

내진 설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파의 작성과 응답 특성 Simulation of Artificial Earthquake Wave Compatible with Seismic Design Spectrum and Its Response Characteristics

전대한* 강병두** 김재웅***

Jun, Dae Han Kang, Pyeong Doo Kim, Jae Ung

ABSTRACT

This study describes a generation of artificial earthquake wave compatible with seismic design spectrum. In seismic response analysis of building structures, the input ground accelerations have considerable effect on dynamic characteristics of structures. Therefore, it is important to properly select input ground motions for seismic response analysis. In this paper, the artificial earthquake wave are generated according to previously recorded earthquake waves in past earthquake events. The artificial wave have identical phase angles to the recorded earthquake wave, and their overall response spectra are compatible with seismic design spectrum with 5% of critical viscous damping.

Each simulated earthquake wave has a identical phase angles to the original recorded ground acceleration, and match to design response spectra in the range of period from 0.02 to 10.0 seconds. It is concluded that the artificial earthquake waves simulated in this paper are applicable as input ground motions for a seismic response analysis of building structures.

1. 서론

지진동은 지진에 의한 지표면의 흔들림을 나타내는 것으로 일반적으로 시간이력파형을 말한다. 하나의 시간이력파형은 특정한 지점의 흔들림을 나타내므로 하나의 시간이력파형만으로 합리적인 내진설계가 이루어질 수 있을 정도로 지진동을 정확히 예측하는 것은 불가능하다. 그러므로 지진 발생 원인과 위치에 따른 차이를 반영하여 여러 개의 지진이력파형을 이용하여 지진응답해석을 수행하고 있다. 실제 설계에서는 진원으로부터의 거리에 따라 원거리 지진동, 근거리 지진동 등으로 구별한 여러 개의 지진파를 사용하여 응답을 평가하고 있다. 이것은 지진에 의해 야기된 지진파가 전달되는 과정에서 발생하는 지진동의 특성을 반영하기 위한 것이다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 이 때 지진응답해

* 정희원, 동서대학교 건축공학과, 부교수

** 정희원, 가창전문대학 건축인테리어과, 부교수

*** 정희원, 동아대학교 건축학부, 교수

석에 사용하는 시간이력파형이 실제 건설 예정지에 발생할 수 있는 지진동과 어느 정도의 차이가 있는지를 검토하는 것이 중요하다.

또한 지진동은 설계용 응답스펙트럼으로 표현될 수 있다. 일반적으로 하나의 시간이력파형에 대응하는 유일한 응답스펙트럼을 계산할 수 있지만, 반대로 설계용 응답스펙트럼이 주어져도 대응하는 유일한 시간이력파형은 결정될 수 없다. 설계용 스펙트럼은 많은 시간이력파형을 사용하여 작성되는 것이며, 특정한 시간이력파형을 나타내는 것은 아니다. 지진동을 설계용 스펙트럼으로 표현하는 이점은 지진하중과 변형을 동시에 결정할 수 있는 것이다. 현재 실무에서는 설계용 응답스펙트럼을 이용하여 지진하중을 결정하고 있으며 시간이력파형을 사용하는 경우는 특별한 경우에 해당된다.

그러나 최근 건축물의 고층화와 평면 및 입면의 비정형성은 지진동에 의한 건축물의 동적 거동을 복잡하게 하고, 이러한 건축물의 내진 안전성을 정확히 평가하기 위해서는 동적 시간이력응답 해석을 요구한다. 본 연구에서는 설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파를 간편하게 다량으로 발생시킬 수 있는 방법을 제시한다. 설정된 설계용 응답스펙트럼에 매우 근접한 인공지진동 파형을 작성하고, 작성된 파형을 구조물의 지진응답해석에 사용하여 그 타당성을 확인하는 것이 목적이다. 본 연구에서는 과거의 지진에서 얻어진 지진동파형과 동일한 위상특성을 가지면서 설계용 스펙트럼에 매우 근접한 응답스펙트럼을 나타내는 인공지진동파형을 간편하게 작성하는 방법을 제안한다. 본 연구의 특징은 기록지진동파형과 같이 다양한 위상을 갖는 인공지진동을 간편하게 작성할 수 있으며, 내진설계 범위내의 주기영역을 모두 포함하는 인공지진동을 대량으로 작성할 수 있다는 것이다.

2. 인공지진파의 작성

2.1 인공지진파 작성 수법

본 연구에서 사용하는 인공지진파 작성법은 이론적 배경이나 기본 원리에서 참고문헌 12의 방법과 동일하다. 즉 과거의 지진에서 기록된 기록지진동의 위상특성을 그대로 유지하면서 구조물의 응답과 밀접한 관계가 있는 지진동의 가속도 응답스펙트럼이 설계용 응답스펙트럼과 유사하게 되도록 기록지진동의 진폭 성분을 변화시키는 방법이다.

과거의 지진에서 기록된 지반가속도파형($\ddot{u}_g(t)$)을 이산화 및 유한 푸리에(Fourier) 근사식으로 표현하면, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{u}_g(t) = \sum_{k=0}^{n-1} a_k \cos(\omega_k + \phi_k) \quad (1)$$

여기서, a_k : k 차의 Fourier 진폭

ω_k : k 차의 Fourier 원진동수

ϕ_k : k 차의 Fourier 위상각

식 (1)에서 얻어지는 인자들 중에서 위상각 성분(ϕ_k)은 그대로 유지하면서 건축물의 설계에 사용되는 주기영역 $T=0.02\sim 10.0$ sec 사이의 Fourier 진폭(a_k)을 조정하여 설정된 설계용 가속도 응답스펙트럼과 일치하도록 한 후, Fourier 역변환으로 인공지진동파형을 생성한다. 여기서

Fourier 진폭은 다음 식과 같이 계산하여 조정한다.

$$a_k' = \frac{S_{AT}}{S_A} a_k \quad (2)$$

여기서, a_k' : 수정된 Fourier 진폭

a_k : 원 기록지진동의 Fourier 진폭

S_{AT} : 설계용 가속도응답스펙트럼

S_A : 기록 지진동파형 또는 수정된 파형의 가속도응답스펙트럼

식 (2)에서 수정된 진폭을 사용하여 Fourier 역변환을 하면, 수정된 인공지진동 가속도파형이 생성된다. 이 파형을 이용하여 지진응답해석을 수행하여 가속도응답스펙트럼을 다시 계산하여 설계용 가속도응답스펙트럼과의 적합도를 확인한다. 이와 같은 계산 과정을 반복하여 최종적으로 설계용 가속도응답스펙트럼에 근접한 파형이 얻어질 때까지 계속한다. 그림 1은 인공지진동파형 작성 흐름을 참고문헌 12의 방법과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 참고문헌 12의 방법은 반복 횟수마다 Fourier 변환과 역변환이 반복되어 계산시간이 많이 걸렸지만, 본 연구에서는 초기 Fourier 변환 후, 설계용 가속도스펙트럼이 얻어질 때까지 Fourier 진폭만 변화시킨 후, Fourier 역변환만 반복되는 흐름을 따르도록 개선되었다. 이 결과 반복되는 Fourier 변환에 따른 위상특성의 수치적 오차가 발생하지 않았으며, 작성 시간도 많이 단축되었다. 또한 설계 대상 주기영역이 모두 포함된 설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진동파형을 단시간에 생성할 수 있었다.

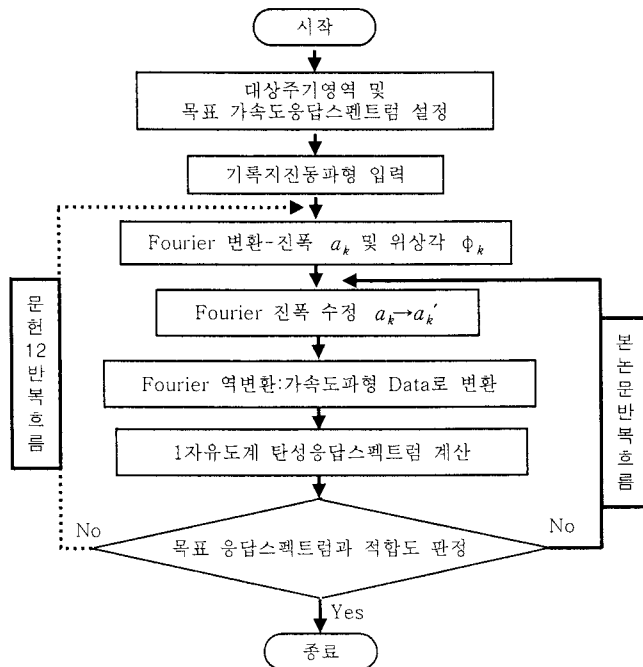


그림 1. 인공지진동파형 작성의 흐름

2.2 적합도 수렴 조건의 설정

본 연구에서는 인공지진동파형의 가속도응답스펙트럼이 설계용 가속도응답스펙트럼에 근사하도록 생성하는 것이다. 작성된 인공지진동파형의 응답스펙트럼과 설계용 가속도응답스펙트럼의 적합도를 판단하는 기준은 다음의 3가지 조건으로 판정한다.

(1) 최소 응답스펙트럼 비

$$\epsilon_{\min} = \left| \frac{S_A(T_i, 0.05)}{S_{AT}(T_i, 0.05)} \right|_{\min} \geq 0.85 \quad (3)$$

여기서,

$S_A(T_i, 0.05)$: 감쇠정수 5%일 때 주기 T_i 에서의 가속도응답스펙트럼

$S_{AT}(T_i, 0.05)$: 감쇠정수 5%일 때 주기 T_i 에서의 설계용 가속도응답스펙트럼

(2) 설계용 가속도응답스펙트럼과의 변동계수

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\epsilon_i - 1.0)^2}{N}} \leq 0.05 \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \epsilon_i = \frac{S_A(T_i, 0.05)}{S_{AT}(T_i, 0.05)} \quad (5)$$

N : 오차를 판정하는 주기 성분의 개수

(3) 평균값의 오차

$$|1 - \epsilon_{ave}| \leq 0.02 \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \epsilon_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_i}{N} \quad (7)$$

위의 적합도 판정은 설계용 가속도응답스펙트럼을 계산하는 주기 범위 $T_i=0.02\sim 10.0\text{sec}$ 사이에서 $N=250$ 개 정도로 계산하였다.

2.3 설계용 응답스펙트럼의 설정

일반적으로 내진설계 기준의 수평 지진하중은 설계용 가속도응답스펙트럼으로부터 유도된다. 그러므로 설계용 가속도응답스펙트럼에 근접한 인공지진동파형을 작성하여 건물의 동적응답특성을 평가하는 것은 그 의미가 있다. 여기서 작성하는 인공지진동파형은 임의로 주어지는 가속도응답스펙트럼에 적합하도록 작성할 수 있다.

본 연구에서는 일본 내진설계기준을 참고하여⁽⁴⁾, 다음과 같이 설계용 가속도스펙트럼을 설정하였다.

① $T_i < 0.16\text{sec}$: $S_{AT}(T_i, 0.05) = 320 + 3000 T_i$

② $0.16 \leq T_i < 0.64\text{sec}$: $S_{AT}(T_i, 0.05) = 800$

③ $0.64\text{sec} \leq T_i$: $S_{AT}(T_i, 0.05) = 512 / T_i$

이것을 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 감쇠정수 $h=5\%$ 에 대해 진동주기(T_i)에 따라 설계용 가속도응답스펙트럼 형상을 정의한 것이며, 진동주기에 따른 가속도응답스펙트럼 크기를 수정하면 지진활동이 다른

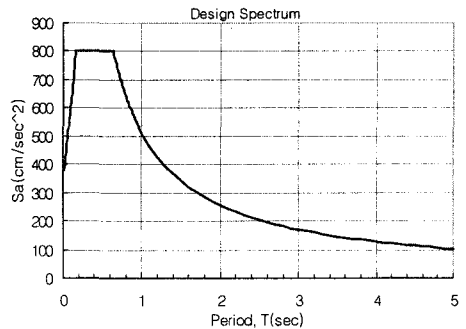


그림 2. 설계용 가속도응답스펙트럼

지역의 설계용 가속도응답스펙트럼으로 대체될 수 있을 것이다.

2.4 인공지진동파형 작성 예

위에서 기술한 작성방법에 따라 1995년 일본 고베(Kobe) 지진시 고베 항만에서 기록된 파형(JMA Kobe 1995 NS)을 이용하여 인공지진동파형을 생성시킨 예를 나타낸다. 여기서 기록지진동의 계속시간은 지진파에 따라 다르지만, 최대 가속도가 생기는 주요동 부분을 기준으로 60sec 가 되도록 조정하였다.

그림 3은 기록된 지진동파형의 지반 가속도, 속도, 변위 성분을 각각 나타낸 것이다. 그림 4는 식 (3)~(7)의 적합도를 판정하는 3가지 조건에 맞게 수렴되는 과정을 표시하고 있다. 실제 계산에서는 9번의 반복계산을 수행하여 설계용 응답스펙트럼에 적합한 인공지진동파형을 생성할 수 있었다.

그림 5는 각 주기 성분별로 Fourier 진폭과 위상각의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 Fourier 진폭은 각 주기 성분별로 변동되었지만, 위상각은 전혀 변화가 없는 것을 알 수 있다.

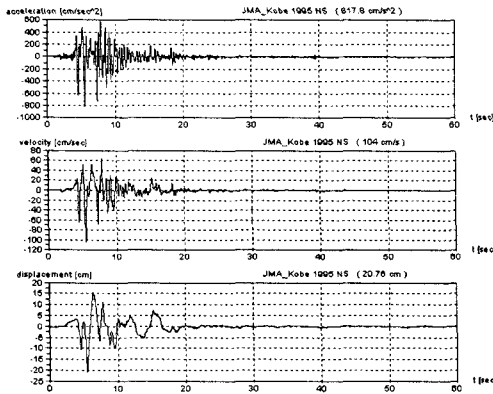


그림 3. 기록지진동의 가속도, 속도, 변위 시간이력

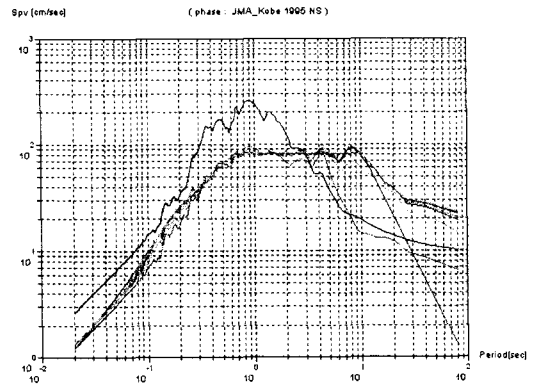


그림 4. 반복계산에 의해 설계용 스펙트럼에 수렴하는 과정

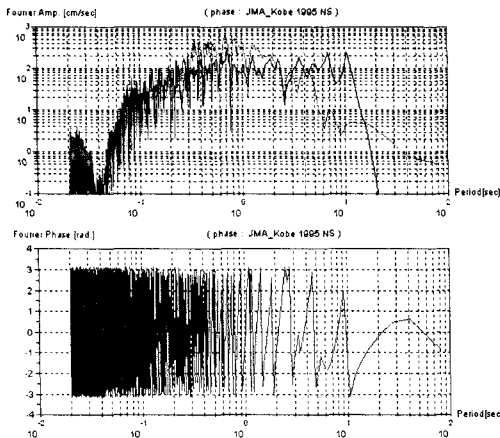


그림 5. Fourier 진폭스펙트럼과 위상각의 비교

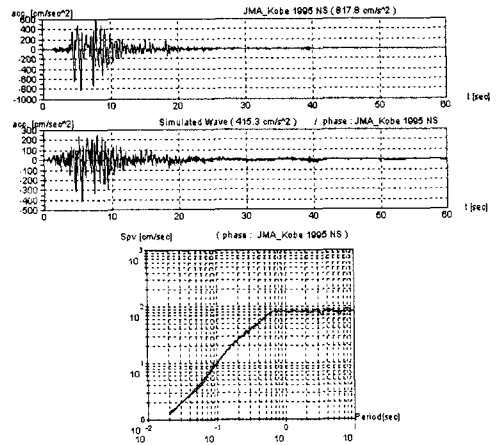


그림 6. 원 기록지진동과 인공지진동의 가속도파형 비교

그림 6은 최종적으로 얻어진 인공지진동파형의 가속도 성분과 원 기록지진동파형을 비교하여 나타내고 있다. 그림에서 가속도 성분은 원 기록지진동파형의 포락 형상과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 가속도 파형을 중심으로 지진동으로서의 타당성을 검토한다.

3. 작성된 인공지진동파형의 성질

3.1 인공지진동파형과 기록지진동파형의 비교

본 연구에서 선정된 기록지진동파형은 현재 내진설계에서 많이 사용되고 있는 대표적인 지진동 파형과 최근의 도시 직하형 지진에서 얻어진 지진동을 사용하여 작성한 몇 가지 파형을 제시한다. 그림 7, 8은 작성된 인공지진동파형과 기록지진동파형을 비교하여 나타내고, 아래에는 설계용 스펙트럼과 원 기록지진동의 응답스펙트럼 및 인공지진동의 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 지진동파형은 동일한 최대 지반 가속도를 가지도록 크기를 조정하여 표시했다. 그림에서 원 기록지진동파형과 인공지진동파형의 위상특성이 동일하기 때문에 포락형상은 매우 닮은 형상을 하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 기록지진동의 응답스펙트럼은 설계용 응답스펙트럼과 유사하게 수정된 것을 확인할 수 있다.

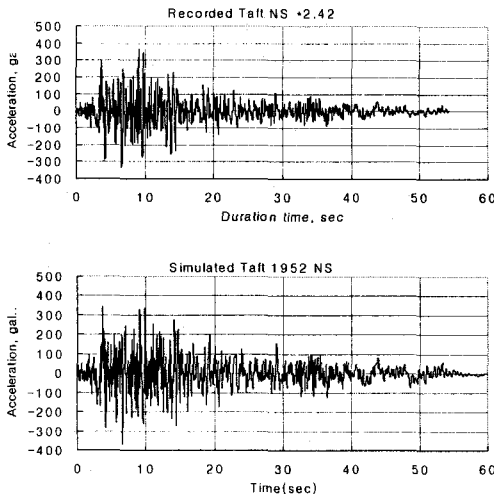


그림 7. Taft 1952 NS 성분

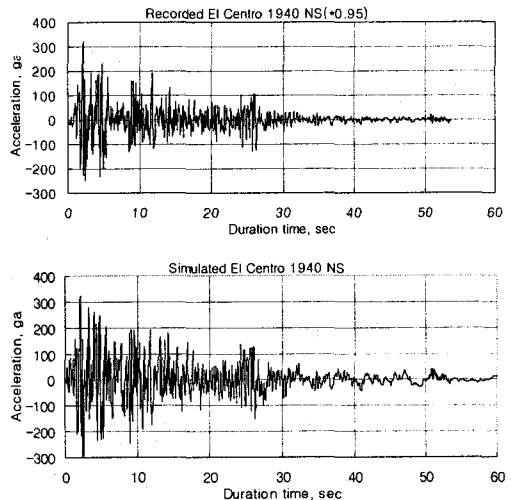


그림 8. El Centro 1940 NS 성분

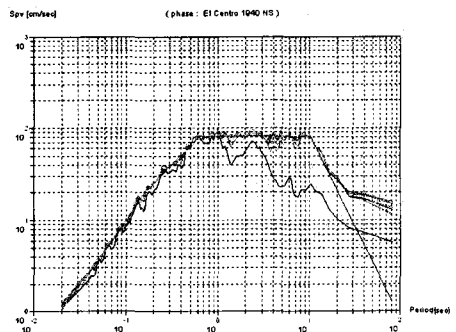
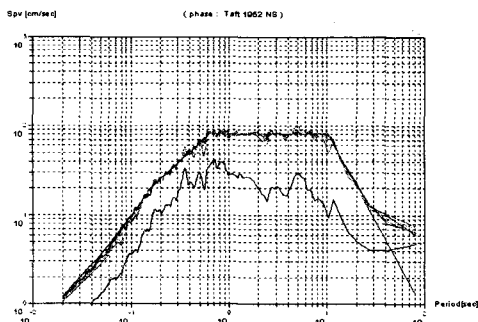


표 1은 동일한 설계용 응답스펙트럼으로 작성된 인공지진동의 최대 지반가속도 값과 발생시간을 기록지진동과 비교하여 나타내었다. 기록지진동의 최대 지반가속도 값은 실제 기록에서 얻어진 값이므로 다양한 크기를 나타내지만, 설계용 응답스펙트럼에 적합하게 작성된 인공지진동의 최대 가속도 값은 321~415cm/sec²의 범위에 있다. 기록지진동과 인공지진동의 최대 가속도 발생시간은 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

표 1. 기록지진동과 인공지진동의 최대가속도 값 비교
(단위: cm/sec², sec)

지진동과형 종류	기록지진동		인공지진동	
	최대값	시간	최대값	시간
JMA Kobe 1995 NS	819.1	4.94	415.3	5.54
JMA Kobe 1995 EW	617.1	8.46	401.1	8.47
Taft 1952 NS	152.7	9.10	369.3	6.62
Taft 1952 EW	175.9	3.70	426.3	3.71
El Centro 1940 NS	341.7	2.12	324.0	2.08
El Centro 1940 EW	210.1	11.44	321.6	2.03
Mexico city 1985 EW	167.9	28.08	336.6	33.38

3.2 인공지진동과형의 탄성 응답특성

그림 9는 El Centro 1940 NS 기록지진파와 인공지진파에 의한 에너지응답 이력을 대비시켜 나타낸 것이다. 초기 10초 동안은 거의 유사한 응답특성을 나타내지만, 이후에는 인공지진파의 총 입력에너지가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 인공지진파의 가속도과형에서 알 수 있는 바와 같이 10초 이후의 가속도 진폭이 증폭되었기 때문이다. 즉 인공지진동의 응답스펙트럼 특성이 설계용 스펙트럼과 일치되어 입력의 세기가 기록지진동보다 강해진 것을 의미한다.

그림 10은 Mexico City 1985 EW 기록지진파와 인공지진파에 의한 에너지응답 이력을 비교하여 나타내고 있다. 총 입력에너지는 약 11배 정도의 차이를 보이지만 입력에너지의 시간이력은 매우 유사한 특성을 나타낸다. 이것은 기록지진파와 인공지진파의 응답스펙트럼 특성에 따라 최대 응답치와 입력지진동의 강도는 다르지만, 두 지진파의 위상특성이 동일하기 때문에 에너지 이력응답도 유사한 응답특성을 나타낸다고 판단된다. 인공지진파의 총 입력에너지가 크게 증가된 것은 기록지진동보다 가속도과형의 진폭이 장, 단주기 성분에서 증폭되었기 때문에 지진동의 세기가 강해진 것을 의미한다.

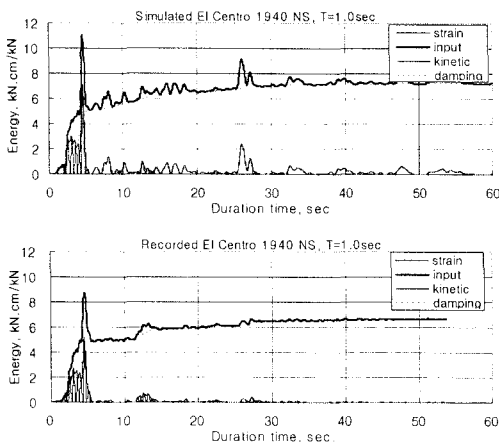


그림 9. El Centro 1940 NS에 의한 에너지 시간이력

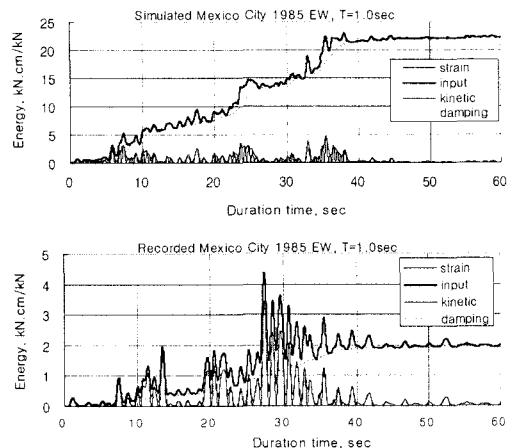


그림 10. Mexico City 1985 EW에 의한 에너지 시간이력

이상의 고찰에서 본 논문에서 작성한 인공지진동파형은 지진동으로서 활용가치가 높다고 볼 수 있다. 즉 기록지진동의 위상특성을 활용한 인공지진동파형은 구조물의 지진응답해석용 입력지진동으로서 타당성이 있다고 사료된다. 그리고 동일한 응답스펙트럼 특성을 갖는 지진동을 입력하게 되기 때문에 구조물의 응답에 미치는 다른 영향 요인들을 규명할 수 있을 것으로 본다.

4. 결 론

건축구조물의 내진설계는 지진에 의한 건축물의 동적거동에 근거하고 있다. 입력지진동의 특성과 구조물의 동적 성질은 구조물의 지진응답을 좌우하는 중요한 요소이다. 구조물의 지진응답에 사용되는 지진동은 지진의 발생 메카니즘과 전달경로, 지반의 증폭특성에 따라 다양한 특색을 포함하고 있어 정량적으로 규정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 내진설계에서는 일반적으로 설계용 응답스펙트럼으로 그 특성을 표현하고 있다.

본 연구에서는 건축구조물의 내진설계에서 규정하는 설계용 스펙트럼과 유사한 응답스펙트럼을 갖는 인공지진동파형을 작성하는 방법을 제시하였다. 지진동의 시간이력 특성을 규정하는 위상특성은 과거의 지진에서 얻어진 기록지진동과 동일한 위상각을 갖도록 하였다. 서로 다른 위상 특성을 가지면서 동일한 응답스펙트럼을 갖는 인공지진동을 간편하게 작성할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 인공지진동에 의한 시간이력해석을 수행하여 구조물의 지진응답해석용 입력지진동으로서의 타당성을 확인하였다.

참고문헌

1. 日本建築學會, 地震荷重-その現狀と將來の展望, 1987, 東京.
2. 日本建築學會, 地震荷重-地震動の予測と建築物の応答, 1992, 東京.
3. 大崎順彦, “設計用入力地震動”, 콘크리트工学, Vol.19, No.7, 1981.6, pp.11-16.
4. 日本建築學會, 鐵筋콘크리트建造物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004, 東京.
5. 理論地震動研究会編, 地震動-その合成と波形處理, 鹿島出版會, 1994, 2. 東京.
6. 日本建築學會, 地震動と地盤-地盤震動シンポジウム10年の歩み-, 1983, 東京.
7. 김진만, “인공지진파 생성기법”, 한국지진공학회 2004년도 Workshop 발표집, pp.246-261.
8. Stewart, J.P., Chiou, S., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., and Abrahamson, N.A., Ground motion evaluation procedures for performance-based design, PEER-2001/09, PEERC, University of California, 2001
9. Tsai, N.C., “Spectrum Compatible Motions for Design Purposes”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.98, No.EM2, Apr., 1972, pp.345-356.
10. Andre Preumont, “The Generation of Spectrum Compatible Accelerograms for the Design of Nuclear Power Plants”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.12, 1984, pp.481-497.
11. Barenberg, M.E., “Inelastic Response of a Spectrum-Compatible Artificial Accelerogram”, Earthquake Spectra, Vol.5, No.3, 1989, pp.477-493.
12. 전대한 외2, “건축구조물의 地震應答 해석용 模擬地震動에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집, 제8권 11호, 1992. 11. pp. 111-120.
13. Vanmarke, E. H. and Gasparini, D. A., “A Program for Artificial Motion Generation, User’s Manual and Documentation,” Dept. of Civil Engineering, Massachusettes Institute of Technology, 1976.