

NREL Phase VI 풍력터빈의 축소효과 보정

박 영민¹⁾, 장 병희²⁾

Scale Effect Correction for NREL Phase VI Wind Turbine

Young Min Park, Byeong Hee Chang

Key words : Scale Effect(축소효과), Correction(보정), NREL Phase VI(NREL Phase VI)

Abstract : The present paper describes the scale effect correction method for wind turbine by using CFD(computational fluid dynamics). For the corrections of wind turbine scale effect, various researches on the helicopter rotor scale effect were investigated and feasibility study of methods was performed to correct wind turbine scale effect. The present paper also introduces new scale effect correction method based on two dimensional lift slope modification. In order to test the present method, performance analyses of NREL Phase VI wind turbines under various scale conditions were carried out by using CFD. The present method showed reasonable results when applied to NREL Phase VI wind turbine.

1. 서론

비교적 축소비가 크지 않은 헬리콥터와는 달리 축소비가 큰 풍력터빈의 경우 풍동시험 결과를 이용한 성능해석에 많은 어려움이 있다. 이러한 특성은 축소효과 때문에 나타나는 현상으로 축소비가 클수록 실제 모델과 더욱 큰 차이를 보이게 된다[1,2]. 그러나 현재까지 풍력터빈에 대한 축소효과 보정관련 연구는 거의 없고 헬리콥터 로터의 축소효과 보정에 관한 연구는 일부 수행된 바 있다.

헬리콥터 로터의 경우 축소효과 보정방법의 대표적인 예로 단면확장법을 들 수 있다[3]. 이 방법은 양력저하로 인한 로터의 성능저하를 보상하기 위하여 코드를 확장하는 방법으로 2차원 익형의 풍동시험을 통해 최고 양력계수와 양력계수 기울기 감소분의 평균값을 이용하여 단면을 확장한다.

물리적인 형상보정 방법 외에 Reynolds 수의 변화에 따른 공력계수 변화특성을 이용한 방법을 들 수 있다[4,5]. 이 방법은 로터의 축소모델 시험을 수행한 뒤 산술적인 처리를 통해 보정하므로 형상변화로 인한 성능오차 가능성을 배제할 수 있다.

본 논문에서는 헬리콥터 로터시험 보정방법에

대하여 먼저 조사하고 풍력터빈으로의 적용가능성을 살펴보았다. 또한, 헬리콥터 로터와는 다른 풍력터빈에 적합한 축소효과 보정방법을 살펴 보았다. 축소효과 보정에 사용된 풍력터빈은 본 저자가 이미 해석한 바 있는 NREL Phase VI를 이용하였다. 축소효과를 관찰하기 위해 6%에서 1,600%까지의 가상적인 축소모델에 대한 해석을 수행하고 본 논문에서 제시하는 보정기법을 적용하여 보았다.

2. 헬리콥터 로터 축소효과 보정

2.1 단면확장법

단면확장법[3]은 모델 축소로 인한 양력감소분을 단면의 확장을 통해 보상하는 방법으로 보통 2차원 익형의 풍동시험 결과를 이용한다.

문헌의 경우 약 12% 정도의 단면을 확장하였으며 그림 2는 단면확장법을 통해 보정한 결과를 보이고 있다.

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

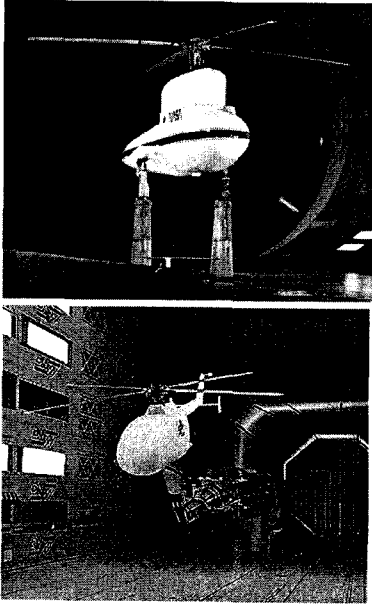


그림 1. BO-105 로터의 40% 축소모델(DNW) 및 full scale(NASA) 풍동시험[3].

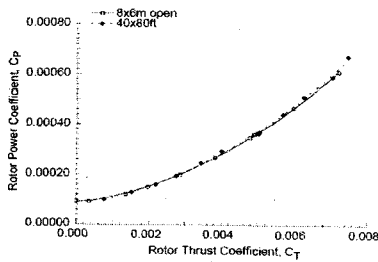


그림 2. 단면확장법을 이용한 BO-105 로터의 축소효과 보정결과[3].

문헌의 경우 40% 모델과 full scale 모델의 성능을 비교하였으며 보정 결과 거의 동일한 성능곡선을 보이고 있다. 그러나 문헌에서 이미 설명한 바와 같이 25% 이상의 축소모델은 full scale 시험결과와 비교하여 큰 차이를 보이지 않는다[1,2]. 따라서 보정하지 않은 결과를 위의 그림에 도시한다고 하면 위의 결과와 큰 차이를 보이지 않을 것으로 예상할 수 있다. 위의 방법을 풍력터빈에 적용할 경우 2차원 익형시험을 수행하고 결과를 동일하게 적용할 수 있다. 그러나 실속저전 현상이 강하게 나타나는 풍력터빈을 위와 동일하게 기준을 적용하기에는 무리가 있다.

2.2 공력계수보정법

이 방법[4,5]은 로터의 축소모델을 그대로 이용하고 결과를 수학적인 방법으로 보정하는 방법이다. 이 방법은 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. 참고문헌[4]에서 사용한 방법은 아래와 같다.

$$CT_{fullscale} = K CT_{model}$$

$$CP_{fullscale} = 1/K CP_{model}$$

$$K = (Re_{fullscale}/Re_{model})^{(1/5)}$$

참고문헌의 경우 16% S-76 헬리콥터 로터 블레이드를 이용하였으며 동일한 모델을 세 가지 시험장치를 이용하여 시험을 수행하였다. 이러한 보정방법은 2차원 익형의 해석을 통한 결과에 근거한다.

그림 3은 풍동시험 후 성능해석 결과와 Reynolds수를 이용하여 보정한 결과를 도시한 그림으로 full scale 시험과 다소 차이가 있음을 확인할 수 있다.

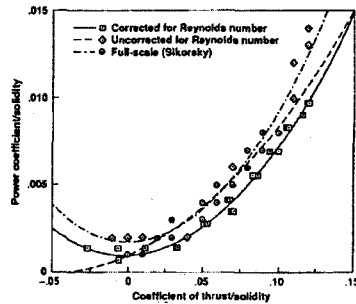
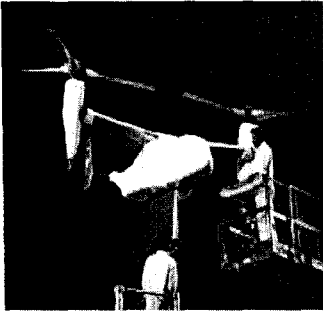


그림 3. 공력계수 보정법을 통한 성능보정[4].

이 방법은 단순하여 사용하기는 편리하지만 축소비가 클 경우 보정계수를 과다하게 예측하는 단점이 있다. 예를 들면 12% 모델의 경우 추력 및 파워를 50% 가까이 보정해야 하며 이는 본 논문에서 예측하는 풍력터빈의 축소효과와 거리가 멀다.

최근 좀더 현실적인 보정 방법이 V-22 틸트로터기의 개발과정에서 시도된 바 있다. 이 시험은 그림 4에서 나타난 바와 같이 NASA에서 수행되었다. 시험에 사용된 로터블레이드는 TRAM(Tilt Rotor Aeroacoustic Model)으로 다양한 축소비에 대한 시험이 존재하며 다수의 관련 논문이 공개되어 있다. V-22 프롭로터는 TRAM, FSTRAM, JVX

등 다양한 scale의 형상이 있으며 이는 아래의 표 1에 나타내었다.



FS TRAM Engineers Examining The Model

그림 4. NASA Ames 풍동에 장착된 FSTRAM(Full Span Tiltrotor Aeroacoustic Model)[5].

표 1. V-22 프롭로터의 축소모델 시험 사례[5].

| Rotor | R | σ | V_{tip} | Re ($\times 10^6$) | CP_o iCP_a |
|----------|-------|----------|-----------|---------------------------|-------------------|
| V-22 | 19.03 | 0.105 | 790 | 7.885 | 1.0 |
| FS TRAM | 4.75 | 0.105 | 705 | 1.756 | 0.7406 |
| TRAM DNW | 4.75 | 0.105 | 705 | 1.756 | 0.7406 |
| JVX OARF | 12.5 | 0.1138 | 760 | 5.400 | 0.8554 |
| BHTI | 2.85 | 0.105 | 789.5 | 1.180 | 0.6840 |
| BVWT | 2.85 | 0.1138 | 789.5 | 1.279 | 0.6413 |

사용한 방법은 아래의 수식에 나타낸 바와 같으며 참고문헌[4]과 비교하여 기본적인 개념은 동일하나 다른 특징으로는 파워계수의 최소값을 이용하여 보정한다는 점을 들 수 있다.

$$\frac{CP_{full}}{CP_{model}} = (Re_{full}/Re_{model})^{1/5}$$

$$CP_{corrected} = CP - CP_o \left(1 - \frac{CP_{corrected}}{CP_o}\right)$$

$$\Delta CP = -CP_o \left(1 - CP_{full}/CP_{model}\right)$$

위의 식에서 CP는 파워계수 그리고 CP_o 는 minimum estimated profile 파워계수를 의미한다. 위의 경우 파워계수의 최소값을 이용하므로 과도하게 보정계수를 예측하는 단점은 없다. 또한 보정계수를 파워계수에만 적용하므로 단순히 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 풍력터빈의 경우 minimum 파워계수의 개념이 없기 때문에 직접 적용하기는 어렵다.

그림 5는 다양한 scale의 풍력터빈에 대하여 작용한 결과로 비교적 유사한 성능곡선을 보인다. 그러나 약간의 차이를 보이는 것은 추력계수를 보정하지 않았기 때문에 나타나는 현상으로 보인다.

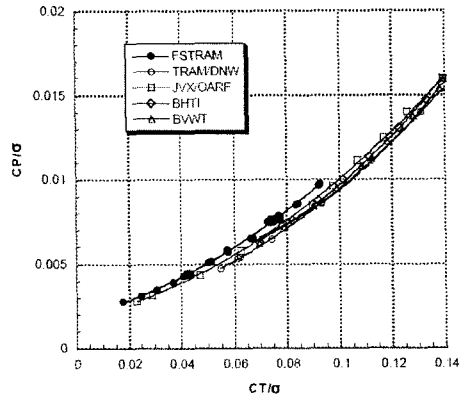


그림 5. V-22 프롭로터의 축소효과 보정[5].

3. NREL Phase VI 축소효과 보정

2장까지는 헬리콥터 로터에 대한 축소효과 보정 예를 설명하고 적용 가능성을 살펴보았다. 그러나 풍력터빈에 직접 적용 가능한 방법이 없으므로 BEM을 이용한 단순한 보정방법을 설명하고자한다. 일반적으로 full scale 과 모델 scale의 단면에서의 토크는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$q_{\infty} (CL_{full} \sin(\alpha) - CD_{full} \cos(\alpha)) = q_{\infty} (CL_{model} \sin(\alpha) - CD_{model} \cos(\alpha))$$

위의 식에서 유효받음각 α 가 충분히 크다는 가정 하에 동일한 항을 제거하면 아래와 같이 간단히 표현할 수 있고 양력계수를 양력계수 기울기와 받음각의 함수로 단순하게 표현하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{full}^2 CL_{full} = V_{model}^2 CL_{model}$$

$$V_{full}^2 a_{full} = V_{model}^2 a_{model}$$

이 때 full scale 조건과 동일한 토크를 발생하기 위해서는 model scale의 경우 TSR을 유지하면서 풍속을 증가시키면 가능하다. 이 때 속도보정계수 K를 이용하여 Full scale 풍속으로 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{full}^2 a_{full} = K^2 V_{full}^2 a_{model}$$

$$K = \sqrt{a_{full}/a_{model}}$$

위의 식에서 보면 model scale이 full scale 과 동일한 토크를 발생하기 위해서는 양력계수 기울기의 비만큼 속도장을 곱하면 가능하다는 것을 알 수 있다. 실제 위의 방법을 적용하기 위하여 12%에서 1,600%의 가상적인 NREL Phase VI 풍

력터빈에 대하여 보정 방법을 적용하여 보았다. 그림 6은 보정 이전 축토크를 비교한 그림으로 풍속에 따라 기울기의 변화를 관찰할 수 있다. 그러나 최대 토크값은 크게 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이 부분은 본 해석방법에서 사용한 난류 모델이 실속을 정확하게 예측하지 못해서 나타날 수 있는 현상으로 추후 실험을 통한 확인이 필요하다.

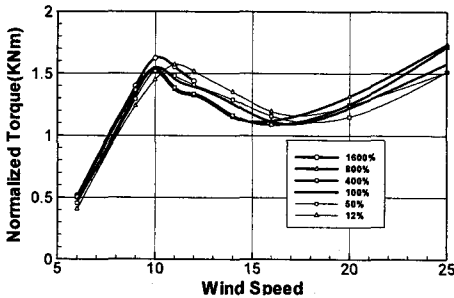


그림 6. Scale변화에 따른 상대토크 비교.
(Without correction)

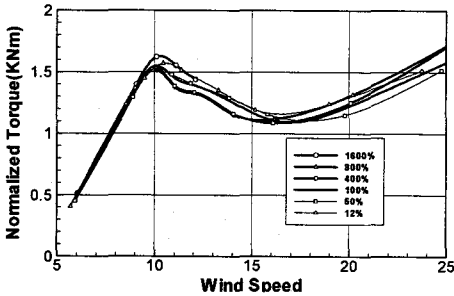


그림 7. Scale변화에 따른 상대토크 비교.
(With correction)

그림 7은 본 논문에서 소개한 방법을 이용하여 보정한 방법으로 위의 식을 이용하여 속도보정상수 K를 구하였다. 위에서 1,600% 모델의 경우 K값은 1.01정도였으며 12% 모델의 경우 약 0.95정도이다. 보정에 사용한 2차원 양력계수 기울기는 75% 지점의 조건을 이용 별도의 2차원 계산을 수행하여 구하였다. 보정한 결과 10m/s 이전 선형영역에서는 보정이 정확하게 이루어짐을 확인할 수 있다. 그러나 10m/s 이후 실속영역은 다소 형상은 다르지만 경향성은 매우 유사하다. 현재까지는 CFD를 이용한 검증이었으나 보다 정확한 검증을 위해서는 풍동시험을 통한 검증이 병행되어야 할 것으로 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 헬리콥터 로터에 대한 축소효과 보정방법을 조사하고 풍력터빈에의 적용 가능성을 살펴보았다. 조사 결과 헬리콥터 로터의 축소효과 보정방법은 실제 풍력터빈에 적용하기에 무리가 따름을 알 수 있었다. 이에 본 논문에서는 단순한 BEM 개념을 이용한 보정방법을 소개하였으며 이를 가상의 NREL Phase VI Scale 모델에 적용하여 보았다. 본 논문에서 제시한 보정방법을 적용한 결과 선형영역과 최대 토크지점 등 실제 scale 결과와 매우 유사한 결과를 보였다. 그러나 6% 이내의 축소비율에서는 다른 결과를 보여 저 Reynolds 영역에 대한 다른 접근 방법이 필요함을 알 수 있었다. 한국항공우주연구원에서는 현재 12% NREL Phase VI 풍력터빈 풍동시험을 진행 중에 있으며 본 방법을 검증할 예정이다.

References

- [1]박영민, 장병희, 2006, "전산유체역학을 이용한 풍력터빈 축소효과 수치해석," 한국신.재생에너지학회 추계학술대회.
- [2]박영민, 장병희, 2006, "스케일변화에 따른 NREL Phase VI 풍력터빈의 성능해석," 한국전산유체공학회 추계학술대회.
- [3]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.
- [4]Kitaplioglu, C., 1990, "Analysis of Small-Scale Rotor Hover Performance Data," NASA TM 102271.
- [5] McCluer, M. S., and Johnson, J. L., 2002, "Full-Span Tiltrotor Aeroacoustic Model (FSTRAM) Overview and Initial Testing," American Helicopter Society Forum, 2002