



입력진동 주파수 특성에 따른 원자력 발전소 배터리 차저의 응답특성 비교

Comparison of Response of Battery Charger in Nuclear Power Plant Depending on Frequency Characteristics in Seismic Motions

정영수* · 임승현** · 전범규* · 박동욱†

Young-Soo Jeong*, Seung-Hyun Eem**, Bub-Gyu Jeon* and Dong-Uk Park†

(Received November 27, 2018 ; Revised November 27, 2018 ; Accepted December 11, 2018)

Key Words : Battery Charger(배터리 차저), Electronic Cabinet(전기 캐비닛), Seismic Amplification(지진 증폭), High Frequency Motion(고주기진동), Shaking Table Test(진동대 실험)

ABSTRACT

Past earthquake events have shown that seismic damage to electrical power systems in nuclear power plants can cause both serious economic losses and operational problems. In this study, to assess the integrity of electrical power systems at nuclear plant plants, seismic tests of a battery charger (B/C) were conducted using the shanking table under three conditions, specifically low frequency, high frequency, and a combination of low and high frequencies. Accelerometers were installed both inside and outside the test cabinet to evaluate the dynamic characteristics of the B/C. The peak accelerations and amplification factors by transfer function occurring both inside and outside the cabinet, depending on input motion, were evaluated and compared. In addition, relay chatter during the seismic test was checked by reference to the relay output signal.

1. 서 론

상업용 건물, 병원 및 공공 서비스 시설과 같은 기타 시스템의 전력 시스템에 지진발생에 의한 피해에 따라 심각한 경제적 손실과 운영상의 문제를 일으킬 수 있음이 보고되고 있다. 특히 원자력발전소의 소내 전력계통에는 다양한 형태의 전기기기가 운용되고 있으며, 가상사고 조건에서 발전소를 안전하게 정지시키고 안전 정지상태로 유지하는데 필요한 안전설비에

전력을 공급한다. 하지만 지진과 같은 자연재해로 인하여 기기의 정지 또는 오작동으로 인하여 전력생산 차질 및 원자로 긴급정지 등에 의한 2011년 후쿠시마 원전사고와 같은 불안감이 가중되고 있다. 최근 국내의 원전의 전기기기 고장사건은 무정전 인버터설비의 빈번한 고장이 발생하고 있으며, 고장의 유형이 공통 원인고장 특성을 지니고 있어 원전 전력계통에 대한 설계개념에 대한 재평가의 필요성이 제기되기도 한다.

배터리 차저(battery charger, B/C)는 원자력 발전소에서 안전 및 비안전 부하에 공급하는 인버터 전원 및

† Corresponding Author; Member, Korea Construction Engineering Development Collaboratory Management Institute
E-mail : kwenry@pusan.ac.kr

* Korea Construction Engineering Development Collaboratory Management Institute

** Member, Structural and Seismic Safety Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute.

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

발전소 배터리에 충전전류를 공급하기 위하여 설치된다. B/C의 고장은 발전소 운전 및 안전에 직접적인 영향을 미치지 않아야 한다. 하지만 국내 표준 원전 기기 신뢰도 분석 자료⁽¹⁾에 따르면 총 34개의 B/C에 대하여 기능상실 4건, 기능저하 1건으로 보고되고 있으며, 고장모드는 기능상실로 정의하고 있다.

원자력 발전소에 설치되는 전기기기들은 일반적으로 캐비닛 형태로 설치되고 있으며, 캐비닛의 내진성능 평가는 진동대 실험과 해석모델을 이용한 고유치 해석으로 동특성을 평가하고 있다. 국내외의 진동대를 이용하여 입력운동의 크기에 따라 캐비닛의 동특성 분석을 실시하였으며⁽²⁻⁴⁾, 진동대 실험방법 이외의 운영 중인 설비에서 실현가능한 장비를 사용하여 동특성 분석을 실시하였다^(5,6). 또한 국내 실정을 고려한 원전에 설치된 캐비닛 기기의 취약도를 재평가하였으며⁽⁷⁾, 유한소해석 기법을 이용하여 캐비닛의 비선형성을 고려한 단순모델을 제안하고 있다^(8,9). 그리고 캐비닛 내부 부품의 내진검증에 입력운동으로 사용되는 캐비닛 내부응답스펙트럼(in-cabinet response spectrum, ICRS)의 작성방법에 대한 연구가 진행되었으며⁽¹⁰⁾, 캐비닛 내부의 응답스펙트럼 평가가 실시되어 지고 있다⁽¹¹⁻¹³⁾.

일반적으로 원자력 발전소는 NRC regulatory guideline 1.60(이하 R. G 1.60)의 표준지진 설계응답스펙트럼 또는 수정된 버전의 응답스펙트럼을 기반으로 스펙트럼 형상이 비슷한 저주파 지진동을 고려하여 설계한다⁽¹⁴⁾. R. G 1.60은 원자력 발전소가 위치한 지진구역에 따라 주어진 최대지반가속도(peak ground acceleration, PGA)에 맞춰 조정할 수 있다. 또한 우리나라 원전 부지에 대한 등재해도 스펙트럼(uniform hazard spectrum, UHS) 작성결과 미국 중동부 지역과 유사하게 설계응답스펙트럼에 비하여 저주파 영역에서는 낮은 스펙트럼 가속도 값을 나타냈으며, 고주파 영역에서 크게 증폭되는 것으로 나타났다⁽¹⁵⁾. 따라서 고주파 지진동에 대한 영향을 고려하여 내진성능 평가가 필요성이 증대되고 있으나 구조물에 부착된 설비에 대한 저주파 및 고주파 진동을 포함하는 지진동에 관한 실험적 해석적 연구는 부족한 실정이다.

이 연구에서는 DC 125 V B/C 전기설비를 대상으로 NRC 표준지진 설계응답스펙트럼(R. G 1.60), 울진 지역의 등재해도 스펙트럼(UHS)^(16,17) 및 설계와 등재해도 스펙트럼을 고려한 응답스펙트럼(combined response spectrum, CRS)을 이용하여 진동대 실험을 실

시하였다. B/C의 캐비닛 외부와 내부에 가속도계를 설치하여 캐비닛의 동특성 평가를 실시하였으며, 입력하중에 따른 캐비닛 외부의 증폭효과와 캐비닛 내부의 주요 부품 위치별 증폭효과를 평가하였다. 또한 전기설비는 지진시 혹은 그 이후에도 원래의 기능을 유지할 수 있어야 하며, 내진실험중에 계전기(relay)의 떨림 현상(chattering) 유무를 확인하였다.

2. 가동원전 특성 평가 및 입력지진 응답스펙트럼 선정

일반적으로 원자력 발전소에 설치되는 기기들의 내진성능은 진동대 실험을 통하여 실시되고 있으며, 입력운동은 기기가 설치되는 건물의 층응답스펙트럼(floor response spectrum, FRS)을 적용하고 있다. 하지만 구조물의 진동수에 따라 지반응답스펙트럼이 층응답스펙트럼에 미치는 영향이 크게 달라짐에 따라 구조물 내부에 설치된 기기의 고주파 진동에 대한 영향 평가가 이루어져야 한다. 특히 고주파 지진동에 의한 기기의 기능적 파괴에 대한 검토가 이루어져야 하며, 구조물 내부에 설치된 기기에 대하여 고주파 지진동에 의한 손상모드가 보고되었다⁽¹⁸⁾. 따라서 국내 가동원전 특성을 고려한 원자력 발전소에 설치된 설비의 내진성능 검증에 사용되는 요구응답스펙트럼(required response spectrum, RRS)은 매우 중요하다. 이 연구에서는 B/C가 설치되는 격납건물에 대하여 R. G 1.60 및 울진 지역의 UHS 지진파에 대한 시간이력 해석결과를 이용하여 FRS 산출을 통하여 저주파와 고주파 성분을 포함하는 입력지진 응답스펙트럼(CRS)을 형상화하였다. 그리고 안전정지지진(safe shutdown earthquake, SSE) 기준인 PGA 0.2 g를 기준으로 R. G 1.60과 UHS 및 CRS의 응답스펙트럼 비율을 조절하여 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 ZPA of RRS based on PGA 0.2 g

Input motion	Zero period acceleration	
	Longitudinal and transverse direction	Vertical direction
UHS	0.293	0.366
R. G 1.60	0.330	0.293
CRS	0.380	0.380

3. 125V DC Battery Charger의 내진성능 실험

원자력 발전소에서 사용 중인 전기설비는 캐비닛 형태가 가장 많이 차지하고 있으며, 전기 캐비닛 내부에 설치된 전기장치의 오작동으로 인하여 원자력 발전소의 안전에 영향을 미칠 수 있다.

3.1 B/C의 제원

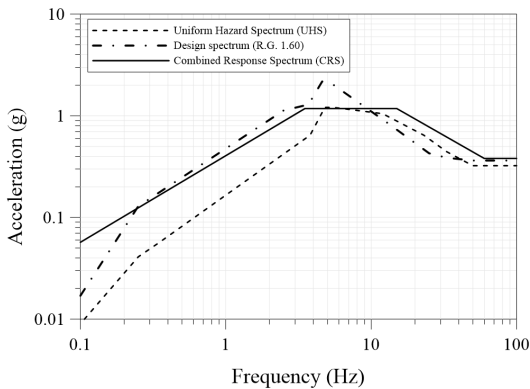
B/C는 교류입력을 직류로 변환하는 순변환기 기능을 수행하며 480 V 교류를 정류회로를 거쳐 직류로 변환하여 125 V DC 모선을 가압하여 발전소 직류부하에 전원을 공급 또는 배터리를 충전한다. B/C의 내진성능 검증을 위하여 원자력 발전소에 납품 실적이 있는 A사의 B/C를 제작하였으며, 제원 및 형상을 Table 2와 Fig. 2에 나타내었다.

3.2 B/C의 내진성능 실험방법

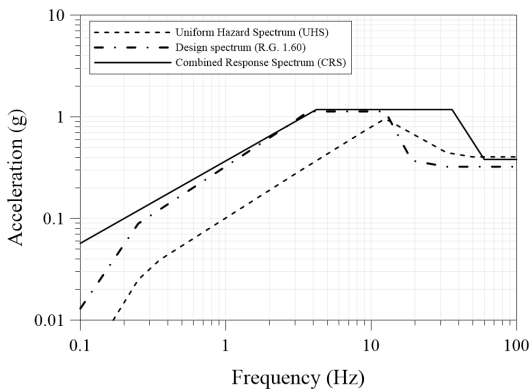
B/C의 외함의 구조적 응답 및 캐비닛 내부의 진동 증폭효과를 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 가속도계를 설치하였다. 캐비닛 외함의 응답을 평가하기 위하여 높이방향으로 등분하여 3축 가속도를 계측하였으며, 캐비닛 내부의 주요 전기부품(coil, circuit breaker, relay, fuse)이 설치된 위치에서 가속도를 계측하였다.

입력 지진파는 원전의 설계지진으로 사용하고 있는 R. G 1.60의 설계스펙트럼, 울진(Uljin) 지역의 등재해도 스펙트럼(UHS) 및 설계와 고주파 성분을 포함하는 인공지진파(CRS)를 사용하였다. 각 방향 요구 응답스펙트럼을 만족하는 지진파를 1축 방향 가진하였으며, 감쇠율(damping ratio)는 5 %로 하였다. 그리고 주파수 범위는 1.0 Hz ~ 60.0 Hz로 진동 지속 시간은 30초, 강진 지속 시간은 20초로 B/C의 내진성능 실험을 실시하였다. 각 입력지진의 주요 가속도 이력을 Fig. 4에 나타내었다.

공진주파수 탐색실험의 입력파는 random wave를 이용하여 B/C의 구조적 손상을 발생시키지 않는 크기 (root mean square 0.1 g, RMS)로 하였으며, 주파수 범위는 진동대 및 입력파형의 특성을 고려하여 0.5 Hz ~ 50.0 Hz로 진동지속시간은 60초 이상으로 하였다. B/C의 내진성능 실험순서를 Table 3에 정리하였으며, 부산대학교 지진방재연구센터의 고성능 진동대를 이용한



(a) Longitudinal and transverse direction



(b) Vertical direction

Fig. 1 Compare of acceleration for different seismic response spectrum

Table 2 Description of B/C cabinet

Battery Charger	Dimensions (mm)			Weight (kN)
	Width	Length	Height	
125V DC 600A	920	1,600	2,215	170

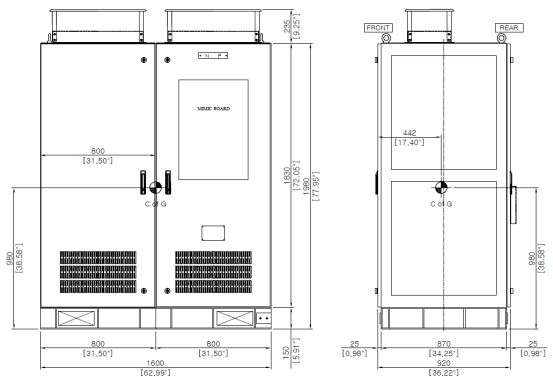
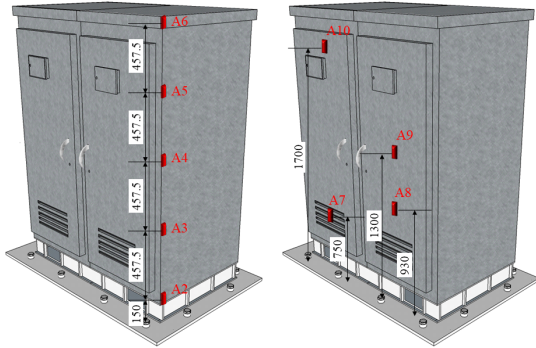


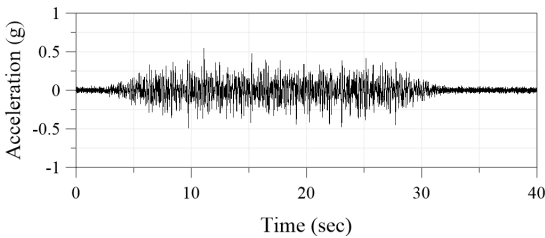
Fig. 2 Dimension and shape of tested B/C

시험전경을 Fig. 5에 나타내었다. B/C를 진동대에 고정하기 위하여 두께 25 mm의 강재를 하부에 용접으로 연결하였으며, 강재와 진동대는 볼트체결을 통하여 설치하였다.

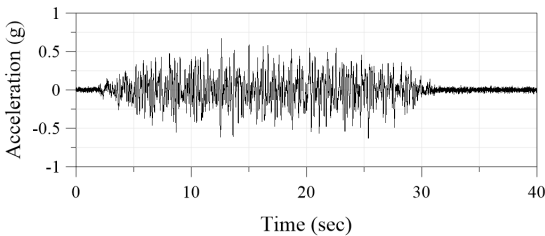


(a) Structural response (b) In-cabinet response

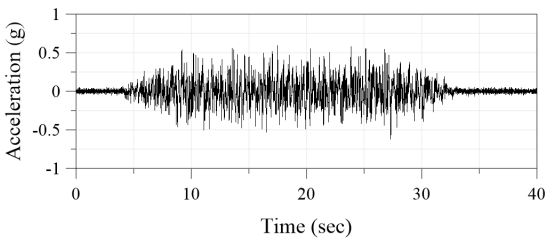
Fig. 3 Location of installed accelerometers



(a) Uniform hazard spectrum (UHS)



(b) Reg. Guide 1.60 design spectrum (R. G 1.60)



(c) Combined response spectrum (CRS)

Fig. 4 Acceleration time history in longitudinal direction

4. 125V DC Battery Charger의 내진성능 실험결과

4.1 공진주파수 실험결과

B/C의 공진주파수를 결정하기 위하여 전달 함수를 산정하는 방법을 적용하였다. 전달함수는 공진주파수 탐색실험동안 진동대에서 입력된 가속도에 대한 응답 가속도의 비를 이용하였으며 식 (1)과 같다.

Table 3 Seismic test sequence

No.	Earthquake motion	Remarks
1	Modal test	Resonant frequency check (X, Y, Z)
2	SSE	UHS longitudinal direction
3	Modal test	Resonant frequency check (X)
4	SSE	UHS transverse direction
5	Modal test	Resonant frequency check (Y)
6	SSE	UHS vertical direction
7	Modal test	Resonant frequency check (Z)
8	SSE	R. G 1.60 longitudinal direction
9	Modal test	Resonant frequency check (X)
10	SSE	R. G 1.60 transverse direction
11	Modal test	Resonant frequency check (Y)
12	SSE	R. G 1.60 vertical direction
13	Modal test	Resonant frequency check (Z)
14	SSE	CRS longitudinal direction
15	Modal test	Resonant frequency check (X)
16	SSE	CRS transverse direction
17	Modal test	Resonant frequency check (Y)
18	SSE	CRS vertical direction
19	Modal test	Resonant frequency check (Z)



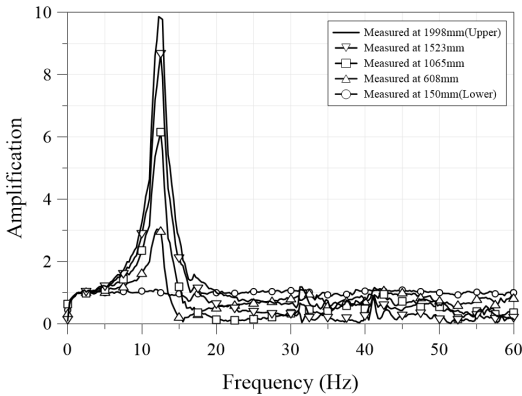
Fig. 5 Seismic test

$$T_{xy}(f) = \frac{P_{yx}(f)}{P_{xx}(f)} \quad (1)$$

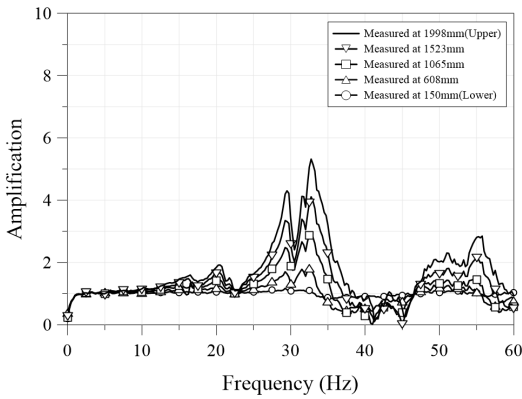
여기서, P_{yx} 는 두 신호의 cross power spectral density 이고, P_{xx} 는 입력신호의 auto power spectral density 이다. 공진주파수 탐색실험 결과의 주파수 왜곡을 피

하기 위하여 각 가속도 신호에 symmetric hamming window를 적용하여 산정하였다. 전달함수를 이용한 캐비닛 외함파 내부의 위치에 따른 공진탐색 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었으며, 각 실험별 공진주파수 산정결과를 Table 4에 나타내었다.

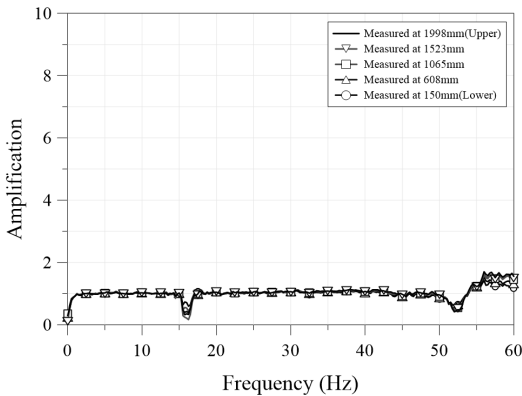
Fig. 6과 같이 B/C 캐비닛의 종방향 고유진동수는



(a) Longitudinal direction (X)

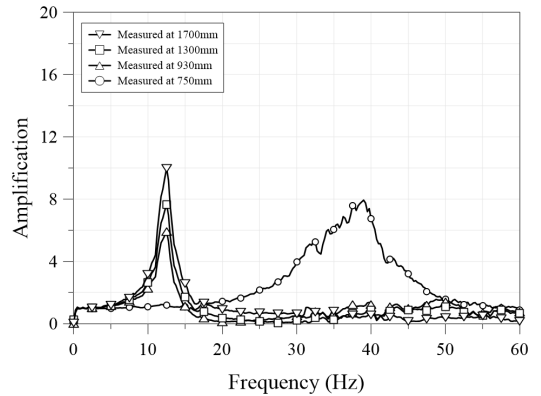


(b) Transverse direction (Y)

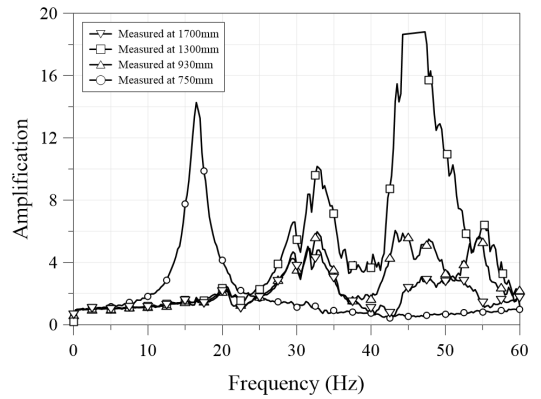


(c) Vertical direction (Z)

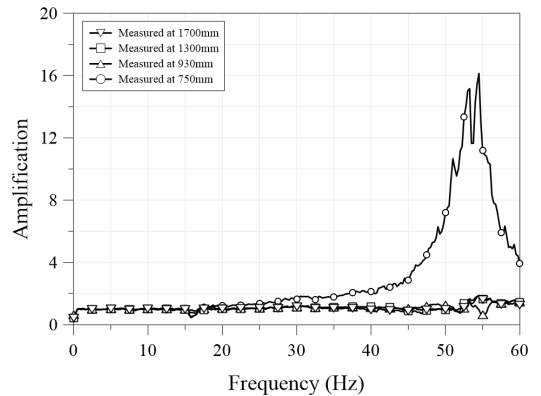
Fig. 6 Resonant frequency test results at out-cabinet



(a) Longitudinal direction (X)



(b) Transverse direction (Y)



(c) Vertical direction (Z)

Fig. 7 Resonant frequency test results at in-cabinet

약 12.5 Hz이며, 횡방향 고유진동수는 약 29.5 Hz로 나타났으며 높이에 따른 변화는 나타나지 않았다. 그러나 캐비닛 내부 주요부품의 고유진동수는 부품의 설치 위치 및 방법, 무게 등에 따라 고유진동수는 다르게 나타났다. Fig. 7에 나타난 것과 같이 캐비닛 내부의 패널(panel)에 부착된 부품의 종방향 및 횡방향 고유진동수는 외함의 경우와 유사하게 나타났으며, 외함의 바닥에 직접적으로 연결된 전기코일의 경우에는 약 39.0 Hz 및 16.5 Hz로 다르게 나타났다. 수직방향에 대한 공진 주파수는 대부분 나타나지 않았으며, 전기코일의 경우에만 약 53.5 Hz로 측정되었다.

4.2 가속도 응답스펙트럼 및 B/C의 기능성 점검 결과

각 인공지진파의 요구응답스펙트럼과 시험응답스펙트럼(tested response spectrum, TRS)을 Fig. 8에 나타내었으며, 진동대의 가진이 충분함을 확인하였다.

캐비닛에 설치되는 기기는 일반적으로 기능적 요건에 따라 배열되며 무거운 부품은 기초부근, 가벼운 부품은 상부에 설치되고 있다. 또한 캐비닛 내부에는 다양한 소형의 전자부품이 설치되고 있으며, 전자부품은 일반적으로 패널에 그룹화하여 캐비닛 골조에 연결되어 진다. 전기기기의 경우에는 지진하중에서도 본래의 기능을 유지할 수 있는 기능성에 대한 평가도 이루어져야 하며, 일반적으로 relay의 chattering 유무로 평가되어진다. 이 연구에서는 relay의 출력 전압을 측정하여 relay의 chattering 유무를 확인하였으며, SSE 지진에 대한 B/C 기능성을 평가하였다. SSE 지진하중 하에서는 relay의 chattering이 발견되지 않았다.

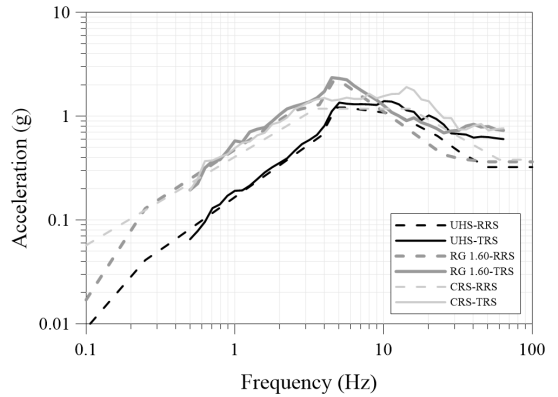
Table 4 Summary of resonant frequency test

Accelerometer	Resonant frequency (Hz)		
	X	Y	Z
A2	N/A	29.25	N/A
A3	12.25	29.25	N/A
A4	12.50	29.25	N/A
A5	12.50	29.25	N/A
A6	12.50	29.25	N/A
A7	12.50	29.25	53.50
A8	12.50	29.25	N/A
A9	12.50	29.25	N/A
A10	39.00	16.50	N/A

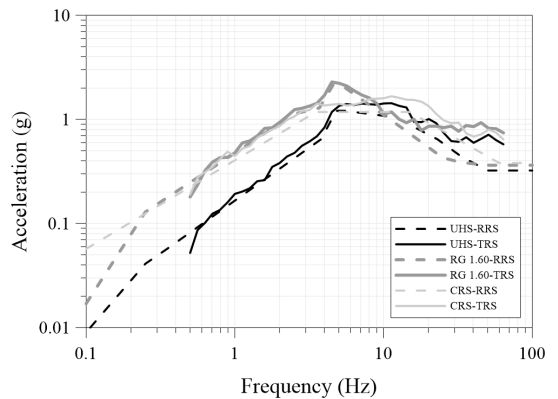
5. 125V DC Battery Charger의 응답분석

5.1 최대가속도 응답

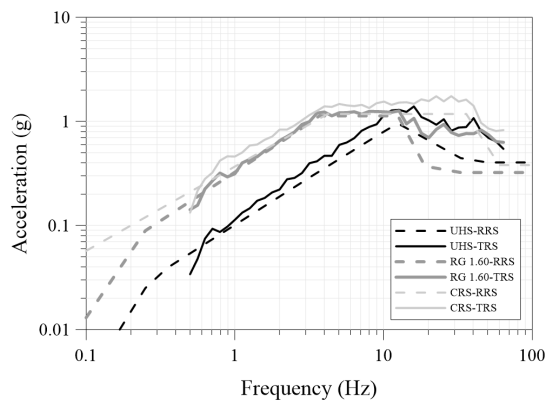
구조적 증폭 특성은 측정된 최대가속도를 이용하여 분석하였으며, 캐비닛 내외부의 위치별 및 입력 지진



(a) Longitudinal direction (X)



(b) Transverse direction (Y)



(c) Vertical direction (Z)

Fig. 8 Acceleration response spectrum of seismic test

별 최대응답 가속도를 비교하여 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 종방향 가진실험의 경우, 캐비닛 외함은 바닥으로부터 높이 1/4지점까지는 R.G 1.60의 최대가속도가 가장 크게 나타났으며, 1/4지점 이후부터 최상부까지는 R.G 1.60, UHS, CRS 순으로 측정되었다. 하지만 횡방향 가진 실험의 경우에는 위치별 및 입력

지진별 경향은 나타나지 않았다. 그리고 수직방향 가진 실험의 경우에는 높이별 최대가속도는 유사하였으며, UHS, R.G 1.60, CRS순으로 증가하였다.

종방향 가진 실험의 경우, 캐비닛 내부의 패널 위치에서의 최대가속도는 CRS 지진이 가장 크게 나타났으며, 캐비닛 외함과 동일하게 R.G 1.60, UHS, CRS 순으

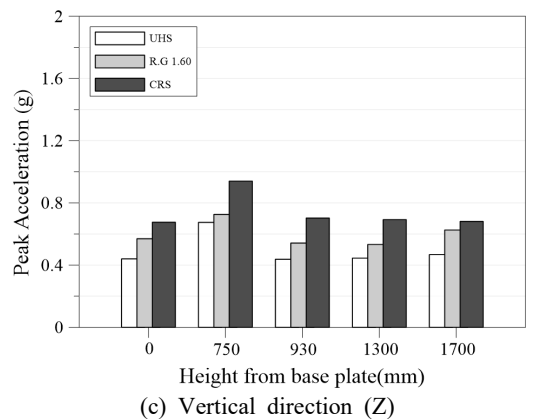
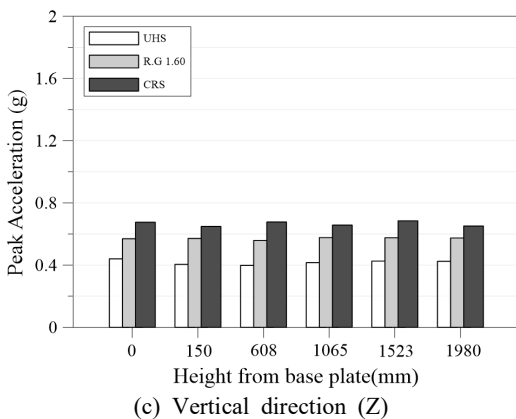
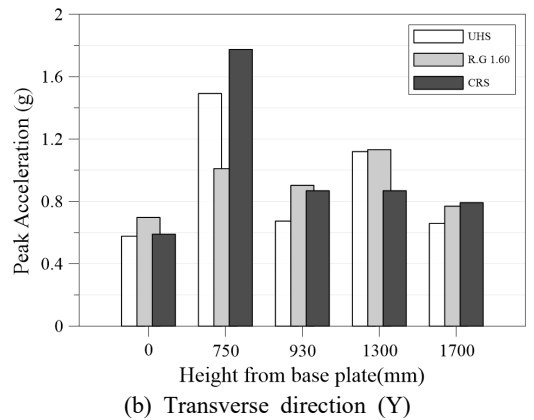
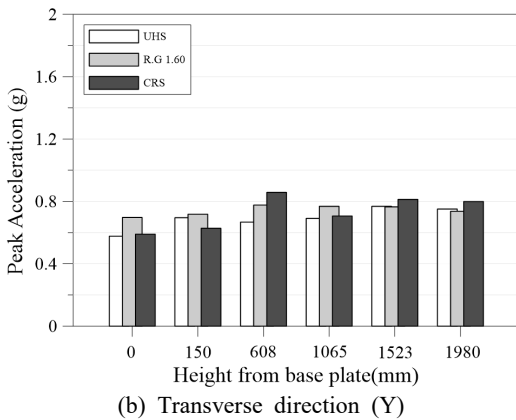
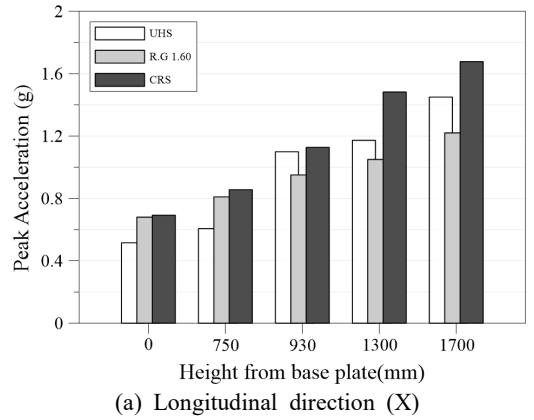
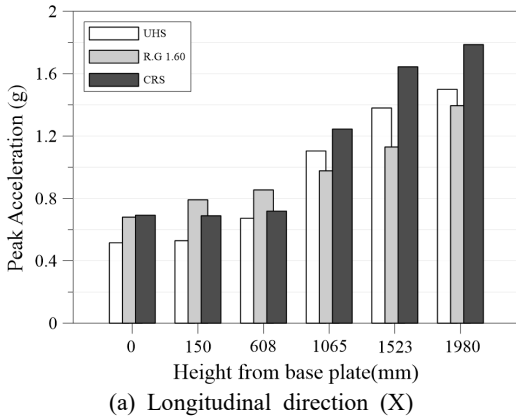


Fig. 9 Comparison of peak acceleration depending on input motion at out-cabinet

Fig. 10 Comparison of peak acceleration depending on input motion at in-cabinet

로 크게 나타났다. 또한 기초부근에 설치된 전기코일의 최대가속도 CRS 지진이 가장 크게 나타났다. 하지만 횡방향 가진 실험의 경우에는 위치별 및 입력지진별 경향은 나타나지 않았으며, 전기코일 위치에서 최대가속도가 패널 위치보다 크게 나타났다. 또한 수직방향 가진 실험의 경우에는 각각 패널의 최대가속도는 유사하였으며, UHS, R. G 1.60, CRS 순으로 증가하였다.

5.2 캐비닛 내외부 증폭계수

선행연구결과 최대가속도 비교를 통하여 캐비닛 외함의 경우에는 R. G 1.60보다 UHS의 경우에 큰 증폭이 발생함을 보고하였으며, 내부의 경우에는 외함과 반대로 UHS보다 R. G 1.60의 경우에 큰 증폭이 발생함을 발표하였다⁽⁷⁾.

전달함수를 이용하여 캐비닛 내외부의 증폭계수를

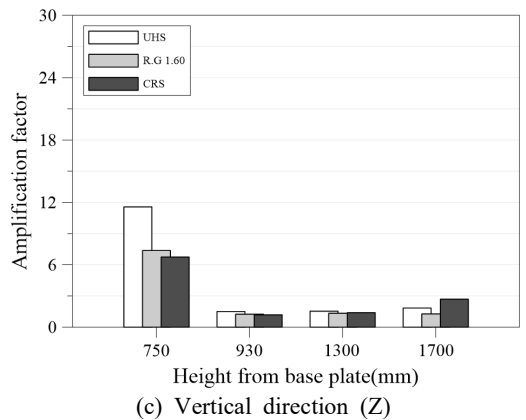
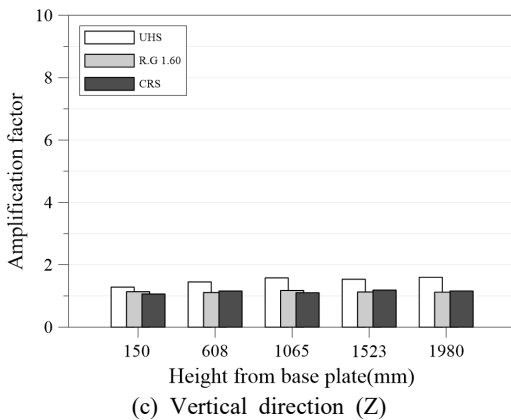
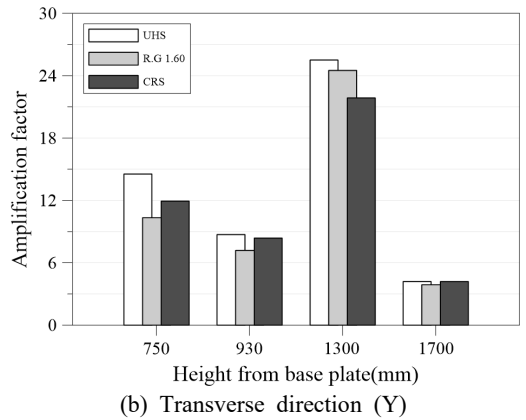
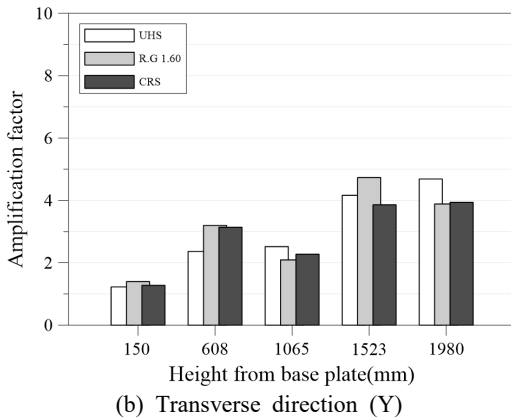
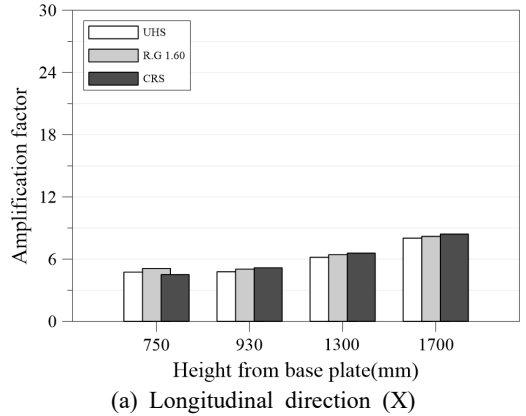
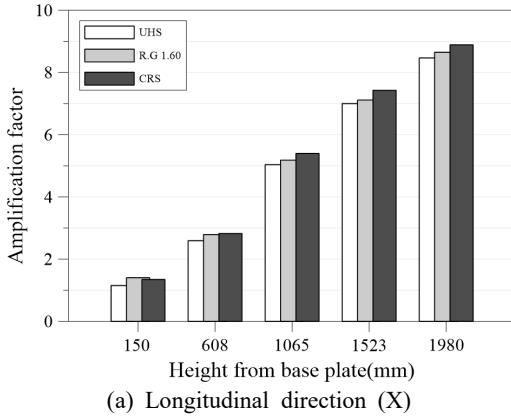


Fig. 11 Comparison of amplification factor at out-cabinet

Fig. 12 Comparison of amplification factor at in-cabinet

Table 5 Summary of amplification factor

No.	Peak acceleration									Transfer function								
	UHS			R. G 1.60			CRS			UHS			R. G 1.60			CRS		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
A2	1.03	1.21	0.92	1.16	1.03	1.00	0.99	1.06	0.96	1.15	1.23	1.29	1.40	1.40	1.14	1.35	1.28	1.06
A3	1.31	1.16	0.91	1.26	1.11	0.98	1.04	1.45	1.00	2.59	2.36	1.45	2.79	3.20	1.11	2.82	3.14	1.16
A4	2.14	1.20	0.95	1.44	1.10	1.01	1.80	1.20	0.97	5.04	2.52	1.58	5.18	2.09	1.17	5.40	2.28	1.10
A5	2.68	1.33	0.97	1.66	1.10	1.01	2.37	1.38	1.01	7.00	4.16	1.54	7.12	4.73	1.13	7.43	3.86	1.19
A6	2.91	1.30	0.96	2.05	1.06	1.01	2.58	1.35	0.96	8.47	4.69	1.60	8.65	3.88	1.12	8.89	3.94	1.16
A7	1.18	2.59	1.53	1.19	1.45	1.28	1.24	3.01	1.39	4.75	14.54	11.57	5.10	10.33	7.37	4.50	11.93	6.74
A8	2.13	1.17	0.99	1.40	1.30	0.95	1.63	1.47	1.04	4.78	8.72	1.50	5.04	7.18	1.24	5.17	8.37	1.19
A9	2.28	1.94	1.01	1.54	1.62	0.94	2.14	1.47	1.02	6.18	25.50	1.54	6.43	24.51	1.33	6.58	21.86	1.39
A10	2.81	1.14	1.06	1.79	1.10	1.10	2.42	1.34	1.01	8.03	4.20	1.84	8.20	3.89	1.27	8.41	4.19	2.69

평가하였으며, Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 캐비닛 외부의 증폭은 종방향 가진의 경우에 캐비닛 공진 주파수와 유사한 주파수 범위에서 가속도 증폭이 발생하였다. 최상단은 약 8.47배 증폭이 발생하였으며, 높이가 증가함에 따라 증폭은 선형적으로 증가하였다. 하지만 이 연구결과는 선행연구결과와 동일하게 평가되지 않았으며, UHS보다 R. G 1.60의 증폭 계수가 크게 나타났다. 상기와 같은 결과는 전기기기인 캐비닛의 특성(재료, 보강형태)에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 횡방향 가진의 경우, UHS 및 CRS는 최상단에서 최대의 증폭이 발생하였으며, R. G 1.60의 경우에는 3/4 높이 지점에서 최대 증폭이 발생하였다. 수직방향 가진의 경우에는 높이별 증폭 계수의 변화는 나타나지 않았다.

Fig. 12와 같이 캐비닛 내부에서의 증폭은 패널형태의 부품과 기초에 직접적으로 연결되는 부품의 증폭은 다른 형태를 나타내었다. 종방향 가진의 경우에는 각 위치별로 입력진동에 의한 증폭계수는 유사하게 나타났으며, UHS, R. G 1.60, CRS순으로 증가하는 경향을 보였다. 횡방향 가진에서 패널형태의 부품은 크게 증폭이 발생하였으며, relay가 설치되는 위치에서의 증폭계수는 약 25.5배 발생하였다. 그리고 수직방향 가진의 경우에는 기초에 직접적으로 연결되는 부품의 경우에만 증폭이 발생하였다. 따라서 캐비닛 내부의 증폭계수는 설치되는 패널의 크기 및 위치, 설치되는 부품의 질량에 따라 캐비닛 다양하게 나타나는 것으로 판단된다.

최대가속도 응답과 전달함수로부터 산출된 각 위치에서의 증폭계수를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 각 최대가속도와 전달함수로부터 산출된 증폭계수는 캐비

닛 외함보다 주요부품이 설치된 내부에서 증폭이 높게 평가되었으며, 외함과 내부의 증폭특성이 상이하게 나타났다. 이와 같이 외함의 경우에는 전체모드에 의한 가속도 증폭이 발생하는 반면 내부에서는 국소모드에 의한 증폭이 발생하는 것으로 판단된다.

6. 결 론

내진성능 평가방법에 사용되는 응답스펙트럼의 형상 또는 지진파의 특성이 변화하면 시험대상시료의 응답이 변화할 수 있다. 기존의 설계응답스펙트럼과 UHS의 응답스펙트럼이 상이하여, 횡방향 가진 조건에서 relay 위치에서 UHS에 의한 응답이 설계응답스펙트럼을 응답보다 높게 평가되는 경우가 존재한다. 이는 기검증에 있어서 실제 발생 가능한 거동의 증폭보다 더 낮은 증폭으로 검토될 가능성이 있음을 시사한다.

이 연구에서는 DC 125V B/C 전기설비를 대상으로 NRC 표준지진 설계응답스펙트럼(R. G 1.60), 울진 지역의 등재해도 스펙트럼(UHS) 및 설계와 등재해도 스펙트럼을 고려한 응답스펙트럼(CRS)을 이용하여 진동대 실험을 통하여 B/C의 캐비닛 외함과 내부의 동특성 평가를 실시하였다. 전달함수와 B/C의 최상단에서의 응답가속도는 기초로부터 높이가 증가할수록 응답은 고주파 성분이 많은 지진파에서 더 높게 평가되었다. 실제 발생 가능한 응답스펙트럼(UHS)과 기존의 설계응답스펙트럼(R. G 1.60)을 활용하여 제시된 응답스펙트럼(CRS)을 이용한 실험에서의 최대가속도 및 증폭계수는 대부분의 위치에서 UHS 및 R. G 1.60보다 높

게 평가되었다.

따라서 원자력 기기의 성능 실험의 목적에 따라 기기의 평가를 위하여 실제 지진하중의 특성을 반영하는 것이 바람직하지만 기기의 검증을 위한 시험에서는 보수적인 응답스펙트럼의 적용을 고려하여야 한다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20171510101910).

References

- (1) Korea Atomic Energy Research Institute, 2004, Analysis of Component Reliability of Korean Standard Nuclear Power Plants, KAERI/TR-2749.
- (2) Joe, Y. H. and Park, H. G., 1998, Modal Testing of Seismic Monitoring System Cabinet of Nuclear Power Plant, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 449-456.
- (3) Joe, Y. H., Cho, S. G. and Park, H. G., 2000, Modal Identification and Nonlinearity Assessment of Electric Cabinet for Improvement of Basic Fragility Variables, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 4, No. 4, pp. 83-91.
- (4) Cho, S. G., Kim, D. K. and Go, S. H., 2010, Effect of the Excitation Level on the Dynamic Characteristics of Electrical Cabinets of Nuclear Power Plants, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 14, No. 3, pp. 23-30.
- (5) Koo, K. Y., Cho, S. G., Cui, J. and Kim, D. K., 2010, Seismic Response Prediction for Cabinets of Nuclear Power Plants by Using Impact Hammer Test, Nuclear Engineering and Design, Vol. 240, pp. 2500-2511.
- (6) Cho, S. G. and So, G. H., 2011, Analysis of Experimental Modal Properties of an Electric Cabinet via a Forced Vibration Test Using a Shaker, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 15, No. 6, pp. 11-18.
- (7) Kim, M. K. and Choi, I. K., 2011, A Shaking Table Test for an Re-evaluation of Seismic Fragility of Electrical Cabinet in NPP, Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 24, No. 3, pp. 295-305.
- (8) Hur, J., Goodno, B. I. and Craig, J. I., 2012, Dynamic Characteristics of Switchboard Cabinets Subjected to Earthquakes Using Numerical Models: A Study of Evaluating Seismic Effects on Nonstructural Components, Structures Congress.
- (9) Cho, S. G., Kim, D. K. and Chaudhary, S., 2011, A Simplified Model for Nonlinear Seismic Response Analysis of Equipment Cabinets in Nuclear Power Plants, Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, pp. 2750-2757.
- (10) Gupta, A., Rustogi, S. K. and Gupta, A. K., 1999, Ritz Vector Approach for Evaluation In-cabinet Response Spectra, Nuclear Engineering, Vol. 190, pp. 255-272.
- (11) Lin, F. R., Chai, J. F., Lai, Z. Y., Chang, K. C., Liao, W. I., Chou, L. P. and Huang, C. C., 2012, Experimental Study of Seismic Qualification of In-cabinet Equipment in NPP, Transaction of 15th World Conference on Earthquake Engineering.
- (12) Cho, S. G., Cui, J. and Kim, D. K., 2011, A Procedure for Generation In-cabinet Response Spectra Based on State-space Model Identification by Impact Testing, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 43, No. 6, pp. 573-582.
- (13) Lin, F. R., Chai, J. F., Lai, Z. Y., Chen, M. Y., Huang, Y. N. and Chang, K. C., 2017, A Simplified Method for the Evaluation of Seismic Demands on In-cabinet Equipment in Motor Control Center Type Cabinets in Nuclear Power Plants, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 40, No. 3, pp. 179-190.
- (14) US NRC Regulatory Guide 1.60, 1973, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.
- (15) Korea Atomic Energy Research Institute, 2003, Evaluation of High Frequency Ground Motion Effects on the Seismic Capacity of NPP Equipments, KAERI/TR-2484.
- (16) Korea Atomic Energy Research Institute, 2012, Probabilistic Seismic Hazard Analysis Procedure and Application for Nuclear Power Plant Sites, KAERI/TR- 4633.
- (17) Rhee, H. M., Kim, M. K., Sheen, D. H. and Choi, I. K., 2013, Analysis of Uniform Hazard Spectra for Metropolises in the Korean Peninsula, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 17, No. 2, pp. 71-77.
- (18) Electric Power Research Institute, 2007, Seismic Screening of Components Sensitive to High-frequency Vibratory Motions, Report 1015109.



Young-Soo Jeong is received Ph. D. from Kyushu University in 2013. He is currently a researcher Seismic Research and Test Center in Korea. His research interests are in maintenance and finite element of steel structure.



Seung-Hyun Eem is a senior researcher of structural and seismic safety research team in Korea Atomic Energy Research Institute. He received a Ph. D. from the Department of Civil & Environmental Engineering in Korea Advanced Institute of Science and Technology. His research interest are structural dynamics, structural stability, structural reliability and seismic.



Bub-Gyu Jeon received his Ph. D. degree from Pusan National University with the topic related with seismic fragility evaluation of base isolated nuclear power plant piping system. He is currently the technical laboratory manager in Seismic Research and Test Center. His research interests encompass seismic evaluation of nonstructural elements and seismic behavior of internal pressured piping system.



Dong-Uk Park received his Ph.D. degree from Pusan National University with the topic related with improvement of numerical model using wireless measurement on railway bridge. He is currently the verification manager in Seismic Research and Test Center. His research interests encompass seismic evaluation of mechanical and electrical equipment and seismic performance of high frequency motion.