한국신·재생에너지학회 2006년도 추계학술대회논문집 pp.261~264

Upwind형 수평축 풍력발전기의 타워 영향에 의한 블레이드 공력 성능 및 하중 변화에 대한 고찰

김 호건[1], 신 형기[2], 박 지웅[3], 이 수갑[4]

Effect of interaction between blade and tower in upwind type HAWT on blade aerodynamic performance and load

Hogeon Kim, Hyungki Shin, Jiwoong Park, Soogab Lee

Key words : Upwind type HAWT, Blade-Tower Interaction, FVE(Finite Vortex Element) model

Abstract : This paper describes the effects to wind turbine blade aerodynamics due to interaction between blade and tower on upwind type HAWT. In order to analyze effects of blade-tower interaction, the analysis program WINFAS which is based on VLM(Vortex Lattice Method), Free wake and FVE model is used. In this study, the changes of wind turbine blade aerodynamics caused by blade-tower interaction are investigated with various parameters windshear, yaw error, TSR and tower diameter.

Nomenclature

U_∞: Wind Speed, m/s
R1: Rotor Radius, m
R2: Tower Radius, m
ϕ^*: Velocity Potential
N_f: Number of Vortex trailers
Γ: Circulation, m^2/s
TSR: Tip Speed Ratio, $\frac{R\Omega}{U_\infty}$
α: Power Law Exponent

Subscrip

HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine
FVE: Finite Vortex Element
CN: Normal force coefficient
CVC: Constant Vorticity Contour

1. 서 론

풍력 터빈의 기술력 향상과 경제성 증가가 맞물려 풍력 터빈의 용량은 급속히 증가하고 있으며 이에 따라 풍력 블레이드의 길이도 증가하고 있다. 1960년도에 24m이던 블레이드 로터 지름은 2005년 126m로 1960년대에 비해 무려 5배~6배 증가[1] 하였다. 또한 수명 향상과 재료적 특성 때문에 탄소섬유를 사용하는 추세가 증가하고 있다. 이러한 풍력 블레이드 길이 증가와 수명 향상을 위해 탄소 섬유가 사용됨에 따라 블레이드는 예전에 비해 점차 유연해 지고 있다. 하지만 블레이드가 유연해 짐에 따라 windshear, 요 에러, 동적 실속, 난류 유동, 블레이드-타워 상호작용 등 비정상 공력 하중에 의한 안정성 문제와, 블레이드가 타워에 부딪히는 등의 문제가 발생하게 된다.

특히 블레이드가 타워에 부딪히지 않도록 최소 거리를 결정하는 것은 풍력 터빈 설계에 있어서

1) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부
E-mail : hamania1@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7384 Fax : (02)875-4360
2) 한국 에너지 기술 연구원
E-mail : hkeewind@kier.re.kr
Tel : (042)860-3748 Fax : (042)861-6224
3) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 대학원
E-mail : pjw77@snu.ac.kr
Tel : 02)880-7384 Fax : (02)875-4360
4) 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 교수
E-mail : solee@plaza.snu.ac.kr
Tel : 02)880-7384 Fax : (02)875-4360

중요한 일중의 하나이다. 블레이드와 타워 간 최소거리를 결정하기 위해서는 블레이드에 작용하는 공력하중에 대한 예측이 필요하다. 블레이드 변형이 크지 않았던 예전에는 공력 해석에 있어서 고려하지 않았던 블레이드 타워 간 상호 작용이 블레이드가 유연해 짐에 따라 이에 대한 연구[2][3]가 필요하게 되었다.

블레이드-타워 상호작용에 의해 발생되는 여러 현상 중 본 논문에서는 블레이드-타워 상호작용이 블레이드 공력에 미치는 영향에 대하여 기술 하였다. 또한 블레이드-타워 상호 작용에 영향을 주는 windshear, 요 에러, 익단 속도비, 타워의 지름 등을 고려하여 연구를 진행하였다.

2. 수치 기법

수치해석을 위해 서울대 공력소음 연구실에서 개발한 WINFAS를 사용하였다. WINFAS 프로그램은 비압축성, 포텐셜 유동을 바탕으로 하고 있으며 와류고리(vortex ring)를 사용하여 블레이드와 타워의 특이점을 모사하고 블레이드에서 발생되는 후류는 FVE모델[4]과 CVC(Constant Vorticity Contour)[5]이 결합된 자유휴류(free wake) 모델로 모사되었다.

비압축성 포텐셜 유동의 지배 방정식은 아래와 같은 라플라스 방정식이다.

$$\nabla^2\phi^* = 0 \qquad (1)$$

식(1)은 벡터 정리를 이용하여 비점성, 비회전을 가정하게 되면 Biot-Savart 법칙이 얻어지는데 이 식을 통해 유동장의 속도를 계산할 수 있다.

$$\bar{u}(\bar{y}) = \frac{1}{4\pi}\int_c \frac{\bar{y}-\bar{x}}{|\bar{y}-\bar{x}|^3} \times \bar{\Gamma} dl \qquad (2)$$

$\bar{x}$는 와동의 위치 벡터이고 $\bar{y}$는 와동에 의해 속도가 유도되는 위치이다.

2.1 CVC(Constant Vorticity Contour) 모델

후류는 CVC[5](Constant Vorticity Contour)로 모델링되며 후류의 와류선 강도와 release point는 다음의 식으로 결정된다.

$$\Gamma = \frac{1.2\max(\Gamma(r,\psi))}{N_f} \qquad (3)$$

$$\bar{r} = \frac{1}{\Gamma(r_b)-\Gamma(r_a)}\int_{r_a}^{r_b}\frac{d\Gamma}{dr}dr = \frac{(r_b+r_a)}{2} \qquad (4)$$

$$\Gamma(\bar{r}) = \frac{\Gamma(r_a)+\Gamma(r_b)}{2} \qquad (5)$$

N_f는 와류선의 개수를 나타내며 20% 여유를 줌으로서 순환이 커질 경우를 고려하게 된다. release point는 구간(r_a, r_b)에서의 와류선 강도는 $\Gamma(\bar{r})$이고 $\bar{r}$인 지점에 하나의 와류선이 나오게 된다. 뒷전에서 순환 분포에 맞춘 release point와 와류 개수에 의해 Kutta condition은 자동으로 만족하게 된다.

2.2 FVE(Finite Vortex Element) 모델

FVE[4] 모델에서는 후류가 짧은 직선 와류 요소(straight vortex element)로 연결된다. 이러한 와류 요소들이 타워를 만났을 때 블레이드와 타워 사이의 후류는 와류 고리형태로 타워 이후의 후류는 말굽형 와류 후류로 분리가 된다. 이를 통해 블레이드에서 발생된 후류가 타워를 지날 때의 현상이 모사된다.

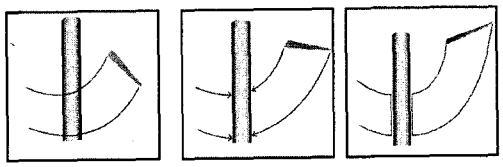

Fig. 1 Blade-Tower Interaction[4]

2.3 공력 하중 계산

공력 하중은 Kutta-Joukowski의 법칙에 의해 구할 수 있으며 하중 계산에 필요한 블레이드와 타워 패널의 와동 강도는 비침투 조건을 적용하여 얻을 수 있다. 식(6)은 특정 블레이드위의 j번째 패널에서의 비침투 조건식이다.

$$\left(\sum_{k=1}^{B}\sum_{i=1}^{N}\alpha'_{i,k}\Gamma_{i,n,k} + \sum_{t=1}^{T}a_t''\Gamma_{t,n} + \overrightarrow{wind} + (\vec{w}_j)_{wake}\right)\cdot\vec{N} = 0 \qquad (6)$$

B는 블레이드 개수, N은 블레이드 패널 수, T는 타워의 패널 수 이다. $\alpha'_{i,k}$는 k번째 블레이드의 i번째 패널에 의한 j번째 패널에 미치는 영향 계수이다. a_t''는 t번째 타워의 패널에서 j번째 블레이드 패널에 미치는 영향 계수이다.

$(\vec{w}_j)_{wake}$는 N-1번째 시간 간격의 와동 강도를 가지는 후류에 의한 속도 이다. $\vec{N}$은 패널의 수직방향 벡터를 의미한다.

유효받음각이 실속 받음각보다 커지게 되면 Du & Selig[6] 3D stall delay 모델이 적용된 2-D 에어포일 데이터값을 바탕으로 하중을 계산하게 된다.

3. 계산 결과 및 토의

3.1 Baseline Wind Turbine

블레이드와 타워의 상호작용이 블레이드 공력에 미치는 영향을 알아보기 위해 아래와 같은 모델을 사용하였다. 이 풍력 터빈을 바탕으로 타워의 지름을 변화 시켜가면서 공력을 계산하였다.

Table 1 Baseline Wind Turbine 제원

Rotor Blade		Tower	
Type	Upwind 3-Bladed HAWT	Type	Tubular
R1,Rotor radius	0.54m	R2,Tower radius	0.0926*R1
Taper Ratio	0.25	Towr -Blade Distance	5*R2
Twist Angle	15.6°	Tower Height	1.67*R1
Number of Used Airfoil	3 (r/R=0.25, 0.75, 0.95)		
Cutout	0.318*R1		

3.2 결과 및 토의

타워의 영향에 대한 경향성과 정성적 비교를 위해 baseline 모델을 이용하였다. 계산 조건은 익단속도비가 8일 때 wind shear는 power law를 적용하였으며 power law exponent는 일반적으로 사용하는 0.14를 이용한 결과로 정규화 하였다

Fig 2,3은 타워가 있을 때와 없을 때의 후류의 형상과 C_N값(normal force coefficient)의 분포를 나타내고 있다. 방위각 180도 일 때 즉 타워가 위치한 방위각에서 C_N값이 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 타워에 가까워 졌을 때 타워 패널 위의 와류 고리와 FVE로 모델링된 블레이드의 와류 고리 후류와 말굽형 와류 후류의 영향이 블레이드가 경험하게 되는 자유 흐름 방향으로의 유동을 방해 하게 된다. 이런 자유 흐름의 방해는 유도 받음각을 감소시키게 되며 결과적으로 블레이드 성능이 감소되게 된다.

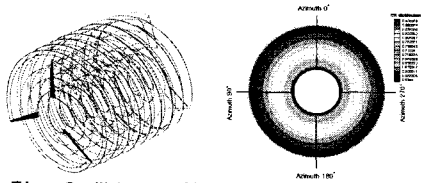

Fig. 2 Wake configuration and normal force coefficient distribution without tower ,TSR=8 , no wind shear, head on flow

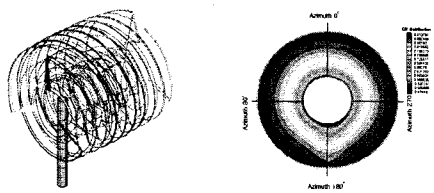

Fig. 3 Wake configuration and normal force coefficient distribution with tower TSR=8 ,no wind shear, head on flow

Fig 4는 타워 유무에 의한 C_N을 방위각에 따라 보여주고 있다. 타워가 없더라도 방위각 180도에서 wind shear에 의해 C_N이 감소하게 된다. 위에서도 언급했듯이 타워와 가까워지면서 유동의 흐름을 타워가 방해하게 되므로 타워부근인 방위각 180도 부근에서 타워가 있는 경우가 타워가 없는 경우 보다 C_N 이 더 감소하게 된다. 이를 통해 타워가 블레이드의 하중에 영향을 미치는 것을 확인하였다. Fig 4에서 확인 할 수 있는 또 다른 경향성은 익단 속도비가 커질수록 C_N의 감소가 줄어들어 타워 없는 경우에 가까워지게 되는 것이다.

익단속도비가 높다는 것은 자유흐름에 비해 상대적으로 블레이드의 회전속도가 빠르다는 것을 의미하게 되는데 이때 블레이드의 회전 속도가 빠르기 때문에 상대적으로 익단속도비가 낮은 경우에 비해 타워의 영향을 받게 되는 시간이 짧아지게 된다. 결국 익단속도비가 높을 때 타워의 영향이 줄어들게 된다.

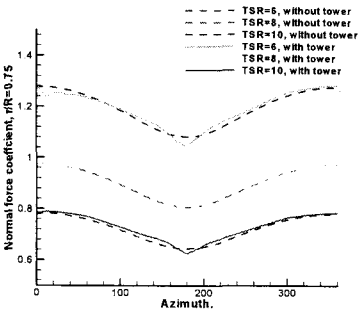

Fig. 4 Normal Force Coefficient versus azimuth angle, at r/R=0.75, yaw=0° and power law wind shear α=0.14

Fig 5는 wind shear가 블레이드와 타워의 상호작용에 미치는 영향에 대해 보여 준다. Power law의 지수가 커질수록 wind shear에 의해 블레이드의 공력 하중 변화는 커지게 되고 상대적으로 타워의 영향은 줄어들게 된다. 또한 블레이드가 타워에 가까이 왔을 때 블레이드가 정속회전을 한다면 국부 익단속도비는 높아지게 되고 위에서 언급한 이유에 의해 타워의 영향은 Power law 지수가 작은 경우와 비교하면 작아지게 되는 것이다. Power law 지수가 작은 해상의 풍황 조건에서는 블레이드-타워 상호 작용이 블레이드 하중에 많은 영향을 끼칠 수 있다.

타워의 반경에 따라, 즉 블레이드의 swept area에 포함되는 타워의 단면적에 따라 풍력터빈의 공력 성능에 미치는 영향은 Fig 6과 7로부터 알 수 있다. 그림 6은 요에러와 정규화된 타워 지름에 대한 성능곡선을 보여준다. yaw error가 증가할수록 타워의 반경이 커지는 것에 대한 영향이 적은 것을 알 수 있다. 반면에 요에러가 0인 head on flow인 경우 baseline에 대해 100%인 반경에 비해 300% 반경인 터빈의 성능은 약 8%정도 감소되었고 200%반경인 터빈의 성능차는 3%, 정도, 150% 반경 터빈과는 1.5% 정도의 성능감소를 보였다.

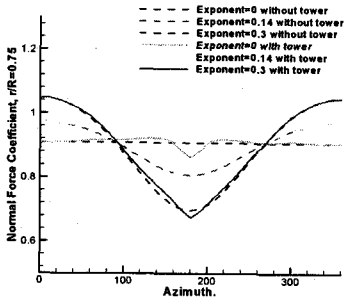

Fig. 5 Normal force coefficient versus azimuth angle at r/R=0.75, yaw=0° and TSR=8

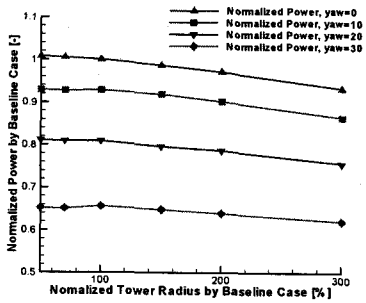

Fig. 6 Normalized power versus tower radius by baseline case at TSR=8 and power law wind shear α=0.14

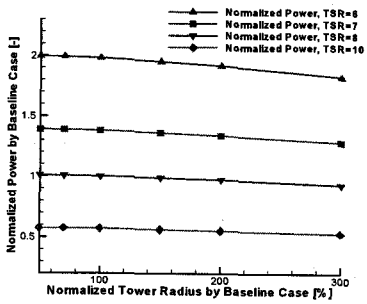

Fig. 7 Normalized Power versus Tower Radius by baseline case at yaw=0° and power law wind shear α=0.14

Fig 7은 익단 속도비와 타워 반경의 따른 baseline case에 정규화된 성능을 보여주고 있다. Fig 4의 결과로부터 알게 되었듯이 익단 속도비가 낮은 경우 블레이드-타워 상호작용이 커지게 되어 익단속도비가 높은 경우보다 상대적으로 공력성능이 더 낮아지는 결과가 나왔다. 익단 속도비가 6일 때 정규화된 타워반경이 100%인 점과 150%, 200%, 그리고 300% 일 때의 성능을 비교해 보면 타워 반경이 150% 일 때 타워 반경이 100%인 터빈 대비 약 1.3%정도 성능이 감소하였으며 200%일 때 3%, 300%일 때 6.7%의 감소를 보였다

4. 결 론

타워가 블레이드 공력성능과 하중에 미치는 영향을 알아 보기 위해 타워와 블레이드의 특이점을 와류고리 형태로 모사 하였으며 블레이드에서 발생된 후류가 타워에 부딪히는 부분은 FVE[4] 모델링을 사용하였고 후류의 와류 강도는 일정한 모델인 CVC[5] 모델을 사용하였으며 windshear, 익단속도비, 요에러 등을 고려하여 타워가 블레이드에 미치는 영향에 대해 알아 보았다. 익단속도비가 작고 요에러와 windshear가 작은 경우 타워의 영향이 증가하는 것을 알게 되었다. 블레이드-타워 상호작용이 성능에 미치는 영향으로서는 타워의 지름이 base line에 150% 일 때는 1.5%, 200%일 때는 3% 정도의 성능 감소를 보였다.

앞으로의 연구에서는 블레이드-타워 상호작용에 대한 확장된 연구를 위해 공탄성 및 공력 소음 해석과 연계하여 연구가 진행 될 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 출연금으로 수행한 최우수실험실사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] Europe Wind Energy Association, "Wind Power Factsheets", EWEA,2005

[2] Bak, C., Aagaard Madsen, H., Johansen, J., 2001,"Influence from blade-tower interaction on fatigue loads and dynamics ",EWEC '01 Porceedings , pp. 394-397

[3] J.M.R. Graham , C.J, Brown, G. Giannakidis ,2001,"Aerodynamic Interaction between Wind- Turbine Rotor Blades and the Tower", "EWEC '01 Porceedings, pp.359 - 361

[4]신형기, 박지웅, 이수갑, 김주언, 2005,"후류와 타워의 영향을 고려한 수평축 풍력 발전기 블레이드의 비정상 하중 예측을 위한 새로운 자유후류기법의 연구", 한국 신재생에너지 학회지, Vol.1,No.1, pp.54-63

[5]Quackenbush, T.T., Bliss, D.B., Wachspress, D.A., and Ong, C. C., 1990, "Free-Wake Analysis of Hover Performance Using a New Influence Coefficient Method", NASA CR 4309

[6] Zhaohui Du and Michael S. Selig, "A 3-D Stall-Delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction", AIAA-98-002