

다수의 익형이 적용된 풍력터빈 블레이드에 대한 축소효과 보상기법

조 태환¹⁾, 김 철원²⁾

Scaled effect correction method for the wind turbine blade with multi airfoils

Abstract : 풍력터빈 블레이드 풍동시험의 경우 사용가능한 시험설비의 크기제한으로 인해 축소모델 사용이 불가피하며, 이로 인해 풍동시험에서는 실물 블레이드에 비해 10% 미만의 낮은 Re수에서 시험이 수행된다. 축소모델 블레이드 풍동시험 결과를 활용하여 실물 블레이드의 성능(토크)을 추정하기 위한 축소효과 보정기법을 2008년 제시하였으며, NREL Phase VI 모델 시험결과에 적용하였다. 당시 제시된 보정기법은 단일익형을 전체 블레이드에 사용한 사례이며 축소효과 보정을 위해 Re수에 따른 익형의 양력계수 변화만을 적용하였다. 본 논문에서는 당시 제안된 축소효과 보정기법을 익형의 양력계수 및 항력계수를 포함한 형태로 수정하였으며, 블레이드에 다수의 익형이 사용되었을 경우에 대해 확장하였다. NREL Phase VI 12% 시험모델의 경우 익형의 양력계수 기울기에 의한 보정량은 약 15% 정도이며, 항력계수 변화에 의한 보정량은 약 5% 정도로 나타났다. 블레이드에 다수의 익형이 사용되었을 경우 설계 또는 전산해석을 통해 구한 반경별 토크 함수를 적용하여 블레이드 축소효과를 보정할 수 있다.

Key words : Wind Tunnel Test(풍동시험), Wind Turbine(풍력터빈), Scaled effect(축소효과)

Nomenclature

V_{wind} : wind speed, m/s
V_{rot} : rotational speed, m/s

subscrip

KARI LSWT : KARI Low Speed Wind Tunnel
NREL : National Renewable Energy Laboratory

1. 서론

풍력터빈의 성능을 결정하는 주요한 요소인 블레이드의 공기역학적 특성은 수치전산해석 부분에서는 활발히 연구되고 있으나, 실험 부분에서는 2차원 익형 등에 대해서만 집중되고 있다. 풍력터빈이 대형화하는 추세에서 실제 풍력터빈을 실험할 수 있는 시험설비가 매우 희귀하며, 일반적인 풍동시험 기법인 축소모델풍동시험의 경우 시험의 효용성에 대해 많은 논란이 있다. 한국항공우주연구원 중형아음속풍동(이하 KARI LSWT)에서는 풍력터빈을 포함한 회전체 풍동시험설비 및 기법을 확보하기 위한 연구가 수행되었다. NREL Phase VI 12% 시험모델을 사용하여 실물

모델과 풍동시험 모델의 토크를 비교하였으며, 축소모델 풍동시험에서 나타나는 Re수 감소에 의한 축소효과를 보정하기 위한 방법을 제안하여 시험결과에 적용하였다[5]. 당시 제안된 축소효과 보정기법은 전산해석을 통해 Re수에 의한 익형의 양력계수 변화를 구한 후, 이를 시험결과에 반영하는 기법이었다. 또한, 시험에 사용된 모델이 동일한 익형(S809)을 사용한 모델이었으므로, 단일 익형이 적용된 블레이드에 대한 축소효과 보정기법을 제안하였다. 현재, 상용화되어 사용되고 있는 풍력터빈 블레이드의 경우 최적의 성능을 위해 4~5개의 익형을 사용하고 있으므로 다수의 익형이 적용된 블레이드에 적용하기 위해 당시 제안된 축소효과 보정기법을 확장하였다.

2. 축소효과 보정기법 : 단일 익형

풍력터빈 블레이드의 공기역학적인 성능은 블레이드에서 발생하는 토크로 결정되며, 블레이드

1) 한국항공우주연구원 공력구조팀
E-mail : thcho@kari.re.kr
Tel : (042)860-2628 Fax : (042)860-2604
2) 한국항공우주연구원 공력구조팀
E-mail : cwkim@kari.re.kr
Tel : (042)860-2691 Fax : (042)860-2604

에서 발생하는 토크는 블레이드 익형에서 발생하는 익형토크의 합으로 나타내어진다. 그림 1에서 θ 는 블레이드 twist각을 의미하며, α 는 유효받음각을 의미한다.

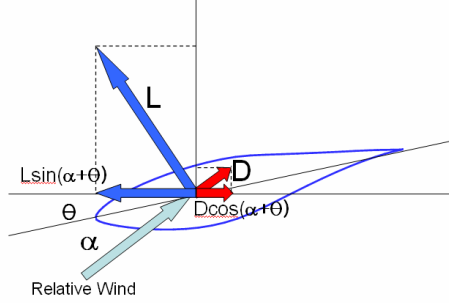


Fig. 1 Aerodynamic force for airfoil

$$\tau = \sum_i \tau_i = \sum_i (L \sin(\alpha + \theta) - D \cos(\alpha + \theta))_r \times r \quad (1)$$

블레이드의 토크계수(C_τ)를 익형의 양력계수 및 항력계수로 나타내면 식 (2)와 같다. 식에서 V_t 는 익형에 작용하는 전체풍속을 의미하며, V_w 는 외부 풍속을 의미한다.

$$C_\tau = \sum_i \frac{V_t^2}{V_w^2} \frac{\Delta A_r}{A_0} [C_l \sin(\theta + \alpha) - C_d \cos(\theta + \alpha)]_r \frac{r}{R} \quad (2)$$

풍동시험에서 축소모델을 사용할 경우 Re수 감소에 의해 익형에서 발생하는 양력 및 항력은 실물모델과 다른 값을 가지게 된다. Re수에 따른 익형의 양력계수 및 항력계수는 익형 풍동시험 또는 전산해석 결과를 사용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 익형 해석 및 설계에 많이 사용되고 있는 Xfoil을 사용하여 Re수에 따른 익형의 공력특성을 파악하였다. 참고문헌 [5]에 나타난 것과 같이 축소모델 풍동시험에서 블레이드 익형 코드 10% 지점에 turbulence dot를 부착하였으므로 축소모델 익형 공력해석은 익형표면흐름의 난류강도를 0.56%(Xfoil, N=4)로 증가시킨 상태에서 해석을 수행하였으며, 실물모델 익형은 난류강도 0.07%(Xfoil, N=9) 조건에서 해석을 수행하였다(그림 2).

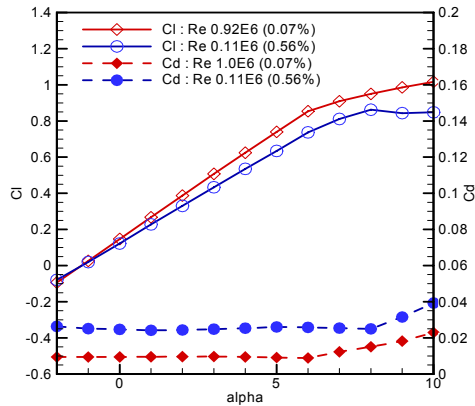


Fig. 2 Aerodynamic characteristics of S809 airfoil by Xfoil

익형 전산해석결과를 사용하여 모델 축소에 따른 양력계수변화 및 항력계수 변화를 식 (3)과 같이 추정하여 식 (2)를 정리하면 식 (4)과 같이 축소모델과 실물모델 블레이드의 상관관계를 구할 수 있다.

$$C_{l,full} \approx a_1 \times C_{l,model} + a_0 \approx 1.15 C_{l,model} + 0.006 \quad (3)$$

$$a_1 \times C_{d,full} - C_{d,model} \approx b_0 \approx 0.02$$

$$C_{\tau,full} = T_1 + T_2 + T_3$$

$$T_1 = \sum_i \frac{V_t^2}{V_w^2} \frac{\Delta A_r}{A_0} a_1 [C_{l,model} \sin(\theta + \alpha) - C_{d,model} \cos(\theta + \alpha)]_r \frac{r}{R}$$

$$= a_1 C_{\tau,model}$$

$$T_2 = a_0 \sum_i \frac{V_t^2}{V_w^2} \frac{\Delta A_r}{A_0} \sin(\theta + \alpha) \frac{r}{R}$$

$$T_3 = b_0 \sum_i \frac{V_t^2}{V_w^2} \frac{\Delta A_r}{A_0} \cos(\theta + \alpha) \frac{r}{R} \quad (4)$$

식 (4)에서 T1은 축소모델 블레이드 풍동시험에서 측정되는 토크값의 함수이며, T2 및 T3는 블레이드의 기하학적인 형상에 의해 결정되는 값이다. 블레이드 반경방향으로 5% 간격으로 단면을 구성하고, 익형단면에서 발생하는 유도속도상수는 전체 블레이드 단면에서 1/3로 일정하고 가정하여 T2 및 T3를 계산하면 식 (5)와 같이 블레이드 축소모델과 실물모델의 토크상관관계를 구할 수 있다.

$$C_{\tau,full} = 1.15 \times C_{\tau,model} + 0.10 \quad (5)$$

축소효과 보정식을 12% 축소모델 풍동시험에 적용한 결과는 그림 3과 같이 실물모델 시험결과와 최대토크 발생속도, 풍속에 대한 토크의 기울기 및 최대 토크값이 일치하고 있다.

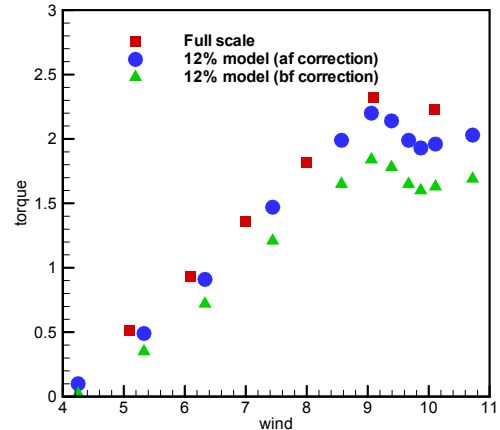


Fig. 3 Scale effect correction results for 12% scaled model of NREL Phase VI W/T

식 (4)에서 T2 및 T3항을 계산하기 위해 유도속도상수(a)가 블레이드 반경방향으로 일정한 값 1/3을 갖는다는 가정을 사용하였으며, Xfoil을 사용하여 익형의 공력계수를 계산할 때 표면흐름의 난류강도를 0.56%로 가정하였다. 이와 같은 가정이 보정량에 미치는 영향을 파악하기 위해,

유도속도를 0.2 ~ 0.4로 변경하였을 때와 표면흐름의 난류강도를 0.37% ~ 0.56%로 변경하였을 때 식 (5) 상수항을 계산하였다. 유도속도와 표면흐름의 난류강도가 보정량에 미치는 영향은 0.01 (최대토크의 0.5%) 미만으로 나타났다.

3. 축소효과 보정기법 : 다수의 익형

현재, 운영되고 있는 대부분의 풍력터빈 블레이드는 4~5개의 익형을 사용하고 있으므로, 축소모델 풍동시험을 사용하여 실물 블레이드의 성능을 추정하기 위해 '2' 장에서 제안된 방법을 다수의 익형에 대해 확장하였다. 그림 4와 같이 블레이드가 K개의 익형으로 구성된 경우, 각 익형이 적용된 구역의 시작반경을 r_k 로 나타내었다. 블레이드 전체반경(R)을 동일한 간격을 갖는 N0개의 단면으로 구성하여 k 익형이 적용된 구역에는 N_k개의 단면이 존재하도록 구성하였다.

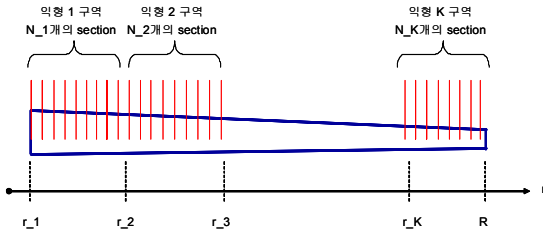


Fig. 4 Blade with many airfoils

블레이드에서 발생하는 토크(C_r)는 각 익형이 적용된 구역(k)에서 발생하는 토크($C_{r,k}$)의 합으로 나타낼 수 있으며, 각 익형구역에서는 동일한 익형이 사용되었으므로 앞장의 접근법을 사용할 수 있다. 익형구역 k에서 익형의 양력계수와 항력계수의 관계를 식 (6)과 같이 가정하면, 식 (7)과 같이 실물모델과 축소모델의 토크 상관관계를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{l,full,k} &\approx a_{1,k} \times C_{l,model,k} + a_{0,k} \\ a_{1,k} \times C_{d,full,k} - C_{d,model,k} &\approx b_{0,k} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C_{r,full} &= \sum_k C_{r,full,k} = T_1 + T_2 + T_3 \\ T_1 &= \sum_k a_{1,k} \frac{V_t^2}{V_w^2} \frac{\Delta A_r}{A_0} [C_{l,model,k} \sin(\theta + \alpha) - C_{d,model,k} \cos(\theta + \alpha)]_r \\ T_2 &= \sum_k a_{0,k} \frac{V_t^2}{V_w^2} \frac{\Delta A_r}{A_0} \sin(\theta + \alpha) \frac{r}{R} = \sum_k a_{0,k} B_{1,k} \\ T_3 &= \sum_k b_{0,k} \frac{V_t^2}{V_w^2} \frac{\Delta A_r}{A_0} \cos(\theta + \alpha) \frac{r}{R} = \sum_k b_{0,k} B_{2,k} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 T2와 T3항은 앞장과 동일하게 블레이드의 기하학적인 형상에 의해 결정되므로 형상 정보를 사용하여 구할 수 있으나, T1항은 축소모델 블레이드에서 각 익형이 적용된 구역에서 발생하는 토크와 관련된 항이 포함되어 있으므로 별도의 처리가 필요하다.

T1항에서 양력계수 기울기의 변화를 나타내는 $a_{1,k}$ 는 식 (8)과 같이 블레이드에 사용된 모든 익형에서 동일한 평균대표값 a_1 과 평균대표값과 각 익형의 기울기 변화량의 차이 $\delta_{1,k}$ 로 나타낼 수 있다.

$$a_{1,k} = a_1 + \delta_{1,k} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하여 T1항을 정리하면, 식 (9)와 같이 축소모델 풍동시험으로부터 측정된 토크와 관련된 항 $a_1 C_{r,model}$ 과 평균대표값 사용으로 인한 오차항 $\sum_k X_k$ 로 표현된다

$$\begin{aligned} T_1 &= a_1 C_{r,model} + \sum_k X_k \\ X_k &= \sum_k \delta_{1,k} \frac{V_t^2}{V_w^2} \frac{\Delta A_r}{A_0} [C_{l,model,k} \sin(\theta + \alpha) - C_{d,model,k} \cos(\theta + \alpha)]_r \frac{r}{R} \end{aligned} \quad (9)$$

블레이드 설계값 또는 전산해석 결과 등을 사용하여 블레이드 반경별 토크를 반경에 대한 함수 $f(r)$ 로 나타낼 수 있다. 식(8)을 사용하여 식 (9)의 오차항이 '0'이 되는 조건을 구하면 식 (10)과 같다. 식 (10)에서 F0는 전체 블레이드 단면에 대한 $f(r)$ 의 합이며, Fk는 각 익형구역에서 $f(r)$ 의 합을 나타낸다. 반경별 블레이드의 단면을 동일한 간격으로 설정하였으므로 k구역의 합은 익형구역의 반경길이에 비례하는 항의 합을 의미하므로, 식 (10)에서 Fk는 익형이 적용된 구역의 '반경길이*단면토크'를 의미한다.

$$\begin{aligned} a_{1,k} f(r) &= a_1 f(r) + \delta_{1,k} f(r) \\ \sum_k a_{1,k} f(r) &= a_1 \sum_k f(r) + \sum_k \delta_{1,k} f(r) \\ \sum_k \delta_{1,k} f(r) &= \sum_k a_{1,k} f(r) - a_1 \sum_k f(r) = 0 \\ a_1 &= \frac{\sum_k a_{1,k} f(r)}{\sum_k f(r)} = \left(\frac{F_1}{F_0} a_{1,1} + \frac{F_2}{F_0} a_{1,2} + \dots + \frac{F_K}{F_0} a_{1,K} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

이상의 결과에서 다수의 익형이 적용된 블레이드의 경우, Re수 변화에 따른 각 익형별 양력계수의 '반경길이*단면토크비'가 반영된 평균값을 사용하여 축소효과를 보정할 수 있다.

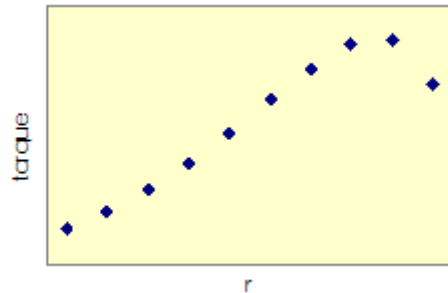


Fig. 5 Torque distribution by radius

블레이드 공력설계시 공기역학적인 손실을 최소화 하기위해 익형단면의 코드길이 및 twist각에 대한 최적화를 수행한다. 그림 5는 8개의 익형이 적용된 설계결과 나타난 반경별 토크의 분포이며, 대부분의 영역에서 익형단면의 토크는 반경에 비례하는 경향을 보이고 있다. 블레이드 반경방향 토크분포가 반경에 비례하는 경우 식 (10)의 $f(r)$ 은 $C_0 r$ 로 나타낼 수 있으며, 축소효과 보정식의 평균대표값 a_1 은 식 (11)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned}
 a_{1,k}r &= a_1r + \delta_{1,k}r \\
 \sum_k a_{1,k}r &= a_1 \sum_k r + \sum_k \delta_{1,k}r \\
 \sum_k \delta_{1,k}r &= \sum_k a_{1,k}r - a_1 \sum_k r = 0 \\
 a_1 &= \frac{\sum_k a_{1,k}r}{\sum_k r} = \left(\frac{A_1}{A_0} a_{1,1} + \frac{A_2}{A_0} a_{1,2} + \dots + \frac{A_K}{A_0} a_{1,K} \right)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

식 (11)에서 A_k 는 동일익형이 적용된 구역의 블레이드 길이와 반경거리의 곱이므로, 축소효과 보정식은 ‘구역길이*반경비’가 반영된 평균대표값 a_1 을 사용하여 수행할 수 있다.

4. 결론

풍력터빈 블레이드 풍동시험에서 축소모델 사용으로 인한 축소효과를 보정하기 위한 기법을 제안하였다. Re수에 따른 단면 익형의 양력계수 및 항력계수의 변화를 반영하여 모델 축소로 인한 토크감소 현상을 보정할 수 있으며, 익형전산 해석결과와 NREL Phase VI 12% 축소모델 풍동시험결과를 사용하여 제안된 기법을 검증하였다. 블레이드 반경에 따른 토크분포를 사용하여 다수의 익형이 사용된 블레이드에 적용할 수 있는 축소효과 보정기법을 제안하였다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 ‘전문화 연구사업’의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] 조태환, 장병희, "KARI LSWT 표준풍력터빈 풍동시험", 한국신재생에너지학회지, 2006.12
- [2] 조태환, 장병희, "KARI LSWT 표준풍력터빈 풍동시험2", 한국신재생에너지학회지, 2007.7
- [2] M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, and S.M. Larwood, 2001, "Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns", NREL/TP-500-29955
- [3] C. Lindenburg, 2004, "Modeling of rotational augmentation based on endengineering considerations and measurements", ECN-RX-04-131
- [4] 박영민, 장병희, 2006, "NREL Phase VI 풍력터빈 축소효과 보정", 한국 신재생에너지학회 추계 학술대회
- [5] 조태환, 장병희, 2008, "풍력터빈 축소모델 풍동시험 : 축소효과 보상기법", 한국 신재생에너지학회 춘계 학술대회