

2016년 경주지진 원인단층의 시나리오 지진에 의한 국내 광역도시 지진관측소에서의 추계학적 강진동 모사

Stochastic Strong Ground Motion Simulation at South Korean Metropolises' Seismic Stations Based on the 2016 Gyeongju Earthquake Causative Fault

최호선^{1)*}

Choi, Hoseon^{1)*}

¹⁾한국원자력안전기술원 원자력안전연구소 책임연구원

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

/ A B S T R A C T /

The stochastic method is applied to simulate strong ground motions at seismic stations of seven metropolises in South Korea, creating an earthquake scenario based on the causative fault of the 2016 Gyeongju earthquake. Input parameters are established according to what has been revealed so far for the causative fault of the Gyeongju earthquake, while the ratio of differences in response spectra between observed and simulated strong ground motions is assumed to be an adjustment factor. The calculations confirm the applicability and reproducibility of strong ground motion simulations based on the relatively small bias in response spectra between observed and simulated strong ground motions. Based on this result, strong ground motions by a scenario earthquake on the causative fault of the Gyeongju earthquake with moment magnitude 6.5 are simulated, assuming that the ratios of its fault length to width are 2:1, 3:1, and 4:1. The results are similar to those of the empirical Green's function method. Although actual site response factors of seismic stations should be supplemented later, the simulated strong ground motions can be used as input data for developing ground motion prediction equations and input data for calculating the design response spectra of major facilities in South Korea.

Key words: Stochastic, Strong ground motion, Simulation, Gyeongju, Scenario

1. 서론

기상청에 따르면, 2016년 9월 12일 19시 44분 32초에 경주지역에서 국지규모(M_L) 5.1의 전진이 발생하였고, 약 50분 후인 20시 32분 54초에 국지규모 5.8의 본진(이하, 경주지진)이 발생하였다. 특히 경주지진은 기상청이 계기지진 관측을 본격적으로 시작한 1978년 이후 최대규모의 지진으로 기록되었다. 가장 큰 여진은 2016년 9월 19일 20시 33분 58초에 발생한 국지규모 4.5의 지진이다[1].

주요 시설에 대한 지진안전성 확보를 위해서는 해당 시설 부지에서 기록된 강진동 자료로부터 내진설계 입력자료인 설계응답스펙트럼을 도출할

필요성이 있다. 이와 관련하여 국내에서는 큰 규모의 지진에 의한 강진동 모사를 위해서 주로 추계학적 방법(stochastic method)을 적용하고 있는데 [2-5], 강진동 모사를 위한 추계학적 방법은 공학적인 측면에서 간결하고 유용하며, 그 효용성이 널리 알려져 있다[6, 7].

이 연구에서는 기존의 추계학적 방법을 적용하는 절차의 일부를 간단히 수정하여 강진동 모사의 적용성을 확인하였다. 강진동을 지진원(예를 들어, 단층), 경로(예를 들어, 지진동 예측식) 및 부지(예를 들어, 부지응답)의 특성으로 구분할 수 있고, 적용된 지진원과 경로의 입력 매개변수는 적절하다고 가정한다. 부지응답을 고려하지 않고 추계학적 방법으로 경주지진 원인 단층([8]에는 '유발단층'이라는 용어를 사용하였으나, 'induced'으로 해석할 여지가 있어, 'causative'라는 의미를 명확히 전달할 수 있도록 '원인 단층'이라는 용어로 수정하여 사용함)에 의한 지진동을 모사하여, 관측 지진파형과 모사 지진파형의 시간이력과 응답스펙트럼을 비교한다. 이 때, 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼의 차이는 부지응답을 고려

*Corresponding author: Choi, Hoseon

E-mail: hoseon@kins.re.kr

(Received May 29, 2021; Revised June 24, 2021; Accepted July 15, 2021)

하지 않았음에서 비롯된 것으로 가정한다(다만, 지진원과 경로의 입력 매개 변수가 어느 정도 합리적인 값으로 적용되었다고 하더라도 불확실성을 갖기 때문에, 이러한 차이는 부지응답 및 전술한 불확실성을 포함한 결과라고 해석할 수 있음. 따라서 순수하게 ‘부지응답’이라고 볼 수 없으므로, 혼란을 피하기 위해 ‘조정인자(adjustment factor)’라는 용어를 도입함). 조정인자를 다시 입력 매개변수로 가정하여 추계학적 방법으로 경주지진 원인단층에 의한 지진동을 모사하고, 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼을 비교하여, 강진동 모사의 재현성을 확인한다. 다음으로 경주지진 원인단층에서 발생할 수 있을 것으로 예상되는 큰 지진(시나리오 지진)을 선정하여 해당 지진에 의해 대상 부지에서 예상되는 강진동을 모사하고 응답스펙트럼을 도출한다. 도출된 결과의 적절성을 확인하기 위해 경험적 그린함수(empirical Green’s function) 방법을 적용한 결과[8]와 비교한다. 대상 부지는 인구와 시설이 집중된 서울, 광주, 대구, 대전, 부산, 울산, 인천의 7개 광역도시를 선정하였으며, 해당 도시의 위치는 기상청이 운영하고 있는 지진관측소의 위치를 기준으로 하였다.

2. 본 론

2.1 추계학적 방법

고주파수 가속도 시간이력이 유한 지속시간을 갖는 백색 가우시안(Gaussian) 잡음을 이용해 모델화될 수 있음[9]을 근거로 지진동을 예측할 수 있는 추계학적 방법이 제안되었다[10]. 진폭스펙트럼 모델은 지진원, 경로, 그리고 부지의 특성으로 구분할 수 있으며, 다음과 같이 주어진다.

$$A(M_0, R, f) = C \cdot E(M_0, f) \cdot D(R, f) \cdot P(f) \cdot I(f) \cdot S(f) \quad (1)$$

식(1)에서 C는 비례조정 인자, E(M₀, f)는 지진원 진폭스펙트럼, D(R, f)는 경로를 특성화하는 감소함수, P(f)는 고주파수 절단 필터, I(f)는 계산될 지진동 유형을 명시하는 필터, S(f)는 부지응답을 나타낸다. 고주파수에서 가속도 스펙트럼 형상을 설명하기 위한 κ 필터가 제안되었는데[11], 이는 비탄성 감쇄와 고주파수 절단의 결과로 표현할 수 있다. 부지응답 S(f)는 주파수에 의존하는 함수인데, 관측 지진자료가 얻어진 장소에 대한 상세한 정보(예를 들어, 전단파속도 주상도)가 별도로 필요하다. 이 연구에서는 부지응답을 고려하지 않고 추계학적 방법으로 강진동을 모사한 후, 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼의 차이를 단순히 조정인자라고 가정하였다.

강진동 모사를 위한 주요 매개변수 중의 하나는 지속시간(duration) 모델인데, 백색 가우시안 잡음의 창(window) 설정과 관련이 있다. 특히, 지진원이 가까이 있을 때, 침두 지진동이나 응답스펙트럼의 생성과 연관된 지속시간은 단층작용(faulting)에 의한 지속시간과 관련이 있다. 한편 추계학적 방법에 의한 시간이력의 창의 형상을 고려해야 하는데, 모사결과에는 결정적이지 않다. 이 연구에서는 실제적인 시간이력 형상을 만들기에 선호되는 창의 형상을 적용하였다[12].

추계학적 방법에 의한 강진동 모사를 위해 EXSIM 코드를 사용하였다. EXSIM 코드는 포트란(FORTRAN)으로 씌어진, 추계학적 유한단층 모사

알고리즘 공개 프로그램으로, 지진에 의한 지진동의 시간이력을 산출한다 [6, 13]. 지진모멘트(seismic moment)에 따라 특정 크기를 갖는 단층면은 구성단층(subfault)의 배열로 나뉘며, 각 구성단층은 점지진원으로 취급된다. 각 구성단층으로부터 지진동은 특정 지속시간의 무작위 가우시안 잡음으로 취급되는데, 전단 방식에 대한 점지진원 모델로 주어지는 스펙트럼을 갖는다[14]. Brune 모델은 지진모멘트와 응력 매개변수에 의해 지진원의 푸리에(Fourier) 스펙트럼을 명시하며, 경험적 감쇄 모델에 따라 주파수 영역에서 감쇄된다. 각 구성단층에 대한 지진동의 지속시간은 지진원 지속시간과 경로 지속시간의 합에서 구한다. 각 구성단층으로부터의 시간이력은 시간영역에서 합쳐지며, 파열면의 전파에 대한 적절한 시간지연(time delay)을 갖게 된다.

2.2 경주지진 원인단층에 의한 추계학적 강진동 모사

기상청이 본격적으로 지진을 관측한 1978년 이래 가장 큰 규모의 지진이 2016년 9월 12일 20시 32분에 경북 경주시 남남서쪽 8.7 km 지역에서 발생하였다. 이 절에서는 우선 부지응답을 고려하지 않고 경주지진 원인단층에 의한 광역도시 지진관측소에서의 관측 지진파형과 모사 지진파형의 지진동과 응답스펙트럼을 비교하였다. 경주지진 본진과 지진관측소에 대한 위치 및 경주지진 원인단층 모델을 Fig. 1에 도시하였고, 각 지진관측소의 정보를 Table 1에 제시하였다.

경주지진 원인단층에 의한 강진동 모사를 위한 입력 매개변수는 진원 위치, 진원 깊이, 단층 길이와 폭, 단층 형상(주향 및 경사), 지진규모, 응력 강하, 기하학적 확산 모델, 비탄성 감쇄 모델, 지속시간 모델, 전단파속도 및 지각밀도, 단층 파열속도, 방사패턴, 자유면 증폭, 구성단층 길이와 폭, 단층 상단 깊이 등이 있다. 해당 매개변수의 값과 출처를 Table 2에 제시하였다.

Fig. 2는 각 광역도시 지진관측소에 대해 Table 2의 매개변수를 입력하여 모사한 결과이다. 전반적으로 관측 지진파형과 모사 지진파형의 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 지진원과 경로 매개변수가 불확실성을 갖지만 어느 정도 합리적인 값으로 적용되었다고 가정하면, 이러한 차이는 각 지진관측소의 부지응답 및 전술한 불확실성이 연구에서는 합쳐서 간단히 조정인자

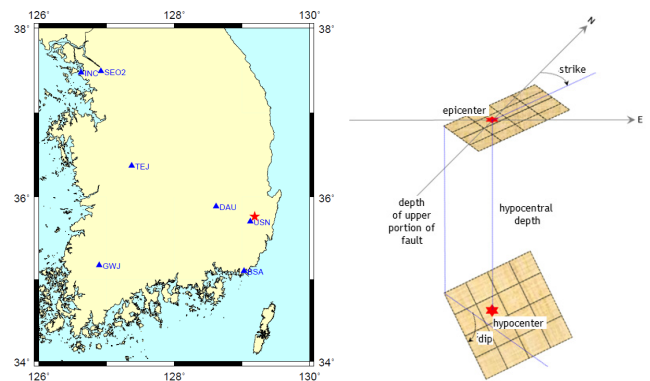


Fig. 1. [left] Location of mainshock (red star) of 2016 Gyeongju earthquake and seismic stations (blue triangle) installed at metropolitan in South Korea. [right] The causative fault model of 2016 Gyeongju earthquake

Table 1. 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 each seismic station

Table 2. Input parameters for stochastic strong ground simulation at seismic stations

Input parameter	Value	Etc
location	35.7621°N, 129.1903°E	[15]
depth	12.8 km	
fault length and width	4 km, 4 km	
fault shape (strike, dip)	26°, 68°	
fault type	strike slip	
magnitude	M _w 5.5	
stress drop	127 bar	
geometrical spreading	1/R (R ≤ 50 km), (50R) ^{-0.5} (R > 50 km)	[16]
anelastic attenuation	229.2r ^{0.73}	[17]
duration	0 (R ≤ 10 km), 0.16×(R-10) (10 < R ≤ 70 km), 9.6-0.03×(R-70) (70 < R ≤ 130 km) 7.8+0.04×(R-130) (130 km < R)	[6]
shear wave velocity and crustal density	3.5 km/s, 2.7 g/cm ³	[4]
fault rupture velocity	2.8 km/s	-
radiation pattern	0.55	-
free surface amplification	2	-
subfault length and width	1 km, 1 km	-
depth of upper portion of fault	11.4 km	-

라고 가정함)을 포함한 결과라고 해석할 수 있을 것이다. Fig. 2에는 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼 차이의 비율도 같이 제시되어 있다. 관측 지진파형의 응답스펙트럼은 두(동서, 남북) 수평성분의 제곱평균 제곱근(root mean square)으로 주어진다. 주파수 대역별로 차이가 있지만, 평균 0.78~1.78배 수준이며, BSA 지진관측소가 0.96배 수준에 표준편차가 상대적으로 작아서 가장 유사한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 3은 전술한 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼 차이의 비율을 단순하게 부지응답에 의한 결과로 가정한 후, EXSIM 코드의 부지응답 매개변수로 입력하여 재계산한 결과이다. USN 지진관측소의 경우, 저주파수 대역에서 모사 지진파형이 관측 지진파형보다 다소 과소 추정되고 있으나, 응답스펙트럼의 전체적인 형상과 진폭은 유사하다. 또한 진앙거리가 멀어질수록 고주파수 대역에서 모사 지진파형이 관측 지진파형보다 다소 과대 추정되는 경향을 보이지만, 전체적인 형상과 진폭은 유사하다. 진앙거리가 멀어지면 강진동의 지반가속도의 값이 크지 않아 내진설계 입력자료로서의 중요성은 크지 않을 것으로 보인다. 주파수 대역별로 차이가 있지만, 평균 0.93~1.04배 수준이며, 조정인자를 고려하기 이전보다 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼이 전반적으로 유사해졌음을 알

수 있다.

관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼 차이에 대한 정량적인 비교를 위하여 [18]에서 제시한 편향 분석을 수행하였다.

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\ln SA_{sim} - \ln SA_{obs}) \quad (2)$$

식 (2)에서 N은 계산에 사용된 지진관측소의 개수이다. 합리적인 수준의 편향은 ±0.5 이내에 있어야 하며[18], 다른 연구[7], [19, 20]에서도 유사한 기준을 적용한 사례가 있다. Fig. 4는 조정인자를 고려한 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼에 대한 편향 분석결과로서 저주파수 대역에서는 다소 과소 추정, 고주파수 대역에서는 다소 과대 추정을 보이지만, 전 주파수 대역에서 ±0.5 이내의 편향을 나타내고 있다. 이러한 편향 분석결과를 근거로 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼이 대체적으로 부합하므로 적용성과 재현성이 있다고 판단할 수 있다.

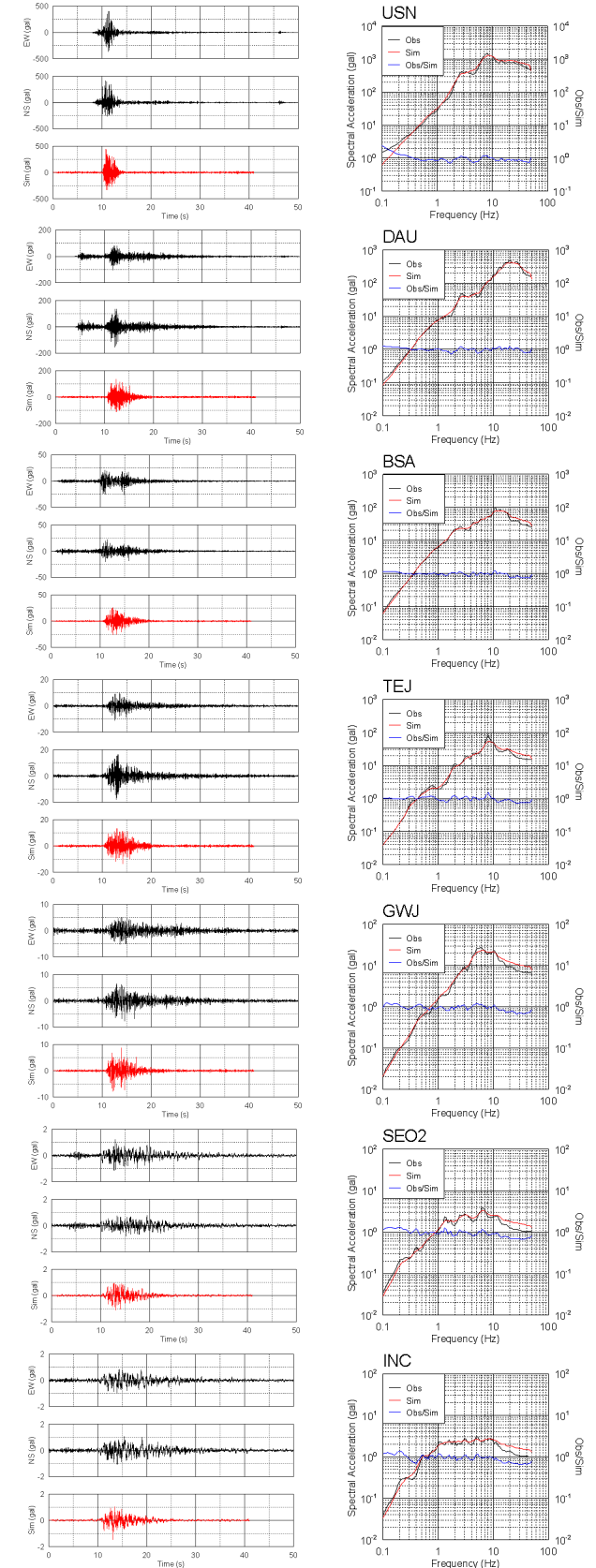
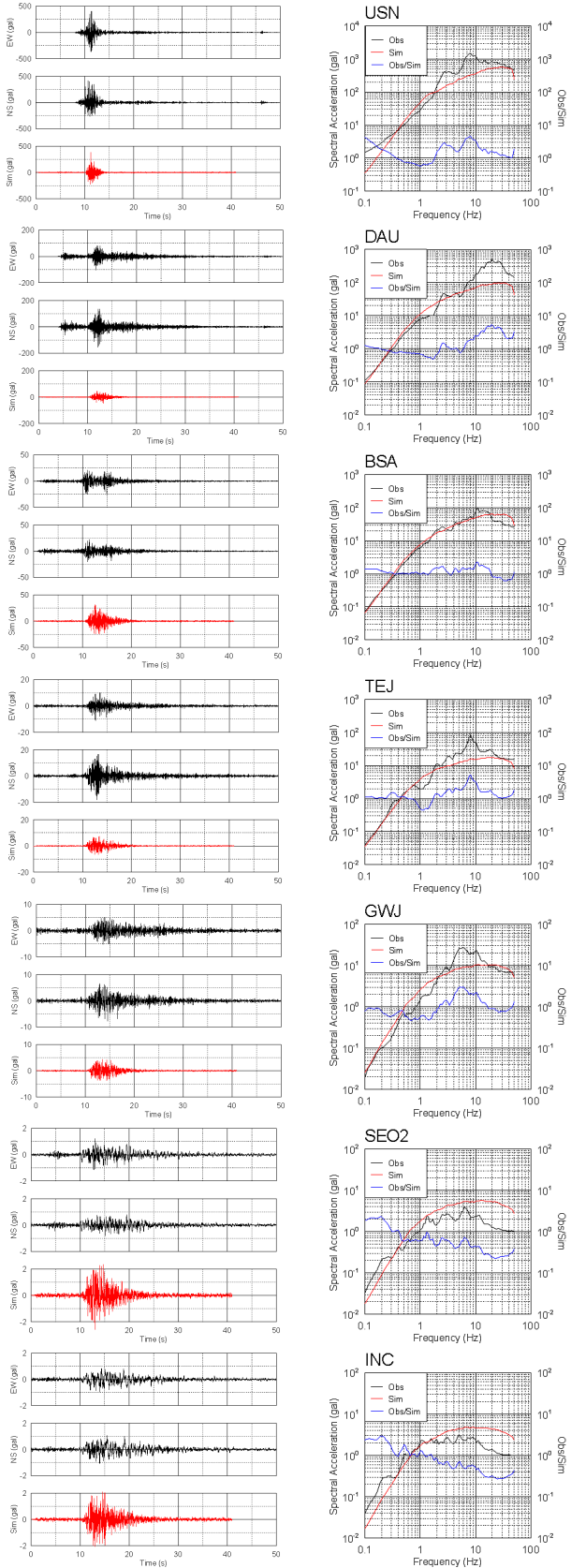


Fig. 2. [left] Comparison of observed (black solid line) and simulated (red solid line) waveforms and [right] their response spectra in seismic stations (refer to the code on the top left of each) without the consideration of each adjustment factor. Spectral ratio is also depicted in blue solid line

Fig. 3. [left] Comparison of observed (black solid line) and simulated (red solid line) waveforms and [right] their response spectra in seismic stations (refer to the code on the top left of each) with the consideration of each adjustment factor. Spectral ratio is also depicted in blue solid line

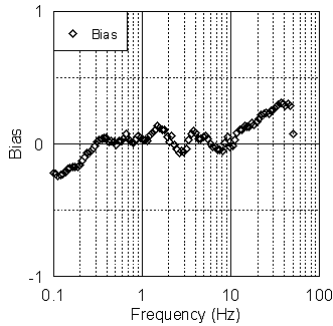


Fig. 4. Bias analysis result based on [18] for observed (black solid line) and simulated (red solid line) response spectra with the consideration of each adjustment factor

2.3 경주지진 원인단층의 시나리오 지진에 의한 추계학적 강진동 모사

2.2절에서 추계학적 방법을 적용하는 절차의 일부를 간단히 수정한 강진동 모사의 적용성과 재현성을 확인하였으므로, 이번에는 경주지진 원인단층의 시나리오 지진을 큰 지진으로 정한 후, 국내 7개 광역 도시 지진관측소에서의 강진동을 모사하였다. 이 연구에서는 경주지진 원인단층의 시나리오 지진의 모멘트규모(M_w)를 6.5로 임의로 설정하였다. 이 지역의 역사 지진을 고려한다고 해도 지표단층작용을 발생시킨 지진이 없었고, 경주지진에 의한 진도를 고려할 때 당시 역사기록에 기록된 피해현상을 보여줄 수 있는 개연성이 있을 것으로 판단하였다[8]. 이와 같은 이유로 경주지진 규모에 1.0을 더하여 경주지진 원인단층의 시나리오 지진의 모멘트규모를 6.5로 선정하였다. 현재 경주지진 원인단층에 대한 지질, 지진 및 지구물리 방법에 의한 다양한 연구가 수행되고 있으므로, 경주지진 원인단층의 시나리오 지진은 해당 연구결과에 따라 수정될 수 있을 것이다.

시나리오 지진의 모멘트규모를 6.5로 가정하고, 단층면적-규모 경험식 [21]을 통해 단층 면적을 평가하였다. 운동감각이 주향이동성단층일 때, 면적-규모 경험식은 다음과 같이 주어진다.

$$M_w = 3.98 + 1.02 \log(A) \quad (3)$$

식 (3)을 이용하면 모멘트규모 6.5일 때 산출되는 단층면적은 295.52 km^2 이다. 일반적으로 단층 길이가 단층 폭보다 크므로, 산출된 단층 면적에 대해 단층 길이와 단층 폭의 비율을 2:1, 3:1, 4:1로 각각 가정하여 단층 면적에 적절한 단층 길이와 단층 폭을 계산하였다. 이렇게 결정된 단층 길이와 폭은 Table 3에 제시되어 있다.

구성단층의 길이(또는 폭)의 경우, 기존 경험식[22] 등으로부터 결정할 수 있다. 이로부터 모멘트규모 6.5일 때 구성단층의 길이를 4.0 km로 계산할 수 있지만, 이 값에 정수배를 곱하여 사용하게 되면 Table 3에 제시된 단

층 길이와 단층 폭에 영향을 주게 된다. 경험식에 의해 도출된 구성단층의 크기와 Table 3에 제시된 길이와 폭에 주는 영향을 가능한 적게 주기 위해서 경험식에서 도출된 구성단층의 길이와 최대한 유사한 값으로 구성단층의 길이를 결정하였다. EXSIM 코드의 경우 다양한 구성단층의 길이를 적용하더라도 동적 모서리주파수(dynamic corner frequency)를 사용하여 구성단층 길이에 의한 영향을 최소화 하고 있다.

국내에는 지진발생층의 상한 깊이에 대한 별도의 결과가 제시되어 있지 않으나, 일반적으로 지진발생 유무에 따라 3개의 깊이 영역으로 나누어져 있을 것으로 생각해 볼 수 있다. 즉 천부 파쇄대, 지진발생(파열시작) 영역, 소성 또는 연성대로 생각할 수 있는데, 지진발생층의 상한 깊이가 지진발생(파열시작) 영역의 최소 깊이이며, 지진발생층의 하한 깊이는 소성 또는 연성대의 최소 깊이와 동일한 의미라고 생각된다. Table 3에서 단층 길이와 단층 폭의 비율이 2:1 일 때, 단층 상단 깊이와 단층 폭을 고려하면 단층의 하단 깊이는 20 km에 육박하게 된다. 이는 한반도 지진발생층의 하한 깊이를 넘어설 수도 있을 것이다. 일부 문헌[23]에서는 지진발생층 하단을 넘어서는 단층 면적을 단층 길이 방향으로 부가하여 평가하기도 하나, 이 연구에서는 단층 길이와 단층 폭의 비율에 따른 대상 부지의 지진동 모사에 초점을 맞추기 위해 그대로 사용하기로 한다. 추후 관련 연구가 진행되면 단층모형을 수정할 필요가 있을 것이다.

Table 2에 제시된 경주지진 원인단층에 의한 추계학적 강진동 모사를 위한 매개변수에 Table 3에 제시된 지진원 관련 매개변수를 입력하여 강진동 모사를 수행하였다. 2.2절에서 계산한 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼 차이의 비율을 다시 조정인자로 고려하였다. 시나리오 지진의 모멘트규모가 6.5이고, 단층 길이와 폭의 비율이 각각 2:1, 3:1, 4:1로 가정했을 때, 각 광역도시 지진관측소에 대한 모사 지진파형 및 응답스펙트럼을 Fig. 5에 제시하였는데, 전체적으로 유사하다. 다만, USN 지진관측소의 응답스펙트럼에서 단층 길이와 폭의 비율이 2:1 일 때 전반적으로 다소 작게 평가된 것을 알 수 있는데, 이는 원인단층과 USN 지진관측소가 진앙거리 9 km로 매우 가깝고, 원인단층의 주향(북북동-남남서)과 USN 지진관측소의 방향(남서)이 비슷하여, 시나리오 지진에 의해 확장된 원인단층 길이와 폭에 의한 기하학적 영향이 지진동 크기에 반영된 것으로 생각된다. 진앙거리가 멀어지면 이러한 영향은 전반적으로 줄어들게 된다. 이렇게 원인단층에서 발생한 시나리오 지진에 의한 응답스펙트럼을 포괄할 수 있는 실제응답스펙트럼을 대상 부지에서의 주요 시설에 적용하게 되면, 내진설계 측면에서 주요 시설의 지진안전성을 확보할 수 있게 되는 것이다.

2.4 경험적 그린함수 방법에 의한 강진동 모사 결과와의 비교

2016년 경주지진 전진과 본진을 경험적 그린함수 방법에 적용하여 각각 본진과 시나리오 지진에 의한 국내 7개 광역도시에 설치된 지진관측소에서 지진동을 모사하였다([8]에서 사용된 지진관측소 기록계 중에 Q730의

Table 3. Calculated fault length and width from fault area considering ratio of fault length and width

Magnitude (M_w)	Area (km^2)	2:1		3:1		4:1	
		Length (km)	Width (km)	Length (km)	Width (km)	Length (km)	Width (km)
6.5	295.52	24.31	12.16	29.78	9.93	34.38	8.60

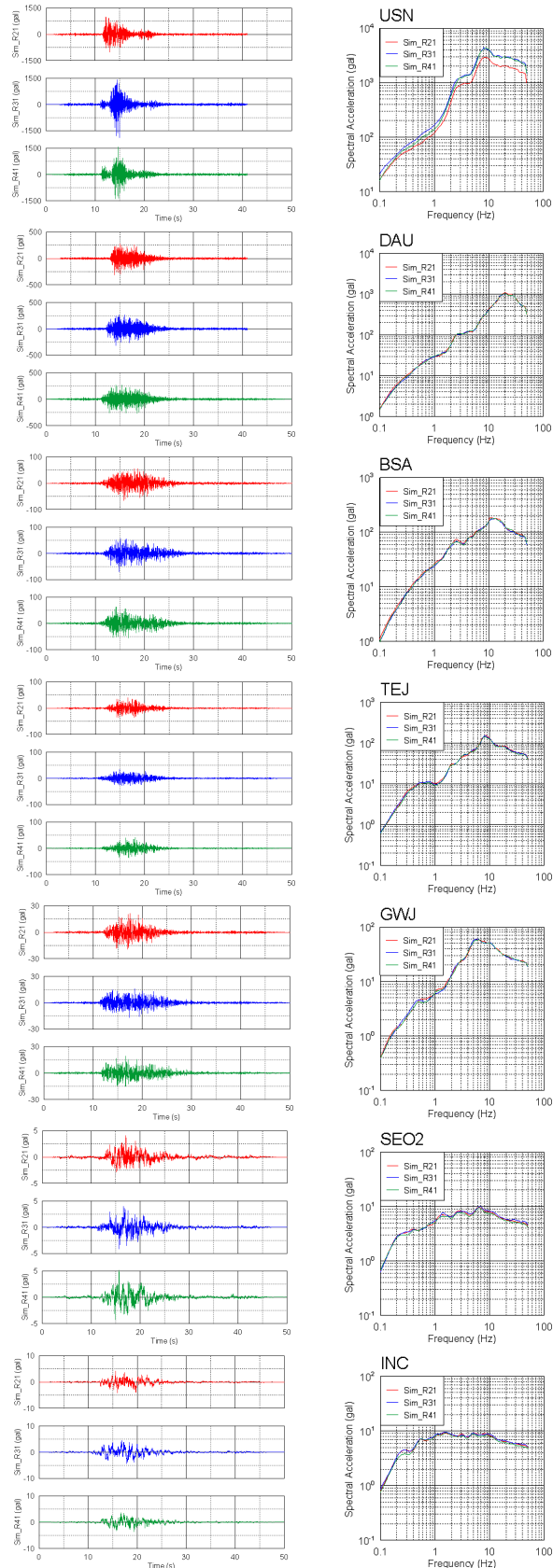


Fig. 5. Comparison of simulated [left] waveforms and [right] their response spectra in seismic stations (refer to the code on the top left of each) with different ratios (2:1 in red, 3:1 in blue and 4:1 in green solid line, respectively) of fault length and width, and the consideration of each adjustment factor

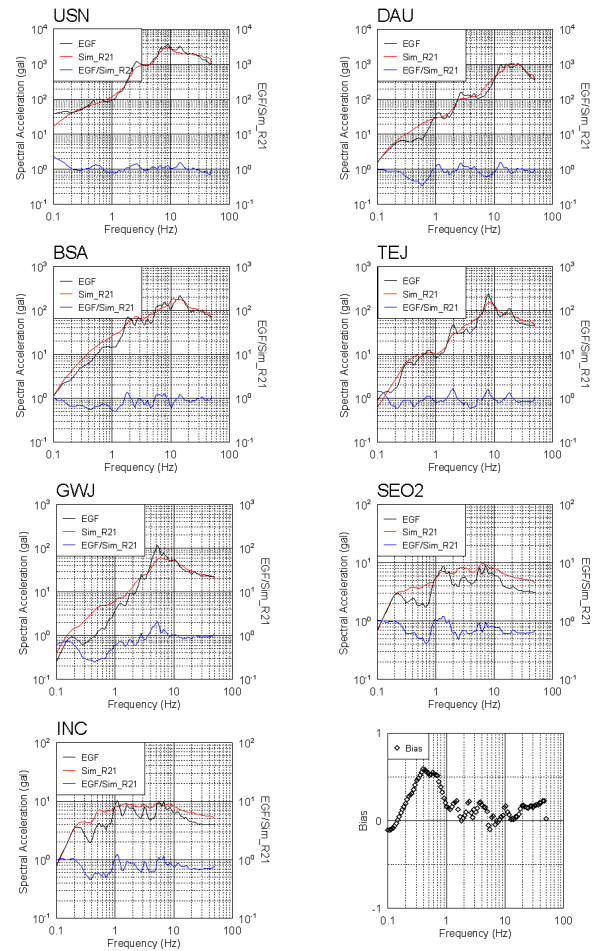


Fig. 6. Comparison of simulated response spectra by stochastic method (red solid line) and empirical Green's function method (black solid line) in seismic stations (refer to the code on the top left of each). In case of stochastic method, the result with 2:1 ratio is presented. Bias analysis result is also presented in lower right panel

민감도가 잘못 입력되어, 이 연구에서 재계산하였음). 우선 2016년 경주지진 전진을 경험적 그린함수로 가정하여 국내 7개 광역도시 지진관측소에서 경주지진 본진을 모사한 결과, 관측 지진파형과 모사 지진파형의 전체적인 형상과 진폭이 유사하며, 강진동 지속시간도 유사한 것을 확인하였다. 또한 지진원과 인접한 USN 지진관측소의 경우 저주파수 대역에서 모사파형의 응답스펙트럼이 다소 과대 추정되었으나, 이를 제외하고는 모사파형과 관측파형의 응답스펙트럼의 전체적인 형상과 진폭이 유사한 것을 확인하였다. 이러한 결과를 근거로 2016년 경주지진 본진을 경험적 그린함수로 가정하고, 시나리오 지진을 경주지진 원인단층에서 발생하는 모멘트규모 6.5의 지진이라고 가정하여 국내 7개 광역도시 지진관측소에서의 지진동을 모사하였다. 지진원과 인접한 지진관측소의 경우는 단층의 기하학적 특성의 영향으로 지진원에 대한 보정이 어렵기 때문에, 이런 근거리 지진관측소보다 멀리 떨어진 지진관측소가 경험적 그린함수 방법이 잘 적용됨을 확인하였다[8].

Fig. 6은 조정인자를 고려하고 추계학적 방법을 이용한 시나리오 지진에 의한 강진동 모사파형의 응답스펙트럼과 경험적 그린함수 방법을 이용한 시나리오 지진에 의한 강진동 모사파형의 응답스펙트럼을 비교한 것이

다. 전반적으로 두 방법에 의한 전체 지진관측소 모사파형의 응답스펙트럼은 서로 유사함을 확인할 수 있다. 단층 길이와 단층 폭의 비율이 2:1 일 때를 기준으로, 주파수 대역별로 차이가 있지만, 평균 최소 0.75 ~ 1.13배 수준으로 대부분 추계학적 방법에 의한 모사파형이 다소 더 크게 계산되었다. 한편, 경험적 그린함수 방법의 단점으로 지적되는 중간 정도 주파수 대역에서 응답스펙트럼 진폭이 다소 부족해지는 현상(sag)은 상당히 줄어들었음을 확인할 수 있다.

추계학적 방법에 의한 지진파형과 경험적 그린함수에 의한 지진파형의 응답스펙트럼 차이에 대한 정량적인 비교를 위하여 [18]에서 제시한 편향 분석을 수행하였다(경험적 그린함수에 의한 지진파형을 관측 지진파형으로 간주함). Fig. 6에서 전 주파수 대역에서 추계학적 방법이 다소 크게 추정하고 있으며, 0.4 Hz 부근의 저주파수 대역에서 더욱 두드러지나, 이를 제외한 주파수 대역에서 ± 0.5 이내의 편향을 나타내고 있다. 이러한 편향 분석결과를 근거로 추계학적 방법에 의한 모사 지진파형과 경험적 그린함수 방법에 의한 모사 지진파형의 응답스펙트럼이 대체적으로 부합한다고 판단할 수 있다. 따라서 현재 강진동 모사에 많이 활용되고 있는 경험적 그린함수 방법[24-26]에 의한 결과와 유사하며 일부 단점을 보완할 수 있으므로, 이 연구에서 제시한 기존의 추계학적 방법을 적용하는 절차의 일부를 간단히 수정한 방법 또한 강진동 모사에 다양하게 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

3. 결론

경주지진 원인단층은 지표 및 지표 가까이에서 지표단층작용을 발생시키지 않은 지하 심부의 단층으로서 지진발생과 관련한 잘 정의된 지질구조이다. 한편 단층과 같은 지진원이 대상 부지와 가깝게 위치해서 단층의 지하학적 형상 등을 무시할 수 없고 단순하게 지진동 모델만을 적용할 수 없을 경우, 단층의 근거리 효과를 지진동 평가에 고려할 필요가 있다. 이를 위해 경주지진 원인단층에 대해 현재까지 가용한 자료를 이용하여 발생할 수 있는 시나리오 지진의 규모를 가정하여, 대상 부지에서의 강진동 모사에 적용하였다.

이 연구에서는 공학적으로 유용한 추계학적 방법을 수행하는 절차의 일부를 간단히 수정하여 강진동 모사에 적용하였다. 경주지진 원인단층에 대해 현재까지 밝혀진 내용을 근거로 하여 매개변수를 설정하고, 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼의 차이의 비율을 조정인자로 가정하였다. 계산 결과 관측 지진파형과 모사 지진파형의 응답스펙트럼이 대체적으로 부합하고 있음을 근거로 강진동 모사의 적용성과 재현성을 확인할 수 있었다.

경주지진 원인단층에서 발생할 수 있을 것으로 예상되는 시나리오 지진을 선정하여 해당 지진에 의해 광역도시 지진관측소에서 예상되는 강진동을 모사하였다. 도출된 결과는 경험적 그린함수 방법을 적용한 결과와 유사하였으며, 경험적 그린함수 방법의 단점으로 지적되는 중간 정도 주파수 대역에서 응답스펙트럼 진폭이 일부 부족해지는 현상(sag)이 상당히 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 하지만, 추계학적 방법의 특성상 3성분 지진파형을 모두 모사할 수 없고, 단층의 수직만 방향으로 강하게 나타나는 방향성 효과를 효과적으로 구할 수 없다는 등의 한계가 있다. 또한 적용한 시나리오

지진에 의한 강진동의 진폭에 차이가 있을 때 부지응답의 비선형성 여부 및 실제 부지응답과의 비교는 추후 보완되어야 할 것이다.

모사된 강진동 자료는 신뢰성 있는 지진동 모델 개발에 활용할 수 있으며, 해당 지진파형은 주요 시설의 지진안전성 확보를 위한 설계응답스펙트럼 도출에도 활용할 수 있을 것이다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 한국원자력안전재단이 출원한 원자력안전연구사업(과제번호 1705010-0521-SB130)의 지원을 받아 한국원자력안전기술원에서 수행하였습니다. 원고의 개선을 위해 세심한 조언을 해주신 익명의 심사위원들께 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Korea Meteorological Administration, 2016 Earthquake catalogue.
2. 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.
3. Jo ND, Baag CE, Stochastic prediction of strong ground motions in southern Korea, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2001 August;5(4):17-26.
4. Junn JG, Jo ND, Baag CE, Stochastic prediction of strong ground motions in southern Korea, *Geosciences Journal*, 2002 Sep;6(3):203-214.
5. 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.
6. Atkinson GM, Assatourians K, Implementation and validation of EXSIM (a stochastic finite-fault ground-motion simulation algorithm) on the SCEC broadband platform, *Seismological Research Letters*, 2015 Jan;86(1):48-60.
7. Dreger DS, Beroza GC, Day SM, Goulet CA, Jordan TH, Spudich PA, Stewart JP, Validation of the SCEC broadband platform V14.3 simulation methods using pseudospectral acceleration data, *Seismological Research Letters*, 2015 Jan/Feb;86(1):39-47.
8. Choi H, Stochastic strong ground motion simulation at seismic stations of metropolises in South Korea by scenario earthquake on the causative fault of 2016 Gyeongju earthquake, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2020 Mar;24(2):59-65.
9. Hanks TC, McGuire RK, The character of high-frequency strong ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981 Dec;71(6):2071-2095.
10. Boore DM, Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1983 Dec;73(6A):1865-1894.
11. Anderson JG, Hough SE, A model for the shape of the fourier

- amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1984 Oct;74(5):1969–1993.
12. Saragoni GR, Hart GC. Simulation of artificial earthquakes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1973 Jan;2(3):249–267.
 13. Motazedian D, Atkinson GM. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005 Jun;95(3):995–1010.
 14. Brune JN. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 1970 Sep;75(26):4997–5009.
 15. 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.
 16. Rhee HM. Analysis of seismic source parameters of earthquakes in the Korean Peninsula and characteristics of strong ground motions. Thesis for the Degree of Ph.D. in Jeonnam National University, c2018.
 17. Kim SK. Seismic wave attenuation in the southern Korea Peninsula: comparison by the applied method and used data. *Journal of Korean Geological Society of Korea*, 2007 Jun;43(2):207–217.
 18. Wirth EA, Frankel AD, Vidale JE. Evaluating a kinematic method for generating broadband ground motions for great subduction zone earthquakes: Application to the 2003 MW 8.3 Tokachi–Oki earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017 Jul;107(4):1737–1753.
 19. Frankel A. Rupture history of the 2011 M 9 Tohoku Japan earthquake determined from strong-motion and high-rate GPS recordings: Subevents radiating energy in different frequency bands. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013 May;103(2B):1290–1306.
 20. Hartzell S, Harmsen S, Frankel A, Larsen S. Calculation of broadband time histories of ground motion: Comparison of methods and validation using strong-ground motion from the 1994 North–ridge earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1999 Dec;89(6):1484–1504.
 21. Wells DL, Coppersmith KJ. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1994 Aug;84(4):974–1002.
 22. Beresnev IA, Atkinson GM. Modeling finite-fault radiation from the ω spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997 Feb;87(1):67–84.
 23. The Headquarters for Earthquake Research Promotion. Strong ground motion prediction method for earthquakes with specified source faults (“Recipe”). c2017.
 24. 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.
 25. 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*, 2013 Dec;93(6):2531–2545.
 26. Hough 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;2018–03:11–12.