

# 포항지진에 대한 원자력발전소 구조물 및 기기의 지진응답 분석

## Seismic Response Analysis of Nuclear Power Plant Structures and Equipment due to the Pohang Earthquake

임승현<sup>1)\*</sup> · 최인길<sup>1)</sup>

Eem, Seung-Hyun<sup>1)\*</sup> · Choi, In-Kil<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한국원자력연구원 구조지진안전연구실

<sup>1)</sup>Structural and Seismic Safety Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute

### / ABSTRACT /

The probabilistic seismic safety assessment is one of the methodology to evaluate the seismic safety of the nuclear power plants. The site characteristics of the nuclear power plant should be reflected when evaluating the seismic safety of the nuclear power plant. The Korea seismic characteristics are strong in high frequency region and may be different from NRC Regulatory Guide 1.60, which is the design spectrum of nuclear power plants. In this study, seismic response of a nuclear power plant structure by Pohang earthquake (2017.11.15. (KST)) is investigated. The Pohang earthquake measured at the Cheongsong seismic observation station (CHS) is scaled to the peak ground acceleration (PGA) of 0.2 g and the seismic acceleration time history curve corresponding to the design spectrum is created. A nuclear power plant of the containment building and the auxiliary buildings are modeled using OPENSEES to analyze the seismic response of the Pohang earthquake. The seismic behavior of the nuclear power plant due to the Pohang earthquake is investigated. And the seismic performances of the equipment of a nuclear power plant are evaluated by the HCLPF. As a result, the seismic safety evaluation of nuclear power plants should be evaluated based on site-specific characteristics of nuclear power plants.

**Key words:** Pohang earthquake, Nuclear power plant, Floor response spectrum, Seismic analysis

## 1. 서론

2017년 11월 15일 14:29:31 (KST) 포항시 북구 북쪽 9 km 지역 (북위 36.109°, 경도 129.366°)에서 규모 5.4 포항지진이 발생하였다[1]. 포항지진은 국내에서 지진을 1970년대부터 관측한 이래로 2016년 9월 12일 발생한 경주지진 다음으로 규모가 큰 지진이다. 포항 지진으로 92명의 피해자 1,797명의 이재민이 발생하였으며, 27,317개소의 시설피해가 발생하였다 [2]. 포항지진으로 많은 경제적, 사회적 손실이 발생하였다. 그리고 동시에 원자력발전소의 지진안전성에 대한 관심이 고조되었다.

원자력발전소의 지진안전성은 확률론적 지진안전성 평가를 통해 평가된다. 확률론적 지진안전성 평가는 다양한 외부하중 및 구조물의 특성의 랜덤성과 불확실성을 고려하여 평가가 진행된다[3]. 이때 원자력발전소 부지의 고유한 특성을 반영 하여 확률론적 지진안전성평가가 수행 되어야 한다. 국내 원자력발전소의 경우 NRC (US Nuclear Regulatory Commission) Regulatory Guide 1.60 설계응답스펙트럼 [4]을 많은 부분 적용을 하였다. NRC Regulatory Guide 1.60 설계응답스펙트럼은 미국 서부지역의 지진 특성이 많은 부분 반영이 되어 있다. 하지만, 국내의 지진동 특성은 미국 중동부지역과 유사하다는 의견이 있다[5, 6]. 국내의 지진동 특성은 설계응답스펙트럼과 비교하여 고주파수 성분이 강한 특성이 있다. 경주지진의 경우 설계응답스펙트럼과 상대적으로 비교하여 고주파수의 성분이 강한 것이 관찰되었다[6]. 고주파수 지진동의 경우 원자력발전소의 구조물의 안전성에 큰 영향을 미치지 않을 수 있지만 고주파수에 민감한 기기의 경우는 그

\*Corresponding author: Eem, Seung Hyun  
E-mail: eemsh@kaeri.re.kr

(Received February 19, 2018; Revised March 12, 2018; Accepted March 14, 2018)

영향이 클 수 있다. 따라서 국내 원자력발전소의 경우 국내지진동 특성을 반영하여 확률론적 지진안전성 평가가 수행되어야 한다.

본 연구에서는 포항지진이 국내지진의 지진동 특성을 대표하지 않지만 국내에서 발생한 포항지진에 대한 원자력발전소의 구조물 및 기기의 지진 응답 분석을 수행하였다. 비교 분석을 위하여 원자력발전소의 설계응답스펙트럼에 부합하는 지진가속도 시간이력곡선과 계측된 포항지진에 의한 원자력발전소 구조물의 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석을 바탕으로 원자력발전소 격납건물 및 보조건물의 층응답스펙트럼을 작성하여 비교 분석을 수행 하였다. 또한 보조건물에 위치한 전기기기에 대해 내진성능평가를 수행 하였다. 대상 전기기는 노심보호연산기계통의 노심보호연산기/제어봉집합체연산기 캐비닛과 모터제어반 캐비닛이며 내진성능 즉 HCLPF (High Confidence, Low Probability of Failure)를 산정하여 비교 하였다.

## 2. 지진응답해석을 위한 입력지진

본 장에서는 포항지진에 의한 원자력발전소 구조물의 지진응답해석을 수행하기 위해 입력지진을 생성하였다. 포항지진은 계측된 지진가속도 시간이력곡선을 원자력발전소 설계최대지반가속도인 0.2 g에 맞게 스케일링 되었으며, 포항지진에 의한 원자력발전소의 지진응답과의 비교를 위하여 NRC Regulatory Guide 1.60 설계응답스펙트럼 (0.2 g)에 맞는 지진가속도 시간이력가속도를 생성하였다.

### 2.1 포항지진의 특징

포항지진은 2017년 11월 15일 14:22:32 (KST) 포항시 북구 북쪽 7 km 지역에서 규모 2.2의 지진과 12초 후인 14:22:44 (KST)에 규모 2.6의 지진으로 하는 두 차례의 진진이 발생하였고, 다음 2017년 11월 15일 14:29:31 (KST) 포항시 북구 북쪽 9 km 지역 (북위 36.109°, 경도 129.366°)에서 규모 5.4의 본진이 발생 하였다[1]. 포항지진으로 포항시는 수정된 메르켈리

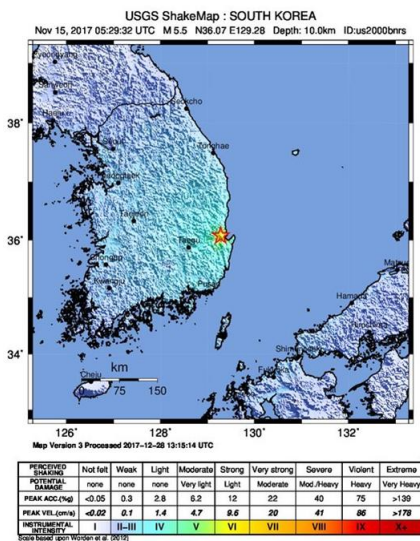


Fig. 1. Shakemap of Pohang earthquake with epicenter [7]

진도(MMI) 6을 경험하였으며 미국지질조사국 (USGS)에서 발표한 셰이크 맵을 Fig. 1에 나타내었다[7].

포항지진의 지진가속도 시간이력곡선은 한국지질자원연구원 지진센터에서 운영 중인 청송지진관측소(CHS)에서 계측된 지진을 활용하였다. 청송지진관측소에서 계측된 최대지반가속도는 0.0278 g로 관측되었다. 청송지진관측소는 북위 36.1811°, 경도 129.0881°에 위치하여 포항지진(본진) 진앙지(북위 36.109°, 경도 129.366°)에서 약 26 km 떨어져 있으며, 포항시 북구에 그 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 청송지진관측소는 지진센터에서 운영하는 지진관측소 중 진앙지에서 가장 가까우며 비교적 암반부지에서 운영되는 지진관측소이다.

청송지진관측소에서 관측된 포항지진 (이하 포항지진)의 수평방향 지진가속도를 원자력발전소 설계최대지반가속도 0.2 g로 스케일링하였다. 포항지진의 지진가속도 시간이력곡선을 Fig. 3에 나타내었다.

강진지속시간은 지진의 특성을 나타내는 좋은 지표이며 [8], 강진지속시간은 식 (1)의 Arias Intensity를 활용하여 계산하였다.

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_r} a^2(t) dt \quad (1)$$

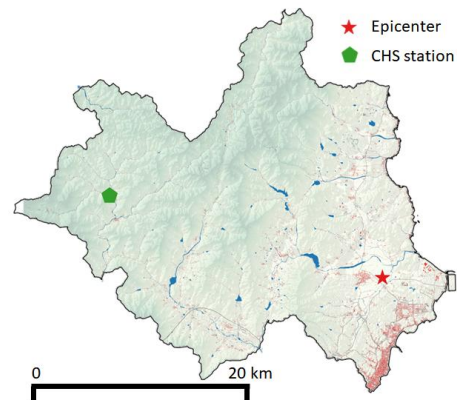


Fig. 2. Location of the Pohang earthquake (epicenter) and the CHS station

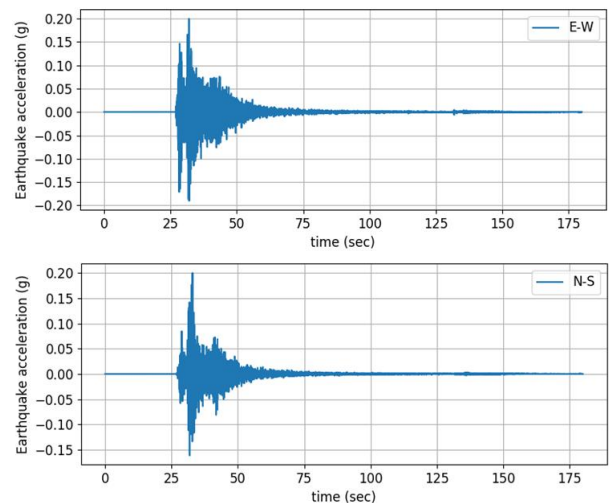


Fig. 3. Acceleration time history of Pohang earthquake (at the CHS station)

여기서  $a(t)$ 는 지진가속도 시간이력곡선이며,  $t_r$ 은 지진가속도 시간이력의 총 시간,  $g$ 는 중력가속도이다. ASCE 4-98에서 Arias Intensity 곡선의 5~75%에 해당하는 지속시간을 강진지속시간으로 정의한다[9]. Fig. 4는 포항지진의 Arias Intensity 곡선을 나타내었으며, 수평방향 E-W 및 N-S 방향 모두 약 9초 정도로 계산되었다. 2016년 9월 12일 국내에서 발생한 경주 지진 보다 포항지진의 강진지속시간이 상대적으로 긴 것을 알 수 있다[10].

Fig. 5는 포항지진의 응답스펙트럼과 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼 (0.2 g)을 비교하였다. 포항지진의 응답스펙트럼과 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼은 다른 주파수 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 주파수 범위 0.1~7 Hz는 포항지진 응답스펙트럼이 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼 보다 스펙트럴 가속도 값이 낮은 것을 알 수 있으며, 주파수 범위 7~50 Hz에서는 포항지진 응답스펙트럼이 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼 보다 스펙트럴 가속도 값이 큰 것을 알 수 있다. 포항지진의 특성이 고주파수 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 국내에서 발생가능한 지진동의 특성이 고주파수 특성을 가진다는 의견과 부합한다. 그 이유는 국내의 지진동 특성이 미국 중동부와 유사하나 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼은 미국 서부의 지진동 특성이 많이 반영되어 이러한 현상이 발생하는 것으로 생각되어진다.

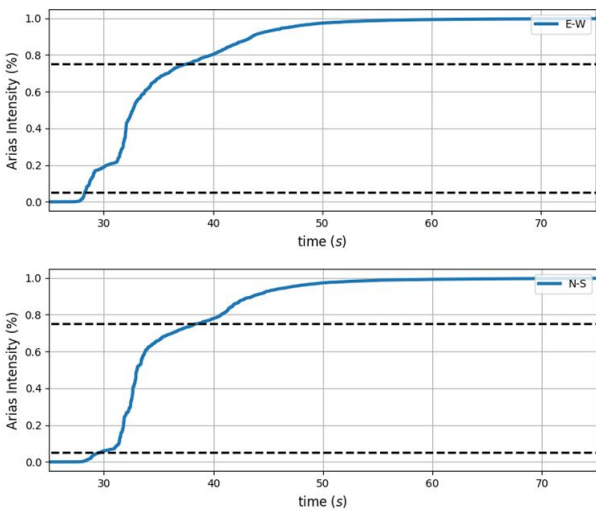


Fig. 4. Arias intensity curves of Pohang earthquake

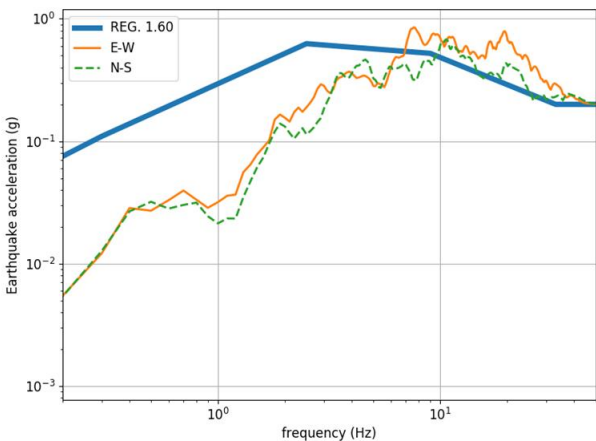


Fig. 5. Response spectrum of Pohang earthquake

## 2.2 원자력발전소 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진 생성

원자력발전소 구조물의 지진응답 비교분석을 위하여 NRC Regulatory Guide 1.60 설계응답스펙트럼에 부합하는 지진가속도 시간이력곡선 (인공지진)을 생성하였다. 지진가속도 시간이력곡선은 랜덤신호를 변환하여 설계응답스펙트럼과 맞게 수정하는 P-CARES 프로그램을 활용하였으며[11], 생성한 지진가속도 시간이력곡선을 Fig. 6에 나타내었다.

인공지진의 응답스펙트럼과 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼을 Fig. 7에 나타내었다. E-W방향 N-S방향 인공지진의 응답스펙트럼이 NRC Regulatory Guide 1.60 설계응답스펙트럼에 잘 맞는 것을 알 수 있다.

## 3. 원자력발전소의 층응답스펙트럼

본 장에서는 포항지진과 인공지진에 의한 원자력발전소 구조물의 지진응답분석을 수행하였다. 지진응답분석은 원자력발전소 격납건물과 보조건물의 층응답스펙트럼을 작성함으로써 이루어졌다. 한국형 표준 원자력

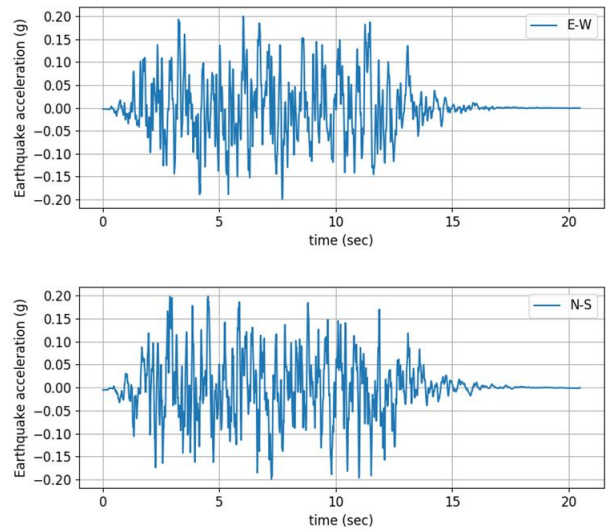


Fig. 6. Acceleration time history of artificial earthquake

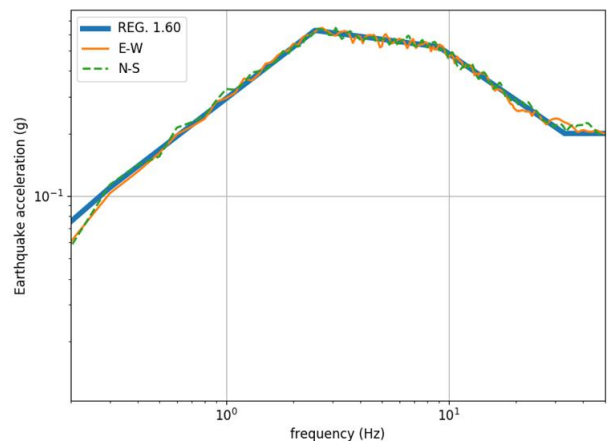


Fig. 7. Response spectrum of artificial earthquake

발전소 OPR1000의 격납건물과 보조건물 모델을 작성하여 지진응답해석 (직접적분법)을 수행하여 각 건물의 층응답스펙트럼을 작성하였다.

### 3.1 격납건물의 층응답스펙트럼

포항지진 (Pohang EQ)과 인공지진 (REG EQ)에 의한 격납건물의 층응답스펙트럼 작성을 위하여 격납건물의 구조모델을 작성 하였다. 한국형 표준원자력발전소 OPR1000의 격납건물을 OPENSEES 프로그램을 활용하여 작성하였다. 격납건물 모델은 집중질량모델으로 작성하였으며 Fig. 8에 나타내었다. 격납건물은 격납건물 외벽과 내부구조물이 같이 모델링 되었다. 총 33개의 노드와 38개의 요소를 활용하였으며 암반지반에 고정조건을 적용하였다. 격납건물 구조물은 반구형 돔과 철근 콘크리트 원통형 셸로 구성된다. 작성한 모델의 모드해석결과를 Table 1과 Fig. 9에 나타내었다.

격납건물 모델을 활용하여 포항지진과 인공지진에 대한 지진응답해석을 수행하였다. 격납건물의 70 ft (21.3 m)와 216 ft (65.8 m)에서의 층응답

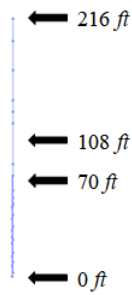


Fig. 8. Reactor containment building of OPR1000

Table 1. Modal analysis results of containment building

Mode number	Natural frequency	Natural period	Note
1	4.561 Hz	0.2192 sec	X-direction
2	4.562 Hz	0.2191 sec	Y-direction
3	9.583 Hz	0.1043 sec	
4	12.198 Hz	0.0819 sec	

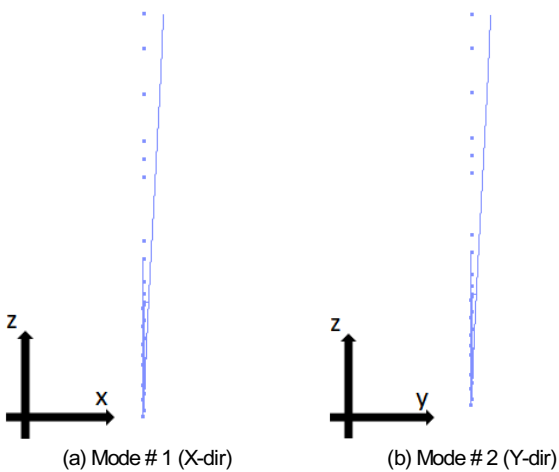


Fig. 9. Mode shape of reactor containment building

스펙트럼을 Fig. 10에 나타내었다. 층응답스펙트럼은 5% 감쇠비에 대하여 작성이 되었다. 층응답스펙트럼 모두 격납건물의 고유주파수인 4.5 Hz 부근에서 피크가 존재하는 것을 알 수 있다. 특히 격납건물 216 ft에서 그 현상이 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 저주파수 대역에서는 인공지진의 지진가속도 시간이력곡선에 의한 스펙트럼 가속도 값이 크며, 고주파수 대역에서는 포항지진에 의한 층응답스펙트럼의 스펙트럼 가속도 값이 큰 것을 알 수 있다. 격납건물의 70 ft 층응답스펙트럼의 경우 포항지진에 의한 스펙트럼 가속도 값의 증폭현상이 격납건물 216 ft 층응답스펙트럼 보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 포항지진이 상대적으로 고주파수 성분이 많아 격납건물의 고차모드에 영향을 주어 발생된 것으로 예상된다.

### 3.2 보조건물의 층응답스펙트럼

포항지진과 인공지진에 의한 보조건물의 지진응답분석을 위하여 구조 모델을 작성 하였다. 한국형 표준원자력발전소 OPR1000의 보조건물을

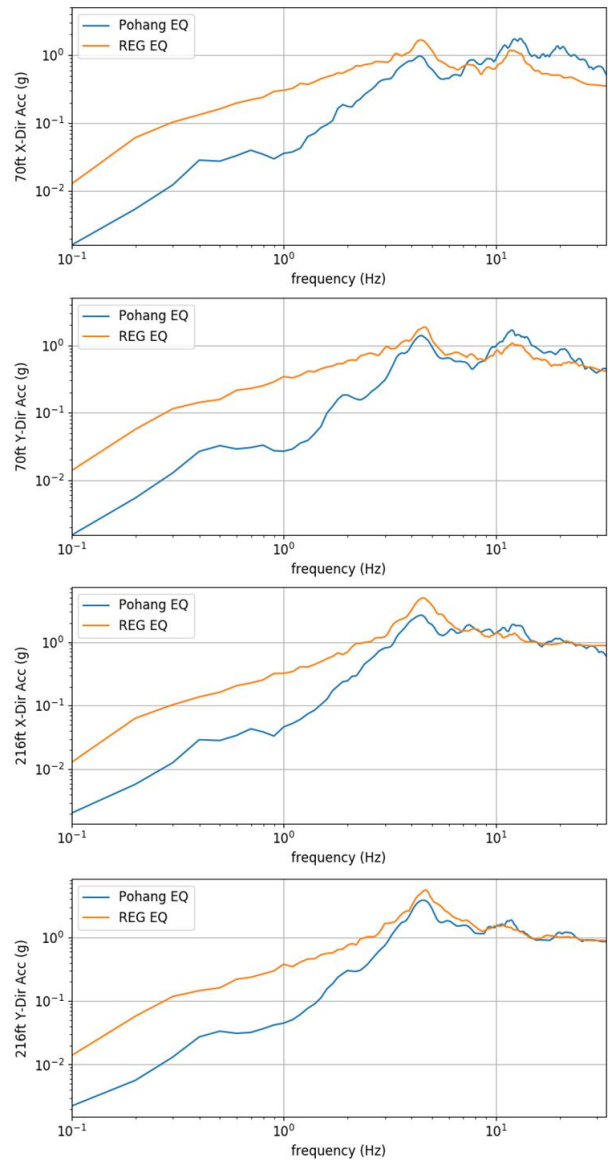


Fig. 10. Floor response spectrum of containment building



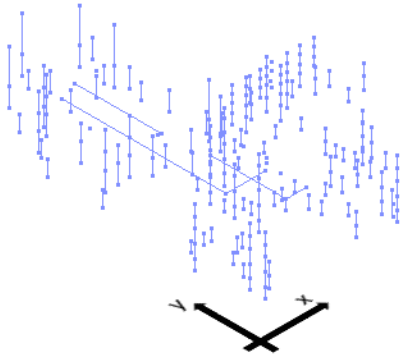
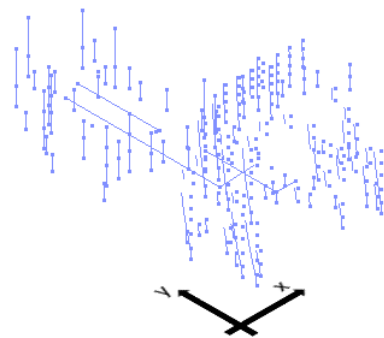


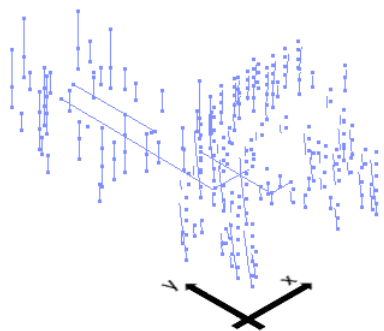
Fig. 11. Auxiliary building of OPR1000

Table 2. Modal analysis results of auxiliary building

Mode number	Natural frequency	Natural period	Note
1	1.815 Hz	0.550 sec	Turb. 1 <sup>st</sup>
2	1.851 Hz	0.540 sec	Turb. 2 <sup>nd</sup>
3	2.368 Hz	0.422 sec	
4	3.053 Hz	0.327 sec	
5	3.305 Hz	0.302 sec	
6	4.470 Hz	0.223 sec	
7	5.181 Hz	0.192 sec	
8	5.247 Hz	0.190 sec	
9	6.437 Hz	0.155 sec	Aux. Y-dir.
10	6.791 Hz	0.147 sec	
11	7.506 Hz	0.133 sec	Aux. X-dir.
12	8.628 Hz	0.115 sec	



(a) Modeshape (frequency at 6.437 Hz)



(b) Modeshape (frequency at 7.506 Hz)

Fig. 12. Modeshape of auxiliary building

OPENSEES 프로그램을 활용하여 작성하였다. 보조건물 모델은 격납건물과 마찬가지로 집중질량모델로 작성하였으며, Fig. 11에 나타내었다.

보조건물은 터빈건물과 출입통제건물이 같이 모델링 되었다. 터빈건물과 출입통제건물은 내진등급 2등급이며, 보조건물이 터빈건물과 출입통제건물이 함께 모델링 된 이유는 약 100 ft (30.5 m) 슬래브를 함께 공유하기 때문이다. 보조건물은 높이 58 ft (17.7 m)의 암석지 지반 기초위에 세워진 철근 콘크리트 전단벽 구조이다. 출입통제건물 또한 보조건물과 같이 철근 콘크리트 건물이며, 터빈건물은 브레이스 강철 프레임으로 구성된다. 작성한 구조모델의 모드해석결과를 Table 2과 Fig. 12에 나타내었다. 구조물 모델이 보조건물뿐만 아니라 터빈건물과 출입통제 건물이 같이 모델링 되어 있기 때문에 보조건물이 아닌 터빈건물의 고유주기가 먼저 나오는 것을 확인할 수 있다. 보조건물의 Y방향 고유진동수는 6.437 Hz, X방향 고유진동수는 7.506 Hz이며, 약 100 ft에서 보조건물, 터빈건물, 출입통제건물이 슬래브를 공유하여 X방향 7.5 Hz 고유진동수의 모드형상에서 출입통제건물이 같이 거동하는 것을 확인할 수 있다.

보조건물 모델을 활용하여 포항지진과 인공지진에 대한 지진응답해석을 수행하였다. 보조건물의 144 ft와 165 ft에서의 층응답스펙트럼을 Fig. 13에 나타내었다. 층응답스펙트럼은 5% 감쇠비에 대하여 작성이 되었다. 보조건물의 고유진동수 영향으로 X방향 층응답스펙트럼은 7.5 Hz 부근에 피크가 존재하며, Y방향 층응답스펙트럼은 6.5 Hz 부근에 피크가 존재한다. 격납건물 층응답스펙트럼의 경향과 유사하게 고주파수 영역에서는 포항지진에 의한 층응답스펙트럼이 NRC Regulatory Guide 1.60의 인공지진보다 스펙트럴 가속도값이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 고주파수 영역에서의 스펙트럴 가속도 증폭 현상이 Y방향보다 X방향 층응답스펙트럼에서 더 뚜렷하게 나타난다. 이는 보조건물의 경우 높이에 따른 층응답스펙트럼 변화가 상대적으로 격납건물의 경우보다 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 원자력발전소 전기기기의 내진성능

원자력발전소 보조건물의 층응답스펙트럼을 바탕으로 전기기기의 내진성능을 HCLPF를 통해 계산하였다. 전기기기의 HCLPF 계산 및 지진취약도의 계산은 등재해도 스펙트럼을 바탕으로 계산이 수행되어야 한다. 하지만, 본 연구에서는 포항지진의 영향을 확인하기 위해 입력지진이 등재해도 스펙트럼을 대표한다고 가정하여 전기기기의 내진성능을 계산하였다. 전기기기의 손상기준은 구조적 손상 및 기능적 손상으로 나뉘지만, 본 연구에서는 구조적 손상만을 고려하였다. 평가 방법은 EPRI 보고서 TR-103959 “Methodology for Developing Seismic Fragilities”에 따라 계산되었다 [12]. EPRI의 지진취약도를 도출하기 위한 안전계수법에서는 구조물의 설계나 응답계산에서 고려된 각종 변수를 크게 성능계수와 응답계수로 구분한다. 구분된 계수에 대해 중앙값 성능과 안전계수 (Factor of Safety)를 계산하고 램덤성과 불확실성을 도출하여 취약도를 평가하게 된다 [6]. 지진취약도 곡선은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$f(a) = \Phi \left[ \frac{\ln(a/A_m) + X\beta_U}{\beta_R} \right] \tag{2}$$

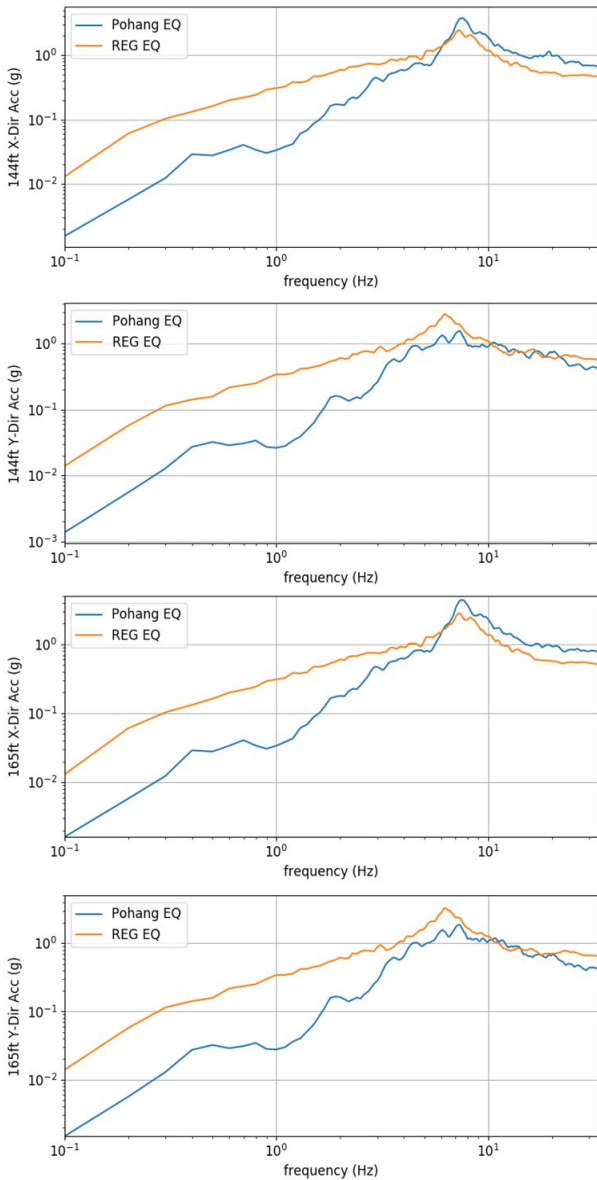


Fig. 13. Floor response spectrum of auxiliary building

여기서  $X = \Phi^{-1}(P_{conf})$

$\Phi(\ )$  : 표준정규확률분포함수

$a$  : 입력지진의 강도

$A_m$  : 중앙값 성능

$X$  : 신뢰도 (95%, 50%, 5%)

$\beta_R$  : 램덤성 대수표준편차

$\beta_U$  : 불확실성 대수표준편차

#### 4.1 CPC/CEAC 캐비닛의 내진성능 비교

노심보호연산기계통 (CPCS : Core Protection Calculator System)은 원자력발전소의 보호계통으로 원자로에 이상신호 발생시 정지신호를 발생시킨다. 노심보호연산기 (CPC : Core Protection Calculator)와 제어봉집합체연산기 (CEAC : Contrl Element Assembly Calculator)는 노심보호

Table 3. Seismic capacity (structural failure) of CPC/CEAC cabinet

	Pohang EQ	REG. EQ
Acceleration result (11.9 Hz & 1% damping)	1.755 g	0.788 g
Median capacity	1.53 g	3.41 g
Randomness ( $\beta_R$ )	0.23	0.23
Uncertainty ( $\beta_U$ )	0.28	0.28
HCLPF	0.67 g	1.48 g

Table 4. Seismic capacity (structural failure) of MCC cabinet

	Pohang EQ	REG. EQ
Acceleration result (5.4 Hz & 5% damping)	0.810 g	1.283 g
Acceleration result (8.4 Hz & 5% damping)	1.130 g	1.489 g
Median capacity	3.35 g	2.39 g
Randomness ( $\beta_R$ )	0.239	0.239
Uncertainty ( $\beta_U$ )	0.278	0.278
HCLPF	1.426 g	1.021 g

연산기계통의 기기이다. CPC/CEAC 캐비닛은 원자력발전소 보조건물 144 ft (43.9 m)에 위치한다고 가정하였다. CPC/CEAC 캐비닛의 무게는 11,506 lb (5,219 kg)이며, 크기는 150"(L) × 54"(W) × 90"(H) (3.8 m (L) × 1.4 m (W) × 2.3 m (H))이다. 본 캐비닛의 고유진동수는 11.9 Hz (side to side)와 37.3 Hz (front to back)이다. CPC/CEAC 캐비닛은 EPRI 보고서 TR-103959 "Methodology for Developing Seismic Fragilities"에 따라 계산되었다. CPC/CEAC 캐비닛의 손상은 프레임의 휨 손상에 의해 발생하며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

CPC/CEAC 캐비닛의 HCLPF 값이 포항지진의 경우 0.67 g, 인공지진의 경우 1.48 g로 포항지진의 경우가 더 낮은 내진성능을 보여주었다. 그 이유는 CPC/CEAC의 고유진동수가 11.9 Hz와 37.3 Hz로 포항지진의 고주파수 성분이 더 많이 존재하기 때문에 인공지진의 HCLPF 값 보다 낮은 것으로 생각된다.

#### 4.2 MCC 캐비닛의 내진성능 비교

모터 제어반 (MCC : Motor Contrl Center)는 원자력발전소에서 모터의 구동, 정지 및 이상상태 감지를 하기 위한 전기기기이다. MCC 캐비닛은 원자력발전소 보조건물 164 ft (50.3 m)에 위치한다고 가정하였다. MCC 캐비닛의 무게는 2,650 lb (1,202 kg)이며 크기는 100"(L) × 21"(W) × 103"(H) (2.5 m (L) × 0.5 m (W) × 2.6 m (H))이다. MCC 캐비닛의 고유진동수는 5.4 Hz (side to side)와 8.4 Hz (front to back)이다. CPC/CEAC 캐비닛과 동일하게 EPRI 보고서 TR-103959에 따라 내진성능을 계산하였다 [12]. MCC 캐비닛의 손상은 바닥에 마운트된 용접부의 손상에 의해 발생하며, 그 결과를 Table 4에 정리하였다.

MCC 캐비닛의 HCLPF 값이 포항지진의 경우 1.426 g, 인공지진의 경우 1.021g로 포항지진인 경우가 인공지진보다 더 높은 내진성능을 보여준다. 이는 MCC 캐비닛의 고유진동수가 5.4 Hz와 8.4 Hz로, 상대적으로 포항

지진의 저진동수 성분이 인공지진보다 적어 나타난 것으로 보인다.

## 5. 결 론

원자력발전소의 지진에 대한 안전성평가를 위해 확률론적 지진 안전성 평가를 수행하고 있다. 확률론적 지진 안전성 평가를 수행 시 원자력발전소의 부지특성을 반영하여 수행하여야 한다. 국내의 경우 지진특성이 고주파수 영역에서의 성분이 상대적으로 원자력발전소의 설계스펙트럼인 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼 보다 강한 현상이 있다. 본 연구에서는 포항지진에 의한 원자력발전소 구조물 및 기기의 지진응답을 확인하였다. 포항지진은 포항지진의 진앙지에서 26 km 정도 떨어진 청송지진관측소에서 관측된 수평방향 지진가속도 시간이력곡선을 최대지반가속도를 0.2 g 로 스케일링한 지진가속도 시간이력곡선을 활용하였다. 포항지진의 지진가속도 시간이력곡선을 원자력발전소의 설계스펙트럼인 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼 (0.2 g)과 비교하였다. 그 결과 포항지진의 응답스펙트럼과 원자력발전소 설계스펙트럼은 상이한 특성을 보여준다. 저주파수 대역에서는 포항지진 응답스펙트럼의 스펙트럴 가속도 값이 설계스펙트럼보다 작았으며, 고주파수 대역에서는 포항지진의 스펙트럴 가속도 값이 설계스펙트럼보다 큰 것을 확인할 수 있었다.

포항지진에 의한 원자력발전소 구조물의 지진응답을 확인하기 위하여 원자력발전소 격납건물 및 보조건물의 구조모델을 구축하였다. 포항지진에 의한 원자력발전소의 지진응답을 비교하기 위하여 NRC Regulatory Guide 1.60 설계스펙트럼 (0.2 g)을 만족하는 인공지진을 작성하였다. 원자력발전소의 격납건물과 보조건물은 포항지진과 인공지진을 입력으로 하여 지진응답해석을 수행하였다. 입력지진의 특성과 유사하게 고주파수 영역에서 원자력발전소 격납건물 및 보조건물의 포항지진에 의한 층응답스펙트럼이 인공지진에 의한 층응답스펙트럼 보다 스펙트럴 값이 큰 것을 확인할 수 있었으며, 반대로 저주파수 영역에서는 포항지진에 의한 층응답스펙트럼이 인공지진에 의한 층응답스펙트럼의 스펙트럴 값 보다 작은 것을 알 수 있었다. 그리고 고주파수 증폭영향은 층별, 구조물의 형태에 따라 달라 질 수 있음을 확인하였다.

포항지진과 인공지진이 등재해도스펙트럼을 대표한다고 가정하여 보조건물에 위치한 전기기기의 내진성능을 계산하였다. 대상기기는 CPC/CEAC 캐비닛과 MCC 캐비닛을 대상으로 하였다. CPC/CEAC 캐비닛의 경우 내진성능 즉, HCLPF 값이 포항지진의 경우 인공지진의 HCLPF 값 보다 내진성능이 낮았으며, MCC 캐비닛의 경우는 포항지진의 HCLPF 값이 인공지진의 HCLPF 값이 더 높았다. 이는 두 전기기기의 고유진동수가 다르기 때문에 나타난다. 즉 현재 설계스펙트럼은 국내지진동특성을 충분히 반영하지 못하며 입력지진에 따라 원자력발전소의 내진성능이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 국내에 발생한 포항지진으로 전기기기 내진성능을 평가시 내진성능 결과에 영향을 미친다. 따라서 원자력발전소의 확률론적 지진 안

전성 평가는 원자력발전소의 부지고유의 특성을 고려해서 평가가 수행되어야 함을 알 수 있다.

## / 감사의 글 /

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 201715101019 10) 또한 포항지진 자료를 제공해주신 한국지질자원연구원 지진연구센터에 감사드립니다.

## / REFERENCES /

1. Korea Meteorological Administration. Earthquake notification - 2017. 11.15. Official notice. c2017.
2. Central Disaster Safety Measures Headquarters, Press Releases: Recovery cost of Pohang earthquake; c2017 Dec 6.
3. Sursock J. Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide. EPRI Report 3002000709. c2013.
4. US Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. c2014.
5. Choi IK, Kim J, Park J, Kim M, Jeon J. Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting. Seismic Fragility Reevaluation of SSCs in NPP with Site-specific Response Spectrum. May 18-19; Jeju Korea. c2017.
6. Choi IK. Review and Proposal for Seismic Safety Assessment of Nuclear Power Plants Against Beyond Design Basis Earthquake. Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping. 2017;13(1):1-15.
7. The U.S. Geological Survey [Internet]. [cited 2018 Feb 6]. Available from: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/e>
8. Bommer JJ, Martinez-Pereira A. The Effective Duration of Earthquake Strong Motion. Journal of Earthquake Engineering 1999; 3(2):127-172.
9. ASCE. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary. ASCE Standard 4-98, c1999.
10. Lee CH, Park JH, Kim T, Kim SY, Kim DK. Damage Potential Analysis and Earthquake Engineering-related Implications of Sep. 12, 2016 M5.8 Gyeongju Earthquake. EESK J. Earthquake Eng. 2016 Dec;20(7):527-536.
11. XU JIM. Probabilistic Computer Analysis for Rapid Evaluation of Structures. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). c2007.
12. Reed JW, Kennedy RP. Methodology for Developing Seismic Fragilities, EPRI TR-103959. c1994.