

# 설계용 탄성응답스펙트럼으로 표준화된 인공지진동과 기록지진동의 비선형 지진응답

## Nonlinear Seismic Estimates of Recorded and Simulated Ground Motions Normalized by the Seismic Design Spectrum

전대한<sup>1)</sup> · 강병두<sup>2)</sup> · 김재웅<sup>3)</sup>

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

**국문 요약** >> 비선형 시간이력응답해석에서 입력지진동은 구조물의 탄소성 지진응답을 결정짓는 중요한 요소이다. 시간이력해석에 사용되는 기록지진동파형은 지진발생 메카니즘, 전달경로, 지반의 성질에 따른 여러 가지 인자가 복잡하게 관련되어 있기 때문에 구조물의 지진응답해석에 사용될 일반성을 갖는 입력지진동을 선정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 본 논문은 실무에서 내진설계용 지진동으로 가장 선호하지 않는 입력지진동을 선정하여 인공지진동파형을 작성하였다. 인공지진동은 기록지진동과 동일한 위상각을 가지며, 감쇠정수  $\eta=5\%$ 일 때의 설계용 스펙트럼과 거의 일치하도록 작성되었다. 기록지진동과 인공지진동을 입력한 1자유도계의 탄성 및 탄소성 지진응답해석을 수행하여 탄소성 응답스펙트럼 및 입력에너지 응답 특성을 분석하였다. 본 연구에서 작성된 인공지진동은 건축구조물의 탄소성 지진응답해석용 입력지진동으로 충분히 타당성이 있다고 사료된다.

**주요어** 인공지진파, 위상각, 설계용 스펙트럼, 탄소성 지진응답, 입력에너지

**ABSTRACT** >> In the nonlinear response history analysis of building structures, the input ground accelerations have considerable effect on the nonlinear response characteristics of structural systems. As the properties of the ground motion, using time history analysis, are interrelated with many factors such as the fault mechanism, the seismic wave propagation from source to site, and the amplification characteristics of the soil, it is difficult to properly select the input ground motions for seismic response analysis. In this paper, the most unfavourable real seismic design ground motions were selected as input motions. The artificial earthquake waves were generated according to these earthquake events. The artificial waves have identical phase angles to the recorded earthquake waves, and their overall response spectra are compatible with the seismic design spectrum with 5% of critical viscous damping. 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.

**Key words** Simulated ground motions, Phase Angles, Design Spectrum, Nonlinear Seismic Response, Input Energy

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경

건축물의 내진성능을 평가하기 위한 지진응답해석에서

입력지진동은 구조물의 비선형 응답 특성을 좌우하는 중요한 요소이다. 건축물의 비선형 지진응답해석을 위한 입력지진동 선정에 관한 많은 연구가 진행되어 최근 여러 연구 성과들이 발표되고 있지만, 뚜렷한 결론을 도출해 내지 못하고 있는 실정이다.<sup>(2-6)</sup> 또한 입력지진동에 따라 건축물의 시간이력응답해석 결과는 큰 차이를 나타내며 건축물의 지진응답해석에서 입력지진동의 크기를 적절히 표준화(Scaling)할 필요가 있다.<sup>(7-10)</sup> 입력지진동의 표준화 방법으로,

- 1) 입력지진동의 최대값을 기준으로 입력강도를 적절히 조절하는 방법
- 2) 설계용 스펙트럼에 일치하는 지진동파형을 입력하는 방법

<sup>1)</sup> 정희원 · 동서대학교 건축토목공학부, 교수  
(교신저자: jdh@dongseo.ac.kr)

<sup>2)</sup> 경남도립거창대학 건축·인테리어과, 교수

<sup>3)</sup> 정희원 · 동아대학교 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 7. 12 / 수정일 : 2011. 8. 30 / 게재확정일 : 2011. 8. 30)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

등이 있다. 현재까지의 연구 결과로는 위의 두 가지 기준화 방법 중에서 어느 것이 더 적합한지에 대한 일치된 의견은 없는 실정이다.<sup>(8)</sup>

지진동파형의 최댓값을 기준으로 입력강도를 조절하는 방법은 각 기록 지진동의 응답스펙트럼을 포함하여 원 지진동파형의 성질이 그대로 유지되지만, 건축물의 응답이 선정된 지진동의 응답스펙트럼 특성에 지배되는 것을 방지하기 위해 최소 7개 이상의 입력지진동을 선정하여 지진응답해석을 수행하도록 권장하고 있다. 특히 비선형 지진응답해석에 적용할 경우에는 지진동 성분을 증폭시키는 계수 값으로 2 이하를 권장하고 있다.<sup>(8)</sup> 이것은 비선형 응답이 지진동의 최댓값에 지배되어 한 방향으로 편중되는 응답특성을 나타내기 때문이다. 그러나 고층 건축물의 경우 장주기 영역에서 충분한 입력에너지를 갖는 지진동을 구하기 어렵기 때문에 부족한 장주기 성분 에너지를 보완하기 위해 상대적으로 큰 증폭 계수 값이 필요하게 된다. 이 경우 상대적으로 단주기 성분의 스펙트럼이 비정상적으로 증대되는 결과를 초래하게 되어 고차모드 주기성분의 영향이 과대하게 나타날 수 있는 단점이 있다.<sup>(12),(13)</sup>

그리고 설계용 스펙트럼으로 입력지진동을 규준화 하는 방법은 적은 수의 지진동파형으로 응답해석을 수행할 수 있지만, 설계용 스펙트럼은 탄성 스펙트럼을 기준으로 설정된 것이기 때문에 비선형 지진응답에 대한 영향은 아직 명확히 알려지지 않은 것이 문제점이다. 특히 설계용 스펙트럼과 일치하는 인공지진동에 의한 입력에너지 응답을 분석한 결과 입력에너지의 과도한 증대가 일어나는 문제점이 지적되고 있다.<sup>(5)</sup>

기존의 연구에서 필자 등<sup>(14)</sup>은 설계규준에 설정된 설계용 가속도응답 스펙트럼과 동일한 탄성 가속도응답 특성을 나타내는 인공지진동 파형의 작성법을 제안하고, 이들 인공지진동에 의한 1자유도계 및 다층 골조구조물의 탄소성 응답 해석을 수행하여, 인공지진동이 기록지진동에 비해 탄소성 응답치의 변동이 훨씬 작은 것을 확인하였다. 필자가 기존 연구에서 사용한 기록지진동은 현재까지 건축물의 지진응답해석에 많이 사용된 표준적인 지진동을 이용하여 인공지진동을 작성하였다. 그러나 이러한 일련의 해석결과는 한정된 기록지진동의 위상각(Phase Angles)을 기초로 작성된 인공지진동을 사용하였기 때문에 그 신뢰성에 한계가 있다. 한편 기존의 문헌에서 지적한 바와 같이 지진동파형의 위상 성분(Phase Content)도 입력지진동에 의한 응답특성을 결정짓는 중요한 요소로 지적되고 있다.<sup>(15)</sup>

따라서 인공지진동 작성에 필요한 위상각(Phase Angles) 특성을 변화시켜 다양한 기록지진동의 위상각을 고려한 인

공지진동을 작성하여 그 신뢰성을 검증할 필요가 있다. 특히 구조물의 지진응답해석용 입력지진동 선정에는 건설 예정지의 지반특성을 고려한 지진동을 입력하는 것이 일반적이다. 따라서 다양한 지반에서 기록된 지진동의 위상각이 반영된 인공지진동파형을 작성하여, 이들 입력지진동에 의한 탄소성 응답의 변동을 확인하는 것이 필요하다.

## 1.2 연구 목적

본 연구에서는 현재까지 기록된 지진동 중에서 ‘내진설계용 입력지진동으로 가장 선호하지 않는 지진동’을 지반 종류별로 2개씩 선정하여, 입력지진동의 특성을 고찰하고, 이들 지진동을 바탕으로 인공지진동을 작성하여 응답 특성을 분석하고자 한다. 여기서 내진설계용 입력지진동으로 선호하지 않는 지진동이란 골조구조물의 동적 응답치(지붕층 변위, 층간변위)가 다른 지진동에 비해 월등히 크게 나타나는 지진동을 일컫는다.<sup>(11)</sup>

본 연구에서는 입력지진동의 규준화 방법으로 설계용 스펙트럼에 주목하여 동일한 응답스펙트럼 특성을 갖는 인공지진동 파형을 입력하여 1자유도계의 탄소성 응답스펙트럼과 에너지 응답을 분석하여 건축물의 비선형 시간이력해석용 입력지진동으로서의 타당성을 검증하는 것이 목적이다. 여기서는 대표적인 소수의 입력지진동만으로 건축물의 내진성능을 효과적으로 평가하기 위하여 입력지진동의 탄성 응답스펙트럼이 동일한 지진동에 대한 1자유도계의 비선형 응답에 미치는 영향을 먼저 확인한 후, 다층 골조구조물의 내진성능평가에 활용하는 것을 최종 목적으로 한다.

## 2. 입력지진동

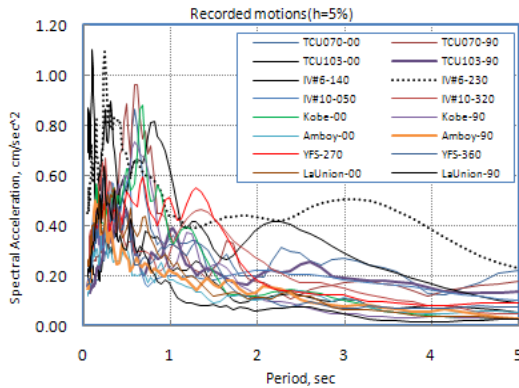
### 2.1 입력지진동의 선정

본 연구에서 사용하는 지진동은 참고문헌 (11)을 참고하여 선정하였다. 참고문헌에서 제시한 바와 같이 현재까지 기록된 지진동 중에서 ‘내진설계용 입력지진동으로 가장 선호하지 않는 지진동’ 8개를 선정하였다. 여기서 ‘내진설계용 입력지진동으로 가장 선호하지 않는 지진동’이란 이들 입력지진동에 의한 탄소성 응답치가 기존의 다른 지진동파형에 비해 특별히 크게 나타나는 지진동으로 분류된 지진동파형을 의미한다.<sup>(11)</sup>

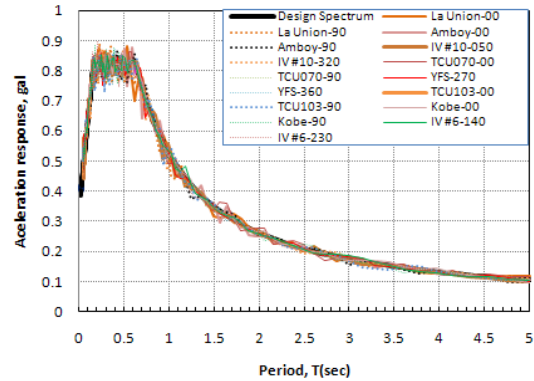
본 연구에서 사용된 기록지진동에 관한 기본적인 정보를 표 1에 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이 일반적으로 내진설계에서 분류되는 4종류의 지반마다 각각 2곳에서 기록된 2종류의 지진동을 선정하였으며, 각 지진동은 서로 직교하는

〈표 1〉 기록지진동의 성질

Earthquake Name	Station	Site condition	Amax (cm/sec <sup>2</sup> )	Vmax (cm/sec)	Dmax (cm)
Mexico Michoacan 1985-09-19	La Union-00	Rock(S1)	165.57	20.66	8.17
	La Union-90		148.34	13.66	5.70
Landers Earthquake, CA, 1992-06-28	Amboy-00		112.72	17.86	9.79
	Amboy-90		143.22	20.07	7.63
Imperial Valley 1979-10-15	El Centro Array #10-050	Stiff Soil(S2)	166.06	49.61	33.95
	El Centro Array #10-320		226.57	45.96	26.74
ChiChi Taiwan 1999-09-21	TCU 070-00		157.95	58.84	54.32
	TCU 070-90		248.74	47.29	30.66
Landers Earthquake, CA, 1992-06-28	Yermo Fire Station-270	Medium Soil(S3)	240.02	50.81	41.28
	Yermo Fire Station-360		148.57	29.03	22.78
ChiChi Taiwan 1999-09-21	TCU 103-00		149.00	24.05	17.15
	TCU 103-90		126.52	67.44	60.04
Kobe Japan 1995-01-16	Shin Osaka Station-00	Soft Soil(S4)	238.14	33.32	8.82
	Shin Osaka Station-90		207.76	23.52	6.86
Imperial Valley 1979-10-15	El Centro Array #6-140		332.44	66.47	28.67
	El Centro Array #6-230		429.18	113.11	72.00



〈그림 1〉 입력지진동의 탄성응답스펙트럼(h=5%)



〈그림 2〉 인공지진동의 탄성 가속도응답스펙트럼과 설계용 가속도스펙트럼(h=5%)

2방향 성분으로 이루어져 있다. 따라서 총 16개의 지진동과형을 대상으로 해석을 수행하였다.

### 2.2 입력지진동의 탄성 응답스펙트럼

본 연구에서 선정된 입력지진동의 탄성 가속도 응답스펙트럼을 그림 1에 나타내었다. 입력지진동의 입력강도는 조정(Scaling)되지 않았으며, 원 기록지진동과형의 응답스펙트럼 특성을 그대로 나타내고 있다. 그림 1의 가속도 응답스펙트럼만으로 판단할 때, 연약지반(S4)에서 기록된 1979년 Imperial Valley 지진파에 의한 두 성분(IV#6-140, IV#6-230)은 주기 T=1sec 이후의 장주기 성분이 다른 지진동에 비해 큰 응답치를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, Kobe 지진파(Kobe-00, Kobe-90)는 고유주기 T=0.7sec 근처에서만 피크값을 나타내고 그 외의 주기 영역은 비교적 작은 응답을 나타내고 있다.

### 2.3 인공지진파의 작성

여기서는 과거의 연구에서와 동일하게 인공지진동과형의 가속도응답스펙트럼이 설계용 가속도응답스펙트럼에 근사하도록 작성하였다. 여기서 선정한 기록지진동의 위상특성을 그대로 유지하면서 구조물의 응답과 밀접한 관계가 있는 지진동의 가속도 응답스펙트럼이 설계용 응답스펙트럼과 유사하게 되도록 기록지진동의 가속도 진폭 성분을 변화시켜 작성하였다.<sup>(14)</sup>

인공지진동을 작성하기 위한 설계용 가속도스펙트럼은 그림 2에 나타난 바와 같이 내진설계규준<sup>(16)</sup>을 참고하여 형상을 설정하고, 지진력의 강도를 증대시키기 위하여 주기별 가속도응답스펙트럼 값은 비례관계로 증폭시켰다. 감쇠정수 h=5%에 대해 진동주기(T<sub>i</sub>)에 따라 설계용 가속도응답스펙트럼

트럼 형상을 정의할 수 있으며, 진동주기에 따른 가속도응답스펙트럼 크기를 수정하면 다양한 지반특성과 지진활동이 다른 지역의 설계용 가속도응답스펙트럼으로 바꿀 수 있을 것이다.

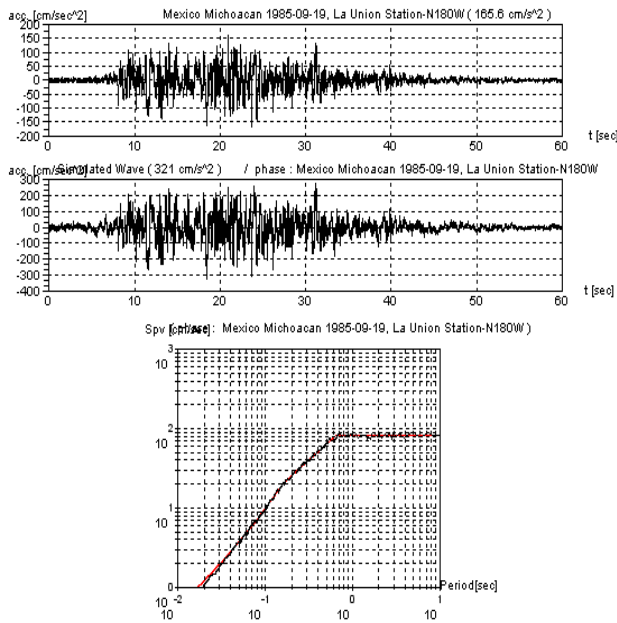
### 3. 작성된 인공지진동파형의 성질

#### 3.1 인공지진동파형과 기록지진동파형의 비교

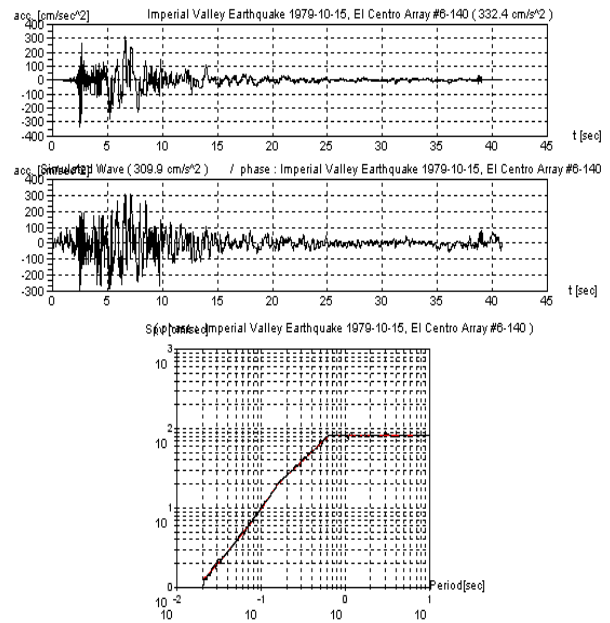
그림 3과 4는 작성된 인공지진동파형과 기록지진동파형

을 비교하여 나타내고, 아래에는 설계용 스펙트럼과 인공지진동의 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 원 기록지진동파형과 인공지진동파형의 위상특성이 동일하기 때문에 포락형상은 동일한 형상을 하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 기록지진동의 응답스펙트럼은 설계용 응답스펙트럼에 근사하게 수정된 것을 확인할 수 있다.

표 2는 동일한 설계용 응답스펙트럼으로 작성된 인공지진동의 최대 지반가속도, 최대 지반속도, 최대 지반변위를 나타내었다. 여기에 표기한 최대지반 속도와 최대 지반변위



〈그림 3〉 Mexico Michoacan 1985 La Union-00



〈그림 4〉 Imperial Valley 1979 El Centro #6-140

〈표 2〉 인공지진동의 성질

Earthquake Name	Station	Site condition	Amax (cm/sec <sup>2</sup> )	Vmax (cm/sec)	Dmax (cm)
Mexico Michoacan 1985-09-19	La Union-00	Rock(S1)	321.00	47.27	35.78
	La Union-90		314.80	50.25	32.84
Landers Earthquake, CA, 1992-06-28	Amboy-00		347.30	47.44	26.74
	Amboy-90		340.30	47.57	27.49
Imperial Valley 1979-10-15	El Centro Array #10-050	Stiff Soil(S2)	337.30	69.68	43.24
	El Centro Array #10-320		355.50	72.99	40.29
ChiChi Taiwan 1999-09-21	TCU 070-00		368.30	42.94	29.61
	TCU 070-90		<b>447.30</b>	42.80	30.31
Landers Earthquake, CA, 1992-06-28	Yermo Fire Station-270	Medium Soil(S3)	344.90	60.63	38.17
	Yermo Fire Station-360		367.80	52.19	40.37
ChiChi Taiwan 1999-09-21	TCU 103-00		336.60	44.69	35.51
	TCU 103-90		350.10	47.41	37.31
Kobe Japan 1995-01-16	Shin Osaka Station-00	Soft Soil(S4)	319.00	43.71	31.31
	Shin Osaka Station-90		351.60	48.33	40.23
Imperial Valley 1979-10-15	El Centro Array #6-140		<b>309.90</b>	58.85	43.42
	El Centro Array #6-230		423.10	78.49	47.21

는 지반 가속도 성분을 시간에 대하여 적분하여 얻어진 값이다. 기록지진동의 최대 지반가속도 값은 실제 기록에서 얻어진 값이므로 다양한 크기를 나타내지만, 설계용 응답스펙트럼에 적합하게 작성된 인공지진동의 최대 가속도 값은 310~447cm/sec<sup>2</sup>의 범위에 있다.

### 3.2 인공지진동파형의 탄소성 응답특성

여기서는 인공지진동파형과 기록지진동파형을 입력한 1자유도계의 탄소성 응답해석을 수행하여 인공지진파의 지진응답특성을 검토한다. 일반적으로 입력지진동에 대한 비선형 응답특성을 나타내는 지표로서 항복강도계수  $C_y$ (Yield Strength Coefficient)가 많이 이용된다. 항복강도계수는 동일한 강도의 입력지진동에 대하여 연성비(Ductility)가 일정하게 되도록 진동모델의 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 (1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup>

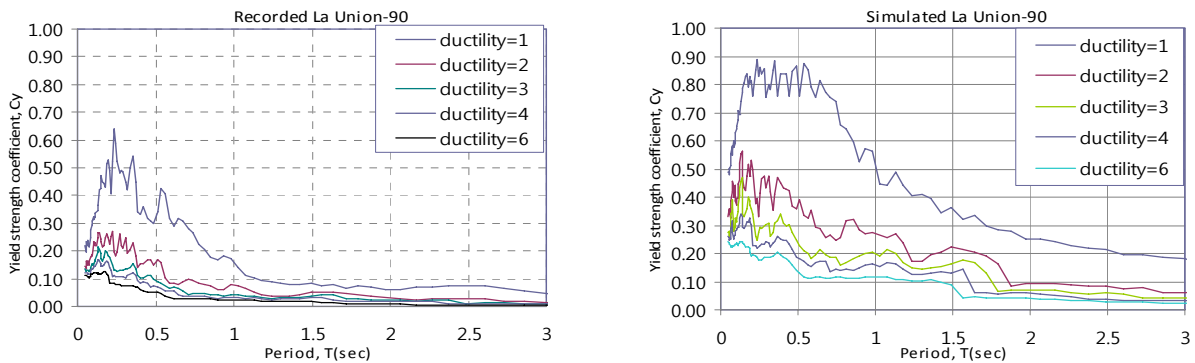
$$C_y = \frac{Q_y}{W_T} = \frac{Q_y}{mg} \quad (1)$$

여기서,  $g$ : 중력 가속도

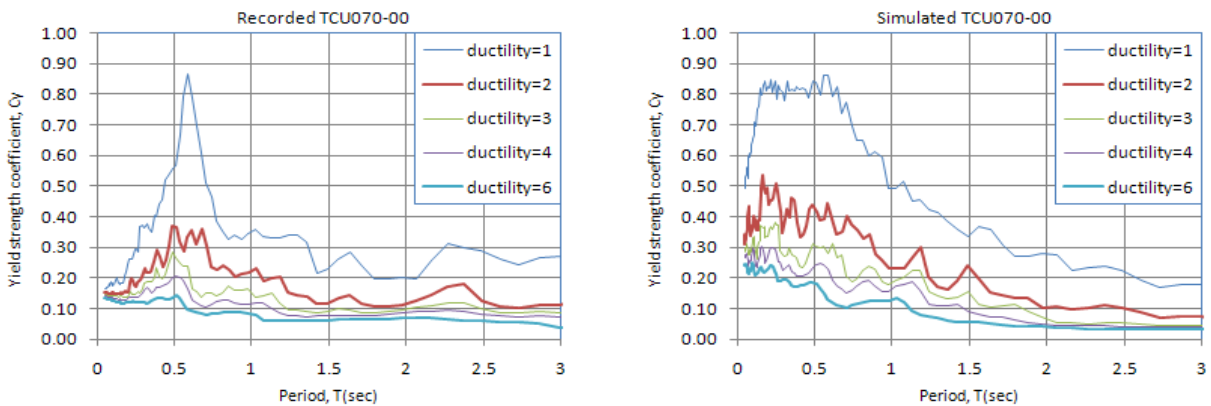
1자유도계 진동모델에서는 질량  $m=1$ 로 무차원화 하면 항복강도계수  $C_y$ 는 진동계의 항복강도( $Q_y$ )와 중력가속도( $g$ )의 비로 표현된다. 이 값은 입력된 지진동에 대하여 진동계의 주기별로 일정한 연성비가 얻어지도록 항복강도를 구하는데 사용되며, 1자유도계의 비선형 일정 연성비 응답스펙트럼이라 부른다. 일정 연성비 응답스펙트럼은 구조물의 손상도를 나타내는 연성비를 주기별로 일정하게 얻기 위하여 진동계의 항복강도를 결정하는데 활용된다.

그림 5~8은 Bilinear 이력모델(초기강성에 대한 항복 후 강성비  $\alpha=5\%$ )을 사용하여 항복강도계수  $C_y$ (Yield Strength Coefficient) 응답을 원 기록지진동과 인공지진동을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 연성비가 1인 경우는 탄성 상태를 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.

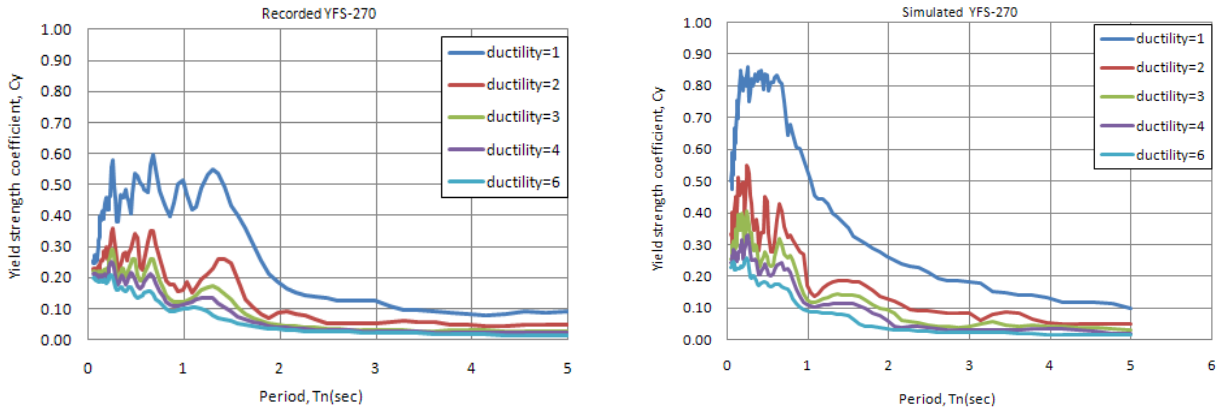
연성비가 1 이상인 경우는 비탄성 응답을 나타내며, 목표 연성비의 값이 증가할수록 비선형 이력모델에 의한 에너지의 소산으로 응답치의 변동은 심하지 않고 안정된 응답을 나타낸다. 그리고 기록지진동의 경우 비선형 응답치가 지진



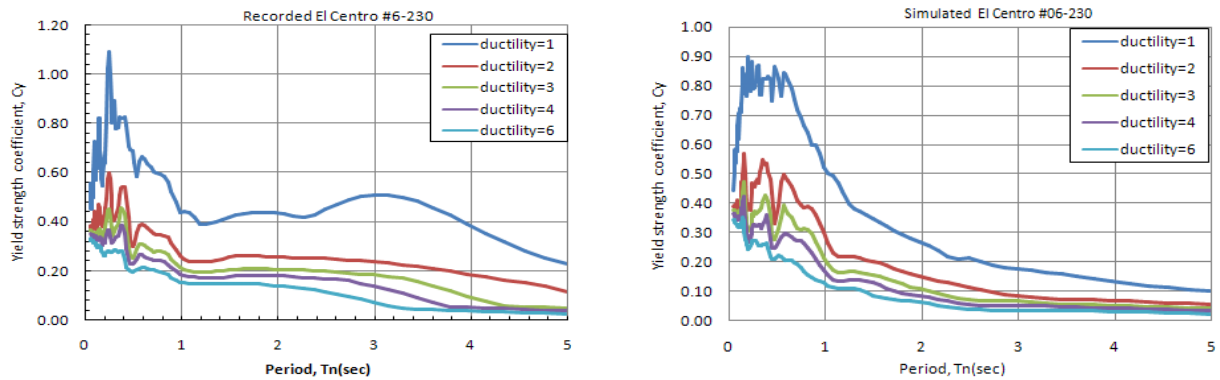
〈그림 5〉 Mexico Michoacan 1985 La Union-90(S1)



〈그림 6〉 Taiwan ChiChi 1999 TCU070-00(S2)



〈그림 7〉 Landers Earthquake CA 1992 YFS-270(S3)



〈그림 8〉 Imperial Valley 1979 El Centro #06-230(S4)

동의 특성이 반영되어 피크치가 나타나는 주기영역이 제각각 다른데 비해, 인공지진동의 경우 지진동별 변화가 작은 것을 알 수 있다. 이러한 성질에 대한 상세한 내용은 다음 절의 고찰에서 명확히 알 수 있다. 또한 그림에서 기록지진동보다 인공지진동의 항복강도계수 응답치가 1.3~1.8배 정도 큰 값을 나타내고 있는 것은 인공지진동의 입력강도가 같은 크기로 증가되었다는 것을 의미하는 것이다.

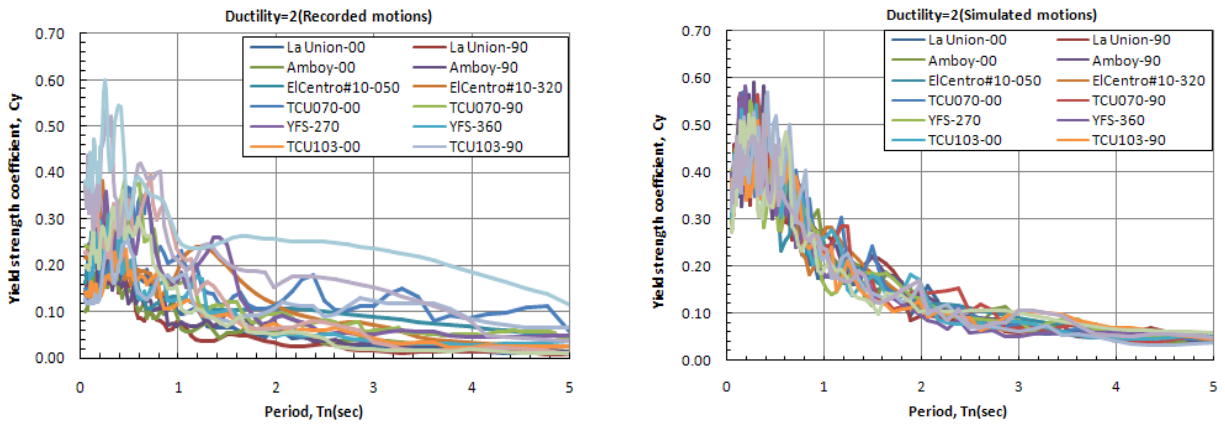
### 3.3 동일한 연성비를 갖는 진동계의 항복강도계수 비교

그림 9~11은 연성비 2, 4, 6을 갖는 진동모델의 항복강도계수를 비교하여 입력지진동별로 나타낸 것이다. 기록지진동에서는 입력지진동에 따라 항복강도계수 값의 변동이 크게 나타나는데 비해 인공지진동의 항복강도계수 값은 변동이 작은 것을 알 수 있다. 특히 주기 1초 이상의 장주기 영역에서는 인공지진동에 의한 항복강도계수의 변동이 매우 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 인공지진동의 특성이 설계용 가속도응답스펙트럼으로 평균화되었기 때문으로 볼 수 있다. 그러므로 인공지진동에 의한 비선형 응답은 기록지진동에 비해 응답치의 변동이 작으며, 입력지진동에 따른 응답치의 변동도 작을 것으로 예측된다.

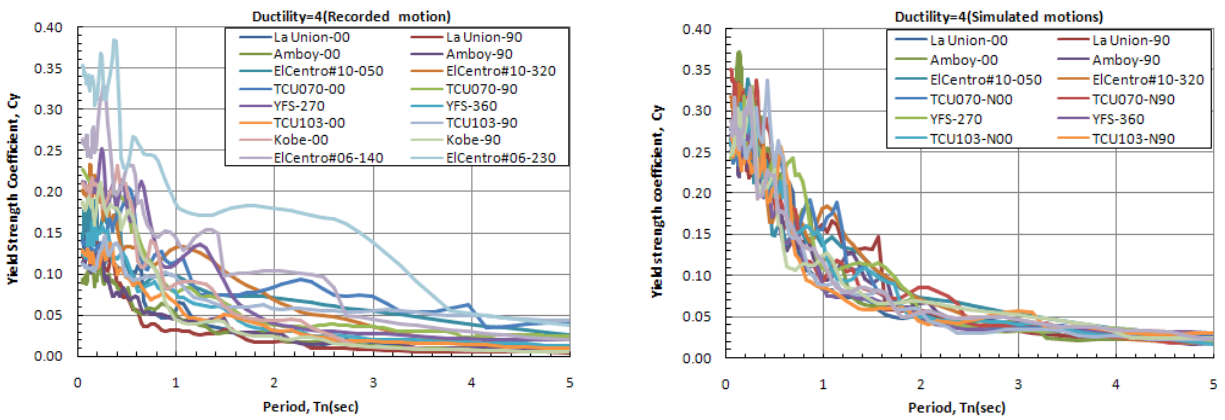
그리고 기록지진동과 인공지진동 모두 동일한 연성비가 얻어지는 입력지진동의 강도에서 항복강도계수 값은 기록지진동에 비해 인공지진동의 값은 1.5배정도 증가된 값을 나타내고 있다. 이것은 기록지진동에 비해 인공지진동의 입력강도가 크다는 것을 의미한다. 그러므로 최근 뉴질랜드, 동일본 등에서 발생하고 있는 초강력 지진에 대한 건축물의 내진안전성 확보 차원에서 초고층 건축물과 같은 장주기 건축물의 지진응답해석용 입력지진동으로 적합할 것으로 사료된다.

### 3.4 동일한 연성비를 갖는 진동계의 에너지응답

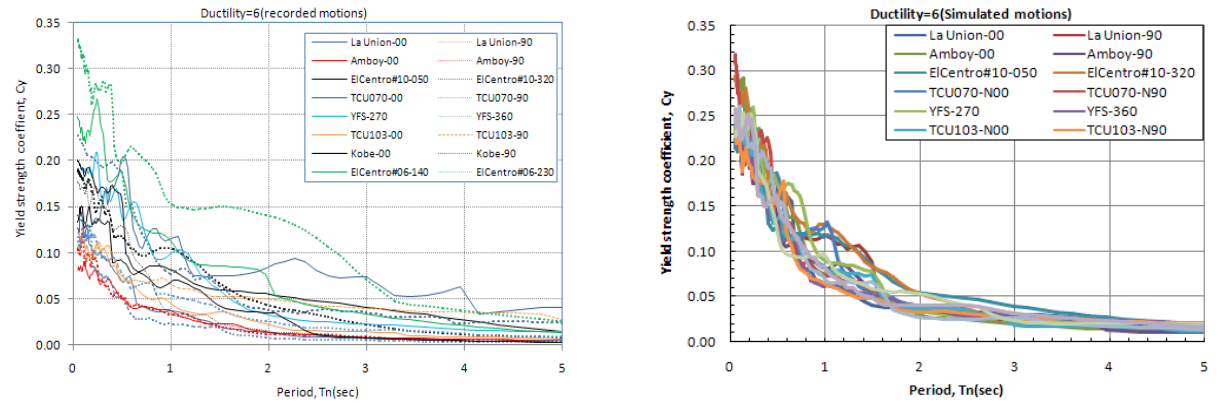
그림 12와 13은 연약지반(Soft Soil)에서 얻어진 2종류의 지진에 의한 지진입력에너지 응답을 나타낸 것이다. 1자유도 진동계의 연성비가 동일하게 얻어지도록 각 고유주기별로 항복강도를 조정하여 비선형 이력해석을 수행하여 얻어진 총입력에너지( $E_i$ )로 나타내었다. 그림 12에서 기록지진동에 비해 인공지진동의 입력에너지가 약 1.5배 증대된 것을 알 수 있다. 그리고 기록지진동에서는 고유주기가 늘어남에 따라 입력에너지가 감소하는데 비해, 인공지진동에서는 입력에너지의 크기가 변화하지 않고 거의 평탄한 에너지



〈그림 9〉 동일한 연성비에서 항복강도계수 변화( $\mu=2$ )



〈그림 10〉 동일한 연성비에서 항복강도계수 변화( $\mu=4$ )



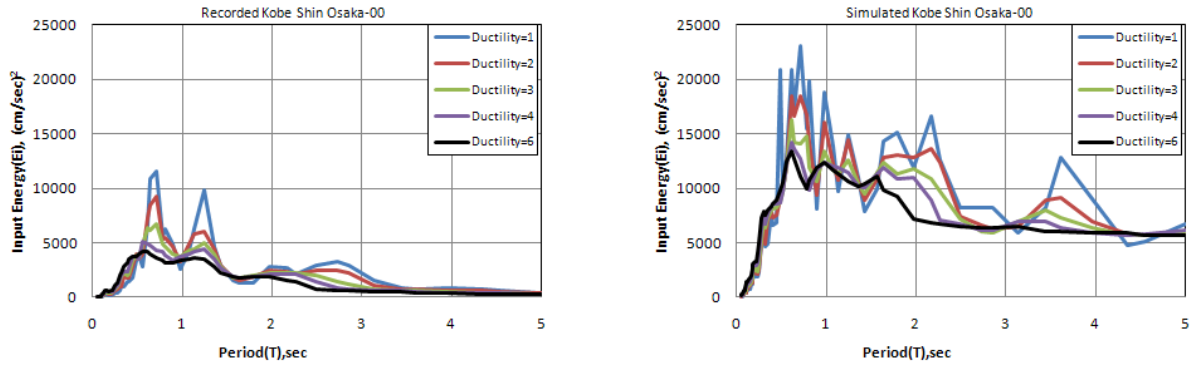
〈그림 11〉 동일한 연성비에서 항복강도계수 변화( $\mu=6$ )

응답을 나타내고 있다.

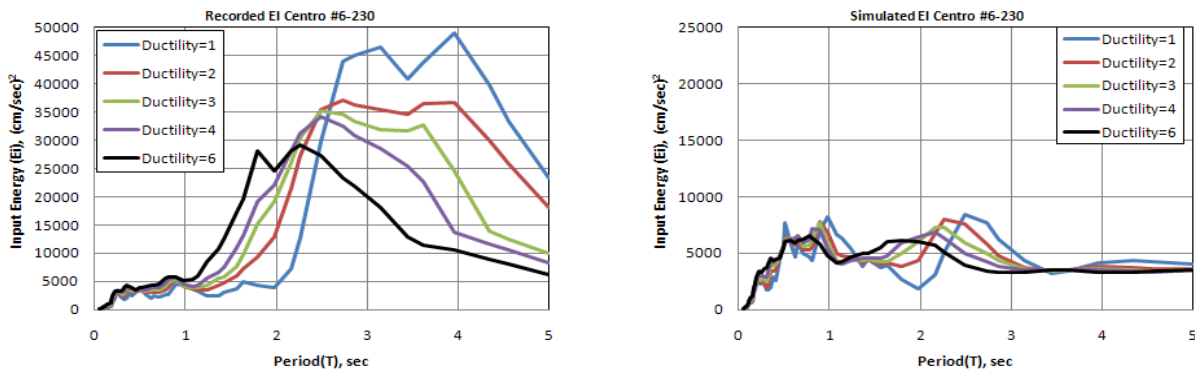
그림 13은 같은 종류의 지반에서 기록된 지진동이지만, 에너지 응답 특성은 그림 12의 지진동과 다른 특성을 나타내고 있다. 기록지진동보다 인공지진동의 입력에너지가 작으며, 특히 주기  $T=1\text{sec}$  이상의 장주기영역에서는 기록지진동의 입력에너지가 인공지진동보다 대략 5배 이상 크다. 그러나 기록지진동의 입력에너지는 고유주기에 따라 변동이 큰데 비해 인공지진동은 전주기 영역에서 평탄한 에너지

응답특성을 보이고 있다.

그림 12와 13의 입력에너지 응답특성은 그림 1의 탄성응답스펙트럼을 통해 설명할 수 있다. 즉 그림 12의 Kobe 지진파는 고유주기  $T=0.7\text{sec}$  근방에서만 피크치를 나타내는 지진동으로 그 외의 주기영역에서는 스펙트럼 강도가 작다. 반면에 그림 13의 Imperial Valley 지진파의 경우는 주기  $T=1.0\text{sec}$  이후의 장주기 영역의 응답스펙트럼 값이 큰 지진동으로 입력강도가 매우 높다. 따라서 지진동의 입력에너지



〈그림 12〉 Kobe(1995) Shin Osaka Station-00 지진동에 의한 입력에너지 스펙트럼



〈그림 13〉 Imperial Valley(1979) EI Centro #6-230 지진동에 의한 입력에너지 스펙트럼

는 장주기 성분의 스펙트럼강도가 클수록 입력에너지도 큰 값을 나타내고 있다.

입력에너지응답 그림에서 기록지진동에 의한 입력에너지의 응답특성은 진동계의 고유주기 특성에 따라 서로 변동이 심한 특성을 보이는 반면, 인공지진동의 입력에너지는 전 주기영역에서 일정한 에너지응답을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 탄성 가속도응답스펙트럼으로 표준화된 인공지진동은 입력에너지 응답도 평탄하여 기록지진동에 비해 안정된 입력에너지응답 특성을 나타내고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 현행 내진설계법의 설계용 응답스펙트럼으로 표준화된 지진동파형을 이용하여 비선형 응답특성을 분석하였다. 즉 시간이력 포락형상(위상각)이 서로 다르지만 탄성 스펙트럼이 동일한 지진동에 의한 비선형 응답특성 분석을 통하여 일반성을 갖는 소수의 입력지진동으로 내진 성능을 평가하는데 최종적인 연구목적을 두고 해석결과를 분석하였다. 특히 본 연구에서는 채택한 기록지진동은 현재까지 기록된 지진동 중에서 ‘내진설계용 입력지진동으로 가장 선호하지 않는 지진동’을 지반 종류별로 2개씩 선정하여, 1자유도계의 비선형 응답특성과 설계용 스펙트럼으로 기준

화된 인공지진동에 의한 비선형 응답특성을 비교하였다.

기록지진동과 인공지진동에 의한 탄소성응답 특성을 비교한 결과, 인공지진동의 각 응답치의 변동이 기록지진동에 비해 작은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 작성된 인공지진동을 지진응답해석용 입력지진동으로 대체할 수 있다고 사료된다.

앞으로 본 연구에서 작성된 인공지진동파형을 구조물의 비선형 지진응답해석용 입력지진동으로서 활용하기 위해서는 입력에너지 응답에 대한 상세한 고찰이 필요하며, 또한 다층 골조구조물의 지진응답에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 2010년도 정부의 재원으로 한국연구재단(2010-0015900)의 지원을 받아 수행되었다. 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 김재관, 이동근, 구조동역학(Chapter 7), 제2판, 피어선에듀케이션코리아, 서울, 308-328, 2004.



2. 日本建築學會, 地震荷重-その現状と將來の展望, 東京, 1987.
3. 日本建築學會, 地震荷重-地震動の予測と建築物の応答, 東京, 1992.
4. 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, 東京, 1994.
5. Naeim, F., and Lew, M., "On the Use of Design Spectrum Compatible Time Histories," *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No. 1, 111-127, 1995.
6. 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.
7. Kurama Y.C., and Farrow, K.T., "Ground motion scaling methods for different site conditions and structure characteristics," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 15, 2423-2450, 2003.
8. Moehle J.P., "Seismic analysis, design, and review for tall buildings," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 15, 495-513, 2006.
9. Aschheim M., Tjhin T., Cormartin C., Hamburger, R., and Inel, M., "The scaled nonlinear dynamic procedure," *Engineering Structures*, Vol. 29, 1422-1441, 2007.
10. Luco N. and Bazzurro P., "Does amplitude scaling of ground motion records result in biased nonlinear structural drift responses?," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, 1813-1835, 2007.
11. Chang-Hai Zhai and Li-Li Xie, "A new approach of selecting real input ground motions for seismic design: The most unfavourable real seismic design ground motions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, 1009-1027, 2007(2).
12. Hancock, J., Bommer, J., and Stafford, P.J., "Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, 1585-1607, 2008.
13. PEER Ground Motion Selection and Modification Working Group(Haselton Curt B. ed.). 2009. Evaluation Ground Motion Selection and Modification Methods: Predicting Median Interstory Drift Response of Buildings, PEER-2009/01, PEER, University of California, 2009.
14. Dae-Han Jun, "Seismic Response of R/C Structures Subjected to Simulated Ground Motions Compatible with Design Spectrum" *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Published online in Wiley Online Library (Wileyonlinelibrary.com) DOI:10.1002/tal.658, 2010.
15. Ohsaki, Y., "On the Significance of Phase Content in Earthquake Ground Motions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, 427-439, 1979(7).
16. 대한건축학회, 건축구조기준 및 해설, 기문당, 서울, 122-131, 2009.