

Nonstationary Random Process를 이용한 인공지진파 발생
 - 설계응답스펙트럼에 의한 파워스펙트럼의 조정 -
 Generation of Artificial Earthquake Ground Motions
 using Nonstationary Random Process
 - Modification of Power Spectrum Compatible with Design Response Spectrum

김승훈* 한상환** 이리형**
 Kim, Seung-Hun Han, Sang Whan Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

In the nonlinear dynamic structural analysis, the given ground excitation as an input should be well defined. Because of the lack of recorded accelerograms in Korea, it is required to generate an artificial earthquake by a stochastic model of ground excitation with various dynamic properties rather than recorded accelerograms. It is well known that earthquake motions are generally non-stationary with time-varying intensity and frequency content. Many researchers have proposed non-stationary random process models. Yeh and Wen (1990) proposed a non-stationary stochastic process model which can be modeled as components with an intensity function, a frequency modulation function and a power spectral density function to describe such non-stationary characteristics. Saito and Wen (1994) proposed a non-stationary stochastic process model to generate earthquake ground motions which are compatible with design response spectrum at sites in Japan.

This paper shows the process to modify power spectrum compatible with target design response spectrum for generating of nonstationary artificial earthquake ground motions. Target response spectrum is chosen by ATC14 to calibrate the response spectrum according to a given recurrence period.

1. 서론

고층 구조물의 비탄성 내진해석, 진동제어 및 손상도 평가 등을 수행하기 위해서는 구조물의 비선형 동적 해석이 필요하다. 해석 결과가 신뢰성을 가지기 위해서는 다양한 지진기록을 바탕으로 제시한 적절한 지진기록이 필요하지만 국내에서 기록된 지진의 수는 매우 부족한 실정이다. 그러므로, 확률론적 지반 운동 모델(stochastic ground motion model)을 이용하여 국내 특성을 고려한 인공지진을 다양하게 발생시켜, 기준이 될만한 인공지진을 제시할 필요가 있다.

지진은 시간에 따라 변화하는 강도(intensity)와 주파수(frequency)양이 변화하는 부정형(nonstationary)한 특성을 가지고 있다. 1970년대 이후 많은 연구자들에 의해 지진에 대한 부정형 모델이 제시되어 왔다. 특히, Yeh¹⁾는 지진파의 부정형한 특성을 나타내기 위해서 강도함수, 주파수 빈도함수, 파워스펙트럼 밀도 함수 등을 이용한 부정형한 확률론적 지반운동 모델을 제안하였고 Satio²⁾는 일본의 특정한 두 지역의 설계응답스펙트럼에 맞는 지반운동 모델을 개발하였다.

* 한양대학교 건축공학부 박사과정
 ** 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

본 연구에서는 지진 재현주기를 고려할 수 있는 ATC14³⁾의 설계응답스펙트럼을 대상 설계응답 스펙트럼으로 하여 설계응답스펙트럼에 맞는 인공지진파를 발생시키기 위해 파워스펙트럼 밀도 함수를 설계응답스펙트럼으로부터 산정하고자 한다.

2. 인공 지진파 발생 모델

시간에 따른 불확실한 지반운동을 모델링하기 위하여 여러 종류의 stationary 또는 nonstationary 의 확률론적 지반운동 모델들이 적용·발전되어왔다. 1947년 Housner와 1960년 Bycroft에 의해 stationary white-noise ground-motion 모델이 제기되었으며, 지반운동의 지역특성과 주기를 고려하기 위해 stationary nonwhite process 모델이 제안되었다(Kanai(1957), Tajimi(1960), Housner와 Jennings(1964), Liu와 Jhaveri(1969)). Faravelli(1988)는 다차원의 스펙트럼 밀도를 가지는 stationary 지반운동 모델을 만들었다. 그러나 이러한 stationary 모델은 실제 지진파의 특성인 시간에 따라 변화하는 강도를 재현하지 못한다. 따라서 시간에 따라 변화하는 함수들이 nonstationary 모델을 만들기 위해 사용되었다. 이러한 모델에는 time-modulated harmonics(Bogdanoff, 1961), filtered modulated white noise, modulated filtered white noise, modulated filtered poisson process(Shinozuka와 Sato, 1967; Amin와 Ang, 1968), modulated stationary process(Iyengar, 1969), filtered modulated stationary process(Levy, 1971) 등이 있다.

더욱 정확한 nonstationary 지반운동 모델은 진폭과 주기를 동시에 표현하여야한다. Saragoni와 Hart(1972)는 감마함수로 변조한 gaussian white noise를 사용하여 fully nonstationary 모델을 제안하였다. Kubo와 Penzien(1979)은 시간에 따라 변화하는 주파수요소를 가지는 강도함수와 결정적(deterministic) 강도함수를 곱하여 nonstationary 모델을 만들었다. Lin과 Yong(1987)은 1차원적인 파동전개로부터 생성된 Green 함수를 사용하였고 임의의 nonstationary 펄스를 나열한 진전된 Kanai-Tagimi 지반운동 모델을 만들었다. Yeh와 Wen(1989)은 nonstationary 지반운동 모델을 만들기 위해 시간에 따라 변화하는 강도와 주파수 모두를 나타내는 지반진동 모델을 제안하였다. Satio와 Wen(1994)은 일본의 두 지역을 대상으로 설계응답스펙트럼을 선정하여 이에 적합한 인공지진파를 Yeh와 Wen 모델을 이용하여 발생시켰다.

3. Yeh의 지반운동 모델

Yeh의 모델은 식 (1)과 같이 1축방향의 지반운동($\xi(t)$)을 나타낼 수 있다. 즉, 지반운동은 지반운동의 진폭을 결정하는 포락함수인 강도함수($I(t)$)와, 지반운동의 주파수 변화율을 결정하는 주파수 빈도함수($\phi(t)$)를 변수로 하고 지반운동의 파워 스펙트럼 밀도($S(t, \omega)$)를 가지는 함수($\zeta(\phi(t))$)의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\xi(t) = I(t) \cdot \zeta(\phi(t)) \quad (1)$$

3.1 강도함수(Intensity Function, $I(t)$)

지반운동의 강도함수는 식 (2)와 같이 지반 운동의 에너지함수($E[W(t)]$)를 이용하여 실제 지진기록($\xi_r(t)$)을 제공하여 적분함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[W(t)] &= \int_0^t E[\xi_r^2(\tau)] d\tau \\ &= \int_0^t E[\xi^2(\tau)] d\tau = \int_0^t I^2(\tau) E[\zeta^2(\phi(\tau))] d\tau \\ &= \int_0^t I^2(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2)$$

강도함수는 식 (3)과 같은 형태의 함수를 사용한다. 식 (3)의 계수 A, B, C, D, E는 실제 지진

기록을 이용하여 비선형 최소 자승 법(nonlinear least square method)에 의해 구할 수 있다.

$$I^2(t) = A \frac{t^B}{D + t^E} e^{-Ct} \quad (3)$$

3.2 주파수 빈도함수(Frequency Modulation Function, $\phi(t)$)

시간에 따른 주파수 빈도함수를 결정하기 위해서는 실제 기록의 zero-crossing 방법⁵⁾(Saragoni와 Hart, 1974)이 사용된다. 시간 t 에 관하여 zero-crossing한 총 수를 식 (4)와 같이 다항식으로 표현한 $\mu_0(t)$ 라고 할 때 주파수 빈도 함수는 식 (5)와 같이 나타낸다. r_1, r_2, r_3 는 비선형 최소 자승 법으로 결정하는 변수들이고 $\mu'_0(t)$ 는 $\mu_0(t)$ 의 시간에 대한 도함수이다. t_0 는 지반운동의 에너지가 총 에너지의 5%가 되는 시점의 시간이다.

$$\mu_0(t) = r_1 t + r_2 t^2 + r_3 t^3 \quad (4)$$

$$\phi(t) = \frac{\mu_0(t)}{\mu'_0(t_0)} \quad (5)$$

3.3 파워 스펙트럼 밀도 함수($S(t, \omega)$)와 필터링 방정식

제로 평균값과 스펙트럼 밀도 S_0 를 가지는 Gaussian white noise($\ddot{\xi}_\omega(t)$)를 식 (6)의 Kanai-Tajimi filter와 식 (7)의 Clough-Penzien filter에 통과시킴으로써 지반의 특성에 따라 변화시킬 수 있다.

$$\ddot{x}_g + 2\zeta_g \omega_g \dot{x}_g + \omega_g^2 x_g = -\ddot{\xi}_\omega(t) \quad (6)$$

$$\ddot{x}_f + 2\zeta_f \omega_f \dot{x}_f + \omega_f^2 x_f = -\ddot{\xi}_{KT}(t) \quad (7)$$

이러한 filter에 의한 filtered white noise의 파워 스펙트럼 밀도는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{CP}(\omega) = S_0 \left[\frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right] \left[\frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \right] \quad (8)$$

어느 특정한 순간에 Kanai-Tajimi 스펙트럼 형태와 Clough-Penzien 스펙트럼 형태를 갖게 하기 위하여 식 (7)과 (8)에 주파수 빈도함수($\phi(t)$)를 사용하고, 이를 연쇄법칙을 사용하여 식 (9)와 (10)과 같이 시간(t)에 대한 nonstationary filtering 방정식을 만들 수 있다.

$$\frac{d^2 x_g(t)}{dt^2} + \left(-\frac{\phi''(t)}{\phi'(t)} + 2\zeta_g \omega_g \phi'(t) \right) \frac{dx_g(t)}{dt} + [\omega_g \phi'(t)]^2 x_g(t) = -[\phi'(t)]^2 \ddot{\xi}_\omega(\phi(t)) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_f(t)}{dt^2} + \left(-\frac{\phi''(t)}{\phi'(t)} + 2\zeta_f \omega_f \phi'(t) \right) \frac{dx_f(t)}{dt} + [\omega_f \phi'(t)]^2 x_f(t) \\ = -2\zeta_g \omega_g \phi'(t) \frac{dx_g(t)}{dt} - [\omega_g \phi'(t)]^2 x_g(t) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (9)~(10)로부터 식 (11)과 같은 Clough-Penzien filter에 의해 필터링된 파($\zeta(\phi(t))$)가 생성된다. $\ddot{\xi}_\omega(\phi(t))$ 의 파워 스펙트럼 밀도함수는 $S_0 / \phi'(t)$ 이고, $\zeta(\phi(t))$ 의 파워 스펙트럼 밀도함수는 식 (12)와 같다.

$$\zeta(\phi(t)) = 2\zeta_f \omega_f \frac{\dot{x}_f}{\phi'(t)} + \omega_f^2 x_f + 2\zeta_g \omega_g \frac{\dot{x}_g}{\phi'(t)} + \omega_g^2 x_g \quad (11)$$

$$S(t, \omega) = \frac{1}{\phi'(t)} S_{CP}\left(\frac{\omega}{\phi'(t)}\right) \quad (12)$$

식 (3)과 식 (11)을 식 (1)에 대입함으로써 인공지진파($\xi(t)$)를 생성할 수 있다.

4. 대상 설계 응답스펙트럼(ATC14)

국내 기준⁴⁾에 의한 설계응답스펙트럼은 재현주기 475년의 지진에 의한 것으로서 건물의 수명이 나 지진의 재현주기가 달라질 경우 이를 고려하기 위해 설계응답스펙트럼의 크기가 조정되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 지진재현주기를 고려하는 ATC14³⁾의 방법에 의한 설계응답스펙트럼을 대상 응답스펙트럼으로 한다. 그림 1에 지진재현주기를 고려하는 ATC14의 방법에 의한 설계응답스펙트럼 작성법⁵⁾을 나타내었다.

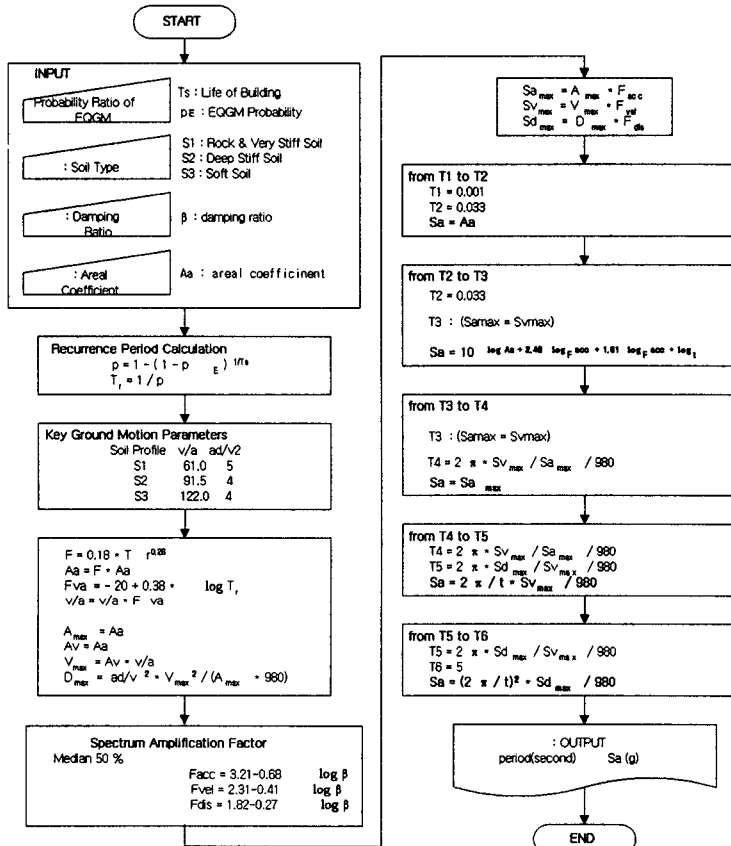


그림 1. 지진 재현주기에 따른 LEDRS 작성방법

재현주기는 475년으로 하고 5% 감쇠, 지역계수 $A_a = 0.12$, 지반조건 S1일 때를 기준으로 한 대상 설계응답스펙트럼을 그림 2에 나타내었다.

5. 설계응답스펙트럼에 적합한 파워스펙트럼 산정

지반운동의 강도함수 산정에 있어서 본 연구에서는 El Centro 지진기록(1940, NS)과 Taft 지진기록(1952, S69E)을 대상으로 하여

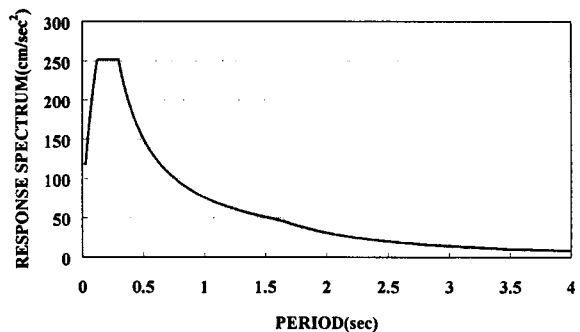


그림 2. 대상 설계응답스펙트럼(ATC14)

식 (2)~(3)에 의해 표 1과 같이 강도함수의 변수를 구하였다.

표 1. 강도함수의 변수

	A	B	C	D	E
El Centro	2.6924E4	2.3880E1	5.8505E-2	1.6537E-1	2.450E1
Taft	8.6748E4	4.1401E0	3.3060E-2	5.0144E3	5.6557E0

그림 2의 대상 설계응답스펙트럼 ($RS_i(w)$)에 적합한 파워스펙트럼은 그림 3과 같은 과정을 통하여 구한다. 식 (13)으로부터 임의의 파워스펙트럼 ($PS_i(w)$)을 가지는 파($X_i(t)$)의 응답스펙트럼($RS_i(w)$)과 설계응답스펙트럼 ($RS_i(w)$)의 비를 이용하여 새로운 파워스펙트럼($PS_{i+1}(w)$)을 식 (14)을 통해서 구한다. 이러한 과정을 통해서 무작위 수(random number)를 달리하는 설계응답스펙트럼에 적합한 3개의 파워스펙트럼을 산정하여 이를 평균한 평균 파워스펙트럼을 구할 수 있다.

$$X_i(t) = I(t) \cdot \left(\sqrt{2} \sum_{m=1}^N \sqrt{PS_i(w_m)} \Delta w \cdot \cos(w_m t + \zeta_m) \right) \quad (13)$$

$$PS_{i+1}(w) = PS_i(w) \left(\frac{RS_i(w)}{RS_i(w)} \right)^k$$

(단, $k=2$: Saito and Wen) (14)

그림 4에 El Centro 와 Taft 지진기록을 이용한 대상 설계응답스펙트럼과 조정된 파워스펙트럼을 가지는 파의 응답스펙트럼을 비교하였고 그림 5에 설계응답스펙트럼에 맞는 평균 파워스펙트럼을 나타내었다. 그림에서와 보면 조정된 파워스펙트럼을 가지는 파의 응답스펙트럼이 대상 설계응답스펙트럼과 유사함을 알 수 있다. 이러한 평균 파워스펙트럼은 식 (8)의 Clough-Penzien 파워스펙트럼 변수 ($S_0, w_g, \zeta_g, w_f, \zeta_f$) 결정에 이용되어 3장의 Yeh 지반운동 모델을 통해서 Nonstationary Random Process를 이용한 인공지진파 발생에 사용되어질 수 있다.

6. 결론

Nonstationary Random Process를 이용한 인공지진파 발생을 위한 설계응답스펙트럼에 의한 파워스펙트럼의 조정에 관한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) Yeh의 지반운동모델을 통해 실제 지진 기록을 이용한 인공지진파를 발생시킬 수 있다. 하지만 이러한 인공지진파의 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼과 다르므로 설계응답스펙트럼에 맞게 조정될 필요가 있다.

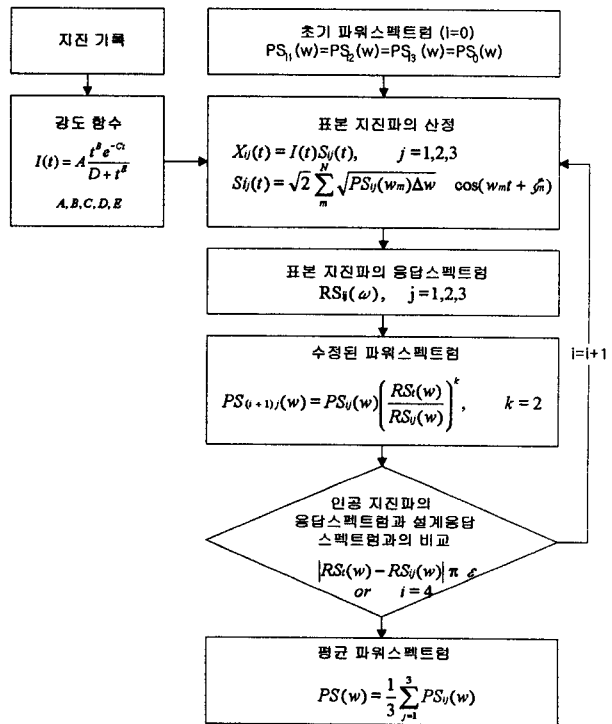
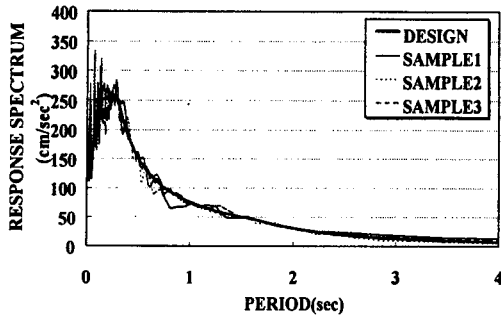
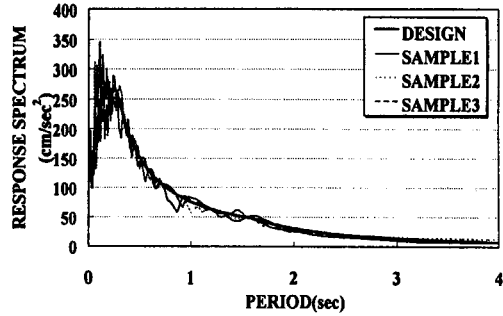


그림 3. 설계응답스펙트럼에 의한 파워스펙트럼의 조정

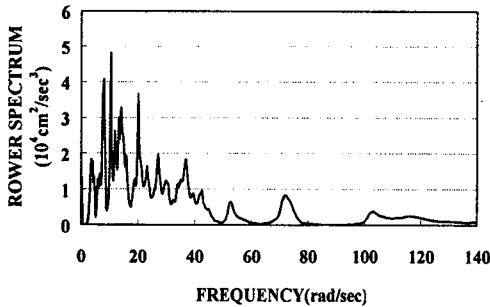


(a) El Centro

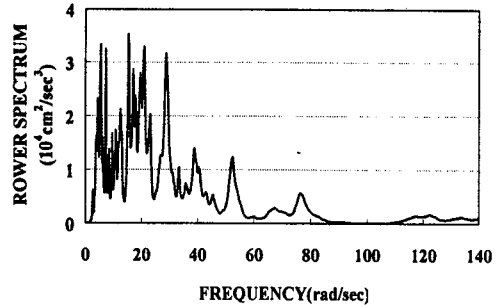


(b) Taft

그림 4. 조정된 파워스펙트럼을 가지는 파의 응답스펙트럼



(a) El Centro



(b) Taft

그림 5. 평균응답스펙트럼

- (2) 임의의 파워스펙트럼과 특정한 강도함수를 가지는 파의 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼을 비교하여 파워스펙트럼을 조정함으로써 설계응답스펙트럼에 맞는 지진파 생성을 위한 파워스펙트럼을 만들 수 있었다.
- (3) 특정한 지역에서 기록된 지진파와 그 지역의 설계응답스펙트럼으로부터 강도함수, 주파수 빈도함수, 파워스펙트럼 함수 등을 구하여 그 지역의 특성을 가지는 인공지진파를 발생시킬 수 있을 것이다.

[감사의 글]

본 연구는 한양대 초대형구조시스템연구센터와 건설교통부 국책 과제 지원에 의한 것으로서 이에 감사드립니다.

[참고문헌]

1. Taiki Saito, and Wen, Y.K. (1994), "Seismic Risk Evaluation of R.C. Buildings in Japan designed in accordance with 1990 AIJ guidelines", Structural Research series No.587, Civil Eng., Urbana-champaign, Illinois, pp. 4-31
2. Yeh, C.H., and Wen, Y.K. (1990), "Modeling of non-stationary ground motion and analysis of inelastic structural response", Structural Safety, pp. 281~298
3. Applied Technology Council, "ATC 14 : Evaluating the Seismic Resistance of Existing Building", ATC, 1987
4. 건설부(1987), "내진설계 지침서 작성에 관한 연구", pp. 29-54
5. 공도환, 한상환, 이리형(1998), "내진설계를 위한 지진 입력하중 조정 방법", 1998년도 추계 학술발표회, 한국지진공학회, Vol.2., No2., pp.20-27