후류에 의한 풍력터빈의 피로하중 특성

김충옥*, 음학진**, 남현우**, 김귀식***

*제주대학교 대학원 풍력특성화협동과정(okwind@jejunu.ac.kr),
**한국선급 녹색산업기술원(hjeum@krs.co.kr), (namhw@krs.co.kr),
***제주대학교 기계시스템공학부(kimgusi@jejunu.ac.kr)

Characteristics of Fatigue Load in a Wind Turbine by the Wake

Kim, Chung-Ok* Eum, Hark-Jin** Nam, Hyun-Woo** Kim, Gui-Shik***

*Multidisciplinary Graduate School for Wind Energy, Jeju National University(okwind@jejunu.ac.kr),
**Green & Industrial Technology Center, Korean Register(hjeum@krs.co.kr), (namhw@krs.co.kr),
***Faculty of Mechanical System Engineering, Jeju National University(kimgusi@jejunu.ac.kr)

Abstract

The wake generated by a wind turbine has an effect on performance of a downstream wind turbine as well as mechanical loads. This paper investigated characteristics of fatigue load at the blade root due to the wake effects and quantitatively analyzed its effects at operating condition of a 5MW tripod offshore wind turbine using Bladed 4.1 software. The wake effects was studied the way the wake's center position move from the rotor center to the blade tip to the far-away position where the wake doesn't affect the wind turbine. When wake's center was located on the blade tip or the rotor center, damage equivalent fatigue load was higher than other positions. It was up to 10~14% compared to those of non-wake case. Results of this study would be helpful to design wind turbines and wind farms to have lifetimes more than 20 years of the wind turbine.

Keywords : 풍력터빈(Wind turbine), 후류(Wake), 피로하중(Fatigue load), 후류감쇄상수(Wake decay constant), 레인플로카운트(Rain flow count), 등가하중(Equivalent load)

기 호 설 명

1. 서 론

TI : Turbulence Intensity
NTM : Normal Turbulence Model
 C_t : Thrust Coefficient
 λ : TSR; Tip Speed Ratio

풍력터빈(Wind turbine)의 회전자는 뒤쪽
으로 강한 후류(Wake)를 발생시키며, 후방
풍력터빈 성능에 큰 영향을 미친다. 특히, 오
늘날에는 풍력터빈이 대형화됨에 따라, 후류

투고일자 : 2011년 9월 30일, 심사일자 : 2011년 10월 4일, 게재확정일자 : 2011년 12월 14일
교신저자 : 음학진(hjeum@krs.co.kr)

그림 1. 덴마크 Horns Rev 해상풍력단지의 후류영향 개념도¹⁾

의 특성을 정확하게 파악하고, 풍력터빈 사이의 상호간섭 영향을 예측하는 것은 매우 중요한 일이 되었다.²⁾³⁾(그림 1 참조)

후류에 의한 출력 감소가 무려 2~20%에 달한다는 연구를 비롯한 출력 관점에서의 후류연구는 널리 진행되어 왔으나, 피로 관점에서의 후류연구는 국내·외를 통틀어 거의 전무한 실정이다. 또한 기존의 후류관련 연구들이 풍력터빈 배치에 관심을 갖는 풍력단지 설계에 대한 거시적 연구였다면, 본 연구는 전·후방 풍력터빈 사이의 직접적인 후류영향에 대한 미시적 연구라 할 수 있다.⁴⁾

본 연구에서는 5MW tripod 해상용 풍력터빈을 대상으로, Bladed 4.1 소프트웨어를 이용하여, 후류에 의한 블레이드 루트의 피로하중 특성을 연구하였으며, 해석결과를 풍력터빈의 20년 이상 수명을 보장하기 위한 설계 기초자료로 활용할 수 있도록, 피로하중(Fatigue load)에 대한 경향성을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

2. 일반 사항

풍력터빈의 후류에 의한 피로하중 특성을 연구하기 위해서는 먼저 대상 풍력터빈 모델 선정 후, 바람과 후류가 정의되어야 하는데, 이에 대한 각 내용은 다음과 같다.

표 1. 5MW tripod 해상용 풍력터빈의 주요제원

Rotor diameter	118m
Number of blades	3
Hub height	80m
Rotational sense of rotor, viewed from upwind	Clockwise
Position of rotor relative to tower	Upwind
Transmission	Gearbox
Aerodynamic control surfaces	Pitch
Fixed / Variable speed	Variable
Cut in wind speed	3.5m/s
Rated wind speed	12.3m/s
Cut out wind speed	25m/s
Rotor speed	13.89RPM

그림 2. 5MW tripod 해상용 풍력터빈의 형상

2.1 풍력터빈 모델

본 연구에 사용된 풍력터빈은 Bladed 4.1 소프트웨어에서 제공하는 5MW tripod 해상용 풍력터빈이다. 표 1과 그림 2에 풍력터빈의 주요제원과 형상을 각각 나타내었다.

2.2 풍속조건

본 연구에서는 IEC 61400-1 ed. 3을 기반으로 Improved von Karman 난류모델을 적용하여 10분간의 난류 랜덤 풍속데이터를 생성하였다. 허브높이에서의 평균풍속을 풍력터빈의 정격풍속인 12.3m/s로, 바람 유입경사를 8°로 각각 설정하였으며, 정상난류모델(NTM)에서의 난류강도(TI)를 식 (1), (2)로 계산하였다.⁵⁾

$$\sigma_1 = I_{ref} (0.75 V_{hub} + b) \quad (1)$$

$$b = 5.6, I_{ref} = 0.16$$

$$TI = \frac{\sigma_1}{V_{hub}} \quad (2)$$

여기서, 상수 b는 IEC 61400-1 ed. 3에 5.6으로 제시되어 있으며, 기준난류강도 I_{ref} 는 풍력터빈 클래스에서 난류특성에 따라 결정되는 값이다. 본 연구에서는 클래스IIA 사이트에 적용시키고자 0.16으로 설정 후, 난류강도를 계산하여, 19.2846%의 값을 얻었다. 생성된 풍속데이터는 그림 3과 같다.⁵⁾

그림 3. NTM에 대한 풍속데이터(12.3 m/s)

그림 4. Eddy viscosity 후류모델의 프로파일⁷⁾

표 2. Eddy viscosity 후류모델의 입력데이터

Diameter	118m
Thrust coefficient(C_t)	0.6441
Tip speed ratio(λ ; TSR)	6.9774
Number of blades	3
Distance upstream(4D)	472m
Default turbulence intensity	19.2846%

풍력터빈 모델에서도 본 연구의 결과를 적용할 수 있도록 육상용의 최소치인 4배(4D)로 설정하였다.⁶⁾

2.4 후류 중심선 오프셋

후류에 의한 피로하중 특성을 연구하기 위해서는 후류 중심선이 후방 풍력터빈의 회전자면을 중심으로 어느 부분에 영향을 미치는지에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 후류 중심선이 그림 5와 같이 수평방향과 수직방향으로 영향을 미친다고 가정 후, 10m의

2.3 후류조건

후류모델에는 PARK 모델, Gaussian 모델, Eddy viscosity 모델, Larsen 모델 등이 있으며, 본 연구에서는 Navier Stokes 방정식에 기반하고, 전방 풍력터빈에 대한 제원과 후류와 전방 풍력터빈 사이의 거리를 바탕으로 정의되는 Eddy viscosity 모델을 이용하여 후류를 생성하였다. Eddy viscosity 모델을 정의하기 위해서는 표 2와 같은 데이터가 필요하다.(그림 4 참조)

여기서, 추력계수(C_t)와 주속비(λ ; TSR)는 정격풍속인 12.3m/s일 때의 값이며, 전·후방 풍력터빈 사이의 거리는 일반적으로 육상용의 경우 회전자직경의 4~7배(4~7D)를, 해상용의 경우 7~12배(7~12D)를 권장하는데, 보다 극치의 결과를 얻고자, 또한 육상용 타

그림 5. 후류 중심선의 오프셋

간격마다 포인트를 설정하여 $\pm 300\text{m}$ 까지 총 121가지 케이스를 계산하였다. 단, $\pm 60\text{m}$ 에서는 블레이드 팁의 위치를 고려하여 회전자반경인 $\pm 59\text{m}$ 에서 계산하였다.

특히, 풍력터빈을 해상에 설치하는 경우, 한 풍력단지 내에서는 대부분 동종의 풍력터빈 모델을 설치하고, 해저 지면의 높이가 일정하여, 전·후방 풍력터빈의 허브높이가 같으므로, 수평방향만 고려하면 된다. 그러나 본 연구에서는 지면 높이가 다른 육상용 타 풍력터빈에서도 적용할 수 있도록 수직방향도 고려하였다. 단, 수직방향의 경우, -80m 이하는 타워기저보다 더 낮은 부분으로 실제 후류가 존재할 수 없으나, 경향성을 살피고자 존재한다고 가정하여 계산에 포함하였다.

2.5 후류크기

대략적인 후류의 크기와 영향범위를 알 수 있다면, 후류영향 연구에 대한 매우 유용한 정보가 될 수 있다. 여러 후류모델들은 후류의 크기를 계산할 수 있도록 다양한 수식들을 제안하고 있으며, 본 연구에서는 후류크기 계산에 한하여 비교적 간편한 PARK 모델의 식(3)을 이용하여 후류의 직경 D_w 를 계산하였다.⁸⁾

$$D_w = D_0 + 2kX \quad (3)$$

여기서, D_0 는 전방 풍력터빈의 회전자직경이며, X 는 후류와 전방 풍력터빈 사이의 거리이다. k 는 후류감쇄상수(Wake decay constant)로, RISO에서는 육상용일 때 0.075를, 해상용일 때 0.050을 권장하고 있다. 따라서 본 연구에 사용된 해상용 모델에서 생성된 후류의 직경은 165.2m 로 전방 풍력터빈 회전자직경의 약 1.4배(1.4D)에 해당한다.⁹⁾

3. 피로하중 특성

이상의 자료를 바탕으로 풍력터빈이 발전 상태일 때, 각 연구 케이스별 블레이드 루트에 작용하는 하중을 계산하였다. 그리고 이 하중 결과를 주파수 분석을 통하여 피로하중을 정성적으로 예측하였다. 또한 앞서 계산한 하중결과를 다시, 사이클 집계방법 중 하나인 레인플로카운트(Rain flow count)를 통하여 등가하중(Equivalent load)을 정량적으로 계산하였다.

3.1 블레이드 좌표계

그림 6. 풍력터빈의 좌표계¹⁰⁾

그림 6은 풍력터빈 전체 좌표계를 나타내며, 이 중에서, Flap방향 XB, Edge방향 YB, Span방향 ZB가 블레이드 좌표계를 나타낸다.

블레이드 루트에 작용하는 하중요소에는 모멘트(M_x , M_y , M_z)와 힘(F_x , F_y , F_z)이 있다. M_x 는 Edge방향 모멘트, M_y 는 Flap방향 모멘트, M_z 는 Span방향 모멘트를 F_x 는 Flap방향 힘, F_y 는 Edge방향 힘, F_z 는 Span방향 힘을 각각 나타낸다.

3.2 후류에 의한 피로하중 예측

본 연구에서는 수평·수직 및 Flap방향, Edge방향, Span방향의 총 6가지 하중요소에 대하여, 후방 풍력터빈 회전자면에 유입되는 후류의 중심선 변화에 따른 블레이드 루트의 피로하중을 주파수 분석을 통하여 정성적으로 예측하였으며, 그 결과는 그림 7~12와 같다.

그림 7. 수평방향 블레이드 루트에서의 주파수 분석(Edge)

그림 8. 수평방향 블레이드 루트에서의 주파수 분석(Flap)

그림 9. 수평방향 블레이드 루트에서의 주파수 분석(Span)

그림 10. 수직방향 블레이드 루트에서의 주파수 분석(Edge)

그림 11. 수직방향 블레이드 루트에서의 주파수 분석(Flap)

그림 12. 수직방향 블레이드 루트에서의 주파수 분석(Span)

상기 결과들에서 Edge방향, Span방향 하중요소들은 후류의 중심선 변화에 따른 영향이 없으나, Flap방향 하중요소들의 경우, 블레이드의 1회전에 해당하는 0.2315Hz일 때(1P), 후류의 중심선 변화에 따른 Auto spectral density의 차이가 있음을 알 수 있다. 이는, Flap방향에서는 블레이드가 바람의 직접적인 영향을 받기 때문이라 추정되며, 후류 중심선이 좌·우 양쪽의 팁이나 음의 수직방향 팁(하부팁)을 지날 때, 후류에 의한 영향이 있음을 예측할 수 있다. 그러나 주파수 분석 결과만을 가지고 피로하중을 정량적으로 예측하기는 매우 어렵기 때문에 레인플로 카운트를 통한 등가하중을 계산할 필요가 있다.

3.3 후류에 의한 피로하중 특성분석

본 연구에서는 후류의 중심선 변화에 따른 블레이드 루트의 피로하중을 등가하중 계산을 통하여 정량적으로 분석하였으며, 그 결과는 그림 13~24와 같다.

그림 13. 수평방향 블레이드 루트 Mx에 대한 등가하중

그림 14. 수평방향 블레이드 루트 My에 대한 등가하중

그림 15. 수평방향 블레이드 루트 Mz에 대한 등가하중

그림 16. 수평방향 블레이드 루트 Fx에 대한 등가하중

그림 17. 수평방향 블레이드 루트 Fy에 대한 등가하중

그림 18. 수평방향 블레이드 루트 Fz에 대한 등가하중

그림 19. 수직방향 블레이드 루트 Mx에 대한 등가하중

그림 23. 수직방향 블레이드 루트 Fy에 대한 등가하중

그림 20. 수직방향 블레이드 루트 My에 대한 등가하중

그림 24. 수직방향 블레이드 루트 Fz에 대한 등가하중

그림 21. 수직방향 블레이드 루트 Mz에 대한 등가하중

그림 22. 수직방향 블레이드 루트 Fx에 대한 등가하중

상기 결과들은 후류의 영향에서 벗어난 300m를 기준으로 정규화한 자료이며, Inverse SN slope는 재료가 가지는 피로특성치로 1910년에 Basquin이 제안한 SN 곡선상의 피로강도지수 법칙에서 피로강도지수(Basquin지수)의 역수에 해당한다. 재료마다 가지는 고유의 피로강도지수를 역수화하여 상기 결과들의 Inverse SN slope에 대입하면, 재료에 따른 블레이드 루트의 피로특성을 쉽게 파악할 수 있다.¹¹⁾

Inverse SN slope에 대한 일반적인 값은 용접 스틸일 경우 3, 압출 알루미늄일 경우 6, 유리섬유 복합재일 경우 10의 값을 갖는다. 특히, 본 연구에서 해석한 블레이드 루트의 경우, 재료로 유리섬유 복합재를 주로 사용한다.¹²⁾

후류 영향을 받는다고 해서, 무조건 피로도가 증가하는 것이 아니라, 후류의 중심선 변화에 따라 피로도가 감소하는 부분도 있음에 유의하여야 한다. 후류의 직접적인 영향으로 후방 풍력터빈의 블레이드 루트 피로도가 증

가하는 부분도 있으나, 후방 풍력터빈으로 유입되는 절대적인 풍속이 감소하기 때문에 피로도도 감소하는 부분이 발생했으리라 추정된다.

표 3은 피로에 대한 최대 후류영향의 정도를 나타내며, 각 수치들은 후류영향이 없을 때를 기준으로 회전자면의 중심 및 팁의 위치별 피로의 증감률을 의미한다. 특히, 팔호 안의 수치는 블레이드의 재료인 유리섬유 복합재에 해당하는 Inverse SN slope가 10일 때를 나타낸다.

표 3. 피로에 대한 최대 후류영향의 정도

Loads	Horizontal			Vertical		
	-59m (Left tip)	0 (Center)	+59m (Right tip)	-59m (Lower tip)	0 (Center)	+59m (Upper tip)
Mx	-6%	0%	+5%	+2%	0%	-3%
My	-9%	-15%	+4%	+10% (+4%)	-20%	-14%
Mz	-7%	0%	+5%	+5%	0%	-5%
Fx	-10%	-16%	+4%	+7%	-18%	-11%
Fy	-4%	0%	+3%	+1%	0%	-2%
Fz	+5%	+14% (+10%)	+5%	+5%	+14% (+10%)	+5%

본 연구에서 최종적으로 계산된 그림 13~24와 표 3의 결과들을 요약 정리하면 다음과 같다.

블레이드 루트의 Mx, My, Mz, Fx, Fy는 후류 중심선이 양의 수평방향 팁(우측팁) 근처나 그 바깥을 지날 때와 음의 수직방향 팁(하부팁) 근처나 그 바깥을 지날 때, 후류에 의한 피로도가 가장 크며, Fz는 후류 중심선이 회전자면의 중심을 지날 때, 가장 크다.

블레이드 루트의 같은 방향 하중요소(Mx와 Fy, My와 Fx)들은 경향성이 거의 동일하며, Edge방향 하중요소인 Mx와 Fy의 경우, Inverse SN slope가 3~12 사이인 재료에 대해서는 재료에 따른 영향이 거의 없다.

후류에 의한 피로도 영향은 음의 수직방향

팁(하부팁) 근처에서 Inverse SN slope가 3일 때 My와, 회전자면의 중심에서 Inverse SN slope가 12일 때 Fz가, 각각 10%, 14%로 최대치를 나타낸다. 또한 유리섬유 복합재에 해당하는 Inverse SN slope가 10일 때, 회전자면의 중심에서 Fz가 10%로 최대치를 나타낸다.

수평방향 해석에서 $\pm 210\text{m}$ 바깥부분(420m)은 피로에 대한 후류의 영향이 없으며, 이는 전방 풍력터빈 회전자직경의 약 3.6배(3.6D)에 해당한다.

한편, 몇몇 피로도도의 경우 회전자면의 중심이나 팁을 조금 벗어난 위치에서 최대치나 최소치가 나타나는데, 이는 발전중인 풍력터빈 회전자의 회전 때문이라 추정된다.

참고로 회전자의 회전방향이 반시계방향인 풍력터빈 모델들은 후류에 의한 피로도가 본 연구 결과와는 반대로 y축 대칭으로 나타난다. 즉, 수직방향 피로도는 시계방향으로 회전하는 풍력터빈과 같은 반면, 수평방향 피로도는 우측보다 좌측이 높게 나타난다.

4. 결 론

5MW tripod 해상용 풍력터빈을 대상으로, Bladed 4.1 소프트웨어를 이용하여, 후류에 의한 블레이드 루트의 피로하중 특성을 연구한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 블레이드 루트의 하중요소에 따라, 후류 중심선이 회전자면의 팁과 중심을 지날 때, 피로도가 크게 나타나기 때문에 풍력터빈 설계 및 블레이드 제조 시 이를 고려하여야 한다.
- (2) 블레이드 루트의 같은 방향 하중요소들은 경향성이 거의 동일하며, Edge방향 하중요소인 Mx와 Fy의 경우에는 재료에 따른 영향이 거의 없다.
- (3) 위치, 하중요소 그리고 재료에 따라 다르지만, 후류에 의한 피로도 영향은 팁 근처에서 최대 10%, 회전자면의 중심에서

최대 14%에 달한다. 또한 블레이드 루트의 재료로 주로 사용되는 유리섬유 복합재의 경우, 회전자면의 중심에서 최대 10%의 피로도 영향이 있다.

- (4) 후류와 전방 풍력터빈 사이의 거리가 전방 풍력터빈 회전자직경의 4배(4D)일 때, 후방 풍력터빈의 피로도에 영향을 미치는 후류의 범위는 전방 풍력터빈 회전자직경의 약 3.6배(3.6D) 정도이다.
- (5) PARK 후류모델을 이용하여 후류의 크기를 계산한 결과, 후류와 전방 풍력터빈 사이의 거리가 전방 풍력터빈 회전자직경의 4배(4D)일 때, 후류의 직경은 165.2m로 전방 풍력터빈 회전자직경의 약 1.4배(1.4D)에 해당한다.

본 연구의 결과물을 풍력터빈과 풍력단지 설계에 적용하여, 20년 이상의 수명을 보장하기 위한 설계 기초자료로서 활용이 기대된다.

한편, 본 연구에서는 단일 풍력터빈을 사용하고, 풍속조건 및 후류조건 등을 제한하여 시뮬레이션 해석을 실시하였다. 따라서 결과 정확도에 대한 한계를 갖고 있으며, 향후 난류 등의 풍속조건, 타 후류모델, 전·후방 풍력터빈 사이의 거리, 타 풍력터빈 모델 등을 변수로 고려하여, 후류에 의한 풍력터빈의 피로하중 특성을 다각적으로 분석하는 연구가 더 진행 될 필요가 있다.

후 기

이 논문은 지식경제부 한국에너지기술평가원 “풍력특성화대학원 인력양성사업”의 지원을 받아 연구한 논문임.

참 고 문 헌

1. Website for Aeolus, <http://ict-aeolus.eu/>
2. 박지웅, 신형기, 선호성, 이수갑, 김주연, 최

- 성옥, 풍력발전기용 블레이드의 후류 구조에 관한 실험적 연구, 한국항공우주학회 2004년도 춘계학술발표대회 논문집, 2004, pp.126~129.
3. 服部 康男, 山本 學, 江口 讓, 近藤 宏二, 須藤 仁, 田中 伸和, 吉田 正邦, 眞田 早敏, 風車後流部の亂流學動, 第18回 風工學シンポジウム, 2004, pp.157~162.
4. EMD, Introduction to Wind Turbine Wake Modelling and Wake Generated Turbulence, EMD, 2005.
5. IEC, IEC 61400-1 ed. 3 Wind Turbines - Part 1: Design Requirements, IEC, 2005.
6. Joshua Earnest and Tore Wizelius, Wind Power Plants and Project Development, PHI, 2011.
7. GL & Garrad Hassan, Bladed 4.1 Theory Manual, GL & Garrad Hassan, 2011.
8. AWS Truepower, Openwind Theoretical Basis and Validation 1.3, AWS Truepower, 2010.
9. R. J. Barthelmie, L. Folkerts, G. C. Larsen, K. Rados, S. C. Pryor, S. T. Frandsen, B. Lange and G. Schepers, Comparison of Wake Model Simulations with Offshore Wind Turbine Wake Profiles Measured by Sodar, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology volume 23, 2005, pp.888~901.
10. (사)한국전급, 풍력발전 시스템의 기술 기준, (사)한국전급, 2008.
11. Norman E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials ed. 2, Prentice Hall, 1999.
12. Herbert J. Sutherland, On the Fatigue Analysis of Wind Turbines, Sandia National Laboratories, 1999.