Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 5 pp. 13-19, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.5.13
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

원자력발전소용 리튬폴리머 배터리 랙 시스템의 내진성능평가

김시준
경기대학교 건축공학과

Seismic Performance Evaluation of the Li-Polymer Battery Rack System for Nuclear Power Plant

Si-Jun Kim
Department of Architectural Engineering, Kyonggi University

요 약 후쿠시마 원전사고 이후 비상 배터리 시설에 대한 안전성 강화가 요구되면서 리튬 폴리머 배터리를 적용한 새로운 전원 공급장치가 국내에서 세계 최초로 제안되었다. 그러나 제안된 기술을 현장에 적용하기 위해서는 배터리 장치가 설치되는 랙 시스템의 내진 안전성이 요구된다. 본 연구에서는 세계 최초로 72시간 용량 확보를 위해 개발 된 리튬폴리머 배터리 장치를 대상으로 지진 발생 시 전원장치의 안전성을 확보하기 위해 설계 된 전원장치 스트링 및 랙 프레임에 대한 내진성능을 평가하고자 하였다. 실험 결과 1) 단위 랙 시스템의 공진대역은 9 Hz로서 지진하중 전 후의 고유진동수가 변하지 않음에 따라 설계지진하중에 대한 부재 및 부재간의 연결부에 대한 안전성을 확인할 수 있었다. 원전 설계기준 OBE와 SSE에서의 가속도 응답 결과 2) 스트링 제작에 의한 진동 저감 효과가 약 20%정도 보였으며, 3) OBE, SSE 조건에서의 내진시험 결과 랙 프레임 시스템은 설계지진에 대해 안전한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 랙 시스템은 요구 지진력에 대한 구조적 건전성이 입증되었으므로 원전 시설에 적용이 가능한 것으로 나타났다.

Abstract After the Fukushima nuclear accident, a new power supply using a lithium polymer battery has been proposed the first time in the world as the safety of the emergency battery facility has been required. It is required to have the safety of the rack system in which the battery device is installed in order to apply the proposed technology to the field. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the seismic performance of string and rack frame for lithium-polymer battery devices developed for the first time in the world to satisfy 72 hours capacity. (1) The natural frequency of the unit rack system was 9 Hz, and the natural frequency before and after the earthquake load did not change. This means that the connection between members is secured against the design earthquake load. (2) he vibration reduction effect by string design was about 20%. (3) As a result of the seismic performance test under OBE and SSE conditions, the rack frame system was confirmed to be safe. Therefore, the proposed rack system can be applied to the nuclear power plant because the rack system has been verified structural safety to the required seismic forces.

Keywords : Rack Frame, String, Seismic Performance, Resonance Frequency Band, Response Spectrum, Acceleration Response

본 논문은 2015년도 산업통상자원부의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 ㈜알씨디에이치와 공동연구를 통해 수행 된 연구임(No. 20151520400600)
*Corresponding Author : Si-Jun Kim(Kyonggi Univ.)
Tel: +82-31-249-1327 email: season@kgu.ac.kr
Received March 12, 2019 Revised April 22, 2019
Accepted May 3, 2019 Published May 31, 2019

1. 서론

최근 10년간 3.0이상의 규모의 국내 지진 발생은 약 917건으로 2016년을 기점으로 51.8%의 급격한 증가를 보이고 있다[1]. 특히 주요 원전 시설과 인접한 포항, 경주 인근에서 지진의 발생 빈도수가 높은 만큼 원전 시설의 안전에 대한 관심이 커지고 있는 실정이다. 일본의 후쿠시마 원전 사고 후 원전에 대한 국제적인 규제가 강화되고 있으며, 국내의 경우 원전시설의 내진성능 강화에 대한 필요성이 더욱 요구되고 있다[2].

후쿠시마 원전사고는 지진과 해일로 인해 소외 전원과 비상디젤 발전기 및 축전지의 기능이 상실 되어 발전소 정전 사고가 일어나게 되고 이것이 폭발의 큰 원인으로 조사되었다[3]. 미국 원자력 규제위원회(Nuclear Regulatory Comission, 이하 NRC)에서는 후쿠시마 원전사고를 계기로 원전 운영국가와 원전운영사업자에게 발전소정전사고 시 냉각 및 냉각재 상실사고를 방지하기 위해 최소 8시간 동안 사고완화 대응방안을 확보하고 이러한 기능을 72시간으로 연장하도록 하는 방안을 권고하고 있다[4]. 현재 국내 원전의 경우 비상디젤발전기, 대체교류발전기 및 축전지를 이용해 대응방안을 확보하고 있으나, 대부분 축전지의 용량은 2~4시간으로 부족하고, 특히 신고리 5, 6호기의 경우 24시간의 용량(2시간 full load, 22시간 load shedding program)을 확보하고 있으나, 최근 한국원자력안전기술원(KINS)에서는 24시간 Full Load 운전을 요구하고 있어 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 따라서 국내원전은 24시간 Full Load 운전할 수 있는 방안을 간구해야 하며, 이와 더불어 72시간 이상(24시간 full load+48시간 load shedding program)의 용량을 확보할 수 있는 시스템이 필요하다[5]. 이러한 요구를 수용하기 위해서는 기존의 납축전지가 아닌 새로운 배터리 시스템을 적용해야 하며, 이를 위해서는 원자력 사업 특성상 배터리의 안전성을 확보할 수 있는 방안 마련이 필수적이고 원자력 발전소의 배터리 장치가 설치되는 랙(rack) 프레임의 내진 안전성이 반드시 기준에 의거 검증되어야 한다[6].

따라서 본 연구에서는 72시간 비상전원 용량을 확보하기 위해 세계 최초로 개발된 리튬폴리머 기반 배터리 시스템에 대해 원자력발전소에 적용 가능여부를 검증하기 위해서 새로운 형상으로 설계된 스트링(string) 및 랙(rack) 프레임에 대한 내진성능을 평가하고 그 안전성을 검증하고자 한다.

2. 내진성능 검증

리튬폴리머 배터리 랙은 안전관련 기기로서 지진 발생 시 그리고 이후에도 구조적 건전성과 기능성이 유지됨을 입증하여야 하며, IEEE 323-2004의 기술기준 요건에 따라 내진검증이 수행된다. 리튬폴리머 배터리 랙은 신고리 5, 6호기 검증요건을 고려하여 FRS(Floor Response Spectra)에 1.4배를 적용하며, KEPIC END 1100(IEEE 323-2003) 6.3.1.6 항에 따라 10% 여유도를 추가한 RRS(Required Response Spectra)를 적용한다. 원전설계기준인 운전정지 지진(Operating Basis Earthquake : OBE)은 안전정지 지진(Safe Shutdown Earthquake : SSE)의 50%를 사용하며, 적용되는 감쇠계수는 Table 1과 같다.

Table 1. Using Damping Factor in Seismic Design

Event	Damping Factor
OBE	2%
SSE	3%

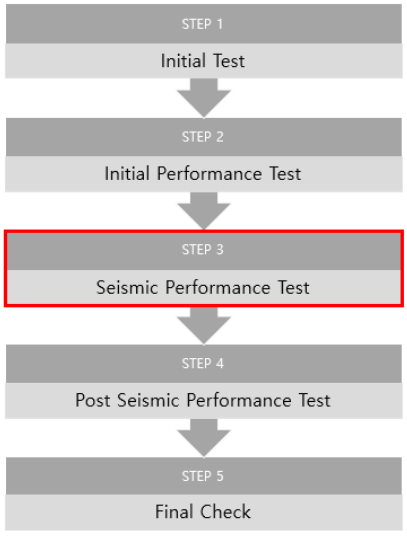

Fig. 1. Seismic Qualification Test of Lithium Polymer Battery Rack System

리튬폴리머 배터리 랙의 내진검증은 형식시험을 통하여 수행되며 Fig. 1의 절차에 따라 수행된다. 초기성능 및 내진 후 성능시험은 리튬폴리머 배터리 장치의 작동성능시험에 관한 것이며, 본 연구의 대상인 랙 시스템에 대한 내진성능 시험은 STEP 3에서 실험 및 평가 된다.

3. 랙 시스템 설계 및 제작

비상 전원 배터리 룸은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 여러 개의 랙들이 모여 구성되며, 랙은 여러 개의 전원모듈이 장착되어 진다. 일반적인 랙 시스템은 Fig. 3(a)와 같이 랙 프레임에 전원 모듈이 개별적으로 장착되어진 구조를 가진다. 이러한 시스템은 각각의 전원 모듈을 장착 및 탈착하기에 편리할 수 있으나, 지진이나 화재 발생 시 내진 및 내화 성능 확보에 취약할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 3(b)와 같이 전원모듈장치들이 외부 충격 및 화재 등에 직접적으로 노출되지 않도록 전원모듈 8개가 카트리지 형태로 장착될 수 있는 스트링(string)을 설계하여 내환경 및 내진성능을 확보하고자 하였다.

또한 랙 프레임은 4개의 스티링이 일체형 직렬방식으로 장착 될 수 있도록 설계하였으며, 기본 구조 형식은 Fig. 4와 같다. 랙 프레임의 설계에 있어 가장 중요한 요건은 지진 발생 시 전원장치의 안정적인 고정과 보호 그리고 전원공급을 유지하는 것이다. 랙 프레임은 스트링 4개가 장착되기 때문에 프레임의 자중과 스트링 무게를 고려해 수직 프레임을 4각 파이프 2개가 결합 된 2중구조로 구성하였으며, 하부 프레임은 M16 볼트 10개를 이용해 바닥에 체결 할 수 있도록 설계하였다.

스트링은 랙 프레임에 슬라이딩 방식으로 결합되며, 전, 후, 좌, 우, 4방향에 대해 1차 고정이 되도록 하였고, 측면 좌우에는 고정레일을 장착해 상, 하, 좌, 우 4방향을 고정한 다음 가이드 프레임을 부착해 전, 후 방향의 이동이 발생 하지 않도록 2차 고정하였다.

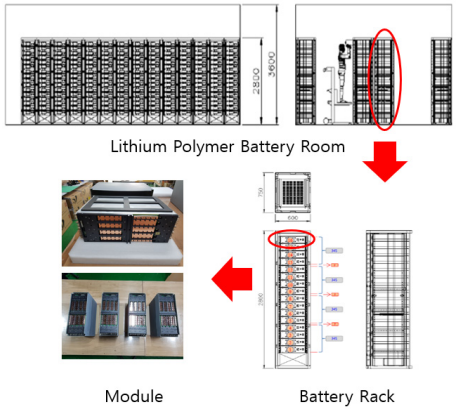

Fig. 2. Lithium Polymer Battery System Component

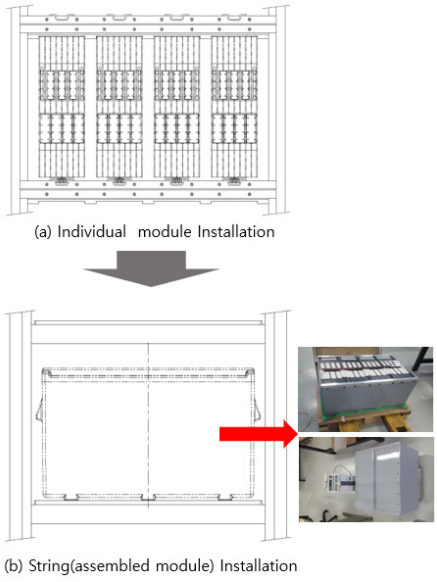

Fig. 3. Module Installation Type

4. 내진성능 시험

4.1 시험준비

4.1.1 내진성능 시험 장비

내진시험에 활용한 장비의 구성은 Fig. 5와 같으며, 설비사양은 Table 2와 같다. 내진시험설비는 데이터 취득 장치와 함께 구성되어 있으며, 32채널을 동시에 디지털 신호를 취득 할 수 있다. 전용 소프트웨어인 STEX Pro를 사용하여 시험설비 제어를 하며, 가속도계에서 계측된 디지털 신호를 최대 2400 Hz까지 신호처리를 할 수 있다.

Fig. 4. Rack frame Design

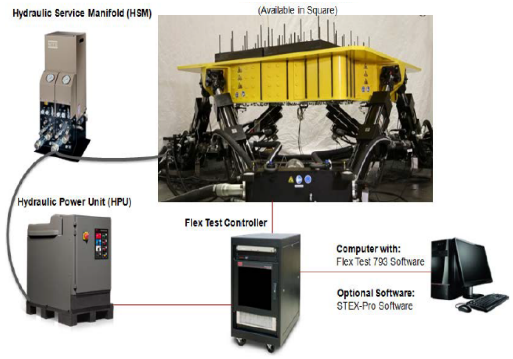

Fig. 5. Composition of equipment for Seismic Test

Table 2. Equipment Specifications for Seismic Test

Type	Specification	
Company	MTS systems Corporation	
Size of Table	2.2 m × 2.2m	
Max. Weight	2 ton	
Frequency	0.8 ~ 100 Hz	
DOF	6 DOF	
Max. Displacement	X	± 125 mm
	Y	± 110 mm
	Z	± 140 mm
Acceleration (Max. Load)	X	7.8 g
	Y	7.5 g
	Z	8.2 g

4.1.2 실험체 설치

내진성능 실험을 위한 실험체는 Fig. 6과 같이 진동대가 가진되는 방향과 동일한 방향을 고려하여 베이스 플레이트(base plate)와 함께 설치하였다. 베이스 플레이트는 M12 볼트 44개를 사용하여 토크 770 kgf·cm로 내진시험 테이블과 거동이 일치하도록 흔들림 없게 고정하였다. 베이스 플레이트와 실험체는 M16 볼트 10개를 사용하여 토크 1940 kgf·cm로 장착하였다.

진동대 제어는 진동대 아래에 부착되어 있는 컨트롤 가속도계의 응답과 MTS의 STEX Pro의 명령을 피드백하여 제어한다. 별도의 가속도계를 테이블 상단에 부착하여, 테이블 가진 신호와 테이블 상단에서 계측된 가진 신호를 상호 비교하여 신호의 유효성을 확인하였다. 사용된 가속도계는 Table 3과 같이 총 15개를 설치하여 가속도를 측정하였다.

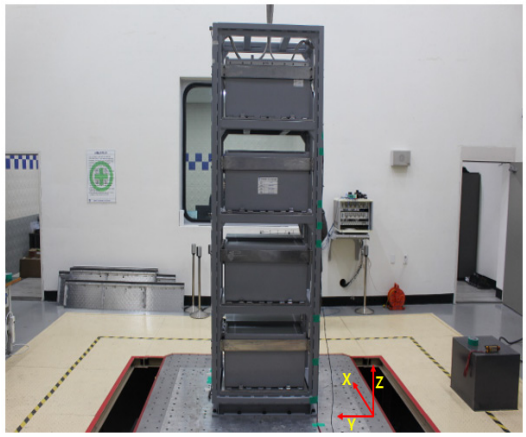

Fig. 6. Seismic Test Setting

Table 3. accelerometer

No. channel	Location	Direction
1	Table	X
2		Y
3		Z
4	Top of the Rack	X
5		Y
6		Z
7	Middle of the Rack	X
8		Y
9		Z
10	Bottom of the Rack	X
11		Y
12		Z
13	String	X
14		Y
15		Z

4.2 내진시험 및 결과

4.2.1 공진시험

공진시험은 단축 가진으로 수행하며, OBE시험 전과 SSE시험 후로 수행하였다. 저준위 정현파(sine wave) 진동(대략 0.2 g)으로 수행하며, 분당 2 옥타브의 주사비율(sweep rate)을 적용하여 각 축 당 1 ~ 50 Hz까지 주어진 내진검증 주파수 범위 내에서 수행하였다. 공진시험 결과는 Fig. 7과 Table 4와 같이 X, Y 방향 모두 9 Hz로 나타났으며 났다. 설계지진이 작용하기 전과 후에 대하여 랙 시스템의 고유진동수가 9 Hz로 변하지 않음에 따라 설계 지진력에 대하여 랙 시스템의 손상피해(부재의 이탈, 변형, 파손 등)는 없는 것으로 확인되었다.

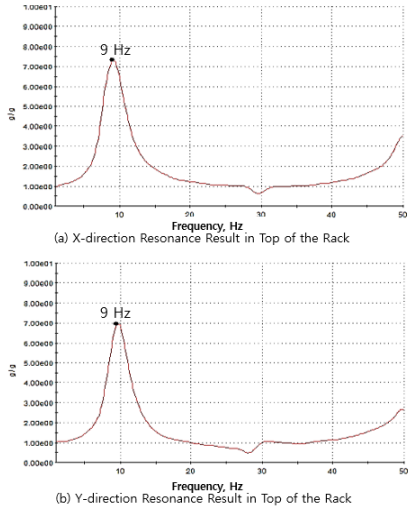

Fig. 7. Resonance Test

Table 4. Resonance Frequency

	Type	Dir. X	Dir. Y
Before OBE Test	Top of the Rack	9.00	9.50
	Middle of the Rack	9.00	9.50
	Bottom of the Rack	-	-
	String	9.00	9.50
After SSE Test	Top of the Rack	8.50	9.00
	Middle of the Rack	8.50	9.00
	Bottom of the Rack	-	-
	String	8.50	9.00

4.2.2 가진시험

가진시험은 3축 동시 가진하여, OBE 5회, SSE 1회를 수행하였다. 1회당 시험시간은 강진(Strong Motion) 20초를 포함하여 30 초 이상이 되도록 인공지진파를 생성하여 수행하였다. 주파수 범위는 1에서 50 Hz까지 1/48 옥타브 간격으로 설정하여 제어하였으며, 시험응답스펙트럼(TRS)은 OBE는 2 %, SSE는 3 % 감쇠계수(Damping Factor)를 적용하여 1/6 옥타브 간격으로 주파수 1 ~ 50 Hz 범위로 분석하여 시험응답스펙트럼의 요구응답스펙트럼(RRS) 포락유무 및 교차 상관 함수 0.3 이하를 만족하는 지 확인하였다. 여기서 요구음답스펙트럼(FRS)을 산정하기 위해 한국전력기술(주)에서 제공한 보조건물 78'-0" SSE FRS를 활용하였다.

시험 결과 Fig. 8과 같이 시험응답스펙트럼은 요구응답스펙트럼을 시험 주파수 대역에서 포락하였으며, 진동대 가진의 3직교축의 독립성은 교차 상관 함수 0.3 이하가 됨을 확인하였다. OBE 5회 시험에 대한 최대 가속도 결과는 Table 5와 같으며, 진동대의 경우 X방향 1.3g, Y방향 0.75g, Z방향은 1.46g의 5회 평균값을 나타냈다. 랙 프레임의 경우 상부, 중간, 하부에 따라 최대 가속도값이 다르게 나타났으며, 랙 프레임 상부의 경우 X방향 3g, Y방향 2.56g, Z방향 1.49g의 평균값을 보였다. 랙 프레임의 중간, 하부로 내려갈수록 가속도 응답은 작게 나타

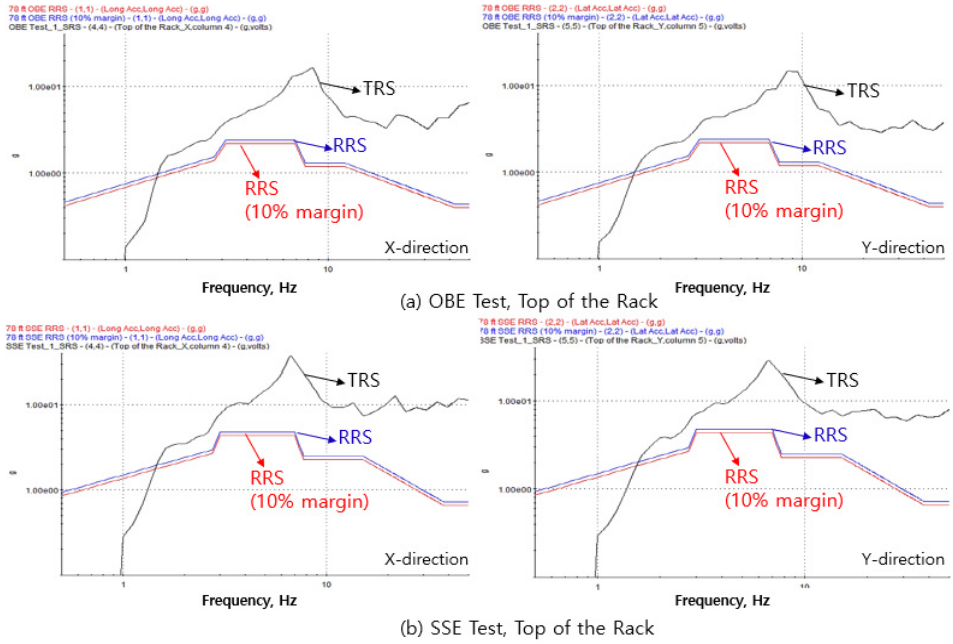

Fig. 8. Seismic(OBE, SSE) Test

Table 5. OBE and SSE Test Result

Sensor Location	Direction	OBE1	OBE2	OBE3	OBE4	OBE5	SSE
Table	X	1.31	1.29	1.32	1.26	1.29	1.95
	Y	0.74	0.76	0.75	0.74	0.74	1.73
	Z	1.44	1.47	1.44	1.44	1.55	3.22
Top of the Rack	X	3.07	3.09	3.08	2.88	2.88	5.90
	Y	2.51	2.63	2.56	2.62	2.48	4.90
	Z	1.48	1.47	1.50	1.50	1.50	3.04
Middle of the Rack	X	1.92	1.92	1.85	1.83	1.84	3.93
	Y	1.79	1.90	1.93	1.90	1.89	3.87
	Z	1.51	1.48	1.53	1.53	1.52	2.94
Bottom of the Rack	X	1.32	1.33	1.33	1.33	1.31	2.03
	Y	0.85	0.82	0.77	0.81	0.81	1.70
	Z	1.52	1.48	1.44	1.45	1.50	2.97
String	X	2.33	2.51	2.48	2.45	2.37	5.17
	Y	1.99	2.08	1.99	2.04	2.04	4.54
	Z	1.56	1.56	1.59	1.57	1.50	2.86

났으며, 하부의 경우 경계조건에서 진동대와의 일체성에 의해 진동대의 결과에 근사한 값을 보였다. 스트링의 최대 가속도 결과는 렉 프레임 상단(4단)에 위치한 것으로, 렉 프레임 상단의 최대 가속도값(X, Y방향)에 비하여 약 20%의 저감 효과를 보였다. 이러한 결과는 전원모듈 장치의 안전성 확보를 위해 설계된 스트링의 내진성능 효과를 입증한 것으로서, 단위 랙 시스템이 아닌 여러 개의 랙이 모여 설치되는 전체 시스템에서는 강성 및 질량 증가 등의 영향성에 따라 그 효과가 더 크게 나타날 것으로 판단된다. SSE 시험결과 진동대에서의 최대가속도는 X방향 1.95g, Y방향 1.73g, Z방향은 1.95g로 나타났으며, 랙 프레임의 경우 상부측 X방향 5.90g, Y방향 4.90g, Z방향 3.04으로 OBE에서 측정된 최대가속도값 대비 약 1.5 ~ 2배 높은 경향성을 보였다. 이러한 결과는 전원모듈 장치의 안전성 확보를 위해 설계된 스트링의 내진성능 효과를 입증한 것으로서, 단위 랙 시스템이 아닌 여러 개의 랙이 모여 설치되는 전체 시스템에서는 강성 및 질량 증가 등의 영향성에 따라 그 효과가 더 클 것으로 판단된다. SSE 시험결과 진동대에서의 최대가속도는 X방향 1.95g, Y방향 1.73g, Z방향은 1.95g로 나타났으며, 랙 프레임의 경우 상부측 X방향 5.90g, Y방향 4.90g, Z방향 3.04으로 OBE에서 측정된 최대가속도값 대비 약 1.5 ~ 2배 높은 경향성을 보였다.

5. 결론

리튬폴리머 배터리 장치의 내진 안전성을 확보하기 위해 설계 된 랙 시스템의 내진성능 시험에 대한 결과는 다음과 같다.

1) 랙 시스템의 공진시험은 OBE시험 전과 SSE시험 후에 수행 하였으며, 두 시험 모두 9 Hz의 공진대역을 나타내었다.
2) 공진시험 결과 공진대역의 변화가 없는 것은 설계지진력(OBE, SSE)에 대한 랙 시스템의 구조적 안전성이 확보됨을 나타낸다.
3) 가진시험결과 설계 지진력 OBE, SSE에 대하여 시험응답스펙트럼(TRS)은 요구응답스펙트럼(RRS)을 모두 포락하여 생성되었다.
4) OBE에 대한 가진시험에서 가장 큰 가속도 응답값은 랙 시스템 상단에서 나타났으며, 상단(4단)에 위치한 스트링의 최대 가속도 응답값은 상단의 랙 프레임의 결과대비 약 20% 저감된 결과를 보였다.
5) SSE에 대한 시험결과 OBE 시험 결과 대비 약 1.5 ~ 2배 높은 경향성을 보였다.
6) 공진시험 및 내진시험 후 랙 시스템의 변형, 접합부 상태 등에 대한 건전성 평가에서 랙 프레임 및 스

트링의 손상된 부분은 발견하지 못하였다.

7) 따라서 리튬폴리머 배터리 전원공급장치를 대상으로 지진 발생 시 전원장치의 안전성을 확보하기 위해 설계 된 스트링 및 랙 프레임에 대한 내진성능이 검증된 것으로 나타났다.

References

[1] H. J. Park, H. S. Kim, "Status of earthquake occurrence and seismic design criteria", *Proceeding of Autumn Annual Conference of KHA,* Vol.2, pp.405-406, 2018.

[2] S. H. Eem, I. K. Choi, "Sesmic Reponse Analysis of Nuclear Power Plant Structures and Equipment due to the Pohang Earthquake", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.22 No.3, pp.113-119, Apr. 2018.
DOI : https://doi.org/10.5000/EESK.2018.22.3.113

[3] NERP, Government of Japan, "Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations", 2011

[4] United States Nuclear Regulatory Commission, "Recomendation Enhancing Reactor Safety in the 21st Century", U.S.NRC, 2011

[5] W. R. Kim, C. K. Chang, "The Utilization of Energy Storage System(ESS) as Emergency Power Source for Nuclear Power Plant", *Journal of Power System Research Association Summer Conference*, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp.641-642, Jul. 2015.

[6] G. H. Lee, J. M. Kim, S. Y. Kim, "Seismic Retrofitting of Cabinet Structures in Nuclear Power Plant", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.7, No.4, pp.31-37, Aug. 2003.

[7] United States Nuclear Regulatory Commission, "Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants". U.S.NRC, c2014.

[8] ASCE/SEI 43-05, "Seismic design criteria for structures, systems, and components in nuclear facilities", ASCE/SEI, 2005.

김 시 준(Si-Jun Kim) [정회원]

- 2008년 2월 : 연세대학교 건축공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 연세대학교 건축공학과 (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 건축공학과 조교수

〈관심분야〉
구조진동, 구조물 유지관리