

위상특성을 반영한 인공지진파 작성 Artificial Generation of Seismic Wave Reflecting Phase Information

연관희* 장천중* 이종림** 노명현***
Yun, Kwan-Hee Chang, Chun-Joong Lee Jong-Rim Noh, Myung-hyun

Abstract

Once a response spectrum is estimated for the site, if there is a need of generating realistic earthquakes time histories considering seismic sources and path effects, one alternative is to use statistical phase characteristics based on real earthquake records other than assuming arbitrary duration and envelope curves. In this study, statistics of group delay times derived from Japanese strong earthquake data were used for phase generation to fully capture the stochastic property of earthquakes. The result shows that simulated earthquake time histories can be generated according to earthquake magnitude and distances with target response spectrum.

1. 서론

입력지진동의 결정은 구조물 내진 설계 및 내진성능(seismic capacity) 평가의 측면에서 매우 중요한 요소로서, 입력지진동으로는 실제 강진자료를 활용하거나 인공지진파를 사용할 수 있으며, 인공지진파 생성시에는 대상 부지의 공학적 의미를 갖는 지진동 특성 파라미터를 최대한 반영하여야 한다. 인공지진파는 지진파형의 푸리에진폭스펙트럼과 위상특성으로부터 유일하게 결정될 수 있으며, 푸리에진폭스펙트럼 대신 목표응답스펙트럼이 사용될 경우에는 반복적인 계산이 요구된다. 최근 연구결과에 의하면 구조물에 중요한 영향을 미치는 인자로서 응답스펙트럼 수준과 최대 지반운동 수준 뿐만 아니라 지속시간 등도 중요한 요소로 대두되고 있다. 또한 원자력발전소의 경우에는 비교적 높은 수준의 지진동에 대한 내진안전성 평가시 비선형해석을 수행해야 하기 때문에 합리적인 인공지진파 작성의 필요성이 대두되고 있다.

인공지진파 생성방법으로는 대상 부지의 지진원 및 전달특성을 고려하지 않고 보수적인 지반응답스펙트럼을 만족하며 정해진 지속시간과 특정 포락곡선을 만족하도록 인공지진파를 합성하는 방법(참고문헌 [2])과 대상부지의 지진원 및 전달특성을 반영하는 방법이 있는데, 중요한 구조물의

* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원
** 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정회원
*** 한국원자력안전기술원 선임연구원, 정회원

내진설계시에는 전자의 방법이 선호되나, 중요 구조물의 내진성능 평가 및 일반 구조물의 정밀 내진해석이 요구되는 경우에는 후자의 방법 적용이 합리적일 것이다. 후자의 방법으로 가장 보편적으로 활용되고 있는 방법으로는 Boore 방법(참고문헌 [3])이 사용되고 있으며 대상부지의 지진원 특성 및 지진전달특성을 반영하여 실제지진을 잘 예측하는 것으로 알려져 있다. 그러나 Boore 방법 사용시에는 정규화된 윈도우의 파라미터에 대한 가정 및 지속시간 등에 대한 가정이 필요하며 생성된 인공지진파형이 Stationary한 특성만을 갖게 된다. 한편 위상각을 무작위로 가정하여 저주파수 성분의 에너지를 충분히 반영할 수 없는 Boore의 방법 대신 Silva는 유사한 지진규모와 거리를 갖는 실측 지진의 위상을 이용하여 인공지진파를 생성하기도 하였다.(참고문헌 [9]) 본 연구에서는 일본의 강진자료를 기반으로 통계적으로 결정된 균지연시간의 위상 특성을 이용하여 인공지진파를 작성하여 보았다.

2. 본 문

2.1 위상차분의 분포와 포락곡선의 관계

일반적으로 임의의 지진파형 $x(t)$ 는 식 (1)과 같이 푸리에급수로 전개할 수 있으며 위상차분 (phase difference)은 식 (2)에서 $\Delta\phi_k$ 로서 정의된다.

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N/2} X_k \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (1)$$

$$\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k, \quad k=1, 2, \dots, N/2-1 \quad (2)$$

여기서 X_k 는 각 성분파의 진폭이며, ϕ_k 는 각 성분파의 위상각을 의미한다.

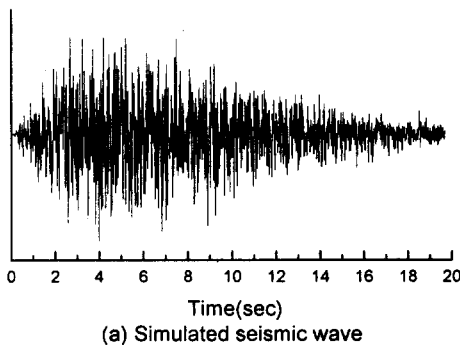


그림 1. 위상차분의 분포와 포락곡선의 형태비교

위상차분의 분포와 포락곡선의 상관관계를 나타내는 그림으로 그림 1(a)는 Boore의 방법(참고문헌 [3])으로부터 생성된 인공지진파이며 그림 1(b)는 이에 대한 위상차분의 분포를 나타내는 그림으로 위상차분의 분포가 인공지진파의 포락곡선의 절대값 형태와 매우 유사함을 확인할 수 있다. 이때 위상차분은 대칭적인 FFT 방법(참고문헌 [7])을 이용하여 계산되었다.

2.2 군지연시간의 분포를 이용한 인공지진파 생성

2.1에 기술된 바와 같이 파형의 위상차분 분포는 인공지진파의 포락곡선과 매우 밀접함을 알 수 있는데, 식 (3)과 같이 위상차분과 관계가 있는 군지연시간(Group Delay Time) $t_{gr}(\omega)$ 을 적분하면 인공지진파의 위상특성을 결정지을 수 있다.

$$t_{gr}(\omega) = -\frac{d\phi}{d\omega} \quad (3)$$

이러한 개념 하에 Murono 등(참고문헌 [10])은 실측자료의 주파수별 군지연시간 분포를 통계적으로 도출하고 그 결과를 인공지진파 합성에 응용하였다. 본 연구에서는 Murono 등에 의해 얻어진 군지연시간의 통계자료를 이용하여 인공지진파를 작성하여 보았다. 군지연시간의 통계자료는 일본에서 발생한 규모 6이상, 진원깊이 50Km이내, 최대가속도 30gal 이상의 5개 강진에 대한 관측 기록을 이용하여 얻어졌다. 통계자료로는, 관측기록에 대해 Wavelet Transform(WT)을 수행하고 얻어진 각 scale 상수(Level)의 분리된 파형에 대한 군지연시간의 평균과 표준편차가 계산되었으며(식 (4)), 이를 식 (5)의 형태처럼 지진규모(M), 진앙거리(Δ (km))의 함수인 군지연시간 감쇠식 모델에 적합시키는 회귀분석이 수행되었다.

$$\mu_{igr}^{(j)} = \sum_{i=1}^{N^{(j)}} \frac{t_{gr}^{(j)}(\omega_i)}{N^{(j)}}, \quad \sigma_{igr}^{(j)} = \sqrt{\frac{1}{N^{(j)}} \sum_{i=1}^{N^{(j)}} (t_{gr}^{(j)}(\omega_i) - \mu_{igr}^{(j)})^2} \quad (4)$$

$$\mu_{igr}^{(j)} = \alpha_1^{(j)} \times 10^{\beta_1^{(j)} M} \times \Delta^{\gamma_1^{(j)}}, \quad \sigma_{igr}^{(j)} = \alpha_2^{(j)} \times 10^{\beta_2^{(j)} M} \times \Delta^{\gamma_2^{(j)}} \quad (5)$$

식 (4)에서 $t_{gr}^{(j)}(\omega)$ 은 j 차 scale 상수의 군지연시간이며 $\mu_{igr}^{(j)}$ 와 $\sigma_{igr}^{(j)}$ 는 각각 j 차 scale 상수의 WT된 파형에 대한 군지연시간 평균과 표준편차 그리고 $N^{(j)}(=2^j)$ 은 해당 scale 상수의 주파수 성분의 개수를 나타낸다. 또한 식(5)에서 $\alpha_1^{(j)}$, $\beta_1^{(j)}$ 및 $\alpha_2^{(j)}$, $\beta_2^{(j)}$ 는 각각 j 차 scale 상수 파형의 지진규모 및 진앙거리에 따른 군지연시간 평균값 감쇠식 그리고 군지연시간의 표준편차 감쇠식의 회귀분석 계수로서 표 1과 같이 주어진다.

일반적으로 WT된 각 scale 상수에 대한 파형은 식 (6)의 주파수대역을 포함하나 이웃하는 scale 상수에 대한 파형과 서로 중복되는 주파수영역을 제외하면 식 (7)의 주파수대역에서 푸리에 진폭 스펙트럼과 거의 일치하며 이러한 특징을 이용하면 인공지진파를 합성할 수 있다.(참고문헌 [10])

$$2^j/3T_d \leq f \leq 2^{j+2}/3T_d \quad (6)$$

$$2^{j-1}/T_d \leq f \leq 2^j/T_d \quad (7)$$

표 1. j차 scale 상수 파형에 대한 균지연시간감쇠식의 회귀분석 계수

j	α_1	α_2	β_1	β_2	γ_1	γ_2
7	1.011	27.708	0.0	0.0	0.864	0.203
8	0.830	14.584	0.04	0.0	0.79	0.337
9	0.543	17.968	0.086	-0.03	0.7	0.344
10	0.806	8.451	0.06	-0.005	0.686	0.321
11	0.850	2.97	0.026	0.016	0.764	0.366
12	0.511	0.392	0.058	0.143	0.744	0.295
13	0.367	0.079	0.077	0.267	0.739	0.201
14	0.33	0.0572	0.081	0.287	0.742	0.239
15	0.0443	0.0106	0.256	0.439	0.591	0.204

그림 2는 지진규모 7.0 진앙거리 50km에 대한 균지연시간의 주파수에 따른 분포를 식 (5) 및 표 1의 지진규모 및 진앙거리에 대한 회귀분석 계수를 이용하여 수치적으로 시뮬레이션 한 결과이다.

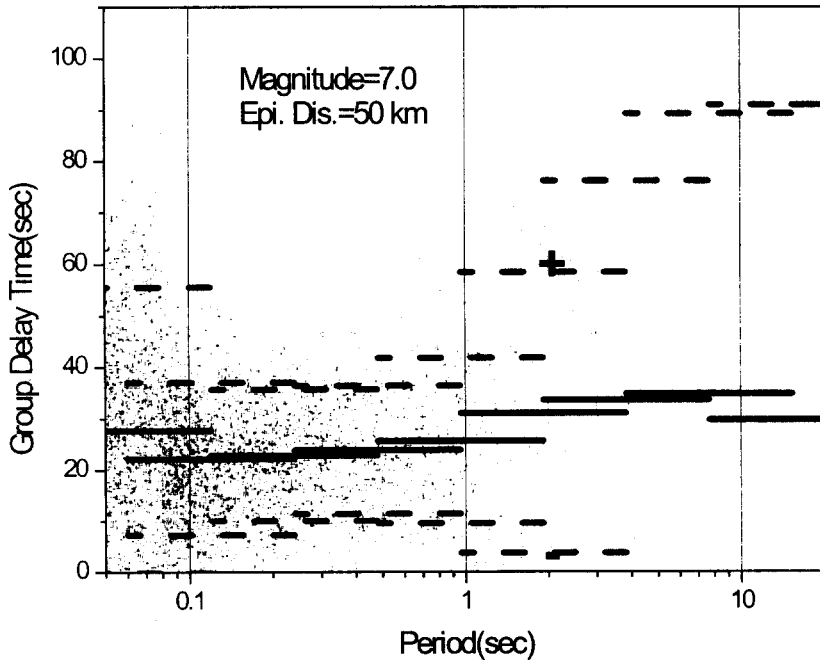


그림 2. 균지연시간의 평균(μ)과 표준편차(σ) 분포

2.3 균지연시간감쇠식을 이용한 인공지진파 합성

그림 3은 2.2에서 기술한 균지연시간의 위상특성을 이용하여 인공지진파를 생성하는 절차를 나타내는 흐름도이다.

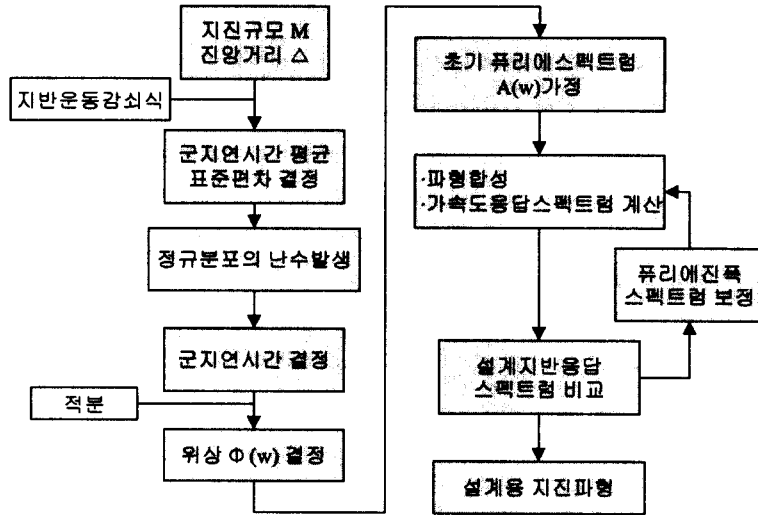


그림 3. 균지연시간의 위상특성을 이용한 인공지진파 합성 절차

상기 흐름도에서 인공지진파의 합성을 위한 초기 푸리에 진폭스펙트럼 $A(\omega)$ 는 감쇠 0%에 해당하는 유사속도응답스펙트럼(= $S_d(\omega)/\omega$)을 사용하였으며, 파형합성은 각 scale 상수에 해당하는 주파수 영역별 시간이력을 모든 scale 상수에 대해 합산하여 얻어졌다. j 차 scale 상수에 해당하는 초기 주파수영역별 파형은 $2^{j-1}/T_d \leq f \leq 2^j/T_d$ 주파수 구간에서는 $A(\omega)$ 와 완전히 일치하고 $2^j/3T_d \leq f \leq 2^{j-1}/T_d$, $2^j/T_d \leq f \leq 2^{j+2}/3T_d$ 구간에서는 0이 되도록 하였으며(식 (6), (7) 참조) 위상은 표 1의 특성을 갖도록 하여 생성되었다. 한편 상기 흐름도에서 푸리에진폭스펙트럼 보정은 일반적으로 사용되는 방법이 적용되었으며, 식 (8)로부터 매회 반복시 계산되는 보정계수 $r(\omega)$ 를 푸리에진폭스펙트럼에 곱하여 보정되었다.

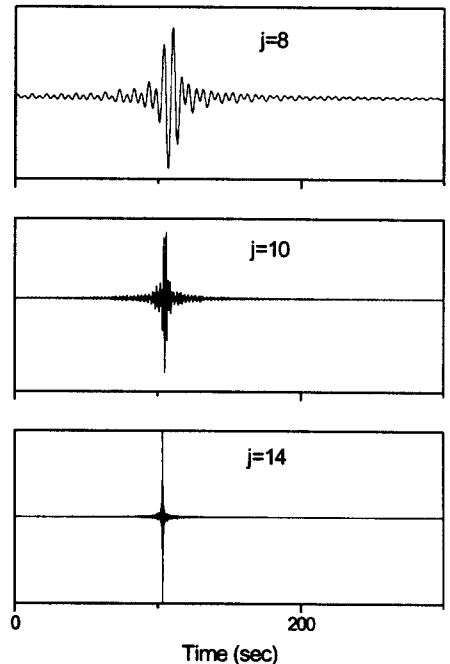


그림 4. 규모 7.0, 진앙거리 50km에 대한 인공지진파 합성을 위해 얻어진 j 차 scale 상수별 파형

$$r(\omega) = \frac{S_d(\omega)}{S_A(\omega)} \quad (8)$$

여기서 $S_d(\omega)$ 는 목표로 하는 가속도응답스펙트럼이며, $S_A(\omega)$ 는 매회 계산되는 가속도응답스펙트럼이다.

본 연구에서는 균지연시간의 위상특성을 이용한 인공지진파의 예제로서 규모 7, 진앙거리 50km에 대한 파형을 합성하여 보았다. 이때 목표응답스펙트럼으로는 미국 서부의 지진자료에 대한 통계처리로부터 얻어진 MMI VII에 해당하는 5% 감쇠 평균 가속도응답스펙트럼을 사용하였다.(참고 문헌 [6]) 그림 4는 파형합성을 위해 1회 반복시 얻어진 j 차 scale 상수별 파형을 보여주는 그림이며 그림 5(a)는 최종적으로 얻어진 인공지진파이다. 그림 5(b)에서는 목표응답스펙트럼과 인공지진파의 응답스펙트럼이 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 6은 그림 5(b)와 동일한 목표응답스펙트럼을 사용하고 균지연시간의 위상특성을 이용하여 규모 7.0 지진에 대해 진앙거리별로 얻어진 인공지진파를 비교하는 그림이다. 그림 6으로부터 진앙거리에 따른 파의 분산현상과 원거리에서 고주파성분이 지진파형의 초반부에 집중하는 non-stationary 현상이 확인됨을 알 수 있다. 일반적으로 지진의 파형형태는 지진규모보다는 진앙거리에 보다 민감한 것으로 알려져 있다.

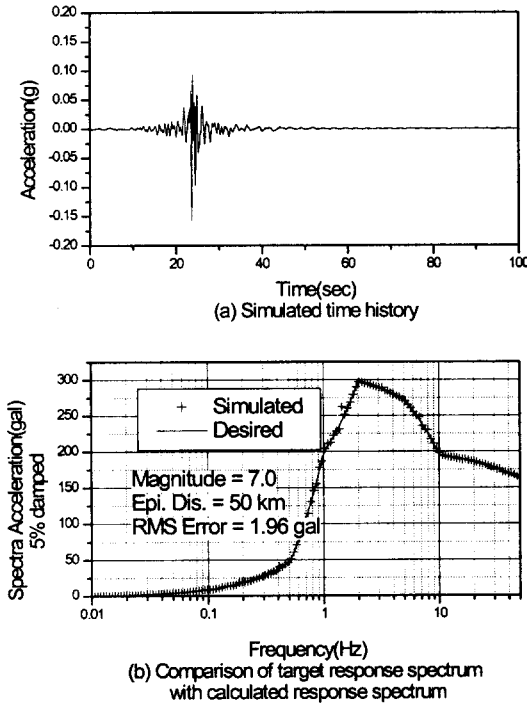


그림 5. 균지연시간의 위상특성을 이용한 인공지진파 합성에

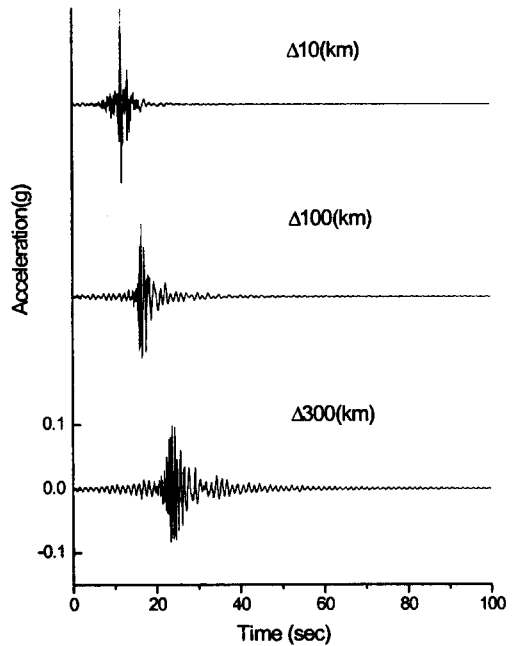


그림 6. 지진규모 7.0에 대한 진앙거리별 인공지진파 비교

3. 결 론

본 연구에서는 일반적인 인공지진파 합성시 소홀히 취급되고 있는 위상특성에 대해 고찰하고 위상특성 중 군지연시간의 통계특성을 이용하여 인공지진파를 생성하여 보았다. 위상특성을 고려하지 않을 경우 인공지진파 합성을 위해서는 지속시간과 포락함수의 형태에 대한 가정이 필요하나 관측지진으로부터 군지연시간의 지진규모, 진앙거리, 주파수 성분에 따른 통계자료를 평가함으로써 대상 부지에 적합한 인공지진파를 합성할 수 있었다. 국내의 경우에도 최근 구축된 지진관측망에 축적되고 있는 공학적으로 의미있는 지진기록에 대한 군지연시간 특성을 도출하면 국내에 적합한 인공지진파를 합성할 수 있을 것으로 판단되며 보다 정밀한 내진해석시 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 이종림, 전규식, 연관희, 차정식 (1996), "미소지진을 이용한 지진동특성에 관한 연구," 연구보고서, 한전전력연구원.
2. 임영환, 김종수, 이상훈 (1996), "인공지진 가속도시간이력 작성기술 및 전산프로그램 개발," 연구보고서, 한국전력기술주식회사.
3. Boore, D.M. (1983), "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra," Bull. Seism. Soc. Am., 73, pp1865-1894.
4. Brune, J.N. (1970), "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes," Jour. Geophys. Res., 87, pp1735-1741.
5. Fabio Sabetta and Antonio Pugliese (1996), "Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motion," Bull. Seism. Soc. Am., 86, No. 2, pp 337-352.
6. Gail M. Atkinson and Eleanor Sonley (2000), "Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity and Response Spectra," Bull. Seism. Soc. Am., 90, 2, pp.537-544.
7. Hiroshi Katukura, Susumu Ohno and Masanori Izumi (1989), "Symmetrical FFT technique and its applications to earthquake engineering," Earthquake Eng. Struct. Dyn., 18, pp717-725.
8. Ohsaki, Y. (1979), "On the significance of phase content in earthquake ground motions," Earthquake Eng. Struct. Dyn., 7, pp427-439.
9. Silva, W.J. (1987), "State-of-the-art for assessing earthquake hazards in the united states," Report 24, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers.
10. Murono, Nishimura, Sato (1999), "觀測波を用いたレベル2地震動の位相特性のモデル化(in Japanese)," Proceeding of the Symposium on Level II earthquake motions.
11. 大崎順彦 (1994), "新・地震動のスペクトル解析入門(in Japanese)," 慶島出版會