

일본 원전 내진설계 기술기준을 적용한 모의지진파(가속도시간이력) 작성

Generation of Design Time History Complying With Japanese Seismic Design Standards for Nuclear Power Plants

진승민^{1)*} · 김용복²⁾ · 이용선³⁾ · 문일환⁴⁾

Gin, Seungmin^{1)*} · Kim, Yongbog²⁾ · Lee, Yongsun³⁾ · Moon, Il Hwan⁴⁾

¹⁾한국전력기술(주) 토건환경기술실 기술원, ²⁾한국전력기술(주) 토건환경기술실 책임기술원, ³⁾한국전력기술(주) 토건환경기술실 주임기술원, ⁴⁾한국전력기술(주) 원자력연구실 주임연구원

¹⁾Junior Engineer Civil, Architectural & Environmental Engineering Department, KEPCO E&C, ²⁾Senior Engineer Civil, Architectural & Environmental Engineering Department, KEPCO E&C, ³⁾Supervisory Engineer Civil, Architectural & Environmental Engineering Department, KEPCO E&C,

⁴⁾Supervisory Researcher, Nuclear Technology Research Department, KEPCO E&C

/ A B S T R A C T /

Seismic designs for Korean nuclear power plants (NPPs) under earthquakes' design basis are noticed due to the recent earthquake events in Korea and Japan. Japan has developed the technologies and experiences of the NPPs through theoretical research and experimental verification with extensively accumulated measurement data. This paper describes the main features of the design-time history complying with the Japanese seismic design standard. Proper seed motions in the earthquake catalog are used to generate one set of design time histories. A magnitude and epicentral distance specify the amplitude envelope function configuring the shape of the earthquake. Cumulative velocity response spectral values of the design time histories are compared and checked to the target response spectra. Spectral accelerations of the time histories and the multiple-damping target response spectra are also checked to exceed. The generated design time histories are input to the reactor building seismic analyses with fixed-base boundary conditions to calculate the seismic responses. Another set of design time histories is generated to comply with Korean seismic design procedures for NPPs and used for seismic input motions to the same reactor containment building seismic analyses. The responses at the dome apex of the building are compared and analyzed. The generated design time histories will be also applied to subsequent seismic analyses of other Korean standard NPP structures.

Key words: Design-time history, Japanese seismic design standard, Seismic analysis, Reactor containment building

1. 서론

후쿠시마 사고와 경주 및 포항지진 이후, 국내외적으로 설계기준을 초과하는 지진(설계초과지진)이 발생하는 경우 원자력발전소의 내진안전성에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 일본은 광범위한 계측기록 데이터의 축적을 바탕으로 이론적인 연구와 실험검증을 통하여 개발된 독자적인 원전 내진설계 기술기준을 실무에 적용하고 있으며, 최근 후쿠시마 사고 이후 중지된 원전을 재가동하기 위해 대폭 상향된 기준지진동(설계기준지진)에 대한 재설계를 수행하고 있다. 이에 따라 한국전력기술은 “해의 내진분석 기술

기준을 적용한 표준형원전 설계초과지진 대응 기술개발” 연구과제의 일환으로 설계기준지진의 수준이 높은 일본의 원전 내진설계기준을 검토하고, 한국 표준형원전 주요구조물에 설계초과지진을 입력하여 한일 양국의 내진설계기준에 따른 지진해석 및 내진설계의 차이점을 분석하고자 한다.

이 논문에서는 표준형원전 주요구조물의 지진해석에 사용하기 위하여 일본의 내진설계 기술기준을 적용한 모의지진파, 즉, 가속도시간이력의 작성 결과를 제시한다. 또한, 개발된 가속도시간이력을 원자로건물 외벽 모델에 적용, 결과를 비교 분석하여 일본 기준과 한국 기준을 각각 적용한 가속도시간이력만의 차이에 의한 지진응답의 결과를 제시한다.

설계초과지진이란 설계기준지진보다 큰 지진을 의미하며, 국내 표준형 원전의 설계기준지진인 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)의 최대지반가속도는 0.2 g로 설정되어 있다. 설계초과지진에 대한 표준형

*Corresponding author: Gin, Seungmin

E-mail: gin2054@kepc0-enc.com

(Received December 31, 2020; Revised February 15, 2021; Accepted February 17, 2021)

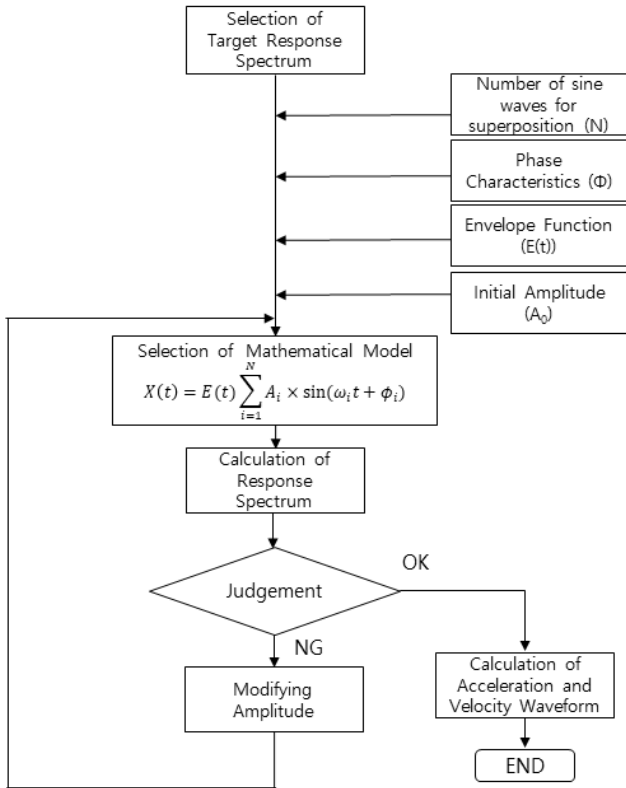


Fig. 1. Flow chart for generation of design time history

원전의 지진해석에 초점이 맞추어져 있는 본 연구에서는 설계초과지진의 최대지반가속도를 0.4 g로 결정하였다.

일본의 내진설계 기술기준으로 일본전기협회에서 발행한 원자력발전 내진설계 기술지침(Japan Electric Association Guide JEAG 4601-2015)[1] 및 원자력발전소 내진설계 기술규정(Japan Electric Association Code, JEAC 4601-2015)[2]이 있다. 원자력발전소 내진설계 기술지침은 일본의 설계기준지진인 기준지진동 결정 요건, 지질/지반조사 및 설계기준을 초과한 지진과 쓰나미의 리스크 정보 등을 고려한 안전성 향상 요건이 제시되어 있으며, 원자력발전소 내진설계 기술규정은 원전 내진설계 기본사항, 내진중요도 분류, 지진해석, 구조물, 기기와 배관계의 내진설계에 관한 사항을 제시하고 있다.

일본 원자력발전소 내진설계 기술지침에 나타나 있는 모의지진파 작성 절차는 Fig. 1과 같으며, 이 절차에 따라 다중감쇠비 가속도시간이력 1세트(2개의 수평방향 및 1개의 수직방향 성분)를 작성하는 방법 및 주요사항에 대해 아래와 같이 기술한다.

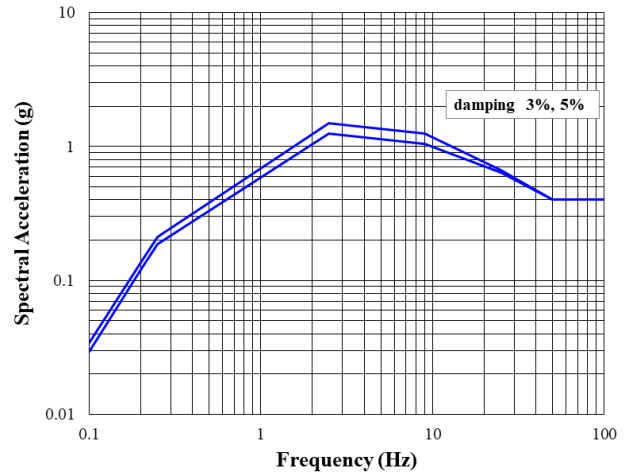
2. 모의지진파 작성

2.1 목표 응답스펙트럼 선정

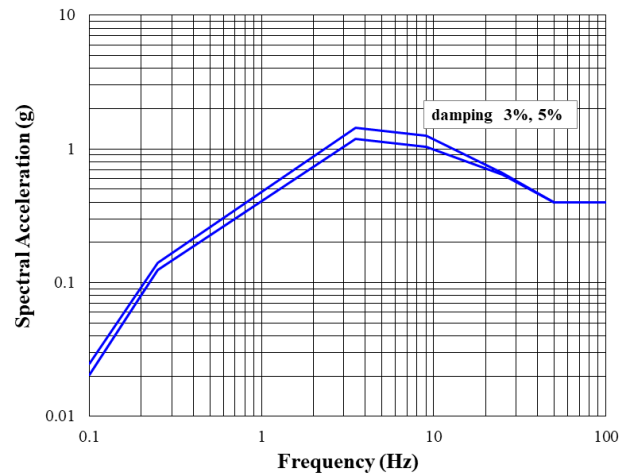
JEAG 4601-2015[1]에 의하면 기준지진동에 대한 수평 및 수직방향의 목표 응답스펙트럼을 정의하고, 이에 포함하는 모의지진파를 작성하여야 한다. 본 연구과제에서 설계초과지진의 목표 응답스펙트럼은 미국 원자력규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Commission, U.S. NRC)의

Table 1. Control points for target response spectra

unit: g	Damping Ratio	0.2 Hz	0.25 Hz	2.5 Hz (3.5 Hz)	9 Hz	25 Hz	50 Hz
Horizontal	3%	0.14	0.21	1.50	1.25	0.66	0.40
	5%	0.12	0.19	1.25	1.04	0.64	0.40
Vertical	3%	0.09	0.14	(1.43)	1.25	0.66	0.40
	5%	0.08	0.12	(1.19)	1.04	0.64	0.40



(a) Horizontal target response spectra for 3% and 5% damping ratios



(b) Vertical target response spectra for 3% and 5% damping ratios

Fig. 2. Target response spectra

Regulatory Guide 1.60[3] 표준설계응답스펙트럼을 기반으로, 통제진동수 25 Hz를 추가적으로 고려하여 고진동수 영역을 보강한 스펙트럼이다. 즉, 통제진동수 0.25 Hz, 25 Hz 및 9 Hz에서 목표 응답스펙트럼 값은 U.S. NRC Regulatory Guide 1.60[3]의 표준설계응답스펙트럼과 같게 되고, 9 Hz 이상에서는 다음과 같은 방법을 사용하여 고진동수 구간을 보강한다.

(a) 진동수 25 Hz에서 U.S. NRC Regulatory Guide 1.60 응답스펙트럼을 1.3의 비로 증가시킨다.

(b) 대수(log)축 상에서 U.S. NRC Regulatory Guide 1.60 응답스펙트럼의 9 Hz에서부터 증폭시킨 응답스펙트럼의 25 Hz까지 직선으로 연결시킨다.

(c) 대수(log)축 상에서 증폭시킨 응답스펙트럼의 25 Hz부터 최대지반가속도가 나타나는 진동수 50 Hz까지 직선으로 연결시킨다.

마찬가지로 수직방향 목표 응답스펙트럼은 저진동수에서 U.S. NRC Regulatory Guide 1.60의 수직방향 표준설계응답스펙트럼을 기준으로 하며, 고진동수에서는 수평방향 목표 응답스펙트럼의 절차와 동일한 방법으로 증가시킨다.

본 연구과제에서 수행되는 지진해석은 일본 원전부지를 대상으로 하지 않으므로, 상기에 기술된 목표 응답스펙트럼은 국내 최신형 원전 표준설계에 적용되는 형상이며, 일본 내진설계 기술지침과는 무관하다.

한편, JEAG 4601-2015[1]에는 5% 감쇠비를 기준으로 모의지진파의 작성 및 평가 방법이 기술되어 있으며, 필요에 따라 5% 이외의 감쇠비를 고려할 수 있다. 본 연구과제의 내진해석 대상인, 국내 표준형원전의 원자로 건물 외벽은 프리스트레스트 콘크리트이며, 원자로건물 내부구조물 및 보조건물은 철근콘크리트 구조물이다. 그러므로 JEAC 4601-2015[2]의 감쇠평가 방법에 따라 응답스펙트럼 검토를 위해 요구되는 감쇠비는 3% 및 5%이며, 이 감쇠비를 적용하여 모의지진파를 작성한다.

상기와 같이 설정된 설계초과지진의 수평방향 및 수직방향에 대한 3% 및 5% 감쇠비 목표 응답스펙트럼의 통제 진동수에 대한 스펙트럼가속도 값을 Table 1에 정리하였으며, 대수(log)축으로 작성한 스펙트럼 형상은 Fig. 2와 같다.

2.2 진폭포락선

모의지진파는 정현파(사인파)의 중첩에 의해 작성할 수 있으며, 파형 $X(t)$ 는 식(1)과 같다. 위상각을 취하는 방법에 따라, (a) 위상각을 균일 난수로 주어 진폭포락선을 이용하는 방법, (b) 실제 지진의 위상각을 이용하는 방법, (c) 위상각 위상 차이를 주는 방법이 있다. 본 논문에서는 실제 지진의 위상각을 이용하는 방법과 진폭포락선, $E(t)$ 를 조합하여 작성하였다.

$$X(t) = E(t) \sum_{i=1}^N A(\omega_i) \times \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

여기서, $E(t)$ 는 진폭 포락선, N 은 $A(\omega_i)$ 의 중첩 개수, ω_i 는 각진동수, $A(\omega_i)$ 는 각진동수 성분의 진폭, ϕ_i 는 위상각이다.

본 연구과제에서 대상 부지의 정보에 따라 원전 부지의 단층과의 거리는 150 km, 지진의 규모는 7.0을 가정하였다. JEAG 4601-2015[1]에 기술된 방법으로 거리 및 규모를 이용하여 등가진원거리를 산정할 수 있으며, 등가진원거리는 50 km (중거리)로 계산된다. 등가진원거리는 진원특성 및 거리 등을 통계처리한 것으로, 규모와 함께 일본의 지진동 특성을 평가하는 경험적 방법에 해당한다. 등가진원거리(X_{eq})의 산정 방법은 식(2)와 같다.

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\int e_m X_m^{-2} ds}{\int e_m ds} \quad (2)$$

여기서, X_m 은 관측점에서 단층면의 각 미소영역 m 의 거리(km), e_m 은 단

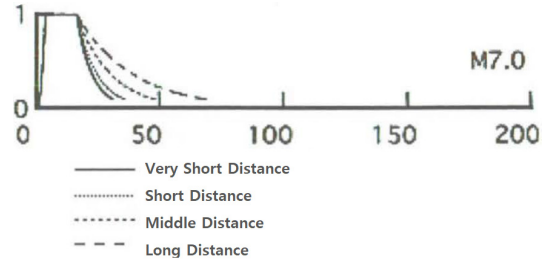


Fig. 3. Total duration time of amplitude envelope function for magnitude 7.0 (JEAG 4601-2015)

Table 2. Values of time characteristic for amplitude envelope function

	t_b	t_c	t_d
Time (sec)	3.7	16.3	50

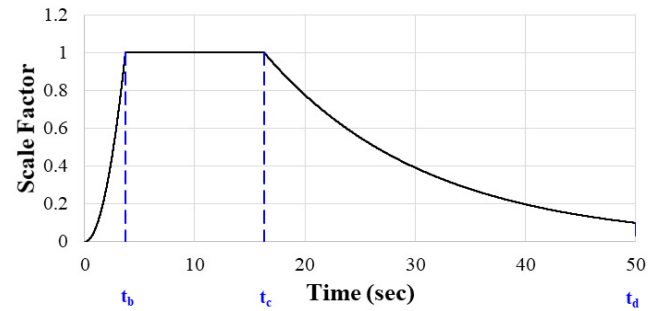


Fig. 4. Amplitude envelope function according to time characteristic

층면의 각 미소영역 m 에서의 지진파 에너지의 상대적인 방출 분포, ds 는 단층면의 미소영역 m 의 면적(km^2)을 의미한다.

등가진원거리와 규모를 바탕으로 모의지진파의 총 지속시간을 결정할 수 있는데, Fig. 3에 나타난 JEAG 4601-2015의 도표를 이용하면 총 지속시간은 50초로 결정된다. 또한, 진폭포락선 작성에 필요한 구간별 시간은 규모 7.0, 등가진원거리 50 km를 이용하여 식(3) 및 식(4)를 이용하여 계산한다. 지속시간 50초를 갖는 진폭포락선의 각 구간별 시간 특성은 Table 2에 기술하였으며, 진폭포락선의 형상은 Fig. 4와 같다.

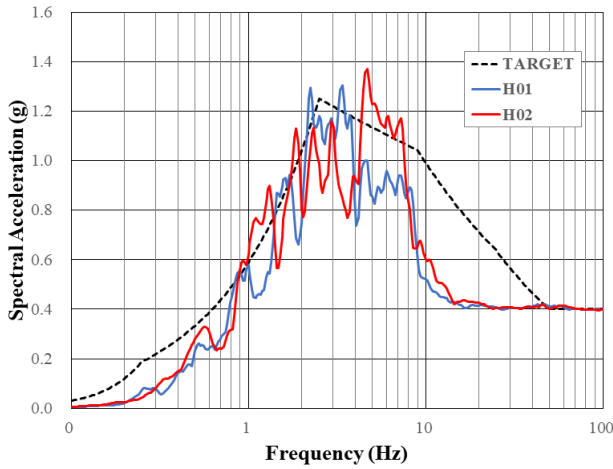
$$\begin{aligned} E(t) &= (t/t_b)^2 & (0 < t \leq t_b) \\ E(t) &= 1 & (t_b < t \leq t_c) \\ E(t) &= e^{\frac{\ln(0.1)}{t_c - t_d}(t - t_c)} & (t_c < t \leq t_d) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} t_b &= 10^{0.5M - 2.93} \\ t_c - t_b &= 10^{0.3M - 1.0} \\ t_d - t_c &= 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} \end{aligned} \quad (4)$$

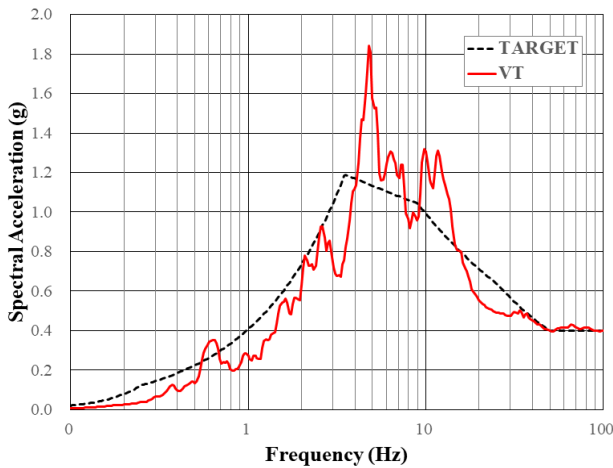
여기서, t 는 시간, M 은 규모, X_{eq} 는 등가진원거리를 나타낸다.

2.3 Seed Motion 선정

설계초과지진 목표 응답스펙트럼에 부합하는 모의지진파를 작성하기



(a) Horizontal response spectra for 5% damping ratio



(b) Vertical response spectrum for 5% damping ratio

Fig. 5. Northridge earthquake horizontal and vertical response spectra scaled to 0.4 g

Table 3. Information of seed motion

Earthquake	Mag.	Station	Closest Distance
Northridge	6.7	West Covina-S Avenue	54.1 km

위해 NUREG/CR-6728[4] Appendix B에 기술된 실제 기록지진 중 하나를 선정하여 seed motion으로 사용하였다. Seed motion이란, 가속도시간 이력 작성을 위해 실제 기록지진을 이용하여 수정하는 경우, 사용된 실제 기록지진을 말한다. 즉, 목표 응답스펙트럼과 NUREG/CR-6728 Appendix B에 수록된 실제 기록지진의 가속도 응답스펙트럼이 유사한 기록지진을 seed motion으로 선택한다(Fig. 5 참조).

Seed motion은 1994년 1월 17일 California에서 발생, 1307 South Orange Avenue, West Covina에서 기록된 규모 6.7의 Northridge 지진을 사용하였으며, Seed motion의 정보는 Table 3에 기술하였다. 사용된 기록지진은 2개의 수평방향(N45W, S45W), 1개의 수직방향(UP)으로 나누어져 있다. 수평방향 N45W, S45W의 기록지진은 각각 H01, H02으로, 수직방향 UP은 VT로 명명한다. 0.4 g로 스케일 조정된 목표 응답스펙트럼과 seed motion의 5% 감쇠비에 대한 가속도 응답스펙트럼의 비교한 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

2.4 모의지진파의 적합성 검토 방법

일본 JEAG 4601-2015[1]의 참고자료 1-15에 따라 작성된 모의지진파의 적합성 검토는 모의지진파의 속도 응답스펙트럼과 목표 속도 응답스펙트럼의 비율($R(T)$) 및 강도(Strength Intensity, SI) 비율을 통해 판정한다. 이때 사용되는 속도 응답스펙트럼의 감쇠비는 5%로 하며, 일본원자력학회의 권고에 따라 5% 이외의 목표로 하는 응답스펙트럼에 대한 적합성 검토는 5%와 동일한 방법으로 한다. 그러므로 작성된 모의지진파의 3% 감쇠비에 대한 속도 응답스펙트럼 또한 5% 감쇠비와 동일한 방법으로 판정한다.

$R(T)$ 는 식 (5)를 통해 계산될 수 있으며, 식 (5)는 모의지진파로부터 계산된 속도 응답스펙트럼과 목표 속도 응답스펙트럼의 주기(또는 진동수)별로 계산된 비율을 의미한다. $R(T)$ 의 최소값은 0.85(즉, 속도 응답스펙트럼의 최소값은 목표 응답스펙트럼의 85%)이며, 주기 0.02초 이상(진동수 50 Hz 이하) 범위에서 만족해야 한다.

$$R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T) \quad (5)$$

여기서, T 는 주기, S_{v1} 은 모의지진파의 속도 응답스펙트럼이며, S_{v2} 는 목표 속도 응답스펙트럼이다.

SI란 모의지진파의 속도 응답스펙트럼의 주기에 대한 적분 값으로 표현되며, 이때 적분 범위는 0.1~2.5초(0.4~10 Hz)이다. SI 비율은 작성된 모의지진파의 속도 응답스펙트럼의 적분 값에 대한 목표 속도 응답스펙트럼의 적분 값을 의미하며, 이 값은 1보다 커야 한다(식 (6) 참조).

$$SI = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_{v1}(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} S_{v2}(T) dt} \geq 1.0 \quad (6)$$

위의 판정조건을 만족하지 않는 경우에는 가속도시간이력에 적절한 보정을 실시하고, 판정조건을 만족할 때까지 반복한다.

2.5 모의지진파 작성 및 결과

3방향 성분으로 구성된 1세트의 가속도시간이력은 50.0초의 지속시간 및 0.005초의 시간간격을 가지며, 최대지반가속도는 1.0 g로 정규화하여 작성하였다. 작성된 3방향의 가속도, 속도, 변위 시간이력은 Fig. 6과 같다.

보정작업은 2.4절의 적합성 검토 결과를 만족할 때까지 실시하며, 컴퓨터 프로그램 OPTIME[5]을 이용하였다. OPTIME은 Lihanand and Tseng [6, 7]의 시간영역에서 다중 설계감쇠비의 응답스펙트럼에 부합하는 가속도시간이력을 작성하는 방법을 개선하였으며, U.S. NRC Standard Review Plan 3.7.1[8]의 기준이 적용된 프로그램이다.

속도 응답스펙트럼 값을 계산하는 진동수는 0.1 Hz부터 각 10배 범위로, 즉, 0.1 Hz~1 Hz, 1 Hz~10 Hz, 10 Hz~100 Hz 각 범위마다 대수축 상에서 동일한 간격으로 100개씩 고려하였으며, 0.1 Hz부터 100 Hz까지 총 301개의 진동수를 사용하였다.

보정작업이 완료된 모의지진파의 3% 및 5% 감쇠비 속도 응답스펙트럼과 목표 속도 응답스펙트럼의 비교 그래프를 Fig. 7에 나타내었으며, 2.4절

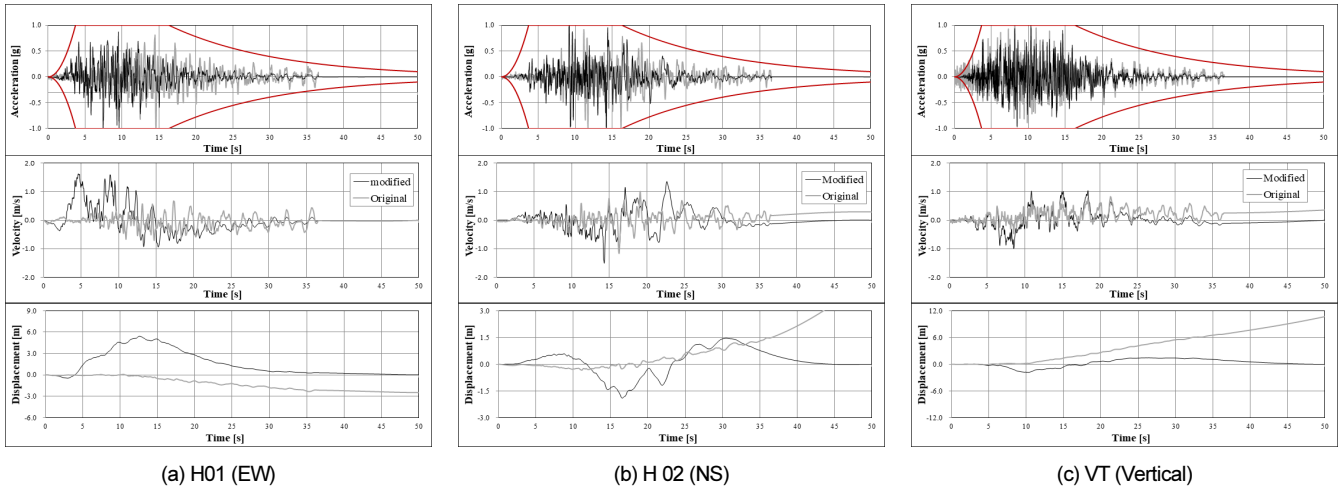
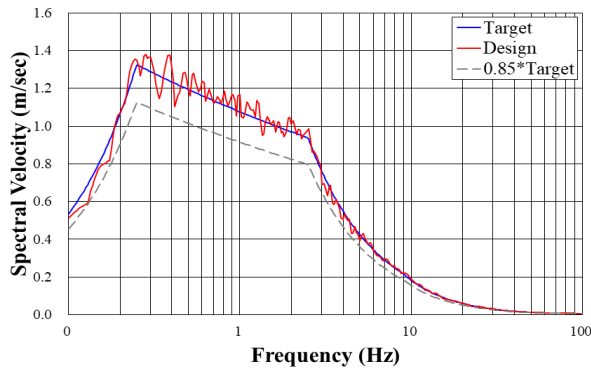
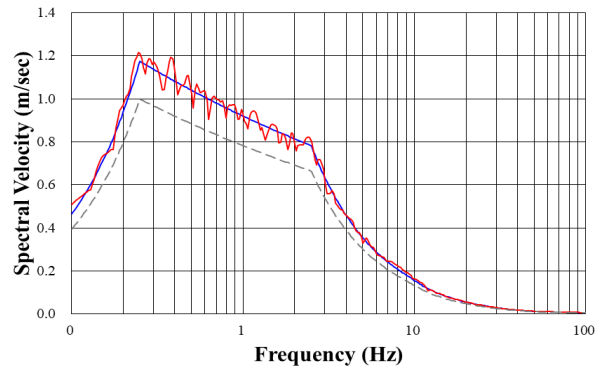


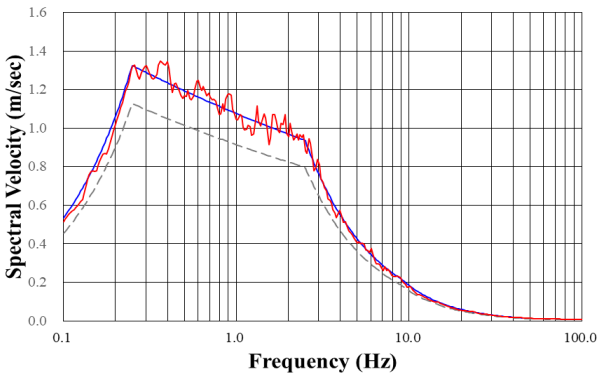
Fig. 6. Acceleration, velocity and displacement time histories



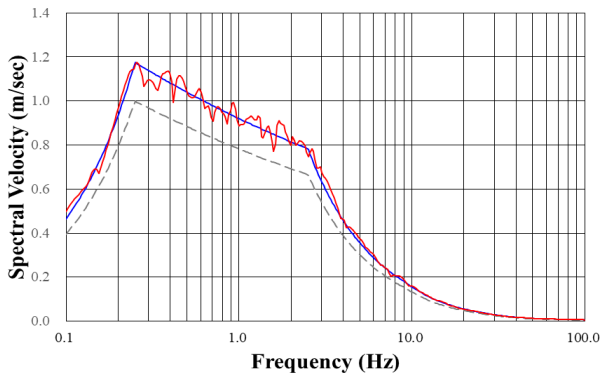
(a) H01 (EW) velocity response spectra for 3% damping ratio



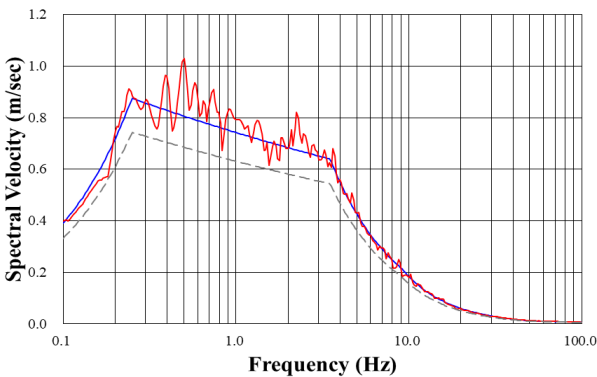
(b) H01 (EW) velocity response spectra for 5% damping ratio



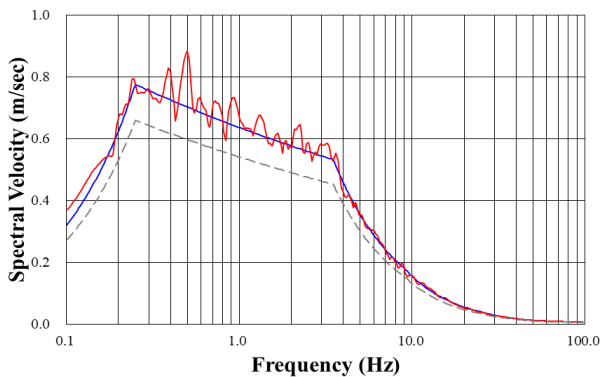
(c) H02 (NS) velocity response spectra for 3% damping ratio



(d) H02 (NS) velocity response spectra for 5% damping ratio



(e) VT velocity response spectrum for 3% damping ratio



(f) VT velocity response spectra for 5% damping ratio

Fig. 7. Comparison of the design velocity response spectra and target velocity response spectra

Table 4. Ratio of velocity response spectrum from design time history and target response spectrum

Damping Value	Minimum Percentage (%)		
	H01 (EW)	H02 (NS)	VT
3%	85.86	90.02	86.23
5%	90.55	90.96	88.73

Table 5. Strength intensity ratio of the velocity response spectrum

Damping Value	Ratio		
	H01 (EW)	H02 (NS)	VT
3%	1.012	1.004	1.045
5%	1.002	1.015	1.034

에 기술된 요건에 따라 작성된 모의지진파의 적합성을 판정하였다. 모의지진파의 속도 응답스펙트럼과 목표 속도 응답스펙트럼의 비율 및 속도 응답스펙트럼의 강도 비율을 각각 Table 4 및 Table 5에 정리하였다.

Fig. 7을 통해 모의지진파의 속도 응답스펙트럼 값이 목표 속도 응답스펙트럼의 85%를 초과하는 것을 알 수 있으며, Table 4에 정리된 모의지진파의 속도 응답스펙트럼과 목표 속도 응답스펙트럼 비율의 최소값으로부터 6개의 Case (3% 및 5% 감쇠비, 3방향) 모두 85%를 초과함을 알 수 있다. Table 5에 정리된 모의지진파의 속도 응답스펙트럼과 목표 속도 응답스펙트럼의 강도 비율과 같이 모든 검토 결과가 기준값 1을 상회하는 것을 알 수 있다. 따라서 적합성 검토 결과, 속도 응답스펙트럼의 비율 및 강도 비율이 JEAG 4601-2015의 요건을 모두 만족한다. 3방향 성분의 가속도시간이력은 동서방향, 남북방향 및 수직방향의 입력 지반운동으로 적용된다.

2.6 원자로건물 외벽 지진해석 결과

일본 내진설계 기술기준이 적용된 모의지진파를 원자로건물 외벽 구조물에 입력운동으로 가하여 응답을 확인하였다. 내진해석을 위한 구조물 모델은 3차원 유한요소로 모델링 되었으며, Fig. 8과 같다. 구조물은 기초와 내부구조물이 생략된 원자로건물의 외벽만 고려되었으며, 고유진동수는 수평방향 4.5 Hz, 수직방향 12.2 Hz이다. 내진해석은 구조물의 최하단에 가속도시간이력을 입력하여 고정지반(fixed-base) 시간이력해석을 수행하고, 구조물의 최상부 돔(Dome)에서 동서방향, 남북방향 및 수직방향의

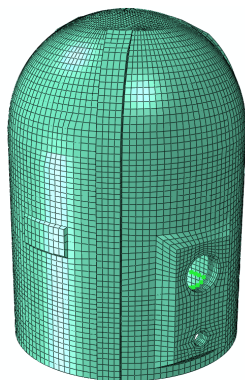
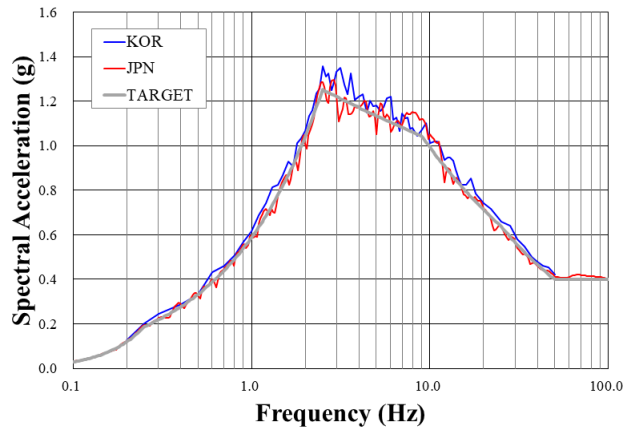


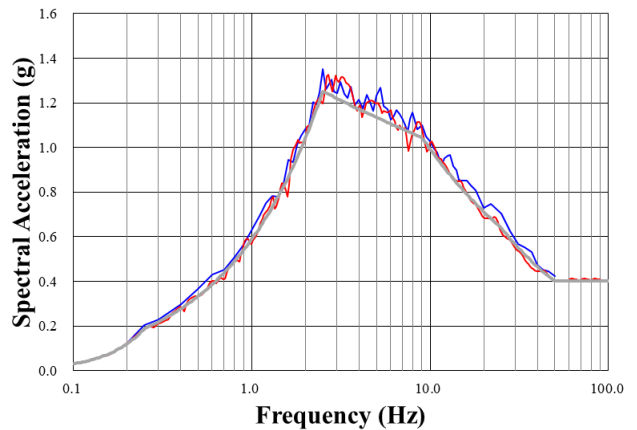
Fig. 8. 3D FEM reactor containment building

응답 시간이력을 산출하여, 5% 감쇠비를 적용한 구조물 내 응답스펙트럼 (In-Structure Response Spectrum, ISRS)을 계산하였다.

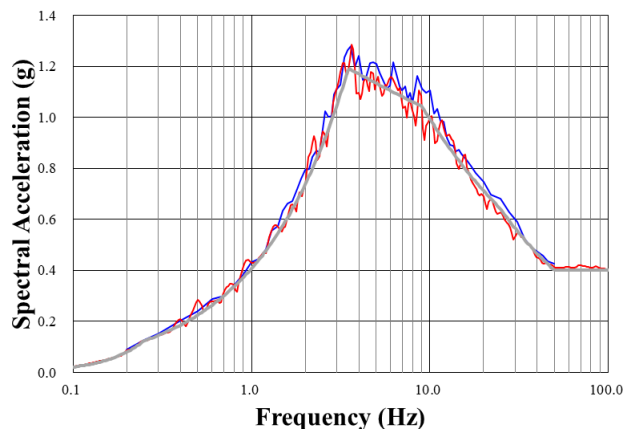
일본 기준을 적용한 지진응답의 확인과 더불어, 한국 기준에 의한 지진 응답을 비교하기 위하여, 동일한 기록지진 및 목표 응답스펙트럼을 이용하여 한국 내진설계 기술기준이 적용된 가속도시간이력 1 세트를 작성하였다. 일본 기준이 적용된 모의지진파의 가속도 응답스펙트럼과 한국 기준이 적용된 가속도시간이력의 가속도 응답스펙트럼을 Fig. 9에 비교하였다. 한



(a) H01 (EW) response spectra for 5% damping ratio

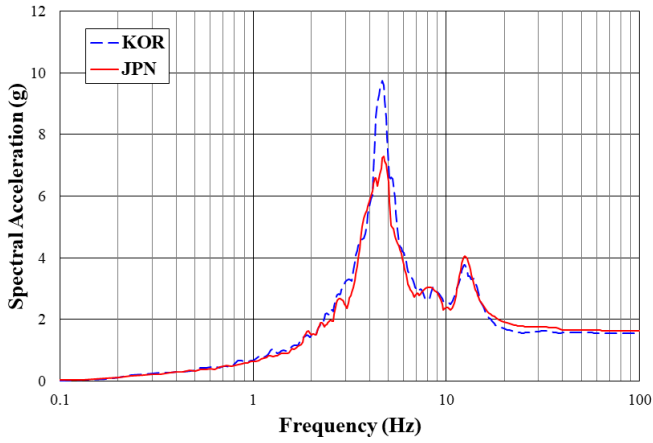


(b) H02 (NS) response spectra for 5% damping ratio

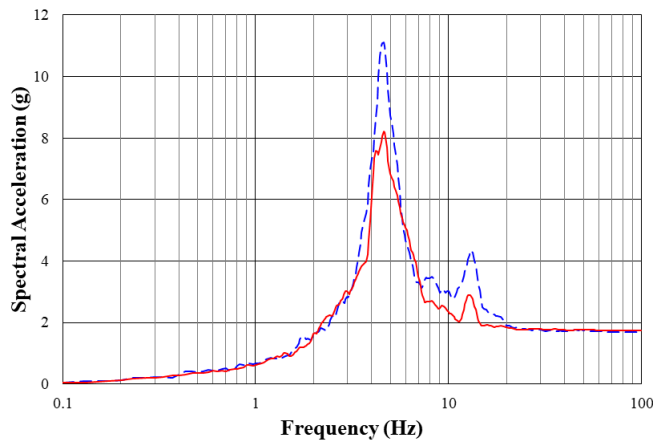


(c) VT response spectra for 5% damping ratio

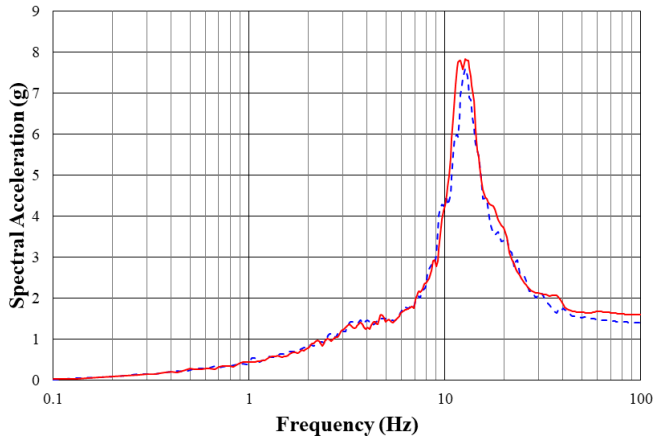
Fig. 9. Comparison of response spectra obtained from Japanese and Korean seismic standards



(a) H01 (EW) ISRS for 5% damping ratio



(b) H02 (NS) ISRS for 5% damping ratio

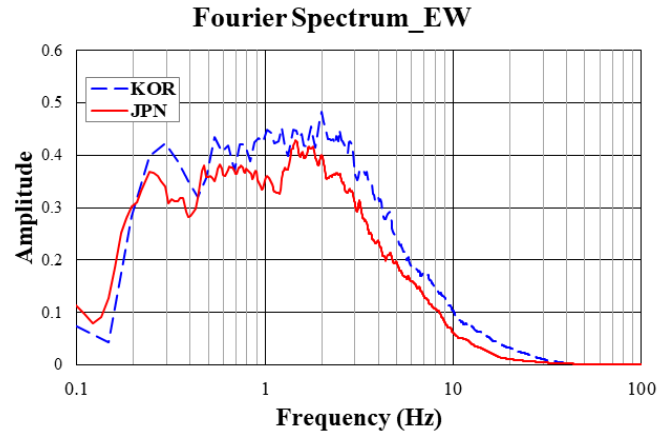


(c) VT ISRS for 5% damping ratio

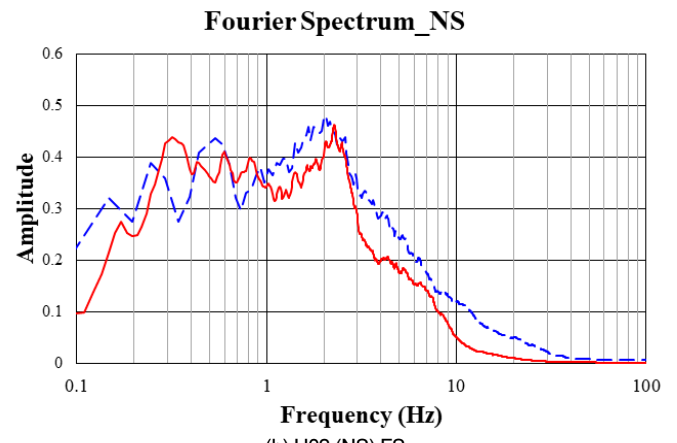
Fig. 10. Comparison of In-structure response spectra obtained from Japanese and Korean seismic design standards

Table 6. Maximum response acceleration values (g)

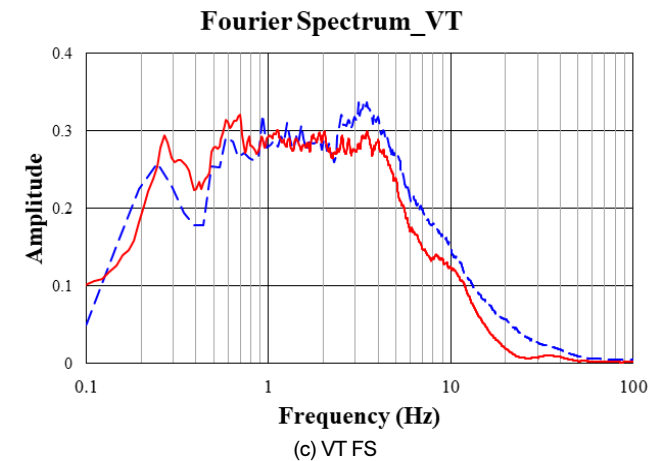
	KOREA	JAPAN
H01 (EW)	1.56	1.64
H02 (NS)	1.67	1.74
VT	1.40	1.59



(a) H01 (EW) FS



(b) H02 (NS) FS



(c) VT FS

Fig. 11. Comparison of Fourier spectrum (FS) obtained from Japanese and Korean seismic standards

Table 7. Amplitude values of Fourier spectrum for frequency obtained from peak value

	Frequency (Hz)	KOR	JPN
H01 (EW)	4.40	0.278	0.202
H02 (NS)	4.47	0.280	0.201
VT	12.2	0.113	0.094

Table 8. Ratio of In-Structure response spectrum to Fourier spectrum

	Frequency (Hz)	Ratio (ISRS/FS)	
		KOR	JPN
H01 (EW)	4.40	32.48	31.36
H02 (NS)	4.47	39.34	39.19
VT	12.2	65.10	80.30

국 기준의 다중감쇠비 가속도시간이력 작성방법을 요약하면 다음과 같으며, 상세 사항은 경수로형 원전 안전심사지침 3.7.1 절[9]에 기술되어 있다.

- (a) 지진응답해석에 사용된 모든 감쇠값에서 응답스펙트럼을 포괄해야 하며, 설계스펙트럼보다 작게 되는 진동수가 5 점 이하이고, 작은 정도가 10% 이내인 경우 포괄한다고 간주 된다.
- (b) 허용 가능한 최소 강진운동지속시간 6.0 초이다.
- (c) 방향 성별별 상호상관계수 0.16을 초과하지 않아야 한다.
- (d) 주요 진동수 범위에서, 최소 목표 파워스펙트럼 밀도 함수를 포괄해야 한다.

Fig. 10에 일본 기준을 적용한 모의지진파와 한국 기준을 적용한 가속도시간이력을 사용하여 고정기초 조건에서 원자로건물 외벽을 대상으로 모드중첩 시간이력해석을 수행한 후 얻어진 구조물 내 응답스펙트럼의 비교 결과를 나타내었다. 수평방향으로 최대값이 발생하는 진동수에서 한국 기준을 적용한 결과가 일본 기준을 적용한 결과값 보다 더 크게 나타났다. 동서방향의 해석결과 4.4 Hz에서 30%, 남북방향의 해석결과 4.47 Hz에서 28.3% 차이를 보인다. 수직방향의 구조물 내 응답스펙트럼은 한국 기준과 일본 기준이 유사한 결과를 보이며, 일부 진동수구간에서 일본 기준이 한국 기준을 약간 상회한다. 3방향에 대한 구조물 응답의 최대가속도를 Table 6에 정리하였으며, 동서방향의 경우 5.0%, 남북방향의 경우 3.38% 그리고 수직방향의 경우 13.96% 차이를 보이며, 일본 기준을 적용한 결과가 더 크게 나타났다.

Fig. 11은 작성한 일본 기준을 적용한 모의지진파와 한국 기준이 적용된 가속도시간이력의 푸리에 스펙트럼을 비교한 그래프이며, 원자력분야에서 사용하는 파워스펙트럼 밀도 함수의 검토 방법에 따라 특정 진동수에서 ±20%의 이동평균으로 평활화한 값으로 나타내었다. 구조물 내 응답스펙트럼의 최대응답이 발생한 진동수에서 푸리에 스펙트럼의 진폭 값을 Table 7에 정리하였으며, 구조물 내 스펙트럼 값 대비 푸리에 스펙트럼의 비교 값을 Table 8에 정리하였다.

3. 결론

이 논문에서는 사례 연구를 통해 일본의 내진설계 기술기준에 따라 모의지진파를 작성하는 절차와 결과를 제시하였다. 또한, 작성된 모의지진파를 원자로건물 외벽에 적용, 고정기초 해석을 수행하여 얻어진 구조물 내 응답스펙트럼을 비교하였다. 본 연구의 수행 결과는 다음과 같다.

- (a) 일본의 내진설계 기술기준을 검토하여 적합성을 만족하는 다중 감쇠비

의 가속도시간이력 1세트(2개의 수평방향, 1개의 수직방향 성분)를 작성하였다. 모의지진파는 규모와 등가진원거리를 이용하여 총 지속시간 및 진폭포락선이 갖는 시간 특성을 계산할 수 있으며, 진폭포락선은 위상각과 조합하여 가속도시간이력을 작성하게 된다.

- (b) 모의지진파의 적합성 검토방법은 속도 응답스펙트럼을 이용하며, 속도 응답스펙트럼의 비율 및 속도 응답스펙트럼 적분값의 비율을 비교한다. 스펙트럼 계산 시 요구되는 진동수는 충분히 많은 개수가 선택되어야 하며, 본 논문에서는 301개의 진동수를 사용하였다. 일본 내진설계 기술기준과 비교하여 한국의 내진설계 기술기준 요건은, 다중감쇠비 시간이력 작성 시 응답스펙트럼 계산을 위해 50 Hz까지 최소 81개의 진동수가 요구되며, 파워스펙트럼 밀도 함수 포괄요건 등 추가적인 요건을 만족시켜야 하는 차이가 있다.
- (c) 원자로건물 외벽을 모델링하여 작성된 모의지진파를 이용한 내진해석을 수행하였다. 응답의 결과를 비교하기 위해 동일한 기록지진과 목표 응답스펙트럼을 이용하여 한국 기준이 적용된 가속도시간이력을 작성하여 내진해석을 수행하였다.
- (d) 일본 기준과 한국 기준을 적용한 입력지반운동에 대한 내진해석 결과, 수평방향의 경우 한국 기준을 적용한 경우가 구조물의 고유진동수 위치에서 더 큰 응답을 보였으며, 수직방향의 경우 유사한 결과를 보이지만 일본 기준이 약간 상회한다.
- (e) 수평방향의 구조물 내 응답스펙트럼의 결과는 푸리에 스펙트럼과 관련이 있으며, 구조물의 고유진동수에서 구조물 내 응답스펙트럼 대비 푸리에 스펙트럼 진폭의 값이 유사함을 보인다. 수직방향의 경우, 입력운동의 푸리에스펙트럼 값은 10 Hz 이후 현저한 감소를 보이며, 구조물 내 응답스펙트럼에 영향을 적게 주는 것으로 볼 수 있다.
- (f) 수평방향과 수직방향의 결과는 상이한 결과를 보이며, 입력운동의 특성으로 볼 수 있다. 하지만, 본 연구에서 수행한 내진해석 대상 구조물인 원자로건물 외벽은 다른 주요구조물보다 상대적으로 단순 거동을 하는 모델이므로, 일본 기준을 적용한 모의지진파와 한국 기준을 적용한 가속도시간이력의 비교를 위해 보다 복잡한 구조물의 내진해석 결과 검토가 요구된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 한국에너지기술평가원(KETEP) 지원에 의해 수행되었음 (No. 20193110100020).

/ REFERENCES /

1. Japan Electric Association, Japan Electric Association Guide 4601-2015, Technical Guidelines for Seismic Design of Nuclear Power Plants, c2015.
2. Japan Electric Association, Japan Electric Association Code 4601-2015, Technical Code for Seismic Design of Nuclear Power Plants, c2015.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants.

- c2014.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6728, Technical Basis for Revision of Regulatory Guidance on Design Ground Motions: Hazard-and Risk-consistent Ground Motion Spectra Guidelines, c2001.
 5. KEPCO E&C, Computer Program OPTIME User Manual, c2002.
 6. Lihanand K, Tseng WS, Generation of Synthetic Time Histories Compatible with Multiple Damping Design Response Spectra, SMiRT-9, Lausanne, K2/10, c1987.
 7. Lihanand K, Tseng WS, Development and Application of Realistic Earthquake Time Histories Compatible with Multiple Damping Design Spectra, Proc. 9th WCEE, Vol. II, c1988.
 8. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan 3.7.1, Seismic Design Parameters, c2014.
 9. KINS, Safety Reveiw Guidelines for Light Water Reactors 3.7.1, Seismic Design Parameters, c2014.