

소형 수직축 풍력발전기의 내진검증 해석

최영휴^{*,#}, 홍민기^{**}

^{*}창원대학교 기계공학부, ^{**}창원대학교 대학원 기계설계공학과

Seismic Qualification Analysis of a Vertical-Axis Wind Turbine

Young-Hyu Choi^{*,#}, Min-Gi Hong^{**}

^{*}School of Mechanical Engineering, Changwon UNIV., ^{**}Graduate student, Changwon UNIV.

(Received 20 October 2015; received in revised form 18 January 2016; accepted 26 January 2016)

ABSTRACT

The static and dynamic structural integrity qualification was performed through the seismic analysis of a small-size Savonius-type vertical wind turbine at dead weight plus wind load and seismic loads. The ANSYS finite element program was used to develop the FEM model of the wind turbine and to accomplish static, modal, and dynamic frequency response analyses. The stress of the wind turbine structure for each wind load and dead weight was calculated and combined by taking the square root of the sum of the squares (SRSS) to obtain static stresses. Seismic response spectrum analysis was also carried out in the horizontal (X and Y) and vertical (Z) directions to determine the response stress distribution for the required response spectrum (RRS) at safe-shutdown earthquake with a 5% damping (SSE-5%) condition. The stress resulting from the seismic analysis in each of the three directions was combined with the SRSS to yield dynamic stresses. These static and dynamic stresses were summed by using the same SRSS. Finally, this total stress was compared with the allowable stress design, which was calculated based on the requirements of the KBC 2009, KS C IEC 61400-1, and KS C IEC 61400-2 codes.

Key Words : Vertical Wind Turbine(수직축 풍력발전기), Seismic Qualification(내진검증), Seismic Response Analysis(내진응답해석), Structural Integrity(구조물 건전성), FEM(유한요소법)

1. 서 론

1985년 멕시코 지진과 1995년 일본 고베지진 이후 국제적으로 발전소나 교량, 건축물 등의 내진설계와 내진 건전성에 대한 기준이 강화되었고^[1,2,3,4], 2014년 일본 후쿠시마 원전사고 등의 영향으로 국

내에서도 원자력발전소뿐만 아니라 건축구조물 등의 내진 건전성에 대한 관심이 고조되고 있다^[5,6,7].

풍력발전기는 규격 KSC IEC 61400-1, 2^[8,9]에 규정된 안전성과 신뢰성에 대한 설계요구조건을 만족하도록 설계되어야 하는데, IEC(International Electrical Commission)의 규격인 IEC 16400-1, 2^[10,11]를 기반으로 제정된 KSC IEC 61400-1, 2 규격은 모두 지진하중에 대하여는 별도로 규정하지 않고 있으므로 KBC 2009^[12]의 기준을 준용한다.

본 연구에서는 소형 사보니우스 수직축 풍력 발

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

전기의 내진설계 검증을 위하여 KBC 2009의 지진하중에 따른 지진응답스펙트럼 해석을 수행하고 그 결과로부터 KSC IEC 61400-1 및 KSC IEC 61400-2에 의거하여 구조물의 건정성을 평가한다.

2. 내진해석

2.1 풍력발전기 FEM 모델링

다음 Fig. 1에 정격 회전속도가 16 ~35 rpm이고 4매속 증속기를 사용하는 소형 사보니우스 수직축 풍력발전기의 구성 부품별 명칭과 FEM 모델을 나타내었다. 풍력발전기 기둥(Pole)의 바닥면과 마운팅 블록 연결고정부의 접촉조건을 구현하기 위하여 바닥면은 No separation 조건을 주어 미끄럼(Sliding)

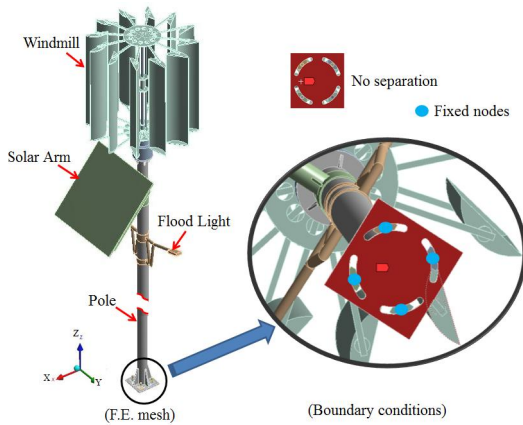


Fig. 1 FEM model of a savonius type vertical-axis wind turbine (Speed-Tech Co.)

Table 1 Summary of material properties

Material Type Component	ABS 1020	Steel(SS 400)
	Property	Rotor blades
Elastic modulus (GPa)	3	200
Poisson's ratio	0.35	0.3
Density (kg/m ³)	1070	7850
Yield strength (MPa)	55	250
Allowable stress (MPa)	50	225

은 허용하였고, 4개의 앵커 볼트는 완전 고정하였다. 풍력발전기 부품들의 재료 물성은 Table 1과 같다.

2.2 모드해석

지진하중을 받는 N-자유도 비감쇠 구조진동계의 운동방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{\ddot{u}_g(t)\} \quad (1)$$

위 식에서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성-계수행렬이고, $\{u(t)\}$ 는 운동자유도 벡터, $-[M]\{\ddot{u}_g(t)\}$ 는 유효 지진하중(Effective seismic force)이며, $\{\ddot{u}_g(t)\} = \{d\}\ddot{u}_g(t)$ 는 지진가속도 벡터이고 $\{d\}$ 는 지진력 작용방향 벡터이다.

식 (1)에 대한 고유치문제에서 모드 벡터 $\{\psi\}_i$ 와 모드행렬 $[\Phi] = [\{\psi\}_1 \{\psi\}_2 \dots \{\psi\}_N]$ 을 구하고, 운동자유도 벡터 $\{u(t)\}$ 는 정규 모드벡터 $\{q(t)\}$ 의 선형좌표 변환 관계, 즉 $\{u(t)\} = [\Phi]\{q(t)\}$ 로 표현할 수 있다. 진동계를 비례감쇠계로 가정할 때, 모드 직교성을 이용하면 식 (1)의 운동방정식은 다음과 같이 N 개의 1-자유도 방정식으로 변환된다.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2q_i(t) = -\gamma_i\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

위 식에서 ζ_i 와 γ_i 는 각각 다음 식으로 정의되는 모드 감쇠율(Modal damping ratio)과 정규모드 지진 참여도(Normal modal earthquake participation factor)이다.

$$\zeta_i = \frac{1}{2\mu_{ii}\omega_i} \{\psi\}_i^T [C] \{\psi\}_i \quad (3)$$

$$\gamma_i = \frac{\xi_i}{\mu_{ii}} \quad (4)$$

여기서 μ_{ii} 와 ξ_i 는 i -번 모드의 모드 질량(Modal mass)과 모드 참여도(Modal participation factor)로

서 다음과 같이 구해진다.

$$\mu_{ii} = \{\psi\}_i^T [M] \{\psi\}_i \quad (5)$$

$$\xi_i = \{\psi\}_i^T [M] \{d\} \quad (6)$$

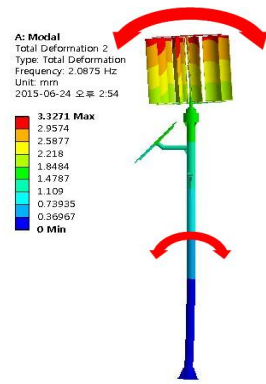
내진해석에 포함되는 모드 수는 질량참여도 (Mass participation ratio)가 90% 이상이 되도록 결정한다^[13]. 즉, 해석에 포함된 N 개 모드질량의 총합 μ_{ii}^* 은 다음 관계를 만족하도록 결정한다.

$$\mu_{ii}^* = \sum_{i=1}^N \gamma_i \xi_i = \sum_{i=1}^N \frac{\xi_i^2}{\mu_{ii}} \geq 0.9 \quad (7)$$

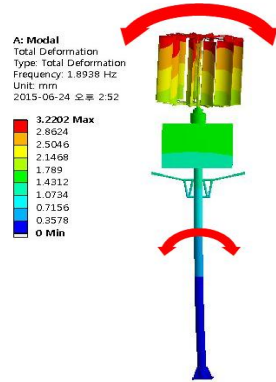
Fig. 1의 소형 수직축 풍력발전기의 FEM 모델에 대하여 ANSYS Workbench를 이용하여^[14] 모드해석을 수행하였다. 모드해석 결과 X-, Y-, Z-방향별 모드 질량참여도를 Table 2에 정리하였다. Fig. 2에는 X-, Y-, Z-방향별로 참여도가 가장 높은 진동 모드의 형상을 나타내었다. 모드해석 결과 1차 고유진동수는 약 2 Hz이고 공진위험속도는 120 rpm 인데, 발전기의 운전 속도 범위는 16 ~ 35 rpm이므로 공진 문제는 발생되지 않는다.

Table 2 Modal analysis results; modal mass ratio to total mass in the X-, Y-, and Z-directions

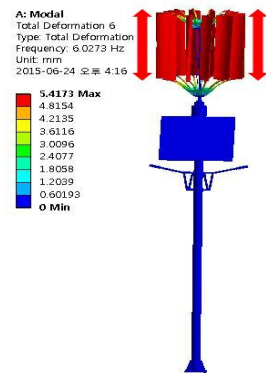
Mode No.	Freq. (Hz)	Ratio			Ratio to total mass		
		X-dir	Y-dir	Z-dir	X-dir.	Y-dir.	Z-dir.
1	1.89	0.165	<u>1.000</u>	0.011	1.95E-02	0.712497	1.06E-05
2	2.09	<u>1.000</u>	0.166	0.054	0.714134	1.98E-02	2.62E-04
3	4.76	0.072	<u>0.223</u>	0.002	3.76E-03	3.54E-02	6.80E-07
4	4.77	<u>0.231</u>	0.072	0.010	3.81E-02	3.72E-03	9.35E-06
5	5.17	0.003	0.001	0.034	9.65E-06	2.33E-07	1.04E-04
6	6.03	0.002	0.002	<u>1.000</u>	3.59E-06	3.08E-06	8.74E-02
7	6.67	0.010	0.025	0.001	7.40E-05	4.48E-04	1.33E-07
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	42.49	0.002	0.019	0.321	3.89E-06	2.59E-04	9.02E-03
Total	0.9	0.9	0.9



(a) In the X-direction: 2nd mode (2.09 Hz)



(b) In the Y-direction: 1st mode (1.89 Hz)



(c) In the Z-direction: 6th mode (6.02 Hz)

Fig. 2 The most higher mass ratio modes

2.3 지진 응답스펙트럼 해석

다자유도계의 지진 응답스펙트럼은 스펙트럼-모드해석 방법(Spectrum modal analysis approach)을 이용하여 참여도가 높은 모드별 최대 지진응답스

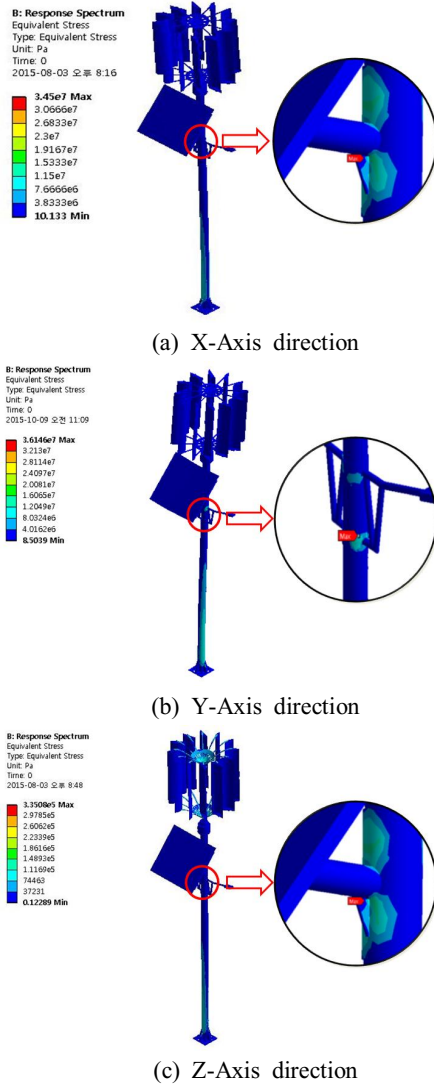


Fig. 5 Computed Von-Mises stress to seismic load

펙트럼을 SRSS(Square root of the sum of the squares)방법으로 조합하여 구한다^[13,15]. 먼저 각 자유도별로 비연성화 된 운동방정식 (2)에 지반 가속도 스펙트럼을 입력하여 i 번째 정규모드의 최대 변위응답스펙트럼 $q_{i,max}$ 을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 q_{i,max} &= |q_i(t)|_{\max} \\
 &= \frac{\gamma_i}{\omega_{di}} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\zeta_i \omega_i (t-\tau)} \sin \omega_{di} (t-\tau) d\tau \\
 &= \gamma_i S_{di}(\omega_i, \zeta_i)
 \end{aligned} \tag{8}$$

위에서 $\omega_{di} = \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2}$ 는 i 번째 모드의 감쇠 고유진동수, $S_{di}(\omega_i, \zeta_i)$ 는 i 번째 모드의 변위응답스펙트럼이다. 따라서 일반좌표와 모드벡터의 변환관계로부터 구조물의 최대 변위응답스펙트럼을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{u\}_{i,max} = \{\psi\}_i q_{i,max} = \{\psi\}_i \{\gamma_i S_{di}(\omega_i, \zeta_i)\} \tag{9}$$

또한 i 번째 모드 변위응답스펙트럼에 의한 구조물의 최대 탄성변형력 벡터 $\{F\}_{i,max}$ 는 다음과 같다.

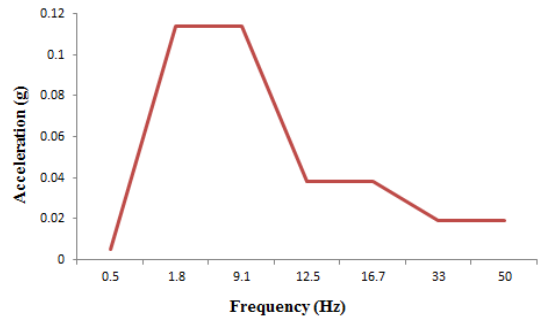


Fig. 3 Floor RRS of SSE-5% condition (Horizontality)

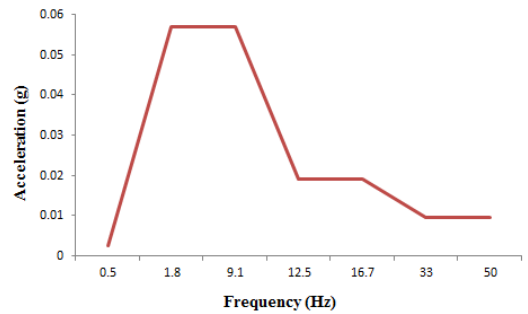


Fig. 4 Floor RRS of SSE-5% condition (Verticality)

$$\begin{aligned} \{F\}_{i,\max} &= [K]\{u\}_{i,\max} = [K]\{\psi\}_i q_{i,\max} \\ &= [K]\{\psi\}_i \{\gamma_i S_{di}(\omega_i, \zeta_i)\} \end{aligned} \quad (10)$$

또는

$$\begin{aligned} \{F\}_{i,\max} &= [M]\{\ddot{u}\}_{i,\max} = [M]\{\psi\}_i \omega_{di}^2 q_{i,\max} \\ &= [M]\{\psi\}_i \{\gamma_i S_{di}(\omega_i, \zeta_i)\} \end{aligned} \quad (11)$$

그러므로 식 (7)에서 결정된 모드 참여도가 높은 N 개 모드별 최대 응답스펙트럼과 최대 탄성변형력 벡터를 SRSS 방법으로 조합하면 구조물의 최대 지진응답스펙트럼 $\{u\}_{\max}$ 과 최대 탄성변형력 벡터 $\{F\}_{\max}$ 를 각각 다음과 같이 구하게 된다.

$$\{u\}_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [\{u\}_{i,\max}]^2} \quad (12)$$

$$\{F\}_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [\{F\}_{i,\max}]^2} \quad (13)$$

내진해석은 KBC 2009의 지반 기준 설계요구응답스펙트럼(RRS of SSE-5%: Required Response Spectrum - Safe Shutdown Earthquake -5% damping)에 의거하여 해석을 수행하였다. 수평 방향의 RRS는 Fig. 3과 같고 수직 방향 RRS는 Fig. 4와 같다. 지반종류가 Sc(연암지반)인 경우 하중 보전계수 $C_a = 0.08$, $C_V = 0.11$, 지진위험도 계수 $I = 0.57$ (100년), 감쇠비 5%일 때 지표면 최고가속도 $A = 2.5IC_a$ 는 0.114g이다. ANSYS Workbench를 이용하여^[14] 구한 X-, Y- 및 Z-축 방향별 변위 응답과 최대응력을 각각 Table 3과 Table 4에 정리하였다. 각 방향별 지진응답 응력 선도는 Fig. 5에 나타내었다.

2.4 정적 해석

풍력발전기의 탑재 중량과 자중의 합인 사하중에 대한 정적 구조해석 결과로부터 구한 정적 응력은 지진응답해석에서 구한 응력과 합산되어 풍력발전기 구조물의 총합응력을 구하게 된다. 사하중에 따른 정적 변위 응답과 최대응력 해석 결과

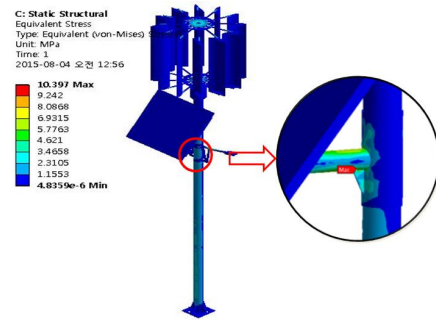


Fig. 6 Computed Von-Mises stress due to static load

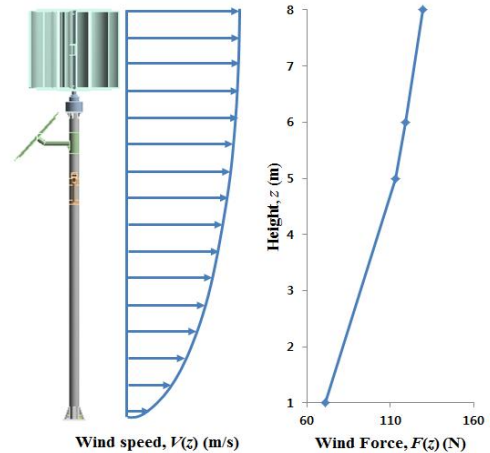


Fig. 7 Applied wind load function of wind speed

는 각각 Table 3과 Table 4에 정리하였고, 응력선도는 Fig. 6에 나타내었다.

2.5 풍하중 응답 해석

먼저 표준 풍력발전의 지상 높이 z 에 따른 풍속 $V(z)$ 은 멱법칙(Wind shear law)^[11]에 따라 다음 식과 같이 표시된다.

$$V(z) = V(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (14)$$

위에서 z_r 은 기준 지상 높이, $\alpha=0.2$ 는 역법칙 지수이다. 풍력발전기 구조물의 단면에 작용하는 풍하중 $F(z)$ 는 다음 식과 같다.

$$F(z) = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad (15)$$

여기서 C_D 는 실린더의 항력계수, ρ 는 공기의 밀도, V 는 풍속, A 는 풍하중을 받는 단면적이다.

본 해석에서는 식 (15)의 풍하중을 지상 높이에 따라 3개의 구간으로 나누어 선형화하여 Fig. 7과 같이 적용하였다.

풍하중에 의한 풍력발전기의 변위 응답과 최대응력은 각각 Table 3과 Table 4에 정리하였고, 응력 해석 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

2.6 응답 변위 및 응력과 구조 안전도

풍력발전기 구조물에 발생된 총합응력(Total

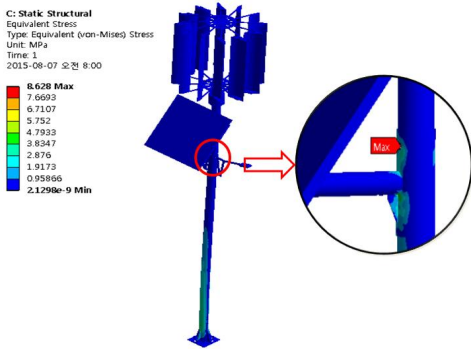


Fig. 8 Computed Von-Mises stress due to wind load

Table 3 Computed maximum displacement on the structural parts of the wind turbine

Load	Max. Displacement (mm)				Total (SRSS)
	X-Dir.	Y-Dir.	Z-Dir.	Total	
Seismic	12.28	14.39	0.42	18.92	20.56
Static	-	-	7.56	7.56	
Wind	2.72	-	-	2.72	

Table 4 Computed maximum Von-Mises stress on the structural parts of the wind turbine (Unit: MPa)

Part	Load	Max. stress				Total (SRSS)
		X-dir.	Y-dir.	Z-dir.	Total	
Pole & Solar arm	Seismic	34.50	36.14	0.33	49.96	51.75
	Static	-	-	10.40	10.40	
	Wind	8.63	-	-	8.63	
Rotor blade	Seismic	0.58	0.62	0.26	0.88	4.75
	Static	-	-	4.67	4.67	
	Wind	0.03	-	-	0.03	

stress) σ_T 은 다음과 같이 정하중에 의한 최대응력과 풍하중에 의한 최대응력 및 동적 지진응답에 의한 최대응력을 SRSS방법으로 조합하여 구한다.

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{E-\max}^2 + \sigma_{S-\max}^2 + \sigma_{W-\max}^2} \quad (16)$$

여기서 $\sigma_{E-\max}$ 는 동적 지진응답에 의한 최대 동적 총합응력, $\sigma_{S-\max}$ 는 정하중에 의한 총합 정적 최대응력(Total static stress), $\sigma_{W-\max}$ 는 풍하중에 의한 총합 최대응력으로서 각각 각 방향별 최대응력을 SRSS 방법으로 조합하여 구한다. 총합 최대 변위도 SRSS방법으로 조합하여 구한다.

동적 지진 응답해석과 정적해석 및 풍하중 응답해석에서 구한 각각의 최대변위와 총합 최대변위 응답을 Table 3에 종합하여 정리하였고, 최대응력과 총합 최대응력을 Table 9에 정리하였다.

KBC 2009와 IEC 61400의 구조 안전도는 최대응력을 기준으로 하여 다음과 같이 정의된다.

$$S = \frac{\sigma_T}{\sigma_a} \quad (17)$$

여기서 σ_T 는 최대응력이고, σ_a 는 허용응력이다.

Table 4에서 확인할 수 있듯이 SS 400 재질인 기둥(Pole) 구조물에 발생된 총합 최대응력은 51.75 MPa이고, 이는 허용응력 225 MPa의 약 23%에 해당한다. 또한 ABS 1020 재질인 풍차 블레이드 구조물에 발생된 총합 최대응력은 4.75 MPa로서 이

는 허용응력 50 Mpa의 9.5% 정도이다.

3. 결과 검토 및 결론

검증대상 소형 수직축 풍력발전기의 모드해석 결과 1차 고유진동수는 약 2 Hz이고 발전기의 운전 속도 범위는 16 ~ 35 rpm이므로 공진 문제는 발생되지 않는다. 지표면 표준 설계가속도응답스펙트럼(5% 감쇠비)에 의거하여 생성된 설계요구응답스펙트럼(RRS) 입력에 대하여 동적 내진해석을 수행한 결과 최대변위는 수평 X-방향으로 14.39 mm의 변위가 발생하고 총합 최대변위는 20.56 mm정도 발생할 것으로 예측되며, 이 정도의 변위는 소형 풍력발전기의 운전과 정상적인 작동에 영향을 미치지 않는다. 또한 사하중과 풍하중 및 지진 가진력으로 인하여 소형 수직축 풍력발전기 구조부품에 발생된 총합 최대응력은 기둥(Pole)에서 허용응력의 23% 정도이고 풍차 블레이드 부품에서는 허용응력의 9.5% 정도이다. 그러므로 검증대상의 소형 수직축 풍력발전기는 지진에 대하여 구조적으로 건전하다.

후 기

이 논문은 2014-2015년도 창원대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Nakashima, M. and 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, 2003.
2. Midorikawa, M., Okawa, I., Iiba, M. and Teshigawara, M., "Performance-Based Seismic Design Code for Buildings in Japan," *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-25, 2003.
3. Fragiadakis, M. and Lagaros, N. D., "An Overview to Structural Seismic Design Optimization Frameworks," *Computer and Structures*, Vol. 89, No. 11, pp. 1155-1165, 2011.
4. SEI/ASCE 7-02 Standard, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ISBN 0-7844-0624-3, 2003.
5. Won, J. B., Kim, M. E., Eum, H. J., and Kim, B. S., "A Study on Vibration Characteristics of the 1.5 MW Wind Turbine under Earthquake," *Proceedings of the 2008 Workshop of the Earthquake Engineering Society of Korea Spring Conference*, 2008.
6. Jeong, S. H. and Kim, J. K., "Comparison of Provisions for Seismic Analysis Methods in ASCE 710 and KBC 2009," *Proceedings of 2011 Workshop of the Earthquake Engineering Society of Korea*, pp. 251-262, 2011.
7. Han, S. W. and Park, Y. J., "Seismic Performance Evaluation of Steel Intermediate Moment Frames with Various SDCs and Heights," *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction*, Vol. 31, No. 8, pp. 27-34, 2015.
8. KS C IEC 61400-1: 2013, *Wind Turbines - Part 1: Design Requirements*, 2013.
9. KS C IEC 61400-2: 2014, *Wind Turbines - Part 2: Small Wind Turbines*, 2014.
10. IEC 61400-1: 2005, *Wind Turbines - Part 1: Design Requirements*, 2005.
11. IEC 61400-2: 2006, *Wind Turbines - Part 2: Design Requirements for Small Wind Turbines*, 2006.
12. KBC 2009: *Korean Building Code - Structural*, Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2009.
13. Bruneau, M., "Dynamics of Civil Engineering Structures," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 5, pp. 847, 1997.
14. *Selected Problems for ANSYS Users*, TSNE Co., 2010.