

설계용 스펙트럼에 적합한 인공지진파에 의한 비선형 응답 특성의 분석

Nonlinear Response Spectra of Artificial Earthquake Waves Compatible with Design Spectrum

전대한¹⁾ · 강병두²⁾ · 김재웅³⁾

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

국문 요약 >> 건축구조물의 비선형 지진응답해석에서 입력지진동은 구조물의 탄소성 지진응답을 좌우하는 중요한 요소이다. 지진동파형은 지진발생과 전파경로에 따른 여러 가지 인자에 의해 그 특성이 결정되기 때문에 구조물의 지진응답해석에서 일반성을 갖는 입력지진동을 선정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 본 논문은 내진설계용 스펙트럼에 대응하는 인공지진동파형을 작성한 후, 작성된 인공지진동에 대한 탄소성 응답스펙트럼 특성을 분석한 것이다. 여기서 작성된 인공지진동파형은 과거의 지진에서 얻어진 기록지진동파형을 이용하여 기록지진동과 동일한 위상각을 가지며, 감쇠정수 $\eta=5\%$ 일 때의 내진설계용 스펙트럼과 거의 일치하도록 작성되었다. 작성된 인공지진동은 원 기록지진동과 동일한 위상각을 가지며, 주기 $T=0.02\sim 10.0\text{sec}$ 범위에서 설계용 스펙트럼과 매우 근접하게 작성되었다. 인공지진동을 입력한 1자유도계의 탄성 및 탄소성 지진응답해석을 수행하여 탄소성 응답스펙트럼 및 탄소성 응답 특성을 분석하였다. 본 논문에서 작성된 인공지진동은 건축구조물의 탄소성 지진응답해석용 입력지진동으로 충분히 타당성이 있다고 사료된다.

주요어 인공지진파, 위상특성, 설계용 스펙트럼, 탄소성 지진응답

ABSTRACT >> In seismic response analysis of building structures, the input ground accelerations have considerable effect on the nonlinear response characteristics of structures. The characteristics of soil and the locality of the site where those ground motions were recorded affect on the contents of earthquake waves. Therefore, it is difficult to select appropriate input ground motions for seismic response analysis. This study describes a generation of artificial earthquake wave compatible with seismic design spectrum, and also evaluates the nonlinear response spectra by the simulated earthquake motions. The artificial earthquake wave are generated according to the 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% critical viscous damping. Each simulated earthquake wave has a identical phase angles to the original recorded ground acceleration, and match to design spectra in the range of period from 0.02 to 10.0 seconds. The seismic response analysis is performed to examine the nonlinear response characteristics of SDOF system subjected to the simulated earthquake waves. It was concluded that the artificial earthquake waves simulated in this paper are applicable as input ground motions for a seismic response analysis of building structures.

Key words artificial earthquake wave, phase angles, design spectrum, nonlinear seismic response

1. 서론

1.1 연구 배경 및 연구 목적

지진동이란 지진에 의해 전달된 특정 지역 지표면의 흔들

림을 시간이력파형으로 나타낸 것이다. 즉 지진동은 하나의 지진에 의한 특정 지역 지표면의 진동에 불과하며, 구조물의 내진 안전성을 보장할 수 있는 일반적인 시간이력파형을 나타내는 것은 아니다. 그러므로 지진발생 메카니즘(Mechanism), 진앙 위치, 지반의 성질 등에 따른 차이를 반영하기 위하여 여러 개의 시간이력파형을 입력한 지진응답해석을 수행하여 내진안전성을 확인해야 한다. 실제 내진설계에서는 진원으로부터의 거리에 따라 원거리 지진동, 근거리 지진동 등으로 구별한 여러 개의 시간이력파형을 사용하여 응답을 평가하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 이것은 지진에 의해 야기된 지진파가 전달

¹⁾ 정회원·동서대학교 건축공학과, 부교수
(대표저자: jdh@dongseo.ac.kr)

²⁾ 정회원·가천전문대학 건축·인테리어과, 부교수

³⁾ 정회원·동아대학교 건축학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 6. 7 / 심사종료일 : 2006. 7. 27)

되는 과정에서 발생하는 지진동의 특성을 반영하기 위한 것이다. 이 때 지진응답해석에 사용된 시간이력파형이 실제 건설 예정지에서 발생할 수 있는 지진동과 어느 정도의 차이가 있는지를 검토하여 선정하는 것이 중요하다.

다른 한편으로 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 시간이력파형의 응답스펙트럼을 의미하는 것은 아니다. 지진동을 설계용 스펙트럼으로 표현하는 장점은 지진하중과 변형을 동시에 결정할 수 있는 것이다. 현재 설계기준에서는 설계용 응답스펙트럼을 이용하여 지진하중을 결정하고 있으며 시간이력파형은 특수한 경우에 사용된다.

· 그러나 건축물의 고층화와 평면 및 입면의 비정형성은 지진동에 의한 건축물의 동적 거동을 복잡하게 하고, 이와 같은 건축물의 내진성능을 확인하기 위해서는 동적 시간이력 응답해석을 요구한다. 또한 건축물의 내진설계용 지진하중은 지진동을 받는 건축물의 동적 지진응답을 고려하여 설정되어야 하므로 지진동에 의한 동적거동을 고려하여 평가되어야 한다. 따라서 건축물의 내진설계에서 입력지진동은 내진성능을 평가하는데 매우 중요한 인자이다.

본 연구에서는 설계용 가속도스펙트럼에 대응하는 인공지진파를 간편하게 대량으로 작성할 수 있는 방법을 제시한다. 설계기준에 설정된 설계용 가속도스펙트럼과 근사한 인공지진동 파형을 작성하고, 작성된 지진동파형의 비선형 지진응답스펙트럼을 분석하여, 시간이력해석용 입력지진동으로서의 타당성을 확인하는 것이 목적이다.

1.2 기존의 연구 고찰과 본 연구의 특징

지진은 자연현상으로 현 단계에서 그 규모와 발생 빈도 등을 정확히 예측할 수 없다. 그러나 현재까지의 연구 성과에 의하면 지진의 발생 메카니즘(Mechanism)은 어느 정도 알려져 있다. 지진은 단층의 미끄러짐 현상으로 발생하고, 지진동은 지진을 일으키는 단층인 진원에서 생겨 지각을 통해 전파되어 표층 지반특성의 영향을 받아 최종적으로 지표면에 도달된다. 진원에서 방출된 지진파는 지각내부를 통과하면서 전파경로와 감쇠에 의해 진폭이 감소되고, 그 특성이 변화된다. 지진동이 지각을 통과하는 순간에는 전단파 속도가 3.0~3.5km/sec 정도인데 비하여, 지표면 부근의 지반에서는 100~300m/sec 정도로 급격히 줄어들어 지표면에

도달할 때까지 지진동은 증폭된다. 그러므로 지진동파형 특성은 진원에서 지각내부를 통과하는 전파경로 특성과 지표면 부근 지반에서의 증폭 특성으로 분리하여 논의하는 것이 일반적이다.⁽⁵⁾ 즉 진원에서 발생한 지진동이 지각내부를 통과하는 과정과 지각 위를 덮고 있는 지반의 영향으로 증폭되는 과정으로 나누어 지진동의 특성을 규명하고 있다.

표층지반에서의 증폭 특성을 알기 위해서는 지각 상부에서 지표면까지의 지반구조를 알아야 한다. 실제 이와 같이 깊은 지반구조에 관한 자료는 많이 부족하지만, 현재까지의 연구결과에 의하면 깊은 표층 지반구조 때문에 지진동의 장주기 성분이 특히 증폭되는 것으로 알려져 있다. 지반의 전단파 속도는 지표면에 가까운 지반 상부로 올라올수록 서서히 작아지고, 특히 전단파 속도 760m/sec 정도 이상의 지반을 기반(Bed rock)이라 부른다.⁽⁵⁾

이와 같이 지진동파형은 매우 복잡한 과정을 거쳐 구조물에 도달하기 때문에 지진동이 건물에 미치는 영향을 규명하는데 어려움이 많으며, 그 성질을 정확히 규명하기 곤란하다. 그러므로 구조물의 설계에 사용하는 일반성을 갖는 입력지진동을 설정하는 것이 어렵다. 구조물 설계에 이용되는 지진파는 과거의 지진 발생에서 기록된 기록지진파와 인공적으로 작성된 인공지진파로 분류된다. 인공지진파 생성기법은 위에서 언급된 지진의 발생과 파동의 전파경로를 지진학적 모델로 생성하고, 다시 지표면 지반의 증폭특성을 반영하여 구조물에 입력되는 설계용 인공지진파를 작성할 수 있다.^(6,7) 그러나 이와 같이 지진동파형의 성질은 진원에서의 지진발생 메카니즘, 지각에서의 전달경로, 지반의 증폭특성 등이 서로 얽혀 건설지역에 장래 발생가능한 지진동 특성을 예측하는 것은 거의 불가능하다. 구조물 응답에 영향을 미치는 지진동의 주요한 인자는 지진동의 최대진폭 크기, 계속시간, 진동수 특성, 지진동파형의 포락 형상 등을 들 수 있다. 이러한 영향 인자를 고려하여 범용성을 갖는 설계용 입력지진동을 설정하는 것이 필요하지만, 현 단계에서는 아직 불가능하다. 또한 설계용 입력지진동은 다양한 구조재료와 구조형식에 능동적으로 대응할 수 있는 파형이 요구된다. 설계기준에서는 구조물의 설계용 지진하중을 산정할 때, 가속도 응답스펙트럼을 기준으로 제시되어 있다. 따라서 구조물의 동적응답해석에 사용하는 입력지진동은 설계용 지진하중과 상관성이 높은 지진동파형이 적합할 것으로 사료된다. 이러한 목적에 부합하는 인공지진동을 생성하는 기법이 많은 내진공학자들에 의해 연구되어 왔으며⁽⁸⁻¹¹⁾, 범용성을 갖는 인공지진동 작성 프로그램이 국내에서도 이용되고 있다.⁽¹²⁾ 그러나 이들 연구 성과는 다양한 지반 종류와 지진동의 영향인자를 반영한 다량의 인공지진동을 작성하는데 많

은 시간과 노력이 요구되어 비능률적이다.

본 연구에서는 과거의 지진에서 기록된 지진동파형과 동일한 위상특성을 가지면서 설계용 가속도스펙트럼에 매우 근접한 응답스펙트럼특성을 갖는 인공지진동파형을 간편하게 작성하는 새로운 방법을 제안한다. 본 연구의 특징은 기록지진동파형의 다양한 위상특성과 설계기준의 설계용 응답스펙트럼을 갖는 인공지진동을 대량으로 작성할 수 있다는 것이다. 본 논문은 기존의 연구⁽¹¹⁾에서 제시된 방법보다 위상특성의 변화가 전혀 없고, 설계용 가속도스펙트럼에 대응하는 여러 종류의 인공지진동파형을 간편하게 작성할 수 있었다. 작성된 인공지진동에 의한 탄소성 응답스펙트럼을 분석한 결과, 범용성을 갖는 입력지진동으로서 타당성이 있다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 인공지진파의 작성

2.1 인공지진파 작성 수법

본 연구의 인공지진동 작성법은 이론적 배경이나 기본 원리에서 참고문헌 11의 방법과 동일하다. 즉 과거의 지진에서 기록된 기록지진동의 위상특성을 그대로 유지하면서 구조물의 응답과 밀접한 관계가 있는 지진동의 가속도 응답스펙트럼이 설계용 응답스펙트럼과 유사하게 되도록 기록지진동의 가속도 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.

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

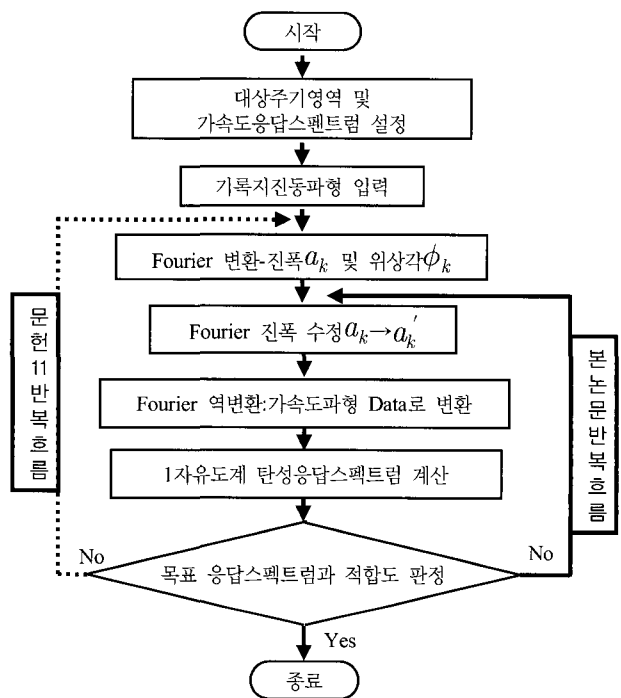
여기서, a_k : k 차의 Fourier 진폭
 w_k : k 차의 Fourier 원진동수
 ϕ_k : k 차의 Fourier 위상각

식 (1)에서 얻어지는 인자들 중에서 위상각 성분(ϕ_k)은 그대로 유지하면서 건축물의 설계에 사용되는 주기영역 $T=0.02 \sim 10.0\text{sec}$ 사이의 Fourier 진폭(a_k)을 조정하여 설정된 설계용 가속도응답스펙트럼과 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 계산한 후, 설계용 가속도응답스펙트럼과의 적합도를 확인한다. 이와 같은 계산 과정을 반복하여 최종적으로 설계용 가속도응답스펙트럼에 근접한 파형이 얻어질 때까지 계속한다. 그림 1은 인공지진동파형 작성 흐름을 참고문헌 11의 방법과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 참고문헌 11의 방법은 반복 횟수마다 Fourier 변환과 역변환이 반복되었지만, 본 연구에서는 초기 Fourier 변환 후, 설계용 가속도스펙트럼이 얻어질 때까지 Fourier 진폭만 변화시킨 후, Fourier 역변환만 반복되는 흐름을 따르도록 개선되었다. 이러한 Fourier 변환의 반복과정을 생략함으로써 인공지진동파형의 위상특성이 원 기록지진동파형의 위상특성을 그대로 유지하게 되었으며, 작성 시간도 단축되었다. 또한 설계 대상 주기영역을 모두 포함하는 설계용 가속도스펙트럼에 근사한 인공지진동파형을 간편하게 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.⁽¹³⁾

(i) 최소 응답스펙트럼 비

감쇠정수 5%를 갖는 1자유도계의 주기 성분별 가속도응답스펙트럼과 설계용 가속도응답스펙트럼의 비(ϵ_i)를 구하여, 최소값이 식 (3)을 만족하도록 설정한다.

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

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

(ii) 설계용 가속도응답스펙트럼과의 변동계수

인공지진동의 가속도응답스펙트럼과 설계용 가속도응답스펙트럼 비(ϵ_i)의 변동계수 값이 식 (4)를 만족하도록 한다.

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

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

N : 오차를 판정하는 주기 성분의 개수

(iii) 평균값의 오차

주기 성분별 스펙트럼 비의 평균값에 대한 오차가 식 (6)을 만족하도록 설정한다.

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

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

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

로 계산하였다.

2.3 설계용 응답스펙트럼의 설정

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

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

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

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

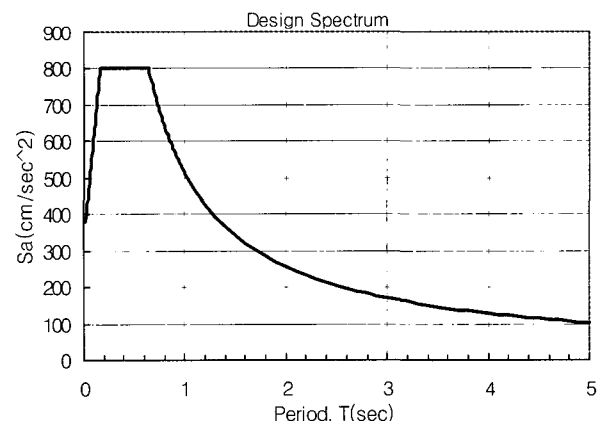
$$(i) 0.64\text{sec} \leq T_i \quad : S_{AT}(T_i, 0.05) = 512/T_i$$

이것을 그림으로 나타내면 그림 2와 같다. 감쇠정수 $\eta=5\%$ 에 대해 진동주기(T_i)에 따라 설계용 가속도응답스펙트럼 형상을 정의한 것이며, 진동주기에 따른 가속도응답스펙트럼 크기를 수정하면 다양한 지반특성과 지진활동이 다른 지역의 설계용 가속도응답스펙트럼으로 바꿀 수 있을 것이다.

3. 작성된 인공지진동파형의 성질

3.1 인공지진동파형과 기록지진동파형의 비교

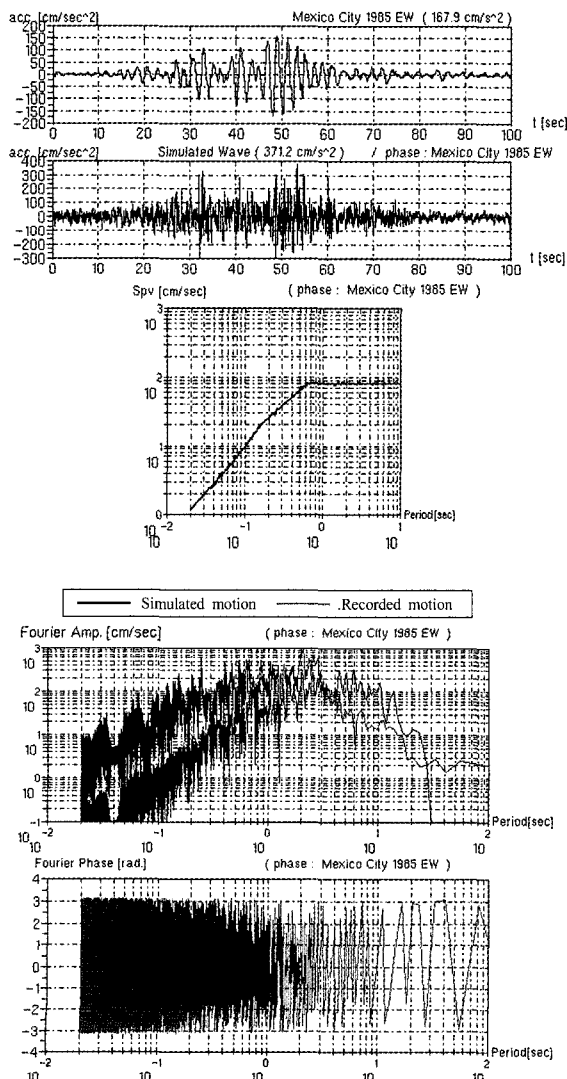
본 연구에서 선정한 기록지진동파형은 현재 내진설계에서 많이 사용되고 있는 대표적인 지진동파형과 최근의 도시직하형 지진에서 얻어진 지진동을 사용하여 작성한 몇 가지 파형을 제시한다. 그림 3~5는 작성된 인공지진동파형과 원 기록지진동파형을 비교하여 나타내고, 아래에는 설계용 스펙트럼과 인공지진동의 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸



(그림 2) 설계용 가속도응답스펙트럼

것이다. 그림에서 원 기록지진동파형과 인공지진동파형의 위상특성이 동일하기 때문에 포락형상은 매우 닮은 형상을 하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 기록지진동의 응답스펙트럼은 설계용 응답스펙트럼에 근접하게 수정된 것을 확인할 수 있다.

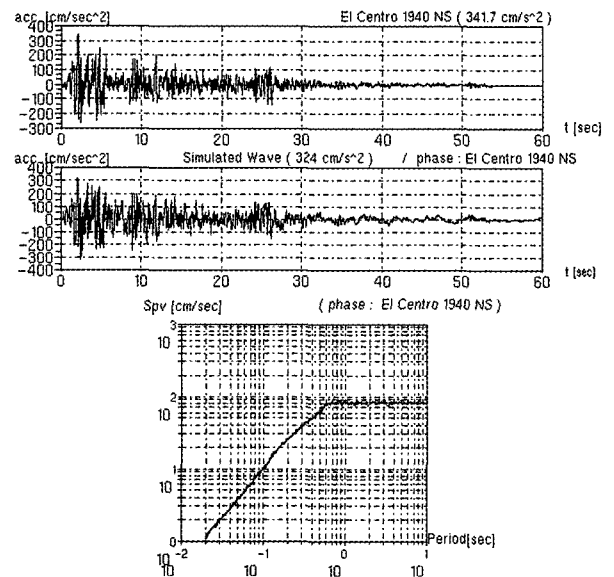
그림 3은 1985년의 Mexico 지진의 Mexico City에서 얻어진 기록지진동파형과 인공지진동파형을 나타내고 있다. 원 기록지진동의 계속시간은 180sec이지만, 여기서는 최대 가속도 값을 나타낸 시간의 전후 100sec 만을 이용하여 인공지진동파형을 작성한 것이다. Mexico 지진동은 기록지진동의 응답스펙트럼에서 알 수 있는 바와 같이 주기 2~3초 사이에서 큰 응답(피크)을 나타내고, 그 외의 주기 성분의 응답은 작은 값을 나타내는 특성을 가지고 있다. 기록지진동은 주기 2~3초 구간의 장주기 성분이 우세한 지진동파형인데 비하여 인공지진동파형은 피크 구간 외의 단주기 성분과 장주기 성분이 모두 증폭되었기 때문에 기록지진동과



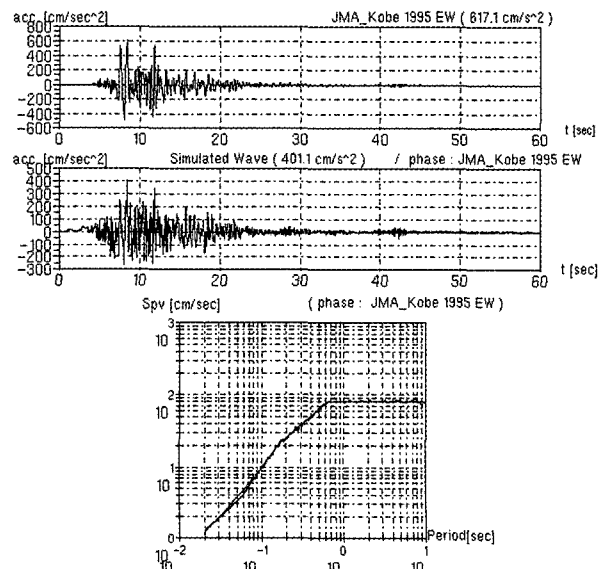
〈그림 3〉 Mexico City 1985 EW 성분

형보다 다양한 주기성분을 포함하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 Fourier 진폭스펙트럼은 단주기와 장주기 성분이 크게 증폭된 것을 확인할 수 있으며, 위상각은 변화가 없는 것을 그림으로부터 확인할 수 있다.

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 324~415cm/sec²의 범위에 있다. 기록지진동과 인공지진동의 최대 가속도 값의 발생시간은 El Centro 1940 EW 파형을 제외하면 거의 근접한 시간에서 생기는



〈그림 4〉 El Centro 1940 NS 성분



〈그림 5〉 JMA Kobe 1995 EW 성분

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

지진동파형 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

것을 확인할 수 있다.

3.2 인공지진동파형의 탄소성 응답특성

여기서는 인공지진동파형과 기록지진동파형을 입력한 1자유도계의 탄소성 응답해석을 수행하여 인공지진파의 지진응답특성을 검토한다.

일반적으로 입력지진동에 대한 비선형 응답특성을 나타내는 지표로써 항복강도계수 C_y (yield strength coefficient)가 많이 이용된다.⁽¹⁴⁾ 항복강도계수는 동일한 강도의 입력지진동에 대하여 소성율(Ductility)이 일정하게 되도록 진동모

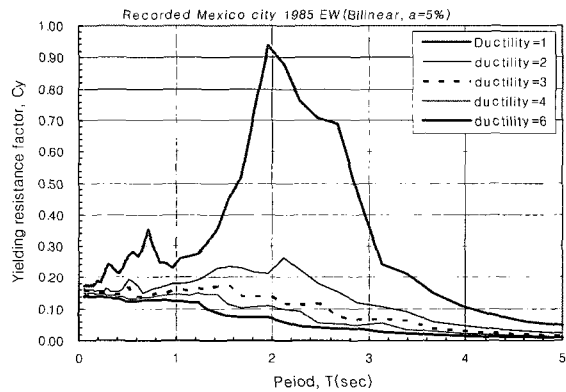
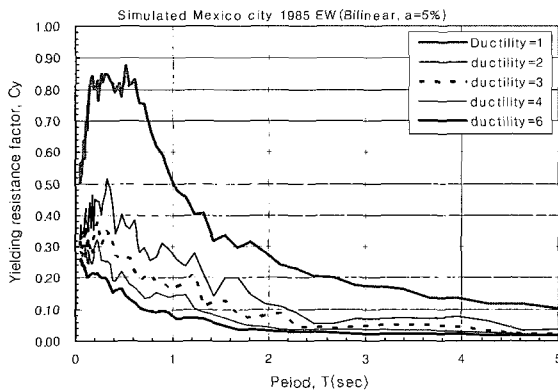
델의 항복강도를 구하여 진동계의 중량으로 나누어 무차원화 한 계수이다. 즉 1자유도계 진동모델의 항복강도를 Q_y , 진동계의 중량을 W_T 라고 할 때, 항복강도계수 C_y 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_y = \frac{Q_y}{W_T} = \frac{Q_y}{mg} \tag{8}$$

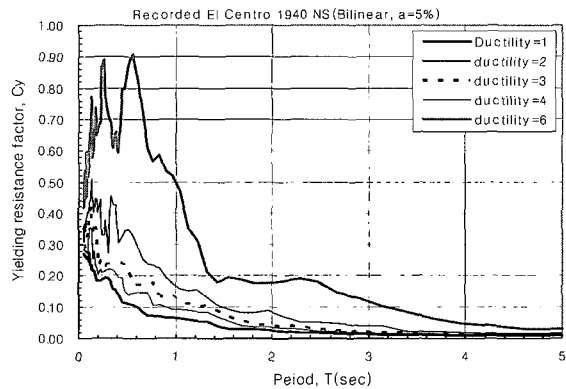
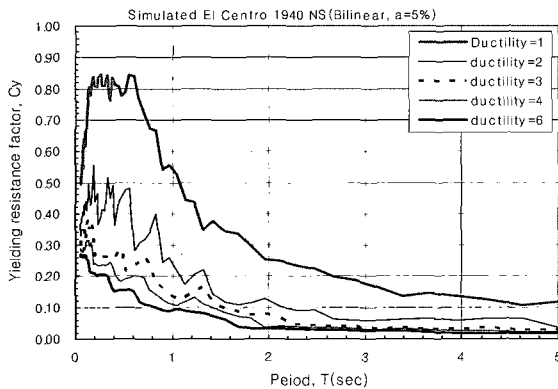
여기서, g : 중력 가속도

1자유도계 진동모델에서는 질량 $m=1$ 로 무차원화 하면 항복강도계수 C_y 는 진동계의 항복강도(Q_y)와 중력가속도(g)의 비로 표현된다. 이 값은 입력된 지진동에 대하여 진동계의 주기별로 일정한 소성율이 얻어지도록 항복강도를 구하는데 사용되며, 1자유도계의 비선형 일정소성율 응답스펙트럼이라 부른다. 일정소성율 응답스펙트럼은 구조물의 손상도를 나타내는 소성율을 주기별로 일정하게 얻기 위하여 진동계의 항복강도를 결정하는데 활용된다.

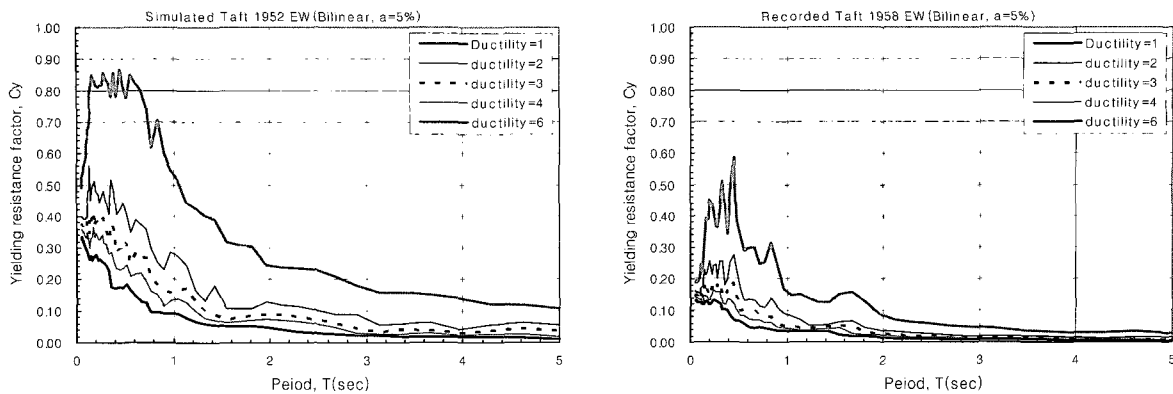
그림 6~8은 Bilinear 이력모델(초기강성에 대한 항복 후 강성비 $a=5\%$)을 사용하여 항복강도계수 C_y (yield strength coefficient) 응답을 원 기록지진동과 인공지진동을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 소성율이 1인 경우는 탄성 상태



〈그림 6〉 Mexico City 1985 EW 지진동파형



〈그림 7〉 El Centro 1940 NS 지진동파형



〈그림 8〉 Taft 1952 EW 지진동파형

를 의미하는 것이므로 기록지진동의 응답은 입력지진동의 특성에 따라 변동이 심한데 비하여 인공지진동에 의한 응답은 모두 거의 동일한 응답특성을 나타내고 있다. 인공지진동은 설계용 가속도스펙트럼에 근사하게 작성되었기 때문이다.

소성율이 1 이상인 경우는 비탄성 응답을 나타내며, 비선형 이력모델에 의한 에너지의 소산으로 응답치의 변동은 심하지 않고 안정된 응답을 나타낸다. 지진동의 세기가 인공지진동에서 증가되었기 때문에 기록지진동보다 인공지진동의 응답치가 약간 크다. 인공지진동에 의한 응답은 입력지진동의 종류에 관계없이 거의 동일한 응답특성을 나타내고 있는데 비해 기록지진동에 의한 응답은 입력지진동에 따라 큰 차이를 보인다. 이것은 인공지진동의 특성이 설계용 가속도응답스펙트럼으로 평균화되었기 때문으로 볼 수 있다. 그러므로 인공지진동에 의한 비선형 응답은 기록지진동에 비해 응답치의 변동이 작으며, 또한 입력지진동에 따른 응답치의 오차도 줄어들었다.

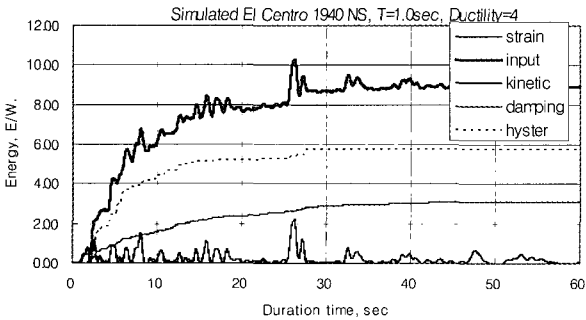
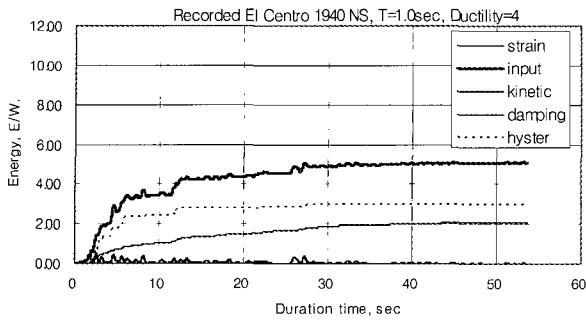
그림 9는 El Centro 1940 NS 지진파의 기록지진동과 동일한 위상의 인공지진동에 의한 에너지응답 이력을 대비시켜 나타낸 것이다. 진동계의 고유주기는 1.0sec, 이력모델은 Bilinear 모델, 최대 변위응답에 대한 소성율이 4인 경우에 대하여 나타낸 것이다. 초기 10sec 동안에 총 입력에너지의 약 80%가 입력되는 것을 알 수 있으며, 기록지진동과 인공지진동 모두 유사한 에너지입력 이력 특성을 나타낸다. 총 입력에너지는 기록지진동보다 인공지진동이 약 2배 정도 큰 것을 알 수 있다. 이것은 그림 4의 인공지진파의 가속도파형에서 알 수 있는 바와 같이 10sec 이후의 가속도 진폭이 증폭되었기 때문이다. 즉 인공지진동의 가속도응답스펙트럼이 증가되어 지진동의 강도가 기록지진동보다 강해진 것을 의미한다.

그림 10은 동일한 진동모델에서 Mexico City 1985 EW

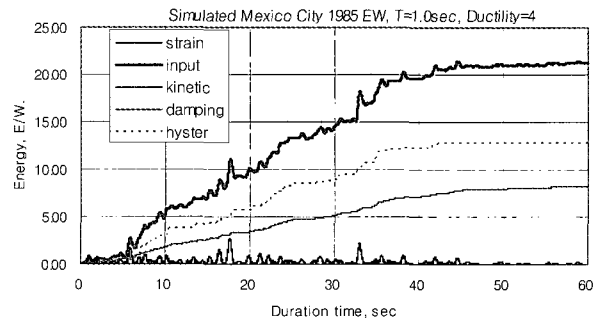
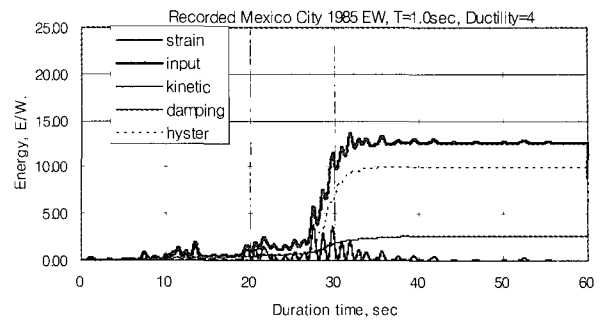
기록지진파와 인공지진파에 의한 에너지응답 이력을 지진동의 계속시간 60sec 동안 비교하여 나타내고 있다. 총 입력에너지는 약 1.7배 정도의 차이를 보이고 입력에너지의 시간이력은 서로 다른 특성을 나타낸다. 그림 3의 지진동파형의 비교로부터 알 수 있는 바와 같이 기록지진동은 30sec 근방에서 최초로 항복이 발생하여 이력에너지가 급격히 증가하는데 비해, 인공지진동은 20sec 근방에서 최초로 항복이 발생하여 이력에너지가 계속하여 증가하는 경향을 보인다. 이것은 기록지진동은 장주기 성분(T=2~3sec)에서 응답치의 피크를 나타내는 강한 성분만 존재하는데 비해, 인공지진동은 설계 대상 주기영역에서 스펙트럼 특성이 증폭되어 입력지진동의 강도가 전 주기영역에서 강해졌기 때문으로 추정할 수 있다.

1자유도계의 입력에너지 이력특성은 기록지진동과 인공지진동에서 모두 지진동에 따라 서로 다른 양상을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 총 입력에너지 양은 지진동의 응답스펙트럼이 동일하게 작성된 인공지진동에서도 서로 큰 차이를 나타내고 있다. 지진동 특성에 따른 입력에너지 응답에 대한 상세한 검토가 필요하며, 앞으로 연구되어야 할 과제라고 생각된다.

이상의 고찰에서 본 논문에서 작성된 인공지진동파형은 탄소성 일정소성율 응답스펙트럼의 관점에서 볼 때, 입력지진동으로서 활용가치가 높다고 볼 수 있다. 즉 기록지진동의 위상특성과 동일하면서 설계용 가속도응답스펙트럼에 적합하게 작성된 인공지진동파형은 지진동의 위상특성과 무관하게 일정 소성율 응답스펙트럼에서도 거의 일정한 응답을 나타내며, 구조물의 탄소성 지진응답해석용 입력지진동으로서 타당성이 있다고 사료된다. 그리고 동일한 설계용 가속도응답스펙트럼 특성을 가지면서 위상특성이 다른 지진동을 입력하게 되기 때문에 구조물 응답에 미치는 영향으로 지진동의 주요한 인자인 지진동의 최대진폭 크기, 계속



〈그림 9〉 EI Centro 1940 NS 지진동파형



〈그림 10〉 Mexico City 1985 EW 지진동파형

시간, 진동수 특성, 지진동파형의 포락 형상 등의 영향 요인들을 좀 더 체계적으로 규명할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 총 입력에너지 양은 지진동의 특성에 따라 서로 다른 양상을 나타내고 있으므로 추가적인 검토가 필요할 것이다.

4. 결론

건축구조물의 내진설계는 지진동에 의한 건축물의 동적 거동에 근거하고 있다. 입력지진동의 특성과 구조물의 동적 성질은 구조물의 지진응답을 좌우하는 중요한 요소이다. 구조물의 지진응답에 사용되는 지진동은 지진의 발생 메커니즘과 전달경로, 지반의 증폭특성에 따라 다양한 특색을 포함하고 있어 각 영향 요인을 정량적으로 규명하는 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 있었다. 또한 인공지진동에 의한 탄소성 시간이력해석을 수행하여 일정소성을 응답스펙트럼을 고찰하여 구조물의 지진응답해석용 입력지진동으로서의 타당성을 확인하였다.

앞으로는 이들 인공지진동을 입력한 다층 골조구조물의 지진응답해석에 적용하여 탄소성 응답치의 변동을 검토하여, 입력지진동으로서의 타당성을 검토할 필요가 있으며, 지진동 특성이 구조물의 응답에 미치는 영향 인자를 정량적으로 규명하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 2006년 동서대학교 교내 특별연구비 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부이다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ATC/FEMA, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, FEMA 440 Report, Prepared by Applied Technology Council and Federal Emergency Management Agency(ATC-55 Project), 2005.
2. 日本建築學會, 地震荷重-地震動の子測と建築物の応答, 1992, 東京, 240pp.
3. 大崎順彦, “設計用入力地震動”, *コンクリート工学*, Vol. 19, No.7, 1981.6, pp. 11-16.
4. 日本建築學會, 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)同解説, 2004, 東京, 400pp.
5. 理論地震動研究会編, 地震動—その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994, 2. 東京, 256pp.
6. 김진만, “인공지진과 생성기법”, 한국지진공학회 Workshop

- 발표집, 2004, pp. 246-261.
7. 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.
 8. Tsai, N.C., "Spectrum Compatible Motions for Design Purposes," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 98, No.EM2, Apr., 1972, pp. 345-356.
 9. Preumont, A., "The Generation of Spectrum Compatible Accelerograms for the Design of Nuclear Power Plants," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 12, 1984, pp. 481-497.
 10. Barenberg, M.E., "Inelastic Response of a Spectrum-Compatible Artificial Accelerogram," *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 3, 1989, pp. 477-493.
 11. 전대한, 김용부, 박학길 "건축구조물의 地震應答 해석용 模擬地震動에 관한 연구," 대한건축학회 논문집, 제8권 11호, 1992. 11, pp. 111-120.
 12. Vanmarke, E. H. and Gasparini, D. A., *A Program for Artificial Motion Generation, User's Manual and Documentation*, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1976.
 13. 渡部 丹, 設計用模擬地震動に関する研究、建築研究報告、No. 92, 1981.
 14. 김재관, 이동근, 구조동역학(Chapter 7), 제2판, 피어선에듀케이션코리아, 서울, 2004, 931pp.