

## 국내 지진 기록을 이용한 약진 지역에서의 인공지진과 발생에 관한 연구

### Generation of Artificial Earthquake Ground Motions for the Area with Low Seismicity

김승훈\*      이승창\*\*      한상환\*\*\*      이리형\*\*\*  
Kim, Seung-Hun    Lee, Seung-Chang    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. This model is based on the simulation for the strong-motion earthquakes with magnitude greater than approximately 5.0~6.0, because it will be not only expected to cause structural damage but also involved the characteristics of earthquake motions. Also, the recorded earthquake motion within this range are still very scarce in Korea. Thus, it is necessary to verify the model by the application of it to the mid-magnitude (approximately 4.0~6.0) earthquakes actually recorded in domestic or foreign area. The purpose of the paper is to generate an artificial earthquake using the model of Yeh and Wen in the area with low seismicity.

Keywords : stochastic ground motion model, artificial earthquake, low seismicity

#### 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 지진 기록이 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(non-stationary)한 특성을 가지고 있다. 1970년대 이후 많은 연구자들에 의해 지진에 대한 부정형 모델이 제시되어 왔다. 특히, Yeh와 Wen(1990)은 부정형한 특성을 나타내기 위해서 강도함수, 주파수 변조함수, 파워 스펙트럼 밀도 함수로 이루어지는 부정형한 확률론적 지반운동 모델을 제안하였다. 주로 지진 규모(magnitude) 약 5.0~6.0 이상의 크기를 가진 강진 등이 구조적 손상을 일으킬 수 있고, 지반운동의 특성을 명확하게 나타내기 때문에 이 모델을 포함하여 대부분의 모델은 강진을 시뮬레이션 대상으로 개발되었다. 그러나 국내에서 발생한 가장

\* 한양대 건축공학과 박사과정

\*\* 한양대 초대형구조시스템연구센터 연구조교수

\*\*\* 한양대 건축공학부 교수

큰 지진들은 대부분 중간 정도의 규모(약 4.0~6.0 정도)를 가진 지진이기에 때문에 상기모델을 국내 지진기록에 적용할 수 있는가는 상당히 의문시된다.

따라서, 본 연구는 궁극적으로 국내 특성에 맞는 인공지진파를 발생하고자 하는 기초적 연구로서, 강진을 시뮬레이션 대상으로 개발한 기존모델을 약진 또는 중진에 적용하여 인공지진파를 발생한 후, 실제 기록과 비교·분석함으로써 모델의 적용 타당성을 검토하는 데 목적이 있다.

## 2. 국내의 지진기록

우리나라의 지진관측은 1905년 인천에 지진계가 설치된 이후 시작되었다. 그 후 1963년 3월 미국 지질조사소(USGS)가 전세계 지진관측망 구축 사업의 하나로 서울에 국제표준지진계(WWSS : World-Wide Standard Seismograph)를 설치하였고 1977년 일본 Katsujima사의 지진계 2대를 도입하여 서울과 광주에 설치하여 2점 관측을 실시하였다.

국내 지진은 연평균 17회 정도 발생되고 있으며, 사람이 느낄 수 있는 규모(規模) 3.0이상은 연평균 10회이고, 피해발생 우려가 있는 규모 5.0이상은 8-10년에 1회 정도로 발생된다. 규모 5.0이상으로 피해가 있었던 지진은 금세기 들어 총 4회('36년 쌍계사 5.1, '78년 홍성 5.0, '78년 속리산 5.2, '80년 삭주 5.0)가 발생되었으며, 최근 발생된 대표적 지진은 1978년의 홍성지진으로 건물 균열 등 피해가 있었다. 이와 같이 국내에서는 지진 규모 5.0 이상의 지진 기록이 미비하고 기록된 지진 자료도 노후화된 초기 측정장비로 측정되어진 것이어서 정밀하지 못하므로 실제 구조물 해석에 사용하기에는 부족한 점이 많다.

본 연구에서는 1997년 6월 26일에 경주 남동쪽 9km 지점에서 발생한 지진규모 4.2의 경주 지진기록과 국외의 지진규모가 5인 Alaska 지진파(1964년)를 대상지진파로 하여 인공지진파를 발생시켰다.

## 3. 인공 지진파 발생 모델

시간에 따른 불확실한 지반운동을 모델링하기 위하여 여러 종류의 stationary 또는 nonstationary의 확률론적 지반운동 모델들이 적용·발전되어왔다. 1947년 Housner와 1960년 Bycroft에 의해 stationary white-noise ground-motion 모델이 제기되었으며, 지반운동의 지역적특성과 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 재생하지 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.

본 연구에서는 시간에 따라 강도와 주파수가 변화하는 non-stationary random process의 특성을 잘 나타

낼 수 있도록 지반운동을 강도함수(intensity function), 주파수 빈도함수(frequency modulation function), 파워 스펙트럼 밀도 함수(power spectral density function)의 세 개의 함수로 이루어진 Yeh의 모델을 이용하여 인공지진파를 발생하였다.

#### 4. 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.

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

##### 4.1 강도함수(Intensity Function, $I(t)$ )

지반 운동의 에너지는 다음 식과 같이 실제 지진기록을 제공하여 적분함으로써 구할 수 있다.

$$E[W(t)] = \int_0^t E[\xi^2(\tau)] d\tau \quad (2)$$

식 (1)과  $\zeta(\phi(t))$ 이 평균이 0, 분산이 1이므로 식 (3)과 같이 에너지함수가 강도함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[W(t)] &= \int_0^t I^2(\tau) E[\zeta^2(\phi(\tau))] d\tau \\ &= \int_0^t I^2(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (3)$$

강도함수 형태에 관해서 여러 가지 함수가 제안되었으나(Amin과 Ang, 1986; Shinozuka와 Sato, 1967; Saragoni와 Hart, 1974), 지반운동의 최대 강도를 종종 과소평가하는 경향이 있으므로 식 (4)와 같은 형태의 함수가 Yeh에 의해 제안되었다. 이 식의 계수 A, B, C, D, E는 실제 지진기록을 이용하여 비선형 최소 자승법(nonlinear least square method)에 의해 구할 수 있다. 그림 1은 El Centro 지진(1934)의 에너지와 식 (4)의 강도함수에 의한 에너지를 비교한 것이다.

$$I^2(t) = A \frac{t^B}{D + t^E} e^{-Ct} \quad (4)$$

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

시간에 따른 주파수 빈도함수를 결정하기 위해서는 실제 기록의 zero-crossing 방법(Saragoni와 Hart, 1974)이 사용된다. 시간 t에 관하여 zero-crossing한 총 수를 식 (5)와 같이 다항식으로 표현한  $\mu_0(t)$ 라고 할 때 주파수 빈도 함수는 식(6)과 같이 나타낸다.  $r_1, r_2, r_3$ 는 비선형 최소 자승법으로 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. 그림 2는 실제 El Centro 지진기록을 zero-crossing한 것과 식 (5)를 비교한 것이다.

$$\mu_0(t) = \gamma_1 t + \gamma_2 t^2 + \gamma_3 t^3 \quad (5)$$

$$\phi(t) = \frac{\mu_0(t)}{\mu'_0(t_0)} \quad (6)$$

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

제로 평균값과 스펙트럼 밀도  $S_0$ 를 가지는 Gaussian white noise( $\ddot{x}_\omega(t)$ )를 식 (7)의 Kanai-Tahimi

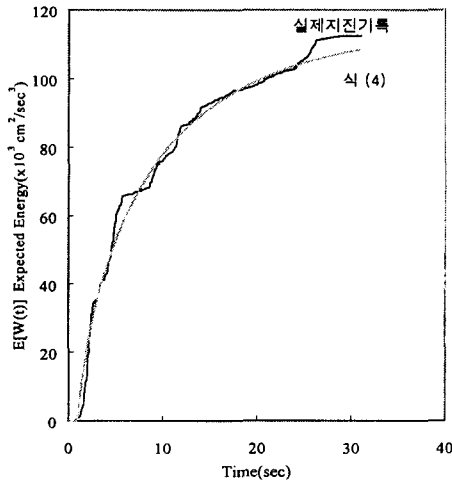


그림 1. El Centro 지진(1934)의 에너지

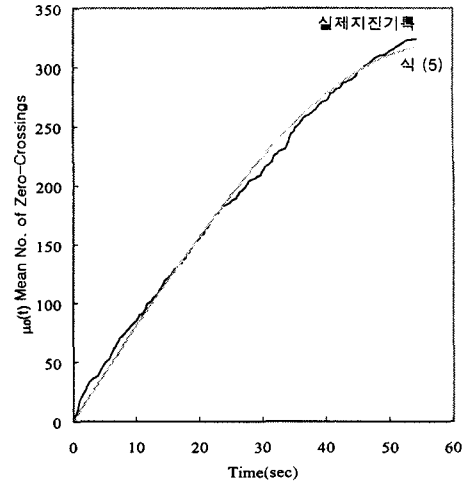


그림 2. El Centro 지진(1934)의 Zero-crossing

filter를 통과시킴으로써 지반의 특성에 변화되어진  $2\zeta_g\omega_g\dot{x}_g + \omega_g^2 x_g (= \ddot{\zeta}_{KT}(t))$ 의 파를 얻을 수 있다.

$$\ddot{x}_g + 2\zeta_g\omega_g\dot{x}_g + \omega_g^2 x_g = -\ddot{\zeta}_\omega(t) \quad (7)$$

이러한 Kanai-Tajimi filter는 지반운동의 낮은 주파수 부분의 거동을 잘 반영하지 못한다. 비록 지반 진동의 낮은 주파수 항목은 비록 선형 탄성 구조물의 반응에 영향이 거의 없다 하더라도 비선형 비탄성 구조물의 동적반응에 큰 영향을 미친다(Anderson and bertero, 1987; Iwan and Pappazizos, 1988).  $\omega=0$ 일 때의 특이점을 제거하기 위해 Clough와 Penzien은 식 (8)과 같은 high-pass filter를 통해  $\ddot{\zeta}_{KT}(t)$ 를 판명하였다. 식 (8)에 의해 filtered white noise( $2\zeta_f\omega_f\dot{x}_f + \omega_f^2 x_f + 2\zeta_g\omega_g\dot{x}_g + \omega_g^2 x_g = \ddot{\zeta}_{CP}(t)$ )가 발생된다.

$$\ddot{x}_f + 2\zeta_f\omega_f\dot{x}_f + \omega_f^2 x_f = -\ddot{\zeta}_{KT}(t) \quad (8)$$

단단한 지반 조건하에서 Hindy와 Novak(1980)은  $\omega_g = 15.46$  rad/sec,  $\zeta_g = 0.623$ ,  $\omega_f = 1.636$  rad/sec,  $\zeta_f = 0.619$ 의 값을 갖는다고 주장했다. Clough-Penzien filter에 의한 filtered white noise의 파워 스펙트럼 밀도는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{CP}(\omega) = S_0 \left[ \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2\omega_g^2\omega^2} \right] \left[ \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2\omega_f^2\omega^2} \right] \quad (9)$$

어느 특정한 순간에 Kanai-Tajimi 스펙트럼 형태와 Clough-Penzien 스펙트럼 형태를 갖게 하기 위하여 식 (7)과 (8)에 주파수 변도함수( $\phi(t)$ )를 사용하고, 이를 연쇄법칙을 사용하여 식 (10)과 (11)과 같이 시간(t)에 대한 nonstationary filtering 방정식을 만들 수 있다.

$$\frac{d^2x_g(t)}{dt^2} + \left( -\frac{\phi''(t)}{\phi'(t)} + 2\zeta_g\omega_g\phi'(t) \right) \frac{dx_g(t)}{dt} + [\omega_g\phi'(t)]^2 x_g(t) = -[\phi'(t)]^2 \ddot{\zeta}_\omega(\phi(t)) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2x_f(t)}{dt^2} + \left( -\frac{\phi''(t)}{\phi'(t)} + 2\zeta_f\omega_f\phi'(t) \right) \frac{dx_f(t)}{dt} + [\omega_f\phi'(t)]^2 x_f(t) \\ = -2\zeta_g\omega_g\phi'(t) \frac{dx_g(t)}{dt} - [\omega_g\phi'(t)]^2 x_g(t) \end{aligned} \quad (11)$$

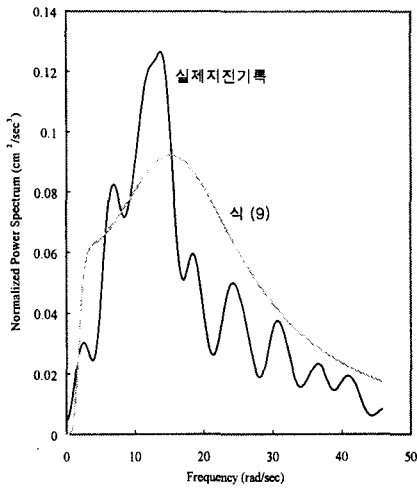


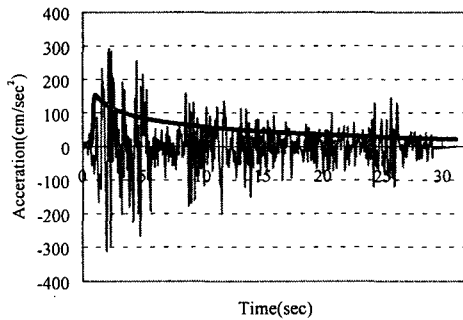
그림 3. El Centro 지진의 파워 스펙트럼 밀도함수

식 (10)~(11)로 부터 식 (12)와 같은 Clough-Penzien filter에 의해 필터링된 파( $\zeta(\phi(t))$ )가 생성된다.  $\zeta_\omega(\phi(t))$ 의 파워 스펙트럼 밀도함수는  $S_0/\phi'(t)$ 이고,  $\zeta(\phi(t))$ 의 파워 스펙트럼 밀도함수는 식(13)과 같다.

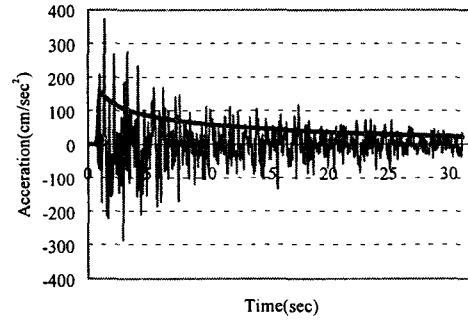
$$\zeta(\phi(t)) = 2\zeta_f \omega_f \frac{\dot{x}_f}{\phi'(t)} + \omega_f^2 x_f + 2\zeta_g \omega_g \frac{\dot{x}_g}{\phi'(t)} + \omega_g^2 x_g \quad (12)$$

$$S(t, \omega) = \frac{1}{\phi'(t)} S_{CP}\left(\frac{\omega}{\phi'(t)}\right) \quad (13)$$

이와 같은 과정을 통하여 식 (1)과 같은 인공지진파( $\xi(t)$ )를 생성할 수 있다. 그림 3은 기록된 El Centro 지진의 파워 스펙트럼 밀도와 식 (9)의 파워 스펙트럼 밀도함수를 나타낸 것이며, 그림 4는 실제 El Centro 지진기록과 Yeh 모델을 통해 생성된 인공지진파를 나타낸 것이다.



(a) 측정된 El Centro 지진

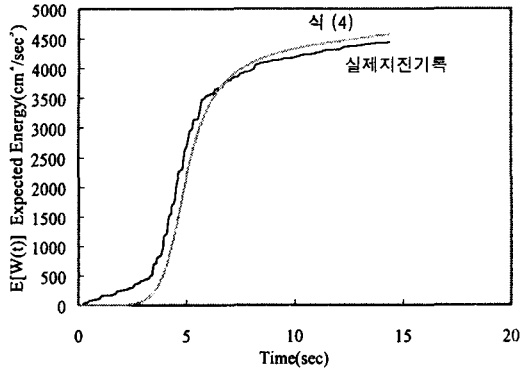


(b) 인공지진파

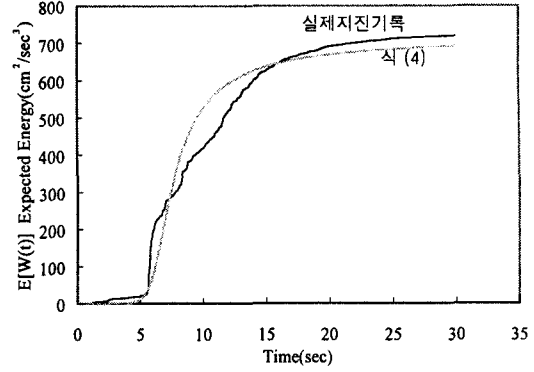
그림 4. El Centro 지진기록과 인공지진파

## 5. 인공지진파 발생

대상 지진파에 대해서 Yeh 모델을 이용하여 강도함수에 의한 지진파의 에너지와 주파수 빈도함수, 파워 스펙트럼 밀도함수를 구하여 그림 5~7과 같이 나타내었다. 파워 스펙트럼 밀도함수를 보아 경주 지진의 경우 고주파수에서 큰 밀도를 가지고 있었다. 이렇게 구해진 함수를 통해 대상 지진파에 대해서 3개의 인공지진파를 생성시켰다. 그림 8과 9는 기록된 대상 지진파와 생성된 인공지진파를 나타낸 것이고 그림 10은 기록된 지진파와 3개의 인공지진파의 응답가속도 스펙트럼을 나타낸 것이다. 실제 지진 기록에 의한 응답가속도와 인공지진파에 의한 응답가속도들의 평균 응답가속도를 비교해 볼 때 Alaska 지진의 경우 주기 0.5sec에서 차이가 났고 경주 지진의 경우 유사하게 나타났다. 그러므로 국내의 지반특성이 지진파의 생성에 주는 영향에 대한 분석이 더 진행되어 진다면 국내와 같은 약진 지역에서 중간정도의 지진규모에 대한 인공지진파 생성 시에 Yeh의 모델을 적용시킬 수 있다고 사료되어진다.

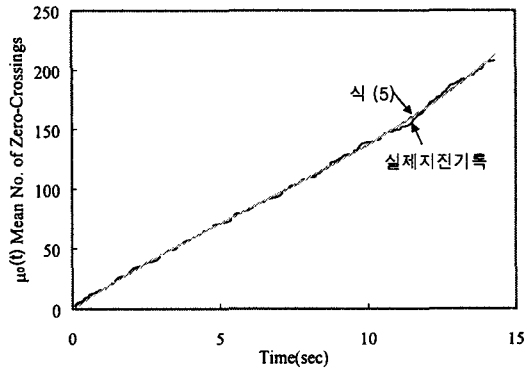


(a) Alaska 지진

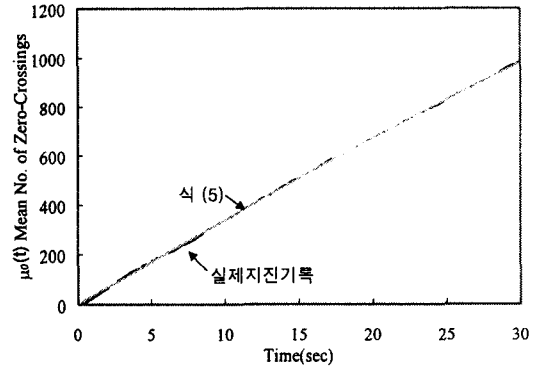


(b) 경주 지진

그림 5. 대상 지진파의 에너지

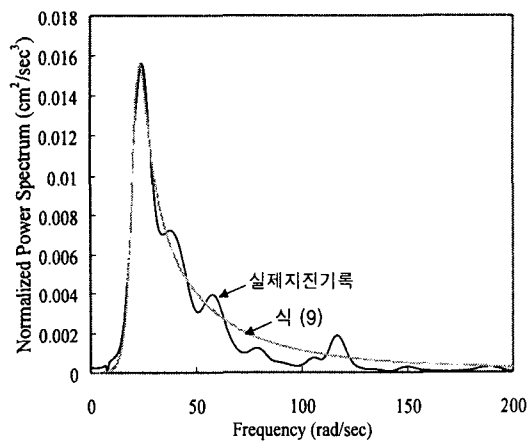


(a) Alaska 지진

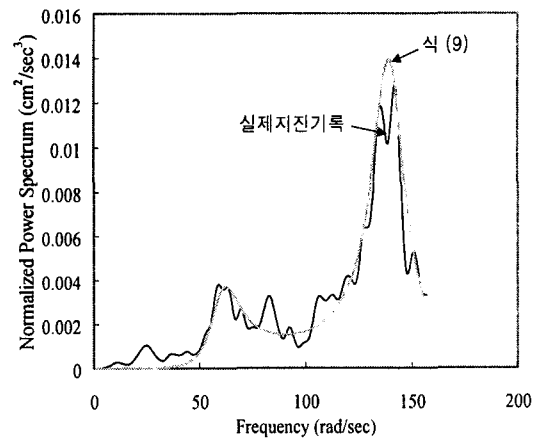


(b) 경주 지진

그림 6. 대상 지진파의 Zero-crossing

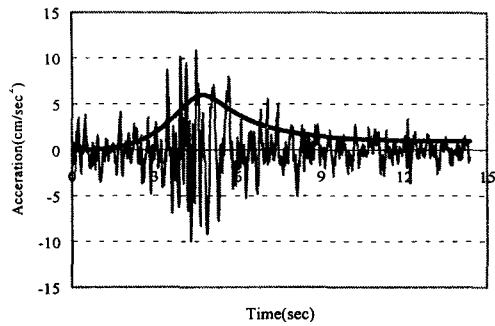


(a) Alaska 지진

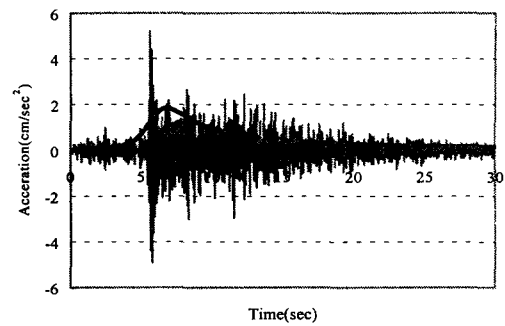


(b) 경주 지진

그림 7. 대상 지진파의 파워 스펙트럼 밀도함수

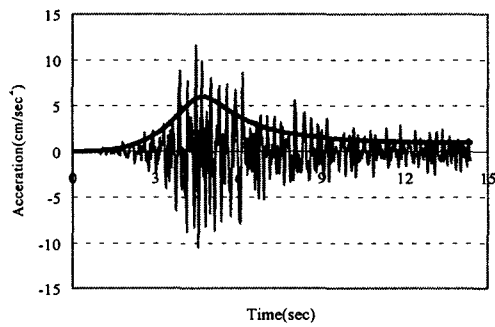


(a) Alaska 지진

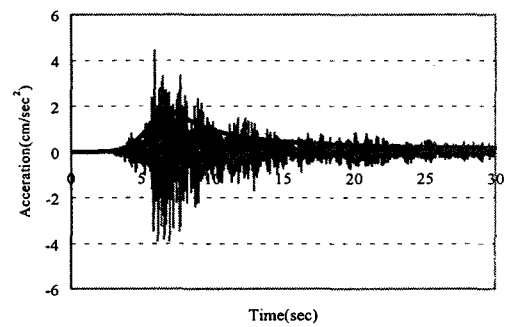


(b) 경주 지진

그림 8. 측정된 지진기록

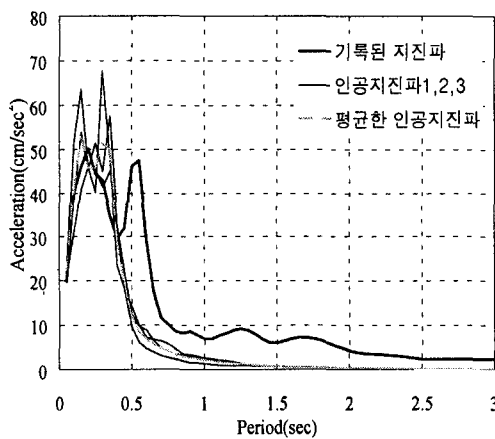


(a) Alaska 지진

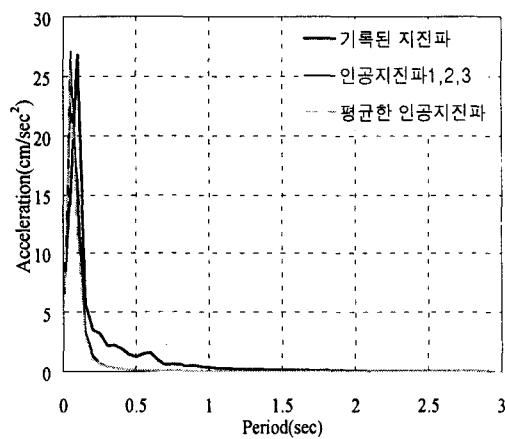


(b) 경주 지진

그림 9. 인공지진파



(a) Alaska 지진



(b) 경주 지진

그림 10. 지진파의 응답가속도 스펙트럼 비교

## 6. 결 론

본 연구는 강진을 시뮬레이션 대상으로 개발한 기존모델을 약진 또는 중진에 적용하여 인공지진파를 발생한 후, 실제 기록과 비교 분석함으로써 모델의 적용 타당성을 검토한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강진을 시뮬레이션 대상으로 개발된 기존 지반 운동 모델을 사용하여 중간 정도의 규모(규모 약 5.0 정도)의 지진에 대해 적용할 때, 지반 운동의 특성이 명확히 나타나는 경우에는 기존 모델로도 충분히 중간 정도 규모의 인공 지진을 발생할 수 있을 것으로 사료된다.
2. 인공 지진파를 사용하여 작성한 응답 스펙트럼의 경우에는 인공지진파 작성 초기에 입력하는 백색파(white noise)가 무작위로 발생하는 랜덤파이기 때문에 발생시마다 약간의 차이를 보이므로 여러번의 시도로 평균화한 응답스펙트럼을 실제 기록에 의한 응답 스펙트럼과 비교하는 것이 바람직하다.
3. 지반특성에 따른 좀 더 많은 국내 지진기록에 대한 시뮬레이션을 진행한다면 국내 지역특성에 맞는 인공 지진파를 제시할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

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

## 참 고 문 헌

1. Clough, R. W. and Penzien, J. (1993) Dynamics of Structures, McGraw-Hill Book Com.
2. Conte, J. P., Pister, K. S., and Mashin, S. A. (1992) Nonstationary ARMA modeling of seismic motions. J. Soil Dyn. and Earthquake Eng., Vol. 11, No. 7, pp. 411-426.
3. Conte, J. P., and Peng, B. F. (1997) Fully Nonstationary Analytical Earthquake Ground-Motion Model. J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 123, No. 1, pp. 15-24.
4. Der Kiureghian, A., and Crempien, J. (1989) An Evolutionary Model for Earthquake Ground Motion. Structural Safety, 6, Elsevier Sci. Pub., pp. 235-246.
5. Eliopoulos, D. F., and Wen, Y. K. (1991) Method of Seismic Reliability Evaluation for Moment Resisting Steel Frames, Structural Research series No.562, Civil Eng., Urbana-cham., Illinois, pp. 5~34
6. Housner, G.W. and Jennings, P.C., "Generation of Artificial Earthquakes," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.90, No.EM1, pp.113-150, February 1964.
7. Kanai, K., "Semi-empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground," Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol.35, 309-325, 1957
8. Lin, Y. K., and Yong, Y. (1987) Evolutionary Kanai-Tajimi earthquake models. J. Eng. Mech., ASCE, Vol. 113, No. 8, pp. 1119-1137.
9. Saragoni, G.R. and Hart, G.C., "Simulation of Artificial Earthquakes," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.2, pp.249-267, 1974. 9.
10. Trifunac, M. D., and Lee, V. W. (1989) Empirical Models for Scaling Fourier Amplitude Spectra of Strong Ground Acceleration in Terms of Earthquake Magnitude, Source to Station Distance, Site Intensity and Recording site Conditions, Soil Dynamics and Earthquake Eng., Computational Mechanics Publications, Vol. 8, No. 3
11. 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