

2016년 경주지진 유발단층 시나리오 지진에 의한 국내 광역 도시 지진관측소에서의 강진동 모사

Strong Ground Motion Simulation at Seismic Stations of Metropolises in South Korea by Scenario Earthquake on the Causative Fault of the 2016 Gyeongju Earthquake

최호선^{1)*}

Choi, Hoseon^{1)*}

¹⁾한국원자력안전기술원 원자력안전연구실 책임연구원

¹⁾Principal Researcher, Department of Nuclear Safety Research, Korea Institute of Nuclear Safety

/ A B S T R A C T /

The empirical Green's function method is applied to the foreshock and the mainshock of the 2016 Gyeongju earthquake to simulate strong ground motions of the mainshock and scenario earthquake at seismic stations of seven metropolises in South Korea, respectively. To identify the applicability of the method in advance, the mainshock is simulated, assuming the foreshock as the empirical Green's function. As a result of the simulation, the overall shape, the amplitude of PGA, and the duration and response spectra of the simulated seismic waveforms are similar with those of the observed seismic waveforms. Based on this result, a scenario earthquake on the causative fault of Gyeongju earthquake with a moment magnitude 6.5 is simulated, assuming that the mainshock serves as the empirical Green's function. As a result, the amplitude of PGA and the duration of simulated seismic waveforms are significantly increased and extended, and the spectral amplitude of the low frequency band is relatively increased compared with that of the high frequency band. If the empirical Green's function method is applied to several recent well-recorded moderate earthquakes, the simulated seismic waveforms can be used as not only input data for developing ground motion prediction equations, but also input data for creating the design response spectra of major facilities in South Korea.

Key words: Empirical Green's function, Gyeongju, Scenario, Strong ground motion, Simulation

1. 서론

한반도는 유라시아판의 극동 가장자리에 위치하면서, 가장 가까운 판경계로부터 수백 km 떨어진 판내지역에 위치하고 있다. 따라서 한반도 인근에서 발생하는 지진들은 판내지진의 전형적인 특성을 보여주는 것으로 생각했었다. 즉 지진의 발생빈도가 낮고, 판간지역에서 발생하는 지진에 비해 상대적으로 규모가 작으며 지진이 발생하는 공간적인 위치도 불규칙하다는 것이다. 이와 같은 이유로 한반도는 지진에 대해 비교적 안전한 곳이라고 알려져 왔다. 그러나 기상청이 본격적으로 지진을 관측한 1978년 이래 가

장 큰 규모인 국지규모(M_L) 5.8의 2016년 경주지진(이하 경주지진)은, 한반도는 지진에 대해 안전한 곳이라고 알려져 왔던 통념을 뒤엎을 정도로 지진에 대한 국민의 불안감을 증대시켰고, 국민들은 지진에 취약한 주요 시설물에 대한 지진안전성 확보를 강하게 요구하게 되었다.

주요 시설물에 대한 지진안전성 확보를 위해서는 해당 시설물 부지에서 기록된 강진동 자료로부터 내진설계 입력자료인 설계응답스펙트럼을 도출해야 하는데, 문제점은 현대적인 지진관측망이 설치된 이후에 발생했던 지진들의 규모가 그렇게 크지 않다는 것이다. 국민에게 불안감을 비약적으로 증대시킨 경주지진조차도 모멘트규모(M_w) 5.5인 중규모 지진 수준이다 [1, 2]. 한편, 국내에서는 큰 규모의 지진에 의한 강진동을 모사하기 위해서 주로 추계학적 방법을 적용하였으나 [3-6], 저주파수 대역의 표면파와 부지 효과가 적절히 포함된 강진동을 모사하기가 쉽지 않다. 이에 비해 경험적 그린함수(empirical Green's function) 방법은 큰 지진이 발생할 가능성이

*Corresponding author: Choi, Hoseon

E-mail: hoseon@kins.re.kr

(Received October 1, 2019; Revised December 27, 2019; Accepted January 2, 2020)

있는 단층에서 발생한 중소규모 지진의 기록을 예상되는 큰 지진의 그린함수로 사용하는 것이다. 이 방법은 큰 지진 유발단층 모든 부분에 대한 경험적 그린함수를 획득할 수 없는 등의 제한사항을 내포하고 있지만, 큰 지진에 의한 관심부지에서의 지진동을 모사하기 위해 지속적으로 개선되면서 널리 사용되고 있다[7-10]. 경험적 그린함수는 실제 기록된 자료이므로 지진원과 지진관측소 사이의 복잡한 매질구조에 의한 특성 등을 고스란히 포함하고 있다. 국내에서 현대적인 지진관측망은 2000년대부터 본격적으로 설치되었으므로, 경주지진을 포함하여 경험적 그린함수로 이용할 수 있는 수 개의 중규모 지진이 잘 기록되어 있다.

이 연구에서는 우선 경험적 그린함수 방법에 의한 강진도 모사의 적용성을 확인하기 위해, 경주지진 전진을 경험적 그린함수로 가정하고 본진의 지진파형을 모사하여, 관측된 본진의 지진파형과 비교하였다. 그 다음 경주지진 본진을 경험적 그린함수로 가정하고, 이 지진의 유발단층에서 발생할 수 있을 것으로 예상되는 큰 지진(시나리오 지진)을 선정하여 해당 지진에 의해 대상 부지에서 예상되는 강진동을 모사하고 응답스펙트럼을 도출하였다. 대상 부지는 인구와 시설이 집중된 국내 광역 도시를 선정하였는데, 서울, 광주, 대구, 대전, 부산, 울산, 인천의 7개 도시이다. 해당 부지의 위치는 기상청이 운영하고 있는 지진관측소의 위치로 가정하였다.

2. 본 론

2.1 경험적 그린함수 방법

동일한 위치에서 발생한 서로 다른 두 지진이 동일한 지진관측소에서 기록되었다면, 두 지진은 결과적으로 전파특성과 부지특성을 공유하게 된다. 따라서 지진원에 대한 상대적인 보정이 잘 이루어진다면 규모가 작은 지진의 실제 기록된 지진파형을 같은 곳에서 발생한 규모가 큰 지진의 그린함수로 사용할 수 있다. 이처럼 그린함수로 사용할 수 있는 실제 기록 지진파형을 경험적 그린함수라고 한다.

경험적 그린함수로 사용할 수 있는 작은 지진과 모사할 큰 지진 간에 자기 유사성 관계가 성립하면, 다음과 같은 관계가 주어질 수 있다[9].

$$\frac{L}{l} = \frac{W}{w} = \frac{T}{\tau} = \left(\frac{M_0}{m_0}\right)^{1/3} = N, \quad \frac{D}{d} = N \tag{1}$$

식(1)에서 L과 l, W와 w, T와 τ, M₀와 m₀, D와 d는 각각 큰 지진과 작은 지진의 단층 길이, 단층 폭, 슬립 지속시간, 지진모멘트, 단층 슬립이다. 이러한 유사성은 규모에 독립적인 응력강화를 기반으로 하며, 정적 응력강화는 M₀/(LW)^{3/2} (또는 m₀/(lw)^{3/2})와 비례한다. 이러한 조건에서 모사할 큰 지진의 단층 면적은 N×N개의 하위단층(subfault)으로 나뉠 수 있고, 각 하위단층의 면적은 작은 지진의 단층 면적과 일치한다.

응력강화가 규모에 독립적이지 않다고 한다면, 식(1)에 약간의 수정을 가하여 식(2)와 같이 표현할 수 있다[9].

$$\frac{L}{l} = \frac{W}{w} = \frac{T}{\tau} = \left[\frac{M_0}{(Cm_0)}\right]^{1/3} = N, \quad \frac{D}{d} = CN \tag{2}$$

식(2)에서 C는 큰 지진과 작은 지진 사이의 응력강화 비율이다. [11]에 따르면 2005년 후쿠오카 지진의 경우 모멘트규모 5.0 이상의 지진에서는 자기유사성 관계를 따른다고 하고 있으나, 아직까지는 지속적인 논쟁의 대상이 되고 있다.

큰 지진의 지진모멘트가 작은 지진의 지진모멘트보다 N³배 크고, 동일한 응력강화(즉 C=1)를 가지며, 큰 지진과 작은 지진의 단층 길이와 폭의 비율을 N이라고 하면, 큰 지진의 단층이 N×N의 하위단층으로 나뉜다고 할 때, 큰 지진의 시간이력 A(t)는 작은 지진의 시간이력 a(t)로 다음과 같이 나타낼 수 있다[12].

$$A(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{r}{r_{ij}} F(t-t_{ij}) * a(t) \tag{3}$$

식(3)에서 i와 j는 단층의 길이 방향과 폭 방향에 대한 지수, r은 작은 지진과 지진관측소까지의 진원거리, r_{ij}는 각 하위단층과 지진관측소까지의 진원거리, t_{ij}는 작은 지진과 지진관측소와 큰 지진과 지진관측소 사이의 진원거리와 하위단층별 파열 시작시간에 따른 도달시간 보정항이다. F(t)는 큰 지진의 하위단층에서 발생하는 지진원 함수와 작은 지진에서 발생하는 지진원 함수와의 상관관계를 나타내는 함수이며, 박스카(boxcar) 함수나 지수함수 형태 등 여러 가지 형태로 나타낼 수 있다[9, 10].

2.2 경주지진 전진을 이용한 본진 모사

2016년 9월 12일 20시 32분에 경북 경주시 남남서쪽 8.7 km 지역에서 국지규모 5.8의 지진이 발생하였다. 이는 기상청이 본격적으로 지진을 관측한 1978년 이래 가장 큰 규모의 지진이었다. 경주지진 본진이 발생하기 약 1시간 전인 19시 44분에 경북 경주시 남남서쪽 8.2 km 지역에서 국지규모 5.1의 전진이 발생하였다. 본진과 전진은 거시적으로 거의 동일한 단층에서 발생한 것으로 추정되므로[1, 2], 경험적 그린함수 방법에 의한 강진도 모사의 적용성을 확인하기 위하여 전진을 작은 지진인 경험적 그린함수로, 본진을 모사할 큰 지진으로 선정한 후, 국내 7개 광역 도시 지진관측소

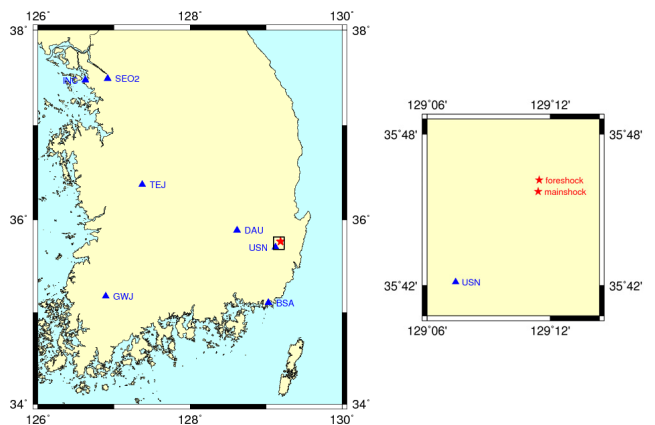


Fig. 1. Location of foreshock and mainshock (red star) of 2016 Gyeongju earthquake (hereafter Gyeongju earthquake), and seismic stations (blue triangle) installed at metro-poles in South Korea. The region surrounded by black square is magnified in right figure

Table 1. Source parameters of the foreshock and the mainshock of 2016 Gyeongju earthquake

origin time (KST)	latitude (°N)	longitude (°E)	depth (km)	magnitude (M_w)	strike (°)	dip (°)	rake (°)
2016-09-11 19:44	35.7698	129.1911	13.9	5.0	29	73	178
2006-09-11 20:32	35.7621	129.1903	12.8	5.5	26	68	175

Table 2. Location and instrumentation of seismic stations installed at metropolises in South Korea

metropolitan	seismic station	latitude (°N)	longitude (°E)	accelerometer	recorder	distance* (km)
Ulsan	USN	35.7024	129.1232	ES-T	Q730	9.0
Daegu	DAU	35.8856	128.6188	ES-T	Q730	53.4
Busan	BSA	35.1048	129.0319	ES-T	Q730	74.3
Daejeon	TEJ	36.3725	127.3711	ES-T	Q730	177.3
Gwangju	GWJ	35.1730	126.8915	ES-T	Q730	218.6
Seoul	SEO2	37.4939	126.9171	ES-T	Q330S	279.8
Incheon	INC	37.4776	126.6239	ES-T	Q730	298.2

*: Epicentral distance between mainshock of 2016 Gyeongju earthquake and seismic station

Table 3. Input parameters for strong ground motion simulation of the mainshock using the foreshock

l (km)	w (km)	N	subfault	C	V_s (km/s)	V_r (km/s)
2	2	2	2×2	1	3.5	2.8

에서 기록된 본진의 관측 지진파형과 경험적 그린함수 방법에 의한 모사 지진파형을 비교하였다. 전진과 본진의 위치는 Fig. 1에 도시하였고, 지진원 정보는 [1]을 참조하여 Table 1에 제시하였다. 두 지진의 규모 차이는 0.5인데, [13]의 사례를 고려할 때 경험적 그린함수 방법을 무리 없이 적용할 수 있다. 국내 7개 광역 도시 위치는 기상청이 운영하고 있는 지진관측소의 위치로 가정하였으며, 각 지진관측소의 위치와 지진계 장비 정보는 Table 2에 제시하였고, Fig. 1에 도시하였다.

경주지진 전진을 경험적 그린함수로 선정하여 본진을 모사하기 위해 이용된 입력 파라미터는 Table 3에 제시하였다. V_s 와 V_r 는 각각 S파 속도와 단층파열 속도를 나타낸다. 이 연구에서는 전진과 본진의 모멘트규모가 5.0 이상이기 때문에 동일한 독립적인 응력강하(즉 C=1)를 가정하였다. N값은 식(1)과 Table 1의 모멘트규모를 고려하여 도출할 수 있으나 정수로 계산되지 않기 때문에(~1.78), 강진동 모사에는 이 값과 가까운 정수(2)를 채택하였다. 이는 경주지진 본진과 모사된 지진의 규모에 약 0.1 정도의 차이를 생기게 하는데, 지진규모 측정 시 오차와 모사 결과를 고려할 때 충분히 수용할 수 있는 수준의 규모 차이로 판단하였다. 단층면상에서 파열은 단층의 북쪽 상단에서 시작된다고 가정하였다[12].

Fig. 2는 국내 7개 광역 도시 지진관측소에 기록된 전진을 경험적 그린함수로 가정하여 본진을 모사한 결과를 각각 동서 성분(EW)과 남북 성분(NS) 지진파형으로 도시한 것이다. 각 지진관측소에서 상단 검은색 지진파형은 경주지진 본진을 관측한 것이고, 하단 붉은색 지진파형은 전진을 경험적 그린함수로 가정하여 본진을 모사한 지진파형이다. 시간영역에서 관측 지진파형과 모사 지진파형의 전체적인 형태와 최대지반가속도 진폭이 유사한 것을 확인할 수 있으며, 강진동 지속시간도 유사하게 모사된 것을 확인할 수 있다. 관측 지진파형과 모사 지진파형의 동서 성분과 남북 성분의 최대지반가속도를 구체적으로 비교한 결과를 Fig. 3에 도시하였다. 전체적으로 모사 지진파형의 PGA가 관측 지진파형 PGA보다 다소 크지만, TEJ 지진관측소는 이와 반대로 모사 지진파형의 PGA가 관측 지진파형 PGA보다

다소 작다. USN 지진관측소 지진파형의 PGA는 지진규모를 고려할 때 이론적으로 큰 값을 보여주는데, 이는 해당 지진관측소 하부에 두꺼운 퇴적층이 존재하여[14] 발생하는 지진파 증폭현상으로 이해된다.

Fig. 4는 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼을 비교한 것인데, 해당 응답스펙트럼은 동서 성분 응답스펙트럼과 남북 성분 응답스펙트럼의 제곱평균제곱근으로 나타내었다. 각 지진관측소에서 검은색 응답스펙트럼은 관측한 경주지진 본진의 응답스펙트럼이고, 붉은색 지진파형은 전진을 경험적 그린함수로 가정하여 본진을 모사한 응답스펙트럼이다. 주파수영역에서 관측 응답스펙트럼과 모사 응답스펙트럼의 전체적인 형태와 스펙트럼가속도 진폭이 유사한 것을 확인할 수 있으나, 진앙거리가 매우 가까운(~9.0 km) USN 지진관측소의 경우 저주파수 대역에서 모사 응답스펙트럼이 다소 과대추정된 것을 확인할 수 있다. 이는 근거리에서 단층의 기하학적 특성 등이 지진원 모델에 정밀하게 반영되지 못해 발생한 것으로 추정된다. 이러한 근거리 단층 효과는 진원거리가 멀어질수록 그 영향이 적어지는 것을 Fig. 4에서 확인할 수 있다. USN 지진관측소 다음으로 지진원에 가까운 지진관측소는 DAU 지진관측소이며(~53.4 km), 관측 응답스펙트럼이 응답 응답스펙트럼과 유사하게 잘 모사되었음을 확인할 수 있다. 이러한 점을 고려할 때, 단층의 기하학적 특성의 영향으로 지진원에 대한 보정이 어려운 근거리 지진관측소보다 멀리 떨어진 지진관측소가 경험적 그린함수 방법이 잘 적용되는 것으로 생각된다.

한편 [15]에서는 경주지진 전진과 본진은 서로 다른 단층면상에 발생했음을 지적하고 있다. 그러나 전술했던 것처럼 경험적 그린함수 방법 자체가 지진 유발단층의 모든 부분의 경험적 그린함수를 획득할 수 없는 등의 제한 사항을 내포하고 있고, 전진과 본진의 단층면해에 약간의 차이는 있지만 이에 대한 보정을 수행하였으며, Fig. 2와 Fig. 4와 같이 관측 지진파형과 모사 지진파형의 유사성을 고려할 때, 경험적 그린함수 방법을 무리 없이 적용할 수 있을 것으로 판단하였다.

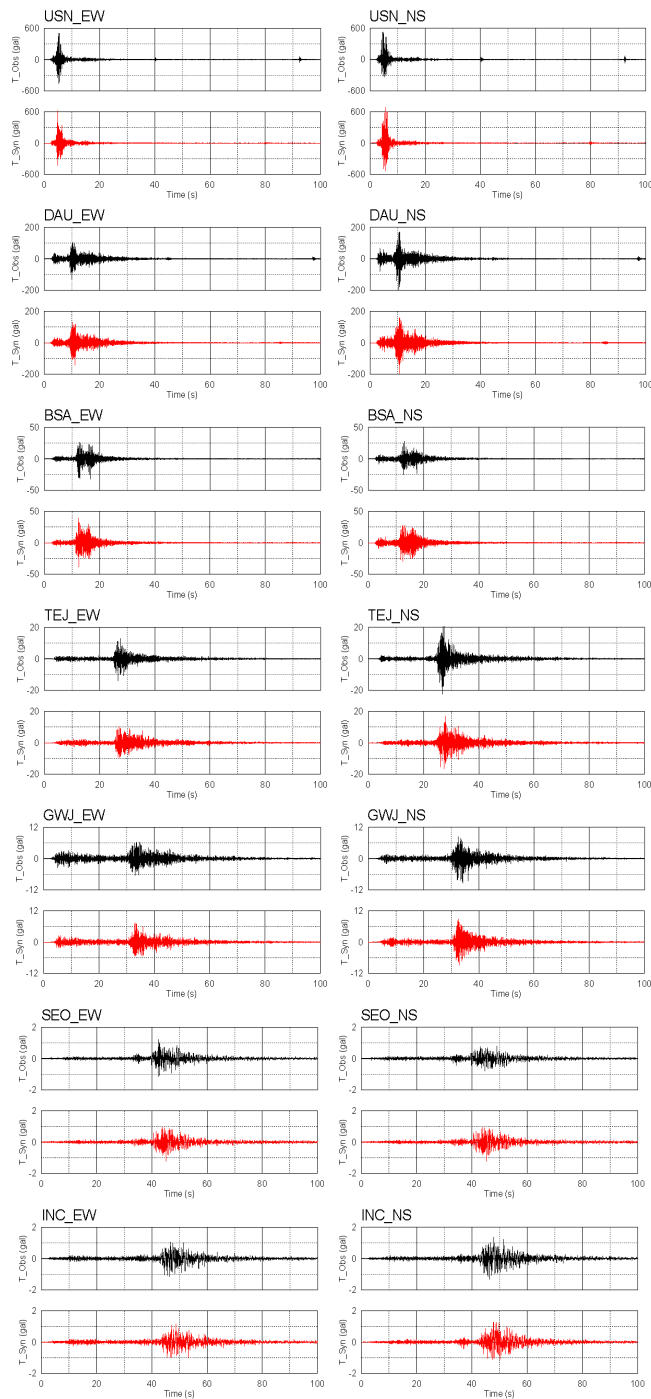


Fig. 2. Comparison of observed (black solid line) and simulated (red solid line) waveforms with EW and NS components in each seismic station

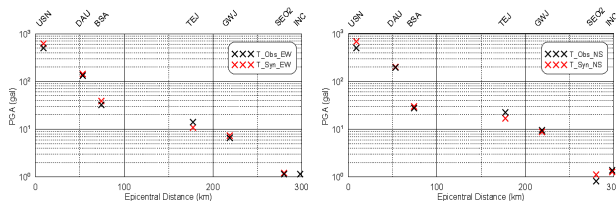


Fig. 3. Comparison of peak ground acceleration (PGA) of observed (black x) and simulated (red x) waveforms with EW and NS components in each seismic station

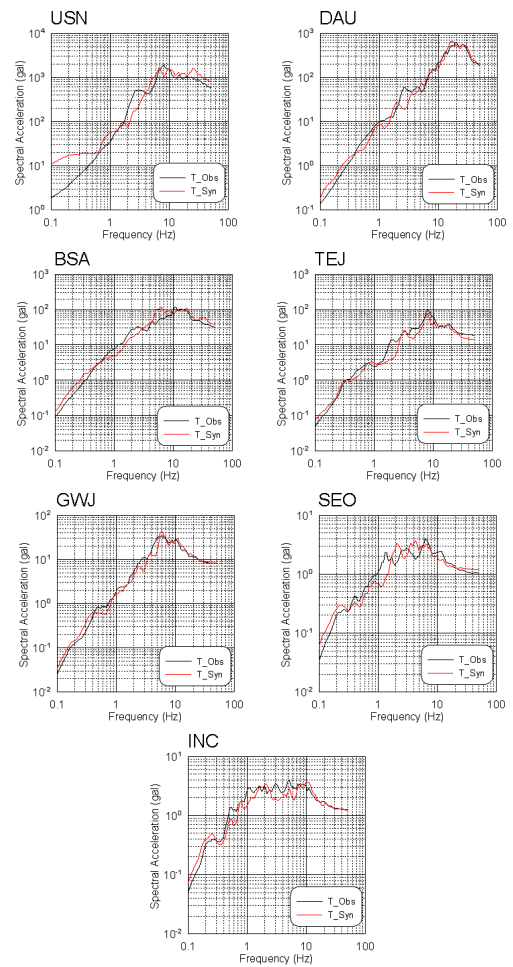


Fig. 4. Comparison of response spectrum of observed (black solid line) and simulated (red solid line) waveforms in each seismic station. Each response spectrum is made from root mean square of EW and NS component response spectra

2.3 경주지진의 본진을 이용한 시나리오 지진 모사

2.2절에서 경험적 그린함수 방법의 적용성이 확인되었으므로, 이번에는 국지규모 5.8의 지진을 작은 지진인 경험적 그린함수로, 경주지진 유발단층 시나리오 지진을 모사할 큰 지진으로 정한 후, 국내 7개 광역 도시 지진관측소에서의 지진파형을 모사하였다.

이 연구에서는 경주지진 유발단층 시나리오 지진의 모멘트규모를 6.5로 임의 설정하였다. 이 지역의 역사지진을 고려한다고 해도 지표단층작용을 발생시킨 지진이 없었고, 경주지진에 의한 진도를 고려할 때 당시 역사목록에 기록된 피해현상을 보여줄 수 있는 개연성이 있을 것으로 판단하였다. 이와 같은 이유로 경주지진 규모에 1.0을 더하여 경주지진 유발단층 시나리오 지진의 모멘트규모를 6.5로 선정하였다. 그러나 이는 다분히 저자의 주관적인 판단이며, 현재 경주지진 유발단층에 대한 지질학적, 지진학적 및 지구물리학적 방법에 의한 다양한 연구가 수행되고 있으므로, 경주지진 유발단층 시나리오 지진은 해당 연구결과에 따라 수정될 수 있을 것이다.

시나리오 지진의 지진원 정보는 Table 1의 경주지진 본진과 본질적으로 동일하며, 변경되는 것은 단층의 길이와 폭이 확장된다는 점이다. 경주지진의 본진을 경험적 그린함수로 이용하여 경주지진 유발단층 시나리오 지진

Table 4. Input parameters for strong ground motion simulation of scenario earthquake using the mainshock

l (km)	w (km)	N	subfault	C	V _s (km/s)	V _r (km/s)
4	4	3	3×3	1	3.5	2.8

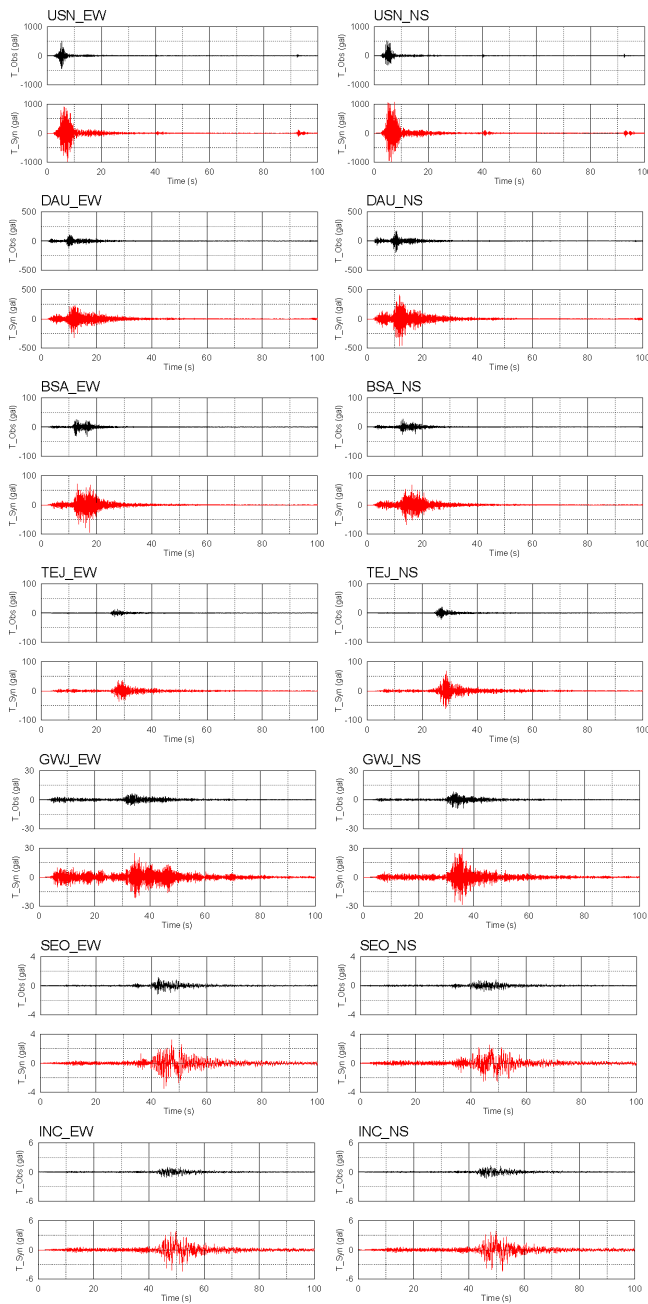


Fig. 5. Comparison of empirical Green's function (black solid line) and simulated scenario earthquake (red solid line) waveforms with EW and NS components in each seismic station

을 모사하기 위해 이용된 입력 파라미터를 Table 4에 제시하였다. 본진과 시나리오 지진에 동일한 응력강하규모에 독립적인 응력강하를 가정하였고, 식 (1)과 시나리오 지진의 모멘트규모를 고려하면 N값을 도출할 수 있다. 마찬가지로 정수로 주어지지 않기 때문에 (~3.16) 실제 모사에는 이 값과 가까운 정수(3)를 적용하였다. 단층면상에서 파열시작점의 위치는 단층의 중앙에서 파열된다고 가정하였다. 이는 시나리오 지진과 모사된 지진의

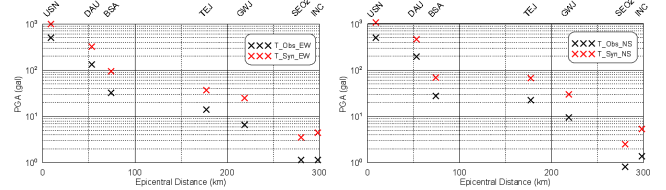


Fig. 6. Comparison of PGA of empirical Green's function (black x) and simulated (red x) waveforms with EW and NS components in each seismic station

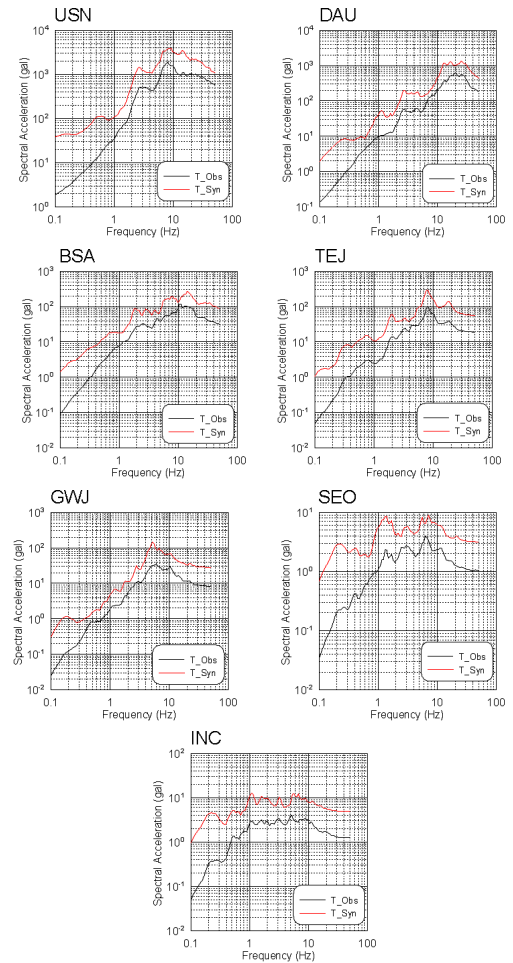


Fig. 7. Comparison of response spectrum of empirical Green's function (black solid line) and simulated scenario earthquake (red solid line) waveforms in each seismic station. Each response spectrum is made from root mean square of EW and NS component response spectra

규모에 약 0.05 정도의 차이를 생기게 한다.

Fig. 5는 국내 7개 광역 도시 지진관측소에 기록된 본진을 경험적 그린 함수로 가정하여 경주지진 유발단층 시나리오 지진을 모사한 결과를 각각 동서 성분과 남북 성분 지진파형으로 도시한 것이다. 각 지진관측소에서 상단 검은색 지진파형은 경주지진 본진을 관측한 것이고, 하단 붉은색 지진파

형은 본진을 경험적 그린함수로 가정하여 시나리오 지진을 모사한 지진파형이다. 모사 지진파형의 최대지반가속도 진폭이 대폭 증가한 것을 확인할 수 있으며, 규모와 상관하여 강진동 지속시간이 길어진 것을 확인할 수 있다. 경험적 그린함수로 사용된 관측 지진파형과 시나리오 지진의 모사 지진파형의 동서 성분과 남북 성분의 최대지반가속도를 구체적으로 비교한 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 2.2절에서 언급했던 것처럼 USN 지진관측소 모사 지진파형 PGA도 규모를 고려할 때 이례적으로 큰 값을 보여주는데, 해당 지진관측소 하부에 두꺼운 퇴적층이 존재하고 있는 환경이 모사 지진파형에 그대로 반영되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 관측한 경주지진 본진의 지진파형과 경주지진 유발단층 시나리오 지진의 모사 지진파형의 응답스펙트럼을 비교한 것이며, 해당 응답스펙트럼은 동서 성분 응답스펙트럼과 남북 성분 응답스펙트럼의 제공평균 제공근으로 나타내었다. 각 지진관측소에서 검은색 응답스펙트럼은 관측한 경주지진 본진의 응답스펙트럼이고, 붉은색 지진파형은 본진을 경험적 그린함수로 가정하여 시나리오 지진을 모사한 응답스펙트럼이다. 주파수 영역에서 모사 응답스펙트럼과 관측 응답스펙트럼의 전체적인 형태가 유사하나 스펙트럼가속도 진폭이 대폭 증가하였으며, 특히 저주파수 대역의 진폭이 고주파수 대역에 비해 상대적으로 증가한 것을 확인할 수 있다. 2.2절에서 USN 지진관측소의 경우 저주파수 대역에서 스펙트럼가속도 진폭이 다소 과대추정된 것을 확인할 수 있었으므로, 시나리오 지진에 의한 저주파수 대역에서 USN 지진관측소의 스펙트럼가속도 진폭이 더욱 과대추정되었을 것으로 판단되며, Fig. 7에서도 그러한 경향을 확인할 수 있다.

2.4 지진동 예측식과 비교

최근 개발된 지진동 예측식 [16]에 모멘트규모 5.5와 6.5, 각 7개 광역 도시 지진관측소의 진원거리를 대입하여 본진 관측 결과와 시나리오 지진 모사 결과 비교하였다. [16]은 2007년부터 2012년까지 한반도에서 발생한 지진의 관측 자료를 이용하여 경험적인 지진동 예측식을 결정하였는데, 사용된 국지규모 2.0~4.9이며, 진앙거리는 1.4~600 km의 범위를 갖는다. 먼 지진관측소에서의 부지효과를 무시하고 회귀분석을 통해 각 지진관측소에서 부지효과를 세 종류로 분류한 후 최종적으로 부지효과를 고려한 지진동 예측식을 다음과 같이 정의하여 결정하였다.

$$\log Y = a + bM + c \log(\sqrt{R_{epi}^2 + h^2}) + dR_{epi} + eS \quad (4)$$

식 (4)에서 Y는 관심 지진동(즉 PGA와 같은), M은 국지규모, R_{epi} 는 진앙거리, h는 유사깊이, S는 부지효과 변수, a, b, c, h, d, e는 지진동 예측식 계수이다. M은 기상청 국지규모이므로, 모멘트규모로 전환하기 위해서 [17]에서 제안한 수평 성분에 대한 다음의 식을 활용하였다.

$$M_L = 0.9187M_L^{KMA} + 0.3906 \quad (5)$$

$$M_L = 1.076M_W - 0.4014 \quad (6)$$

Fig. 8은 경주지진 본진의 동서 성분과 남북 성분에 대한 PGA 관측 결과

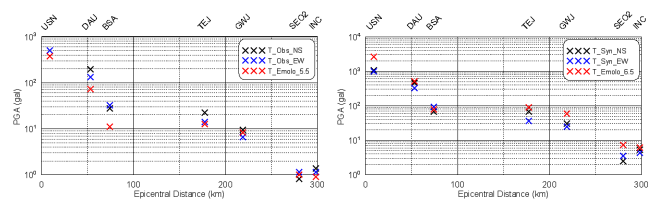


Fig. 8. Comparison of PGA of mainshock (left), scenario earthquake (right) with EW (blue x) and NS (black x) components, and ground motion prediction equation (red x) of [16] with moment magnitude 5.5 and 6.5 in each seismic station

와 시나리오 지진의 동서 성분과 남북 성분에 대한 PGA 모사 결과를, 모멘트규모 5.5와 6.5일 경우 [16]의 지진동 예측식 분석 결과를 비교한 것이다. 경주지진 본진의 경우 [16]의 결과가 다소 과소 추정하는 경향을 보이며, 특히 100 km 미만의 진앙거리에서는 큰 편차를 보인다. 시나리오 지진의 경우는 반대로 다소 과대 추정하는 경향을 보이지만, 전체적인 PGA의 진폭 수준이 유사하다.

3. 결론

2016년 경주지진 전진과 본진을 경험적 그린함수 방법에 적용하여 각각 본진과 시나리오 지진에 의한 국내 7개 광역 도시에 설치된 지진관측소에서의 강진동을 모사하였다. 해당 방법의 적용성을 확인하기 위해 우선 2016년 경주지진 전진을 경험적 그린함수로 가정하여 국내 7개 광역 도시 지진관측소에서의 경주지진 본진을 모사한 결과, 관측 지진파형과 모사 지진파형의 전체적인 형태와 최대지반가속도 진폭이 유사하며, 강진동 지속시간도 유사하게 모사된 것을 확인하였다. 또한 지진원과 인접한 USN 지진관측소의 경우 저주파수 대역에서 모사 응답스펙트럼이 다소 과대 추정되었으나, 이를 제외하고는 관측 응답스펙트럼과 모사 응답스펙트럼의 전체적인 형태와 스펙트럼가속도 진폭이 유사한 것을 확인하였다.

이러한 결과를 근거로 2016년 경주지진 본진을 경험적 그린함수로 가정하고, 시나리오 지진을 경주지진 유발단층에서 발생하는 모멘트규모 6.5의 지진이라고 가정하여 국내 7개 광역 도시 지진관측소에서의 지진동을 모사하였다. 모사 지진파형의 최대지반가속도 진폭이 대폭 증가한 것을 확인하였으며, 규모와 상관하여 강진동 지속시간이 길어진 것을 확인하였다. 주파수 영역에서 모사 응답스펙트럼과 관측 응답스펙트럼의 전체적인 형태가 유사하나 스펙트럼가속도 진폭이 대폭 증가하였으며, 특히 저주파수 대역의 진폭이 고주파수 대역에 비해 상대적으로 증가한 것을 확인하였다. 지진원과 인접한 지진관측소의 경우는 단층의 기하학적 특성의 영향으로 지진원에 대한 보정이 어렵기 때문에, 이런 근거리 지진관측소보다 멀리 떨어진 지진관측소가 경험적 그린함수 방법이 잘 적용되었다. 다만, 이는 근거리 단층의 기하학적 특성 등을 지진원 모델에 정밀하게 반영되면 해결할 수 있을 것이다.

한편 국내 지진동 예측식은 대부분 추계학적 방법을 적용해서 개발되고 있다. 현대적인 지진관측망 구축 이후로 모멘트규모 5.0 이상의 중규모 지진이 몇 차례 발생하였으며 해당 지진자료가 잘 기록되어 있다. 이러한 중규모 지진에 경험적 그린함수 방법을 적용한다면 모멘트규모 7.0 지진에 의한

각 지진관측소에서의 지진파형까지 모사할 수 있으므로, 이 강진동 자료는 신뢰성 있는 지진동 예측식 개발에 활용할 수 있으며, 해당 지진파형은 주요 시설물의 지진안전성 확보를 위한 설계응답스펙트럼을 도출하는데 활용할 수 있을 것이다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 한국원자력안전재단이 출원한 원자력안전연구사업(과제번호 1705010-0319-SB130)의 지원을 받아 한국원자력안전기술원에서 수행하였습니다. 원고의 개선을 위해 세심한 조언을 해주신 익명의 심사위원 분들께 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Son M, Cho CS, Shin JS, Rhee HM, Sheen DH. Spatiotemporal distribution of events during the first three months of the 2016 Gyeongju, Korea, earthquake sequence. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018 Feb;108(1):210–217.
2. Kim YH, Rhie J, Kang TS, Kim KH, Kim M, Lee SJ. The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 1. Observation and remaining questions. *Geosciences Journal*, 2016 Dec;20(6):747–752.
3. Park DH, Lee JM, Baag CE, Kim JK. Stochastic prediction of strong ground motion and attenuation equations in the southeastern Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, 2001 Mar;37(1):21–30.
4. Jo ND, Baag CE. Stochastic prediction of strong ground motions in southern Korea. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2001 Aug;5(4):17–26.
5. Junn JG, Jo ND, Baag CE. Stochastic prediction of strong ground motions in southern Korea. *Geosciences Journal*, 2002 Sep;6(3):203–214.
6. Jo ND, Baag CE. Estimation of spectrum decay parameter κ and stochastic prediction of strong ground motions in southeastern Korea. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2003 Dec;7(6):59–70.
7. Hartzell SH. Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophysical Research Letters*, 1978 Jan;5(1):1–4.
8. Joyner WB, Boore DM. *Earthquake Source Mechanics* 37: Maurice Ewing 6. 1986 Jan;269–274.
9. Irikura K, Kamae K. Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique. *Annals of Geophysics*, 1994 Dec;37(6):1721–1743.
10. Miyake H, Iwata T, Irikura K. Source characterization for broad-band ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003 Dec;93(6):2531–2545.
11. Yoo SH, Rhie J, Choi H, Mayeda K. Evidence for non-self-similarity and transitional increment of scaled energy in the 2005 west off Fukuoka seismic sequence. *Journal of Geophysical Research*, 2010 Aug;115:B08308.
12. Hwang SE, Park DH, Kim HS, Han A. Ground motion simulation using empirical Green's function: Application to scenario earthquake on the Korean Peninsula. *Proceedings of the Earthquake Engineering Society of Korea Conference*, 2018 Mar;22:11–12.
13. Carrillo J, Rubiano A, Delgado A. Evaluation of Green's function when simulating earthquake records for dynamic tests. *Ingeniera E Investigacion*, 2013 Dec;33(3):28–33.
14. Han SM, Park EH, Hahn IK, Park SC, Jeon YS, Jo EY, Lee CW. Analysis report of site environment at permanent seismic stations operated by Korea Meteorological Administration. National Institute of Meteorological Research, 2014 Aug;NIMR-TN-2014-007.
15. Uchide T, Song SG. Fault rupture model of the 2016 Gyeongju, South Korea, earthquake and its implication for the underground fault system. *Geophysical Research Letters*, 2018 Feb;45(5):2257–2264.
16. Emolo A, Sharma N, Festa G, Zollo A, Convertito V, Park JH, Chi HC, Lim IS. Ground-motion prediction equations for South Korea Peninsula. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015 Sep;105(5):2625–2640.
17. Sheen DH, Kang TS, Rhie J. A local magnitude scale for South Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018 Oct;108(5A):2748–2755.