

이중 수정함수 적용을 통한 설계응답스펙트럼 포괄 인공지진파의 생성

박 건* · 홍기남** · 한상훈*** · 김재석****

Park, Gun* · Hong, Ki Nam** · Han, Sang Hoon*** · Kim, Jae Suk****

Generation of Artificial Time History Covering Design Response Spectrum by Two Modification Functions

ABSTRACT

The domestic and foreign seismic design codes have specified that time history covers design response spectrum when the response spectrum, which calculated from the time history, is smaller than the design response spectrum at five points or less. In order to verify the design codes, time history analysis for a pier was performed by using five artificial time histories conforming design code with various characteristics and its member forces were evaluated according to them. It was confirmed from analysis results that, regardless of the conformity to design code requirement, seismic design using the artificial time histories could not guarantee earthquake resistant design if the response spectrum from them is lower than design response spectrum at the similar period to the natural frequency of structure. Thus, the time history generating method to make its acceleration response spectrum to be greater than design response spectrum at all period was proposed by two modification function in this study. It was also verified whether time histories from the proposed method satisfy the seismic design codes or not.

Key words : Artificial time history, Design response spectrum, Seismic design, Modification function

초 록

현 국내·외의 설계기준들은 인공지진파에 의해 계산된 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼보다 작은 값의 수가 5개 이내일 경우 설계응답스펙트럼을 포괄 한다고 규정하고 있다. 현 설계의 문제점을 확인하기 위하여 설계기준을 만족하는 5개의 각기 다른 특성을 가진 인공지진파를 사용하여 교각에 대한 시간이력해석을 수행하고, 부재력을 정량적으로 평가하였다. 설계기준을 만족하는 인공지진파일지라도 구조물의 고유주기와 유사한 주기에서 계산된 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼보다 작을 경우 시간이력해석을 통한 내진의 안전성을 확보하지 못함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 스펙트럼 가속도 값이 설계응답스펙트럼보다 모든 주기에서 큰 값을 갖는 인공지진파를 생성하는 기법을 이중 수정함수를 적용하여 제안하였다. 또한 제안된 기법에 의해 작성된 인공지진파가 국내·외의 기준들의 적합성을 만족하는지 검토하였다.

검색어 : 인공지진파, 설계응답스펙트럼, 내진설계, 수정함수

1. 서론

우리나라는 1972년 원자력구조물에 내진설계가 도입된 이후, 1988년 건축물, 1991년 고속철도, 1992년 도로교량, 1993년 댐 등에 지진하중을 고려하였고, 일부 기타 구조물에도 지진하중을 고려하고 있다. 그러나 교량이나 건축물 등의 일부 구조물을 제외하고는

* 중신회원 · (주)에스디이엔지 과장, 박사과정 (SDENG Ltd. · silvist@sdeng.net)

** 교신저자 · 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Chungbuk National University · hong@chungbuk.ac.kr)

*** 중신회원 · 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Chungbuk National University · shhan@chungbuk.ac.kr)

**** 정회원 · (주)에스디이엔지 대표이사, 공학박사 (SDENG Ltd. · jskim@sdeng.net)

Received July 9, 2015/ revised September 21, 2015/ accepted December 30, 2015

실제로 정확한 내진설계기준이 정해진 상태는 아니며 일부 내진설계를 실시하고 있는 구조물의 경우에도 우리나라의 지진특성을 고려한 내진설계기준이 없어 외국의 기준을 차용하여 사용하고 있기 때문에 내진설계 기준이 단편적이고 체계적인 구성을 갖추고 있지 못한 실정이다(National disaster management institute, 1998). 현행 내진기준의 입력지진하중 산정 방법 중 가장 널리 사용되고 있는 것이 지진하중을 등가의 정적수평하중으로 산정하여 계산하는 등가정적해석법(Equivalent Static Load Analysis)이다. 그러나 등가정적해석법은 비정형성이 심한 건물에는 사용하기 어려우며, 높이 72m를 초과하는 건물에는 고진동모드에 의한 영향이 증가하므로 적용할 수 없다는 한계가 있다(Lee et al., 1999). 따라서 등가정적해석법을 적용할 수 없는 구조물에 대해서는 동적해석법이 사용된다. 동적해석법은 입력하중의 형태에 따라 응답스펙트럼해석과 실제지진기록을 이용한 시간이력해석으로 구분할 수 있다. 특히, 구조물의 형상이 비정형으로 복잡하거나 고층건물과 같이 지진 위험성이 큰 구조물에는 시간이력해석법을 이용한 비탄성 응답의 결과로 지진에 대한 안전성을 평가하고 있다. 그러나 우리나라는 설계용 지진, 즉 기록된 지진지반운동이 거의 없어 설계용 응답스펙트럼과 유사한 지진이력하중을 구하기가 매우 힘든 실정이다(Lee et al., 1999). 인공 가속도시간이력은 1970년대 중반까지는 진동수영역에서 응답스펙트럼을 조정하는 방법을 사용하여 작성되었으나, 1970년대 후반에 Kaul (1978)이 시간영역에서 가속도시간이력의 응답스펙트럼을 조정하는 방법을 개발함으로써 설계응답스펙트럼에 보다 접근된 가속도시간이력을 작성할 수 있게 되었다. 그 이후에도 이 분야에 대한 지속적인 연구가 이루어졌다. 1980년대 후반에 Lilhanand and Tseng (1988) 등은 서로 다른 두 감쇠율을 동시에 만족시키는 설계응답스펙트럼을 작성하는 기법을 제안하였다. 또한 Choi and Lee (2003)은 충격응답합수에 보정계수를 적용하여 다중 감쇠를 포괄하는 인공지능파를 작성할 수 있는 방법을 제안하였다. 한편 Lilhanand and Tseng (1988) 등이 제안한 방법은 두개 이상의 감쇠율에 대해 설계응답스펙트럼을 동시에 만족시키지 못하는 것으로 보고되었다(Park and Chung, 2007).

도로교 설계기준(Ministry of land, transport and maritime affairs, 2010) 및 전력산업기술기준(Korea electric association, 2005)에서는 인공지능파로 작성된 응답스펙트럼 값이 설계지반 응답스펙트럼 값보다 작은 주기의 수는 5점 이하이고 낮은 정도는 10%이내에 있으면 그 인공지능파는 사용 가능한 것으로 규정하고 있다. 그러나 이 규정에 대한 유효성을 검증한 연구는 아직까지 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 도로교 설계기준과 전력산업기술에서 제시하는 유효 지진파 선별 조건의 신뢰성을 교각의 시간이력해석

을 통하여 검증하였다. 또한 인공지능파의 응답스펙트럼 값이 설계지반 응답스펙트럼 값보다 모든 주기에서 큰 값을 가지도록 계산되는 새로운 기법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 방법에 의해 수정된 인공지능파가 국내·외의 다양한 설계기준들에서 제안하고 있는 적합성을 만족하는지에 관하여도 검토되었다.

2. 현 설계기준의 문제점

전술한 바와 같이 국내의 도로교 설계기준(2010) 및 KEPIC STB (2005)은 인공지능파의 응답스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값보다 작은 주기가 5점 이하이면 설계응답스펙트럼을 포괄한다고 명시하고 있다. 그러나 설계응답스펙트럼을 만족하지 않아도 되는 주기에 대하여는 구체적으로 언급되어 있지 않다. 따라서 인공지능파의 평균 응답스펙트럼 값이 특정 주기에서 설계응답스펙트럼보다 작거나 큰 값을 가지는 경우 구조물에 미치는 영향을 알아보기 위하여 아래 5가지 경우의 변수를 적용하여 구조해석을 수행하고 정량적인 평가를 하였다.

- Case 1. 구조물의 고유주기에서 인공지능파의 응답스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값보다 큰 경우
- Case 2. 구조물의 고유주기에서 인공지능파의 응답스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값과 유사한 경우
- Case 3. 구조물의 고유주기에서 인공지능파의 응답스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값보다 작은 경우
- Case 4. 구조물의 고유주기보다 작은 주기에서 인공지능파의 응답스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값보다 큰 경우
- Case 5. 구조물의 고유주기보다 큰 주기에서 인공지능파의 응답스펙트럼 값이 설계응답스펙트럼 값보다 큰 경우

Fig. 1은 선형 구조해석에 적용된 구조물인 교각의 형상 및 구조해석 모델링을 보인 것으로 교각의 높이(h)는 9.0m이고, 교각의 지름(d)은 1.5m이다. Fig. 2는 Case 1~5의 구조해석에 적용한

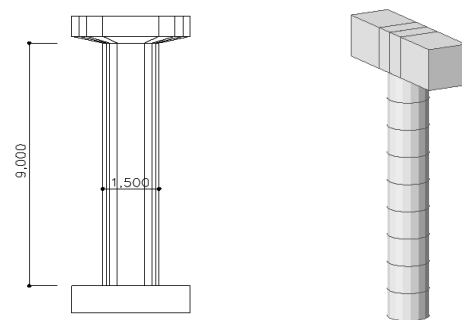


Fig. 1. Analysis Model (Unit: mm)

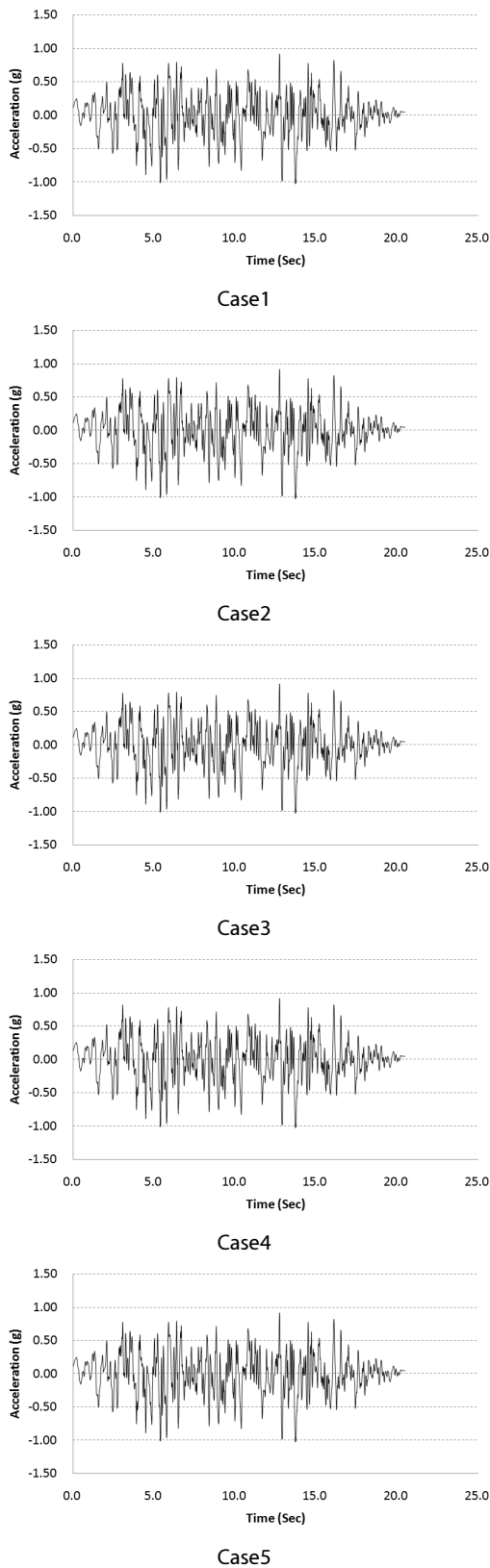


Fig. 2. Artificial Time History for Each Case

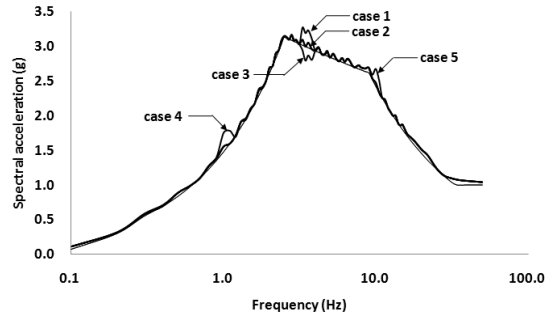


Fig. 3. Response Spectrum by Artificial Time History

인공지진파를 보인 것으로 Case 2의 인공지진파를 기준으로 하여 특정 주기의 응답스펙트럼 값을 변화시킴으로써 시간이력해석에 적용될 5개의 인공지진파의 전체적인 형상이 유사하게 유지 될 수 있도록 하였다. Fig. 3은 Fig. 2에서 보인 인공지진파의 응답스펙트럼 값을 설계응답스펙트럼과 비교한 것이다.

Fig. 2에서 보인 5개의 인공지진파의 최대지진가속도 값은 1.025g로 모두 동일하며, 지진파의 형상 또한 유사하도록 작성하였다. 설계응답스펙트럼은 U.S. NRC RG 1.60을 기준으로 작성되었으며, Fig. 3에서 보인 인공지진파로부터 계산된 응답스펙트럼은 Case 2의 경우 구조물의 고유주기와 유사한 주기(Frequency) 3.45Hz에서 설계응답스펙트럼과 유사한 2.990g로 오차는 0.1%이다. Case 1은 Case 2와 동일한 주기에서 설계응답스펙트럼 값보다 6.515%가 큰 3.188g이 되도록 작성된 인공지진파이며, Case 3은 Case 1,2와 동일한 주기에서 설계응답스펙트럼보다 6.682%가 작은 2.793g의 값을 가지도록 작성된 인공지진파이다. 또한, Case 4와 Case 5는 각각 1.0Hz와 10.0Hz에서 설계응답스펙트럼보다 18.725%, 10.559% 큰 값을 가지는 1.474g, 2.415g로 작성된 인공지진파이다. Table 1은 위의 내용을 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1. Comparisons of Design Response Spectrum and Calculated Response Spectrum

Case	Frequency (Hz)	Design	Calc.	Ratio (%)	Peak Acc.
1	3.45	2.993	3.188	6.515	1.025
2	3.45	2.993	2.990	0.100	1.025
3	3.45	2.993	2.793	6.682	1.025
4	1.00	1.474	1.750	18.725	1.025
5	10.00	2.415	2.670	10.559	1.025

Table 2는 Case 1~5의 인공지진파를 사용하여 수행된 시간이력 해석으로부터 도출된 최대모멘트를 보여준다. Table 2를 통해 Case 2, Case 4, Case 5의 모멘트는 모두 동일함을 확인할 수 있다. 이는 구조물의 고유주기 이외의 주기에서 인공지진파의 응답스펙

트럼이 설계응답스펙트럼 보다 크더라도 구조물에 발생하는 부재력의 크기에는 큰 영향이 없음을 나타낸다. 그러나 Case 1~3에서는 각기 다른 크기의 최대모멘트가 발생하였다. 이는 구조물의 고유주기에 해당하는 주기에서 인공지진파로부터의 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼보다 작거나 크면 구조물에 발생하는 부재력은 직접적으로 영향을 받음을 확인할 수 있다. 따라서 단주기 운동이 지배적인 구조물의 내진설계 시 구조물 고유주기에 해당하는 주기에서 반드시 설계응답스펙트럼 이상의 값을 가지는 인공지진파를 사용하여만 구조물의 내진 안전성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 2. Maximum Moment for Each Case

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Moment (kN·m)	13965	13090	12215	13090	13090

3. 인공지진파의 수정

3.1 수정 이론

Lilhanand and Tseng (1988) 및 Choi and Lee (2003)의 연구에서는 충격응답함수를 사용하여 설계응답스펙트럼과 유사한 인공지진파를 작성하는 방법을 제안하고 있으며, 그 결과는 충분한 신뢰성을 확보하고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서도 그들의 연구에서 사용된 충격응답함수를 적용하였다. 스펙트럼 맞춤형 인공 지진파를 작성하는 이론을 간략히 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

인공 지진파 $\ddot{Z}(t)$ 를 임의의 위상각을 포함한 주기함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{Z}(t) = I(t) \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (1)$$

여기서, A_i , ω_i 및 ϕ_i 는 각각 i 번째 주기함수의 진폭, 진동수 및 위상각에 해당되며, $I(t)$ 는 정상상태의 임의진동 파형을 비정상상태의 임의진동 파형으로 변환시켜주는 세기함수(deterministic intensity function)이다. Eq. (1)에서 얻어진 지진동 시간이력의 응답스펙트럼 값은 Eq. (2)와 같이 단자유도계의 해를 통하여 구할 수 있다.

$$\ddot{X}(t) + 2\omega_i \xi_k \dot{X}(t) + \omega_i^2 X(t) = -\ddot{Z}(t) \quad (2)$$

여기서, $X(t)$ 및 $\dot{X}(t)$ 는 각각 시간이력의 상대변위 응답 및

속도이며, ω_i 는 i 번째 고유진동수, ξ 는 감쇠비이다.

진동수 ω_i 와 감쇠비 ξ 에서 지진동시간이력의 응답스펙트럼값을 $S_R(\omega_i, \xi_k)$, 설계응답스펙트럼값을 $S_T(\omega_i, \xi_k)$ 라 할 때, 지진동시간이력의 응답스펙트럼값과 설계응답스펙트럼값의 보정량은 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta S(\omega_i, \xi_k) = S_R(\omega_i, \xi_k) - S_T(\omega_i, \xi_k) \quad (3)$$

보정량을 임의의 시간함수 $\delta \ddot{Z}(t)$ 를 사용하여 나타내면 Eq. (4)와 같다.

$$\delta S(\omega_i, \xi_k) = \int_0^{t_{mi}} \delta \ddot{Z}(\tau) h_i^k(t_{mi} - \tau) d\tau \quad (4)$$

여기서, $h_i(t)$ 는 ω_i 와 감쇠비 ξ ($\omega_{Di} = \omega_i \sqrt{1 - \xi^2}$)에 대한 단자유도계의 지진동 충격응답함수(acceleration impulse response function)이고, $t_{mi}(t_m(\omega_i))$ 의 생략형태는 스펙트럼 응답이 발생하는 시간이며, τ 는 시간변수이며, 단자유도계의 지진동 충격응답함수는 Eq. (5)와 같이 표현된다.

$$h_i(t) = \frac{-\omega_i}{\sqrt{1 - \xi^2}} \exp(-\omega_i \xi_k t) ((2\xi_k^2 - 1) \sin(\omega_i' t) - 2\xi_k \sqrt{1 - \xi_k^2} \cos(\omega_i' t)) \quad (5)$$

임의의 시간함수 $\delta \ddot{Z}(t)$ 는 다시 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta \ddot{Z}(t) = b' f'(t) \quad (6)$$

여기서, b' 은 미지의 상수이며, $f'(t)$ 는 또 다른 형태의 지진동 충격 응답함수 또는 수정함수(adjustment function)이고, Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f'(t) = h_i(t_{mi} - t) \quad (7)$$

그러므로 시간이력에 대한 보정량 $\delta S(\omega_i, \xi_k)$ 중 최대값 δS^{\max} 는 Eq. (8)과 같이 단순화 할 수 있다.

$$C' = \int_0^{t_{mi}} h_i(t_{mi} - \tau) f'(\tau) d\tau \quad (8)$$

Eq. (7)을 Eq. (8)에 대입하여 C' 을 간략화 시키면 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C' = \int_0^{t_{mi}} [h_i(t_{mi} - \tau)]^2 d\tau \quad (9)$$

Eq. (9)로부터 미지의 상수 b' 을 계산할 수 있으며, 임의의 시간함수 $\delta\ddot{Z}(t)$ 또한 계산될 수 있다. 이렇게 구해진 $\delta\ddot{Z}(t)$ 를 이용하여 새로운 가속도시간이력을 생성할 수 있으며 Eq. (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\ddot{Z}_{n+1}(t) = \ddot{Z}_n(t) + \delta\ddot{Z}(t) \quad (10)$$

Eq. (10)을 적용하여 초기에 작성된 시간이력에 반복적으로 더해가면서 $\delta S(\omega_i, \xi_i)$ 를 원하는 오차수준까지 감소하여 새로운 시간이력을 생성한다.

3.2 수정함수

인공지진파의 수정을 위해서는 3.1절의 Eq. (6)과 같이 임의의 시간함수 $\delta\ddot{Z}(t)$ 를 계산하기 위한 적절한 수정함수를 선택하여 적용하는 것이 중요하다. Lilhanand and Tseng (1988)의 연구에서는 Lilhanand and Tseng의 파형과 Tapered Cosine 파형을 제안하고 있으며, Choi and Lee (2003)에서는 Lilhanand and Tseng의 파형과 유사한 형태의 파형을 수정함수로 사용하고 있다. 앞의 두 연구들에서는 모두 수정함수를 하나만 선택하여 적용하고 있으나, Abrahamson N.A. (1992)에 의하면 Lilhanand and Tseng의 파형은 주기(Period)의 값이 3초 이하인 경우 또는 보정량의 값이 작은 경우에 효과적이고, Tapered Cosine 파형의 식은 보정량의 값이 큰 경우에 효과적이라고 기술하고 있다. 따라서 본 연구에서는 수정함수(adjustment function) $f'(t)$ 를 효율적으로 적용하기 위하여 Tapered Cosine 파형과 Lilhanand and Tseng의 파형을 모두 적용하였으며, 적용된 수정함수의 식은 Eqs. (11)~(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f'(t) = \cos(\omega_j'(t - t_j + \Delta t_j)) \exp(-|t - t_j + \Delta t_j| \alpha_j) \quad (11)$$

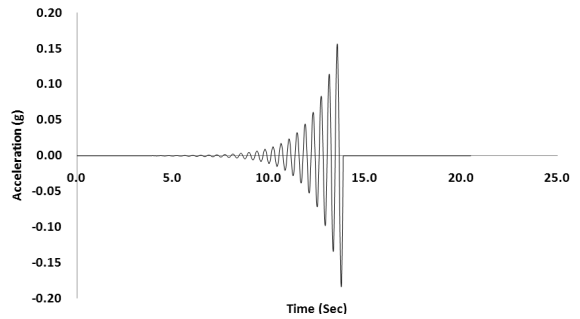
$$\Delta t_j = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - \beta_j^2}}{\beta_j}\right)}{\omega_j'} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \alpha(f) &= a_1 f & f < f_1 \\ \alpha(f) &= (a_1 + (a_2 - a_1) \frac{(f - f_1)}{(f_2 - f_1)}) f, & f_1 < f < f_2 \\ \alpha(f) &= a_2 f & f > f_1 \end{aligned} \quad (13)$$

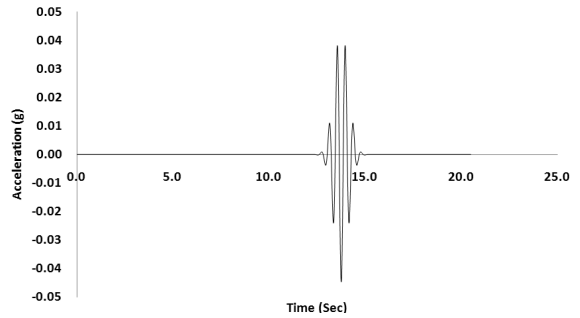
$$f'(t) = \frac{-\omega_i}{\sqrt{1 - \beta^2}} \exp(-\omega_i \beta_i (t_i - t)) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} &((2\beta_i^2 - 1) \sin(\omega_i'(t_i - t)) - 2\beta_i \sqrt{1 - \beta_i^2} \\ &\cos(\omega_i'(t_i - t))) \end{aligned}$$

Lilhanand and Tseng과 Tapered Cosine파형을 임의의 주기에 대하여 작성하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.



(a) Lilhanand and Tseng



(b) Tapered Cosine

Fig. 4. Wave Shapes

3.3 수정 절차

본 연구에서는 인공지진파에 의해 작성된 응답스펙트럼이 설계 응답스펙트럼보다 작은 값을 가지지 않으면서 최대값은 KEPIC STB 2.3.2.2의 요건에 따라 설계응답스펙트럼 값의 130%이하를 만족할 수 있도록 인공지진파를 수정하는 것에 목적을 두고 있다. 이는 구조물의 고유주기에 해당하는 영역에서 구조물에 미치는 에너지가 설계기준보다 작은 값을 가지지 않도록 방지하면서 과도한 에너지의 적용에 의한 구조물의 과다 설계를 방지하기 위함이다. 위의 조건을 만족하기 위하여 초기에 입력된 인공지진파를 이용하여 응답스펙트럼을 계산한 후 계산된 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼을 비교하여 설계응답스펙트럼보다 작은 값이 존재하는지를 검색하도록 하였다. 만약 설계응답스펙트럼보다 작은 값을 가지는 주기가 있다면 해당되는 주기에 대하여 3.1절의 이론을 적용하여

검색된 모든 주기에 대하여 설계응답스펙트럼보다 큰 값을 가지도록 수정하였다. 이렇게 수정된 인공지진파는 모든 주기에서 설계응답스펙트럼보다 큰 값을 가짐은 명백하나 최대값이 설계응답스펙트럼의 130% 이상이 될 가능성을 가지고 있다. 따라서 계산된 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼의 차이가 최대인 값이 허용오차 이내에 있는지를 확인하고 허용오차보다 큰 값을 가진다면 3.1절의 이론에 의해 추가로 인공지진파를 수정하게 된다. 그러나 두 번째 과정에 의해 수정된 인공지진파로 계산된 응답스펙트럼은 계산된 주기의 값에만 영향을 미치지 않고 다른 주기의 응답스펙트럼 값에도 영향을 미치게 된다. 따라서 설계응답스펙트럼과의 재비교를 통하여 수정된 인공지진파에 의해 작성된 응답스펙트럼이 모든 주기에 대하여 설계응답스펙트럼보다 큰 값을 가지는지에 대한 재확인 과정을 거치게 하였다. 위의 과정을 반복적으로 수행하면서 수정된 인공지진파가 계산된 모든 주기에 대하여 설계응답스펙트럼보다 큰 값을 가지도록 하면서 허용오차를 만족한다면 프로그램은 종료되고 이렇게 작성된 인공지진파를 사용하여 설계기준에서 제안하고 있는 적합성 검토를 수행하게 된다. 계산과정을 순서대로 나타내면 Fig. 5와 같다.

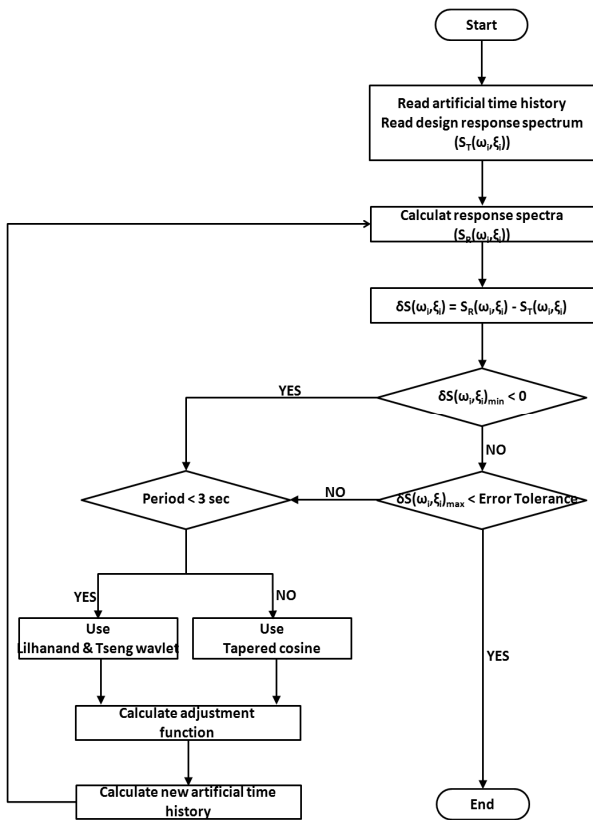


Fig. 5. Flow Chart of Proposed Method

3.4 수정 결과

설계응답스펙트럼을 포괄하는 인공지진파를 생성하기 위하여 초기에 입력된 인공지진파를 생성하여야 한다. 이를 위하여 인공지진파 생성 프로그램인 Simqke (Gasparini and Vanmarcke, 1976)를 이용하여 임의의 인공지진파를 생성하였다. 생성된 인공지진파는 지속시간 20.48초, 시간간격 0.005초를 갖는 4096개의 값으로 정의되었고, 최대 지진가속도의 값은 1.0g로 정하였다. Fig. 6은 Simqke에 의해 작성된 각 방향별 인공지진파를 보인 것이다.

U.S. NRC RG 1.60 (1973)에서 제안된 감쇠비 0.5%, 2.0%, 5.0%, 7.0%, 10.0%에 대한 설계응답스펙트럼을 작성한 방향별 설계 응답스펙트럼과 계산된 응답스펙트럼을 비교하여 보인 것이 Fig. 7 및 Table 3이다.

Table 3에 의하면 Simqke에 의해 생성된 인공지진파를 사용하여 U.S. NRC RG 1.122에서 제안하는 계산 주기 간격인 Table

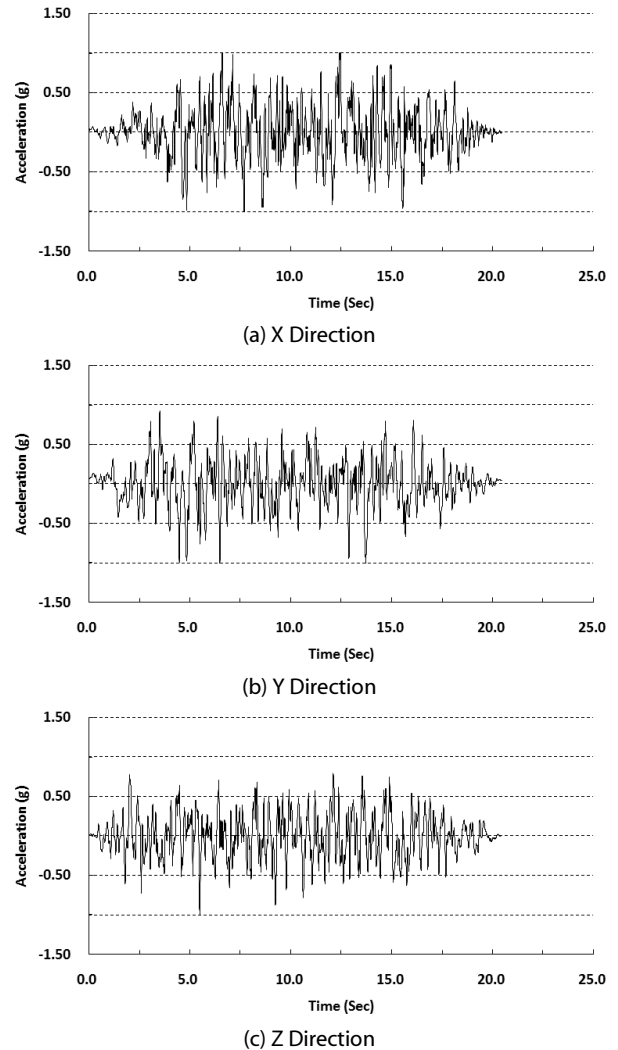


Fig. 6. Original Artificial Time History

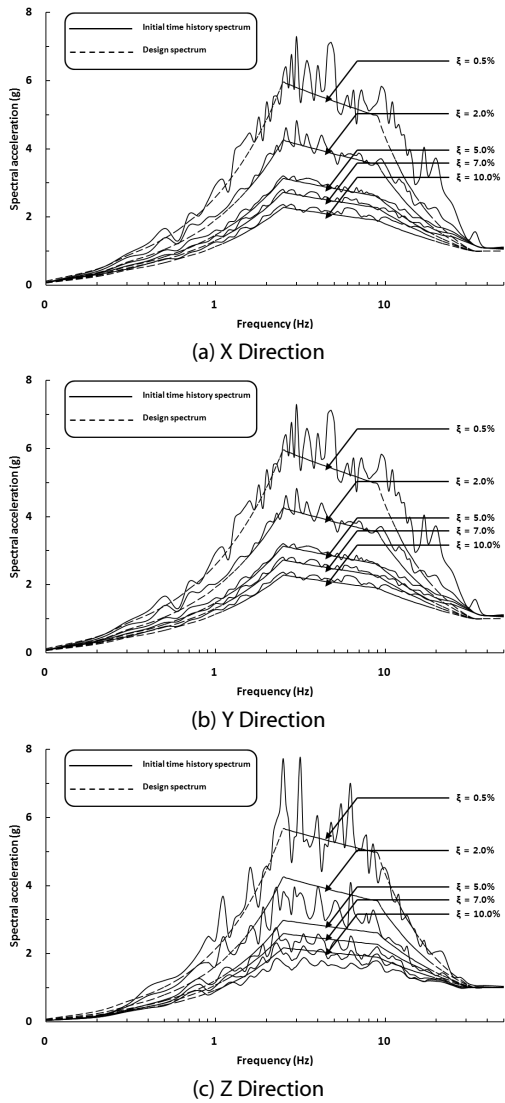


Fig. 7. Comparisons of Design Response Spectrum and Design Spectrum Based on Original Time History

Table 3. Number of Period of Response Spectrum Lower than Design Response Spectrum (Original Time History)

	Peak acc.	Num of $\delta S(\omega_i, \xi_i) < 0$				
		0.5%	2%	5%	7%	10%
X	1.0g	16	13	5	6	3
Y	1.0g	37	59	60	54	54
Z	1.0g	30	62	64	69	71

4에 의해 계산된 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼을 만족하지 못하는 주기의 수가 모든 방향에서 국내의 설계기준에서 제안하는 5개를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 Simqke를 사용하여 생성된 인공지진파를 3.3절에서 언급한 7단계의 반복계산을 수행하여

Table 4. Suggested Frequency Intervals for Calculation of Response Spectra

Frequency range (Hz)	Increment (Hz)	Frequency range (Hz)	Increment (Hz)
0.2~3.0	0.10	8.0~15.0	0.50
3.0~3.6	0.15	15.0~18.0	1.00
3.6~5.0	0.20	18.0~22.0	2.00
5.0~8.0	0.25	More than 22.0	3.00

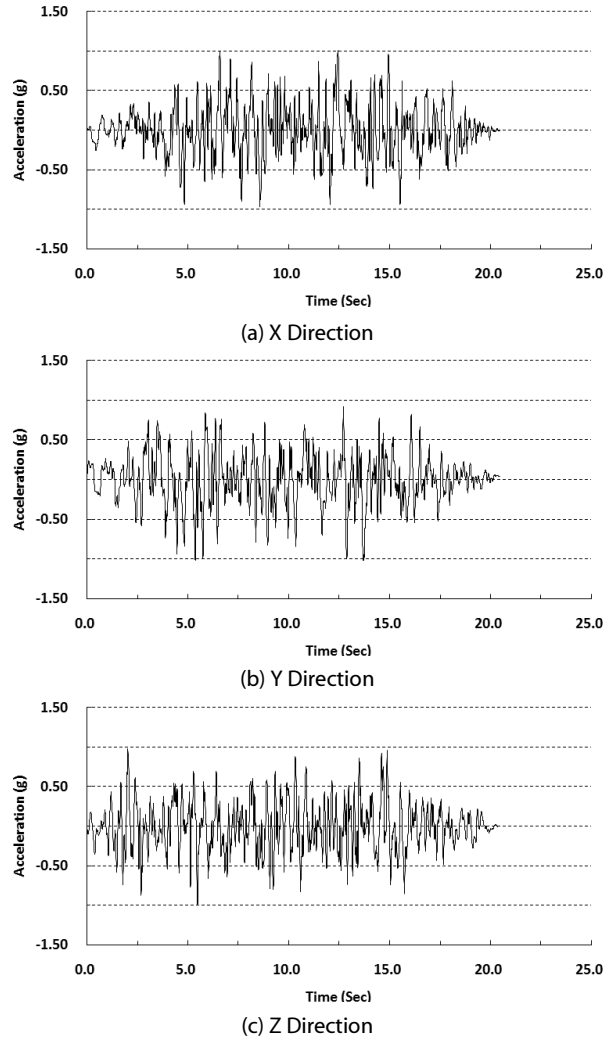


Fig. 8. Modified Artificial Time History

수정하였다. Fig. 8은 수정된 인공지진파를 각 방향별로 보여준다.

또한, Fig. 9 및 Table 5에 수정된 인공지진파를 사용하여 작성된 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼의 비교를 나타내었다.

Table 5에 나타난 바와 같이 수정 후 인공지진파의 최대 가속도 값은 X방향으로 0.7%, Y방향으로 1.8% 및 Z방향으로 0.0%의 증가량을 보여 수정 전 최대가속도 값과 유사함을 보였다. 수정

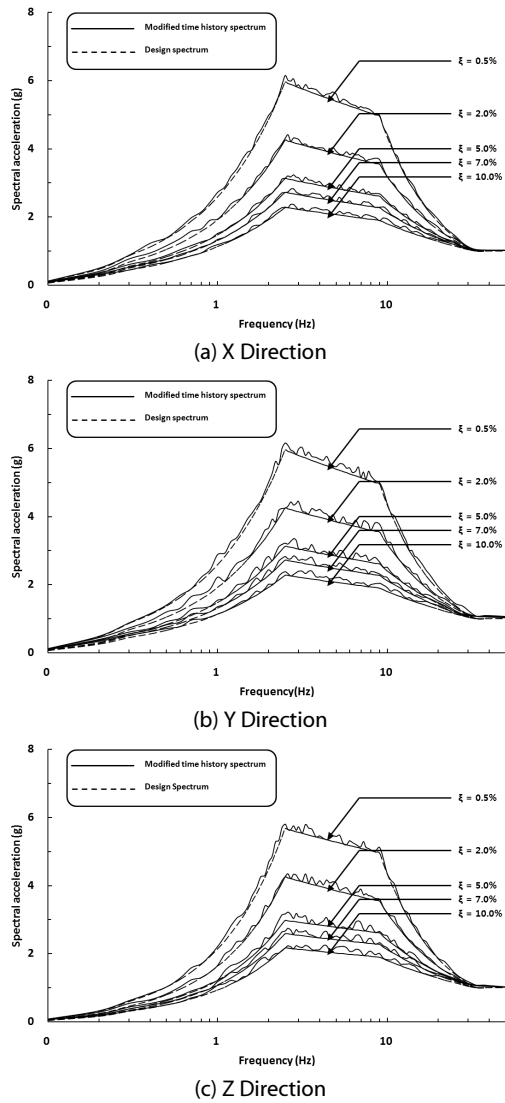


Fig. 9. Comparisons of Design Response Spectrum and Response Spectrum Based on Modified Time History

Table 5. Number of Period of Response Spectrum Lower than Response Spectrum Based on Modified Time History

	Peak Acc.	Numer of $\delta S(\omega_i, \xi_i) < 0$				
		0.5%	2%	5%	7%	10%
X	1.007g	0	0	0	0	0
Y	1.018g	0	0	0	0	0
Z	1.000g	0	0	0	0	0

후 인공지진파에 의해 계산된 응답스펙트럼은 모든 방향 및 감쇠비에서 설계응답스펙트럼보다 작은 값이 없는 것으로 확인되어 설계 응답스펙트럼을 포괄하는 것으로 나타났다. 또한, 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼의 최대오차는 X방향, Y방향, Z방향에 대해 각

각 118%, 125%, 113%로 나타나 기준에서 정하고 있는 130% 이내를 만족하는 것으로 확인되었다.

3.5 수정 인공지진파의 검증

3.5.1 적합성 검토

KEPIC STB (2005) 및 U.S NRC SRP 3.7.1 (1989)을 살펴보면 인공지진파의 적합성검토를 위해 사용되는 방법은 Arias Intensity에 의한 인공지진파의 강진 지속시간 검토와 파워스펙트럼밀도함수(Power Spectrum Density, PSD)에 의한 인공지진파의 에너지량 검토가 있다. 첫 번째 적합성 검토인 Arias Intensity (I_A)는 지반 운동 강도의 척도로서 일시적인 지진파의 가속도를 측정하여 지진파의 강도를 결정하는 것으로 강진의 척도를 설명할 수 있는 신뢰성 있는 값으로 알려져 있으며 Eq. (15)와 같이 나타낼 수 있다.

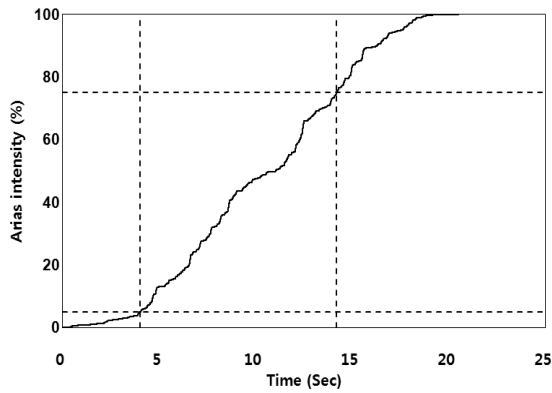
$$E(t) = \int_0^t A^2(x) dx \quad (15)$$

KEPIC STB (2005) 및 U.S NRC SRP 3.7.1 (1989)의 설계기준에서는 인공지진동시간이력의 Arias Intensity 강진 운동 지속시간을 6초 이상으로 규정하고 있으며, 강진 운동 지속시간을 결정하는 방법은 Eq. (16)과 같다.

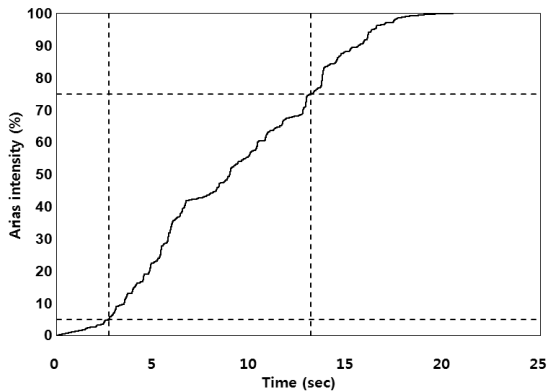
$$T_D = T_{0.75} - T_{0.05} \quad (16)$$

여기서, $T_{0.75}$ 및 $T_{0.05}$ 는 75% 및 5%에 도달하는 누적 에너지의 시간이다. 수정된 인공 지진동 시간이력으로 작성된 각 방향별 Arias Intensity를 Fig. 10 및 Table 6에 나타내었다. Arias Intensity에 의해 검토된 강진지속시간은 X방향, Y방향, Z방향으로 각각 10.160초, 10.440초, 11.695초로 모두 6초 이상의 강진지속시간을 가지는 것으로 확인되었으며, 이는 KEPIC STB (2005) 및 U.S NRC SRP 3.7.1 (1989)의 기준을 모두 만족하는 값이다.

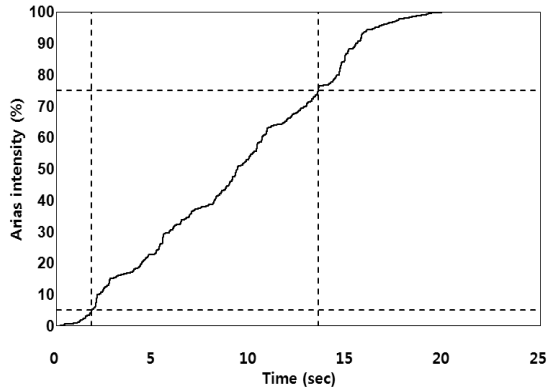
원자력 분야의 지진해석에서 PSD (Power Spectral Density)함수는 시간이력의 진동수 특성을 파악하기 위한 규제요건으로 활용되고 있다. 이에 따라 미국원자력규제위원회는 시간이력으로부터 PSD함수를 계산하는 방법, U.S. NRC RG 1.60 (1973)에서 제안하고 있는 설계응답스펙트럼에 부합하는 구체적인 목표 PSD함수의 형태 및 계산된 PSD함수의 목표 PSD함수를 포괄하는 요건 등을 명시해 놓고 있다(Lee and Choi, 2006). KEPIC STB에서는 지진동시간이력의 일면중첩 파워스펙트럼밀도 $S_0(\omega)$ 를 Eq. (17)로부터 계산한다.



(a) X Direction



(b) Y Direction



(c) Z Direction

Fig. 10. Arias Intensity

Table 6. Time of Cumulative Energy

Direction	$T_{0.05}(s)$	$T_{0.75}(s)$	$T_D(s)$	Checked
X	4.020	14.180	10.160	O.K
Y	2.695	13.135	10.440	O.K
Z	1.810	13.505	11.695	O.K

$$S_0(\omega) = \frac{2|F(\omega)|^2}{2\pi T_D} \quad (17)$$

여기서, $F(\omega)$ 는 인공 지진파의 Fourier진폭이고, T_D 는 $F(\omega)$ 를 계산하는 인공 지진파의 강진 지속시간이다.

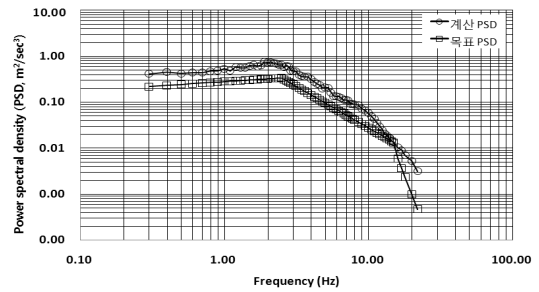
KEPIC STB에 기술한 수평방향 표준응답스펙트럼의 최대지진 가속도 1.0g에 대한 목표 PSD는 Eq. (18)로부터 계산한다. 또한 수직방향 표준응답스펙트럼에 대한 목표 PSD는 수평방향 표준응답스펙트럼 가속도 값 차이의 제곱비율로 조정한다.

$$0.3 \sim 2.5Hz : S_0(\omega) = 4149(f/2.5)^{0.2}cm^2/sec^3 \quad (18)$$

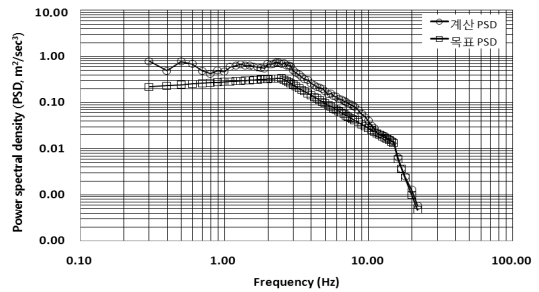
$$2.5 \sim 9.0Hz : S_0(\omega) = 4149(f/2.5)^{1.8}cm^2/sec^3$$

$$9.0 \sim 16.0Hz : S_0(\omega) = 418(9.0/f)^3cm^2/sec^3$$

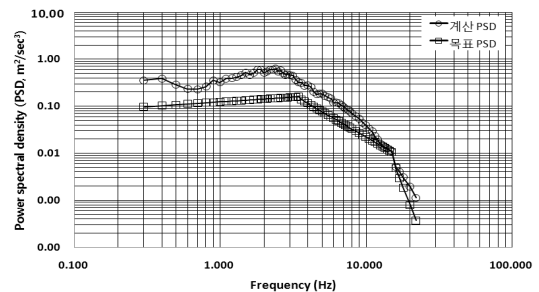
$$16.0 \sim 24.0Hz : S_0(\omega) = 74.2(16.0/f)^8cm^2/sec^3$$



(a) X Direction



(b) Y Direction



(c) Z Direction

Fig. 11. Comparisons of Power Spectral Density

여기서, f 는 목표 PSD를 계산하는 진동수이다.

각각의 진동수를 중심으로 $\pm 20\%$ 의 진동수 폭에 대하여 Eq. (17)에서 계산한 PSD 값을 평균한 평균 PSD가 Eq. (18)에서 계산한 목표 PSD의 80%를 포괄해야한다. Fig. 11 및 Table 7은 수정 후 인공지진파에 의해 작성된 이동평균 PSD이며 각 방향별로 계산된 PSD는 목표 PSD보다 최소 0.469%, 최대 85.176%이상 큰 값을 가져 기준을 포괄하는 것으로 확인되었다.

Table 7. Comparisons of Standard PSD and Calculated PSD

	X dir.(%)	Y dir.(%)	Z dir.(%)
Min.	0.469	0.808	2.846
Max.	85.176	71.873	76.772

3.5.2 독립성 검토

U.S NRC SRP 3.7.1 (1989)에 의하면 두 방향 이상의 시간이력을 고려할 경우 각 직교방향의 시간이력은 통계학적으로 독립되어야 한다고 규정하고 있다. 여기서 두 시간이력 사이의 시작시간 차이를 고려하여 계산된 상관계수함수의 절대최대값이 0.16을 넘지 않는다면 두 시간이력은 통계학적으로 독립이라고 간주할 수 있다고 규정하고 있으며 독립성 검토는 Eq. (19)를 통해 수행한다.

$$r = \frac{\sum_i ((x(i) - mx) \times (y(i) - my))}{\sqrt{\sum_i (x(i) - mx)^2 \times \sum_i (y(i) - my)^2}} \quad (19)$$

여기서, $x(i)$ 와 $y(i)$ 는 서로 다른 시간이력의 i 시간에 대한 가속도 값이며, mx 와 my 는 서로 다른 시간이력의 평균 가속도 값이다. Table 8은 인공지진파의 독립성을 계산한 값으로 수정된 인공지진 동시간이력은 모든 방향에서 상관계수함수 절대최대값이 0.16를 넘지 않으므로 서로 독립성을 확보하고 있음을 확인할 수 있다.

Table 8. Absolute Maximum Value of Coefficient Function for All Direction

Direction	X-Y	X-Z	Y-Z
Max value	0.015	0.048	0.018

4. 결론

본 연구에서는 수정합수를 적용하여 인공지진파를 수정하고 국내·외의 다양한 기준을 적용하여 적합성 검토를 수행하였다. 본 연구로부터 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 구조물의 고유주기와 유사한 영역의 주기에서 계산된 인공지진

파의 응답스펙트럼이 설계응답스펙트럼보다 작을 경우 구조물의 내진 안전성을 확보하였다고 할 수 없음이 확인되었다. 따라서 인공지진파를 생성 시 인공지진파의 응답스펙트럼은 구조물의 고유주기에 해당하는 주기에 대하여 반드시 검토되어야 하며, 그 값은 설계응답스펙트럼보다 큰 값을 가져야 하는 것으로 확인되었다.

- (2) 수정 후 인공지진파에 의하여 계산된 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼의 비교에서 설계응답스펙트럼 이하의 값을 가지는 스펙트럼 가속도 값이 존재하지 않아 설계응답스펙트럼을 포괄하는 것으로 확인하였으며, 큰 값의 정도는 30%이하로 에너지가 과대해지는 것을 방지할 수 있음을 확인하였다.
- (3) 수정 후 인공지진파에 대한 Arias 합수를 이용한 강진 지속시간 검토에서 방향별 수정된 인공지진파의 강진 지속시간은 최소 10.16초로 6초 이상을 만족하는 것으로 나타났다.
- (4) 수정 후 인공지진파에 대한 PSD 합수를 이용한 적합성 검토에서는 기준에서 제안한 값과 계산된 값의 비가 최소 0.469%, 최대 85.176%로 모든 주기에서 설계기준에서 제안한 값을 포괄하는 것으로 확인되었다.
- (5) 수정 후 인공지진파의 각 방향별 독립성 검토에서는 각 방향별의 최대값이 0.048로 기준값인 0.16이하로 기준을 만족하는 것으로 확인되었다.
- (6) 본 연구에서 제시한 인공지진파 수정방법은 구조물의 내진 안전성을 확보함과 동시에 설계기준의 적합성과 독립성을 모두 만족하는 것으로 나타나 실무에서 적절하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

Abrahamson, N. A. (1992). "Non-stationary spectral matching." *Seismological research letters*, Vol. 63, No. 1, p. 30.

Choi, D. H. and Lee, S. H. (2003). "Multi-damping earthquake design spectra-compatible motion histories." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 226, No. 3, pp. 221-230.

Gasparini, D. A. and Vanmarcke, E. H. (1976). "Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra." Publication No. 76-4. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

Kaul, M. K. (1978). "Spectrum-consistent time-history generation." *ASCE J. Eng., Mech.* EM4, pp. 781-788.

Korea Electric Power Industry Code, KEPIC STB (2005). "Seismic analysis and seismic capacity evaluation of nuclear facilities." 2005 Edition and 2008 Supplement.

Lee, H. H., Han, S. W. and Lee, L. H. (1999). "Selection of earthquake ground motion for time history analysis." *Architectural Institute of Korea*, Vol. 15, No. 6, pp. 53-60.

Lee, S. H. (2009). "Enhanced techniques for seismic analysis of

- nuclear power facilities incorporating response-spectrum-compatible and spatially incoherent ground motion input.” Ph.D. Dissertation, Hanyang University.
- Lee, S. H. and Choi, D. H. (2006). “Generation of target PSD function compatible with design response spectrum.” *Proceedings of EESK Conference*, Vol. 10, pp. 637-644.
- Lilhanand, K. and Tseng, W. S. (1988). “Development and application of realistic earthquake time histories compatible with multiple damping design spectra.” *Proceeding of the 9th WCEE*, Vol. II, pp. 819-824.
- Linda, A. A. and Norman, A. (2010). “An improved method for nonstationary spectral matching.” *Earthquake Spectra*, Vol. 26, No. 3, pp. 601-617.
- National Disaster management institute (1998). Study on the Seismic Design Policies and Criteria(I) (in Korean).
- Park, H. G. and Chung, H. K. (2007). “Incorporating genetic algorithms into the generation of artificial accelerations.” *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 11, No. 2, pp. 1-9.
- U.S NRC (1973a). “Design response spectra for seismic design of nuclear power plants.” *Regulatory Guide 1.60*, Rev. 1.
- U.S NRC (1973b). “Damping values for seismic design of nuclear power plants.” *Regulatory Guide 1.60*, Rev. 1.
- U.S NRC (1978). “Development of floor design response spectra for seismic design of floor supported equipment or components.” *Regulatory Guide 1.122*, Rev. 1.
- U.S NRC (1989). “Seismic design parameter.” *SRP 3.7.1*, Rev. 2.