

## 지진환경과 설계기준과 호환하는 대표 입력 지진파의 생성 Generation of Seismic Environment and Design Code Compatible Representative Earthquake Motion

정창균<sup>1)</sup>, Chang-Gyun Jeong, 박두희<sup>2)</sup>, Duhee Park

<sup>1)</sup> 한양대학교 건설환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>2)</sup> 한양대학교 건설환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**SYNOPSIS** : Since the importance of seismic design is greater, dynamic analysis is more widely using than past. The input motion is one of the most important factors of dynamic analysis. However, in Korea input motions are selected from U.S. and Japan those are captured from large magnitude earthquakes without considering seismic environment or generated in frequency domain. In this research, the methodology for generating input motions those are considered seismic environment and design code is proposed. The seismic environment compatibility is considered by performing deaggregation and the design code compatibility is considered by time-domain artificial time history acceleration generation method. The results shows that seismic environment and design code compatible input motions are successfully generated.

**Keywords** : input motion, design code, seismic environment, artificial time history, seismic design

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 강진 발생빈도가 증가하고 있으며, 한반도 역시 과거에 비해 지진의 규모 및 발생빈도가 증가하고 있다. 이에 따라 국내 내진설계의 중요성이 강조되고 있는 추세이다. 특히 주요 구조물에 대한 내진설계가 의무화 되었으며, 다양한 해석기법을 통하여 구조물의 지진 안전도를 평가하도록 하고 있다. 컴퓨터 하드웨어와 해석프로그램의 급격한 발전으로 동적 해석을 활용한 내진해석이 활발히 수행되고 있으며, 동적 해석은 다수의 입력변수를 필요로 한다. 이중 입력진파 즉, 지반운동의 시간이력은 가장 중요한 입력변수 중 하나이다. 입력지진파는 현재 국내에서는 지진학적 검토없이 미국, 일본에서 계측된 강진기록이 무분별하게 사용되고 있다. 또한 계측지진파의 대용으로 사용되고 있는 인공지진파는 설계스펙트럼과의 일치성은 우수하나, stationary 특성이 강하여 실제 지진기록과 상이한 주파수 특성을 가지고 있다. 이와 같은 사실은 현재의 기법 만으로는 지진환경과 내진설계기준에 모두 부합하는 지진파 생성이 존재하지 않는다는 것을 의미한다.

본 연구는 합리적 내진설계를 위해 국내의 지진학적 환경을 기반으로 대표 지진시나리오를 선정하며 이에 상응하는 대표성을 가진 입력 지진파 생성 모듈을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다.

### 2. 국내의 입력지진파 선정방법

현재 국내에서 내진설계를 위한 동적 해석시 일반적으로 사용되는 계측 지진파는 Hachinohe(1968년

일본, 규모 7.9)와 Ofunato(1978년 일본, 규모 7.8)이다. Hachinohe와 Ofunato는 각각 설계응답스펙트럼의 장주기와 단주기 부분의 일치성이 뛰어나 사용되고 있다. 인공지진파는 SIMQKE(Gasparini 등, 1976)를 사용하여 스펙트럼 맞춤형 지진파를 생성한다. 인공지진파는 설계응답스펙트럼과의 일치성이 가장 뛰어나며 모든 주기스펙트럼에서 설계스펙트럼과 거의 동일한 응답을 보이고 있다. 계측 지진파의 경우 규모 7 이상의 강진기록을 최대지반가속도(Pear Ground Acceleraton, PGA)만 설계기준과 동일하도록 scaling 하여 사용하고 있으며 연산시간을 줄이기 위하여 최대진동부분만을 부분적으로 추출하여 사용하고 있다. 인공지진파의 경우 설계스펙트럼에 맞추어 주파수 영역에서 생성하고 있으며, 생성된 지진파는 실제 계측된 지진파와는 다른 주파수 특성과 비현실적 장주기 요소 등의 문제점을 가지고 있다.

지진파의 특성은 최대진동가속도와 응답스펙트럼만으로 규정지을 수 없다. 지진파의 주파수 특성, 지속시간, 총 에너지 등은 지진의 규모와 진앙거리, 즉 지진 시나리오에 의해서도 크게 지배 받으며 이에 대한 정보 없이 지진파를 생성하는 것은 많은 문제점을 내포하고 있다.

표 1 한반도 일부 지역의 deaggregation 결과

지역	재현 주기 (년)	대표 시나리오 1		대표 시나리오 2		대표 시나리오 3	
		규모(M)	거리 (R, km)	규모(M)	거리 (R, km)	규모(M)	거리 (R, km)
서울	500	5.25	25	4.75	25	4.75	15
	1000	5.25	25	5.75	25	5.25	15
	2400	5.75	25	6.25	25	5.25	15
대전	500	5.25	25	5.75	25	4.75	15
	1000	5.75	25	5.25	25	5.25	15
	2400	6.25	25	5.75	25	5.75	15
광주	500	4.75	25	5.25	25	4.75	15
	1000	5.25	25	5.75	25	4.75	15
	2400	5.75	25	5.25	25	5.25	15
대구	500	5.25	25	5.75	25	4.75	15
	1000	5.75	25	5.25	25	5.25	15
	2400	6.25	25	5.75	25	5.75	15
김천	500	5.25	25	5.75	25	4.75	15
	1000	5.75	25	5.25	25	5.25	15
	2400	6.25	25	5.75	25	5.75	15
부산	500	4.75	25	5.25	25	4.75	15
	1000	5.25	25	5.75	25	4.75	15
	2400	5.75	25	5.25	25	5.25	15

### 3. 대표 입력지진파의 생성

본 연구에서는 지진환경과 설계기준을 모두 만족시키는 대표 입력지진파의 생성을 위해 다음과 같은 방법을 적용할 것이다. 먼저 지진학적 환경 고려를 위하여 지진재해분석의 역 개념인 deaggregation을 수행하여 대표 지진 시나리오를 선택한다. 선택된 시나리오에 부합하는 조건의 계측 지진파를 지진 기록 데이터베이스를 활용하여 수집한 뒤, 수집된 지진파를 기본으로 시간영역에서 응답스펙트럼에 맞추어 시간영역 인공지진파를 생성한다. 시간영역에서 생성되는 응답스펙트럼 맞춤형 지진파는 주파수 영역에서 생성되는 맞춤형 인공지진파와는 다르게 계측 지진파의 non-stationary 특성을 잘 보존하는 장점이 있어 가장 정교하게 목표 스펙트럼을 맞추는 기법으로 평가되고 있다.

#### 3.1 Deaggregation

본 연구에서는 선행 연구(박두희 등, 2009)에 의해 新 PSHA기법으로 작성된 지진재해도를 기반으로

deaggregation을 수행하였다. Deaggregation은 한반도 전 지역에 대해 수행되었으며 일부 대표 지역의 deaggregation 결과는 표 1과 같다. 표 1에 나타난 바와 같이 한반도 일부 지역의 대표 지진 시나리오는 규모 6.5, 이격 거리 25 km 이하이다. 이와 같은 사실은 국내 내진설계를 위한 동적 해석 시 입력지진파로 사용되는 큰 규모의 지진파는 deaggregation 결과와 일치하지 않는다는 것을 의미한다.

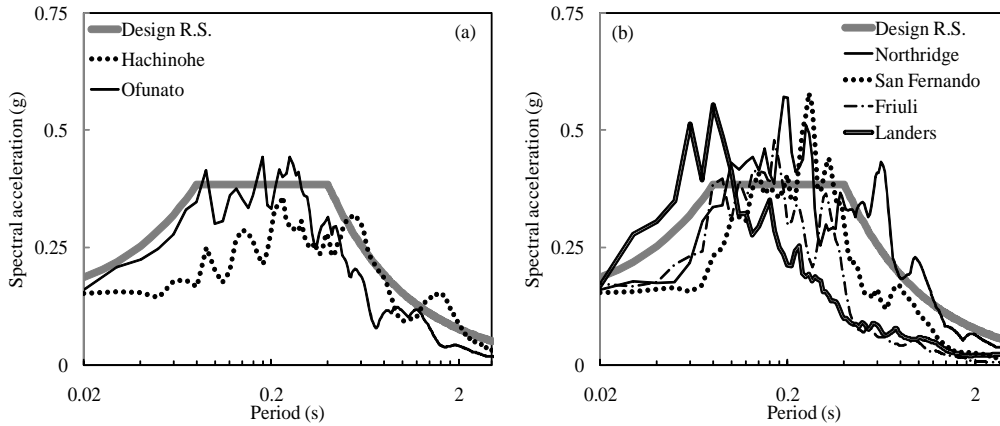


그림 1. (a) 국내 내진설계 적용 지진파와 (b) 연구 대상 지진파의 5% 감쇠비를 적용한 응답스펙트럼

### 3.2 지진 환경을 고려한 계측지진파 선택

Deaggregation 결과를 고려하여 규모 5.0에서 7.9, 이격 거리 0 km 에서 150 km, 지반분류상 site B 이상( $V_s=800$  m/s 이상)의 지반에서 계측된 지진파를 수집하였다. 지진파의 수집은 PEER (<http://peer.berkeley.edu/nga>), COSMOS(<http://db.cosmos-eq.org>), NCEER(<http://ideo.columbia.edu/res/data/nceer>) 등 다양한 지진센터의 자료를 기반으로 수행되었다. 수집된 지진파는 시간영역 맞춤형 지진파 생성 기법을 사용하여 국내 설계응답스펙트럼(재현주기 1000년, site B)에 맞추어 생성하는 맞춤형 지진파 생성에 기본 지진파로 사용 하였다. 그림 1은 국내 내진해석시 일반적으로 사용되는 지진파인 Hachinohe와 Ofunato, deaggregation 결과 계산된 규모 6.5에 해당하는 계측 지진파(Northridge  $M=6.7$ ,  $R=23.4$  km; San Fernando  $M=6.6$ ,  $R=28.5$  km; Friuli  $M=6.5$ ,  $R=20.9$  km), 이와 비교를 위해 선정 한 큰 규모의 지진파(Landers  $M=7.3$ ,  $R=28.2$ )의 응답스펙트럼을 도시한 것이다. 일반적으로 알려진 바와 같이 큰 규모의 지진파 일수록 장주기 요소가 지배적인 응답 형상을 보이고 있다.

### 3.3 시간영역 인공지진파 생성

시간영역 맞춤형 지진파 생성은 여러 연구자(Abrahamson, 1996; Choi 등, 2003)들에 의해 연구 되었 으며 본 연구에서는 Choi 등(2003)의 방법에 기반하여 지진파 생성 프로그램을 작성한 뒤 연구에 적용 하였다. Choi 등(2003)은 기준 응답스펙트럼과 대상 계측지진파의 응답스펙트럼의 차이를 충격 스펙트럼 (spectral impacts)를 통해 맞추어 가는 과정을 반복 수행하는 방법을 제안하였다. 충격 스펙트럼의 입력 은 응답스펙트럼의 부분적 수정에 매우 적합하며 시간영역에서 수행되므로 계측지진파의 non-stationary 특성을 손상시키지 않는다. 계산된 응답스펙트럼과 기준 응답스펙트럼(설계응답스펙트럼)과의 차를  $\delta S(\omega_i, \xi)$ 라 하면 이는 임의의 시간함수  $\delta \ddot{Z}(t)$ 를 사용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 (Kaul, 1978; Lilhanand 등, 1987).

$$\delta S(\omega_i, \xi) = \int_0^{t_{mi}} \delta \ddot{Z}(\tau) h_i(t_{mi} - \tau) d\tau \quad (1)$$

여기서

$$h_i(t) = -\frac{1}{\omega_{Di}} \exp(-\xi \omega_{Di} t) \sin \omega_{Di} t \quad (2)$$

이며,  $h_i(t)$ 는 I번째 고유진동수(natural frequency),  $\omega_i$ 와 감쇠비  $\xi(\omega_{Di} = \omega_i \sqrt{1 - \xi^2})$ 에 대한 단자유도(SDOF)계의 가속도 충격응답함수(acceleration impulse response function),  $t_{mi}(t_m(\omega_i))$ 의 축약형태)는 해당응답스펙트럼의 발생시간,  $\tau$ 는 시간변수이다. 이러한 과정을 통하여 계산된  $\delta \ddot{Z}(t)$ 를 시간이력에 응답 오차가 허용범위를 만족할 때 까지 반복적으로 더하여 맞춤형 지진파가 생성된다.

위 과정을 통하여 수집된 계측 지진파를 국내 설계기준에 부합하는 설계응답스펙트럼(재현주기 1000년, site B)에 맞추어 생성하였다. 그림 2는 계측 지진파와 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도를 그림 3은 계측 지진파와 맞춤형 지진파의 스펙트로그램(spectrogram)을 그림 4는 수집된 계측 지진파를 기본으로 하여 시간영역에서 생성된 맞춤형 지진파의 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼(재현주기 1000년, site B)을 각각 나타내고 있다. 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도(그림 3f~j)와 스펙트로그램(그림 4f~j)은 계측 지진파(그림 3a~e, 그림4a~e)와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 즉, 시간영역에서 생성된 지진파는 계측지진파의 non-stationary 특성을 유지하고 있는 것이다. 또한, 그림 2는 시간영역에서 생성된 맞춤형 지진파의 응답스펙트럼은 주파수 영역에서 생성된 인공지진파와 마찬가지로 설계응답스펙트럼과 완벽히 일치함을 나타내고 있다.

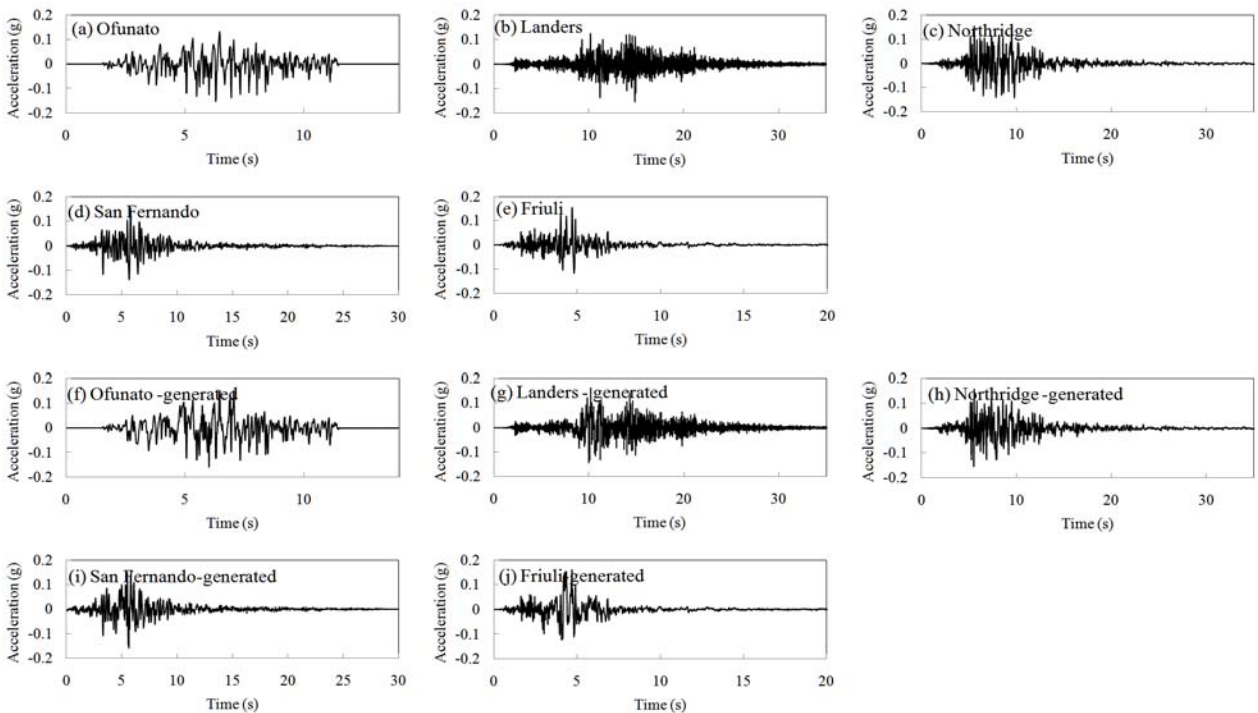


그림 2. 계측지진파(a~e)와 시간영역에서 생성된 맞춤형 지진파(f~j)의 시간이력 가속도 곡선

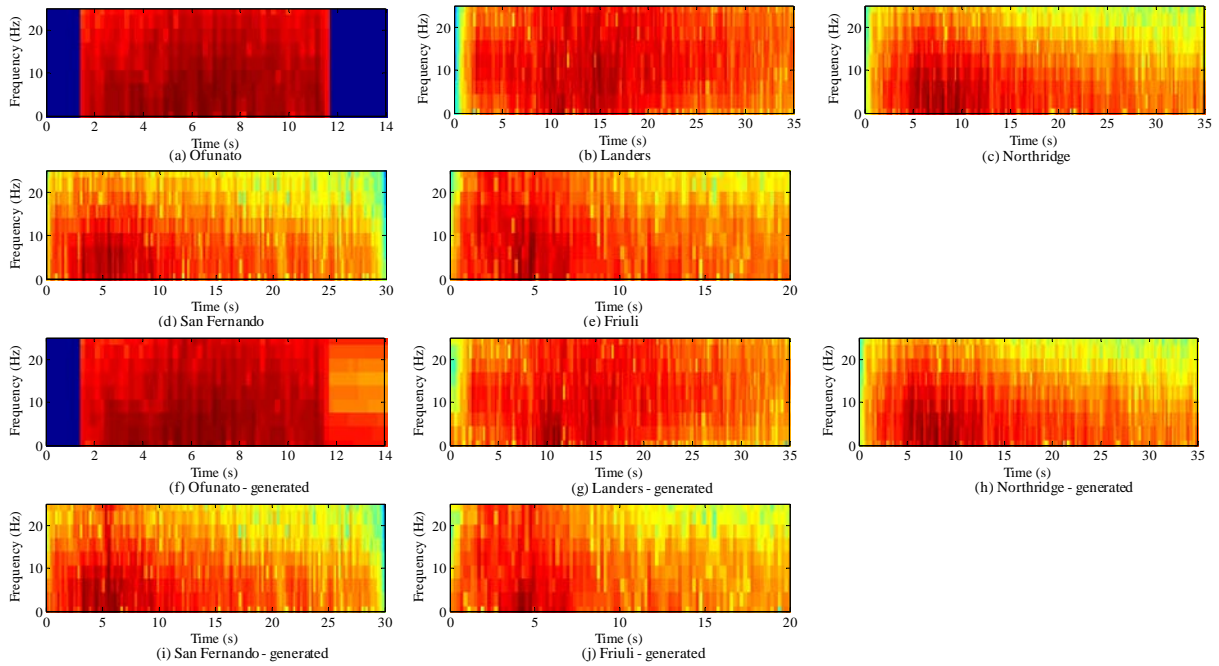


그림 3. 계측지진파(a~e)와 시간영역에서 생성된 맞춤형 지진파(f~j)의 스펙트로그램(spectrogram)

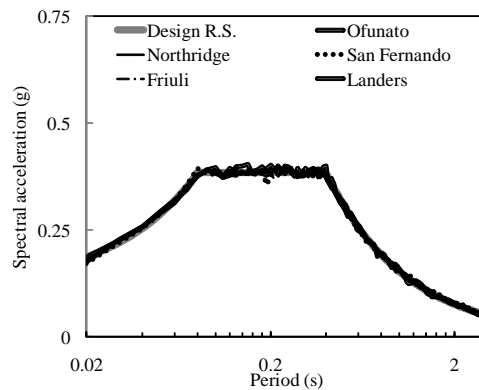


그림 4. 시간영역에서 생성된 맞춤형 지진파의 응답스펙트럼

#### 4. 결론

본 연구는 지진학적 환경과 설계기준을 모두 만족하는 입력지진파 생성 알고리즘에 관한 연구이다. Deaggregation을 수행하여 대표 지진 시나리오를 선정하였으며 이에 근거한 계측 지진파 데이터 베이스를 구축하였다. 계측 지진기록은 wavelet을 이용하여 설계응답스펙트럼 맞춤형 지진파로 변환되었다. 연구 결론은 다음과 같다.

- 1) 한반도를 대상으로 확률론적 지진재해분석의 역개념인 deaggregation을 수행하였다. 국내의 경우 지진 시나리오 별 기여도가 유사한 것으로 나타났다. 대표 지진 시나리오는 설계 지진 규모 6.5보다 작은 5.25~5.75인 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구에서 적용한 맞춤형 지진파 생성 알고리즘은 매우 정확하게 목표 스펙트럼에 상응하는 지진기록을 생성하는 것으로 나타났다. 알고리즘의 장점은 시간 영역에서 wavelet을 추가하기 때

문에 원 지진기록의 non-stationary 특성을 보존하는 것으로 나타났으며 주파수 영역에서 생성되는 인공지진파의 단점을 극복하는 것으로 나타났다.

- 3) 위 과정은 실 지진기록을 변환하여 설계 스펙트럼에 완벽히 상응하도록 맞추어 주기 위하여 수행되는 것이다. 따라서 현재 사용되는 인공지진파 대신 맞춤형 지진파를 사용할 수 있을 것이라고 판단되며 이 경우 현재 내진해석시 권장하는 2개의 계층지진파와 1개의 인공지진파를 1개의 맞춤형 지진파로 대체 할 수 있게 되므로 지진해석 소요시간이 줄어들 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-331-D00601).

## 참고문헌

1. 박두희, 광동엽, 정창균 (2009), “新 확률론적 지진재해분석 및 국내 지진계수 개발 Part I : 新 확률론적 지진재해분석 기법 적용 및 검증”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제 10권, 제 7호, pp.103~109.
2. Abrahamson, N. (1996), “Nonstationary response-spectrum matching”, *Unpublished papers*.
3. Choi, D. and Lee, S. (2003), “Multi-damping earthquake design spectra-compatible motion histories”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 226, No. 3, pp.221~230.
4. Gasparini, D.A. and Vanmarcke, E.H. (1976), *SIMQKE: A program for artificial motion generation Cambridge: Massachusetts Institute of Technology*.
5. Kaul, M. (1978), “Spectrum-consistent time-history generation”, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 104, No. 4, pp.781-788.
6. Lilhanand, K. and Tseng, W. (1987), *Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping response spectra*, SmiRT-9. Lausanne, Vol. 2.