한국기계가공학회지, 제17권, 제1호, pp.122～129(2018.02) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.17, No.1, pp.122~129(2018.02) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.1.122

소형 사보니우스형 수직축 풍력발전기의 내진검증

최영휴*,#, 강민규**, 박성훈***

*창원대학교 기계공학부, **창원대학교 대학원 기계설계공학과

Seismic Qualification Analysis of a Small Savonius Style Vertical Axis Wind Turbine

Young-Hyu Choi*,#, Min-Gyu Kang**, Sung-Hoon Park***

*School of Mechanical Engineering, Changwon UNIV.,

**Graduate student, Changwon UNIV., ***Speed-tech Co.

(Received 2 November 2017; received in revised form 29 November 2017; accepted 15 January 2018)

ABSTRACT

This study conducted a seismic qualification analysis of small savonius style vertical axis wind turbine(VAWT) using finite element method(FEM). The modal analysis was performed on the wind turbine structure to check the occurrence of resonance caused by the rotation of gearbox and windmill blades. Next, it conducted a seismic response spectrum analysis due to horizontal and vertical seismic load of required response spectrum of safe shutdown earthquake with 5 % damping(RRS/SSE 5%) of KS C IEC 61400 and conducted a static analysis due to deadweight and wind load. The total maximum stress of the VAWT structure was calculated by adding the maximum stresses due to each load case using the square root of the sum of the squares(SRSS) method. Finally, the structural safety of the VAWT structure was verified by comparing the total maximum stress and the allowable stress.

Key Words : Vertical Axis Wind Turbine(수직축 풍력발전기), Seismic Qualification(내진검증), Response Spectrum Analysis(응답스펙트럼해석), Finite Element Analysis(유한요소해석), Safety Factor(안전계수)

1. 서 론

풍력발전기는 외력에 의해 파손될 경우 전기에너지 공급에 차질이 발생하며 이에 따른 2차적인 피해가 발생할 수 있다. 그러므로 풍력발전기를 포함한 발전설비는 지진상황에서도 정상적인 기능을 수행할 수 있도록 내진설계 기준을 만족하도록 설계되고 구조안전성이 확보되어야 한다.

1995년 일본 고베 지진과 2014년 일본 후쿠시마 지진, 2016년 경주 지진, 중국 쓰촨성 지진 등 국내외적으로 규모가 큰 지진이 잇따라 발생하고 지진으로 인한 인적, 물적 피해가 속출함에 따라 국제적으로 발전소나 건축물 등의 내진설계에 관심이 고조되고, 내진설계 기준도 강화되고 있다[1~5].

한국건축구조설계기준[1]은 내진설계등급과 내진성능목표 및 지진하중 산정을 위한 상위기준으로 개정되었고, 미국 ASCE 7-10 기준[2]도 기존의 하중

Corresponding Author : yhchoi@changwon.ac.kr
Tel: +82-55-213-3623, Fax: +82-53-263-5221

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기반 내진설계에 더하여 성능기반 면진설계를 강화하는 방향으로 변화되었다[3]. M. Nakashima[4], M. Midorikawa[5] 등에 의하면 2000년 이후 일본의 건축구조물 내진해석의 입력기준이 기반암 가속도(Engineering bedrock acceleration)에서 레벨이 더 높은 지표면 가속도로 강화되었다.

J. B. Wom[6] 등은 1.5 MW급 풍력발전기의 구조물을 유한요소 모델링하고 상부 구조물은 절점질량으로 간주하여 진동특성을 해석하고 응답스펙트럼 해석법으로 내진해석을 수행하였다. J. H. Kim[7]은 유한요소법으로 5 MW급 풍력발전기 회전체의 동적 안정성을 해석하고 응답스펙트럼해석법을 이용하여 풍력발전기 구조물의 내진해석을 수행하였다.

H. C. Choi[8] 등은 MW급 풍력발전기 타워의 지진응답을 시간이력해석법으로 구하고 지진하중과 함께 풍하중의 영향을 고려하였다. Y. H. Choi[9] 등은 1 kW급 소형 수직축 풍력발전기의 지진응답을 응답스펙트럼해석법으로 구하고, 사하중과 풍하중에 의한 응력까지 고려하여 구조안전성을 분석하였다.

일반적으로 사용되는 내진해석으로는 등가정적해석법과 동적해석법이 있고, 동적해석법에는 응답스펙트럼해석법과 시간이력해석법이 있다[7,10]. 구조물의 내진성능 평가에서는 응답의 시간이력보다 응답의 최대치가 필요하기 때문에 지진하중의 가진주파수 영역에 걸쳐 응답 최대치를 간편하게 구할 수 있는 응답스펙트럼해석법이 흔히 이용된다[10].

본 연구에서는 스피드테크[11]에서 개발 중인 3 kW급 소형 수직축 풍력발전기의 설계단계에서 내진 검증을 하기 위하여 유한요소법과 응답스펙트럼해석법[10]으로 지진응답을 구하고 내진해석을 수행하여 그 결과로부터 구조물의 안전성을 평가한다.

2. 내진해석

2.1 해석과정

먼저 풍력발전기 구조물을 유한요소 모델링하고, 진동모드해석으로 계산된 고유진동수를 풍력발전기의 가진주파수와 비교하여 공진유무를 조사한다. 1차 고유진동수가 지진주파수 한계인 33 Hz 이하이면 동적 내진해석을 수행한다. 동적 내진해석의 지진응답은 KS C IEC 61400-1[12]에 규정된 안전정지지진/요구응답스펙트럼(RRS/SSE-5%, required response spectrum/safe shutdown earthquake with 5% damping)을 적용하여 응답스펙트럼해석법[10]으로 구하고, 내진해석에 추가되는 하중으로 KS C IEC 61400-1, 2[12,13]에 규정한 하중조건에서 사하중과 풍하중을 적용하여 구조물에 발생하는 최대응력을 구한다. 최대지진응답에 의한 최대응력과 사하중 및 풍하중에 의한 최대응력을 총합하여 총합최대응력을 계산하고 최종적으로 총합최대응력을 구조물의 허용응력과 비교하여 구조안전성을 평가한다.

2.2 유한요소 모델링

풍력발전기의 구조는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 풍차 몸체(Turbine frame)와 16개의 날개(Turbine blade)로 구성되는 풍차(Wind turbine), 증속발전기(Generator)와 기둥(Pole)으로 이루어져있다[11].

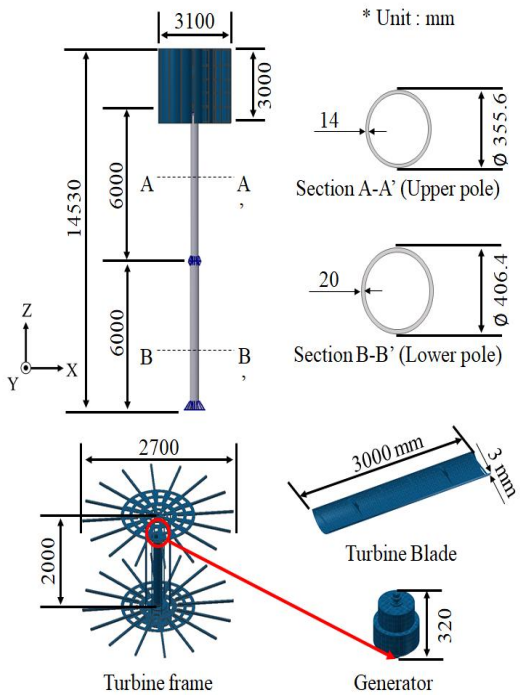


Fig. 1 Schematic of the VAWT geometry

Table 1 Material properties of the VAWT

Part (Material) / Property	Pole (SS400)	Turbine frame (AL6061-T6)	Turbine blade (PC)
Elasticity (GPa)	200	69	2.27
Poisson's ratio	0.3	0.33	0.38
Density (kg/m3)	7,850	2,700	1,200
Yield stress (MPa)	315	275	62
Allowable stress (MPa, σ_a)	284	248	56

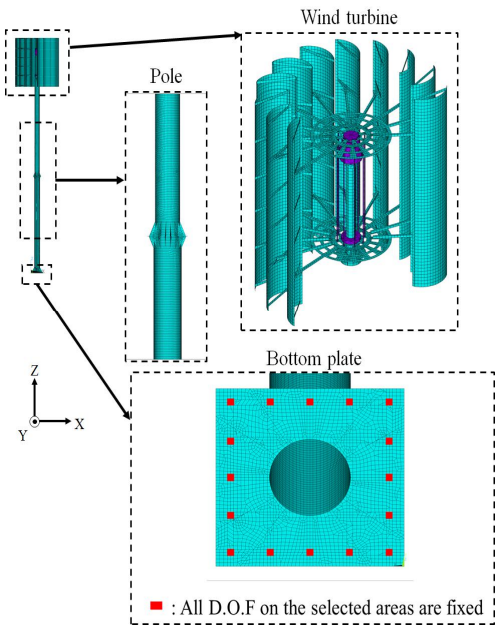


Fig. 2 Finite element model of the VAWT

Table 1에는 풍력발전기의 각 부품의 물성치를 정리하였다. Fig. 2에 나타낸 것처럼 풍력발전기의 내진해석을 수행하기 위하여 ANSYS APDL[14]을 이용하여 유한요소 모델링하였고, 증속기는 솔리드(Solid) 요소, 증속발전기 이외의 구조물은 쉘(Shell) 요소로 모델링하였다. 모든 구조부품의 연결부는 강체결합이며, 경계조건은 바닥면에서 앵커볼트가 장착되는 16개의 면의 자유도를 모두 구속하였다.

유한요소 모델의 총 절점수는 31,393개이고, 요소수는 쉘 요소 15,183개, 솔리드 요소 16753개이다. 또한 유한요소 모델링된 풍력발전기 구조물의 총 질량은 2,800 kg이다. 유한요소법 내진해석에서는 구조물의 질량이 응답의 정확성에 큰 영향을 미치는데 유한요소 모델의 총질량이 실제 풍력발전기 구조물 설계중량 2,817 kg과 오차 1% 미만으로 근사하므로 이 유한요소 모델링은 타당한 것으로 판단된다.

2.3 모드해석과 공진분석

수직축 풍력발전기의 운전속도 범위는 10 ~ 30 rpm이며, 정격 운전속도는 15 rpm이다. 유성기어로 구성된 증속기의 입력 축의 회전속도(Input rpm or input frequency)를 라 하면 플레닛 기어 축은 입력 회전속도의 4 배, 선 기어 축은 플레닛 기어 축 회전속도의 4 배로 회전하므로 증속발전기 회전에 의한 각각의 기어 축의 가진주파수는 입력주파수의 1배(1X 주파수), 4배(4X 주파수), 16배(16X 주파수)가 된다. 또한 풍차 날개의 수는 16개이므로 풍차 날개에 의한 가진주파수는 입력주파수의 16배(16X 주파수)이다. Table 2에는 풍차 날개와 증속기의 회전에 의한 풍력발전기의 가진주파수를 정리하였다.

Fig. 2의 유한요소 모델에 대한 진동모드해석 결과 가진주파수 범위, 즉 1X ~ 16X 주파수 범위의 고유진동수인 1 ~ 4차 고유진동수를 Table 3에 정리하였다. Fig. 3에는 1 ~ 4 차 진동모드 형상을 나타내었다. 1차와 2차 모드는 기둥의 X-축 및 Y-축 방향의 1차 굽힘 횡진동(Lateral bending modes) 모드로서 동일한 대칭 모드이다. 3, 4차 모드도 동일한 대칭 모드로서 풍차의 1차 굽힘 횡진동 모드이다.

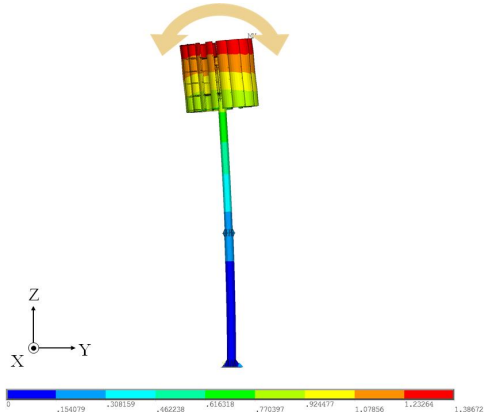
공진분석을 위하여 캠밸선도를 작성하였다. Fig. 4의 캠밸선도에 나타낸 것과 같이 수직축 풍력발전기 구조물의 1차 및 2차 고유진동수인 2.12 Hz 및 2.13 Hz와 3차 및 4차 고유진동수인 8.25 Hz와 8.96 Hz는 풍력발전기의 정격운전속도 범위인 10 ~ 30 rpm에서 1X, 4X, 16X 가진주파수와 겹치지 않으므로 공진이 발생되지 않는다.

Table 2 Excitation frequencies of the VAWT

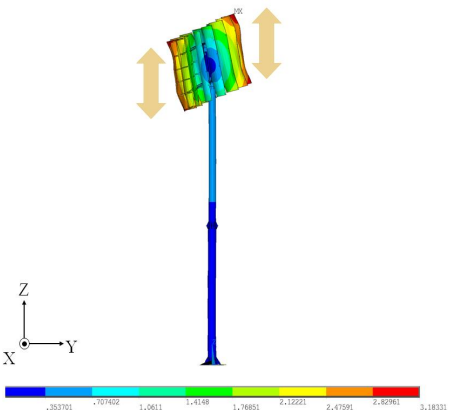
Excitation source		Exciting frequency
Gearbox	Carrier (input)	1X
	Planet gear shaft	4X
	Sun gear shaft (output)	16X
Turbine blade		16X

Table 3 Natural frequencies of the VAWT

Mode number	1st	2nd	3rd	4th
Frequency (Hz)	2.12	2.13	8.25	8.96



(a) The 1st and 2nd modes (2.12 Hz, 2.13 Hz):



(b) The 3rd and 4th modes (8.25, 8.96 Hz):

Fig. 3 The lowest 4 modes of the VAWT

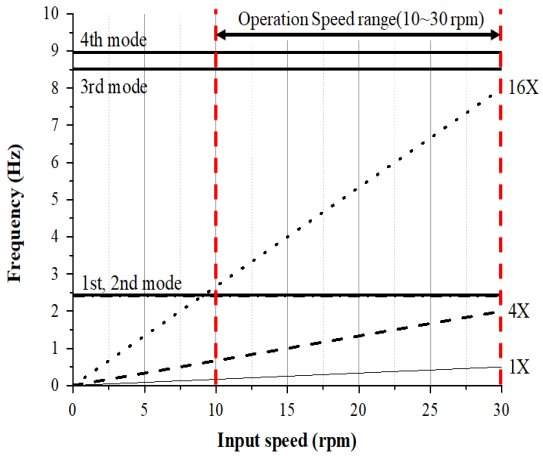


Fig. 4 Campbell diagram

2.4 지진응답스펙트럼해석

풍력발전기 구조물의 진동모드해석 결과 1차 고유진동수가 2.12 Hz로 지진주파수 한계인 33 Hz보다 낮으므로 동적 내진해석을 수행해야 한다.

지진응답스펙트럼은 스펙트럼-모드해석방법을 이용하여 구하는데, 이 방법은 참여도(Participation factor)가 높은 단일 모드별 최대지진응답을 구하고 이들을 SRSS(Square root of the sum of the squares) 방법[10.15].으로 조합하여 총합응답을 구하는 방법이다. 지진응답스펙트럼해석에 포함되는 모드 수는 참여도가 높은 순서대로 해당 모드질량(Modal mass)의 합이 총 구조물 질량의 90 % 이상이 되도록 정한다[16]. Table 4, 5, 6에는 X-, Y-, Z-방향별 모드질량 참여도를 정리하였다. 표에서 보듯이 모드질량 참여도는 X-방향은 2차 모드가 가장 높고, Y-방향은 2차 모드가 가장 높으며, Z-방향은 6차 모드가 가장 높게 나타났다.

지진 응답스펙트럼해석은 KBC 2009와 ASCE 7-10의 안전정지지진/요구응답스펙트럼(RRS/SSE-5%)에 의거하여 수평방향(Horizontal: X- and Y-directions) 지진력과 수평방향 지진력 크기의 1/2에 해당하는 수직방향(Vertical: Y-direction) 지진력의 세 가지 경우에 대하여 수행하였다. RRS/SSE-5%에 대응되는 수평방향 지표면 RRS와 수직방향 지표면 RRS를 Fig. 5에 나타내었다.

Table 4 Modal analysis results ; ratio to total mass in the X-direction

Mode	Freq. (Hz)	Ratio	Ratio to total mass
1	2.12	0.28	0.37×10^{-1}
2	2.13	**1**	0.47
3	8.25	0.26	0.32×10^{-1}
4	8.96	0.21	0.22×10^{-1}
5	9.87	0.71×10^{-2}	0.23×10^{-4}
6	10.02	0.88×10^{-3}	0.36×10^{-6}
⋮	⋮	⋮	⋮
150	223.65	0.15×10^{-1}	0.12×10^{-5}
Sum	-	-	0.90

Table 5 Modal analysis results ; ratio to total mass in the Y-direction

Mode	Freq. (Hz)	Ratio	Ratio to total mass
1	2.12	**1**	0.47
2	2.13	0.27	0.36×10^{-1}
3	8.25	0.21	0.22×10^{-1}
4	8.96	0.25	0.31×10^{-1}
5	9.87	0.74×10^{-2}	0.25×10^{-4}
6	10.02	0.69×10^{-3}	0.22×10^{-6}
⋮	⋮	⋮	⋮
150	223.65	0.24×10^{-1}	0.24×10^{-5}
Sum	-	-	0.91

Table 6 Modal analysis results ; ratio to total mass in the Z-direction

Mode	Freq. (Hz)	Ratio	Ratio to total mass
1	2.12	0.52×10^{-3}	0.17×10^{-9}
2	2.13	0.12×10^{-3}	0.91×10^{-9}
3	8.25	0.12×10^{-1}	0.90×10^{-5}
4	8.96	0.89×10^{-3}	0.52×10^{-7}
5	9.87	0.52	0.17×10^{-1}
6	10.02	**1**	0.65×10^{-1}
⋮	⋮	⋮	⋮
150	223.65	0.12	0.43×10^{-6}
Sum	-	-	0.90

Table 7 Computed maximum stress to seismic load

Part	Max. stress (MPa)			
	X-dir. $\sigma_{seis,x}$	Y-dir. $\sigma_{seis,y}$	Z-dir. $\sigma_{seis,z}$	Resultant, σ_{seis}
Pole	46.36	42.76	0.71	63.07
Turbine frame	119.28	119.57	26.53	170.96
Turbine blade	1.63	1.65	0.36	2.35

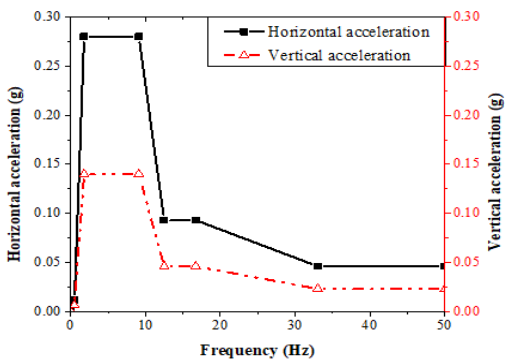


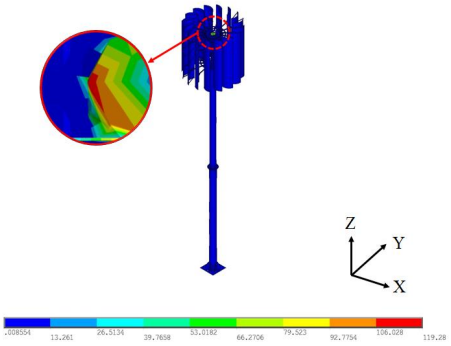
Fig. 5 Seismic load (Floor RRS/SSE-5%)

위 Fig.5의 요구응답스펙트럼에 해당하는 수평방향 지표면 최고가속도는 $A=2.5IC_a=0.28g$(지반종류 연암지반(S_c), 하중보전계수 $C_a=0.08$, 지진위험도계수 $I=1.4$, 재현주기 1000년으로 가정)로서 규모 6의 지진에서 지표면 최고가속도에 해당한다.

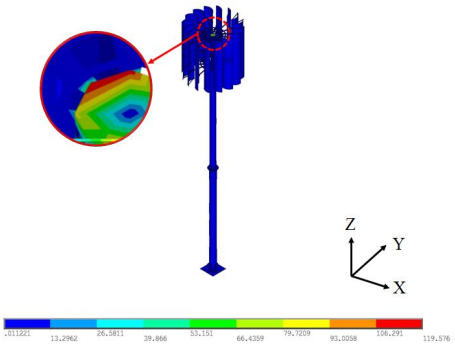
지진 응답스펙트럼해석 결과로부터 X-, Y-, Z-방향의 최대응력(Maximum stress)을 식 (1)과 같이 SRSS방법으로 합산하여 지진하중에 의한 최대합응력(Resultant maximum stress)을 계산한다.

$$\sigma_{seis}=\sqrt{\sigma_{seis,x}^2+\sigma_{seis,y}^2+\sigma_{seis,z}^2} \quad (1)$$

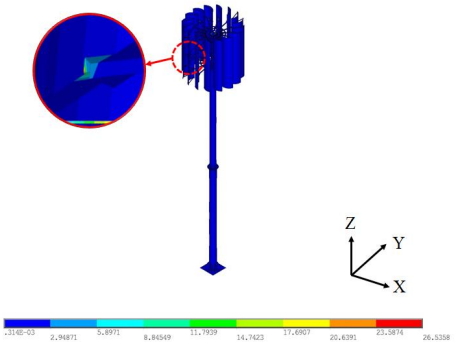
풍력발전기 구조 부품별 지진하중에 의한 최대합응력(σ_{seis})을 Table 7에 정리하였고, 응력 분포선도(Stress contour)를 Fig. 6에 나타내었다.



(a) X-direction



(b) Y-direction



(C) Z-direction

Fig. 6 Von-Mises stress due to seismic load

2.5 사하중과 풍하중에 의한 구조해석

Fig. 2의 풍력발전기 유한요소 모델에 사하중과 풍하중이 작용하는 경우의 구조해석을 통하여 각각 사하중(자중)에 의한 최대합응력(σ_{dead})과 풍하중에 의한 최대합응력(σ_{wind})을 구한다. 풍하중은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 지상 높이에 따라 3개의 구간으로 나누어 적용하였다.

정적구조해석 결과, 사하중과 풍하중에 의해 발생된 구조 부품별 최대합응력을 Table 8에 정리하였고, Fig. 8과 Fig. 9에는 자중과 풍하중에 의해 계산된 응력선도를 각각 나타내었다.

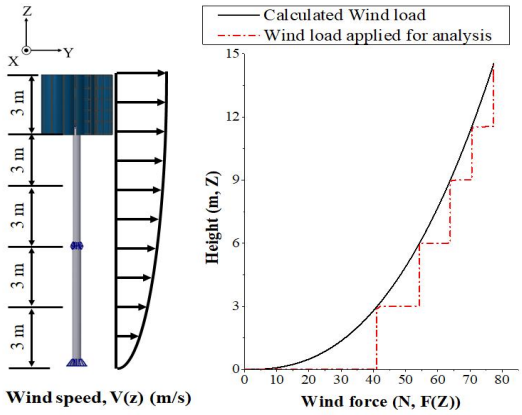


Fig. 7 Applied wind load

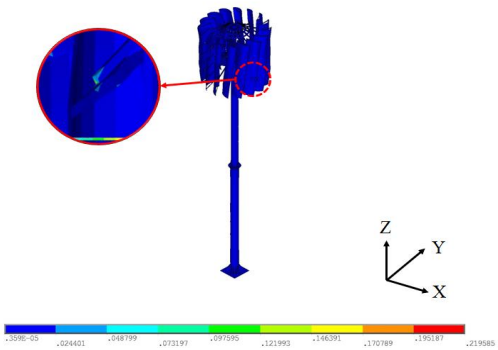


Fig. 8 Von-Mises stress due to deadweight

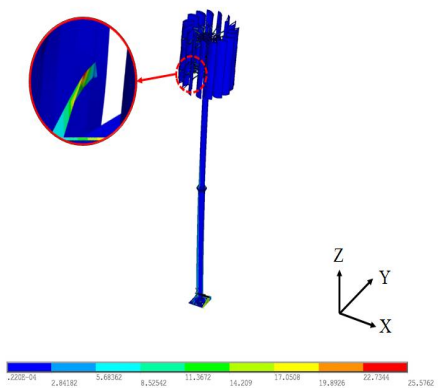


Fig. 9 Von-Mises stress due to wind load

Table 8 Computed resultant maximum stress to deadweight and wind load

Part	Resultant max. stress (MPa) due to	
	deadweight, σ_{dead}	wind load, σ_{wind}
Pole	0.0102	13.71
Turbine frame	0.2195	25.57
Turbine blade	0.0017	1.84

2.6 구조 안전성 분석

지진 응답스펙트럼해석 결과와 사하중과 풍하중에 의한 정적구조해석 결과로부터 계산된 각 부품별 최대합응력을 다음의 식 (2)에 대입하여 각 구조부품별 총합최대응력(σ_{tot})을 구하며, 식 (2)로 구한 총합최대응력과 재료의 허용응력(σ_a)을 식 (3)에 대입하여 부품별 설계안전계수(Design safety factor, S)를 구한다. Table 9에는 식 (2)와 식 (3)으로 계산된 풍력발전기의 구조 부품별 총합최대응력과 설계안전계수를 정리하였다. 표에서 보듯이 각 부품의 설계안전계수가 1보다 크므로 풍력발전기의 모든 구조 부품은 구조적으로 안전한 설계라고 할 수 있다.

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{seis}^2 + \sigma_{dead}^2 + {}^2_{wind}} \qquad (2)$$

$$S = \frac{\sigma_a}{\sigma_{tot}} \qquad (3)$$

Table 9 Computed total maximum stress and safety factor of the wind turbine parts

Part	Total max. stress, σ_{tot}	Allowable stress, σ_a	Safety factor, S
Pole	64.54	284	4.40
Turbine frame	172.86	248	1.43
Turbine blade	2.98	56	18.77

3. 결 론

본 연구에서는 3 kW급 소형 사보니우스형 수직축 풍력발전기의 내진검증을 위하여 안전정지지진/요구응답스펙트럼(RRS/SSE-5%) 조건에서 응답스펙트럼해석법으로 내진해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 소형 수직축 풍력 발전기의 모드해석 결과 고유진동수는 1차 2.12 Hz, 2차 2.13 Hz, 3차 8.25 Hz, 4차 8.96 Hz로서 캠벨선도를 이용하면 풍력발전기의 운전속도 범위 10 ~ 30 rpm에서 발생 가능한 가진주파수 범위에서 일치되는 고유진동수가 존재하지 않으므로 공진 위험성은 없다.
2. RRS/SSE-5% 지진하중에 사하중과 풍하중 조건을 추가한 내진해석 결과로부터 풍력발전기의 모든 구조부품별로 발생된 총합최대응력이 구조물의 허용응력보다 낮게 나타났으므로 검증 대상 소형 수직축 풍력발전기는 발생 가능한 최대지진에 대하여 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.
3. 본 연구의 소형 풍력발전기 내진검증해석 과정은 풍력발전기 구조설계 단계에서 발생 가능한 최대지진에서의 소형 풍력발전기 내진검증과 구조안전성 평가와 내진설계에 활용할 수 있다.

후 기

"이 논문은 2017-2018년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임."

REFERENCES

1. KBC 2009: Korean Building Code – Structural, Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2009.
2. ASCE 7-10 Standard, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, the American Society of Civil Engineers, ISBN 0-7844-1085-1, 2010.
3. Jeong, S. H., Kim, J. K., "Comparison of Provisions for Seismic Analysis Methods in ASCE 7-10 and KBC 2009," Proceedings of 2011 Workshop of the Earthquake Engineering Society of Korea, pp. 251~262, 2011.
4. Nakashima, M., Chuslip, P., "A Partial View of Japanese Post-Kobe Seismic Design and Construction Practices," Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Vol. 4, No. 1, pp. 3~13, 2004.
5. Midorikawa, M., Okawa, I., Iiba, M., Teshigawara, M., "Performance-Based Seismic Design Code for Buildings in Japan," Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Vol. 4, No. 1, pp. 15~25, 2004.
6. Won, J. B., Kim, M. E., Eum, H. J., Kim, B. S., "A Study on Vibration Characteristics of the 1.5 MW Wind Turbine under Earthquake," Proceedings of the KWEA Spring Conference, 2011.
7. Kim, J. H., "A Study on the Rotor Stability and Structural Safety under Seismic Loads for 5 MW Wind Turbine," Master's Thesis, Graduate School of Changwon National University, 2015.
8. Choi, H. C., Kim, D. H., Kim, D. M., Park, K. K., "Seismic Response Analysis of a MW Class Wind-Turbine Considering Applied Wind Loads," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 23, No. 2, 2010.
9. Choi, Y. H., Hong, M. G., "Seismic Qualification Analysis of a Vertical-Axis Wind Turbine," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol 15, No. 3, pp. 21~27, 2016.
10. Hart, G. C., Wong, K., Structural Dynamics for Engineers, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
11. Speed tech co., Technical Brochure, 2017.
12. KS C IEC 61400-1: 2013, Wind turbines - Part 1: Design requirements.
13. KS C IEC 61400-2: 2014, Wind turbines - Part 2: Small wind turbines.
14. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide, ANSYS, Inc, 2013.
15. Wilson, E. L., Kiureghian, A. Der, Bayo, E. P., "A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 9, pp. 187~194, 1981.
16. Bruneau, M., "Dynamics of Civil Engineering Structures," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 847, 1997.