

시간영역 인공지진파 생성

Generation of Synthetic Ground Motion in Time Domain

김현관¹ · 박두희² · 정창균³

Hyun-Kwan Kim¹, Du-Hee Park², and Chang-Gyun Jeong³

(Received August 31, 2010 / Revised October 5, 2010 / Accepted October 13, 2010)

요 약

국내에서 내진설계의 중요성이 점차적으로 부각되고 있으며 이에 따라 설계 시 동적 지진해석의 수행빈도가 높아지고 있다. 동적 지진해석을 수행하기 위한 가장 중요한 입력변수 중 한가지는 입력지진파이다. 그러나 현재 국내에서는 지진학적 검토 없이 미국, 일본 등에서 계속된 강진 기록을 입력지진파로 사용하거나 주파수영역에서 생성된 인공지진파를 사용하고 있다. 국외 계속 지진기록은 지진 규모에 따라 변화하는 지속시간과 에너지를 고려할 수 없어서 국내 지진환경에는 적합하지 않으며, 주파수 영역에서 생성되는 설계응답스펙트럼에 맞춤형 인공지진파는 실제 지진기록과 주파수 특성이 상이한 문제가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 입력지진파의 문제점을 극복하기 위하여 시간영역에서 수행되는 응답스펙트럼 맞춤형 인공지진파 알고리즘을 적용하여 입력 지진파를 생성하였다. 생성된 지진파는 계속 지진기록의 고유한 성질인 Non-stationary 특성을 보존하며 동시에 설계 응답스펙트럼과 거의 완벽한 일치성을 보이는 것으로 나타났다.

주제어 인공지진파, 설계응답스펙트럼, 지진해석, 입력지진파, 시간영역

ABSTRACT

The importance of seismic design is greatly emphasized recently in Korea, resulting in an increase in the number of dynamic analysis being performed. One of the most important input parameters for the dynamic seismic analysis is input ground motion. However, it is common practice to use recorded motions from U.S. or Japan without considering the seismic environment of Korea or synthetic motions generated in the frequency domain. The recorded motions are not suitable for the seismic environment of Korea since the variation in the duration and energy with the earthquake magnitude cannot be considered. The artificial motions generated in frequency domain used to generate design response spectrum compatible ground motion has the problem of generating motions that have different frequency characteristics compared to real recordings. In this study, an algorithm that generates target response spectrum compatible ground motions in time domain is used to generate a suite of input ground motions. The generated motions are shown to preserve the non-stationary characteristics of the real ground motion and at the same, almost perfectly match the design response spectrum.

Key words Synthetic ground motion, Design response spectrum, Seismic analysis, Input ground motion, Time domain

1. 서론

최근 전 세계적으로 강진 발생 빈도가 증가하고 있으며, 한반도 역시 과거에 비해 중소규모의 지진이 지속적으로 발생하고 있다. 최근 이와 같은 현실은 더 이상 한국이 지진의 안전지역이 아님을 입증하고 있으며 이에 따른 국내 내진설계기준에 대한 연구도 활발히 이루어져야 됨을 의미한다. 내진설계 시 지진해석의 수행은 다수의 입력변수를

필요로 하며 이중 해석결과에 가장 큰 영향을 미치는 것은 입력 지진파, 즉 지반운동의 시간이력이다. 하지만 현재 국내에서는 지진해석 수행 시 지진학적 검토 없이 미국, 일본에서 계속된 강진 기록을 입력지진파로 사용하거나 계속 지진파의 대응으로 설계응답스펙트럼에 맞추어 생성한 인공지진파를 사용하고 있다(건설교통부, 2005, 2007; 대한건축학회, 2006). 국내 발생 확률이 매우 적은 강진 기록을 스케일링하여 국내 지반에 적용할 경우 지진 규모에 따라 변하는 지속시간과 주

1) 한양대학교 건설환경공학과 석사과정(khk1227@hanyang.ac.kr)

2) 한양대학교 건설환경공학과 조교수(교신저자: dpark@hanyang.ac.kr)

3) 한양대학교 건설환경공학과

파수 특성을 고려할 수 없으며, 주파수 영역에서 설계응답스펙트럼에 맞춘 인공지진파를 사용할 경우 실제 지진기록과 주파수 특성이 상이하다는 단점이 있다. 또한, 입력지진파의 특성은 최대지반가속도와 가속도 응답스펙트럼만으로 규정 지을 수 없다. 지진파의 주파수 특성, 지속시간, 총 에너지, 등가반복 횟수 등은 지진의 규모와 진앙거리와 같은 지진환경에 의해 지배받기 때문이다(Anderson, 1991).

본 연구는 이와 같은 입력지진파 선정의 문제점을 시간영역 설계응답스펙트럼 맞춤형 기법을 적용하여 극복하고자 국내 지진학적 환경과 내진설계기준에 모두 부합하는 맞춤형 지진파를 생성하였다.

2. 국내 지진 해석에 사용되는 입력지진파의 특성 분석

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

국내의 경우 일반적으로 입력 지진파는 계측 그리고 인공 지진파가 사용되며 주로 Miyagi-oki 지진(1978년 일본 Ofunato

계측, 규모 7.4), Tokachi-oki 지진(1969년 일본 Hachinohe 계측, 규모 7.9)과 설계응답스펙트럼에 맞추어 주파수 영역에서 생성된 인공지진파를 사용한다. 그림 1은 각각 Ofunato, Hachinohe, 인공지진파의 시간이력 가속도 곡선과 푸리에 스펙트럼을 도시한 것이다. 인공지진파는 SIMQKE(Gasparini 등, 1976)로 생성되었다. SIMQKE는 기본적으로 어떠한 함수도 일련의 조화함수의 합으로 나타낼 수 있다는 사실에 입각하고 있으며 주파수 영역에서 지진파 특징을 정의하는 스펙트럼밀도함수, 실제 지진기록과 유사한 형상을 갖도록 인공지진파를 시간영역에서 변형하는 강도집중함수, 지속시간 등을 정의하며 화이트 노이즈를 사용하여 인공지진파를 생성한다.

그림 1은 Ofunato, Hachinohe 실 계측기록과 인공지진파의 푸리에 스펙트럼을 비교하고 있다. Ofunato와 Hachinohe는 각각 중/고주파수 대역과 저주파수 대역이 풍부한 것을 볼 수 있으며 인공지진파는 모든 주파수 대역에 걸쳐서 고르게 에너지가 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 2는 각 지진파의 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼을 비교하고 있다. Hachinohe는 장주기 요소가, Ofunato는 단주기와 중주기 요소가 응답스펙트럼과 비교적 잘 일치하며, 인공지진파는 모든 주기에 걸쳐 응답스펙트럼과 잘 일치한다. Hachinohe와 Ofunato는 국내 발생 확률이 희박한 대지진에서 발생한 진동

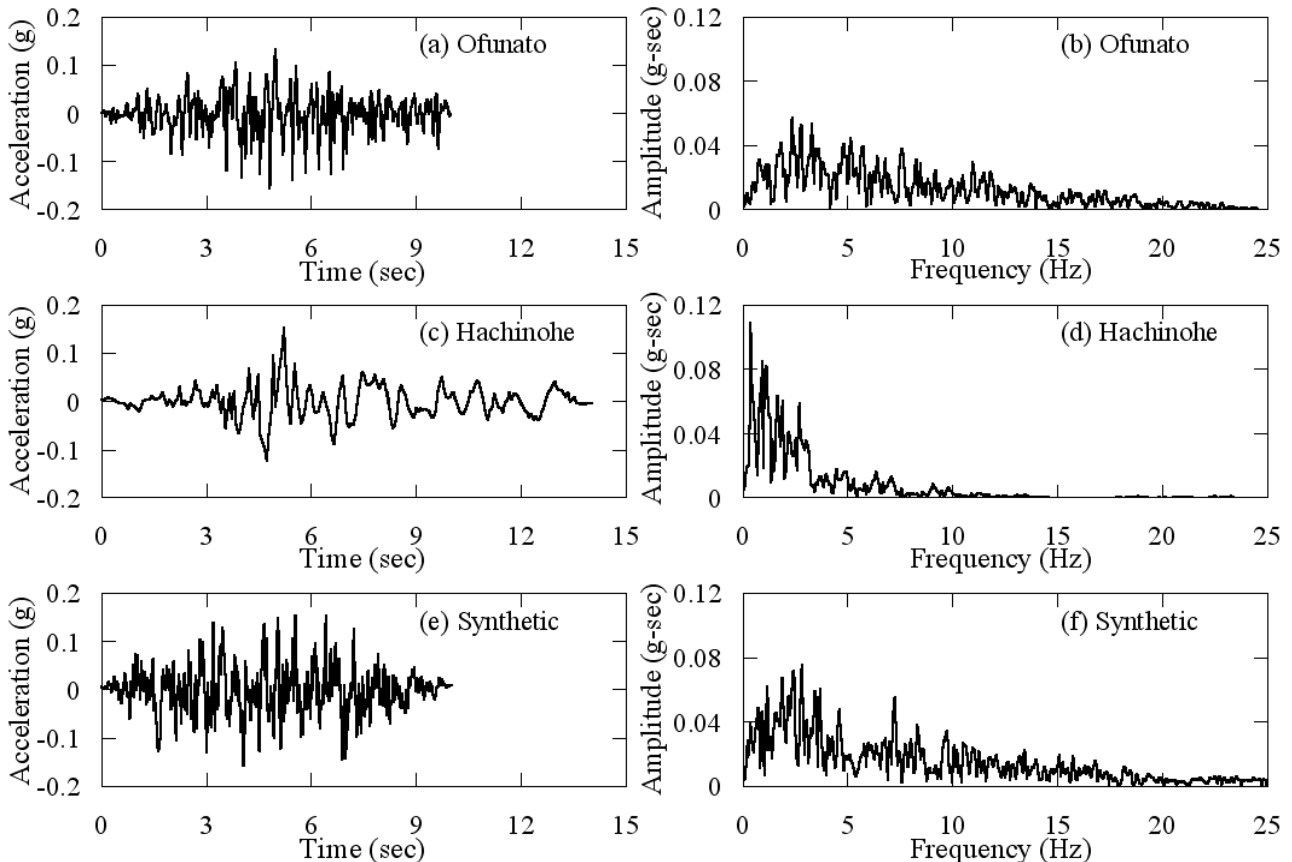


그림 1. 국내 내진설계에 사용되는 입력지진파의 시간이력 가속도 곡선과 푸리에 스펙트럼

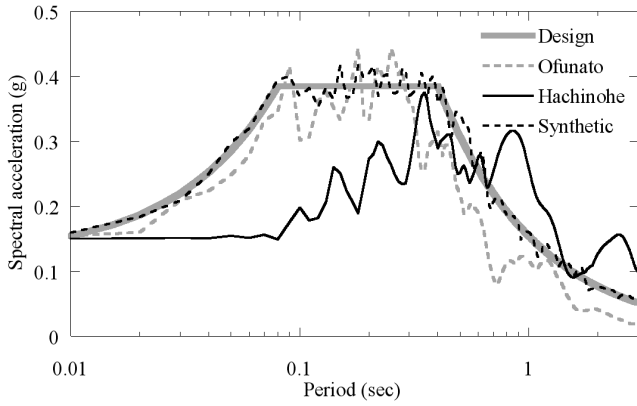


그림 2. 설계응답스펙트럼(재현주기 1000년, S_B)과 입력지진파에 따른 응답스펙트럼의 비교

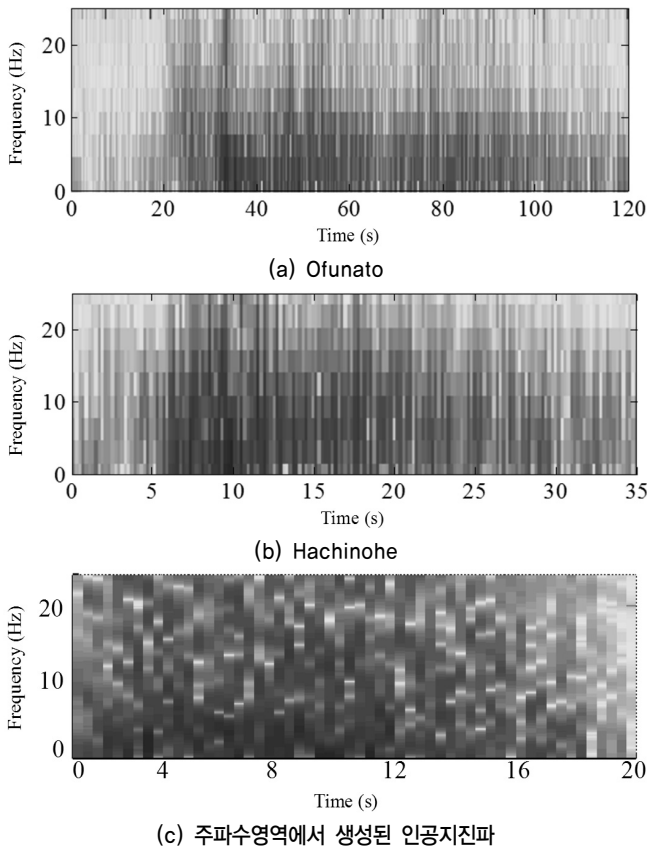


그림 3. Ofunato, Hachinohe, 인공지진파의 Spectrogram 비교

을 최대지반가속도만을 국내 기준에 적합하도록 스케일링하였으며, 무엇보다도 토층에서 계측된 지진파이므로 이들을 기반암에 적용할 수 없다. 특히 Hachinohe의 지진기록은 장주기 요소가 설계 응답스펙트럼에 비하여 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 인공지진파의 경우 설계응답스펙트럼과는 완전히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 각각의 지진파의 시간에 대한 주파수 특성의 변이를 분석하기 위하여 Spectrogram을 계산하여 그림 3에 비교하였다. Spectrogram은 시간단계 별

파워 스펙트럼 밀도 함수(Power spectral density function)를 나타낸다. Spectrogram의 색깔이 짙은 붉은 색일 경우 해당 주파수에서 푸리에 진폭이 최대이며 옅은 색일 수록 진폭이 작다는 것을 의미한다.

비교 결과, Hachinohe와 Ofunato는 시간에 따라서 주파수 특성이 변이하는 반면 인공지진파의 Spectrogram은 일정한 것을 볼 수 있다. 즉, 계측 지진파는 시간영역에 걸쳐서 주파수 특성이 변화하는 Stationary한 특성을 가지는 반면, 주파수 영역에서 생성된 인공지진파는 Non-stationary 특성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한, 인공지진파는 최대가속도가 지속적으로 반복되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 강진동 반복횟수가 커지면 유효응력 지반응답해석 시 과잉간극수압을 매우 크게 예측할 수 있어 계측 지반운동을 사용하는 경우와 특성이 크게 상이한 결과를 계산할 수 있어 주의해야 한다.

3. 시간영역에서 수행되는 맞춤형 인공지진파의 생성

본 연구에서는 지진파의 Stationary 특성을 보존할 수 있게 보다 진보된 기법인 시간영역 생성 알고리즘을 사용하여 지진파를 생성하였으며 이의 적용성을 분석하였다. 시간영역 인공 지진파 생성 알고리즘은 Choi와 Lee(2003)의 방법을 적용하였다. Choi와 Lee(2003)의 방법은 기준 응답스펙트럼과 대상 응답스펙트럼의 주파수 별 차이를 적절한 크기의 충격 스펙트럼(spectral impacts) 입력을 통하여 맞추어가는 과정을 반복하여 이를 수렴시킨다. 충격 스펙트럼의 입력은 응답스펙트럼의 부분적 수정에 매우 적합하며 시간영역에서 수행되므로 계측 지진파의 Non-stationary 특성을 손상시키지 않는다. Choi와 Lee(2003)의 방법은 다음과 같은 과정을 통해 수행된다.

$\ddot{Z}(t)$ 를 시간이력 가속도 곡선이라 하였을 때, 식 (1)와 같이 단자유도(Single Degree of Freedom, SDOF) 계의 응답을 계산할 수 있다.

$$\ddot{X}(t) + 2\omega_i \xi \dot{X}(t) + \omega_i^2 X(t) = -\ddot{Z}(t) \quad (1)$$

여기서 $\ddot{X}(t)$, $\dot{X}(t)$, $X(t)$ 는 각각 시간이력 상대 가속도, 속도, 변위의 응답이며 ω_i 는 i 번째 고유진동수(natural frequency)를 ξ 는 감쇠비를 의미한다. 계산된 응답스펙트럼과 기준 응답스펙트럼(설계응답스펙트럼)과의 차를 $\delta S(\omega_i, \xi)$ 라 하면 이는 임의의 시간함수 $\delta \ddot{Z}(t)$ 를 사용하여 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Kaul, 1978; Lilhanand와 Tseng, 1987).

$$\delta S(\omega_i, \xi) = \int_0^{t_{mi}} \delta \ddot{Z}(\tau) h_i(t_{mi} - \tau) d\tau \quad (2)$$

여기서

$$h_i(t) = -\frac{1}{\omega_{D_i}} \exp(-\xi\omega_{D_i}t) \sin \omega_{D_i}t \quad (3)$$

이며 $h_i(t)$ 는 ω_i 와 ξ 에 대한 단자유도계의 가속도 충격응답함수(acceleration impulse response function)이며, $t_m(t_m(\omega_i))$ 의 축약형태)는 해당응답스펙트럼의 발생시간, τ 는 시간변수이다. 임의의 시간함수인 $\delta\ddot{Z}(t)$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다 (Lilhanand와 Tseng, 1987).

$$\delta\ddot{Z}(t) = b' f'(t) \quad (4)$$

여기서 b' 는 미지의 상수이며 $f'(t)$ 는 다른 형태의 가속도 충격응답함수이다. 이를 통해 구한 $\delta\ddot{Z}(t)$ 를 식 (5)과 같이 시간이력에 응답오차가 허용범위를 만족할 때까지 반복적으로 더하게 된다(Choi와 Lee, 2003).

$$\ddot{Z}_{n+1}(t) = \ddot{Z}_n(t) + \delta\ddot{Z}_n(t) \quad (5)$$

이 방법의 장점은 계측 지진파를 기반으로 설계 응답스펙트럼 맞춤형 지진파를 생성할 수 있다는 점이다. 즉, 계측 지진기록과 인공지진파의 장점을 모두 보전할 수 있기에 기존의 입력 지진파 들의 문제점을 극복할 수 있으며 보다 합리적인 해석이 가능하다.

4. 시간영역 인공지진파의 적용

본 절에서는 전 절에서 설명한 알고리즘의 적용성을 평가하고자 일련의 지진파에 대한 맞춤 해석을 수행하였으며 이들의 특성을 분석하였다. 선택된 지진파는 Hachinohe (1968년 3월, 규모 7.9 PGA 0.17 g), Ofunato (1978년 6월, 규모 7.4 PGA 0.23 g), Friuli (1976년 5월, 규모 6.5, PGA 0.34 g) 지진파이다. Hachinohe와 Ofunato는 현재 지진해석 시 빈번히 사용하고 있는 지진파이고, Friuli는 국내 내진설계기준 규모인 6.5를 만족하는 지진이다. 이는 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)의 데이터베이스를 통하여 수집되었다. 모든 지진파는 재현주기 1000년에 상응하는 최대지반가속도($PGA=0.154$ g)로 스케일링한 후 시간영역 맞춤형 지진파 생성 프로그램인 OPTIME(Choi 와 Lee, 2003)을 사용하여 변형되었다.

먼저 Sampling rate의 효과가 맞춤형 생성지진파 생성에 어떠한 영향을 미치는지 비교하기 위해 Hachinohe 지진파를 사용하여 시간영역에서 맞춤형 지진파를 생성해 보았다. 본 연구에서는 국내 사용되는 지진파와 유사하게 강진구간 발생

구간 약 12 초만을 적용하였고 sampling rate는 원 지진기록의 시간간격인 0.04초와 0.005초를 적용하였으며 그림 4에 그 결과를 나타내었다. 원 지진간격 (0.04초)으로 추출한 지진데이터를 사용하여 맞춤과정을 수행할 경우 지진파의 특성 설계스펙트럼과 큰 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 Hachinohe(그림 2)는 맞춤대상인 설계응답스펙트럼과 매우 큰 차이가 나는 지진기록이기 때문이다. 따라서 보다 정밀한 sampling rate를 요한다. 반면 0.005초로 샘플링 된 지진파의 경우는 설계응답스펙트럼과 잘 일치한다는 것을 알 수 있었으며 그림 5에서 볼 수 있듯이 계측지진파와의 시간이력가속도와도 유사함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 차후 수행된 모든 지진파들에 대해서 원 시간간격이 아니라 0.005 초를

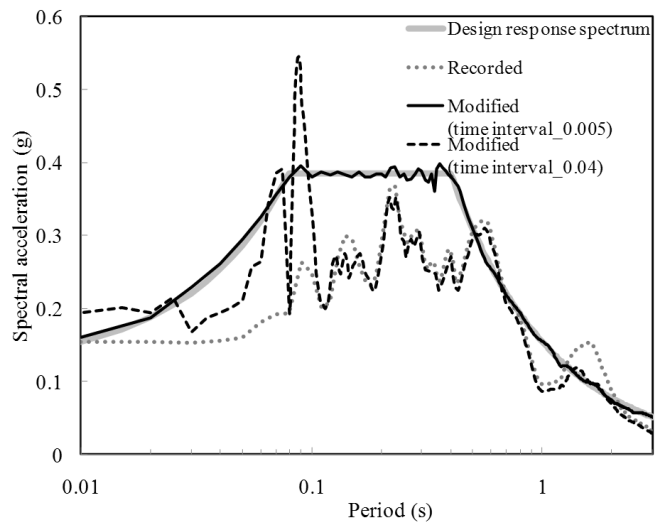


그림 4. 계측지진파(Hachinohe)와 맞춤형 지진파의 응답스펙트럼 비교

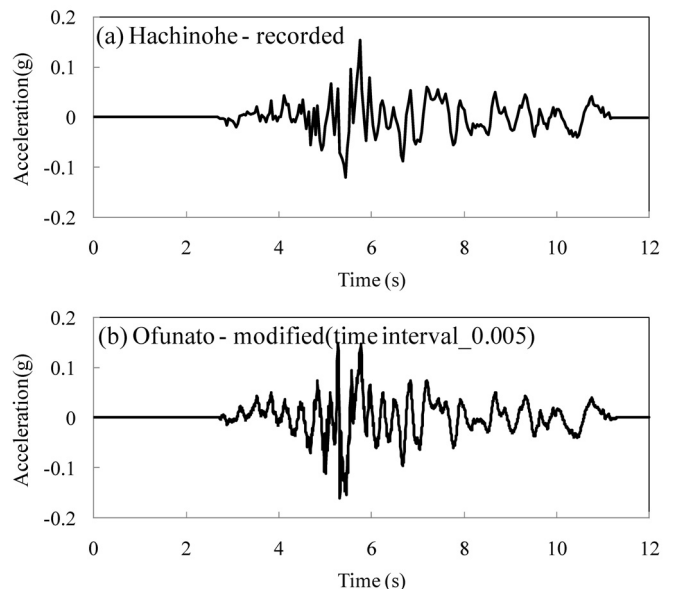


그림 5. 계측지진파(Hachinohe), 맞춤형 지진파(0.005초)의 시간이력 가속도

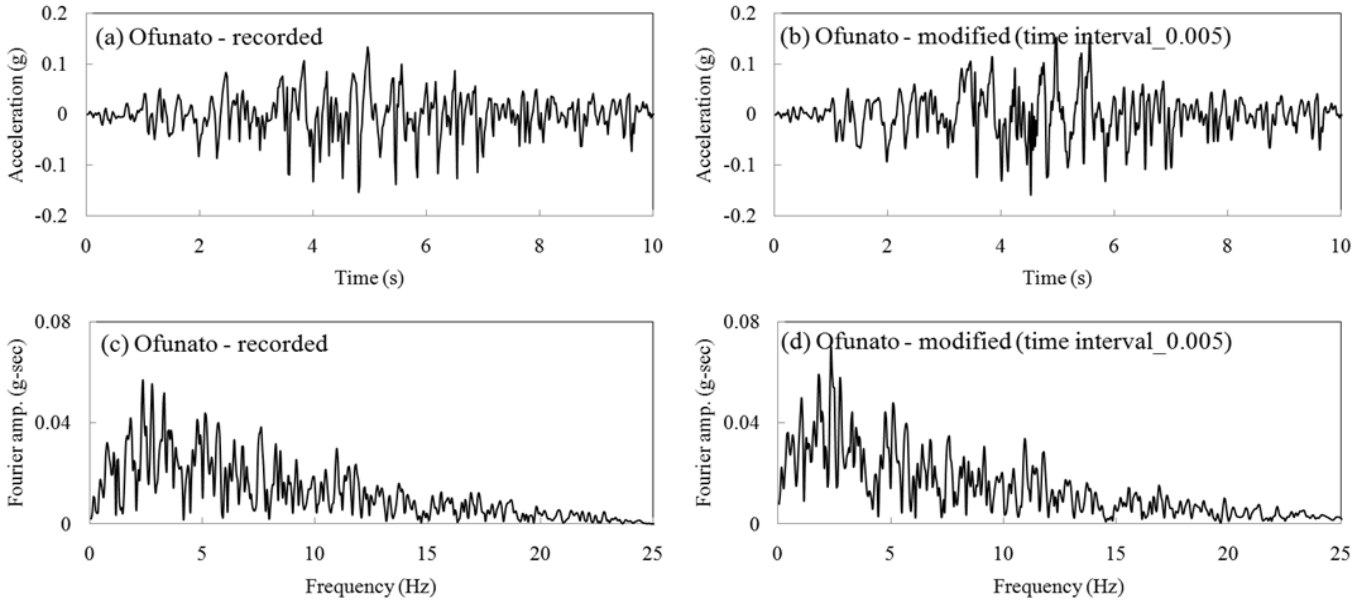


그림 6. 계측지진파(Ofunato), 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도와 푸리에 스펙트럼의 비교

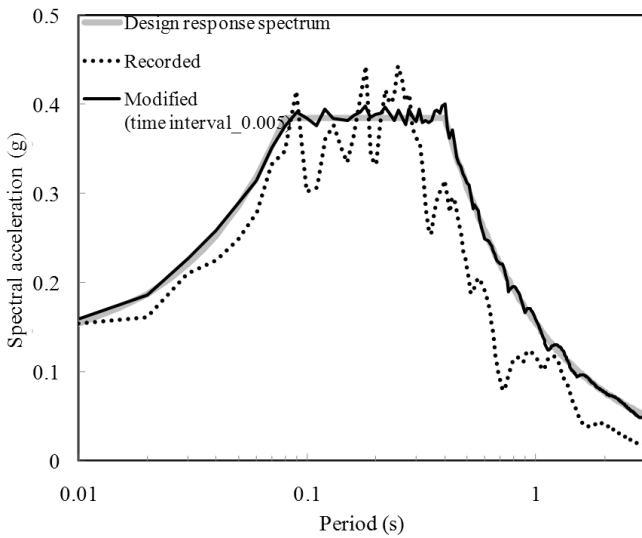


그림 7. Ofunato 계측지진파와 맞춤형 지진파의 응답스펙트럼 비교

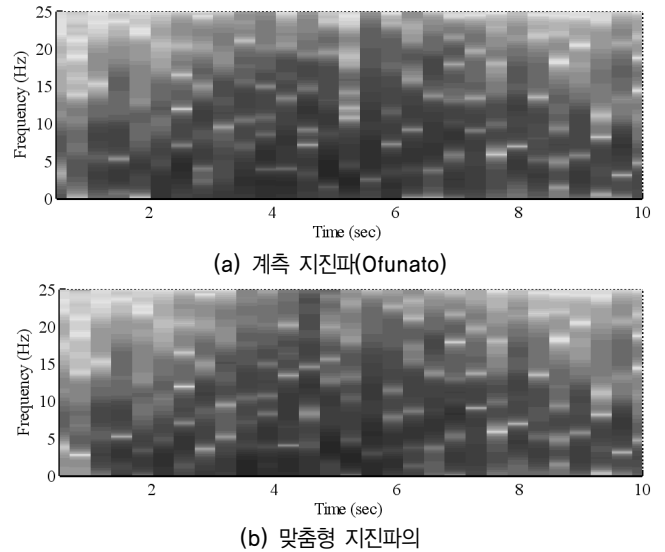


그림 8. 계측지진파(Ofunato)와 맞춤형 지진파의 Spectrogram 비교

적용하였다.

다음으로 Ofunato 지진파에 대한 변형을 적용하였다. 실제 지진 지속시간은 약 1 분 가량이나 본 연구에서는 국내 내진 설계 시 널리 사용되는 강진 발생구간 약 10 초만을 추출한 지진파를 적용하였다. 그림 6은 Ofunato와 이를 이용하여 생성된 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도 곡선과 푸리에 스펙트럼을 도시하고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 적용 전/후 두 지진파의 지진기록에는 차이가 크지 않으며, 이는 맞춤형 지진파가 원 지진파의 Non-stationary 특성을 유지하고 있음을 의미한다. 그림 7는 설계응답스펙트럼과 계측지진파의 수정 전/후의 응답스펙트럼을 비교하고 있다. Ofunato는 전 주

기에서 뛰어난 일치성을 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 그림 8은 Ofunato 계측기록과 맞춤형 지진파의 Spectrogram이다. 그림 8(a)와 (b)는 매우 유사한 주파수 특성을 보여주고 있다.

마지막으로 이탈리아에서 발생한 Friuli 지진을 시간영역 맞춤기법에 적용시켰다. 그림 9는 Friuli와 이를 이용하여 생성된 맞춤형 지진파, 인공지진파의 시간이력 가속도 곡선과 푸리에 스펙트럼을 나타내고 있다. Ofunato의 경우와는 달리 계측지진파와 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도 곡선은 확연한 차이를 보이고 있으며 푸리에 스펙트럼 역시 차이가 있는 것으로 나타났다. 이에 대한 이유는 Friuli 지진기록이 설계

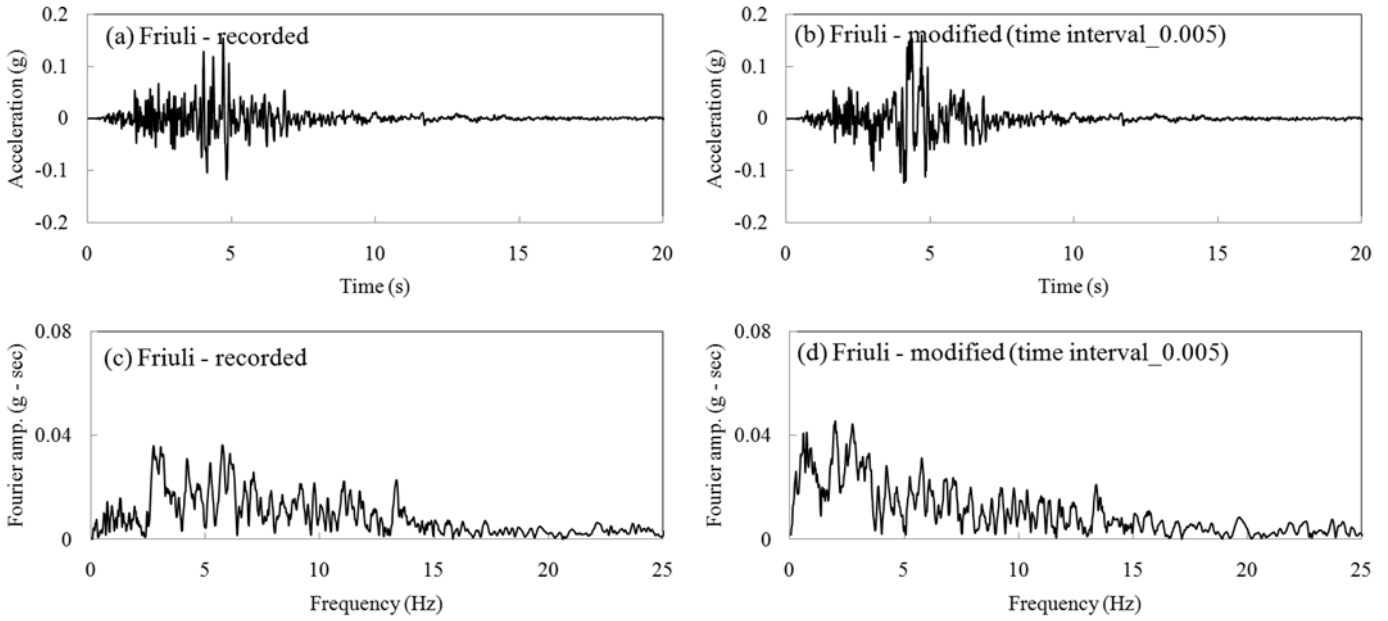


그림 9. Friuli 계측지진파, 맞춤형 지진파의 시간이력 가속도와 푸리에 스펙트럼의 비교

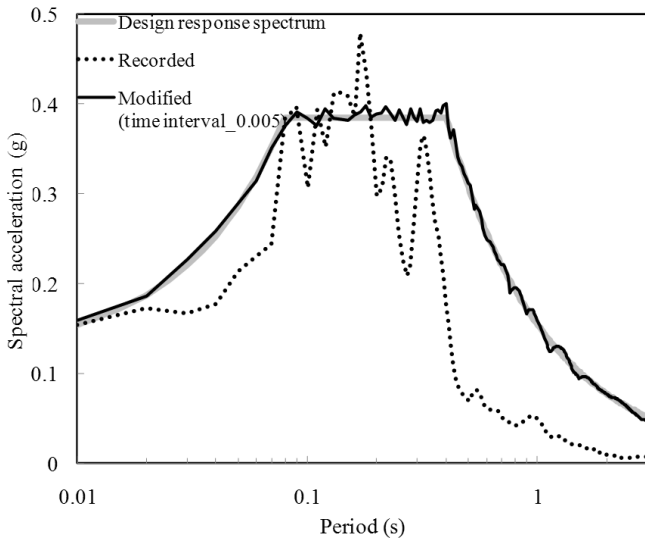


그림 10. 계측지진파(Friuli)와 맞춤형 지진파의 응답스펙트럼 비교

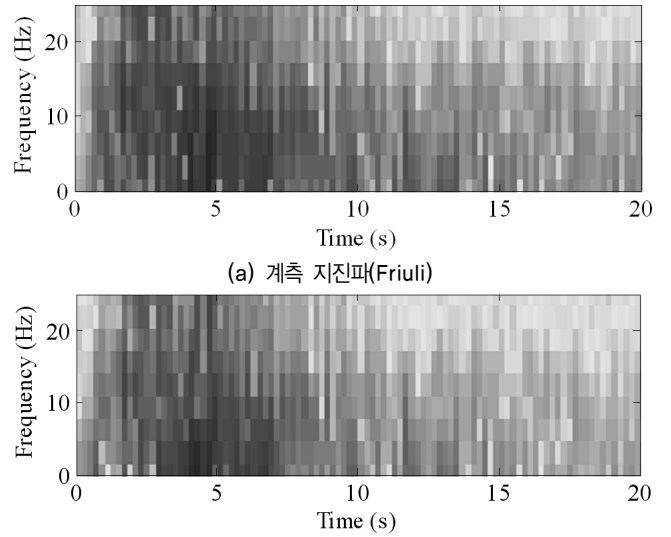


그림 11. 계측지진파(Friuli)와 맞춤형 지진파의 Spectrogram 비교

응답스펙트럼(그림 10)과 주파수 특성이 현격하게 다르기 때문이다. 설계응답스펙트럼이 계측 지진파의 응답스펙트럼보다 작은 주기 0.15초에 상응하는 푸리에 스펙트럼 6.5 Hz 영역에의 경우 맞춤형 지진파의 푸리에 요소가 크게 감소한 것을 확인할 수 있으며 반대로 설계 응답스펙트럼이 계측 지진파의 응답스펙트럼보다 큰 주기 0.4초 이상의 영역(2.5 Hz 이하)에서는 푸리에 스펙트럼(그림 9(c),(d))의 저주파수 요소가 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. Spectrogram(그림 11)은 계측지진파와 생성지진파가 유사한 주파수 요소를 나타내며 원 지진파의 Non-stationary 주파수 특성을 잘 유지 하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 동적 지진해석 수행에 필요한 입력지진파를 생성하였다. 기존의 방법과는 다르게 시간영역에서 설계응답스펙트럼 맞춤형 지진파를 생성하는 알고리즘을 적용하였다. 세 개의 계측 지진파를 국내 재현주기 1000년 설계응답스펙트럼에 상응하도록 변형시켜서 이의 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

1. Hachinohe와 같이 설계응답스펙트럼과 큰 차이가 있는 지진파의 경우, 원 지진간격을 사용할 경우 설계 응답스펙트럼 맞춤형 지진파를 생성할 수 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 경우에는 Sampling rate를 0.005초로 감소하여 적용할 경우, 설계스펙트럼 맞춤형 지진파를 생성할 수 있는 것으로 나타났다.
2. 시간영역에서 생성된 지진파는 모든 경우에서 설계응답스펙트럼과의 일치성이 뛰어나되 원 지진기록의 주파수 특성을 크게 훼손하지 않으며 Non-stationary 특성도 잘 유지 하는 것으로 나타났다.
3. 본 연구에서 적용한 알고리즘은 성능은 뛰어나지만 경험이 풍부하지 않은 엔지니어가 사용하기에는 어려움이 많을 것으로 사료된다. 일단, 지진파 별 최적 Sampling rate를 결정해야 하며, 나아가 생성된 지진 시간기록을 보고 비현실적인 파형은 삭제해야 하는 수작업을 거쳐야 하기 때문이다. 추후 이에 대한 보완 연구를 진행하며 동시에 본 알고리즘을 적용한 입력지진기록 데이터 베이스를 생성할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 기초과학분야 신진교수지원(D00601) “내진설계를 위한 대표 지진파 생성 모듈 개발”으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(2005), 도로교설계기준(2005)(건설교통부 제정), 한국도로교통협회.
2. 건설교통부(2007), 터널설계기준(2007), 한국터널공학회.
3. 대한건축학회(2006), 건축구조설계기준 및 해설, 대한건축학회.
4. Anderson, J.G. (1991), Guerrero accelerograph array: Seismological and gertechanical lessons, *Gertechanical News*, Vol. 9, No. 1, pp.34-37.
5. 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.
6. Gasparini, D.A., Vanmarcke, E.H. (1976), SIMQKE: A program for artificial motion generation Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
7. Kaul, M. (1978), Spectrum-consistent time-history generation, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 104, No. 4, pp.781-788.
8. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., pp.
9. Lilhanand, K. and Tseng, W. (1987), Generation of synthetic time histories compatible with multiple-damping response spectra, *SmiRT-9. Lausanne*, K, Vol. 2.