

# 전산유체역학을 이용한 풍력터빈 축소효과 수치해석

박영민\*, 장병희

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

Young Min Park, Byeong-Hee Chang

**Abstract** Numerical analysis of wind turbine scale effect was performed by using commercial CFD code, Fluent. For the numerical analysis of wind turbine, the three dimensional Navier-Stokes solver with various turbulence models was tested. As a turbulence mode, the 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 its wind tunnel test and blind test data. Using the present method, numerical simulations for various size of wind turbine models were carried out and characteristics were analyzed in detail. For wind turbine test model, the size of nacelle may not be scaled down precisely because of available motor. The effect of nacelle size was also computed and analyzed through CFD simulation. The present results showed the good correlations in pre-stall region but much to be improved in post-stall region. In 2006 and 2007, the performance and the scale effect of standard wind turbine model will be tested in KARI(Korea Aerospace Research Institute) LSWT(Low Speed Wind Tunnel) and the present results will be validated with the wind tunnel data.

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

\* 한국항공우주연구원 공력성능그룹 선임연구원  
□E-mail : ympark@kari.re.kr

### 1. 서론

기술의 발전과 더불어 풍력터빈은 점차 대형화 추세로 진화하고 있으며 이는 풍력터빈의 지상 설치비용 절감 및 효율적인 지상풍 이용 측면에서 큰 장점을 갖는다. 이러한 대형화 추세로 본다면 Fig.1에서 보는 바와 같이 현재 최대 지름이 약

130m 인 풍력터빈은 2010년 경 약 180m에 이를 전망이다.<sup>1)</sup> 일반적으로 풍력터빈 설비가 대형화 될수록 비용절감을 위한 최적 구조설계와 풍력단지의 경제성 예측을 위해서 정확한 성능해석은 매우 중요하다.

풍력터빈의 성능해석은 Free-wake method, BEM, CFD 등 다양한 성능해석 도구를 주로 이용하나 회전효과, 3차원 효과, 실속 및 실속지연 효과 등 복잡한 유동특성으로 인하여 성

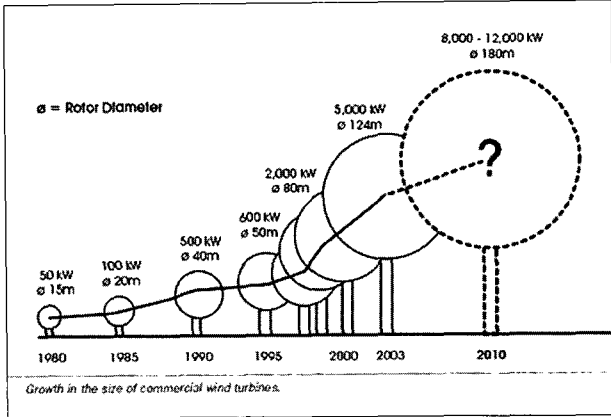


Fig 1. Trends of wind turbine size

능예측이 쉽지 않다. 이는 NREL 시험을 기준으로 한 Blind Test 결과를 보면 알 수 있으며 성능예측 오차는 방법에 관계 없이 20%이상까지 이르고 있다.<sup>2,3)</sup>

이와 달리 풍동시험은 정확한 데이터를 제공할 수 있는 장점이 있으나 2차원 익형시험에 한정되어 있고 3차원 풍력터빈 형상에 대한 시험은 활발하게 이루어지지 않고 있다. 일부 NREL 과 같은 기관은 설계과정에서 성능해석 프로그램의 검증에 이용할 수 있도록 NASA Ames Research Center 의 80ft x 120ft 풍동에서 10m급 풍력터빈의 시험결과를 바탕으로 표준 데이터를 제공하고 있다.<sup>4)</sup>

그러나 실제 운용되는 풍력터빈은 10m 이상에서 수 100m 까지 이르므로 이들에 대한 실제 스케일 풍동시험은 불가능하며 축소모형을 통한 풍동시험만이 가능하다.

축소 모형을 시험하는 경우 일반적으로 TSR (tip speed ratio)을 실제의 풍력터빈과 동일하게 설정하여 시험을 수행한다. 그러나 풍동에서 시험할 경우 로터의 직경은 풍동의 시험부 크기에 의하여 결정되므로 대부분의 풍동에서 실제와 동일한 Reynolds 상사성을 유지할 수 없다. 가장 일반적인 보정 방법으로 블레이드의 앞전에 천이 도트(transition dot)를 부착, 강제로 난류로의 천이현상을 발생시켜 실제 풍력터빈과 유사한 유동을 모사하는 방법이 있으나 고정익과 달리 회전효과가 있고 실속특성도 위치별로 다르므로 이를 적용하기가 쉽지 않다. 참고로 천이 도트를 이용한 풍동실험은 유럽의 MEXICO(Model Rotor Experiments under Controlled Conditions), 프로젝트의 일부로 수행될 예정이다.<sup>2)</sup> 이 외에 블레이드 단면을 확장하여 축소효과를 보정하는 방법이 있으며 헬리콥터 풍동시험<sup>5)</sup>에 사용되기도 하였다. 풍력터빈의 경우

본 연구 이전에 축소효과에 관해서 일부 연구가 이루어진 바 있다.<sup>6)</sup>

본 연구에서는 이러한 풍력터빈의 축소효과를 관찰하기 위하여 전산유체역학을 이용하여 풍력터빈 유동장을 해석하였다. 해석모델은 NREL Phase VI로 선정하여 실험값과 비교 검증하였고 이를 이용하여 다양한 축소모델에 대한 성능을 해석하였다. 또한 축소모델의 풍동시험 과정에서 발생할 수 있는 대형 나셀로 인한 토크 감소효과를 살펴보았으며 최종적으로 풍력터빈의 코드확장에 따른 보정기법을 설명하고 이를 NREL Phase VI 풍력터빈에 적용하여 가능성을 살펴보았다.

본 연구에서 주로 다루어진 축소효과는 2006년 및 2007년에 한국항공우주연구원(이하 항우연) 내 중형아음속풍동에서 시험이 이루어질 예정이다. 풍동시험은 주로 검증시험, 축소효과 및 보정기법 등에 관하여 이루어질 예정이며 시험장치 및 시험계획에 관해서는 본 논문의 후반부에 설명하기로 한다.

## 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.<sup>4)</sup> 이중 본 연구에서 사용한 형상은 Phase VI에 해당하는 모델로 대표적인 특성을 정리하면 아래와 같다.

- Number of blades : 2
- Rotor Type: Teetering Type
- 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
- Rotating Direction : CCW viewed from upwind
- Used Airfoil : S809 airfoil

### 3. 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.

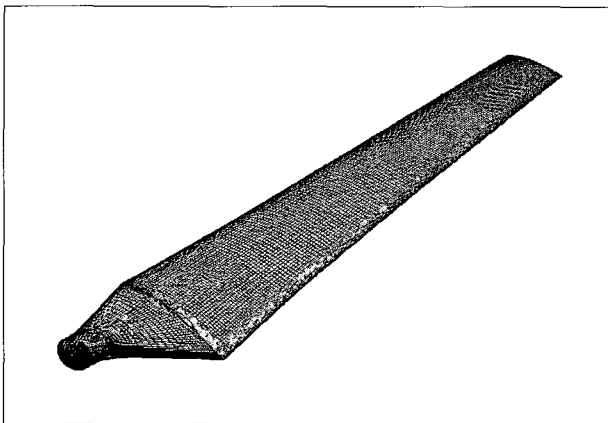


Fig. 2 Blade surface mesh distribution of NREL Phase VI wind turbine.

Fig. 2는 해석에 사용된 NREL Phase VI 블레이드의 표면 격자를 보이고 있다. 블레이드 표면은 정렬사각 격자를 이용하였으며 점성계산을 위한 사각기둥을 20개의 층으로 생성하였다. 원방경계 영역은 격자를 효율적으로 이용하기 위하여 정렬 격자를 이용하였고 블레이드와 원방경계의 사이(buffer zone)는 비정렬 사면체 격자로 공간을 생성하였다. 격자의 수는 총 330만개 정도이며 이중 절반이 블레이드 격자와 중간영역(buffer zone)에 해당한다.

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

Fig. 4는 계산에 사용된 격자를 이용하여 계산한 결과 중 끝단와류를 도시한 그림으로 블레이드 후방으로 와류가 전달되

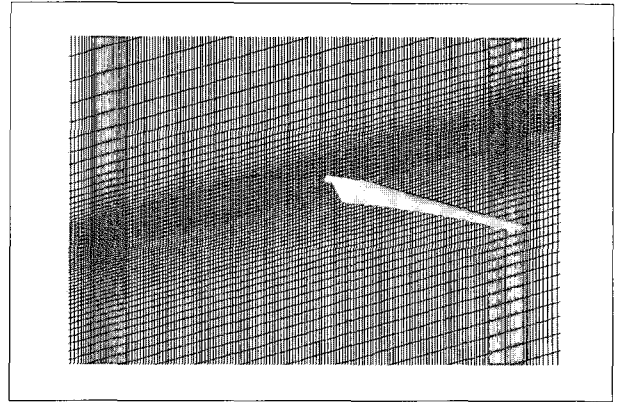


Fig. 3 NREL Phase VI wind turbine blade and periodic boundary

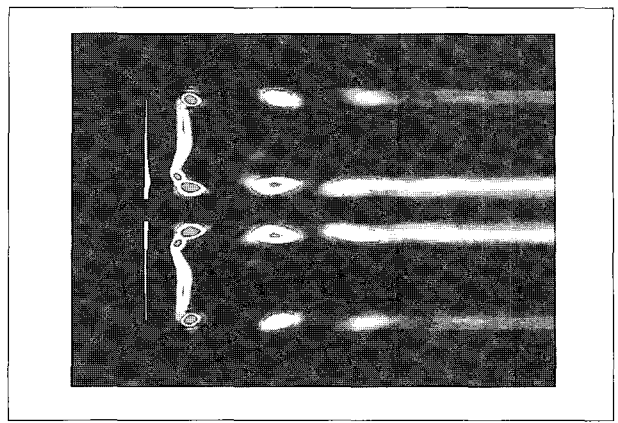


Fig. 4. Vortices convection from turbine blade at the periodic boundary.

어 가는 것을 관찰할 수 있다. 루트 부근에서 두개의 와류가 관찰되는 이유는 블레이드 어깨(shoulder)로 인하여 나타나는 현상이다. 와류의 세기는 받음각이 비교적 큰 루트에서 가장 강하며 이는 그림에서 확인이 가능하다.

유동해석 과정에서는 K-ε, K-ω, Spalart-Allmaras 등 다양한 난류모델과 여러 풍속 조건(6m/s~25m/s)에 대하여 해석을 수행하고 NREL Phase VI 풍동시험 결과와 가장 유사한 모델을 선정하여 축소효과 수치해석에 사용하였다.

### 4. 계산 결과 및 토론

위에 언급한 방법을 이용하여 먼저 여러 난류모델에 대한 유동해석을 수행하고 NREL Phase VI 결과와 비교하였다. 다음

으로 6m/s~25m/s 풍속조건에서 NREL 시험결과<sup>3)</sup>와 비교하였으며 최종적으로 여러 축소 모델에 대한 성능해석을 수행하였다. 계산에 사용한 풍력터빈의 피치각 및 요각 조건은 각각 3도와 0도로서 모두 동일하다.

### 4.1 난류모델 선택

풍력터빈의 유동장은 대부분 실속영역이나 이에 준하는 영역에서 운용되므로 천이점을 정확히 예측하고 실속 예측능력이 우수한 난류모델을 선택해야 한다. 본 연구에서는 k-ε, k-ω, Spalart-Allmaras 난류 모델 등 다양한 난류모델을 이용하여 유동을 해석하고 NREL 시험결과와 가장 유사한 모델을 선택하여 축소효과 해석에 활용하였다.

Fig. 5는 난류모델에 대한 축토크를 도시한 그림으로 풍속 10m/s에서 토크가 최대값에 이르고 이후의 풍속영역에서는 실속이 발생함을 확인할 수 있다. 10m/s 조건은 최대토크가 발생하고 실속이 시작되므로 일반적으로 예측하기가 매우 어렵다고 알려져 있다. 그림을 보면 k-ε 계열의 난류모델이 실험값과 가장 유사한 특성을 보였다. 반면 Spalart-Allmaras 모델이나 k-ω 모델의 경우 서로 유사하며 조기에 실속에 돌입하여 성능을 낮게 예측하였다. 계산결과 k-ε Realizable 모델이 가장 유사했으며 k-ε RNG 모델도 비교적 근접한 결과를 보였다. k-ε Realizable 모델은 기존의 k-ε 모델을 수정한 것으로 역압력 구배가 심하거나 유동박리가 있는 유동장의 해석에 적합하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 위의 결과를 바탕으로 k-ε Realizable 모델을 축소효과 해석에 이용하였다.

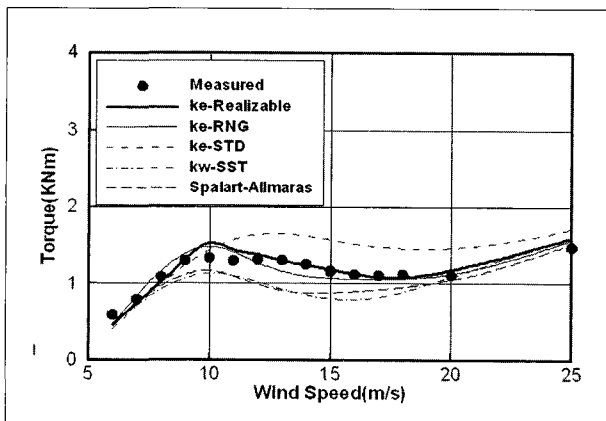


Fig 5. Shaft torque characteristics for various turbulence model.

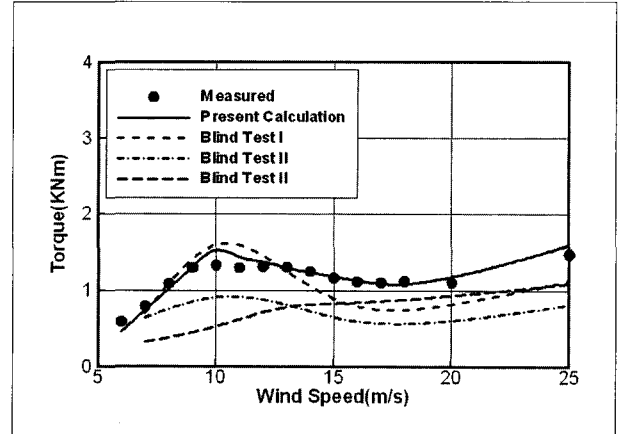


Fig 6. Shaft torque comparisons with blind test results.

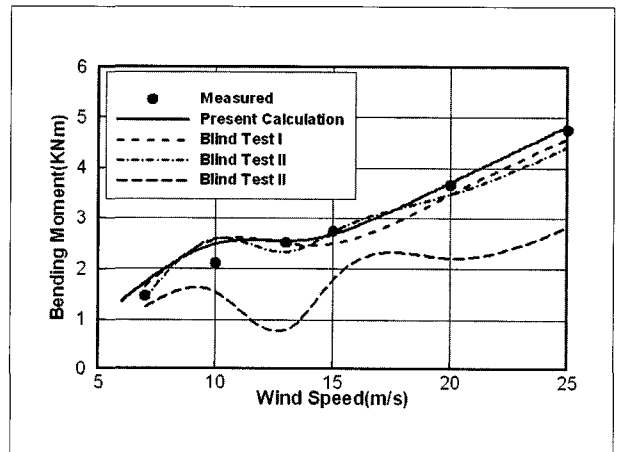


Fig 7. Bending moment comparisons with blind test results.

### 4.2 NREL Phase VI 해석결과 및 검증

Fig. 6와 Fig. 7은 NREL Phase VI 풍력터빈의 풍동시험결과 및 그 결과를 모른 채 각종 계산기법으로 예측한 Blind test 결과를 본 해석결과와 비교 도시한 그림이다. 타 연구기관의 결과에 비해 본 해석결과가 비교적 정확하게 시험치를 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 방법을 풍력터빈의 해석에 무리 없이 사용할 수 있음을 알 수 있다.

### 4.3 축소효과 수치해석

풍력터빈의 축소효과를 관찰하기 위하여 5%, 10% 20% 40% 그리고 60%의 NREL Phase VI 모델에 대한 해석을 수행하였다. 해석은 풍속 10m/s 조건에 대하여 수행하였으며 비교가 용이하도록 상대적인 파워계수 및 추력계수를 비교하였다. 또한, 헬리콥터 로터의 축소효과를 관찰하기 위하여 TRAM(Tilt-Rotor Aeroacoustic Model) 프로토타입을 선택 전진비행시 축소효과를 관찰하였다.<sup>7)</sup> 계산에 사용한 조건은 피치각 26도, 블레이드의 끝단 마하수 및 전진비는 각각 0.62와 0.35에 해당한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 풍력터빈의 축소효과를 도시한 그림으로 두 가지 계수에 대한 독특한 특성을 바로 확인할 수 있다. 그림을 보면 파워계수의 경우 모델의 축소에 민감하게 반응하나 추력은 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 특히 파워계수는 20% 까지는 선형적으로 파워계수가 감소하나 20% 이하의 모델에서는 급격하게 비선형적으로 감소하고 있어 이에 대한 보정이 쉽지 않음을 예측할 수 있다.

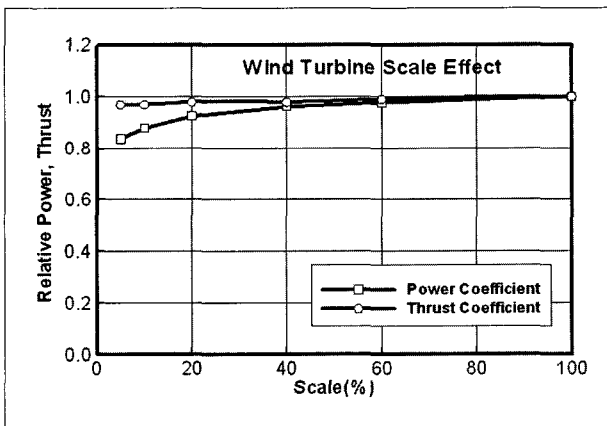


Fig. 8. Torque and thrust coefficient comparison for various model scales. (NREL Phase VI,  $V=10\text{m/s}$ ,  $\text{TSR}=3.74$ )

Fig. 9는 풍력터빈 단면에서의 공력계수를 개념적으로 도시한 그림으로 추력계수와 파워계수의 변화를 설명하고 있다. 그림을 보면 파워계수는 단면의 양력과 항력의 차에 비례하고 추력계수는 두 계수의 합에 비례한다. 따라서 양력이 감소하고 항력이 증가하는 축소모델의 경우 파워의 감소가 확연하게 나타나고 추력계수는 어느 정도 상쇄되므로 차이가 별로 없다.

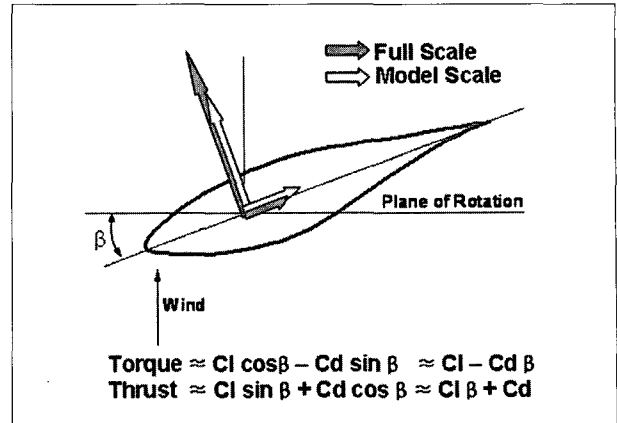


Fig. 9. Sectional torque and thrust comparisons for full and model scale wind turbine(Wind Turbine).

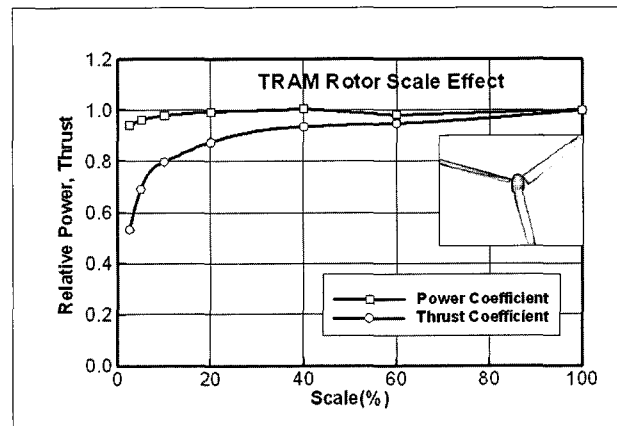


Fig. 10. Torque and thrust coefficient comparison for various model scales (TRAM pro-protor,  $M_{T0}=0.62$ ,  $V/(QR)=0.35$ )

따라서 축소효과 보정은 파워 즉 토크에 관하여 주로 이루어져도 무방하다고 볼 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 TRAM 프로토타입에 관한 축소효과를 도시한 그림으로 풍력터빈과 유사한 특성을 관찰할 수 있다. 그러나 풍력터빈과는 반대로 동력을 전달받아 추력을 발생하는 TRAM 프로토타입의 경우 축소에 따른 공력계수의 특성이 다르게 나타난다. Fig. 10을 보면 파워 계수는 큰 변화가 없으나 추력계수의 변화가 급격하게 발생함을 확인할 수 있다. 특히 풍력터빈과 달리 축소에 따른 추력계수 감소가 큰 이유는 블레이드의 수가 세 개이기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 따라서, 실제 일반적인 풍력터빈의 블레이드의 수가 세 개인 점을

감안하면 축소로 인한 파워감소는 블레이드가 두 개인 NREL Phase VI 풍력터빈보다 심하게 발생할 수도 있다. TRAM 로터 단면의 공력특성은 Fig. 11에 도시한 바와 같이 풍력터빈의 경우와 반대이다.

#### 4.4 풍속에 따른 축소효과

풍속에 따른 풍력터빈의 축소효과를 관찰하기 위하여 NREL Phase VI 풍력터빈에 대하여 자유류 속도 10m/s 그리고 25m/s에 대하여 해석을 수행하였다.

Fig. 12는 두 가지 풍속에 대하여 모델의 축소에 따른 파워계수를 도시한 그림으로 풍속이 클 경우 축소로 인한 파워감소 또한 더욱 크게 발생함을 볼 수 있다. 이는 아래의 Fig.13에서

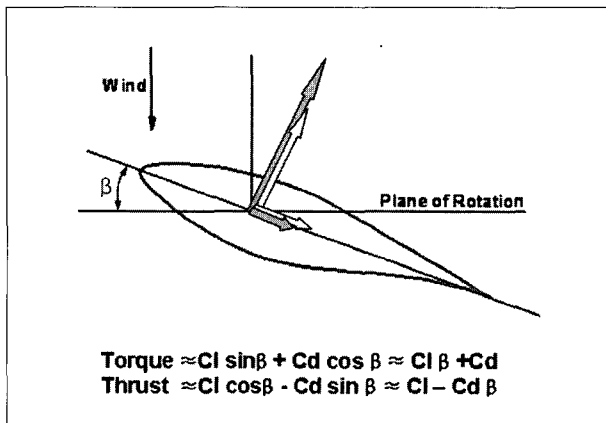


Fig 11. Sectional torque and thrust comparisons for full and model scale wind turbine(TRAM Prop-rotor).

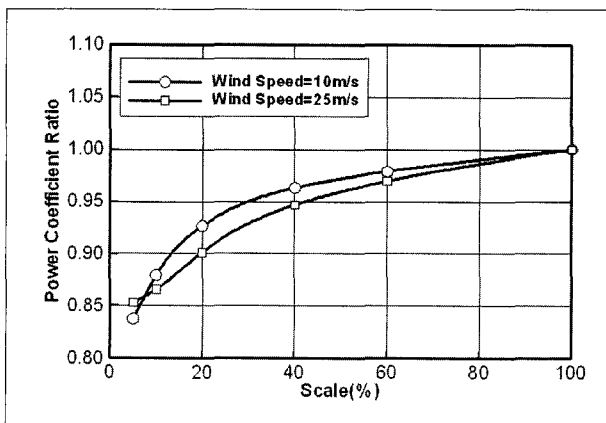


Fig 12. Wind turbine scale effects for 10m/s and 20m/s wind speed conditions.

보는 바와 같이 받음각이 커질수록 Reynolds 수에 따른 양력계수의 변화가 크기 때문에 발생한다. Fig. 13을 살펴보면 받음각 10도 이내의 선형영역에서 Reynolds수에 따른 양력계수의 변화는 큰 차이가 없으나 10도 이상의 영역에서는 Reynolds수에 따라 더욱 증가한다.

#### 4.5 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. 14은 NREL Phase VI 나셀, KARI에서 시험할 표준풍력터빈 모델(12% NREL Phase VI) 형상에 대한 나셀, 그리고 최대용량의 모터를 장착한다고 가정하였을 때의 나셀을 상대적으로 도시한 그림으로 각각 지름대비 폭은 약 9%, 15%, 21%에 해당한다. 이 중 9%와 21% 나셀에 대한 해석결과는 Table 1에 나타난 바와 같으며 토크는 각각에 나셀에 대하여 2% 미만의 감소효과를 보여 21% 정도의 나셀의 크기에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

따라서, 항우연에서 풍동시험을 수행할 15% 정도의 나셀이

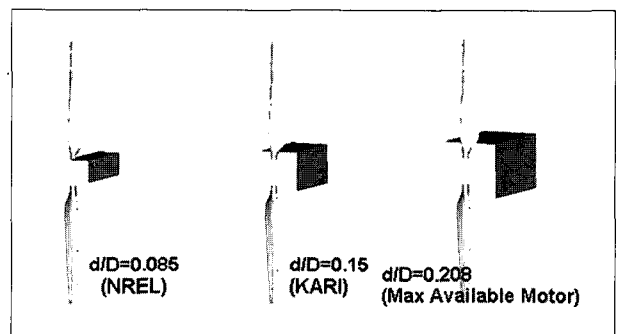


Fig 14. NREL Phase VI full scale nacelle and model scale nacelle for 12% model.

Table 1 Shaft torque variations for various nacelle sizes.

Model Size	Nacelle Size (d/D)	Shaft Torque (Newton)	Relative Shaft Torque (%)	Variation (%)
Full Scale (D=10m)	No Nacelle	1,434	100.0	-
	0.085	1,433	99.9	-0.07
	0.208	1,416	98.7	1.26
Model Scale (D=1.2m)	No Nacelle	2,36	100.0	-
	0.085	2,36	100.0	-0.08
	0.208	2,32	98.4	1.61

면 1% 미만의 토크변화를 보일 것으로 예상되므로 표준풍력터빈 시험장치에 충분히 이용 가능하다.

### 4.6 축소효과 보정

해석결과를 바탕으로 3가지 조건에 대한 축소효과 보정을 시도하였다. 보정방법은 앞서 언급한 바 있는 블레이드 단면 확장법을 이용하였다. 이 경우 반경은 유지하고 단면의 코드방향과 두께방향 길이를 확장한다. 보정은 먼저 Fig. 15에 도시한 바와 같이 실속 이전 9m/s 조건(1)과 실속이 시작되는 10m/s 조건(2)에서 파워계수가 동일하도록 하였다. 다음으로 속도에 관계없이 최대 토크값이 서로 일치(3)하도록 보정하였다.

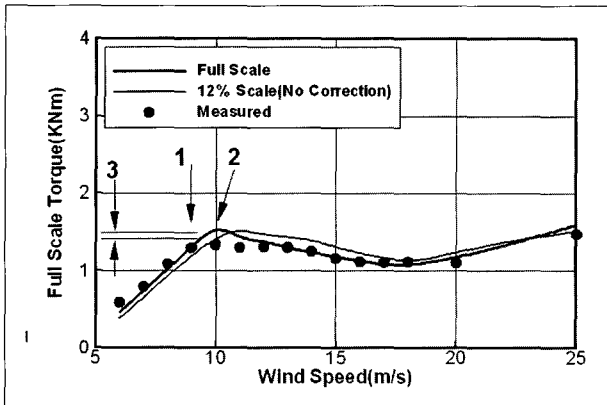


Fig 15. NREL Phase VI full scale nacelle and model scale nacelle for 12% model.

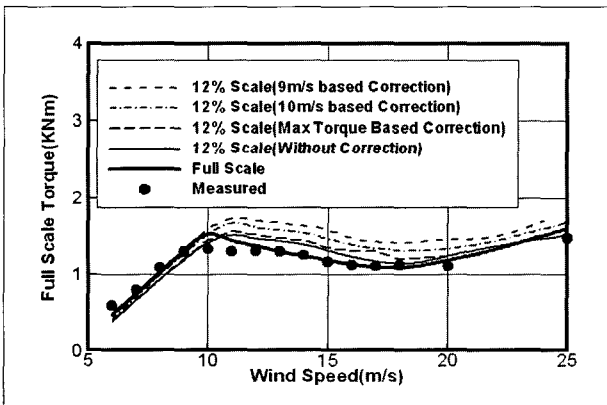


Fig 16. NREL Phase VI full scale nacelle and model scale nacelle for 12% model.

보정을 위한 단면길이 확장비는 모델 풍력터빈의 단면을 5%, 10% 그리고 15% 확장하여 실제 크기의 풍력터빈과 동일한 파워계수가 나오는 확장비를 내삽하여 결정하였다. 본 연구의 경우 위의 세 조건에 대하여 해석한 결과 14%, 8.5% 그리고 3%의 단면을 확장하면 실제 풍력터빈과 동일한 파워계수를 유지할 수 있었다.

Fig. 16은 세 가지 보정방법으로 보정한 후 풍속에 따른 토크를 도시한 그림으로 10m/s 이전의 선형영역에는 비교적 보정이 이루어지나 10m/s 이상의 실속영역에서는 보정이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 이 영역에서 보정이 난해한 이유는 최대 토크의 발생지점 즉 실속이 발생하는 지점이 다르기 때문에 나타나는 현상으로 정확한 보정을 위해서는 토크계수와 더불어 실제 풍력터빈과 실속이 발생하는 유속을 조절할 수 있어야 한다. 그러나 최근의 대형 풍력터빈은 실속제어(stall regulation) 방식보다 피치제어(pitch control) 방식을 선호하므로 실속이전 영역의 보정과 이를 이용한 풍동시험의 이용 가능성은 높다고 볼 수 있다.

### 5. 표준풍력터빈 풍동시험 계획

항우연에서는 2006년과 2007년 표준풍력터빈의 풍동시험을 계획하고 있다. 표준 풍력터빈은 본 연구에서 선정한 NREL Phase VI 풍력터빈과 동일한 형상이고 크기는 12%에 해당한다(Fig. 17).

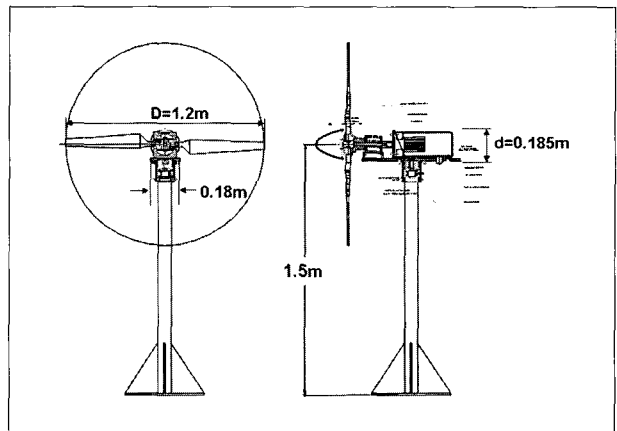


Fig 17. KARI standard wind turbine test rig (12% scale of NREL Phase VI Wind Turbine).

Table 2 Comparisons of NREL and KARI wind tunnel tests

	NREL Phase IV	KARI
Blade (Diameter=D)	2(10m)	2(1.2m)
Nacelle Width(d)	0.85m	0.185m
d/D	0.085	0.150
Velocity Measurement	5-hole@5-Span (34,51,67,84,91%)	-
Blade Pressure	pressure hole & p-ducer	-
Region of Interest	Post Stall	Validation/ Scale Effect
Bending Moment	Pressure Integration	Strain gauge
Win Tunnel	NASA Ames 25m x 37m(8.8%)	KARI 4m x 3m(9.5%)
RPM( $M_{tip}$ )	72rpm(0.11)	600rpm(0.11)
Wind Speed (TSR, $\lambda$ )	6m/s~25m/s (6.2~1.5)	6m/s~25m/s (6.2~1.5)
Transition	Clean Blades	Clean Blades, Tripped Blades, Extended Blades

Table 2에서는 NREL Phase VI 풍력터빈의 풍동시험과 항우연 풍력터빈의 풍동시험을 간략하게 비교 설명하였다. 표를 보면 NREL의 경우 실속 이후의 특성이 주 목적이었으나 항우연의 경우 풍력터빈 풍동시험의 검증과 축소효과 보정에 관한 연구가 주로 계획되어 있다. 본 연구에서 도출한 결과는 향후 표준풍력터빈 시험결과를 이용하여 검증할 계획이며 동시에 축소효과를 보정할 수 있는 새로운 기법에 관한 연구도 지속적으로 수행할 예정이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 풍력터빈의 축소효과를 해석하였다. 해석도구로는 FLUENT를 사용하였으며 k- $\epsilon$  난류모델이 가장 시험값과 유사한 결과를 보였다.

모델을 축소할 경우 토크 계수는 민감하게 반응하였으나 추력계수는 변화가 거의 없었다. 또한, 풍속에 따른 축소효과를 관찰한 결과 풍속이 빠를 경우 보다 큰 축소효과를 보였다.

나셀로 인한 영향은 해석결과 크기가 지름의 20%인 경우에 대하여 토크 변화 2% 이내로 무시할만한 변화를 보여 항우연 표준풍력터빈 시험장치의 나셀이 충분히 이용 가능성을 확인할 수 있었다.

최종적으로 단면 길이 확장법을 이용하여 축소효과 보정을 시도하였다. 이 결과 실속 이전의 선형영역에서는 보정효과를

볼 수 있었으나 실속이후에서는 보정효과를 볼 수 없었다. 이는 실제의 풍력터빈과 동일한 유속에서 실속이 발생하지 않기 때문에 나타나는 결과로 이를 보정하기 위해서는 실속발생을 제어할 수 있는 보정방법이 필요하다. 그러나 최근의 대형 풍력터빈은 피치제어 방식을 사용하므로 실속 이전의 선형 구간 내 보정을 통한 풍동시험 방법도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

본 연구 결과는 향후 항우연 표준풍력터빈 풍동시험을 통해 검증될 예정이며 축소효과 및 보정기법에 관한 연구 또한 지속적으로 진행될 예정이다.

## References

- (1) "European Wind Energy at the Dawn of the 21st Century", 2005, ER 21351.
- (2) 장병희, 2005, "미국과 유럽의 풍력터빈 풍동시험", 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 52<sup>nd</sup> Forum.
- (6) 박영민, 윤성준, 장병희, 2005, "NREL Phase VI 풍력터빈의 축소효과 수치해석", 한국항공우주학회 추계학술대회.
- (7) Johnson, W., 2001, "Calculation of the Aerodynamic Behavior of the Tilt Rotor Aeroacoustic Model (TRAM) in the DNW", Proceedings of the 57<sup>th</sup> Annual Forum of the American Helicopter Society.



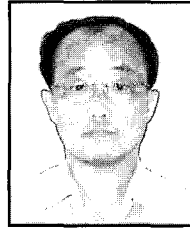
**박영민**



1995년 인하대학교 항공우주공학과 공학사  
1997년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학석사  
2003년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학박사

현재 한국항공우주연구원 공력성능그룹 선임연구원  
(E-mail ; ympark@kari.re.kr)

**장병희**



1984년 서울대학교 항공우주공학과 공학사  
1986년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학석사  
1996년 한국과학기술원 항공우주공학과 공학박사

현재 한국항공우주연구원 공력성능그룹 그룹장  
(E-mail ; cbh@kari.re.kr)