 도시한 그림으로 각각 지름대비 약 8% 와 20%에 해당한다. 해석결과에는 표 1에 나타낸 바와 같으며 토크는 각각에 나셀에 대하여 2% 미만의 감소효과를 보여 나셀의 증가에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Table 1 Nacelle Effect

Scale	Nacell Size	Torque	Δtorque(%)
Full Scale	No Nacelle	1434 Nm	100.00%
	Full Scale	1433 Nm	99.93%
	12% Scale	1416 Nm	98.74%
Model Scale	No Nacelle	2.36 Nm	100.00%
	Full Scale	2.36 Nm	100.08%
	12% Scale	2.32 Nm	98.39%

4. 결론

본 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 풍력터빈의 축소효과를 해석하였다. 해석도구로는 FLUENT를 사용하였으며 k-ε 난류모델이 가장 시험치와 유사한 결과를 보였다. 모델을 축소할 경우 토크가 민감하게 반응하였고 추력은 변화가 거의 없었다. 또한, KARI에서 수행예정인 12% NREL 모델을 대하여 해석을 수행한 결과 상대적 인 최대 토크값이 약 3%정도 감소하고 위치 또한 1m/s 이동함을 확인할 수 있었다. 나셀로 인한 효과는 지름의 20%에 대하여 해석한 결과 2% 이내로 무시할만한 변화를 보였다.

References

- [1] "European Wind Energy at the Dawn of the 21st Century", 2005, ER 21351.
- [2] 장병희, 2005, "미국과 유럽의 풍력터빈 풍동 시험," 한국신재생에너지학회 춘계학술대회.
- [3] Simms, D., Schreck, D., Hand, M., and Fingersh, L. J., 2001, "NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements," NREL/TP-500-29494.
- [4] Hand, M., Simms, D., Fingersh, D., Jager, D., Cotrell, J., Schreck, S., and Larwood, S., 2001, "Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: ind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns," NREL/TP-500-29955.
- [5] Langer, H. J., Peterson, R. L., and Maier, T. H., 1996, "An Experimental Evaluation of Wind Tunnel Wall Correction Methods for Helicopter Performance," American Helicopter Society 52nd Forum.
- [6] 박영민, 윤성준, 장병희, 2005, "NREL Phase VI 풍력터빈의 축소효과 수치해석," 한국항공우주학회 추계학술대회.