

응답스펙트럼해석법을 이용한 배전반의 내진건전성 해석

최영휴*, 김수태*[#], 설상석*, 문성춘**

*창원대학교 기계공학부, **나산전기산업(주)

Seismic Integrity Analysis of an Electric Distributing Board Using the Response Spectra Analysis Method

Young-Hyu Choi*, Soo-Tae Kim*[#], Sang-Seok Seol*, Sung-Choon Moon**

*School of Mechanical Engineering, Changwon UNIV., **Nasan Electric Co. Ltd.

(Received 4 February 2020; received in revised form 10 March 2020; accepted 17 March 2020)

ABSTRACT

In this study, a response spectrum analysis of an electric distributing board (EDB) was conducted to investigate seismic integrity in the design stage. For the seismic analysis, the required response spectra of a safe shutdown earthquake with 2% damping (RRS/SSE-2%) specified in GR-63-CORE Zone 4 was used as the ground spectral acceleration input. A finite element method modal analysis of the EDB was also performed to examine the occurrence of resonance within the frequency range of the earthquake response spectrum. Furthermore, static stress caused by deadweight was analyzed. The resultant total maximum stress of the EDB structure was calculated by adding the maximum stresses from both seismic and static loads using the square root of the sum of the squares (SRSS) method. Finally, the structural safety of the EDB was investigated by comparing the resultant total maximum stress with the allowable stress.

Key Words : Electric Distributing Board(배전반), Seismic Integrity(내진건전성), Response Spectrum Analysis Method(응답스펙트럼해석법), Finite Element Method(유한요소법), Modal Analysis(모드해석)

1. 서 론

배전반(EDB, Electric distributing board)은 발전소 변전소, 전동기 등의 운전과 제어에 필수적인 전기 설비이다. 그러므로 배전반은 지진상황에서 정상적 기능을 수행할 수 있도록 내진설계 기준을 만족하도록 설계되고 구조적 건전성이 확보되어야 한다.

1995년 일본 고베 지진과 2014년 일본 후쿠시마

지진, 2008년 중국 쓰촨성 지진, 그리고 2017년 포항 지진, 등 국내외에서 규모가 큰 지진이 잇따라 발생하고 지진으로 인한 인적, 물적 피해가 속출함에 따라 국제적으로 건축물과 발전설비의 내진설계에 관심이 고조되고, 내진설계 기준도 강화되고 있다^[1-6]. 한국건축구조설계기준^[1]은 내진설계등급과 내진성능목표 및 지진하중 산정을 위한 상위기준으로 개정되었고, 미국 ASCE 7-10 기준^[2]도 기존의 하중기반 내진설계에 더하여 성능기반 면진설계를 강화하는 방향으로 변화되었다^[3]. M. Nakashima^[4], M. Midorikawa^[5] 등에 의하면 2000년 이후 일본의

Corresponding Author : stkim@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3601, Fax: +82-53-213-3611

건축구조물 내진해석의 입력기준이 기반암 가속도 (Engineering bedrock acceleration)에서 레벨이 더 높은 지표면 가속도로 강화되었다. 미국의 전기통신 장비 내진설계 및 내진검증 규격으로 통용되는 Telcordia Technologies의 GR-63-CORE^[6]은 미국을 4개 구역(Zone 1~4)으로 구분하고, 가장 강한 지진이 발생하는 태평양 연안지역인 Zone 4에서는 규모 7~8의 지진에 내진건전성을 갖도록 강화되었다. KBC-2009^[11]나 ASCE 7-10^[12]은 입력지진가속도를 위험도계수, 지반종류, 지진계수, 시설물의 중요도 등을 고려하여 정하므로 설계자의 판단에 따라 입력 지진가속도가 변할 수 있는데 반하여 GR-63-CORE는 발생 가능한 최대지진가속도를 사용해야 한다.

일반적으로 사용되는 내진해석 방법으로는 등가정적해석법과 동적해석법이 있고, 동적해석법에는 응답스펙트럼해석법과 시간이력해석법이 있다^[7,8,9]. 구조물의 내진성능 평가에서는 응답의 시간이력보다 응답의 최대치가 필요하기 때문에 지진하중의 가진 주파수 영역에 걸쳐 응답 최대치를 간편하게 구할 수 있는 응답스펙트럼해석법이 흔히 이용된다^[10,11].

본 연구에서는 국내에서 개발 중인 배전반(Electric distributing board)^[12]을 대상으로 국제적으로 전기통신장비의 내진설계/검증 규격으로 통용되고 있는 GR-63-CORE Zone-4^[6]을 적용하여 설계단계에서 유한요소법과 응답스펙트럼해석법으로 내진해석을 수행하고 배전반의 내진건전성을 평가하고자 한다.

2. 내진해석

2.1 해석과정

먼저 배전반 구조물을 유한요소 모델링하고, 진동모드해석으로 계산된 고유진동수를 배전반의 가진주파수와 비교하여 공진유무를 조사한다. 1차 고유진동수가 지진주파수 한계인 33 Hz 이하이면 동적 내진해석을 수행하여야 한다. 동적 내진해석의 지진응답은 GR-63-CORE Zone-4^[6]에 규정된 안전정지 지진/요구 응답스펙트럼(RRS/SSE-2%, required response spectrum/ safe shutdown earthquake with 2% damping)을 적용하여 응답스펙트럼해석법으로 구하고, 최대지진응답에 의한 최

대응력과 사하중에 의한 최대응력을 총합하여 총합최대응력을 계산하고 최종적으로 총합최대응력을 구조물의 허용응력과 비교하여 구조적 건전성을 평가한다.

2.2 유한요소 모델링

배전반의 구조는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 프레임(Frame)과 옆면 벽체(Side plates), 도어(Door)와 좌대(Base seat), 상하 덮개(Top and under covers) 등으로 구성되어 있다^[12]. 배전반의 내진해석을 위하여 ANSYS APDL^[13]를 이용하여 Fig. 2에 나타난 것처럼 유한요소 모델링하였다. 모든 구조는 솔리드 요소(Solid element)로 모델링하였다. 프레임과 벽체 및 덮개의 접합부는 볼트로 접합되었는데 Fig. 2 (b)에 나타난 바와 같이 볼트 접합된 구조부품의 접합면(Bonded surface)은 정방형으로 모델링하고, 접합면은 분리현상과 미끄럼이 없는(No separation and no slip) 구속조건을 부과하였다. 접합면의 지름(Diameter of the bonded area)은 접합용 볼트-너트 폭(Across the flats) F 와 같게 정하였다. 경계조건은 Fig. 2 (c)에 나타난 것처럼 지반에 고정되는 4개 앵커볼트(Anchor bolts)의 밀면과 앵커볼트가 결합된 좌대의 채널 다리(Channel legs)의 밀면 8곳을 포함하여 총 12개 면의 모든 자유도를 구속하였다. 총 질점 수는 363,529개, 요소 수는 솔리드 요소 151,074개이다. 유한요소 모델의 총질량이 971 kg으로 계산되었는데 이는 실제 배전반의 설계중량 1,000 kg과 오차 3% 이하로 근사하다. Table 1에는 배전반 구성 부품별 재료 물성치를 정리하였다.

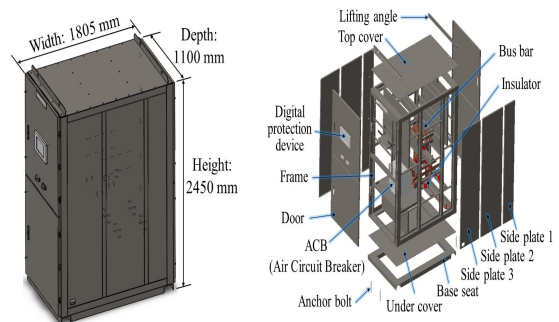


Fig. 1 Construction of the electric distributing board

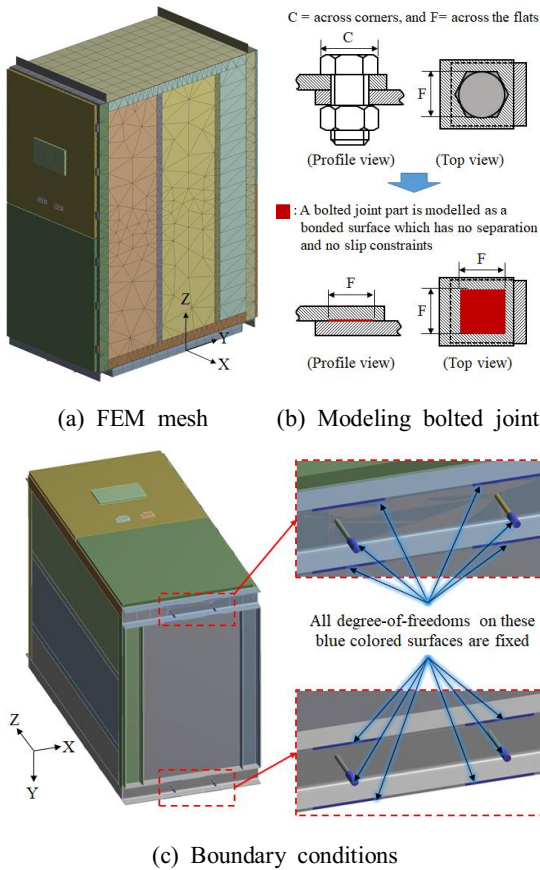


Fig. 2 Finite element modeling of the EDB

Table 1 Material properties of the EDB

Property	Parts	Part 1	Part 2	Anchor	Bus bar	Insulator
		SPHC	SS400	SUS304	Copper	Epoxy
Elast'y(GPa)		202	202	190	110	242
Poisson ratio		0.3	0.3	0.3	0.37	0.35
Density(kg/m ³)		7,850	7,850	8,000	8,900	1100
Allowable stress(MPa)		177	225	557	232	93

Note : Part 1 = Frame, Door, Side plates, Covers.
Part 2 = Base seat, Lifting angle.

2.3 모드해석

배전반의 모드해석 결과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 1 ~ 6차 모드가 모두 굽힘모드이며, Table 2에

나타낸 바와 같이 1 ~ 12차 고유진동수가 지진하중 스펙트럼의 주요 주파수 범위인 33 Hz 이하에 존재하는 것으로 나타났다. 그러므로 배전반 구조물에 대한 내진해석이 필요하다.

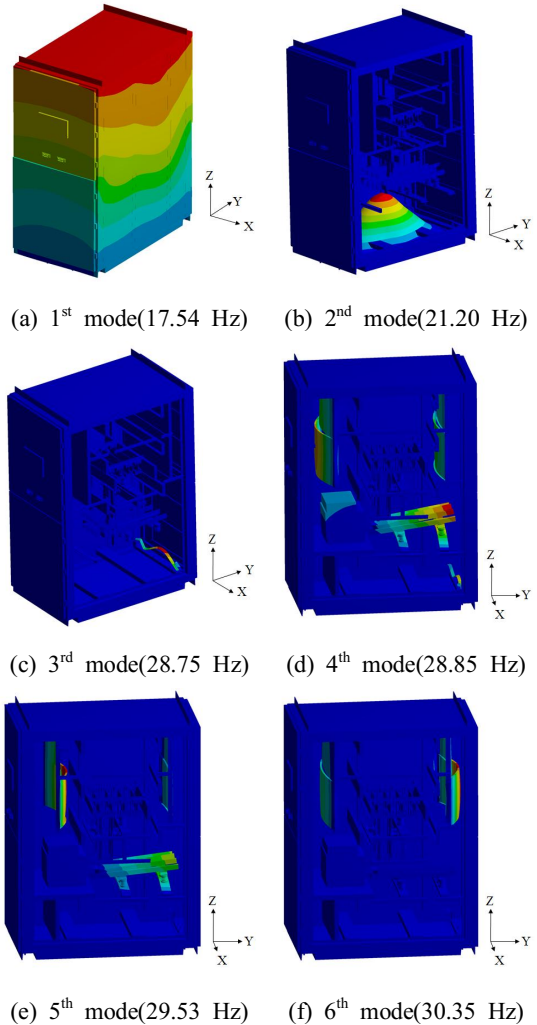


Fig. 3 The lowest 6 modes of the EDB

Table 2 Lowest 12 natural frequencies of EDB

Mode No.	1	2	3	4	5	6
Freq. (Hz)	17.5	21.2	28.8	28.9	29.5	30.4
Mode No.	7	8	9	10	11	12
Freq. (Hz)	31.2	31.6	33.4	36.0	36.6	37.8

2.4 응답스펙트럼 해석

응답스펙트럼 해석은 스펙트럼-모드해석방법을^{17,8,9)} 이용하여 구하는데, 이 방법은 참여도(Participation factor)가 높은 단일 모드별 최대지진응답을 구하고 이들을 SRSS(Square root of the sum of the squares) 방법으로 조합하여 총합응답을 구하는 방법이다¹⁴⁾. 응답스펙트럼해석에서 포함되는 모드는 참여도가 높은 모드를 포함하여 모드질량(Modal mass)의 합이 총 구조물 질량의 90 % 이상이 되도록 권장한다¹⁴⁾. Table 3, 4, 5에는 3X-, Y-, Z-방향별 진동모드별 모드질량 참여도를 정리하였다.

Table 3 Modal analysis results; effective mass, ratio, and ratio to total mass in the X-direction

Mode No.	Freq. (Hz)	Participat'n factor	Effective mass(kg)	Ratio	Ratio to total mass
1	17.54	25.6488	657.841	1	0.684433
2	21.20	7.40E-2	5.47E-3	0.002884	5.69E-6
3	28.75	-8.32E-3	6.91E-5	0.000324	7.19E-8
4	28.85	3.16E-2	9.99E-4	0.001232	1.04E-6
5	29.53	-1.93E-2	3.72E-4	0.000752	3.87E-7
6	30.35	-2.04E-2	4.16E-4	0.000795	4.33E-7
.
300	322.95	-5.64E-2	3.18E-3	0.003334	2.87E-6
Total	.	.	809.91	.	0.85

Table 4 Modal analysis results; effective mass, ratio, and ratio to total mass in the Y-direction

Mode No.	Freq. (Hz)	Participat'n factor	Effective mass(kg)	Ratio	Ratio to total mass
1	17.54	0.10957	1.20E-2	0.006482	1.25E-5
2	21.20	1.53E-2	2.36E-4	0.000908	2.45E-7
3	28.75	1.8094	3.27405	0.107047	3.41E-3
4	28.85	-9.8779	97.5733	0.584381	0.101517
5	29.53	5.3250	28.3561	0.315031	2.95E-2
6	30.35	4.0134	16.1073	0.23743	1.68E-2
.
10	36.01	16.903	285.719	1	0.297268
300	322.95	-0.68391	0.467733	0.04046	4.87E-4
Total	-	-	832.9	-	0.88

Table 5 Modal analysis results; effective mass, ratio, and ratio to total mass in the Z-direction

Mode No.	Freq. (Hz)	Participat'n factor	Effective mass(kg)	Ratio	Ratio to total mass
1	17.54	-3.77E-2	1.42E-3	0.002536	1.48E-6
2	21.20	3.30300	10.90989	0.222131	1.14E-2
3	28.75	0.40049	0.160391	0.026933	1.67E-4
4	28.85	3.29760	10.87430	0.221769	1.13E-2
5	29.53	3.39450	11.52250	0.228283	1.20E-2
6	30.35	0.90621	0.821215	0.060944	8.54E-4
.
30	67.41	-14.870	221.106	1	0.230043
300	322.95	-1.57E-3	2.47E-6	0.000106	2.57E-9
Total	.	.	917.9	.	0.96

내진해석의 입력 지진응답스펙트럼은 Fig. 4 에 나타낸 GR-63-CORE⁶⁾의 Zone 4에 규정된 안전정지 기준 요구응답스펙트럼(RRS/SSE-2%)을 사용하였다. 지진 응답스펙트럼해석 결과로부터 구한 X-, Y-, Z-방향의 최대응력(Maximum stress)을 식 (1)과 같이 SRSS방법으로 합산하여 지진하중에 의한 최대합응력(Resultant maximum stress), σ_{seis} 을 계산한다.

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

지진하중에 의한 배전반 구조물의 응력 분포선도 (Stress contours)를 Fig. 5에 나타내었다.

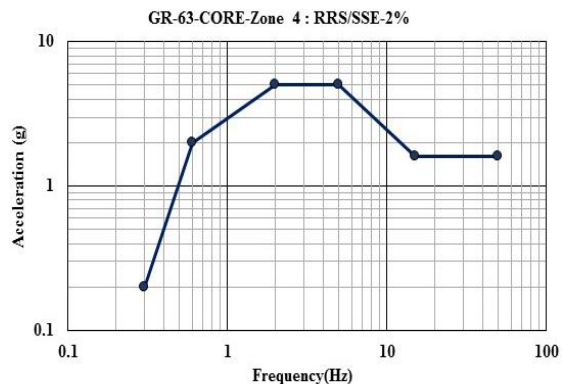
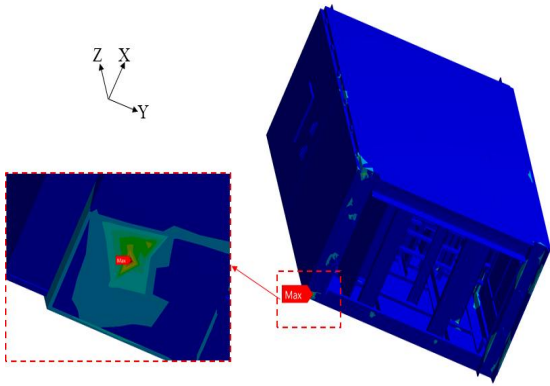
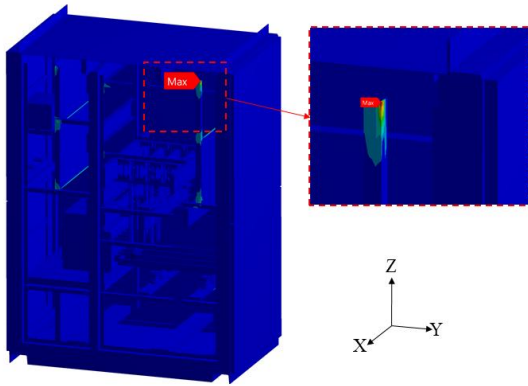


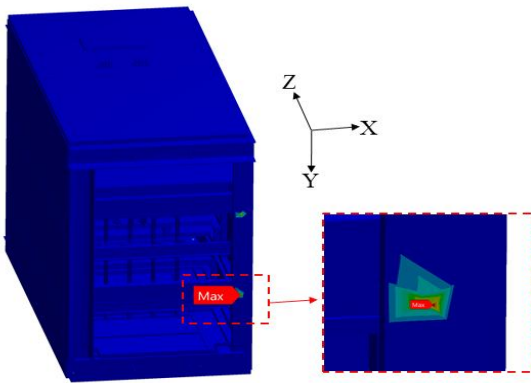
Fig. 4 Seismic load(Floor RRS/SSE-2%)



(a) In the X-direction



(b) In the Y-direction



(c) In the Z-direction

Fig. 5 Von-Mises stress due to seismic load

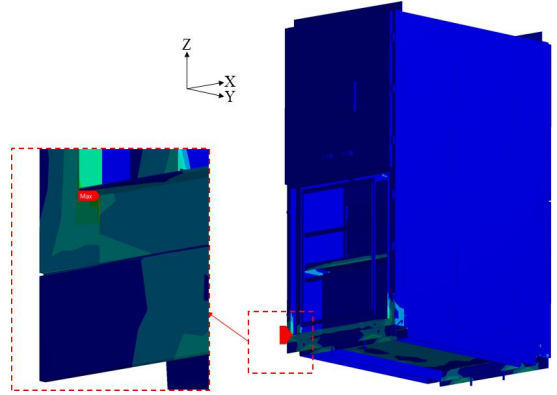


Fig. 6 Von-Mises stress due to deadweight

지진하중에 의한 최대합응력 σ_{seis} 의 값은 2.6절 내진건전성 분석에 종합하여 정리하였다.

2.5 사하중에 의한 구조해석

정적 구조해석을 통하여 Fig. 2의 배전반 유한요소 모델에 사하중이 작용하는 경우의 응력분포도를 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 정하중에 따른 최대합응력 σ_{stat} 의 값은 2.6절 내진건전성 분석에 종합하여 정리하였다.

2.6 내진건전성 분석

지진응답스펙트럼해석 결과와 사하중에 의한 정적구조해석 결과로부터 계산된 지진응력각 부품별 총합 최대응력을 다음의 식 (2)에 대입하여 각 구조 부품별 총합최대응력(σ)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 6에는 식 (2)와 식 (3)으로 계산된 배전반의 구조 부품별 총합최대응력과 설계안전계수를 정리하였다. Table 6에서 보듯이 각 부품의 설계안전계수가 1보다 크므로 배전반의 모든 구조 부품은 구조적 건전성이 확보되었다고 볼 수 있다.

$$\sigma \quad (2)$$

$$S = \frac{\sigma_a}{\sigma} \quad (3)$$

Table 6 Computed total maximum stress and safety factors of the EDB parts

Part name	Allowable stress (MPa)	Max. stress (Mpa)		Total stress (SRSS)	Safety factor	
		Seismic	Static			
Frame	177.00	159.13	33.45	162.60	1.09	
Top cover	177.00	4.99	2.59	5.63	31.46	
Under cover	177.00	41.12	9.21	42.14	4.20	
Side plate	1	177.00	15.76	3.78	16.20	10.92
	2	177.00	8.19	1.11	8.27	21.40
	3	177.00	12.19	3.10	12.58	14.07
Door	177.00	21.37	3.08	21.59	8.20	
Lift angle	225.00	6.66	1.23	6.77	33.23	
Base seat	225.00	51.88	11.22	53.08	4.24	
Anchor bolt	557.00	18.45	3.32	18.74	29.73	
Bus bar	232.00	27.35	10.93	29.46	7.88	
Insulator	93.00	31.13	9.64	32.59	2.85	

내진해석결과 최대합응력, σ_{seis} 과 부재별 설계안전계수, S 를 Table 6에 정리하였다.

Table 6에서 모든 부재들 중에서 설계 안전계수가 가장 낮은 Frame의 안전계수가 1.09이므로 이 배전반의 모든 구조부재는 구조적으로 안전하다고 볼 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 배전반의 내진검증을 위하여 최근 국제적으로 가장 강화된 전기통신장비 내진검정 규격으로 통용되고 있는 Telcordia Technologies의 GR-63-CORE^[6] Zone-4에 규정된 안전정지지진/요구응답스펙트럼(RRS/SSE-2%) 입력조건에 대하여 응답스펙트럼해석법으로 내진해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 배전반의 모드해석 결과 배전반의 1 ~ 6차 고유진동수가 입력 지진스펙트럼의 상한주파수 33 Hz보다 낮게 나왔으므로 동적 내진해석이 필요하다.
2. 지진하중에 사하중 조건을 조합한 내진해석 결과로부터 배전반의 모든 구조 부품별로 발생된

총합최대응력이 구조물의 허용응력보다 낮게 나타났다으므로 배전반은 GR-63-CORE^[6]에 규정된 발생 가능한 최고 규모 지진에 대하여 구조적 건전성이 확보되었다고 평가된다.

3. GR-63-CORE^[6]에 규정된 발생 가능한 최고 규모 지진에 해당하는 지표면가속도 5g의 입력조건에 따른 내진해석 결과로부터 배전반 내진건전성이 확보되었으므로, 현재 국내외에서 적용되는 내진설계/검증 규격과 비교하여 상대적으로 가장 강화된 규격에 의거한 배전반 내진설계가 이루어진 것으로 평가할 수 있다.

후 기

“이 논문은 2019-2020년도 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: 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., Chusilp, 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.
5. 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, 2004.
6. Telcordia, NEBS Requirements: Physical Protection, Generic Requirements GR-63-CORE Issue 3, March 2006.
 7. Chopra, A. K., Dynamics of Structures: theory and applications to earthquakes engineering, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 3rd edition, ISBN 0-13-156174x, 2007.
 8. Hart, G. C., Wong, K., Structural Dynamics for Structural Engineers, John Wiley & Sons, Inc., ISBN-10: 0471361690, 2000
 9. Bruneau, M., "Dynamics of Civil Engineering Structures," Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 847, 1997.
 10. Choi, M. J., Yoo, J. W., "Evaluation of the Seismic Integrity of a Centrifugal Pump Using Response Spectrum Analysis," Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 14, Issue 6, pp. 44-50, 2010, 1226-8402(pISSN).
 11. Choi, Y. H., Kang, M. G., Park, S. H., "Seismic Qualification Analysis of a Small Savonius Style Vertical Axis Wind Turbine," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 1, pp. 122-129, 2018, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.1.122>.
 12. "Technical Catalog" (2019), <http://www.nasanec.co.kr/>(accessed 26, Aug., 2019)
 13. ANSYS Inc., ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide, 2013.
 14. Wilson, E. L., Der Kiureghian, A., Bayo, E. P., "A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 9, pp. 187-194, 1981.