한국지진공학회 논문집 21권 6호 (통권 제119호)
2017년 11월

ISSN 1226-525X / eISSN 2234-1099
EESK J Earthquake Eng Vol. 21 No. 6, 295-301
https://doi.org/10.5000/EESK.2017.21.6.295

풍력발전기의 규정에 대한 지진 하중 특성 연구 및 건전성 평가

Study on Seismic Load Characteristics of Regulations and Integrity Evaluation of Wind Turbine

김미선[1)]* · 김정기[1)] · 박선호[1)] · 방조혁[1)] · 정진화[1)]
Kim, Miseon[1)]* · Kim, Jeonggi[1)] · Park, Sunho[1)] · Bang, Johyug[1)] · Chung, Chinwha[1)]

[1)]유니슨(주), 풍력연구소
[1)]Wind Energy R&D Center, UNISON Co., Ltd.

/ ABSTRACT /

This paper relates to the study of load characteristics applicable to wind turbine generators induced by earthquakes. An artificial design earthquake wave generated through the target spectrum and the envelope function of Richter Magnitude Scale (ML) 7.0 as in ASCE4-98 was created. A simulation of earthquake loads were performed according to the design load cases (DLC) 9.5~9.7 of GL guidelines. Additionally, simulation of seismic loads experienced by Wind Turbines installed in the Gyeongju region were carried out utilizing artificial earthquakes of ML 5.8 simulating the real earthquakes during the Gyeongju Earthquakes of Sept. 2016.

Key words: Korea, Earthquake, Wind turbine, Gyeongju earthquake

1. 서 론

2016년 9월 12일 경주에서 발생한 규모 5.8의 9.12 지진 이후 지진에 대한 구조적 안전성이 부각되고 있으며, 실제로 작년 한 해 동안 국내에서 발생한 규모 2.0 이상의 지진발생횟수는 여진을 포함하여 254회[1]로 지진이 급격히 증가하였다.

풍력발전기에 대한 국외의 내진설계기준을 살펴보면 대표적인 국제 인증기준으로 IEC 61400-1[2]과 GL guideline 2010[3]이 있으며, 이 기준들은 지진의 위험지역에 대해서는 지진에 의해 발생된 하중을 고려하고, 지진하중은 지역규정을 따른다고 명시하였다. 그밖에 지진이 많은 일본의 내진설계기준을 살펴보면 풍력발전설비 지지구조물 설계지침・동 해설 2010[4]에 "지진하중의 평가"라는 세부적인 기준을 제시하고 있다. 풍력발전기의 국내 기준은 KS C 8572[5]와 전기설비기술기준[6]이 있으며, KS C 8572의 경우 IEC 61400-1기준을 준용한 기준으로 국제기준과 동일하게 명기되어 있으며, 전기설비기술기준의 경우 풍력터빈을 지지하는 구조물은 설치 환경에 따라 지진에 대해 구조상 안전하여야 한다고 명기되어 있다. 그러나 "지진하중"에 대한 세부적인 기준은 마련되어 있지 않다. 따라서 풍력발전기에 적용 가능한 국내외 설계기준(풍력발전설비 지지구조물 설계지침・동 해설, 건축구조기준, 항만 및 어항설계기준・해설)을 비교하여 풍력발전기에 적절한 지진하중을 산출하고, 건전성을 평가하고자 한다. 또한, 최근 경주에서 발생한 9.12 지진을 적용하여 A사 풍력발전기의 건전성을 평가하고자 한다.

*Corresponding author: Kim, Miseon
E-mail: kms@unison.co.kr
(Received July 3, 2017; Revised August 29, 2017; Accepted September 22, 2017)

2. 지진하중 특성연구

2.1 국제기준

풍력발전기의 내진규정이 세부적으로 제시된 일본의 풍력발전설비 지지구조물 설계지침・동 해설을 살펴보면, 대상구조물의 높이가 60 m이상에 대해 시간이력 응답해석을 수행하고, 수평방향 지반운동은 지역계수를 고려한 스펙트럼적합파와 관측지진파를 채용한다. 채용된 지반운동을 공학적 기저면(Vs ≥ 400 m/s)에 입력하여 지반에 의한 증폭을 고려하거나 건설지 주변에서의 활단층분포, 단층파괴모델, 과거의 지진활동, 지반구조 등에 입각하여, 건설지에서의 부지내 지진파를 적용하도록 규정하고 있다. 이에 따른 지진하중 특성은 Table 1과 같이 정리 된다.

2.2 국내기준

최근 국내에 설치되고 있는 중대형 풍력발전기의 높이는 지상 70 m~100 m가 대부분이며, 풍속이 다소 높은 연안에 설치될 수 있음을 감안하여 건축물(건축구조기준) 및 항만(항만 및 어항 설계기준・해석)의 내진규정을 살펴보았다. 각 기준의 지진하중 특성은 Table 2와 같다.

건축구조기준(KBC 2016)의 경우, 재현주기 2400년에 한번 발생할 지진의 최대 크기에 대하여 지진구역 및 지반종류를 고려하고, 건축물의 중요도에 따라 피해수준을 다르게 적용하기 위해 내진등급을 총 3등급으로 분류하여 지진하중을 산정한다. 건축물의 경우 지진 후 피해복구에 필요한 중요시설을 갖추고 있거나 유해물질을 다량 저장하고 있는 구조물의 경우 중요도(특)으로 분류하고, 지진으로 인한 피해를 입을 경우 대중에게 큰 위험을 초래할 수 있는 구조물을 중요도(1)로 분류하며, 농업시설물, 소규모창고, 가설구조물을 중요도(3)으로 분류한다. 중요도(특), 중요도(1), 중요도(3)에 해당하지 않는 건축물의 경우 중요도(2)로 분류하고, Table 3에 의해 내진등급을 분류한다.

풍력발전기의 내진등급은 규정되어 있지 않으나 중요도(특), (1), (3)에 해당하지 않는 건축물로 중요도(2)로 분류하였으며, 내진II등급으로 분류하였다. 항만 및 어항설계기준・해설(Ports and Fishing Code 2014)의 경우, 재현주기 50년에서 4800년 중 적절한 내진성능과 내진 등급을 기준으로 지반운동을 산정한다. 따라서 KS C 8572에 정의된 지진 재현주기 475년을 기준으로 평균재현주기 500년을 적용하였으며, 평균재현주기 500년은 내진II등급에 해당된다.

Table 1. Seismic design criteria in Japan

Analysis Method	Time history analysis (height>60 m)
Recurrence Period(Year)	50, 500
Seismic Zone	A, B, C
PGA (Bed Rock)	0.163g / 0.326g
Acceleration Component	Horizontal component (X,Y) + Vertical component (Z)
Input Ground Motion	Artificial earthquake wave, Observed seismic wave, Site earthquake wave

Table 2. Seismic design criteria in South Korea

	KBC 2016[7]	Ports and Fishing Code 2014[8]
Recurrence Period (year)	2400 x 2/3	50, 100, 200, 500, 1000, 2400, 4800
Seismic Zone	I, II	I,II
Seismic Classification	Special, I, II	I, II
Soil Type	S_A, S_B, S_C, S_D, S_E	S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F
Acceleration Component	Horizontal component (X,Y)	Horizontal component (X,Y) + Vertical component (Z)
Input Ground Motion	Artificial earthquake wave, Observed seismic wave	Artificial earthquake wave, Observed seismic wave
Analysis method	Equivalent static analysis, Dynamic analysis	Equivalent static analysis, Dynamic analysis

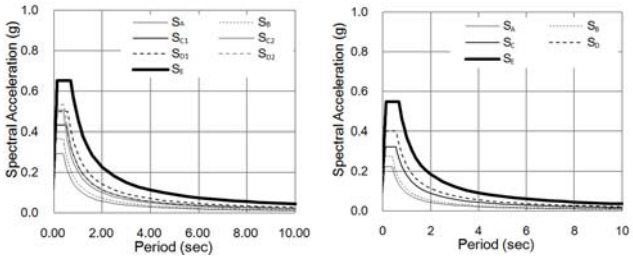
Table 3. Importance category and seismic classification of building

Importance category	Seismic Classification	Description
Special	Special	Buildings designated as essential facilities (ex, emergency shelters, general hospital)
1	I	Buildings that represent a substantial hazard to human life in the event of failure (ex, school, welfare facilities)
2	II	Building not corresponding to categories “Special”, “1” or “3”
3	II	Agricultural, temporary, and minor storage facilities

2.3 목표스펙트럼 정의

건축구조기준과 항만 및 어항 설계기준・해설에 기초하여 가속도 설계스펙트럼을 Fig. 1과 같이 도시화 하였다. 단, 부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반 S_F는 제외하였다.

각 기준에서 가장 높은 스펙트럼을 요구하는 S_E지반을 비교한 결과 Fig. 2와 같이 건축구조기준(실선)이 항만 및 어항설계기준・해설(점선)보다 높은 가속도스펙트럼을 요구한다. 그러나 건축구조기준의 경우, 구조물이 지반에 고정된 정지 상태로 연직방향 거동에 의해 상대운동이 발생하지 않는다는 가정아래 일반적으로 연직방향 지반운동은 무시하는 반면, 항만 및 어항설계기준・해설의 경우, 수평2축 방향성분 외에 연직방향성분도 수평



(a) KBC 2016 (b) Ports and Fishing Cord 2014

Fig. 1. Acceleration response spectrum

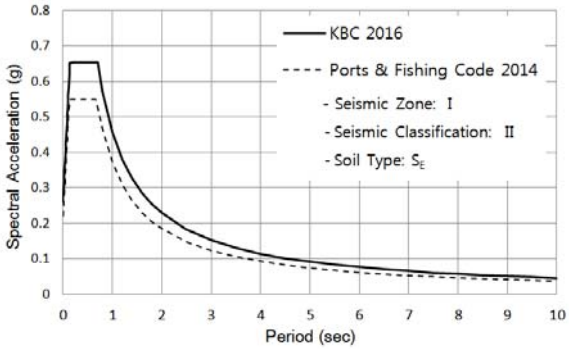


Fig. 2. Comparison of Acceleration response spectrum

방향의 2/3수준으로 지반운동을 고려한다. 일본의 경우, 수평방향 가속도 스펙트럼을 기준으로 0.1초 이하의 단주기는 20/31수준, 이후 장주기는 1/2수준으로 정의하여 연직방향 지반운동을 고려한다[4]. 지진하중의 특성은 국지적인 지질조건 및 지하지형에 따라 달라지므로 지역규정을 우선되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 풍력발전기의 지진에 대한 건전성을 검토하기 위하여 건축구조기준을 따라 수평방향 목표스펙트럼을 선정하고, 항만 및 어항 설계기준・해설을 따라 수평방향 목표스펙트럼의 2/3 수준으로 연직방향 지반운동을 추가적으로 고려하였다.

3. 입력 지반운동 선정

3.1 스펙트럼 적합파

지진에 의한 하중은 주파수 또는 시간영역으로 결정될 수 있으나, 풍력발전기에 작용하는 외력이 시간에 따라 변하는 동하중이라는 특성을 고려하여 목표스펙트럼에 적합한 시간이력을 작성하였다. 건축구조기준의 경우, 3개의 지반운동을 이용하여 최대응답으로 설계 하거나, 7개 이상의 지반운동을 이용하여 평균응답으로 설계한다. GL guideline의 경우, 6개 이상의 지반운동을 이용하여 최대응답으로 설계한다. 보수적인 결과를 위해 본 연구에서는 6개의 지반운동을 사용하였으며, 그 중 최대응답을 지진에 의한 하중으로 결정하였다. 이때 사용된 지반운동은 난수와 Fig. 3의 포락함수를 이용하여 목표스펙트럼에 적합한 6개의 인공지진파를 생성하였다. 사용된 포락함수는 규모별로 제시된 ASCE 4-98[9]을 참고하여 규모 7이상에 해당하는 강진지속시간을 적용하여 생성하였다. Fig. 4는 생성된 인공지진파 중 Case1에 대해 도시화하였으며, Fig. 3의 포락함수와 일치하게 생성된 것을 확인 할 수 있다.

설계지진파의 적합성을 평가하기 위해 건축구조기준에 근거하여 응답스펙트럼의 SRSS값이 풍력발전기 기본 진동주기의 0.2배부터 1.5배 사이에 해당되는 주기에 대해서 목표스펙트럼의 1.3배보다 10% 이상 작지 않도록 지진파를 선정하였다. 6개의 인공지진 시간이력의 적합성은 Fig. 5에 나타내었으며, 회색음영 부분은 풍력발전기 기본진동주기의 0.2배에서 1.5배를 의미한다. 산출된 인공지진파는 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 제60조의 2[10]에 의해 내진능력(MMI 등급) VII 0.261 g에 해당한다.

3.2 관측 지진파

최근 경주에서 국내 최대 규모의 9.12 지진이 발생하였으며, 경주지역에 A사 풍력발전기가 지반종류 S_B와 S_C에 설치되었거나 건설 중이다. 실제 사이트의 지진파를 이용하여 풍력발전기의 건전성을 평가하기 위해, 9.12 지진의 진앙지 주변 관측소에서 측정된 지진파를 입력 지반운동으로 선정하였다(Fig. 6). 진앙지 주변 MKL, USN, DKJ관측소의 정보는 Table 4에

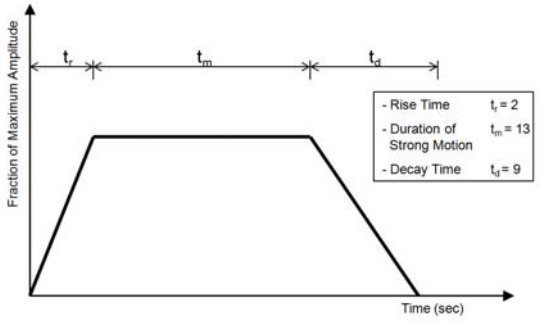


Fig. 3. Envelope functions (Magnitude 7.0~7.5)

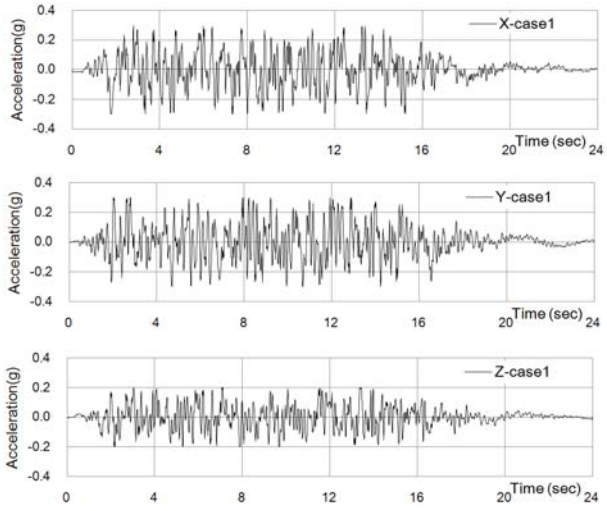


Fig. 4. Artificial earthquake waves (Case1)

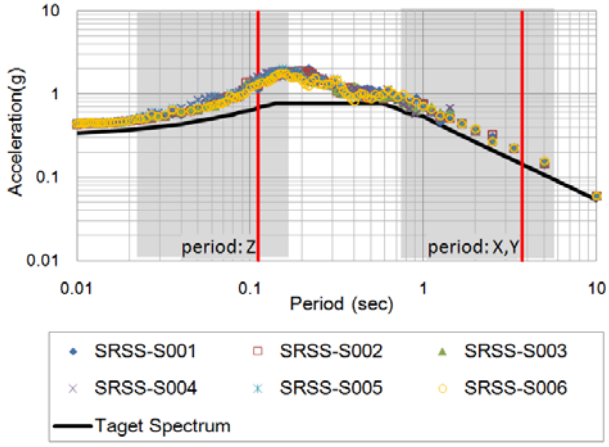


Fig. 5. Response Spectrum of Artificial Earthquakes

Fig. 6. Seismic Station of Gyeongju Earthquake(9.12 earthquake)

나타내었고, 사용된 계측지진은 설치 중인 풍력발전단지의 불리한 지반조건(S_c)와 동일한 지반의 계측 지진파(USN)를 사용하였다[11]. 사용된 USN지진파의 파형은 Fig. 7과 같으며, 응답스펙트럼은 Fig. 8과 같다.

4. 지진을 고려한 하중계산

4.1 설계하중조건

본 연구에서는 지진하중에 대한 설계기준이 세부적으로 제시되어 있는 GL Guideline을 적용하였으며, GL Guideline 에는 풍력발전기의 운전 상태, 외부환경 조건, 고장 및 유지 보수등과 같이 설계시 고려해야 되는 설계하중케이스(Design Load Case, DLC)에 대해 정의하고 있다. DLC는 여러 요소의 조합을 통해 세부적으로 분류 및 정의되며, 지진을 고려하는 DLC는 Table 5와 같이 정상 운전 중에 지진이 발생하는 경우(DLC 9.5), 정상 운전 중 지진과 계통손실(grid loss)이 발생하여 정지되는 경우(DLC 9.6), 계통손실로 정지된 후 지진이 발생한 경우(DLC 9.7)로 정의하고 있다. 지진하중에 대한 부분안전계수는 GL Guideline 2010에 제시된 1.0을 적용하였다.

Table 4. Information of analyzed stations

Station		MKL	USN	DKJ
Latitude		35.7322	35.7024	35.9468
Longitude		129.242	129.1232	129.1089
Acceleration sensor		ES-T	ES-T	CMG-5T
Recorder		Q330	Q730	Q330HRS
Site class		SB	SC	SB
Epicentral distance [km]		5.9	8.2	22.2
PGA (gal)	E-W	339.6	403.9	89.7
	N-S	269.7	422.2	209.3
	Vertical	200.0	209.3	65.7

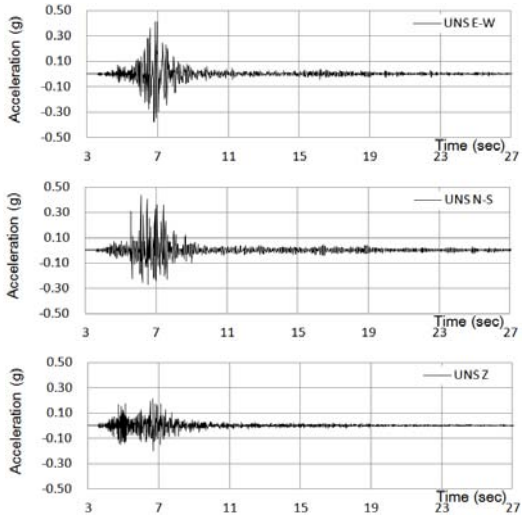


Fig. 7. Gyeongju earthquake waves (9.12 earthquake)

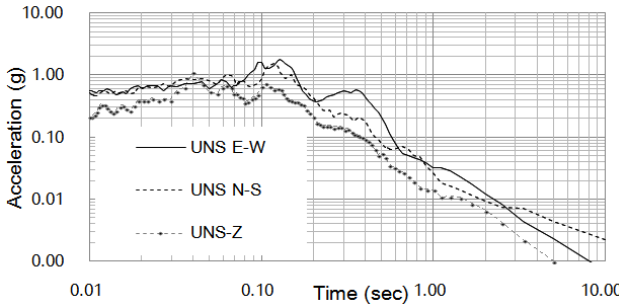


Fig. 8. Response spectrum of gyeongju earthquake waves (9.12 earthquake)

4.2 해석모델

해석에 사용된 모델은 기어드(Geard) 타입의 육상 풍력터빈 모델로 로터(Rotor)가 타워의 상부에 위치하는 전방위형(UPwind)타입이며, 3개의 블레이드(Blade)를 갖는 수평축 풍력터빈이다. 풍력터빈 지지구조물로는 허브 높이 100 m인 강재 타워가 적용되었으며 해석모델의 일반적인 사양

Table 5. Earthquake design load case (DLC)

Design situation	DLC	Wind Conditions	Other Conditions
Power production	9.5	NTM*	Earthquake
	9.6	NWP**	Earthquake plus grid loss and, if applicable, activation of the safety system by vibration sensor
Parked (standstill or idling)	9.7	NWP	Earthquake and grid loss

* NTM = Normal turbulence wind model
** NWP = Normal wind profile model

Table 6. Technical data of the Wind Turbine

Turbine type	Upwind horizontal axis
Design class	GL/IEC S
Blade weight	11.1 ton
Nacelle weight	85 ton
Tower weight	231 ton
Operation wind speed	3~20 m/s
Rotor speed	6.0~15.4 rpm

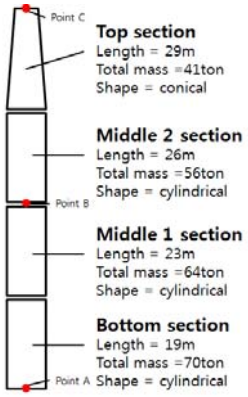


Fig. 9. Technical data of the tower

은 Table 6과 Fig. 9와 같다. 풍력발전기의 동적하중을 산출하기 위해 상용 소프트웨어 GH Bladed를 사용하여 통합 하중해석을 수행하였다. 단, GH Bladed의 경우 수평방향 지반운동만 고려되므로, 연직방향의 지반운동에 대해 Ansys를 사용하여 별도로 시뮬레이션을 수행하였다. 지진에 대한 시뮬레이션을 수행할 때 사용되는 좌표계는 Fig. 10과 같이 타워 중심축과 타워 기초부의 윗면이 교차하는 지점을 원점으로 하는 직교 좌표계를 사용하였다. 해석모델은 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었으며, 지진하중의 응답을 해석하는 과정에서 사용된 각 모드별 질량참여율의 합은 80%이상을 사용하였고, 타워의 고유주기 및 모드 형상은 Table 7과 같다.

4.3 하중평가

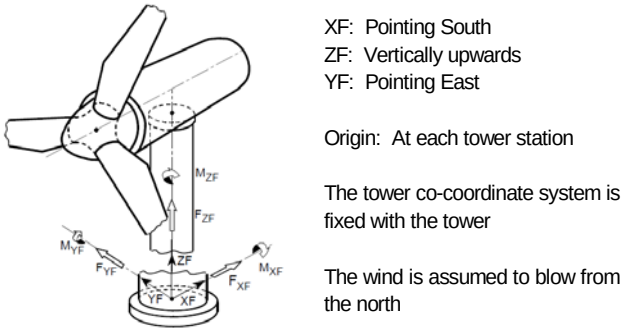


Fig. 10. Coordinate system

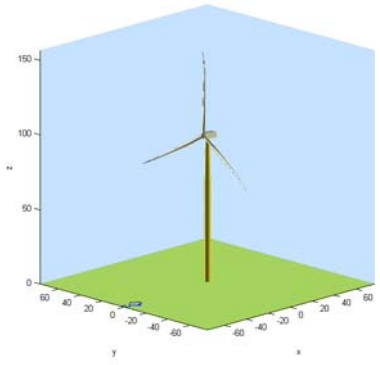


Fig. 11. Wind turbine system of GH bladed

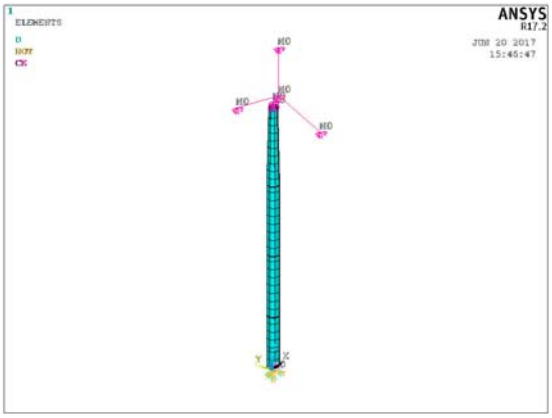


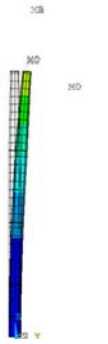
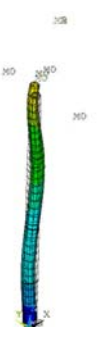
Fig. 12. FE model of ansys

지난 20년 동안 경주에서 발생된 규모 3.0이상 지진은 29회이고[1], 지진파의 강진지속시간이 10초 내외임을 고려한다면 지진에 의한 피로손상은 풍하중에 의한 피로손상 보다 미미할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 지진에 의한 피로 손상도는 평가에서 제외하고, 극한하중에 대해 평가를 수행하였다. 평가부재로는 풍력발전기를 지지하는 타워를 선정하고, 타워의 주요설계인자인 굽힘 모멘트에 대해 살펴보았다.

타워의 설계 시 고려된 최대 굽힘 모멘트는 DLC1.5에서 발생하는 하중이며, DLC1.5는 1년 재현 주기의 극한 운전 돌풍(extreme operating gust, EOG1) 중 계통 손실이 발생하는 설계하중 조건으로 Fig. 13의 바람 조건과 운전 상태로 정의 된다. Fig. 13과 같이 10.5초의 짧은 시간 동안에 급격한 풍속 변화에 대한 공력 토크가 증가하고 5초에서 발생하는 계통 손실에 의해 발전기 부하가 상실되고 이로 인해 순간적인 로터의 가속이 발생하여 타워에 최대 굽힘 모멘트($M_{xy}=\sqrt{M_x^2+M_y^2}$)를 발생시킨다.

인공지진파를 적용한 타워의 최대하중은 DLC9.5 에서 발생하며 최대하중 발생 시점의 시간이력은 Fig. 14에 도시되어 있다. DLC9.5 는 정상 난류 바람 조건에서 정상 운전 중 지진이 발생하는 것으로, 100초 부근에서 발생한 지진에 의해 타워 하중이 증가된다. Table 8은 Fig. 9에 표기된 위치 A, B, C에 대해서 타워 설계 시 고려된 최대 굽힘 모멘트(A)와 지진이 고려되었을 때 최대 굽힘 모멘트(B)의 비(B/A)를 나타내었다.

Table 7. 1st mode shape and 1st natural frequency of the tower

X–Dir.	Y–Dir.	Z–Dir.
		
Frequency=0.269 Hz	Frequency=0.270 Hz	Frequency=9.019 Hz

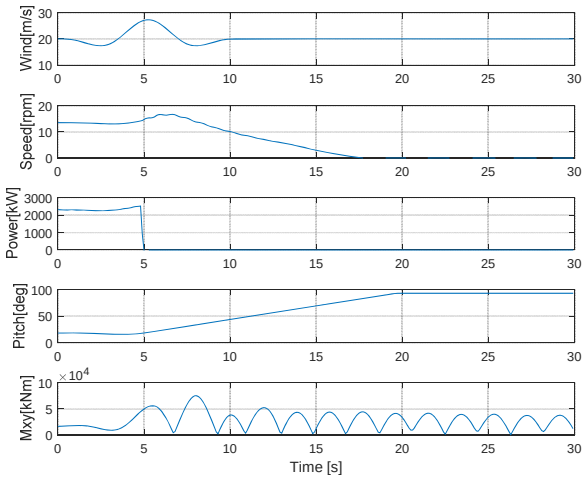


Fig. 13. Time series of DLC1.5

Figs. 15~17은 인공지진 및 9.12 지진을 이용하여 시뮬레이션한 결과와 연직방향 지반운동의 영향을 굽힘 모멘트 비에 대해 막대그래프 형태로 나타내었다.

Figs. 15~17에서 연직방향 지반운동을 추가적으로 고려한 경우(H+V)를 살펴보면, Mx(좌・우방향 모멘트)에 대한 영향은 없으며, My(전・후방향 모멘트)에 대한 영향이 타워 상부(Tower top)에서 최대 1.423(0.642/0.451)배 크게 나타났다. 이는 풍력발전기(타워제외)의 무게중심이 타워의 중앙에 있지 않고, 나셀의 전단쪽에 위치하는 특징으로 인해 추가적인 하중이 발생된 것으로 여겨진다. 타워는 굽힘 하중이 지배적인 설계하중이므로, 지진하중에 대해서는 수평방향성분의 지반운동과 더불어 연직방향성분의 지반운동도 고려하여야 한다.

한편, 모든 조건에서 비율(Ratio)이 1보다 작다는 것은 연직성분의 지반

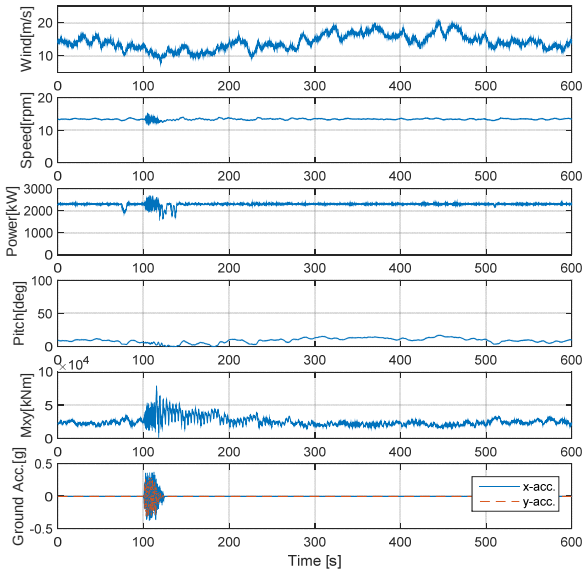


Fig. 14. Acceleration response time series (case 1)

Table 8. Ratio of bending moment of the tower

Load Case	PGA (g)	Point A		Point B		Point C	
		Mx	My	Mx	My	Mx	My
1	0.296	0.722	0.585	0.758	0.519	0.602	0.538
2	0.296	0.712	0.596	0.735	0.580	0.634	**0.568**
3	0.296	0.713	0.625	0.699	0.570	**0.690**	0.496
4	0.296	0.733	0.563	0.749	0.514	0.609	0.505
5	0.296	0.677	**0.669**	0.710	**0.598**	0.648	0.511
6	0.296	**0.771**	0.574	**0.789**	0.524	0.643	0.505

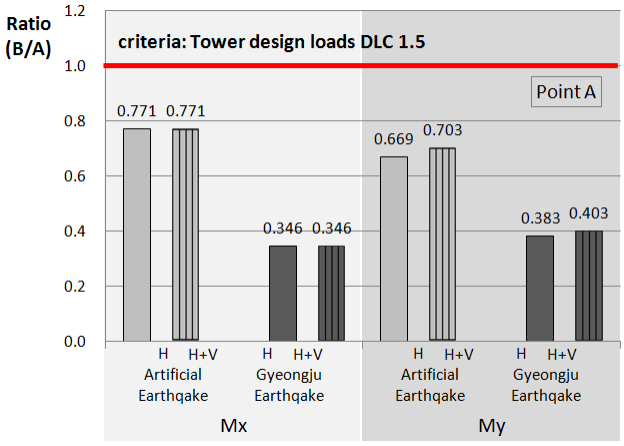


Fig. 15. Load comparison at tower bottom (point A)

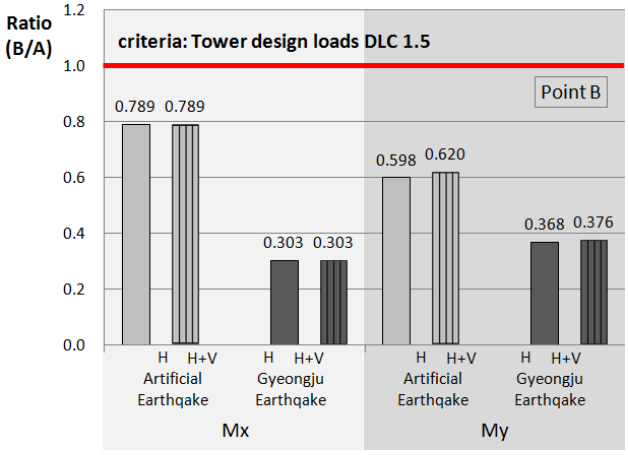


Fig. 16. Load comparison at tower middle(point B)

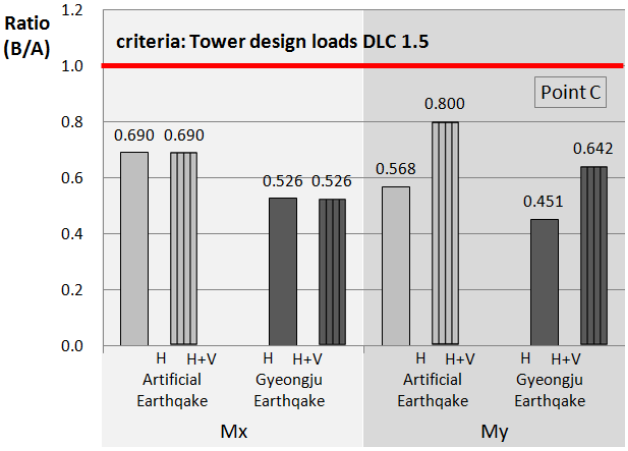


Fig. 17. Load comparison at tower top(point C)

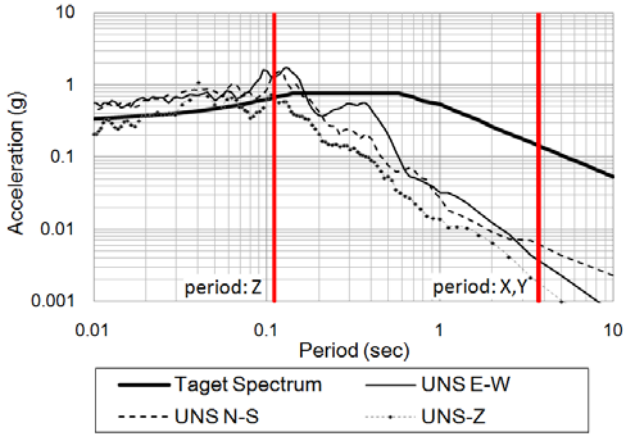


Fig. 18. Response spectrum of gyeongju earthquake waves (9.12 earthquake)

운동을 고려하였음에도 불구하고 지진하중이 극한 풍하중에 의한 설계하중보다 작다는 것을 의미한다.

Figs. 15~17에서 9.12 지진(Gyeongju Earthqake)을 이용한 지진하중(진한회색)이 목표스펙트럼을 이용한 지진하중(연한회색)보다 작은 수준의 값(최대 0.642<1)이 산출되었다. 이는 Fig. 18과 같이 장주기 거동이 우세한 풍력발전기의 기본 진동주기에서 계측지진의 가속도가 목표스펙트럼보다 낮은 가속도 값을 나타내기 때문이며, 풍력발전기 타워는 설계하중 미만의 하중이 작용하였으므로 탄성범위 내에서 거동된다. 따라서 단주기가 우세한 9.12지진에 의해 이미 설치된 풍력발전기 타워가 파손되거나 영구변형이 발생할 가능성은 없는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 풍력발전기의 내진설계를 위해 적용 가능한 지반운동을 산출하고, 연직방향 지반운동이 풍력발전기에 미치는 영향과 풍력발전기의 건전성을 다음과 같이 평가하였다.

1) 풍력발전기에 적용 가능한 목표스펙트럼은 건축구조기준에 의해 내진능력 VII 0.261 g에 해당하는 지반운동을 수평방향 설계지반운동으로 선정하였으며, 연직방향의 설계지반운동은 항만 및 어항 설계기준・해설을 따라 수평방향 성분의 2/3로 가정하였다. 또한 풍력발전기가 설치된 지역에서 관측된 지진파를 입력 지반운동으로 선정하였다.
2) 연직방향성분이 풍력발전기의 비정형성에 의해 전후방향 운동(My)에 영향을 주고, 주요 설계인자인 굽힘 모멘트(My)의 하중을 최대 1.4배 증가시켰다. 따라서 풍력 발전기의 지반운동 시뮬레이션시 연직방향에 대한 지반운동을 고려하여야 한다. 다만, 지진하중을 고려한 타워의 하중(B)이 타워설계하중(A) 대비 최대 0.8배 수준으로 산출되었다. 이는 연직성분의 지반운동을 고려하였음에도 불구하고 지진하중이 극한 풍하중에 의한 설계하중보다 작다는 것을 의미한다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 한 연구과제입니다(과제번호: 20153010024450).

/ REFERENCES /

1. KMA [Internet]. Republic of Korea: Korea Meteorological Administration; c2009[cited 2017 April 27] Available from: http://www.kma.go.kr/weather/earthquake_volcano/domestictrend.jsp
2. International Electrotechnical Commission; IEC 64100-1. 3.0. c2005 Aug. p.72.
3. Guideline for the certification of Wind Turbine. Germanischer Lloyd; c2010 Jul. p.4-24.
4. Japan Society of Civil Engineers; Task Committee on Dynamic Analysis and Structural Design of Wind Turbine Committee of Structural Engineering. Structural Engineering Series 20. Guidelines for Design of Wind Turbine Support Structures and Foundations. Korean translation. 195-259.
5. Korean Standard & Certifications. KS C 8572. Design requirements for onshore large and medium sized wind turbines. c2015 Jun.
6. National Law Information Center. Electric Engineering and Construction Technical Regulation: Ministry of Trade, Industry and Energy; c2017 Mar.
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport; Korean Building Code. c2016. May.
8. Ministry of Oceans and Fisheries; Commentary of Ports and Fishing Code(Volume 1), 2014. c2014. Apr.
9. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary; ASCE Standard 4-98. c1999.
10. Ministry of Land, Infrastructure and Transport; Rules on the Structural Standards of Buildings. c2017. Feb.
11. Park, JH. 9.12 Earthquake, KERC; Korea Earthquake Research Center. c2016 Sep.