

## 시간영역에서 생성되는 설계응답스펙트럼 맞춤형 지진파 생성

### Generation of Design Spectrum Compatible Ground Motion in Time Domain

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

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

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

**SYNOPSIS** : Due to the improvement of the seismic hazard analysis method and the design code, dynamic analysis method is widely used. To conduct dynamic analysis, various coefficients should be designated. The time history acceleration is one of the most essential factor. However, strong earthquake motion data from the outside of the country have been used to conduct dynamic analysis without considering of the ground motion parameters. In this study, the methodology to choose appropriate input motion is developed by using time domain design spectrum matching procedure. Two examples are applied to verify the methodology. The Result shows that the methodology satisfies seismic circumstances and the design code.

**Key words** : Design spectrum, spectrum matching, dynamic analysis, input motion

## 1. 서론

최근 내진설계에 대한 관심이 높아지며, 지진 해석시 동적 해석의 활용이 빈번해지고 있는 추세이다. 동적 해석은 다수의 입력변수를 필요로 하며 이중 해석결과에 가장 큰 영향을 미치는 것은 입력 지진파, 즉 지반운동의 시간이력이다. 하지만 현재 국내는 지진학적 검토 없이 미국, 일본에서 계측된 강진 기록을 입력지진파로 사용하거나 계측 지진파의 대응으로 설계응답스펙트럼에 맞추어 생성한 인공지진파를 사용하고 있다. 국내 발생 확률이 매우 적은 강진 기록을 국내 지반에 적용할 경우 지진 규모에 따라 변하는 지속시간과 에너지를 고려할 수 없으며, 설계응답스펙트럼에 맞춘 인공지진파를 사용할 경우 실제 지진기록과 주파수 특성이 상이하다는 단점이 있다. 본 연구는 이와 같은 입력지진파 선정의 문제점에 대하여 고찰하여 보고, 시간영역 설계응답스펙트럼 맞춤 기법을 이용하여 국내 지진학적 환경과 내진설계기준에 모두 부합하는 맞춤형 지진파 선정방법을 제안하고자 한다.

## 2. 국내 입력지진파 선정의 문제점

지진재해예측은 일반적으로 확률론적인 접근방식을 채택하여 수행되며 암반노두에서 미래에 발생할 진동을 예측한 뒤 진동에 따른 부지효과를 예측하는 과정을 통하여 이루어 진다(Kramer, 1996). 이 때 수행되는 지반응답해석을 위하여 입력 지진파를 선정하여야 하며 선정 기준은 작성된 설계응답스펙트럼이다.

국내의 경우 일반적으로 입력 지진파는 계측 또는 인공지진파가 사용되며 주로 Miyagi-oki 지진(1968년 일본 Ofunato 계측, 규모 7.9), Tokachi-oki 지진(1978년 일본 Hachinohe 계측, 규모 7.4)과 설계응답스펙트럼에 맞추어 생성된 인공지진파를 사용한다. 그림 1은 각각 Ofunato, Hachinohe, 인공지진파의 시간이력 가속도곡선과 푸리에스펙트럼을 도시한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 Ofunato는 중/고 주파

수가, Hachinohe는 저주파수가, 인공지진파는 거의 모든 주파수 대역이 우세한 것을 알 수 있다. 그림 2는 각 지진파의 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼을 비교하고 있다. 언급한 바와 같이 Hachinohe는 장주기 요소가, Ofunato는 단주기와 중주기 요소가 응답스펙트럼과 비교적 잘 일치하며, 인공지진파는 모든 주기에 걸쳐 인공지진파와 완벽히 일치한다. Hachinohe와 Ofunato는 국내 발생 확률이 희박한 대지진에서 발생한 진동을 최대지반가속도만을 국내 기준에 적합하도록 스케일링하고, 동적 해석시 소요시간을 줄이기 위하여 최대 진동부분만을 추출하여 사용하고 있는 것이며, 토층에서 계측된 지진파이므로 이들을 기반암에 적용할 경우 중장기 요소가 두 번에 걸쳐 증폭되므로 매우 비현실적인 주파수 특성을 갖게 될 수 있다. 인공지진파의 경우 설계응답스펙트럼과는 완전히 일치하지만 전 주파수 대역이 큰 주파수 요소를 나타내며 시간이력 가속도곡선의 경우 최대지반가속도가 반복적으로 나타나는 등의 부자연스러운 현상을 나타낼 수 있다. 또한 입력 지진파의 특성은 최대지반가속도(PGA)와 응답스펙트럼만으로 규정지을 수 없다. 지진파의 주파수 특성, 지속시간, 총 에너지, 등가반복 횟수 등은 지진의 규모와 진앙거리와 같은 지진환경에 의해 지배 받는다(Anderson, 1991; Liu et al., 2001). 이와 같이 입력 지진파의 지진학적 환경 고려는 매우 중요하지만 국내 설계기준(건설교통부, 2005; 건설교통부, 2007; 대한건축학회, 2006)은 입력지진파에 대해 상세히 다루고 있지 않다.

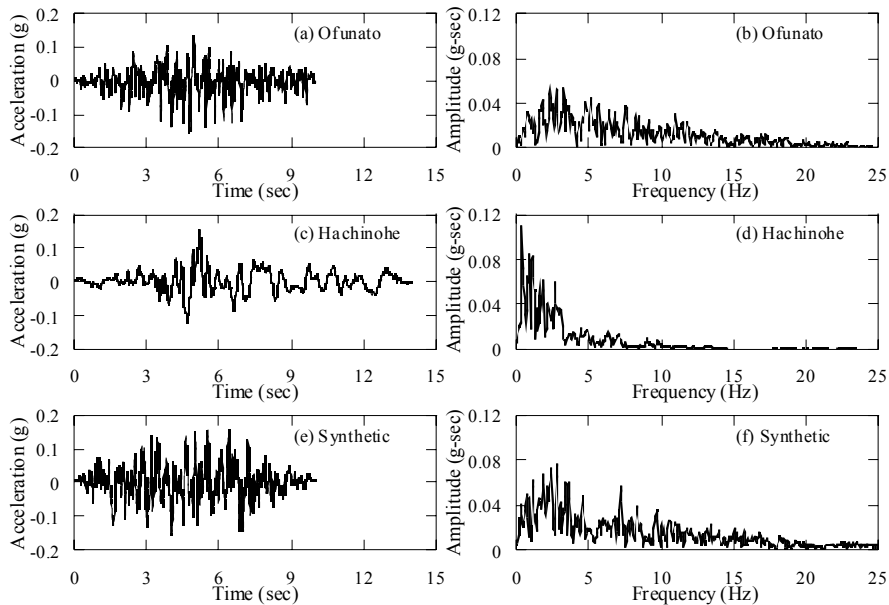


그림 1. 국내 내진설계시 사용하는 입력지진파의 시간이력 가속도 곡선과 푸리에 스펙트럼

### 3. 설계응답스펙트럼 맞춤형 지진파

본 연구에서 제안하는 입력지진파의 선정방법은 다음과 같이 두 단계로 이루어져 있다. 첫째, 지진학적 환경을 고려한 계측지진파 선정. 둘째, 선정된 계측지진파를 설계응답스펙트럼과 일치하도록 맞춤. 인공지진파는 주파수 영역에서 설계응답스펙트럼에 맞추어 생성되기 때문에 비현실적인 주파수 요소를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 인공지진파가 아닌 계측 지진파만을 대상으로 진행 될 것이며 이를 설계응답스펙트럼을 만족하도록 수정하여 입력지진파로 선정할 것이다.

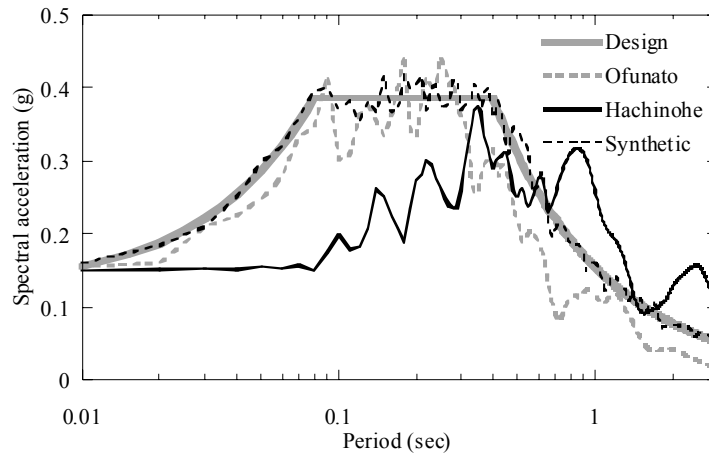


그림 2. 설계응답스펙트럼(재현주기 1000년, SITE B)과 입력지진파에 따른 응답스펙트럼의 비교

먼저 지진학적 환경은 진앙거리, 규모, 지진파의 계측위치, 최대지반가속도(PGA), 30 m 깊이까지의 평균진단파 속도( $V_{S30}$ ) 등이 있다. 이와 같은 지진학적 환경은 확률론적 지진재해 분석을 통한 최적 시나리오로부터 결정 될 수 있으며 현재 여러 연구자에 의해 명확한 지진환경 결정을 위한 연구가 진행중이다. 본 연구는 이중 박두희(2009)에 의한 연구 결과를 예시로 사용할 것이다. 최적 시나리오가 결정된 후 이에 상응하는 계측 지진파를 선정하여야 한다. 결정된 지진학적 환경과 동일한 환경에서 계측된 지진파를 여러 데이터베이스(PEER, COSMOS)를 이용하여 선정할 수 있다.

선택된 지진파를 입력지진파로 사용하기 위하여 설계응답스펙트럼과 동일한 응답스펙트럼을 가지도록 맞추어야 한다. 이 과정은 크게 주파수 영역 맞춤과 시간영역 맞춤으로 구분할 수 있다. 주파수 영역 맞춤은 일반적으로 수렴이 어렵고 비현실적인 파형을 나타내는 경우가 많은 반면 시간영역 맞춤의 경우 계측 지진파의 non-stationary 특성을 잘 보존하며 자연스러운 파형을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 시간영역 맞춤기법을 사용할 것이다.

시간영역 설계응답스펙트럼 맞춤 기법은 입력지진파의 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼과 맞추기 위하여 시간이력 가속도 곡선을 작게 분해하여 분해된 각각의 웨이브렛을 반복 조절하는 기법이다. Choi and Lee(2003)의 방법은 대상 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼의 차이를 적절한 크기의 충격 스펙트럼(spectral impacts) 입력을 통해 맞추어 가는 과정을 반복하여 이름 수렴시키는 방법이다. 충격 스펙트럼의 입력은 응답스펙트럼의 부분적 수정에 매우 적합한 것으로 알려져 있다.

#### 4. 맞춤형 지진파생성 예시

위에 언급한 바와 같이 동적 해석을 위한 가장 이상적인 입력 지진파의 선택은 지진재해 분석시 deaggregation을 통해 발생 확률이 가장 높은 시나리오를 결정한 후 이때 결정된 규모와 진앙거리 지반 조건과 같은 지진환경을 참고로 하여 과거 발생하였던 지진중 같은 환경을 가진 지진의 기록을 이용하여 응답스펙트럼 맞춤과정을 거친 뒤 이를 사용하는 것이다. 본 연구에서는 이와 같은 과정을 간단한 예를 통하여 구현하여 보았으며 이를 현재 내진설계 동적 해석 수행시 일반적으로 사용하고 있는 지진파에 적용한 결과와 비교하여 보았다. 예에는 총 2개의 지진파가 사용되었으며 선택한 지진파는 Ofunato(1978년 6월, 규모 7.4, PGA 0.23g), Northridge(1994년 3월, 규모 5.28, PGA 0.04g)이다. Ofunato(1978년 6월, 규모 7.4, PGA 0.23g)는 현재 내진설계시 빈번히 사용하고 있는 지진파이며, Northridge(1994년 3월, 규모 5.28, PGA 0.04g)는 확률론적 지진재해 분석을 통하여 선정된 최적 시나리오와 유사한 지진파로 가장 이상적인 입력지진파이다. 지진 시나리오는 SITE B 지반 노두에서 계측된 진앙거리 25 Km, 규모 5.25의 지진이다. 이와 같은 지진환경을 가지고 PEER(Pacific Earthquake

Engineering Research center, <http://peer.berkeley.edu/nga>)의 계측 지진파 데이터 베이스를 통해 계측 지진파를 획득하였다. 설계응답스펙트럼은 국내 재현주기 1000년, SITE B를 사용 하였다.

#### 4.1 사례 1: Ofunato

1978년 6월 12일 일본에서 발생한 Miyagi-Oki 지진은 규모 7.4, 최대지반가속도 0.23 g 의 강진이다. Ofunato는 이와테현의 도시인 Ofunato에서 계측된 지진파로서, 실제 지진 지속시간은 약 1 분 가량이나 본 연구에서는 국내 내진설계시 사용되는 지진파와 유사하게 강진 발생구간 약 10 초만을 적용하였고, 재현주기 1000년에 해당하는 최대지반가속도(PGA=0.154 g)로 스케일링 한 후 맞춤 기법을 적용하였다.

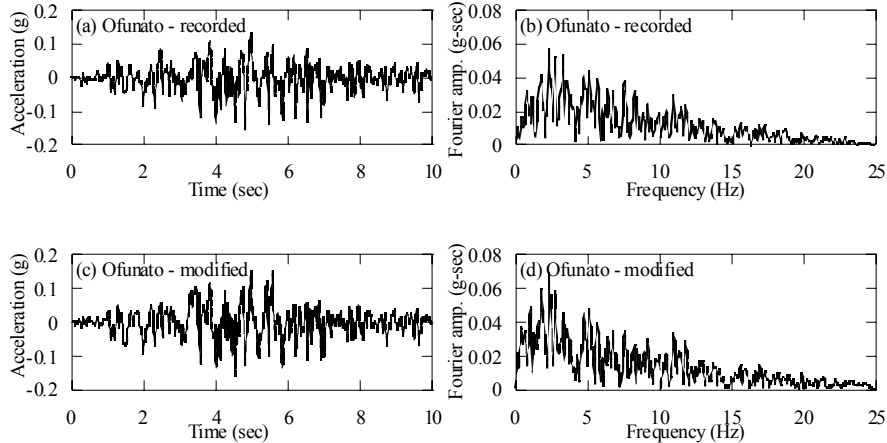


그림 3. 계측지진파(Ofunato)와 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도 곡선과 푸리에 스펙트럼의 비교

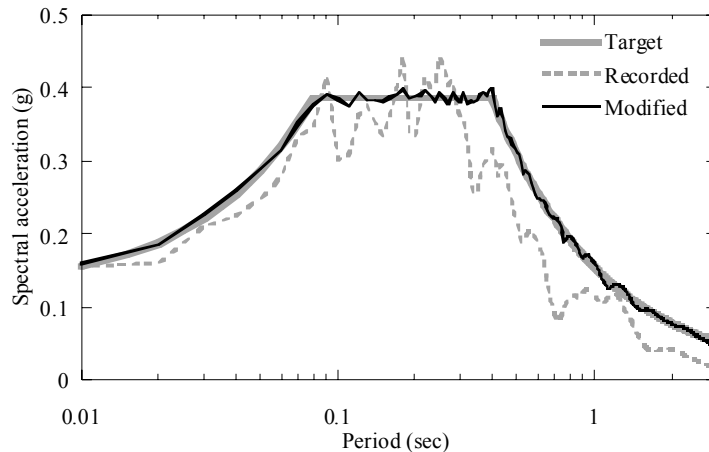
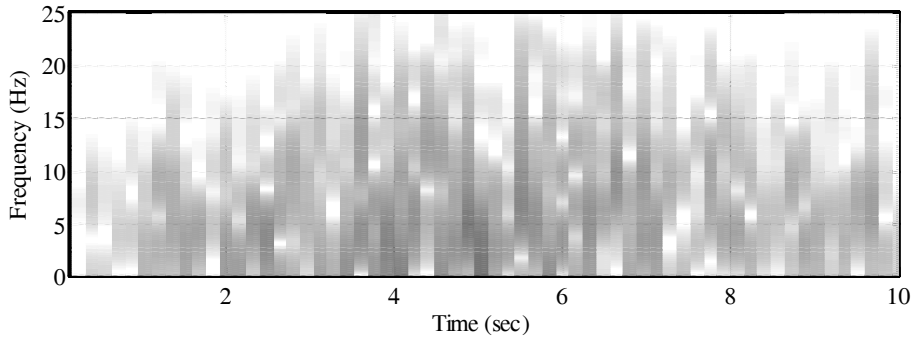


그림 4. 계측지진파(Ofunato)와 맞춤형 지진파의 응답스펙트럼 비교

그림 3은 Ofunato와 이를 이용하여 생성된 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도 곡선과 푸리에 스펙트럼을 나타내고 있다. 나타난 바와 같이 맞추어 지기 전/후 두 지진파의 차이는 크지 않으며, 이는 맞춤형 지진파가 원본 지진파의 non-stationary 특성을 유지하고 있음을 의미한다. 그림 4는 각 지진파의 응답스펙트럼을 비교하고 있다. 국내 내진설계시 적용되고 있는 Ofunato는 그림에 나타난 바와 같이 설계응

답스펙트럼과 같이 단주기, 중주기 대역의 일치성이 좋아 국내 내진설계시 사용하고 있는 지진파이다. 이를 시간영역에서 설계응답스펙트럼과 맞춘 결과 단주기, 중주기 뿐만이 아닌 전 주기에서 뛰어난 일치성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 Ofunato와 맞춤형 지진파의 스펙트로그램이다. 그림 5(a)와 (b)는 거의 유사한 주파수 요소를 보여주고 있다. 이는 맞춤 기법이 잘 적용되었음을 의미한다. 하지만 Ofunato의 경우 계측기록 일부를 발췌하여 해석에 적용하므로 자연적인 지진파의 주파수 특성을 보이지 않고 있음에 유의하여야 한다.

(a) 계측 지진파(Ofunato)의 스펙트로그램



(b) 설계응답스펙트럼에 맞추어진 지진파의 스펙트로그램

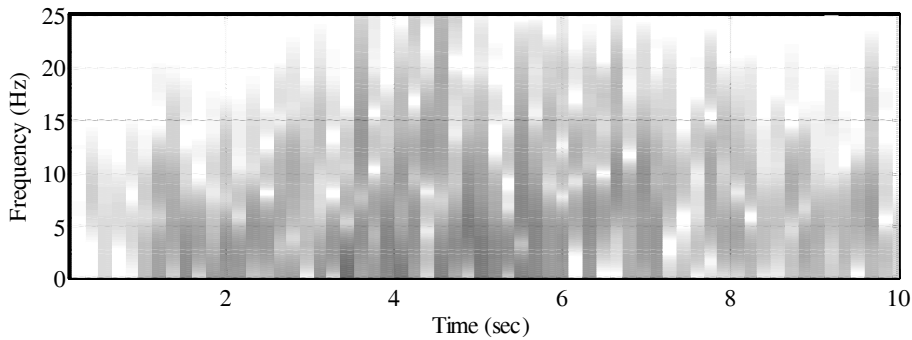


그림 5. 계측 지진파(Ofunato)와 맞춤형 지진파의 스펙트로그램 비교

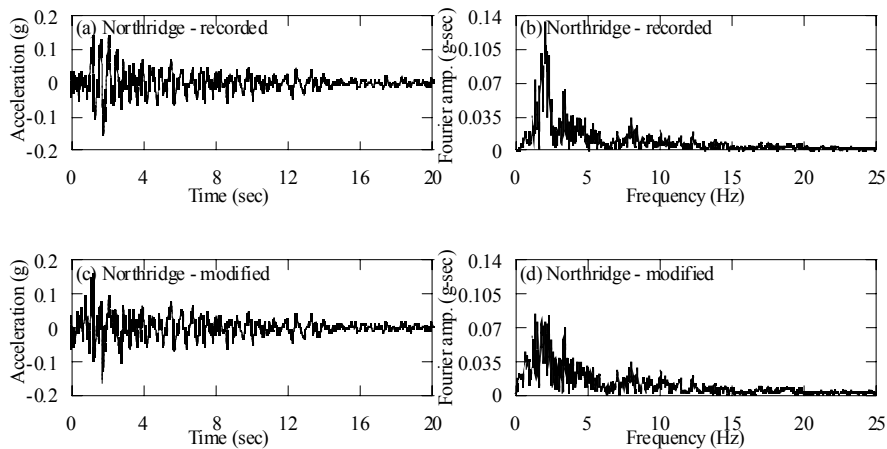


그림 6. 계측지진파(Northridge)와 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도 곡선과 푸리에 스펙트럼의 비교

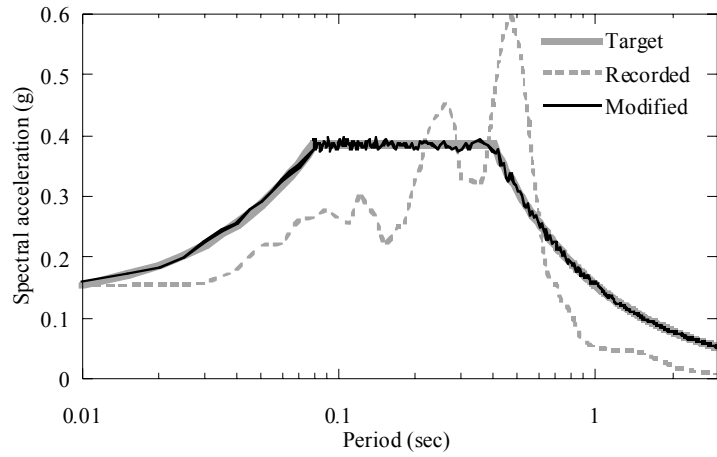
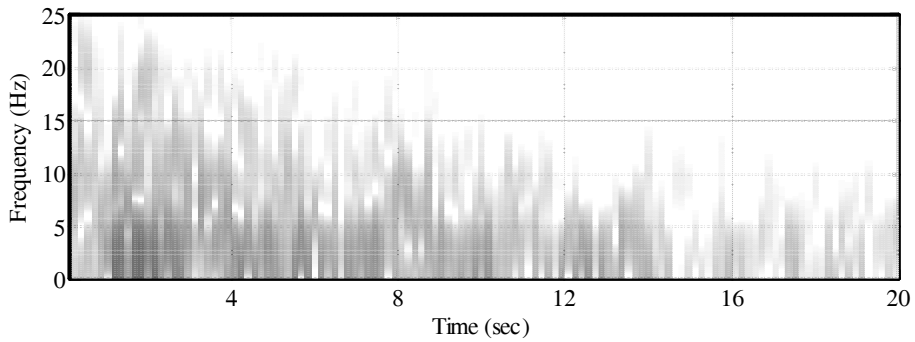


그림 7. 계측지진파(Northridge)와 맞춤형 지진파의 응답스펙트럼 비교

(a) 계측지진파의 스펙트로그램



(b) 설계응답스펙트럼에 맞추어진 지진파의 스펙트로그램

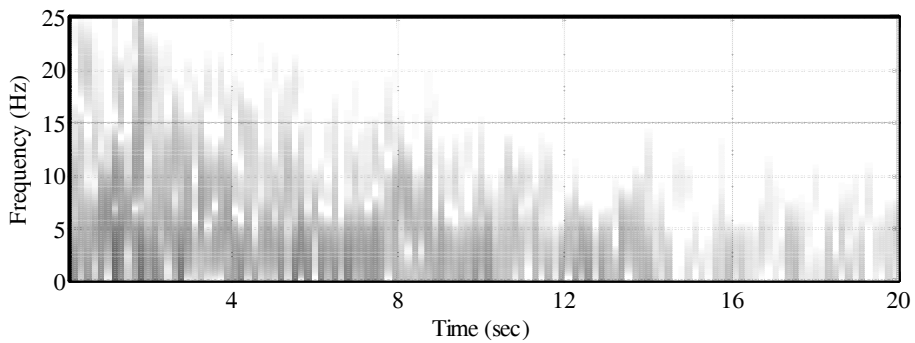


그림 8. 계측지진파(Northridge)와 맞춤지진파의 스펙트로그램 비교

## 4.2 사례 2: Northridge

1994년 3월 20일 미국 캘리포니아주에서 발생한 Northridge 지진은 규모 5.28, 최대지반가속도 0.05 g의 지진이다. 위에 언급한 바와 같이 Northridge는 국내 지진재해 분석 결과 발생 확률이 가장 높은 시나리오의 규모와 거리(규모 5.25, 이격거리 25 km)가 유사한 지진파로서 내진 해석시 적용하여야 할 가장 이상적인 지진파이다. 해당 지진파를 재현주기 1000년에 해당하는 최대지반가속도(PGA=0.154g)로 스케일링 한 후 맞춤형 지진파를 생성 하였다.

그림 6은 Northridge와 이를 이용하여 생성된 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도 곡선을 나타내고 있다. Northridge의 시간이력곡선은 Ofunato의 경우와는 달리 계측지진파와 맞춤형 지진파 사이에 확연한 차이를 보이고 있다. 푸리에 스펙트럼 역시 많은 차이를 보이고 있다. 이는 응답스펙트럼(그림 7)을 통해 잘 설명될 수 있다. 설계응답스펙트럼이 계측 지진파의 응답스펙트럼보다 작은 0.5 초에 해당하는 주파수 요소의 크기가 매우 작아졌으며 반대의 경우 해당 주파수 요소의 크기가 매우 커졌음을 알 수 있다. 하지만 전체 시간영역을 주파수 영역으로 나타낸 푸리에 스펙트럼과는 달리 시간의 흐름에 따른 주파수 요소를 나타낸 스펙트로그램(그림 8)의 경우 일부 시간대의 주파수 요소만 조정되었으며 대부분 영역의 경우 원 계측 지진파의 특성을 잘 유지하고 있다.

## 5. 결론

본 연구는 내진설계시 수행되는 동적 해석 적용을 위한 입력지진파의 적절한 선택을 위해 시간영역에서 설계응답스펙트럼에 맞추어지는 맞춤형 지진파 생성에 관한 알고리즘을 소개하고, 두 개의 지진파를 예로 이용하여 국내 재현주기 1000년, SITE B에 해당하는 설계응답스펙트럼에 적용하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 일본의 강진 계측기록인 Ofunato는 지진파의 일부(강진 구간)를 발췌하여 해석에 적용하므로 Northridge와 같은 자연적인 계측지진파와 다른 주파수 요소를 가지고 있으며 이는 오히려 인공지진파의 특성과 가깝다. 따라서 동적 해석 적용시 주의를 요한다고 판단된다.
2. 시간영역에서 수행되는 설계응답스펙트럼 맞춤형 지진파의 경우 설계응답스펙트럼과의 일치성이 뛰어나며 non-stationary 특성도 잘 유지 하는 것으로 나타났다.
3. 추후 맞춤형 지진파와 기존 지진파의 부지효과에 따른 증폭특성에 대한 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 신진교수지원(D00601)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 건설교통부 (2005), “도로교설계기준”, 한국도로교통협회, 510 pp.
2. 건설교통부 (2007), “터널설계기준”, 한국터널공학회, 138 pp.
3. 대한건축학회 (2006), “건축구조설계기준 및 해설”, 대한건축학회, 710 pp.
4. 박두희 (2009), “신 확률론적 지진재해분석기법과 부지효과 모듈을 통합하는 온라인 통합 플랫폼 개발 최종보고서”, 88 pp.
4. Kramer, S. L. (1996), “Geotechnical earthquake engineering”, *Prentice Hall*, xviii, 653 pp.
5. Anderson, J. G. (1991), “Guerrero accelerograph array: Seismological and gertechanical lessons”, *Gertechanical News*, Vol. 9, No. 1, pp. 34-37.
6. Liu, A., Stewart, J., Abrahamson, N. and Moriwaki, Y. (2001), “Equivalent number of uniform

stress cycles for soil liquefaction analysis", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, No. 12, pp. 1017-1026.

7. 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.
8. Lilhanand, K. and Tseng, W. (1987), "Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping response spectra", *SmiRT-9*, Vol. 2
9. Abrahamson, N. (1996), "Nonstationary response-spectrum matching", *Unpublished papers*