

스케일 변화에 따른 NREL PHASE VI 풍력터빈의 성능해석

박영민^{1*}, 장병희²PERFORMANCE ANALYSIS OF NREL PHASE VI WIND TURBINES
UNDER VARIOUS SCALE CONDITIONSY.M. Park^{1*} and B.H. Chang²

In the present paper, the scale effects of two-dimensional airfoil and three-dimensional wind turbine were investigated by using FLUENT software. For two dimensional analysis, flow around S809 airfoil with various Reynolds No. and Mach No. conditions were simulated. For three dimensional analysis, scaled NREL Phase VI wind turbine models from 6% to 1,600% were simulated under the same tip speed ratio condition. Finally, aerodynamic comparisons between two-dimensional flow and three dimensional wind turbine flow are made for the feasibility study of scale effect corrections. Currently, KARI(Korea Aerospace Research Institute) is preparing for the wind tunnel test of 12% NREL Phase VI wind turbine and the performance analysis of the scaled NREL wind turbine model will be validated by the wind tunnel test.

Key Words: 풍력터빈(wind turbine), NREL Phase VI(NREL Phase VI), 축소효과(scale effect), 성능해석(performance analysis)

1. 서 론

풍력터빈은 설치비용의 절감과 효율적인 발전을 위하여 점차 대형화되어가는 추세이며 이를 위해서는 설계단계에서 정확한 성능예측이 가능해야 한다. 그러나 풍력터빈의 성능예측은 유동의 복잡성으로 인하여 난해한 분야로 알려져 있으며 BEM, free-wake 그리고 CFD 등의 방법을 이용하여 성능을 예측하기도 하나 정교한 결과를 예측하기에는 어렵다[1,2]. 풍동 시험 또한 실제 풍력터빈의 축소로 인한 유동특성 변화로 인하여 정확한 결과를 산출하기 어렵다. 때문에 대부분의 풍력터빈의 풍동시험은 2차원 익형에 대하여 국한되어 있고 여기서 산출된 결과를 풍력터빈의 성능해석 프로그램에 이용한다.

실제 스케일의 풍력터빈 풍동시험은 미국의 NREL(National Renewable Research Laboratory)이 NASA Ames 풍동에서 풍동시험을 수행한 바 있다. 이 풍동시험은 상업적 목적이 아니라 연구용 목적으로 수행된 것으로 일부 데이터가 공개되어 있다. 한국항공우주연구원(이하 항우연) 공력성능그룹

에서는 NREL의 풍력터빈 모델 중 Phase VI 형상에 대한 12% 모델의 풍동시험을 계획하고 있다.

본 논문에서는 이에 대비하여 2차원 익형 및 다양한 크기의 NREL Phase VI 풍력터빈에 대한 해석 결과를 통해 성능 변화를 관찰하였고 축소효과의 보정 가능성을 살펴보았다.

2. NREL Phase VI 풍력터빈

미국의 NREL은 1987년부터 실제 크기의 수평축 풍력터빈에 대한 표준정보를 제공하기 위하여 다양한 풍력터빈에 대한 풍동시험을 NASA Ames Research Center의 80ft x 120ft 풍동을 이용하여 수행하고 있다[3]. 이 중 본 연구에서 사용한 형상은 Phase VI에 해당하는 모델로 시험모델과 대표적인 형상특성을 정리하면 아래 그림 1과 같다.

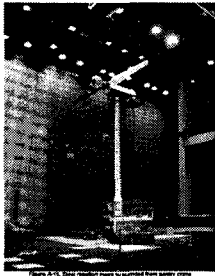
3. 수치적 기법 및 검증

본 연구에 사용된 유동해석 도구로는 상용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하였다. 해석 과정에서는 2차원과 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식 해법을 이용하였으며 계산은 모두 2차의 공간정확도 조건으로 하였다. 또한, 계산시간을 고려하

1 정희원, 한국항공우주연구원 공력성능그룹

2 정희원, 한국항공우주연구원 공력성능그룹

* Corresponding author E-mail: ympark@kari.re.kr



- Number of blades : 2
- Blade Diameter : 10.058m
- Design Speed : 72 rpm
- Cut-in and Cut-out speed : 6 m/s ,25m/s
- Power regulation : Stall
- Rated Power : 19.8 Kw
- Used Airfoil : S809 airfoil

Fig. 1 NREL Phase VI wind turbine model and specification

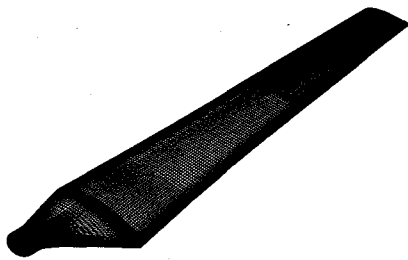


Fig. 2 Surface mesh of NREL Phase VI wind turbine blade.

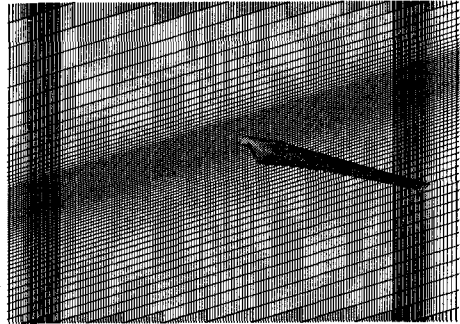


Fig. 3 NREL Phase VI wind turbine blade and periodic boundary.

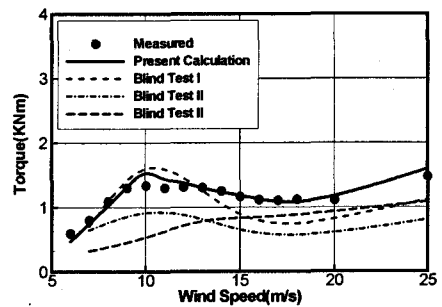


Fig. 4 Shaft torque comparisons with blind test results[4].

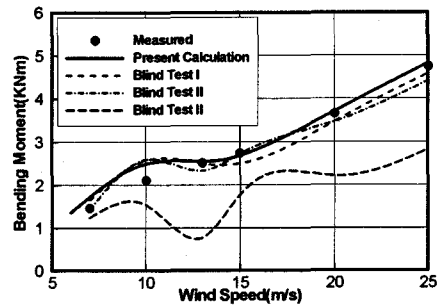


Fig. 5 Shaft bending moment comparisons with blind test results[4].

여 유동장을 모두 정상(steady) 유동으로 가정하였다. 3차원 풍력터빈의 경우 계산시간 절감을 위하여 주기경계면(periodic boundary) 조건을 이용하였으며 경계조건은 유입유동의 경우 속도를 고정하는 velocity inlet 조건을 사용하였고 유출유동의 경우 대기압과 동일한 pressure outlet 조건을 사용하였다.

유동해석도구에 대한 검증은 참고문헌[4]에서 이미 수행한 바 있으므로 상세한 설명은 생략하기로 한다. 여러 가지 방법에 대한 해석결과 k-ε 난류모델이 가장 시험값에 근접했으므로 모든 해석과정에서는 k-ε 난류모델을 사용하였다. 아래의 그림 2는 계산에 사용된 NREL Phase VI 풍력터빈 블레이드의 표면격자를 보이고 있으며 총 격자면수(faces)는 약 3만개 정도이다. 그림 3은 주기경계면을 도시한 그림으로 tip vortex 영역에 격자가 집중되어 있음을 알 수 있다. 전체격자(cell)는 약 330만개 정도이다.

그림 4와 5는 참고문헌[4]의 blind test 결과와 비교한 그림으로 본 방법의 타 연구자들의 결과와 비교하여 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그림에서 보면 풍속 10m/s 부근에서 차이가 심하게 발생하는데 이는 계산에 사용된 k-ε 난류모델의 천이현상이 다소 높은 속도에서 발생하기 때문에 나타나는 현상이다. 이러한 차이는 타 난류모델을 사용했을 경우에도 나타났으나 k-ε 모델을 사용할 경우 실험값과 가장 근사한 결과를 예측하였다[4].

4. 결과 및 토의

풍력터빈의 축소효과를 관찰하기 위하여 먼저 NREL Phase VI 풍력터빈에 사용되는 S809 익형에 대하여 다양한 Reynolds 수 조건에 대한 2차원 해석을 수행하였다. 또한, 6%에서 1,600%까지 이르는 다양한 크기의 3차원 NREL Phase VI 풍력터빈 모델에 대한 해석을 수행하고 스케일에 따른 성능특성을 관찰하였다.

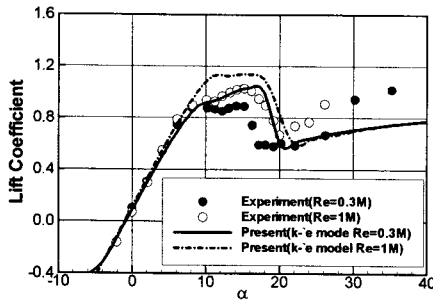


Fig. 6 Lift coefficient of S809 airfoil.

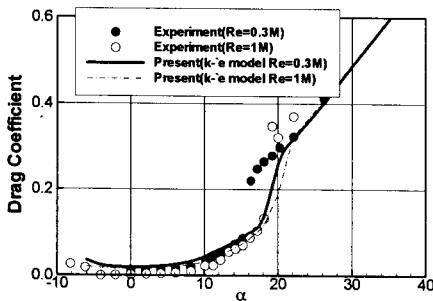


Fig. 7 Drag coefficient of S809 airfoil.

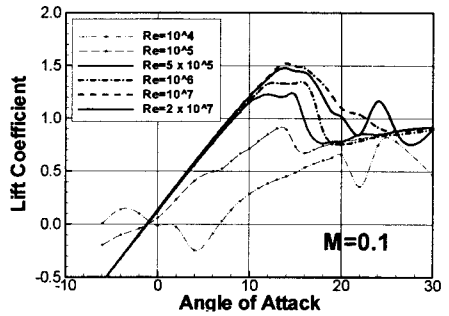


Fig. 8 Lift coefficient of S809 airfoil for various Reynolds No condition(Mach=0.1).

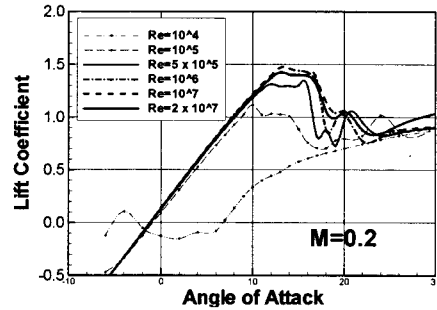


Fig. 9 Lift coefficient of S809 airfoil for various Reynolds No condition(Mach=0.2).

4.1 S809 익형 해석

S809는 1980년도 초에 NREL에서 Eppler설계 프로그램을 이용하여 설계한 익형으로 풍력터빈의 단면형상으로 자주 이용되고 있다. NREL Phase VI 풍력터빈의 경우 블레이드 S809 단일 익형만을 이용한다.

그림 6과 7은 해석과정에서 이용한 유동해석 도구를 시험 값[1]과 비교한 그림으로 최대 양력계수는 다소 크게 예측하지만 양력계수 기울기 및 실속각은 비교적 정확하게 예측할 수 있다.

그림 8과 9는 Mach수 0.1, 0.2 및 여러 Reynolds 수에 대하여 양력 및 항력 계수 특성을 비교한 그림으로 Reynolds 수가 증가할수록 양력계수의 기울기, 최대 양력계수 그리고 실속반음각이 증가함을 확인할 수 있다. Mach 수에 따른 특성을 보면 0.1과 0.2인 경우 큰 변화가 없다 그러나 위의 검증 조건인 Mach수 0.06인 경우 최대양력계수 및 실속특성이 0.1이상인 조건에 비하여 현격하게 차이가 남을 볼 수 있다. 이러한 결과를 본다면 풍력터빈의 경우 끝단속도(tip speed)를 높일수록 효율적인 발전이 가능하다는 것을 예측할 수 있다.

결과를 요약하면 2차원 익형의 경우 축소비가 클수록 양력 기울기 및 최대양력계수가 감소하고 항력계수는 증가한다. 실속이 시작되는 받음각 또한 축소비가 클수록 감소하는 경향을 보인다. 이러한 특성을 본다면 풍력터빈 축소모델의 경우

받음각은 풍속에 비례하고 축도크는 양력계수에 비례하므로 최대토크가 감소하고 풍속에 따른 축도크 증가를 또한 감소할 것으로 예상할 수 있으며 이에 대한 확인은 다음 절에서 하기로 한다.

4.2 NREL Phase VI 풍력터빈 해석

실제 풍력터빈의 축소효과를 보기 위하여 NREL Phase VI 풍력터빈의 성능을 해석하였다. NREL Phase VI 풍력터빈의 경우에는 실제 스케일에 대한 풍동시험 데이터가 공개되어 있으므로 정확한 검증이 가능하다.

NREL Phase VI 풍력터빈은 직경이 10.029m이며 본 연구에서는 축소효과를 관찰하기 위해 6%에서 1,600%의 가상 모델을 설정하고 계산을 수행하였다. 계산조건은 10.029m 풍력터빈 기준 피치각 3도, 72rpm 조건이며 동일한 유동조건을 사용하였다. 표 1 은 각각의 조건에 대한 회전속도와 Reynolds수를 보이고 있다.

그림 10은 스케일별로 성능(100% 스케일 축도크 기준)을 비교한 그림으로 2차원 익형과 다른 양상을 관찰할 수 있다. 가장 큰 차이점을 들면 스케일별 토크계수의 차를 들 수 있다. 그림을 모델의 축소비가 클수록 토크계수는 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 토크의 경우 양력에 비례하여 증가

Table. 1 Various Sizes of NREL Phase VI Wind Turbine

| Scale(%) | 1,600 | 800 | 400 | 100 | 50 | 12 | 6 |
|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| Radius (m) | 80.46 | 40.23 | 20.12 | 5.03 | 2.51 | 0.60 | 0.30 |
| RPM | 4.5 | 9 | 18 | 72 | 144 | 600 | 1,200 |
| Re($0.75R$) | 15M | 7.5M | 3.7M | 0.9M | 0.5M | 0.1M | 0.06M |

하며 양력은 축소비가 커질수록 기울기 낮아진다고 앞 절에서 설명한 바와 같이 2차원 익형과 유사한 특성을 갖는다. 반면 최대토크(2차원의 경우 최대양력)와 실속이 발생하는 풍속(2차원의 경우 받음각)은 다른 양상을 보인다. 먼저 최대토크의 경우 스케일 변화에 따라 큰 차를 보이지 않는다. 이는 풍력터빈 블레이드상의 실속지연 현상에 기인하며 최대토크(최대양력)는 축소비에 관계없이 일정한 수준에 도달함을 알 수 있다. 이러한 실속지연 현상 때문에 최대토크가 발생하는 풍속은 증가하며 속도에 따른 토크는 그래프의 풍속 축방향으로 확대가 된 모양을 갖는다. 따라서 실제보다 풍동시험 모델이 실제보다 작은 크기라면 적절한 양의 풍속을 증가시켜 실제 스케일과 유사한 성능을 예측할 수 있다.

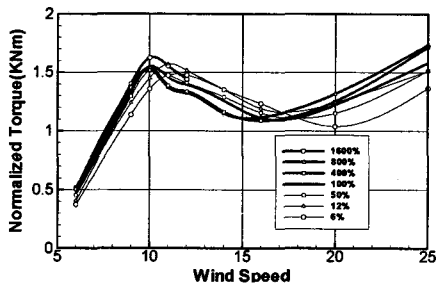


Fig. 10 Shaft torques comparison of NREL phase VI wind turbines under various scales.

요약하면 풍력터빈 축소모델의 토크기울기는 실제와 비교하여 감소하나 최대토크 값은 큰 변화를 보이지 않는다.

4.3 Scale Effect 보정 및 풍동시험

헬리콥터 및 프로토타입에 대한 풍동시험 과정에서 축소효과를 보정하는 방법은 이미 일부 문헌에 소개되어있다[5,6]. 소개되어 있는 방법의 경우 축소효과는 대부분 점성항력의 차이로 인해 발생한다고 가정하고 추력 및 파워계수를 점성

항력계수 비에 해당하는 $(Re_{model}/Re_{full})^{(1/5)}$ 값을 이용하여 보정하는 형태를 갖는다. 그러나 이러한 방법들은 헬리콥터와 달리 바람의 힘을 이용하여 동력을 추출하는 풍력터빈에는 적용하기 어렵다. 현재는 축소효과 보정방법에 대한 연구를 진행하고 있으며 풍동시험을 통해 검증 및 보완할 예정이다.

5. 결 론

본 논문에서는 2차원 익형과 3차원 NREL Phase VI 풍력터빈 해석을 통해 모델의 축소에 따른 성능변화를 관찰하였다. 두 가지 경우를 해석해본 결과 3차원 풍력터빈의 경우 2차원 익형과 달리 최대토크 값의 변화가 크지 않고 실속풍속도 증가함을 확인할 수 있었다.

향우연에서는 현재 12% NREL Phase VI 모델에 대한 풍동시험을 진행 중에 있다. 풍동시험은 향우연의 중형아음속 풍동(4m x 3m)에서 수행할 예정이며 보정기법에 관한 연구를 병행할 예정이다.

참고문헌

- [1] Simms, D., Schreck, D., Hand, M., and Fingersh, L.J., "NREL Unsteady Aerodynamic Experiment in the NASA Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements," *NREL/TP-500-29494*, 2001.
- [2] 장병희, "미국과 유럽의 풍력터빈 풍동시험," *한국신재생에너지학회 춘계학술대회*, 2005.
- [3] Hand, M., Simms, D., Fingersh, D., Jager, D., Cotrell, J., Schreck, S., and Larwood, S., "Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns," *NREL/TP-500-29955*, 2001.
- [4] 박영민, 장병희, "전산유체역학을 이용한 풍력터빈 축소효과 수치해석," *한국신재생에너지학회지 Vol 2. No. 2*, 2006.
- [5] Kitaplioglu, C. "Analysis of Small-Scale Rotor Hover Performance Data," *NASA TM 102271*, 1990.
- [6] McCluer, M. S., and Johnson, J. L. "Full-Span Tiltrotor Aeroacoustic Model(FSTRAM) Overview and Initial Testing," *American Helicopter Society Forum*, 2002.