



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



碩士學位論文

후류에 의한
풍력터빈의 피로하중 특성

濟州大學校 大學院

風力特性化協同科程

金 忠 玉

2011年 12月



후류에 의한
풍력터빈의 피로하중 특성

指導教授 金 貴 植

金 忠 玉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2011年 12月

金忠玉의 工學 碩士學位 論文을 認准함

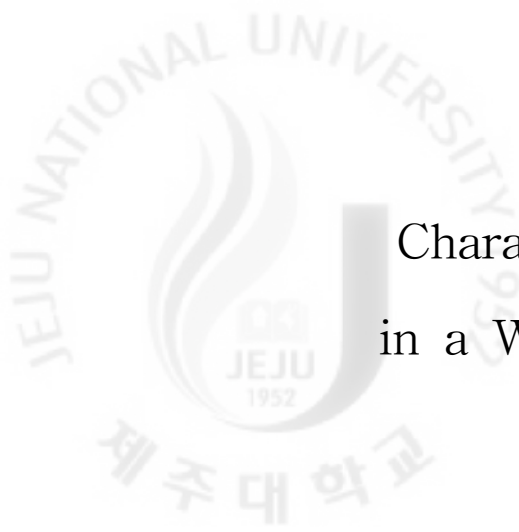
審査委員長 _____ (인)

委 員 _____ (인)

委 員 _____ (인)

濟州大學校 大學院

2011年 12月



Characteristics of Fatigue Load in a Wind Turbine by the Wake

Chung-Ok Kim

(Supervised by professor Gui-Shik Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering

Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

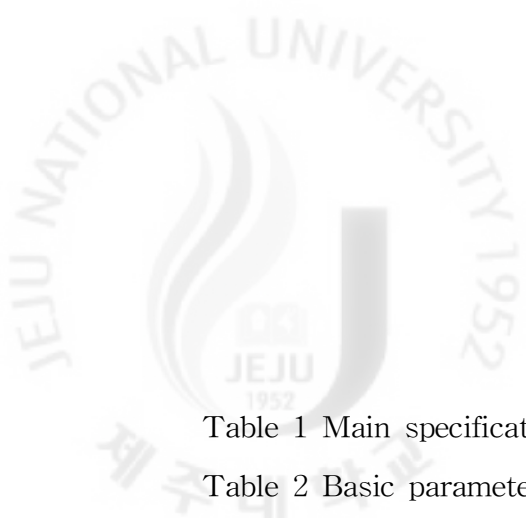
2011. 12.

목 차

List of Tables	vi
List of Figures	vii
Nomenclature	ix
Summary	xi
I. 서 론	1
II. 해석도구 및 이론	3
2-1 Bladed 4.1 소프트웨어	3
2-2 PARK 후류모델	9
2-3 Eddy viscosity 후류모델	12
2-4 등가하중	15
2-5 피로의 지수법칙	16
III. 연구 방법	17
3-1 풍력터빈 모델	18
3-2 풍속조건	20
3-3 후류조건	22
3-4 후류 중심선 오프셋	24
3-5 후류크기	26
IV. 결과 및 고찰	27
4-1 블레이드 좌표계	27
4-2 후류에 의한 하중 계산	29
4-3 후류에 의한 피로하중 예측	33



4-4 후류에 의한 피로하중 분석	37
V. 결 론	47
참고 문헌	49



List of Tables

Table 1 Main specification of 5MW tripod offshore wind turbine	18
Table 2 Basic parameters for wind turbine classes	20
Table 3 Input data of eddy viscosity wake model	22
Table 4 C_p , C_t and λ (TSR) value for hub wind speed	23
Table 5 Degree of maximum wake effects for fatigue	45

List of Figures

Fig. 1 Illustration of wake at offshore wind farm in Horns Rev in Denmark	2
Fig. 2 Task window of Bladed 4.1 software	3
Fig. 3 Calculations window of Bladed 4.1 software	3
Fig. 4 Task window of define turbulence	4
Fig. 5 Task window of improved von Karman model	5
Fig. 6 Task window of time varying wind	6
Fig. 7 Task window of turbulence characteristics	6
Fig. 8 Task window of upwind turbine wake	7
Fig. 9 Task window of simulation control	8
Fig. 10 Overview of PARK wake model	9
Fig. 11 Plan view of upstream turbine in the wake downstream turbine	10
Fig. 12 Wake development after a single turbine of PARK wake model	11
Fig. 13 Wake profile used in eddy viscosity wake model	12
Fig. 14 Wake development after a single turbine of eddy viscosity wake model	14
Fig. 15 Flow chart of study	17
Fig. 16 Figure of 5MW tripod offshore wind turbine	19
Fig. 17 Wind speed data for NTM(12.3m/s)	21
Fig. 18 Power curve of 5MW tripod offshore wind turbine	23
Fig. 19 Offset of wake's center line	24
Fig. 20 Co-ordinate system of wind turbine	28
Fig. 21 Simulation data for center loads(0,0)	29
Fig. 22 Simulation data for center loads(-59,0)	30
Fig. 23 Simulation data for center loads(59,0)	30
Fig. 24 Simulation data for center loads(0,-59)	31
Fig. 25 Simulation data for center loads(0,59)	31

Fig. 26 Auto spectral density for edgewise blade root loads(Horizontal) ····	33
Fig. 27 Auto spectral density for flapwise blade root loads(Horizontal) ·····	34
Fig. 28 Auto spectral density for spanwise blade root loads(Horizontal) ····	34
Fig. 29 Auto spectral density for edgewise blade root loads(Vertical) ······	35
Fig. 30 Auto spectral density for flapwise blade root loads(Vertical) ·······	35
Fig. 31 Auto spectral density for spanwise blade root loads(Vertical) ······	36
Fig. 32 Equivalent load for blade root M_x (Horizontal) ···················	37
Fig. 33 Equivalent load for blade root M_y (Horizontal) ···················	38
Fig. 34 Equivalent load for blade root M_z (Horizontal) ···················	38
Fig. 35 Equivalent load for blade root F_x (Horizontal) ···················	39
Fig. 36 Equivalent load for blade root F_y (Horizontal) ···················	39
Fig. 37 Equivalent load for blade root F_z (Horizontal) ···················	40
Fig. 38 Equivalent load for blade root M_x (Vertical) ···················	40
Fig. 39 Equivalent load for blade root M_y (Vertical) ···················	41
Fig. 40 Equivalent load for blade root M_z (Vertical) ···················	41
Fig. 41 Equivalent load for blade root F_x (Vertical) ···················	42
Fig. 42 Equivalent load for blade root F_y (Vertical) ···················	42
Fig. 43 Equivalent load for blade root F_z (Vertical) ···················	43
Fig. 44 Equivalent load for blade root loads(Horizontal, Inverse SN slope=10) ·	44
Fig. 45 Equivalent load for blade root loads(Vertical, Inverse SN slope=10) ·	47

Nomenclature

P	출력	[W]
ρ	공기밀도	[kg/m ³]
A	회전자의 회전면적	[m ²]
V	풍속	[m/s]
C _t	추력계수, Thrust coefficient	[-]
k	후류감쇄상수, Wake decay constant	[-]
X	후류와 전방 풍력터빈 사이의 거리	[m]
D _w	후류의 직경	[m]
D ₀	전방 풍력터빈의 회전자직경	[m]
D ₁	후방 풍력터빈의 회전자직경	[m]
U ₀	전방 풍력터빈의 유입풍속	[m/s]
U ₁	후방 풍력터빈의 유입풍속	[m/s]
U _f	자유기류상의 풍속	[m/s]
δV	후방 풍력터빈에서의 풍속손실	[m/s]
A ₁	후방 풍력터빈 회전자의 회전면적	[m ²]
A _{o1}	후류단면과 후방 풍력터빈 회전자면의 중첩된 면적	[m ²]
I ₀	주변 난류강도의 백분율	[%]
D _m	중심선 풍속손실	[m/s]
D	한 지점에서의 풍속손실	[m/s]
r	후류 중심선으로부터 반경방향의 거리	[m]
ε	Eddy viscosity 후류모델의 텀(Term)	[-]
K ₁	무차원 상수	[-]
k ₁	von Karman 상수	[-]
F	여과함수	[-]
n _i	사이클 수	[-]

S_i	하중범위	[N]
P_{el}	등가하중	[N]
m	Inverse SN slope(피로강도지수의 역수)	[-]
T	시간	[s]
f	주파수	[1/s]
$\frac{\Delta\sigma}{2}$	응력진폭	[N/m ²]
$2N_f$	파괴시까지의 반복수(1반복수=1/2사이클)	[-]
σ_f'	피로강도계수	[-]
b	피로강도지수	[-]
σ_1	풍속표준편차	[m/s]
I_{ref}	기준난류강도	[-]
V_{hub}	허브높이풍속	[m/s]
V_{ref}	기준평균풍속	[m/s]
A	높은 난류특성의 카테고리	[-]
B	중간 난류특성의 카테고리	[-]
C	낮은 난류특성의 카테고리	[-]
C_p	출력계수, Power coefficient	[-]
λ	주속비, Tip speed ratio(TSR)	[-]



Summary

The wake generated by a wind turbine has an effect on performance of a downstream wind turbine as well as mechanical loads, and therefore lifetime of the wind turbine. The wake effects also increases in offshore wind farms where the turbulence intensity is lower and wake is longer since there is less turbulence to mix the flow behind an upstream wind turbine.

This paper examines the importance of the wake effects with respect to fatigue damage. In the same context, this paper also 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 aim of this study is to analyze the wake effects on calculated fatigue load on the wind turbine installed at a wind farm.

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.

I. 서 론

최근, 에너지 문제의 심각성을 인식한 세계 각 국가에서는 고갈 중인 화석연료를 대체하고, 환경적으로도 문제가 없으며, 자원의 한정이 없는 친환경 신재생에너지(New & renewable energy)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 다양한 형태의 대체에너지들 중에서, 기술적 파급효과가 크고, 경제성이 높은 풍력발전의 성장이 두드러지고 있으며, 이는 풍력터빈(Wind turbine)과 풍력단지(Wind farm)의 대형화가 급속도로 진행되는데 일조하고 있다.[1,2]

풍력발전이란, 바람이 가지는 운동에너지를 이용하여 회전자를 회전시키고, 이때 발생하는 회전력의 공력특성을 이용하여 발전기를 구동시켜 전기에너지를 생산하는 청정 무공해 에너지 발전방식으로, 에너지 자원빈국인 우리나라의 현실에 적합하여 그 성장 가능성이 매우 높은 발전방식이다.[2,3]

그러나 풍력터빈의 회전자는 뒤쪽으로 강한 후류(Wake)를 발생시키며, 후방 풍력터빈 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 특히, 오늘날에는 풍력터빈이 대형화됨에 따라, 후류의 특성을 정확하게 파악하고, 풍력터빈 사이의 상호간섭 영향을 예측하는 것은 매우 중요한 일이 되었다.[4,5]

일반적으로 풍력터빈의 출력(P)은 식 (1)과 같이 풍속의 세제곱에 비례하기 때문에, 후류에 의한 풍속손실은 반드시 고려되어야 하며, 이는 2~20%에 달하는 출력감소와 직결된다.[6,7]

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

여기서, ρ 는 공기밀도를, A 는 회전자 회전면적을, V 는 풍속을 각각 나타낸다.

이와 같은 풍속과 출력 관점에서의 후류연구는 널리 진행되어 왔으나, 피로 관점에서의 후류연구는 국내·외를 통틀어 거의 전무한 실정이다. 또한 기존의 후류 관련 연구들이 풍력터빈 배치에 관심을 갖는 풍력단지 설계에 대한 거시적 연구였다면, 본 연구는 전·후방 풍력터빈 사이의 직접적인 후류영향에 대한 미시적

연구라 할 수 있다.

Fig. 1은 덴마크 Horns Rev 해상풍력단지에서 발생하는 후류의 모습을 나타내며, 전방 풍력터빈의 뒤쪽으로 발생한 후류의 크기가 상당함을 가늠할 수 있다.



Fig. 1 Illustration of wake at offshore wind farm in Horns Rev in Denmark[8]

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.

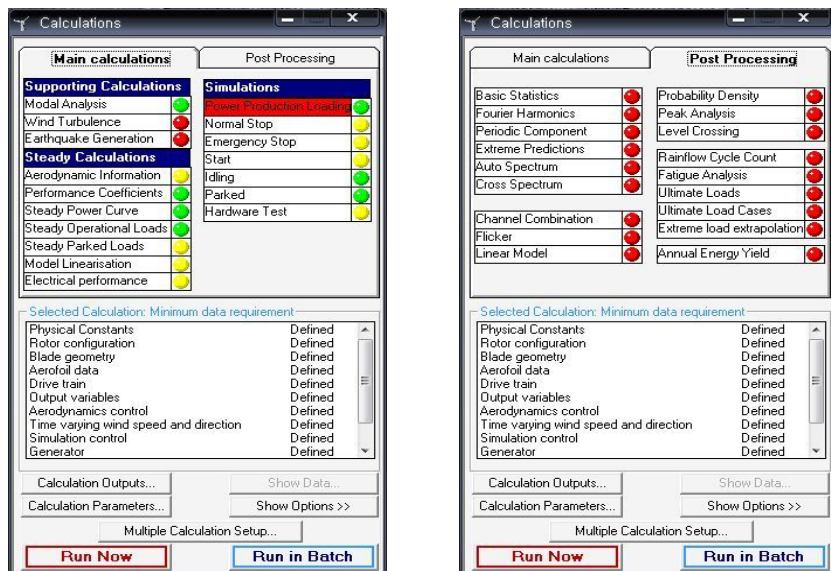
II. 해석도구 및 이론

2-1 Bladed 4.1 소프트웨어

Bladed 4.1 소프트웨어는 풍력산업에서 풍력터빈 설계를 위해 가장 범용적으로 사용되며, 풍력터빈의 모델설계, 정상상태(Steady state)해석 및 모드(mode)해석 등의 시뮬레이션이 가능한 공탄성(Aeroelastic)해석 프로그램으로 풍력터빈의 성능을 검증하는 기능도 갖추고 있다.[9]



Fig. 2 Task window of Bladed 4.1 software



(a) Main calculations

(b) Post processing

Fig. 3 Calculations window of Bladed 4.1 software

Fig. 2와 3은 Bladed 4.1 소프트웨어의 작업창(Task window)과 계산창(Calculations window)을 나타내며, 작업창에서 풍력터빈의 전반적인 제원과 바람 및 해양조건을 입력하고, 계산창의 Main calculations에서 사용자가 원하는 계산을 수행 할 수 있다. 또한 주파수 분석, 사이클 집계 등의 후처리 과정이 필요할 때, Main calculations에서 계산한 결과를 이용하여 Post processing에서 2차적인 계산을 수행 할 수 있다.

본 연구에서는 Bladed 4.1 소프트웨어에 대한 전반적인 사용설명 및 시뮬레이션 이론 보다는 실제 시뮬레이션 연구에 사용한 작업창 위주로 간략하게 설명하고자 한다. 전반적인 사용설명 및 시뮬레이션 이론은 박종식(2010)의 “MW급 풍력 터빈 피치 제어기 설계” 연구와 Bladed 4.1 소프트웨어에서 제공하는 “User manual” 및 “Theory manual”, 그리고 국제기준인 “IEC 61400-1 풍력터빈 설계 요구사항” 등을 참조하기 바란다.[9-12]

본 연구에 사용된 풍력터빈은 Bladed 4.1 소프트웨어에서 제공하는 5MW tripod 해상용 풍력터빈이며, IEC 61400-1 ed. 3의 정상난류모델(NTM; Normal turbulence model)에 따라 바람을 생성하였다.

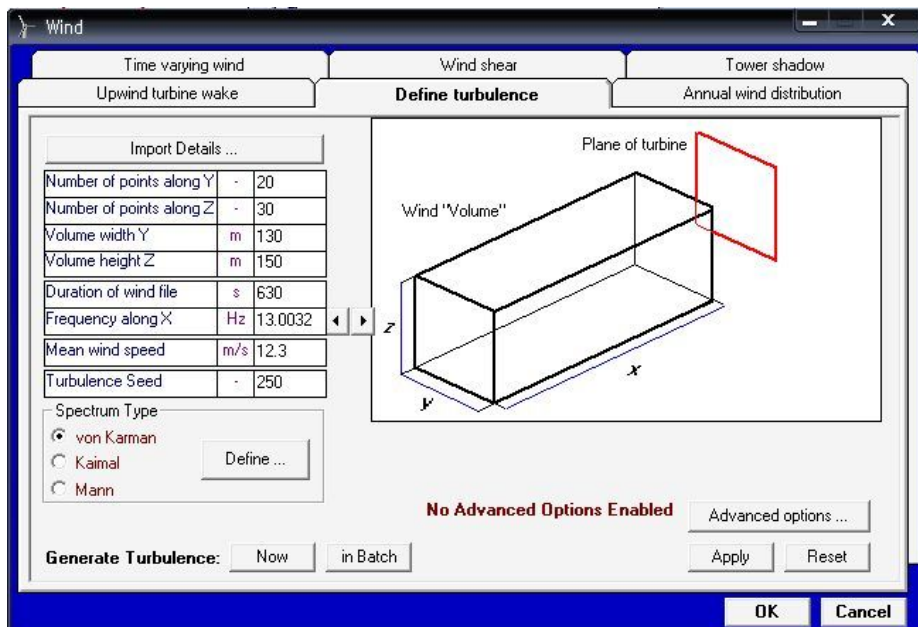


Fig. 4 Task window of define turbulence

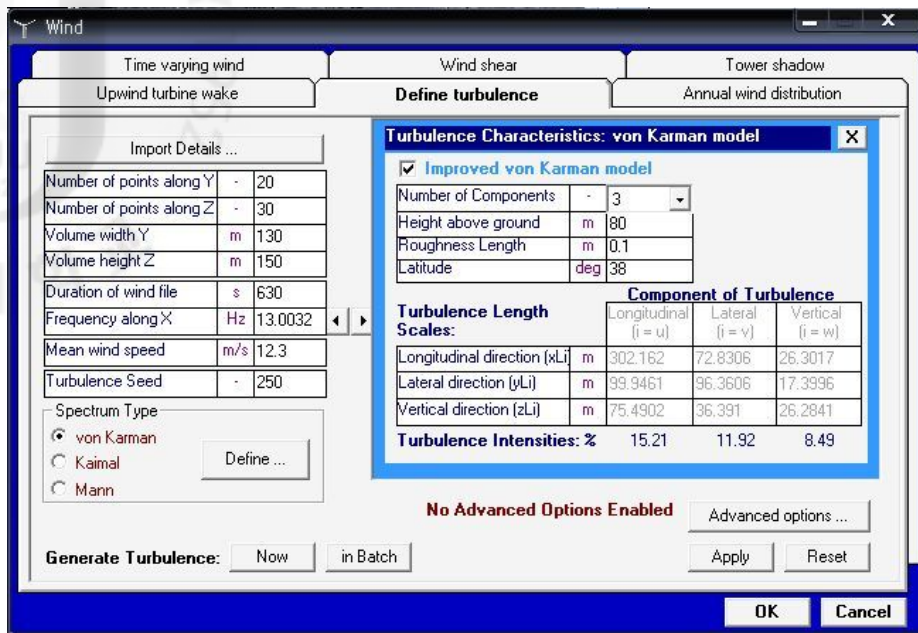


Fig. 5 Task window of improved von Karman model

Fig. 4와 5는 난류 랜덤 풍속데이터를 생성하기 위한 작업창을 나타낸다. 난류 모델이므로 10분 이상의 시간이 입력되어야 하며, 제어체적(Control volume)을 풍력터빈 전체를 에워쌀 수 있는 충분한 크기로 설정하였다. 그리고 Bladed 4.1 소프트웨어에서 지원하는 von Karman 모델, Kaimal 모델 및 Mann 모델의 3가지 난류모델 중에서, von Karman 모델이 타 난류모델에 비해 하중을 크게 예측하므로, 보다 극심한 결과를 얻고자 von Karman 모델을 선택하였다. 또한 von Karman 모델에서, 낮은 고도(Latitude)에서의 취약점을 보완하기 위해 Improved von Karman 항목을 활성화하였다.[1,13]

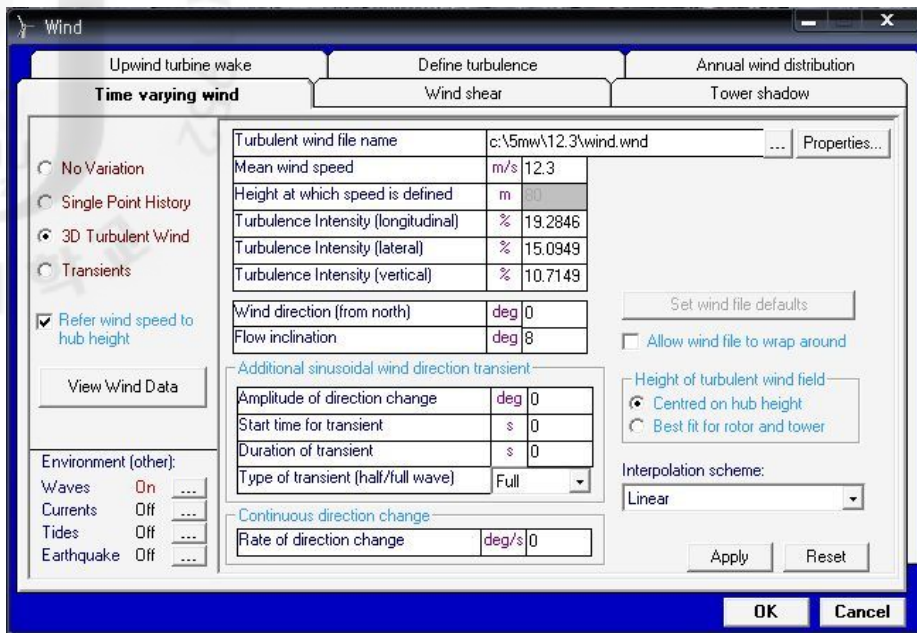


Fig. 6 Task window of time varying wind

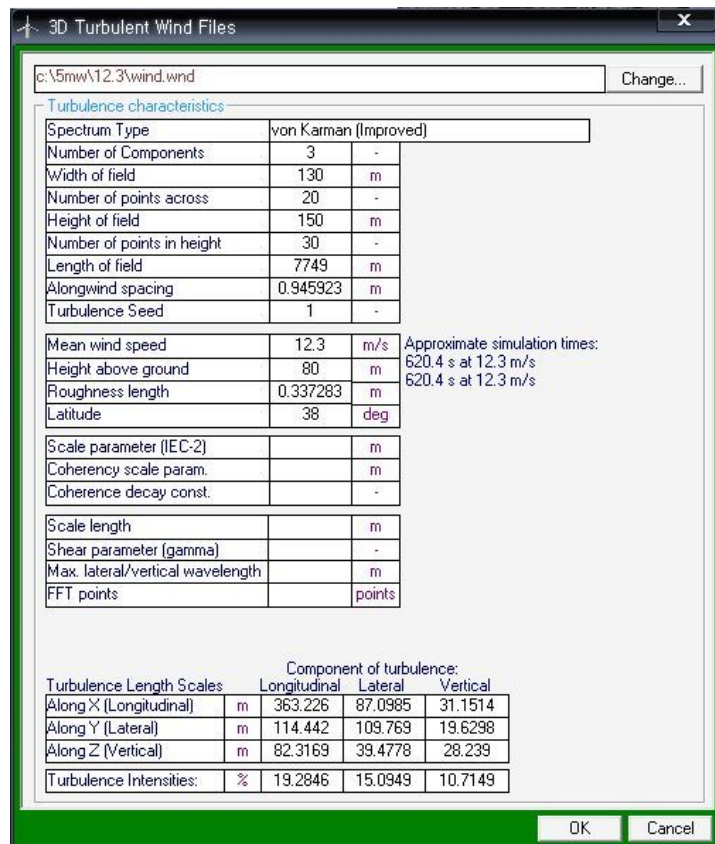


Fig. 7 Task window of turbulence characteristics

Fig. 6과 7은 IEC 61400-1 ed. 3의 정상난류모델에 따라 생성된 난류 랜덤 풍속데이터에 대한 기본정보가 포함된 작업창을 나타내며, 여기에는 평균풍속, 방향별 난류강도(TI; Turbulence intensity) 등의 난류특성이 포함되어 있다.[12]

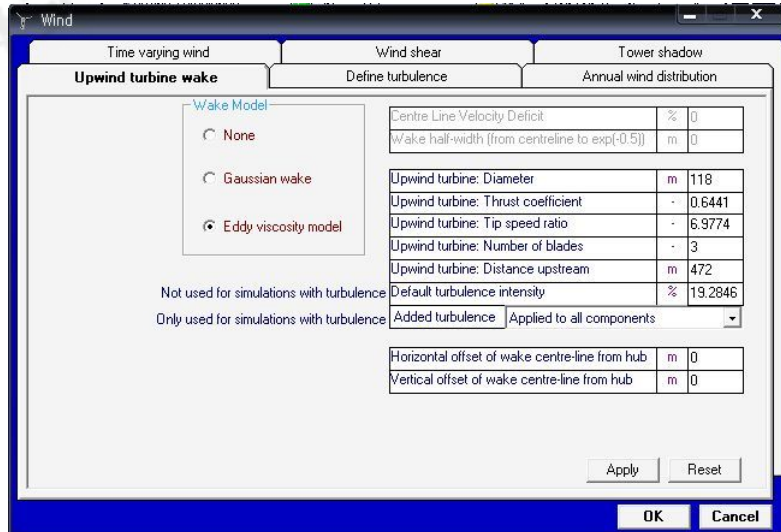


Fig. 8 Task window of upwind turbine wake

Fig. 8은 후류를 생성하기 위한 작업창을 나타낸다. 후류모델에는 PARK 모델, Gaussian 모델, Eddy viscosity 모델, Larsen 모델 등이 있으며, Bladed 4.1 소프트웨어에서는 Gaussian 모델 및 Eddy viscosity 모델의 2가지 후류모델을 지원한다. Gaussian 모델의 경우, 사용자가 후류 중심선에서의 풍속손실을 직접 계산 후 입력해야 하는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 전방 풍력터빈에 대한 제원과 후류와 전방 풍력터빈 사이의 거리를 바탕으로 정의되는 Eddy viscosity 모델을 이용하고, 후류 중심선 좌표를 변수로 설정하여 포인트별 후류를 생성하였다.[10,11]

단, Bladed 4.1 소프트웨어에서는 후류의 크기 계산을 지원하지 않아 수기 등의 다른 방법으로 계산하여야 하므로, 후류의 크기 계산에 한하여, 타 후류모델에 비해 비교적 간편한 PARK 모델을 사용하였다.

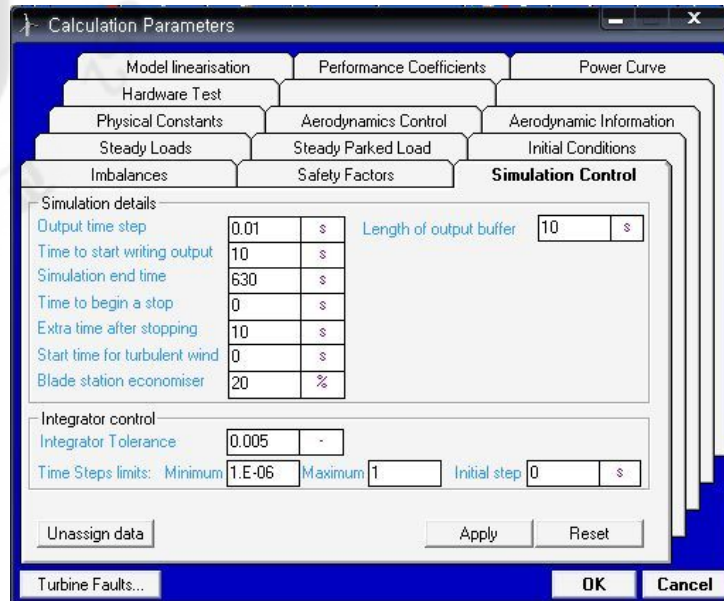


Fig. 9 Task window of simulation control

Fig. 9는 시뮬레이션 컨트롤을 위한 작업창을 나타낸다. 앞서 Fig. 4와 5에서 설명했듯이, 난류모델이므로 10분 이상의 시간이 입력되어야 하며, 시간간격을 조절하여 결과의 정확도를 높일 것인지, 아니면 계산시간을 줄일 것인지 사용자가 고려하여 설정할 수 있다.

이상 Bladed 4.1 소프트웨어에 대한 전반적인 사용설명 및 시뮬레이션 이론 보다는 실제 시뮬레이션 연구에 사용한 작업창 위주로 간략하게 설명하였다.

2-2 PARK 후류모델

PARK 모델은 N.O.Jensen(1984)과 Katic(1986) 등에 의해 제안되었으며, WAsP, Openwind 등 여러 풍력관련 소프트웨어에 구현되어 있다. 이 모델은 풍력터빈 회전자 바로 뒤에서, 추력계수(C_t)로부터 계산된 풍속손실을 가정하고, 후류의 선형 확대율과 후방 풍력터빈과의 거리를 바탕으로 설정되는 후류감쇄상수 (Wake decay constant)를 경험적으로 결정한다. PARK 모델은 지형에 따른 후류의 영향을 포함한 바람의 유동을 가정하며, 후류의 영향은 전방 풍력터빈으로부터 생성된 후류의 단면과 후방 풍력터빈의 회전자면을 중첩시킴으로서 고려될 수 있다. 이에 대한 기본개념을 Fig. 10과 11에 나타내었다.[14]

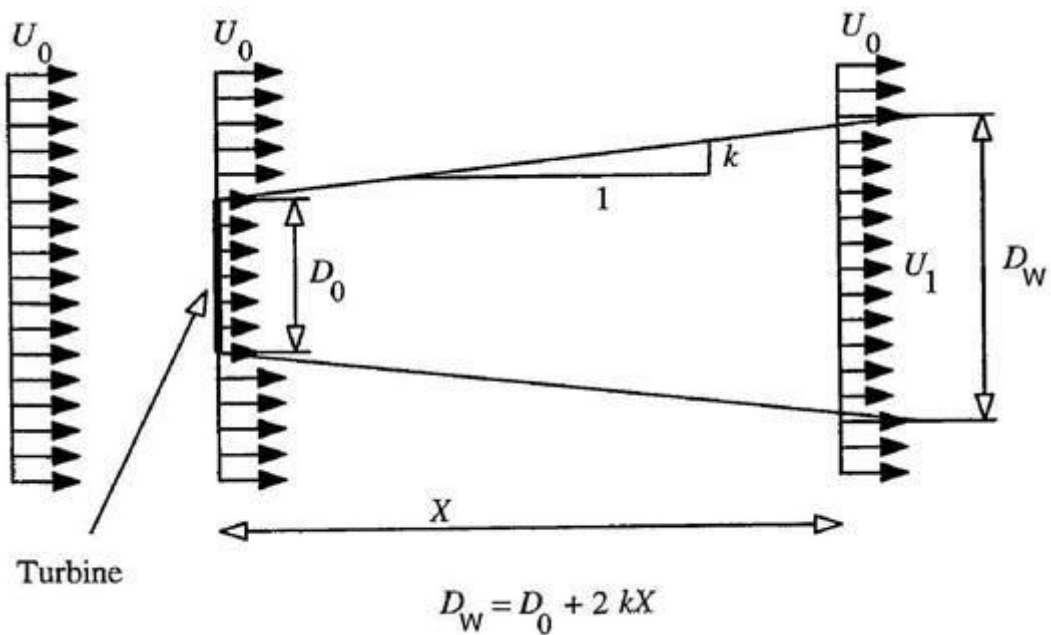


Fig. 10 Overview of PARK wake model[15]



Fig. 11 Plan view of upstream turbine in the wake downstream turbine[14]

후방 풍력터빈에서의 풍속손실(δV)은 Katic(1986) 등이 제안한 식 (2)와 같이 계산된다.[14]

$$\delta V = U_0 \cdot (1 - \sqrt{1 - C_t}) \cdot \left(\frac{D_0}{D_0 + 2kX} \right)^2 \cdot \frac{A_{ol}}{A_1} \quad (2)$$

여기서, U_0 는 회전자직경이 D_0 인 풍력터빈의 유입풍속이다. C_t 는 추력계수를, k 는 후류감쇄상수를, X 는 후류와 전방 풍력터빈 사이의 거리를 각각 나타낸다. 또한 A_1 은 후방 풍력터빈 회전자의 회전면적을, A_{ol} 은 후류단면과 후방 풍력터빈 회전자면의 중첩된 면적을 각각 나타낸다. 후방 풍력터빈의 유입풍속은 자유기류상의 풍속과 식 (2)에 의해 계산된 후류손실의 차로 결정된다.[14]

한편, Fig. 12는 PARK 모델의 Contour plot을 나타내며, 본 연구에서는 후류의 크기를 추정하기 위하여, PARK 모델을 사용하였다.

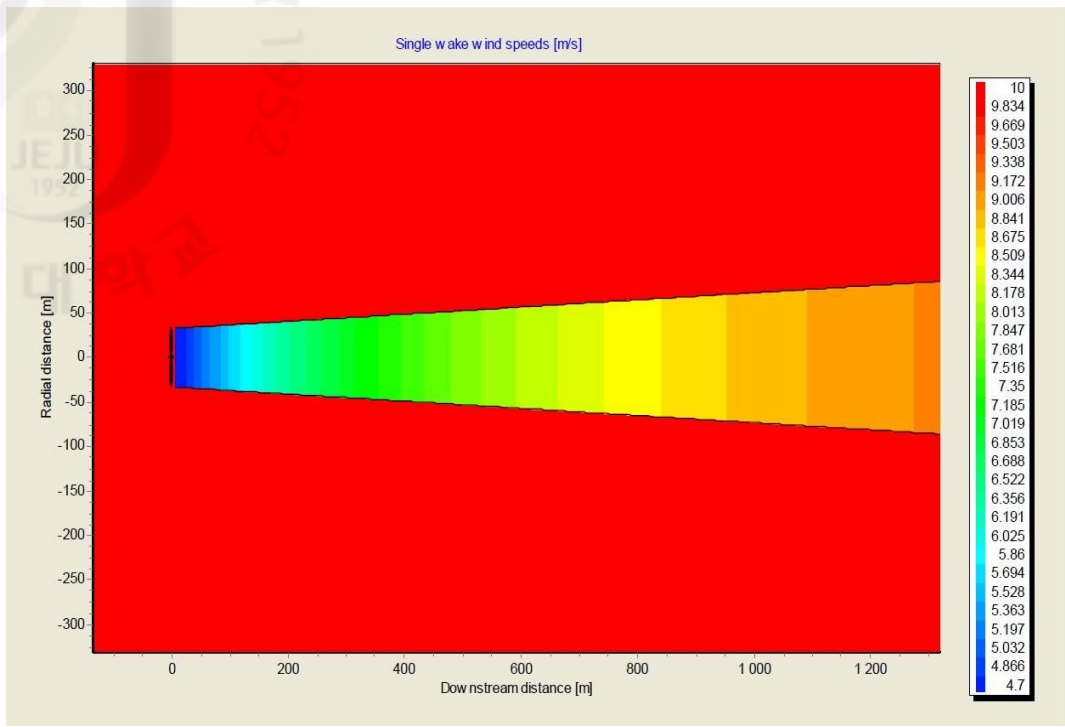


Fig. 12 Wake development after a single turbine of PARK wake model[7]

2-3 Eddy viscosity 후류모델

Eddy viscosity 모델은 Ainslie(1988)에 의해 제안되었으며, Bladed, Openwind 등 여러 풍력관련 소프트웨어에 구현되어 있다. 이 모델은 후류 풍속손실에 대해 나타내며, 이에 대한 기본개념은 Fig. 13과 같다.

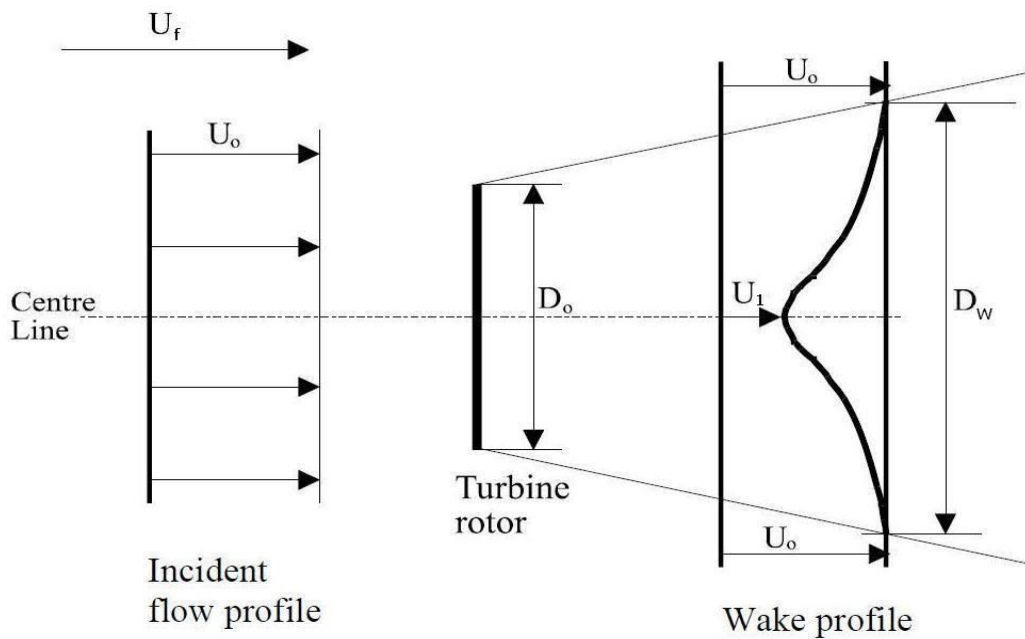


Fig. 13 Wake profile used in eddy viscosity wake model[11]

이 풍속손실은 후류 주변에서 자유기류상의 바람과 함께 혼합되면서 수정된다. 혼합율은 주변 난류강도에 의해 결정되며, 주변 난류강도가 클수록, 혼합율은 더 커지고, 후류손실은 더 작아진다. 회전자에 유입되는 풍속과 관련된 중심선 풍속 손실(D_m)은 식 (3)과 같다.[14]

$$D_m = C_t - 0.05 - (16C_t - 0.5) \frac{I_0}{1000} \quad (3)$$

여기서, C_t 는 추력계수를, I_0 는 주변 난류강도의 백분율을 각각 나타낸다.

후류 풍속손실을 자유기류상의 한 부분으로 변환하기 위하여, 손실은 자유기류상의 풍속(U_f)과 전방 풍력터빈 유입풍속(U_0)의 비로 측정된다. 반경방향의 후류 손실 프로파일이 점차적으로 부서지긴 하지만, 후류의 직경은 후방 풍력터빈과의 거리가 증가함에 따라 같이 증가한다. 후류의 직경(D_w)은 식 (4)와 같이 주어진다.[14]

$$D_w = \sqrt{\frac{3.56C_t}{8D_m(1-0.5D_m)}} \quad (4)$$

Eddy viscosity 모델은 중심선을 따라 풍속손실을 반영한다. 이 풍속손실은 후방 풍력터빈의 한 지점에서 식 (5)와 같은 Gaussian 분포형태의 풍속 프로파일을 설명하는데 사용된다.[14]

$$D = U_0(1 - D_m e^{-3.56 \frac{r^2}{D_w^2}}) \quad (5)$$

여기서, D 는 한 지점에서의 풍속손실을, U_0 는 전방 풍력터빈 유입풍속을, r 은 후류 중심선으로부터 반경방향의 거리를, D_w 는 후류의 직경을, D_m 은 중심선 풍속손실을 각각 나타낸다.

Eddy viscosity 모델을 이용한 후류 내의 각 풍력터빈에서, 유입 난류강도는 주변 난류강도로 이동하고, 이 값은 후방 풍력터빈에서의 후류계산에 사용된다. 난류강도는 식 (6)과 같은 Eddy viscosity 모델 계산에 영향을 미친다.[14]

$$\begin{aligned} \varepsilon &= FK_1 D_w (U_f - U_1) + K_m \\ K_m &= Fk_1^2 \frac{I_0}{100} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, ε 은 Eddy viscosity 모델의 텀(Term)을, K_1 은 무차원 상수 0.015를,

D_w 는 후류의 직경을, U_f 는 자유기류상의 풍속을, U_1 은 후류 중심선 풍속을, k_1 은 von Karman 상수를, I_0 는 주변 난류강도 백분율을, F 는 식 (7)과 같은 여과함수를 각각 나타낸다. 여기서 여과함수란, 특정 주파수를 통과 또는 제거시키기 위한 함수를 말한다.

$$F=1.0 \quad \text{for } x > 5.5 \quad (7)$$

$$F=0.65 + \left(\frac{x-4.5}{23.32} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{for } x < 5.5$$

여기서, x 는 회전자로부터 후방풍력터빈 사이의 거리이며, 여과함수가 비활성화 되었을 때, F 는 1.0이다.[14]

한편, Fig. 14는 Eddy viscosity 모델의 Contour plot을 나타내며, 본 연구에서는 후류에 의한 풍력터빈의 피로하중 특성을 예측하고 분석하기 위하여, Eddy viscosity 모델을 사용하였다.

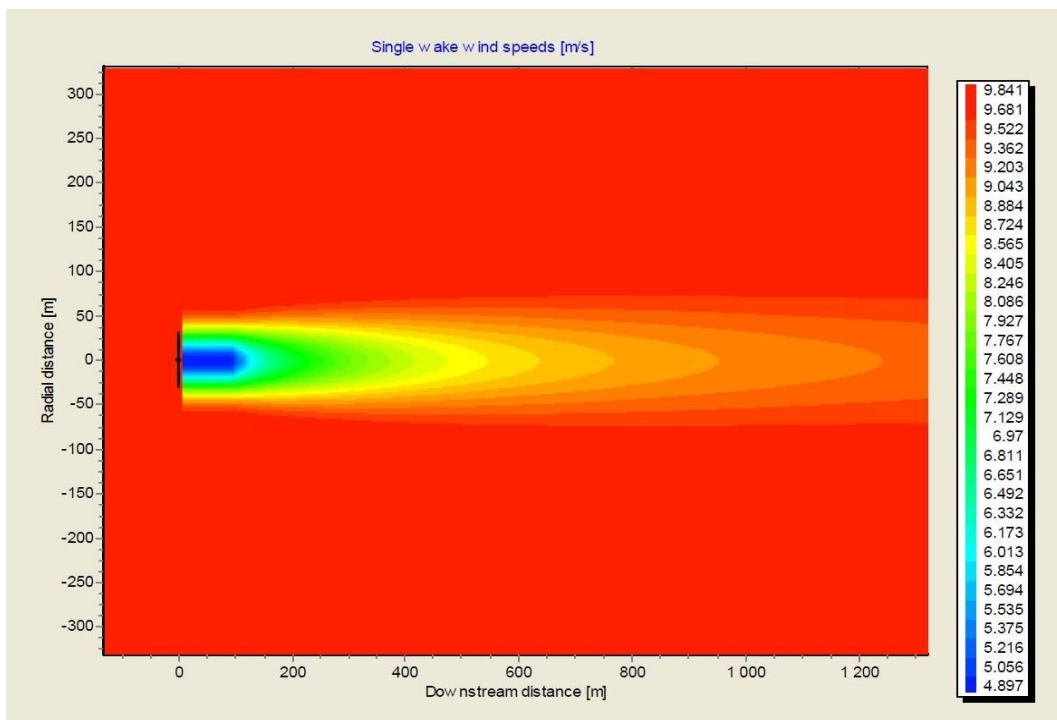


Fig. 14 Wake development after a single turbine of eddy viscosity wake model[7]

2-4 등가하중

하중 스펙트럼으로부터 피로에 대한 영향을 설명하기 위해, 등가하중 (Equivalent load)의 개념이 사용된다. 일반적으로 등가하중은 서로 다른 모든 크기의 하중 합에 대해 동일한 피로 손상을 줄 수 있는 단 하나의 하중크기로 결정되며, 복잡한 하중 스펙트럼을 상당히 단순화 시킬 수 있다. 또한 등가하중은 가해지는 서로 다른 하중들에 대한 상대적인 손상 가능성의 정도를 평가할 수 있는 좋은 방법이 될 수 있으며, 재료의 성질에 따라 좌우되는 값이다. 등가하중 P_{el} 은 식 (8)과 같은 형태로 사용된다.[16]

$$P_{el} = \left(\frac{\sum_i n_i S_i^m}{Tf} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

여기서, n_i 는 사이클 수를, S_i 는 하중범위를, m 은 Inverse SN slope(피로강도지수의 역수)를, T 는 시간을, f 는 주파수를 각각 나타낸다. Inverse SN slope에 대한 일반적인 값은 용접 스틸일 경우 3, 압출 알루미늄일 경우 6, 유리섬유 복합재일 경우 10의 값을 갖는다.[11,16]

본 연구에서는 하중 계산결과를 바탕으로 후류에 의한 풍력터빈의 피로하중 특성을 분석하기 위하여, 레인플로카운트 기법과 등가하중 개념을 사용하였으며, 이 때, Inverse SN slope는 3~12까지 설정하였다.

2-5 피로의 지수법칙

1910년, Basquin은 SN 관계를 대수좌표 위에 직선으로 나타낼 수 있음을 보여주었고, 그것에 의해 식 (9)와 같이 피로의 지수법칙을 설정하였다.[17]

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_f' (2N_f)^b \quad (9)$$

여기서, $\frac{\Delta\sigma}{2}$ 는 응력진폭을, $2N_f$ 는 파괴시까지의 반복수(1반복수=1/2사이클)를, σ_f' 는 피로강도계수를, b 는 피로강도지수(Baquin지수)를 각각 나타낸다. σ_f' 와 b 는 재료의 피로특성치이며, σ_f' 는 σ_f 와 거의 동일하다. 또한 b 는 일반적으로 -0.05와 -0.12 사이의 값을 갖는다.[17]

피로강도지수 b 는 앞서 설명한 증가하중에서 Inverse SN slope m 과 서로 역수관계에 있으며, 재료의 성질에 따른 고유한 값으로, 본 연구에서는 레인플로카운트를 통한 증가하중을 계산하는데 피로의 지수법칙과 피로강도지수 개념을 사용하였다.

Ⅲ. 연구 방법

풍력터빈의 후류에 의한 피로하중 특성을 연구하기 위해서는 먼저 대상 풍력터빈 모델 선정 후, 바람과 후류가 정의되어야 하며, 후류 중심선 좌표에 따른 후방 풍력터빈의 하중을 계산하고, 이를 바탕으로 주파수 분석 및 레인플로카운트를 통한 등가하중이 계산되어야 한다. 이에 대한 본 연구의 구체적인 플로차트는 Fig. 15와 같다.

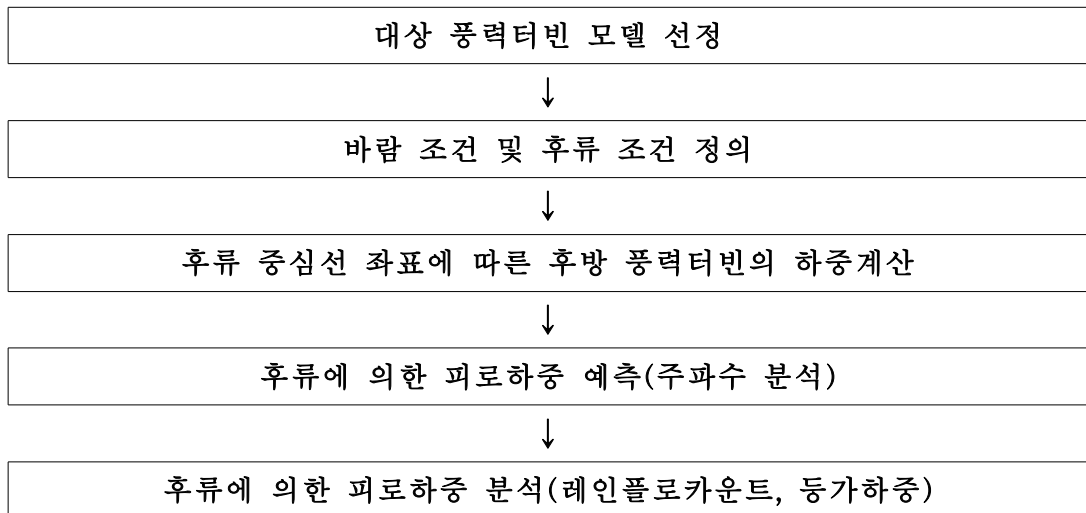


Fig. 15 Flow chart of this study

3-1 풍력터빈 모델

본 연구에 사용된 풍력터빈은 Bladed 4.1 소프트웨어에서 제공하는 5MW tripod 해상용 풍력터빈이다. Table 1과 Fig. 16에 풍력터빈의 주요제원과 형상을 각각 나타내었다.

Table 1 Main specification of 5MW tripod offshore wind turbine

Rotor diameter	118m
Number of blades	3
Teeter hinge	No
Hub height	80m
Offset of hub to side of tower centre	0m
Tower height	78m
Tilt angle of rotor to horizontal	4deg
Cone angle of rotor	0deg
Blade set angle	-3deg
Rotor overhang	6m
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
Diameter of spinner	6m
Radial position of root station	2m
Extension piece diameter	2.5m
Extension piece drag coefficient	1
Cut in wind speed	3.5m/s
Rated wind speed	12.3m/s
Cut out wind speed	25m/s
Rotor speed	13.89RPM



Fig. 16 Figure of 5MW tripod offshore wind turbine

3-2 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, 정상난류모델에서의 난류강도를 식 (10)과 (11)로 계산하였다.[12]

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) \quad (10)$$

$$b = 5.6$$

$$I_{ref} = 0.16$$

$$TI = \frac{\sigma_1}{V_{hub}} \quad (11)$$

여기서, 상수 b는 IEC 61400-1 ed. 3에 5.6으로 제시되어 있으며, 기준난류강도 I_{ref} 는 풍력터빈 클래스에서 난류특성에 따라 결정되는 값이다. 본 연구에서는 Table 2와 같이 클래스IIA 사이트에 적용시키고자 0.16으로 설정 후, 난류강도를 계산하여, 19.2846%의 값을 얻었다. 생성된 풍속데이터는 Fig. 17과 같다.[12]

Table 2 Basic parameters for wind turbine classes[12]

Wind turbine class	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	Values specified by the designer
A I_{ref} (-)	0.16			
B I_{ref} (-)	0.14			
C I_{ref} (-)	0.12			

여기서, V_{ref} 는 10분기준 평균풍속을, A는 높은 난류특성의 카테고리, B는 중간 난류특성의 카테고리, C는 낮은 난류특성의 카테고리, I_{ref} 는 기준난류강도를 각각 나타낸다.

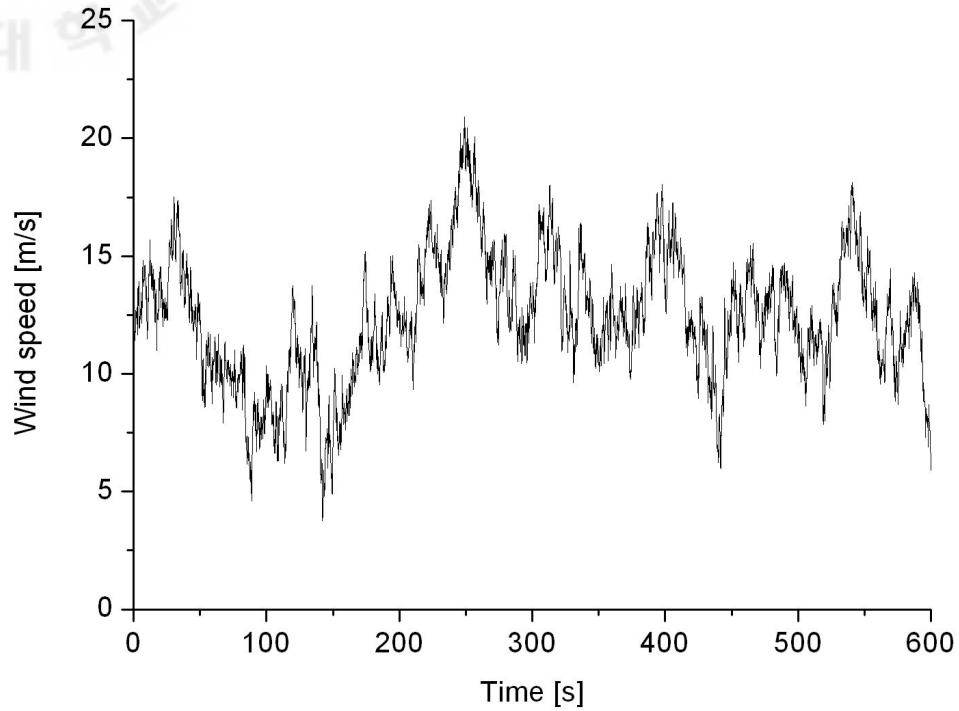


Fig. 17 Wind speed data for NTM(12.3m/s)

3-3 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 Table 3과 같은 데이터가 필요하다.

Table 3 Input data of eddy viscosity wake model

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%

여기서, 추력계수(C_t)와 주속비(λ ; TSR)는 Table 4와 같이 정격풍속인 12.3m/s 일 때의 값이며, 이 정격풍속은 Fig. 18과 같이 풍력터빈의 출력곡선(Power curve)을 그려봄으로서 계산할 수 있다.

한편, 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 풍력터빈 모델에서도 본 연구의 결과를 적용할 수 있도록 육상용의 최소치인 4배(4D)로 설정하였다.[18]

Table 4 C_p , C_t and λ (TSR) value for hub wind speed

Hub wind speed [m/s]	Power coefficient(C_p)	Thrust coefficient(C_t)	Tip speed ratio(λ ; TSR)
11.8	0.4469	0.6758	7.2730
11.9	0.4455	0.6713	7.2119
12	0.4439	0.6667	7.1518
12.1	0.4423	0.6620	7.0927
12.2	0.4406	0.6574	7.0346
12.3	0.4362	0.6441	6.9774
12.4	0.4259	0.6151	6.9211
12.5	0.4157	0.5906	6.8657
12.6	0.4059	0.5687	6.8113
12.7	0.3964	0.5488	6.7577
12.8	0.3871	0.5302	6.7048

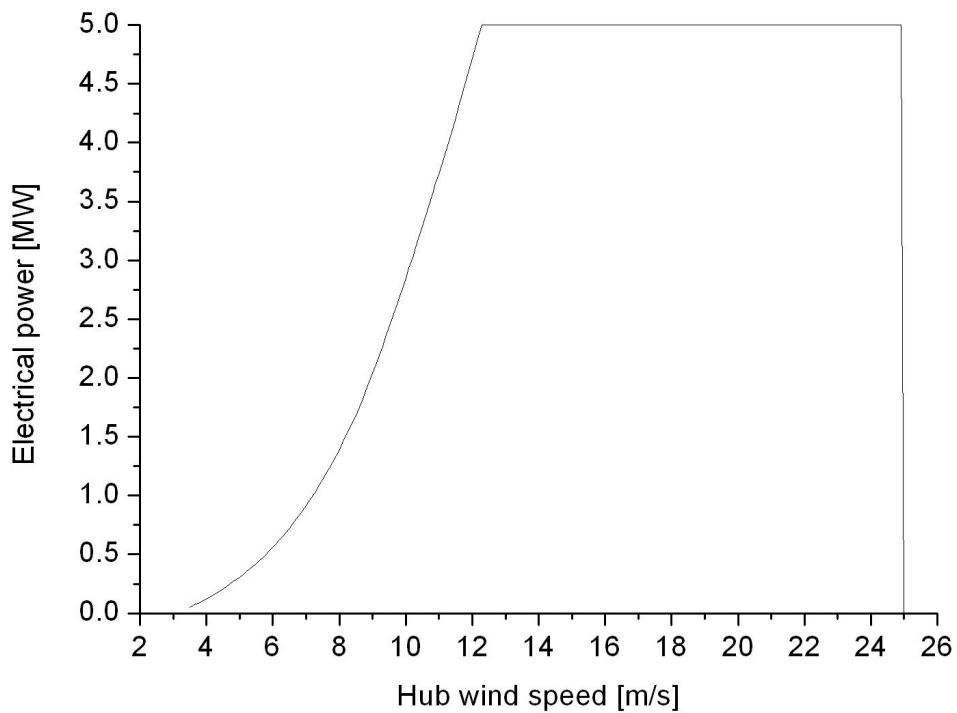


Fig. 18 Power curve of 5MW tripod offshore wind turbine

3-4 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 Fig. 19와 같이 수평방향과 수직방향으로 영향을 미친다고 가정 후, 10m의 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.

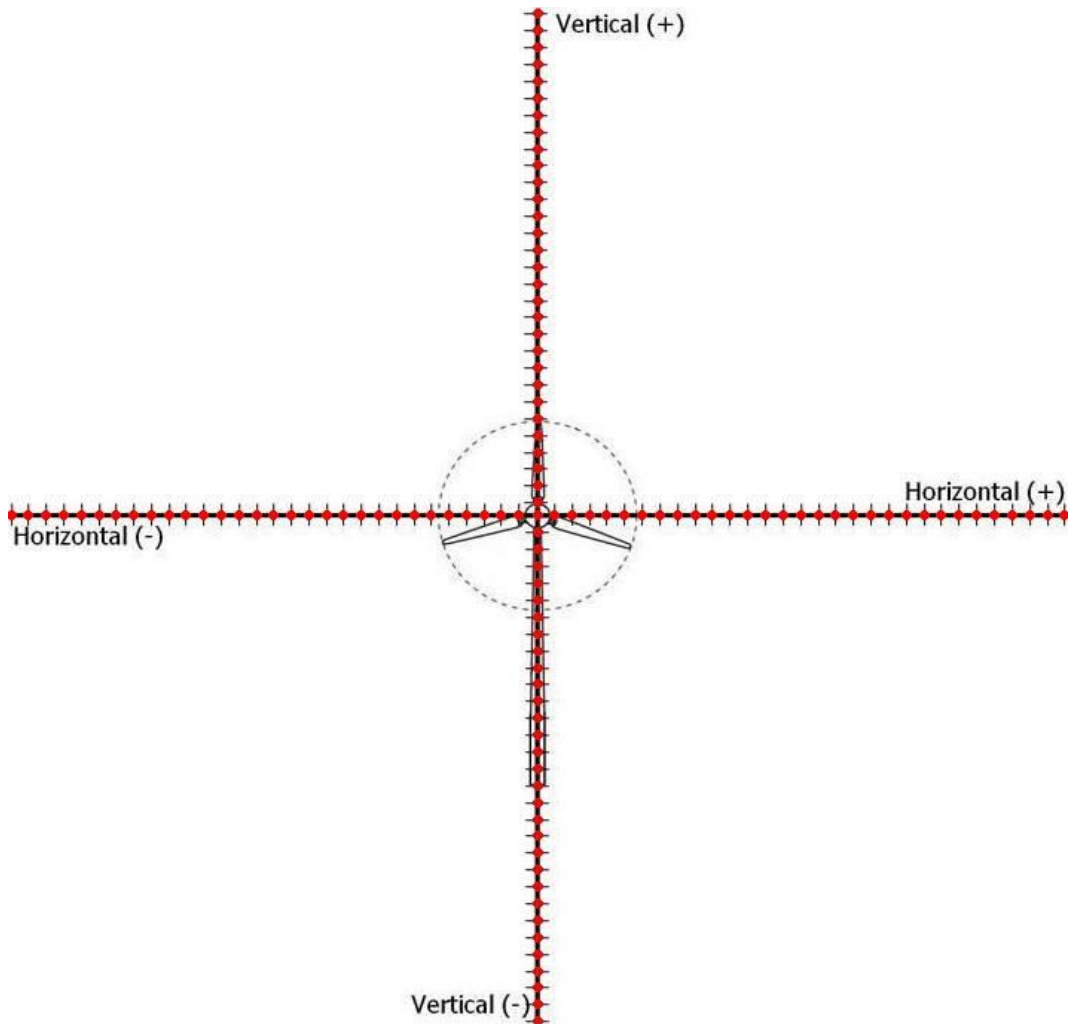


Fig. 19 Offset of wake's center line

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.

3-5 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 (12)를 이용하여 후류의 직경(D_w)을 계산하였다.[14]

$$D_w = D_0 + 2kX \quad (12)$$

여기서, D_0 는 전방 풍력터빈의 회전자직경이며, X 는 후류와 전방 풍력터빈 사이의 거리이다. k 는 후류감쇄상수로, RISO에서는 육상용일 때 0.075를, 해상용일 때 0.050을 권장하고 있다. 따라서 본 연구에 사용된 해상용 모델에서 생성된 후류의 직경은 165.2m로 전방 풍력터빈 회전자직경의 약 1.4배(1.4D)에 해당한다.[19]

IV. 결과 및 고찰

이상의 자료를 바탕으로 풍력터빈이 발전 상태일 때, 각 연구 케이스별 블레이드 루트에 작용하는 하중을 계산하였다. 그리고 이 하중결과를 주파수 분석을 통하여 피로하중을 정성적으로 예측하였다. 또한 앞서 계산한 하중결과를 다시, 사이클 집계 방법 중 하나인 레인폴로카운트를 통하여 등가하중을 정량적으로 계산하였다.

4-1 블레이드 좌표계

Fig. 20은 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.

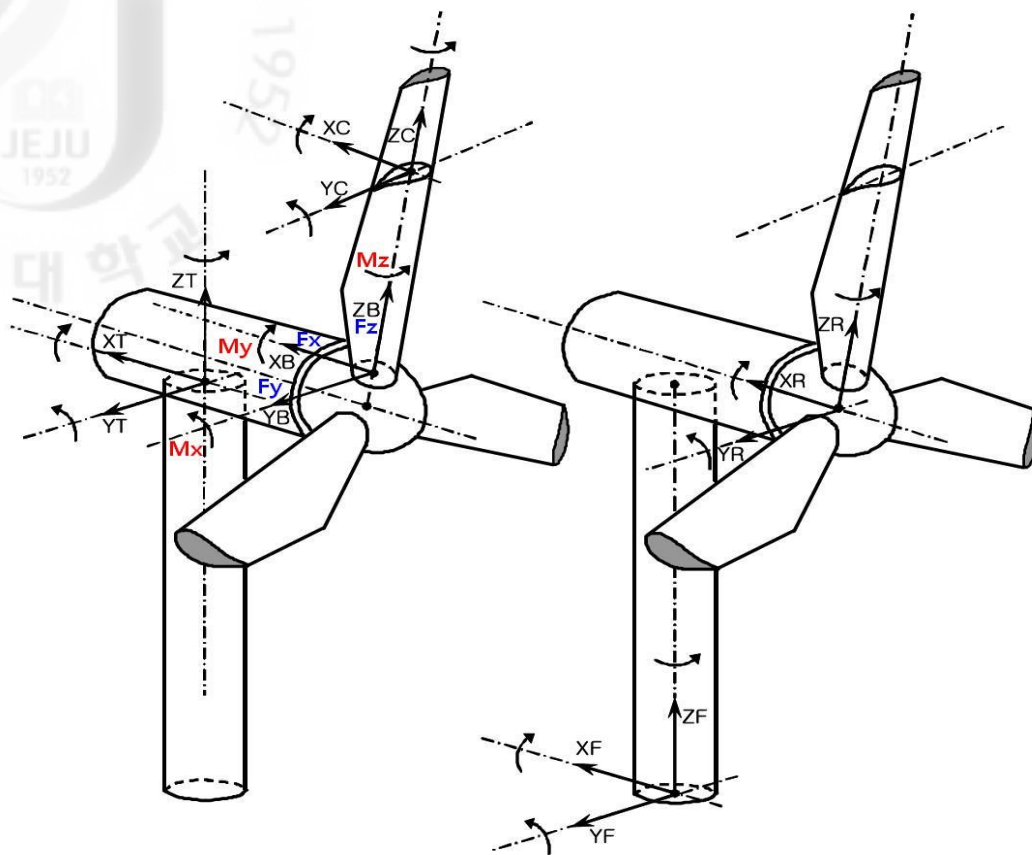


Fig. 20 Co-ordinate system of wind turbine[20]

4-2 후류에 의한 하중 계산

본 연구에서는 수평·수직 및 Flap방향, Edge방향, Span방향의 총 6가지 하중요소에 대하여, 후방 풍력터빈 회전자면에 유입되는 후류의 중심선 변화에 따른 블레이드 루트의 하중을 총 121가지 케이스에 대하여 계산하였으며, 대표적으로 회전자면의 중심과 좌·우·하·상단 팁에서의 5가지 케이스에 대한 하중 계산결과를 Fig. 21~25에 나타내었다.

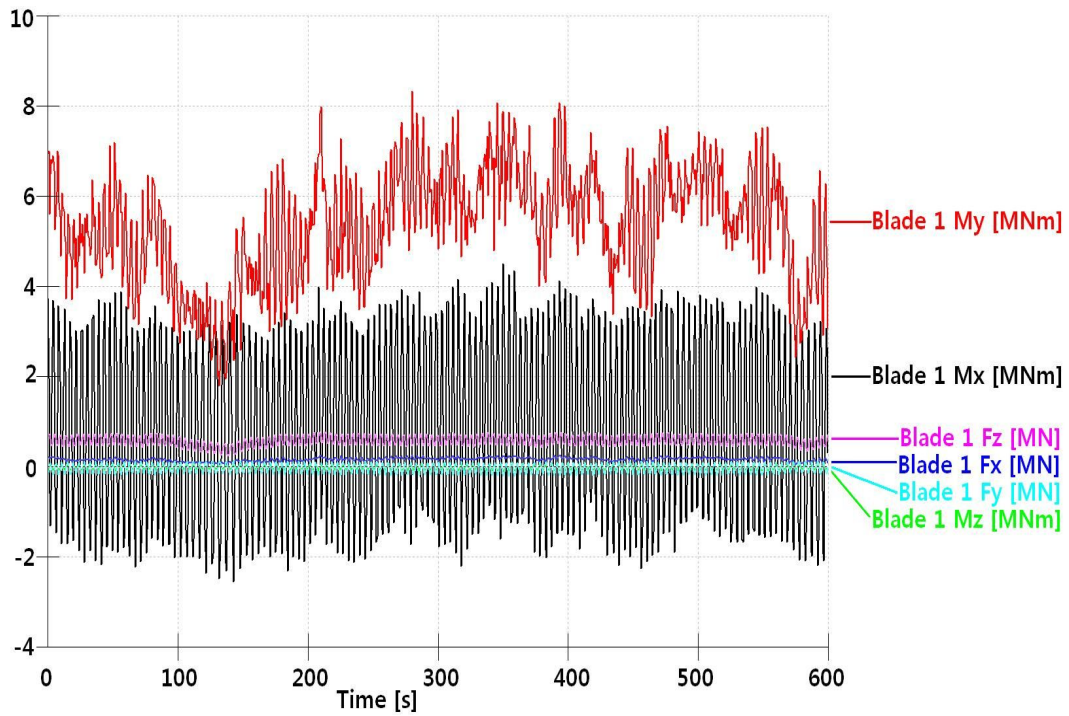


Fig. 21 Simulation data for center loads(0,0)

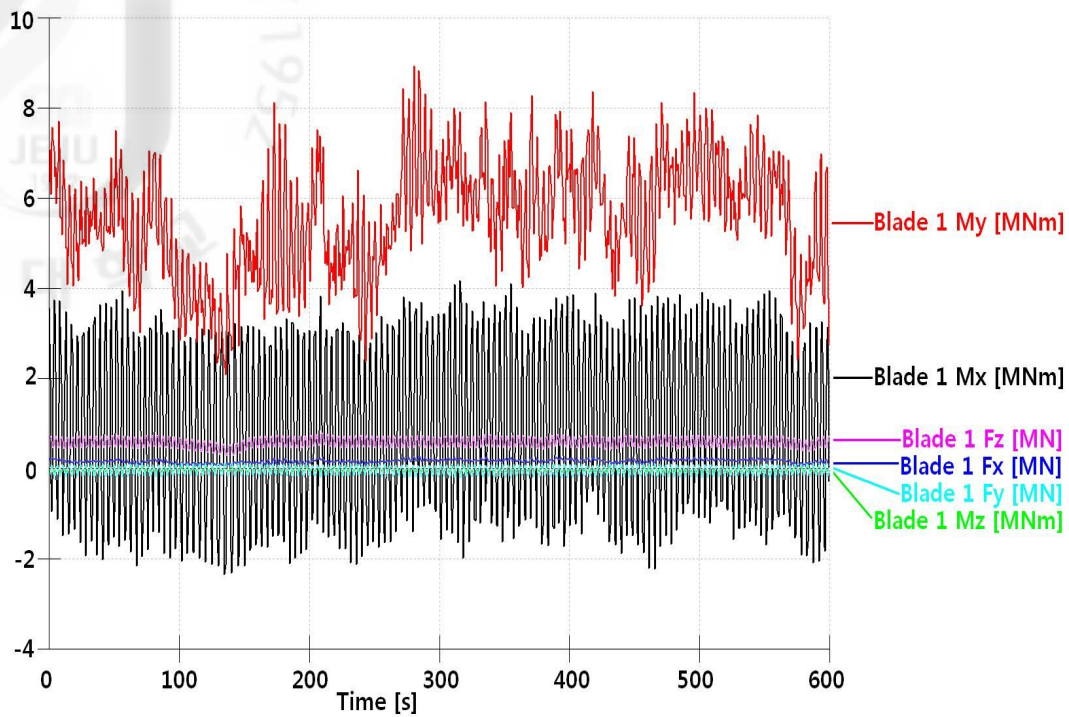


Fig. 22 Simulation data for tip loads(-59,0)

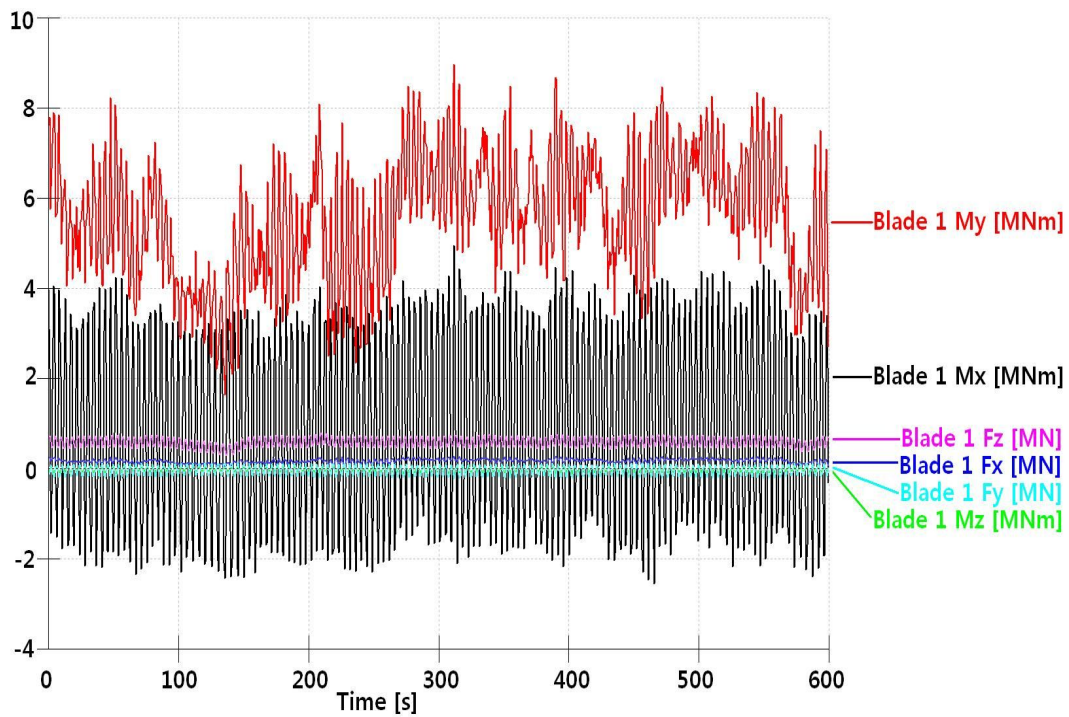


Fig. 23 Simulation data for tip loads(59,0)

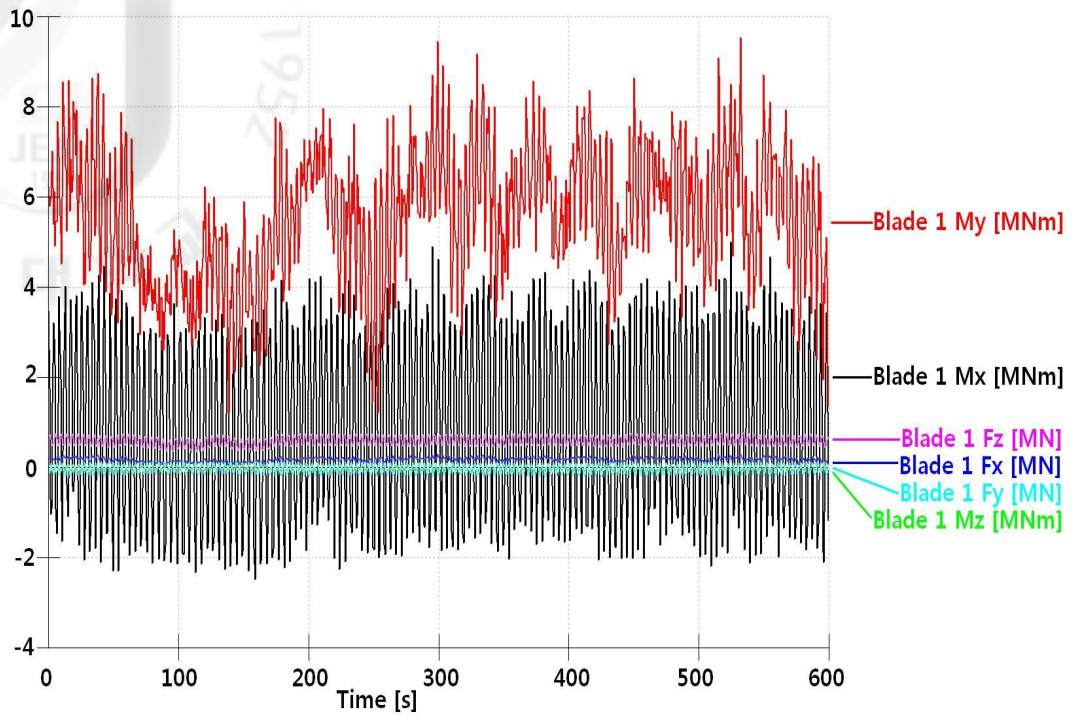


Fig. 24 Simulation data for tip loads(0,-59)

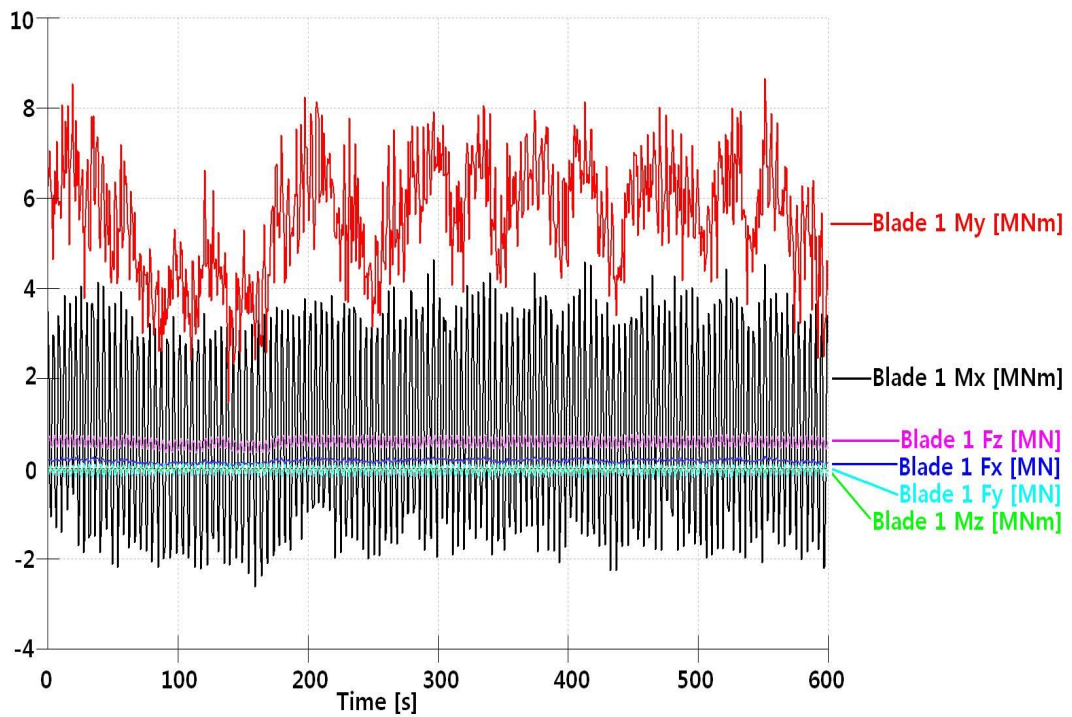


Fig. 25 Simulation data for tip loads(0,59)

상기 결과들에서 Edge방향 모멘트인 M_x 는 수시로 계속하여 교번되고 있으며, 이는 블레이드의 회전과 관계가 있다고 추정된다. 그리고 Flap방향 모멘트인 M_y 가 상당히 크게 발생함을 알 수 있는데, 이는 블레이드가 바람의 직접적인 영향을 받기 때문이라 추정된다. 또한 상기 결과들을 종합하여 볼 때, 차이를 정확히 파악할 수는 없으나, 후류의 중심선 변화에 따라 분명 하중 그래프가 달라짐을 알 수 있다. 이 차이를 면밀히 분석하기 위하여, 본 연구에서는 하중 계산결과에 대한 Post processing 과정으로 주파수 분석과 레인플로카운트를 통한 등가하중 계산을 수행하였다.

4-3 후류에 의한 피로하중 예측

본 연구에서는 후방 풍력터빈 회전자면에 유입되는 후류의 중심선 변화에 따른 블레이드 루트의 피로하중을 주파수 분석을 통하여 정성적으로 예측하였으며, 그 결과는 Fig. 26~31과 같다.

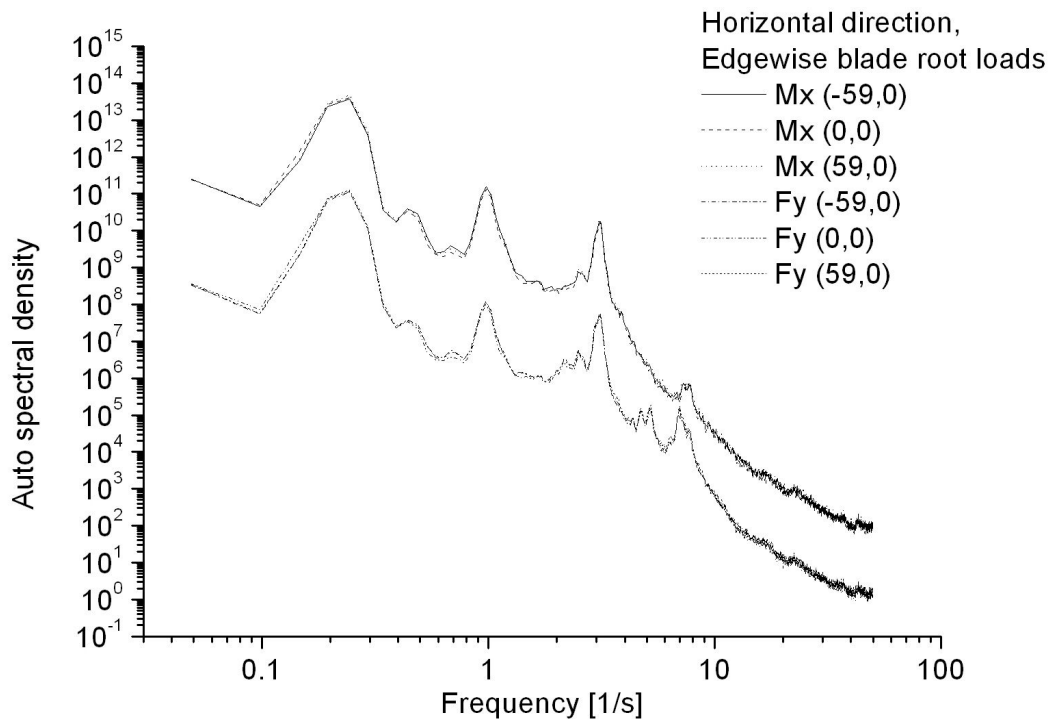


Fig. 26 Auto spectral density for edgewise blade root loads(Horizontal)

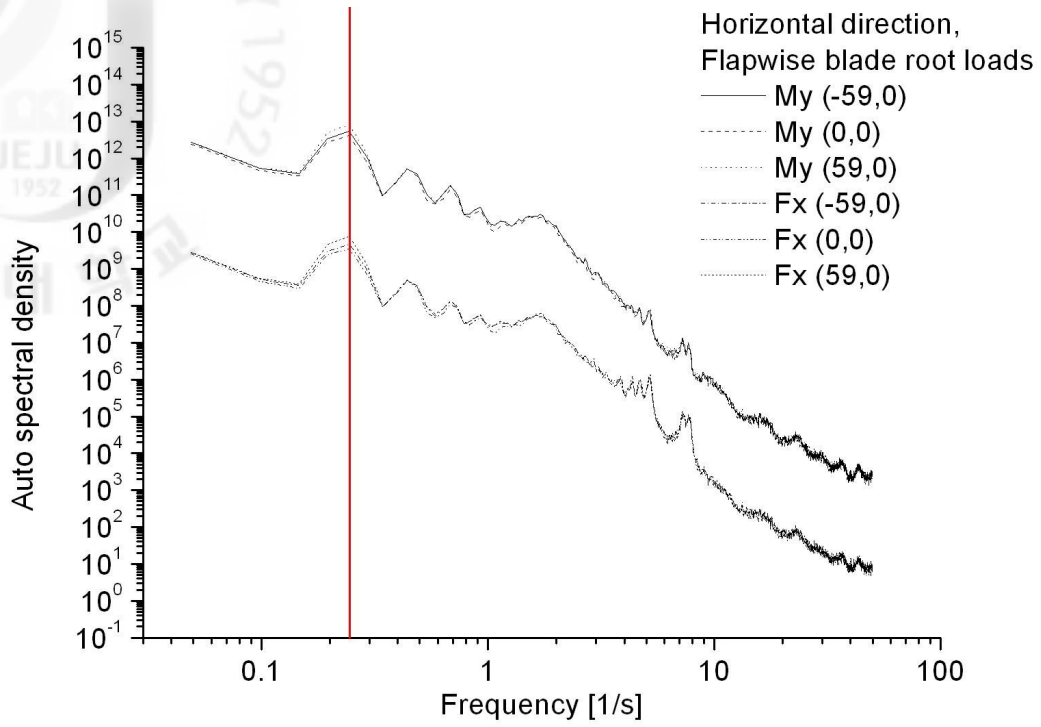


Fig. 27 Auto spectral density for flapwise blade root loads(Horizontal)

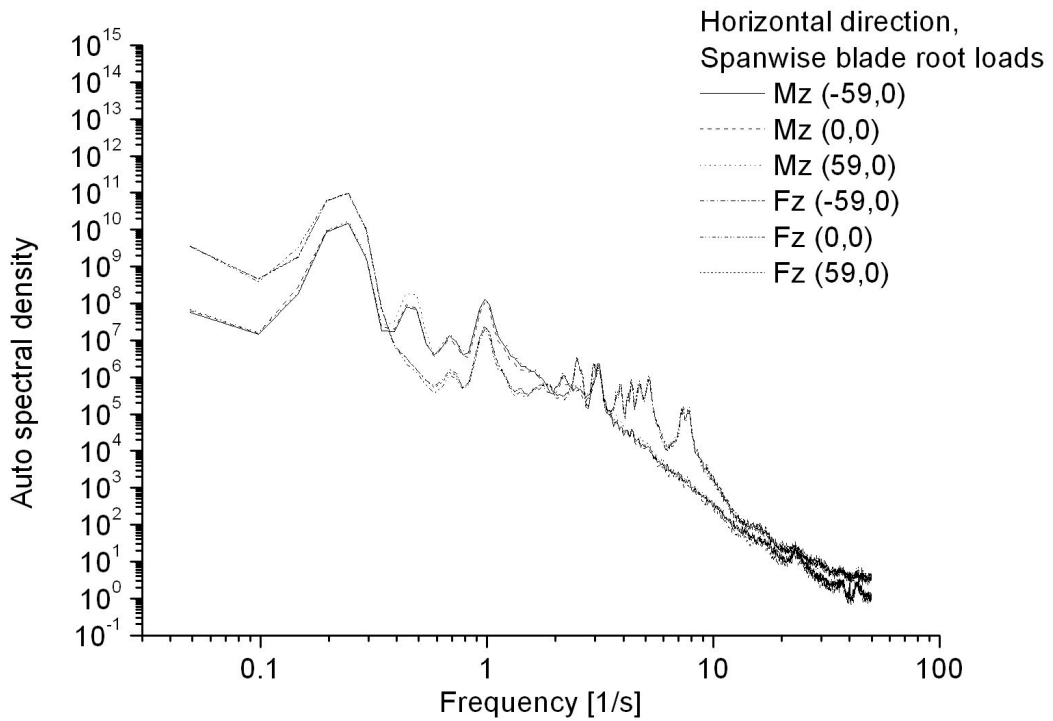


Fig. 28 Auto spectral density for spanwise blade root loads(Horizontal)

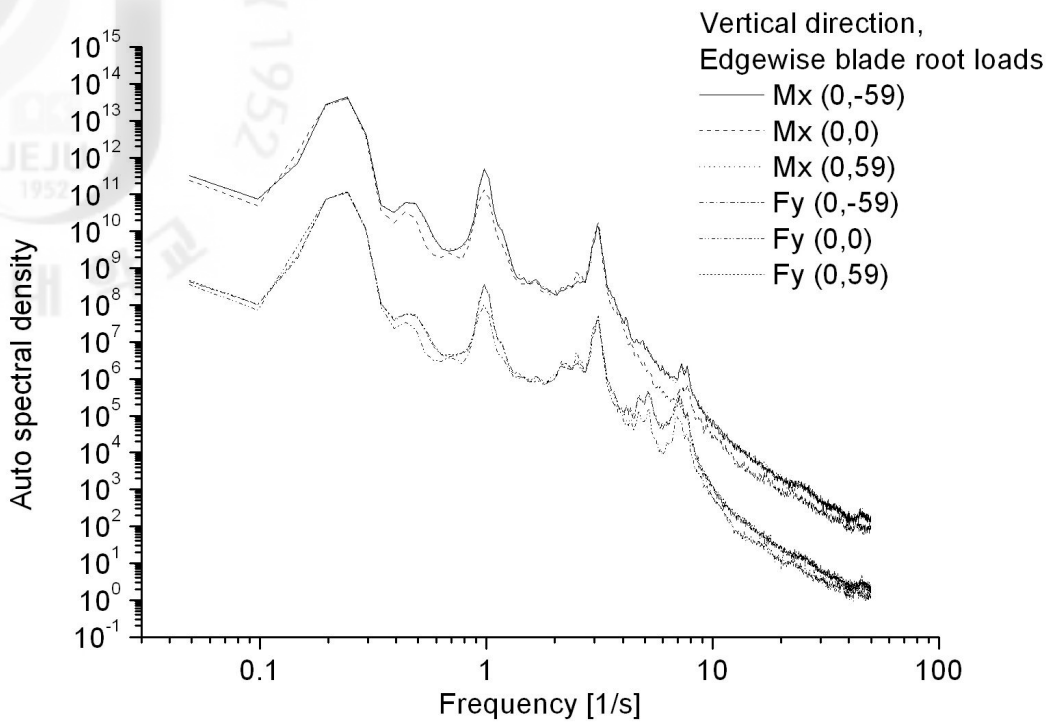


Fig. 29 Auto spectral density for edgewise blade root loads(Vertical)

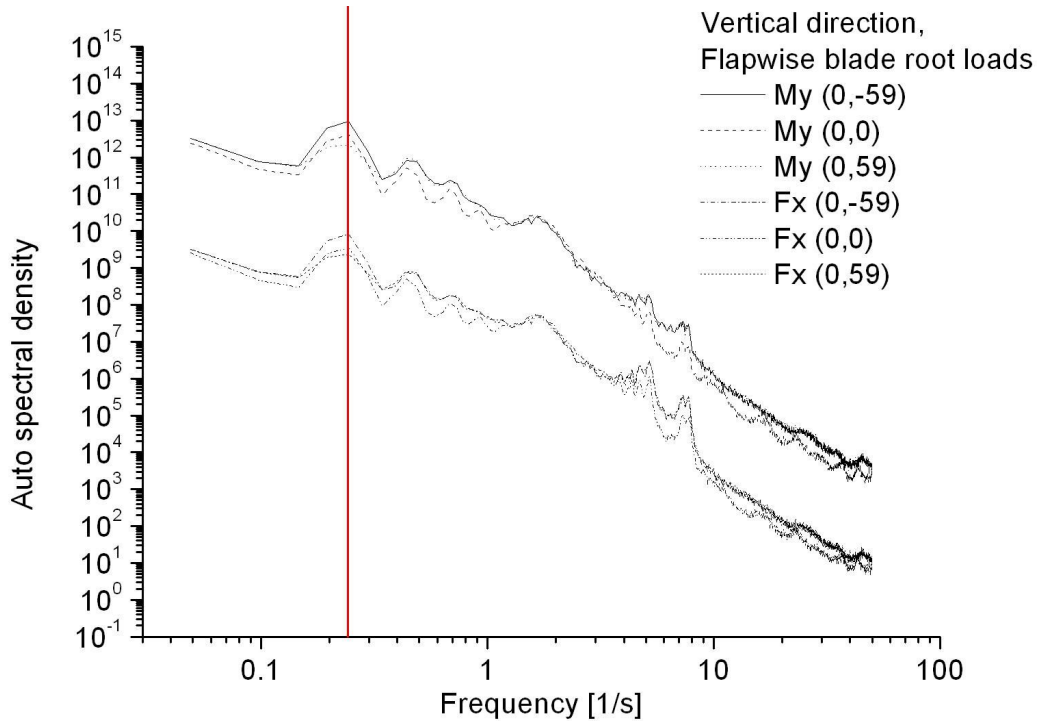


Fig. 30 Auto spectral density for flapwise blade root loads(Vertical)

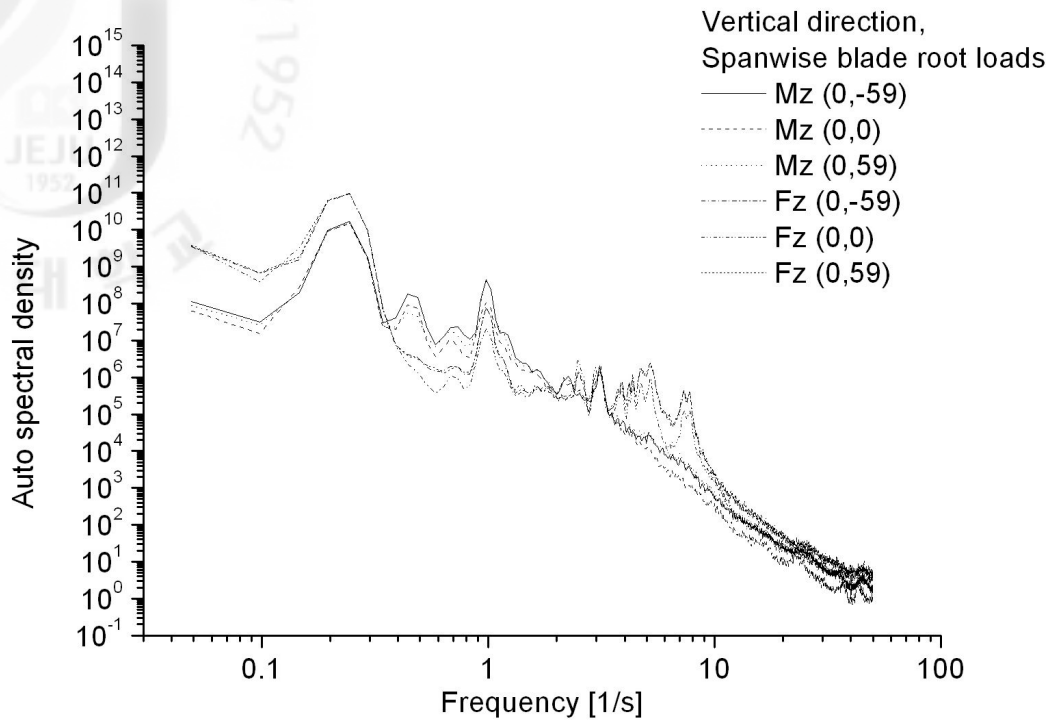


Fig. 31 Auto spectral density for spanwise blade root loads(Vertical)

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. 이 역시, 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 레인플로카운트를 통한 등가하중을 계산할 필요가 있다.

4-4 후류에 의한 피로하중 분석

본 연구에서는 후방 풍력터빈 회전자면에 유입되는 후류의 중심선 변화에 따른 블레이드 루트의 피로하중을 증가하중 계산을 통하여 정량적으로 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 32~43과 같다.

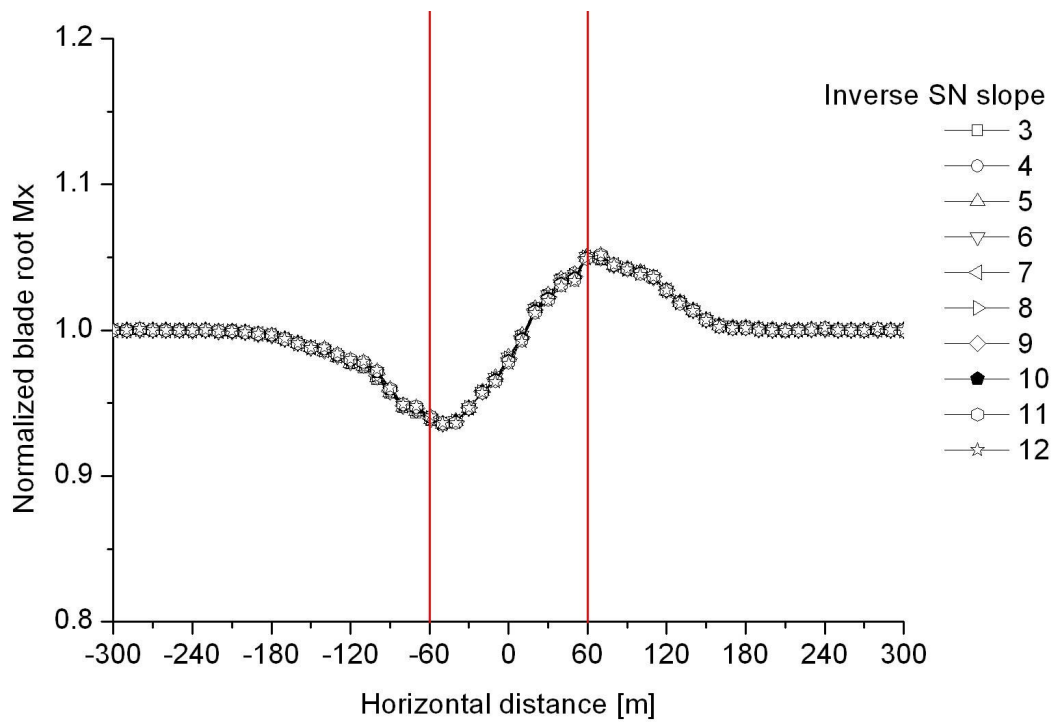


Fig. 32 Equivalent load for blade root M_x (Horizontal)

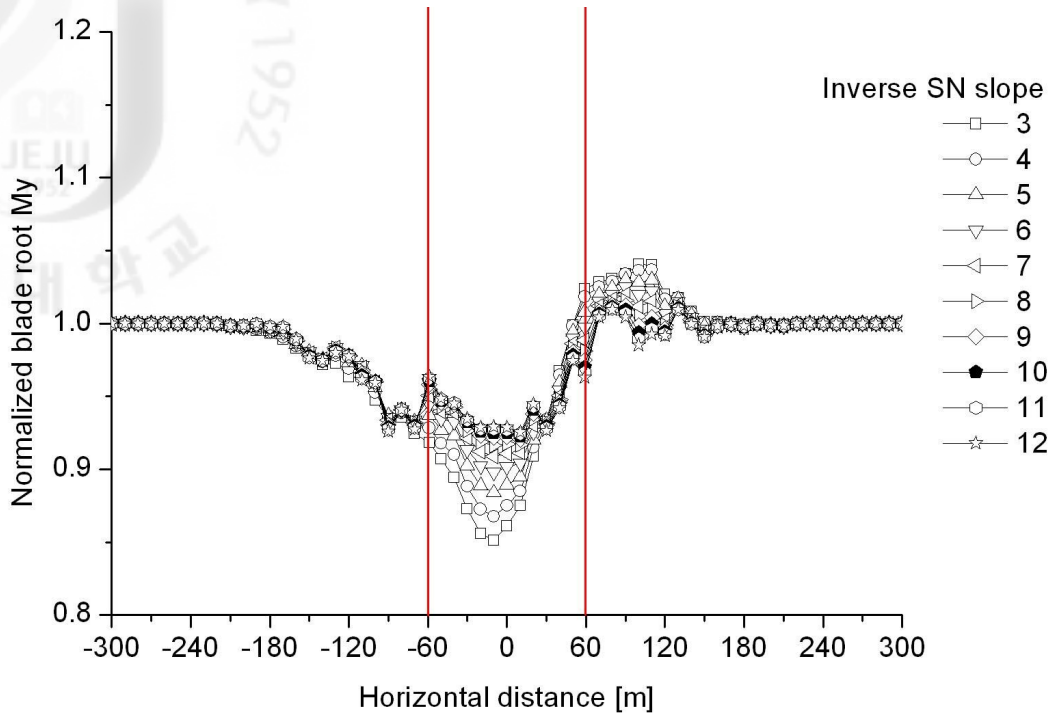


Fig. 33 Equivalent load for blade root M_y (Horizontal)

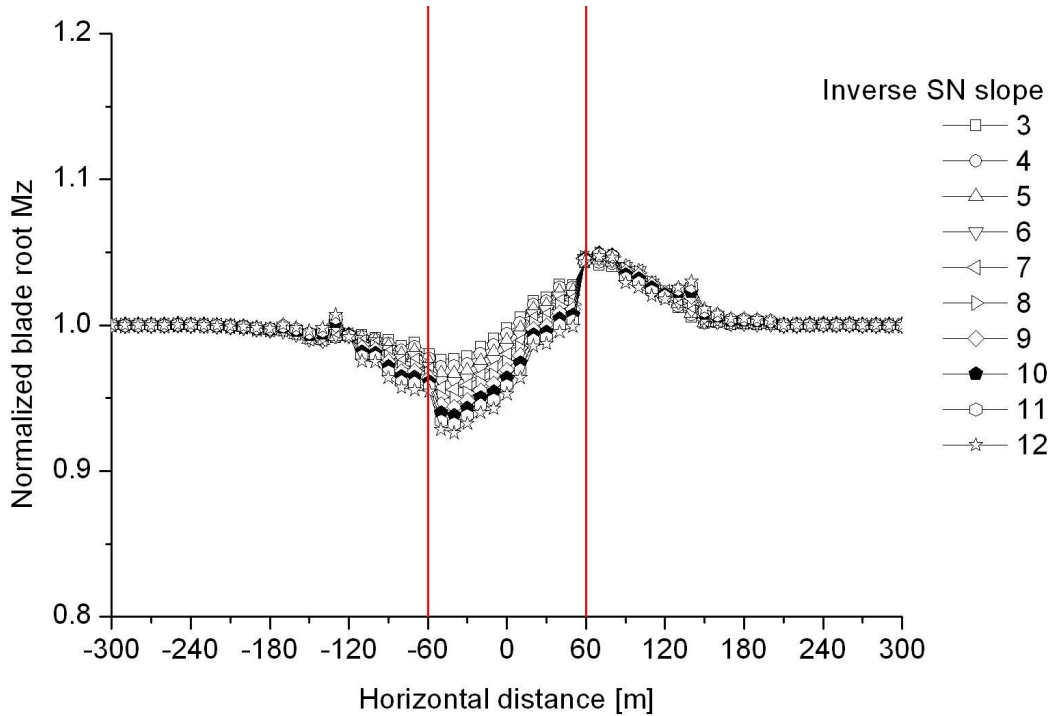


Fig. 34 Equivalent load for blade root M_z (Horizontal)

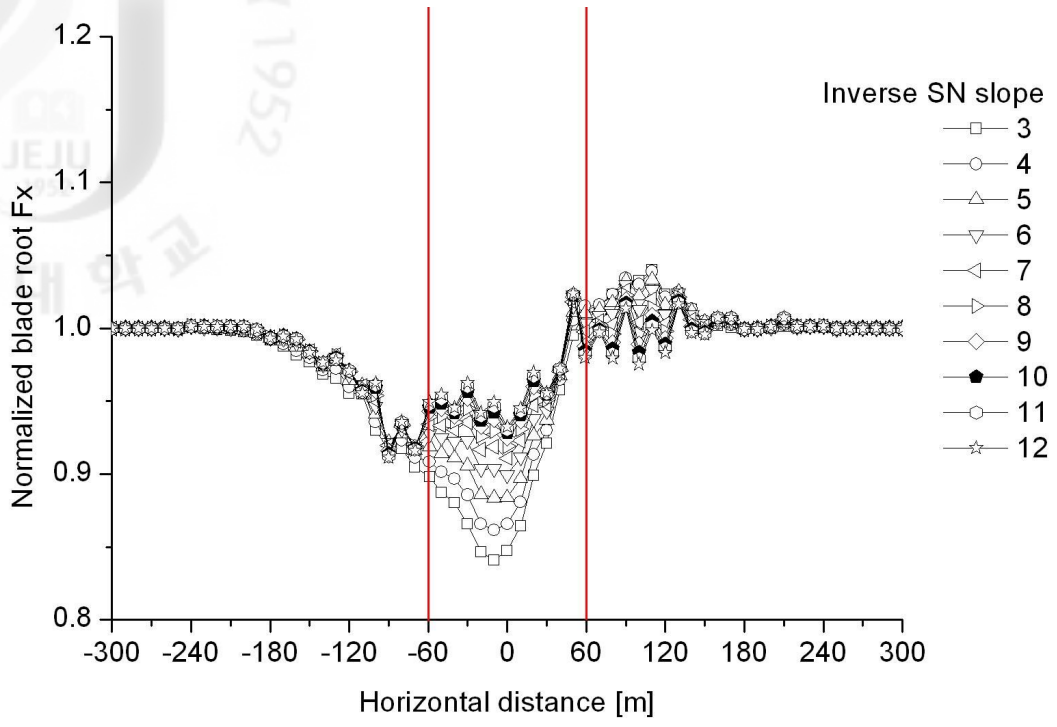


Fig. 35 Equivalent load for blade root Fx(Horizontal)

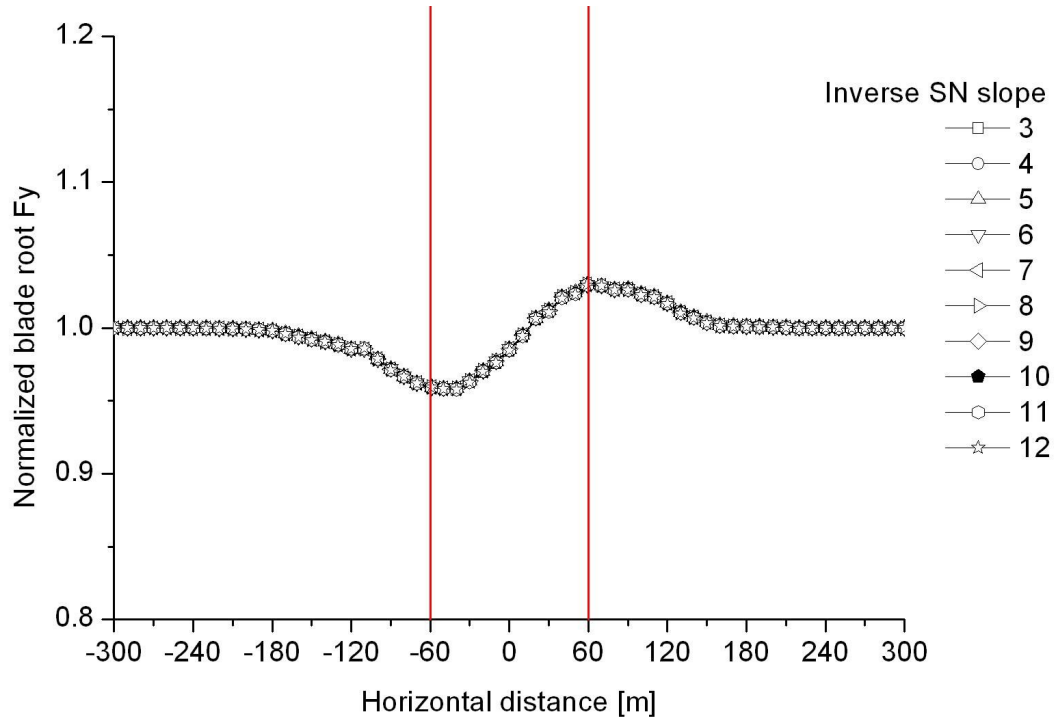


Fig. 36 Equivalent load for blade root Fy(Horizontal)

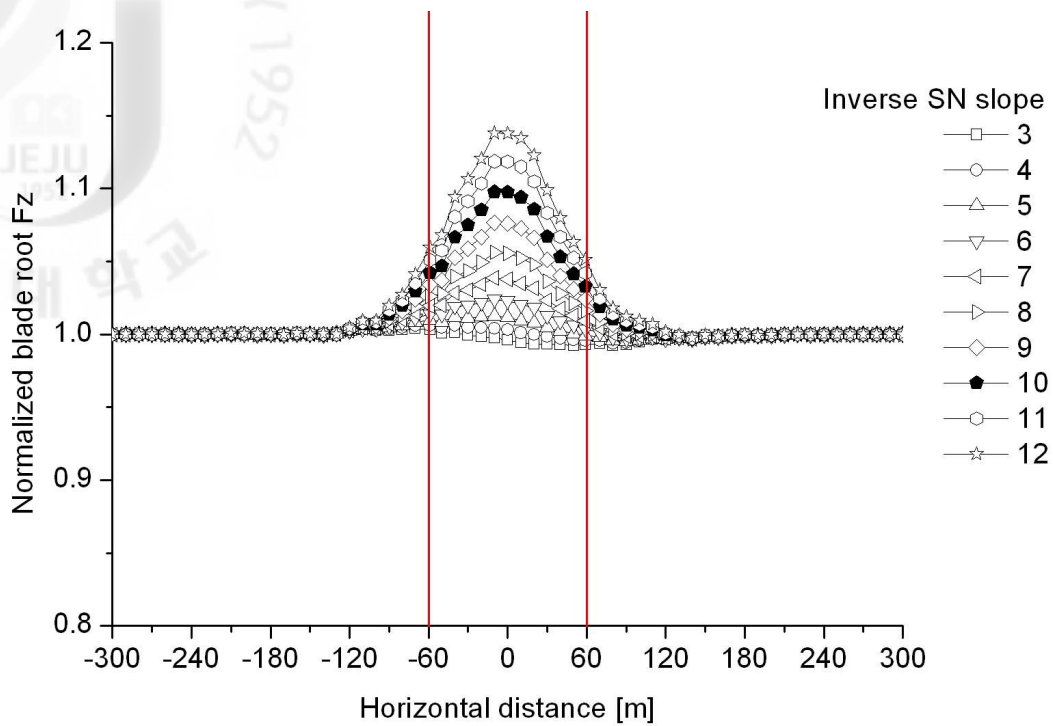


Fig. 37 Equivalent load for blade root F_z (Horizontal)

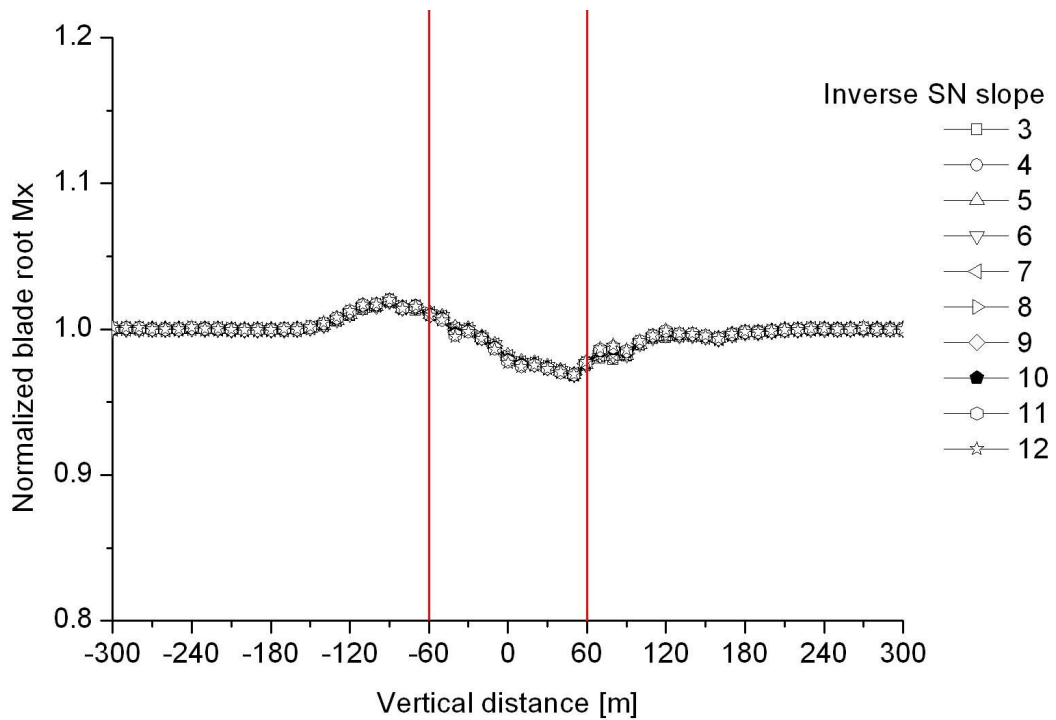


Fig. 38 Equivalent load for blade root M_x (Vertical)

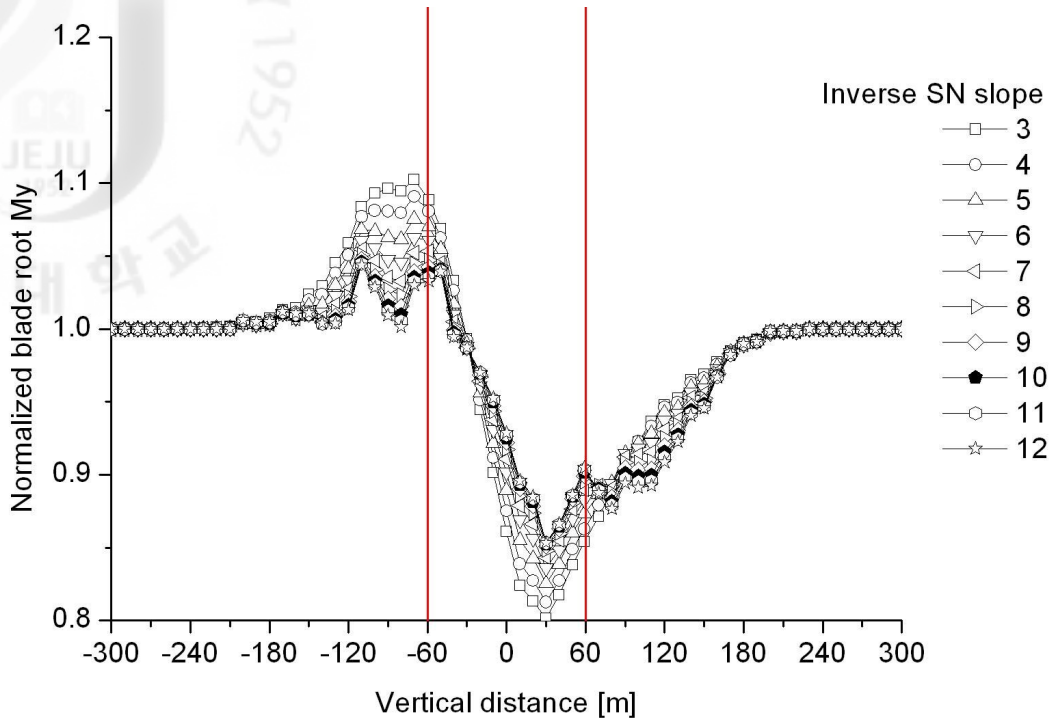


Fig. 39 Equivalent load for blade root M_y (Vertical)

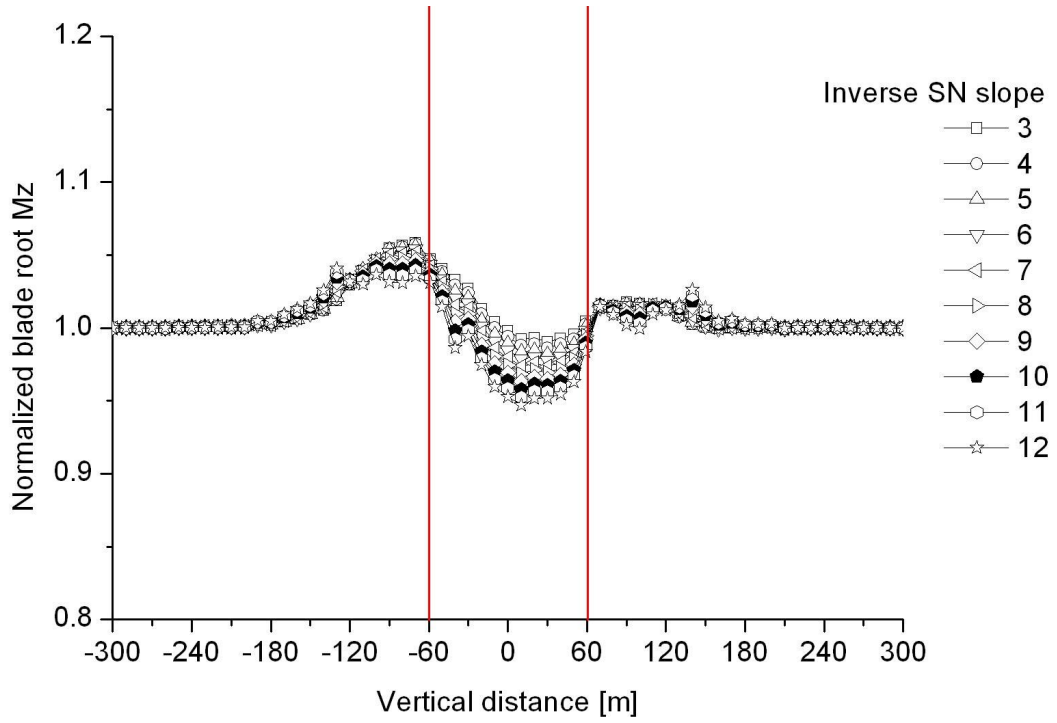


Fig. 40 Equivalent load for blade root M_z (Vertical)

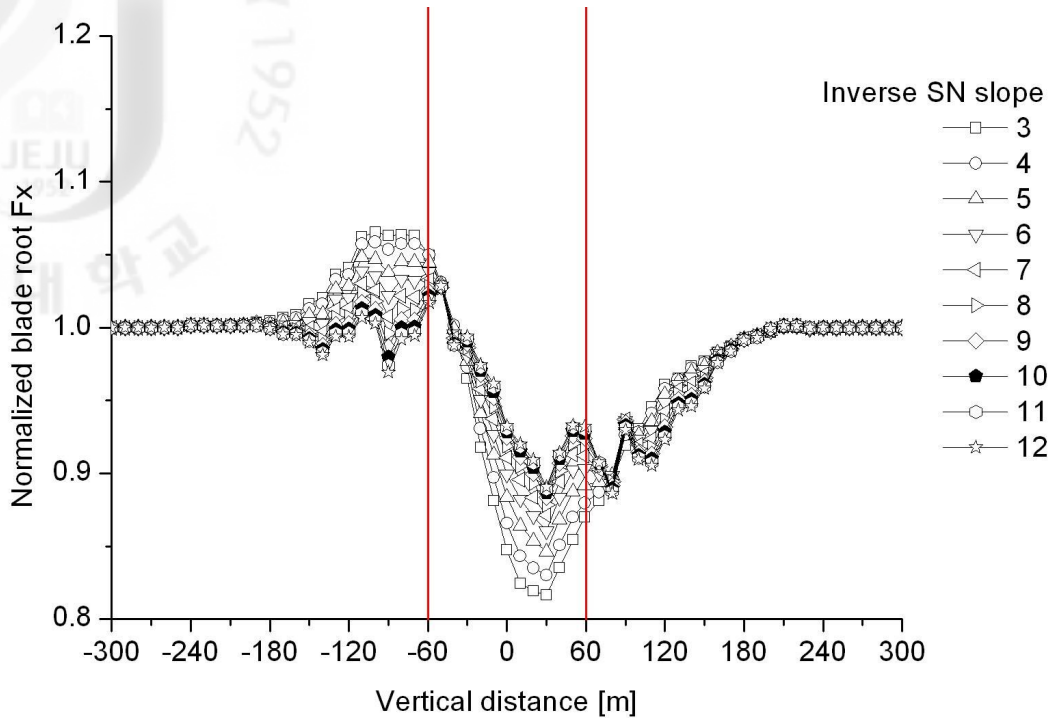


Fig. 41 Equivalent load for blade root F_x (Vertical)

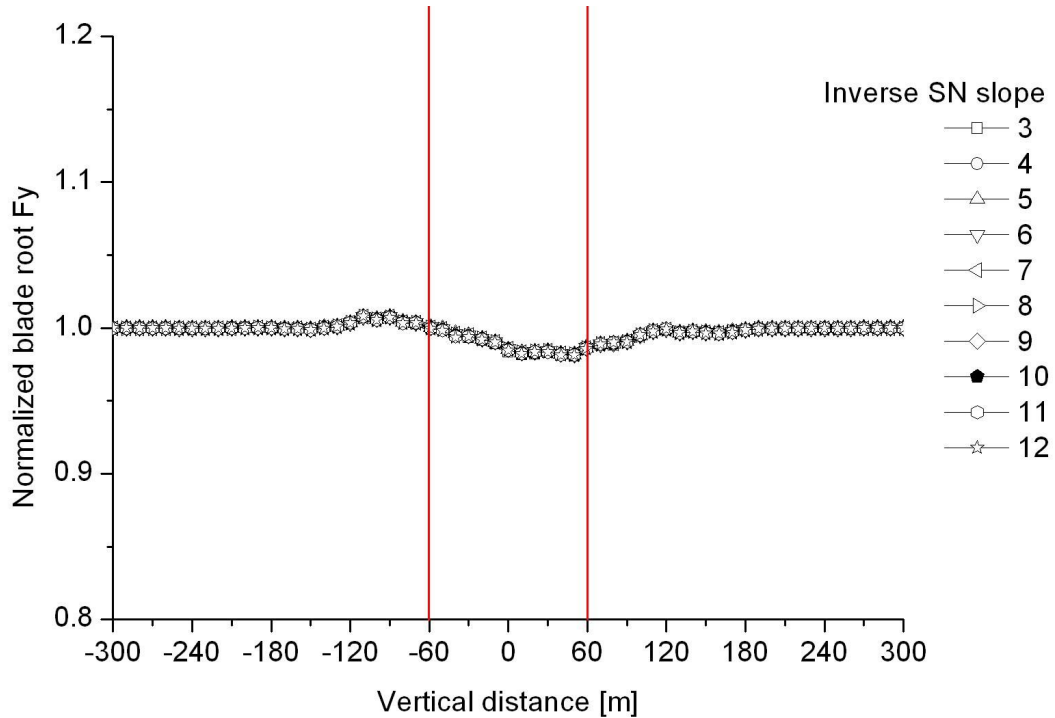


Fig. 42 Equivalent load for blade root F_y (Vertical)

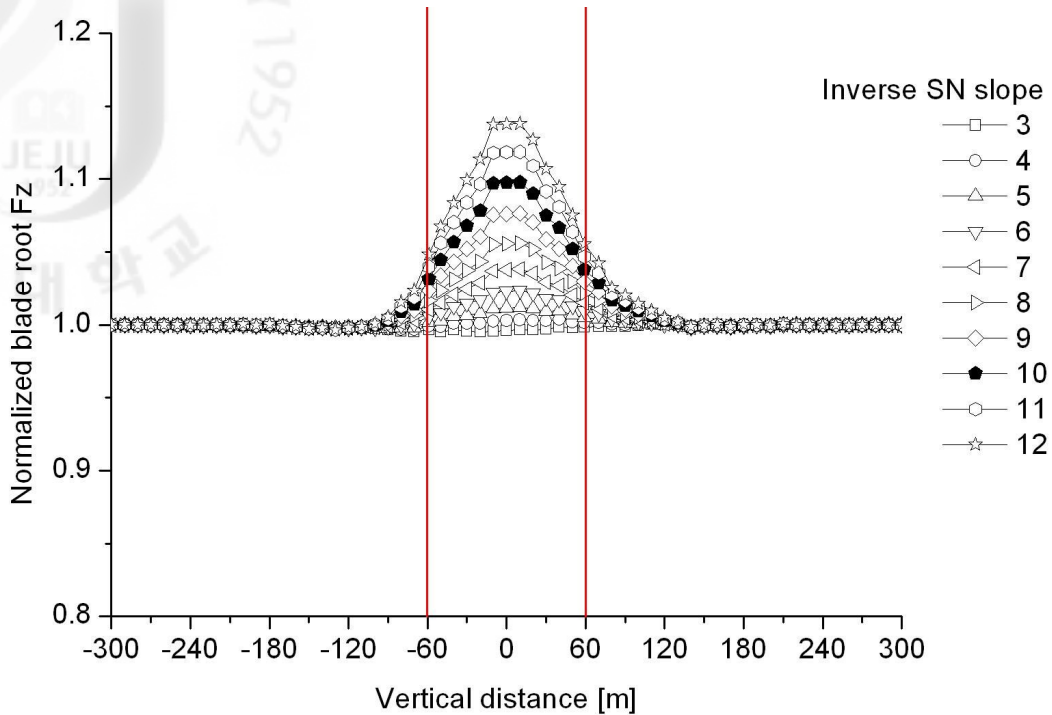


Fig. 43 Equivalent load for blade root Fz(Vertical)

상기 결과들은 후류의 영향에서 벗어난 300m를 기준으로 정규화한 자료이며, Inverse SN slope는 재료가 가지는 피로특성치로 1910년에 Basquin이 제안한 SN 곡선상의 피로지수법칙에서 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.[21]

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 사용하며, Inverse SN slope가 10일 때의 증가하중 결과를 정리하여 Fig. 44와 45에 나타내었다.[16]

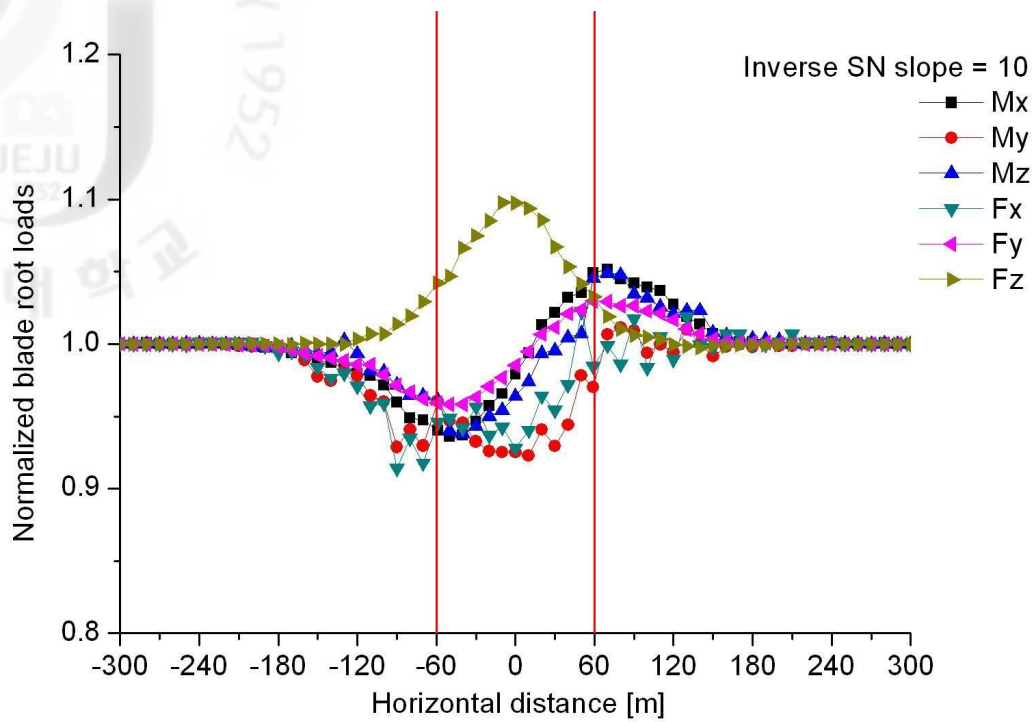


Fig. 44 Equivalent load for blade root loads(Horizontal, Inverse SN slope=10)

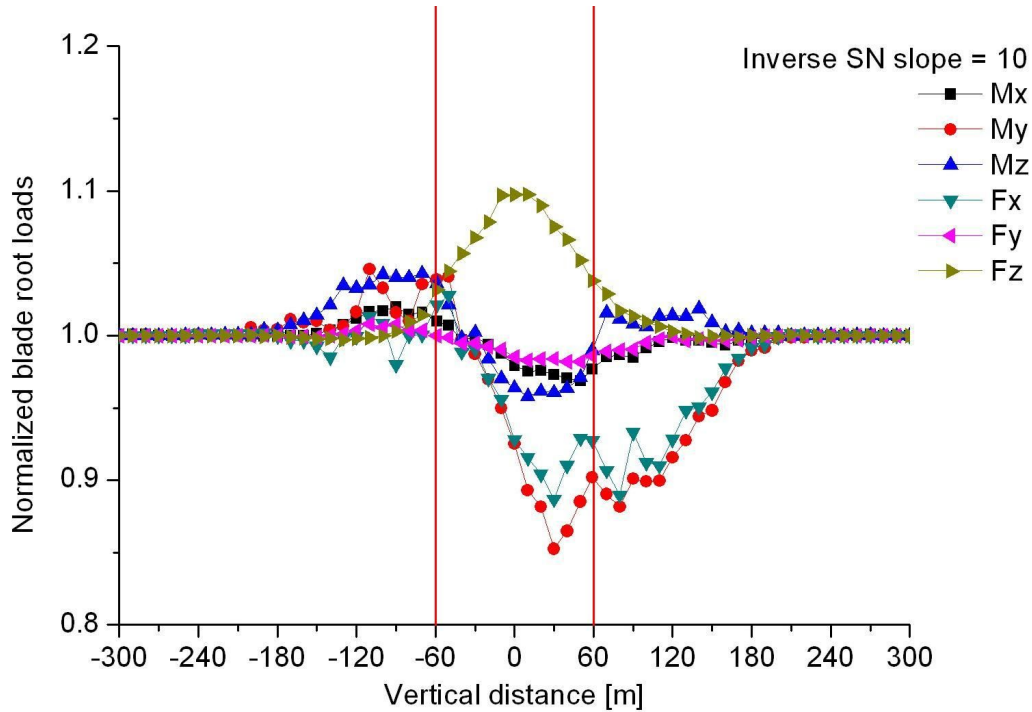


Fig. 45 Equivalent load for blade root loads(Vertical, Inverse SN slope=10)

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

Table 5는 피로에 대한 최대 후류영향의 정도를 나타내며, 각 수치들은 후류영향이 없을 때를 기준으로 회전자면의 중심 및 팁의 위치별 피로의 증감률을 의미한다. 특히, 괄호 안의 수치는 블레이드의 재료인 유리섬유 복합재에 해당하는 Inverse SN slope가 10일 때를 나타낸다.

Table 5 Degree of maximum wake effects for fatigue

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 Fig. 32~45와 Table 5의 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 3~12사이인 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 피로도의 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.

V. 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 M_x 와 F_y 의 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 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 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 수명

을 보장하기 위한 설계 기초자료로서 활용이 기대된다.

한편, 본 연구에서는 단일 풍력터빈을 사용하여, 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.

참고 문헌

- [1] 신상명, 백진호, 김지훈, “난류모델 차이가 풍력발전기 피로하중에 미치는 영향 연구”, 2011, 한국풍력에너지학회 2011년도 춘계학술대회 논문집, pp.109~115.
- [2] 김범석, 김정환, 김유탉, 남청도, 이영호, 2003, “수평축 풍력발전용 터빈의 유동해석 및 성능예측에 대한 CFD의 적용성 평가에 관한 연구”, 대한기계학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, pp.2192~2197.
- [3] 동경민, 정성남, 2002, “후류영향을 고려한 상반회전 풍력발전 시스템의 공력 성능 예측에 관한 연구”, 한국항공우주학회지 제30권 제7호, pp.20~28.
- [4] 박지웅, 신형기, 선호성, 이수갑, 김주연, 최성욱, 2004, “풍력발전기용 블레이드의 후류 구조에 관한 실험적 연구”, 한국항공우주학회 2004년도 춘계학술발표대회 논문집, pp.126~129.
- [5] 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, 2004, “風車後流部の亂流學動”, 第18回 風工學シンポジウム, pp.157~162.
- [6] 이명성, 이승호, 허남건, 2010, “지형에 따른 발전기 배치가 풍력 발전 성능에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구”, 대한기계학회논문집 B권 제34권 제10호, pp.901~906.
- [7] EMD, 2005, “Introduction to Wind Turbine Wake Modelling and Wake Generated Turbulence”, EMD.
- [8] Website for “Aeolus”, <http://ict-aeolus.eu/>
- [9] 박종식, 2010, “MW급 풍력 터빈 피치 제어기 설계”, 강원대학교 대학원 기계공학과 공학석사학위논문.
- [10] GL & Garrad Hassan, 2011, “Bladed 4.1 User Manual”, GL & Garrad Hassan.
- [11] GL & Garrad Hassan, 2011, “Bladed 4.1 Theory Manual”, GL & Garrad Hassan.
- [12] IEC, 2005, “IEC 61400-1 ed. 3 Wind Turbines - Part 1: Design

Requirements”, IEC.

[13] 남현우, 음학진, 김만웅, 2010, “풍력 터빈의 난류모델별 극한 하중 예측에 관한 연구”, 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 논문집, pp.3642~3647.

[14] AWS Truepower, 2010, “Openwind Theoretical Basis and Validation 1.3”, AWS Truepower.

[15] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, 2002, “Wind Energy Explained”, John Wiley & Sons LTD.

[16] Herbert J. Sutherland, 1999, “On the Fatigue Analysis of Wind Turbines”, Sandia National Laboratories.

[17] Julie A. Bannantine, Jess J. Comer and James L. Handrock, 1989, “Fundamentals of Metal Fatigue Analysis”, Prentice Hall.

[18] Joshua Earnest and Tore Wizelius, 2011, Wind Power Plants and Project Development, PHI.

[19] R. J. Barthelmie, L. Folkerts, G. C. Larsen, K. Rados, S. C. Pryor, S. T. Frandsen, B. Lange and G. Schepers, 2005, “Comparison of Wake Model Simulations with Offshore Wind Turbine Wake Profiles Measured by Sodar”, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology volume 23, pp.888~901.

[20] (사)한국선급, 2008, “풍력발전 시스템의 기술 기준”, (사)한국선급.

[21] Norman E. Dowling, 1999, Mechanical Behavior of Materials ed. 2, Prentice Hall.

감사의 글

2년 전, 뚜렷한 목표를 설정하지 못하고, 막연하게 풍력에 대한 관심 하나만으로 대학원을 진학했던 그때가 지금도 기억에 생생합니다. 어느 덧, 그 때의 막연함도 대학원 석사과정을 끝마치는 지금에 와서는 시원섭섭함과 함께, 저를 도와 주신 많은 분들께 감사하는 마음으로 바뀌어, 이 글을 통해 그 마음을 전하고자 합니다.

지난 2년의 시간 동안 여러 조언과 많은 도움을 주신 저의 지도교수님, 김귀식 교수님께 가장 큰 감사의 마음을 전합니다. 교수님의 지도 아래, 풍력에 대한 학문적 성과를 낼 수 있었고, 흔들림 없는 대학원 생활을 할 수 있었습니다. 2년간의 시간이 정말 아깝지 않은 배움의 시간이 될 수 있도록 지도해 주셔서 진심으로 감사드립니다. 그리고 풍력특성화대학원장이신, 허종철 교수님께 감사의 마음을 전합니다. 풍력에 대한 지식이 전무한 저를 비롯한 동기들을 잘 이끌어 주셨고, 이렇게 풍력분야의 한 일꾼으로서 잘 길러주셨습니다. 교수님의 열성적인 지도가 결과적으로 좋은 양분이 되어 지금의 저를 있게 해주셨습니다. 정말 감사드립니다.

항상 할 수 있다는 자신감을 북돋워 주신, 연구실 선배 경조 형, 세웅이 형, 정근이 형, 명근이 형, 제석이 형의 아낌없는 격려 진심으로 감사드립니다. 연구실의 굳은 일을 마다 않고, 열심히 저를 도와준 후배 동찬이, 동호, 용우, 윤호에게, 그리고 저 보다 훨씬 더 고생하며, 연구실을 위해 헌신한 동료 현관이에게도 감사의 마음을 전합니다.

또한 저와 2년간 풍력을 같이 공부하며 고생한 동기인 박사과정 혁준이 형, 정우 형, 석사과정 승건이 형, 형택이 형, 치훈이 형, 대영이 형, 경현이 형, 수영이, 석현이, 정운이, 정민이, 명석이, 수형이, 의장이에게도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 저희가 공부하는데 어려움이 없도록 뒤에서 아낌없는 지원을 해주신 풍력특성화대학원 행정실의 김익선 행정실장님, 이창림 선생님, 김봄솔 선생님께도 진심으로 감사드립니다.

식사 생활 중, 인턴쉽 연구과정으로 지냈던 (사)한국선급 녹색산업기술원의 식구 분들에게도 감사의 마음을 전합니다. 회사일로 다들 바쁘신데도, 제가 여쭙보는 질문 하나하나 마다 성심껏 답변해주시고, 아낌없는 지도와 격려도 해주시고, 한 식구처럼 생각해주셔서 정말 감사드립니다. 특히, 제가 5개월간 열심히 배우며 몸담았던 하중파트의 음학진 박사님, 남현우 연구원님, 강문종 연구원님, 모하메드 아시드 줄라 연구원, 그리고 이경우 신재생에너지팀장님, 김만웅 녹색산업기술원장님께 진심으로 감사드립니다.

마지막으로 학업에 전념할 수 있도록 뒷바라지 해주시며 고생하신 부모님, 누님 내외, 형님 내외, 사랑하는 의숙이에게 감사의 마음을 전합니다.

2011년 12월 김충욱