

추계학적 점지진원 모델을 사용한 한반도 지반 운동의 경로 감쇠 효과 평가

Estimation of Path Attenuation Effect from Ground Motion in the Korean Peninsula using Stochastic Point-source Model

지현우¹⁾ · 한상환^{2)*}

Jee, Hyun Woo¹⁾ · Han, Sang Whan^{2)*}

¹⁾한양대학교 건축공학과 대학원생, ²⁾한양대학교 건축공학과 교수

¹⁾Graduate Student, Department of Architecture Engineering, Hanyang University, Korea, ²⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Korea

/ A B S T R A C T /

The stochastic point-source model has been widely used in generating artificial ground motions, which can be used to develop a ground motion prediction equation and to evaluate the seismic risk of structures. This model mainly consists of three different functions representing source, path, and site effects. The path effect is used to emulate decay in ground motion in accordance with distance from the source. In the stochastic point-source model, the path attenuation effect is taken into account by using the geometrical attenuation effect and the inelastic attenuation effect. The aim of this study is to develop accurate equations of ground motion attenuation in the Korean peninsula. In this study, attenuation was estimated and validated by using a stochastic point source model and observed ground motion recordings for the Korean peninsula.

Key words: Stochastic point-source model, Path attenuation effect, Ground motion simulation, Earthquake, Ground motion prediction equations

1. 서론

유라시아판 내부에 위치한 한반도는 중약진 지역으로 분류되어있기 때문에, 일본과 대만, 그리고 미국의 서부 지역과 같은 지진 활동이 활발한 지역에 비해서 큰 규모의 지진 발생 가능성은 높지 않다. 그러나 역사적으로 한반도에서 규모 6이상의 지진이 다수 기록된 바 있다 [1-3]. 또한, 기상청에서 디지털 계기 관측이 시작된 이래로, 한반도 내에서 발생한 2016년 경주 지진 (M_L 5.8)과 2017년 포항 지진 (M_L 5.4)은 주변 지역의 건축 및 문화재 구조물에 대한 피해에 따른 경제적 손실과 인명 피해를 유발하여 국내 지진 피해에 대한 중요성이 증가하고 있는 추세이다.

지진 피해를 정량화하여 보여주는 방법으로는 지진 규모 및 거리에 따른 지진파의 감쇠 특성을 보여주는 지반운동 예측식 (Ground motion prediction equations, GMPEs)과 이를 기반으로 확률론적 지진 재해도 해석

(Probabilistic seismic hazard analysis, PSHA)를 통해 작성되는 지진위험도가 있다. 이러한 방법들은 지진 수준 예측 및 구조물에 대한 지진 피해를 줄이기 위해 지진 공학에 활용되고 있다.

이에 대한 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 대상 지역에서 발생하는 지반운동의 특성에 대한 적절한 연구가 필요하다. 이에 대한 대표적인 특성으로는 지진원 효과 (Source effect), 경로 감쇠 효과 (Path attenuation effect), 부지 효과 (Site effect)가 있다 [4].

이를 평가하기 위한 방법으로서 Boore [5]은 기존 연구 [6-8]에서 제안된 ω^2 모델을 기본으로 한 추계학적 점지진원 모델 (Stochastic point-source model)을 사용하여 미국 서부 지역에서 관측된 지반운동의 특성을 평가하고 이를 모사한 바 있다. 이후 국내에서는 이러한 추계학적 점지진원 모델을 활용하여 이러한 특성을 정량적으로 평가해왔다 [9-16].

이러한 특성 중에서 지진원에서 발생한 지진파가 특정 지역에 전파되는 경로에 따른 지반 운동의 경로 감쇠 효과는 지반운동을 모사하는 데 있어서 매우 중요한 연구 주제이다 [4,5], [17-25].

경로 감쇠 효과는 기하학적 감쇠 효과 (Geometrical attenuation effect)

*Corresponding author: Han, Sang Whan

E-mail: swhan@hanyang.ac.kr

(Received August 14, 2019; Revised October 14, 2019; Accepted December 3, 2019)

Table 1. Information of the earthquake events catalogue from Korea Meteorological Administration (KMA)

Event	Type of earthquake event	Local-date Time	Longitude (East)	Latitude (North)	Focal Depth (km)	M_L
1	Foreshock of the 2016 Gyeongju earthquake	2016-09-12 19:44:32	129.19	35.77	19	5.1
2	Mainshock of the 2016 Gyeongju earthquake	2016-09-12 20:32:54	129.19	35.76	19	5.8
3	Aftershock of the 2016 Gyeongju earthquake	2016-09-12 20:34:22	129.19	35.78	12	3.6
4	Aftershock of the 2016 Gyeongju earthquake	2016-09-19 20:33:58	129.18	35.74	19	4.5
5	Aftershock of the 2016 Gyeongju earthquake	2016-09-21 11:53:54	129.18	35.75	18	3.5
6	Mainshock of the 2017 Pohang earthquake	2017-11-15 14:29:31	129.37	36.11	9	5.4
7	Aftershock of the 2017 Pohang earthquake	2017-11-15 14:32:59	129.36	36.10	8	3.6
8	Aftershock of the 2017 Pohang earthquake	2017-11-15 15:09:49	129.34	36.09	8	3.5
9	Aftershock of the 2017 Pohang earthquake	2017-11-15 16:49:30	129.36	36.12	10	4.3
10	Aftershock of the 2017 Pohang earthquake	2018-02-11 05:03:03	129.33	36.08	14	4.6

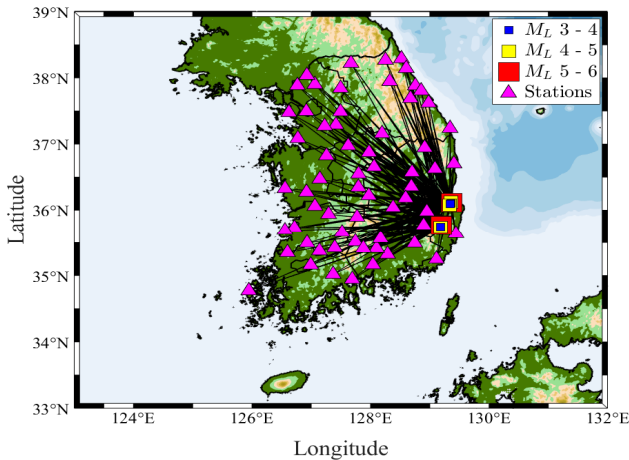


Fig. 1. The 2016 Gyeongju and 2017 Pohang earthquakes and recording stations with ray path lines (solid lines)

와 비탄성 감쇠 효과 (Inelastic attenuation effect)의 곱으로 고려된다. 또한, 이와 관련한 기존 연구 [15], [17], [21]에 따르면 두 효과는 상호 간에 영향을 주기 때문에 한반도 지역의 경로 감쇠 효과를 평가하기 위해서는 두 가지를 동시에 분석할 필요가 있다. Zandieh and Pezeshk [21]는 Atkinson and Mereu [17]가 제안한 절차에 따라 모멘트 규모 (M_W) 2.5에서 5.2 사이의 지반운동 기록과 추계학적 점지진원 모델을 사용하여 뉴 마드리드 지역의 경로 감쇠 효과를 평가하기 위해, 기하학적 감쇠 효과와 비탄성 감쇠 효과를 동시에 분석한 바 있다.

본 연구는 추계학적 점지진원 모델과 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진의 전진, 본진, 여진에 의한 지반 운동 기록을 사용하여 한반도에서 발생한 지진파의 경로 감쇠 효과를 평가하고자 한다.

이에 대한 정확성과 타당성을 검증하기 위해, 고려한 지반 운동 기록에 대한 최대 지반 가속도 (Peak ground acceleration, PGA)와 5% 감쇠비 적용된 유사 스펙트럼 가속도 (Pseudo spectral acceleration, PSA)를 추계학적 점지진원 모델을 사용하여 모사된 인공 지반 운동과 비교해보고자 한다. 여기서, 본 연구에서 고려된 지진에 대한 정보는 Table 1에 정리되었으며, 지진 관측소 및 지진의 발생 위치는 Fig. 1에 나타내었다.

2. 추계학적 점지진원 모델

본 연구에서 사용하는 추계학적 점지진원 모델은 관련 기존 연구 [6-8]에서 사용된 ω^2 모델을 기본으로 한 푸리에 진폭 스펙트럼 (Fourier amplitude spectrum, FAS) 모델로서 Hanks and McQuire [26]과 Boore [5]가 지반 운동의 특성을 분석하고 모사하기 위해 사용한 이래로 현재까지 널리 쓰이고 있다. 이 모델 [$A(f)$]은 앞서 언급한 지반 운동의 특성인 지진원 효과, 경로 감쇠 효과, 부지 효과를 고려하여 식 (1)과 같이 정리할 수 있다.

$$A(f) = Source(f) \times Path(R, f) \times Site(f) \quad (1)$$

여기서, $Source(f)$ 는 지진 진원의 매커니즘을 대표하는 지진원 효과 함수이다. $Path(R, f)$ 는 지진원과 대상 지역 사이의 지진파 전파 경로에 따른 감쇠를 대표하는 경로 감쇠 효과 함수이다. $Site(f)$ 는 대상 지역에서의 부지 증폭 및 감쇠를 대표하는 부지 효과 함수이다. f 는 주파수이다. R 은 진원거리이다. 모델의 매개변수에 대한 설명은 Table 2에 요약하였다. $Source(f)$ 는 주로 단일 모서리 주파수 (single-corner-frequency, SCF) 모델 또는 더블 모서리 주파수 (double-corner-frequency, DCF) 모델이 사용된다 [23]. 본 연구에서는 이러한 모델 대신에 각 지진 이벤트 별로 여러 관측소에서 평가한 지진원 효과 함수 값을 로그 영역에서 평균하여 사용하였다 [21]. 이 방법은 개별 관측소에서 발생하는 방위각 편향 (azimuthal bias)을 충분히 줄일 수 있기 때문에, 지진 이벤트 별로 지진원 효과 함수를 대표할 수 있다 [27]. $Path(f)$ 에서 $G(R)$ 는 진원 거리에 따른 지진파의 기하학적 경로 감쇠 효과를 나타내며, $\exp(-\pi f R / Q_p(f) \beta_s)$ 는 주파수 성분과 진원 거리에 따른 S파의 지각에서의 비탄성 경로 감쇠 효과 함수를 나타낸다. $Site(f)$ 에서 $Amp(f)$ 는 대상 지역에서의 부지 증폭 효과를 나타내며, 본 연구에서는 수평 및 수직 스펙트럼 비 (horizontal-to-vertical spectral ratio, HVSR) 기법을 활용하여 이를 평가하였다 [27-29]. Nakamura [28]에 의해 개발된 HVSR는 상시 미동에서의 푸리에 진폭 스펙트럼의 수평 성분과 수직 성분의 비를 활용하여 대상 지역에서의 부지 증폭 효과를 평가하는 방법이다. Atkinson and Cassidy [27]는 HVSR 기법이 대상 지역의 부지 증폭 효과를 합리적으로 근사할 수 있으며, 토질 정보 (soil profile)가 없을 때 유용하게 사용할 수 있음을 보인 바 있다. Zhao et al. [29]는 기존 HVSR 기법을 활용하였을 때 발생할 수 있는 급격한 특이 값과 분산을 줄이기 위하여 상시

미동의 푸리에 진폭 스펙트럼 대신 지반 운동의 5% 감쇠비 적용된 응답 스펙트럼의 수평 성분과 수직 성분의 비를 제안한 바 있다. 본 연구에서는 Zhao et al. [29]가 제안한 방법을 활용하여 부지 증폭 효과를 평가하였으며 식 (2)에 나타내었다.

$$AMP(f) = \frac{RS_H(f)}{RS_V(f)} \quad (2)$$

여기서, $RS_H(f)$ 는 지반 운동 기록에서의 5% 감쇠비 적용된 수평 성분 응답 스펙트럼의 기하 평균(geometric mean)이며, $RS_V(f)$ 는 지반 운동 기록에서의 5% 감쇠비 적용된 수직 성분 응답 스펙트럼이다. 여기서, $RS_H(f)$ 을

Table 2. Parameters for stochastic point-source model [$A(f)$]

Source(f), Source effect function	
Estimated values from $\overline{\log Source_i(f)}$ referred to Eq. (4)	
Path(R, f), Path attenuation effect function	
Equation	$Path(R, f) = G(R) \times \exp(-\pi f R / Q_S(f) \beta_S)$
Parameters	$G(R) = \begin{cases} R^{b_1} & (R \leq R_1) \\ R_1^{b_1} (R/R_1)^{b_2} & (R_1 < R \leq R_2) \\ R_1^{b_1} (R_2/R_1)^{b_2} (R/R_2)^{b_3} & (R > R_2) \end{cases}$: hinged-trilinear geometrical attenuation effect function $Q_S(f) = Q_0 f^\eta$: quality factor of Inelastic attenuation effect function for S-wave β_S : crustal shear wave velocity near earthquake source for S-wave (= 3.5 km/s) b_1, b_2, b_3, R_1, R_2 : coefficients of hinged-trilinear geometrical attenuation effect function Q_0, η : coefficients of quality factor for S-wave
Site(f), Site effect function	
Equation	$Site(f) = Amp(f) \times \exp(-\pi \kappa_0 f)$
Parameters	$Amp(f)$: site amplification function κ_0 : site kappa factor of site attenuation effect function

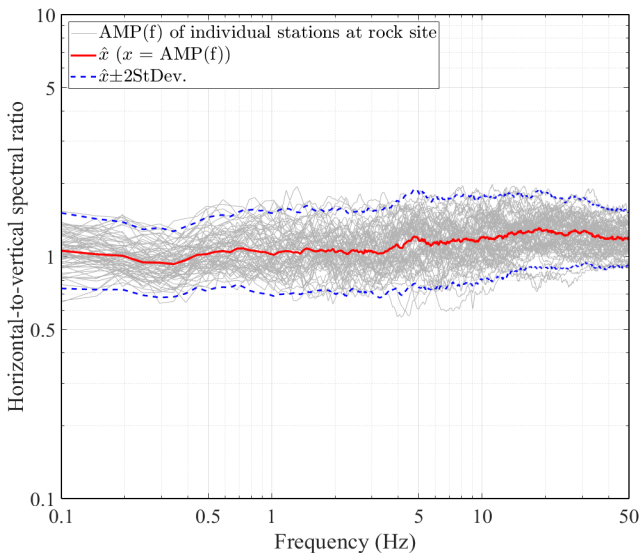


Fig. 2. Median and individual $AMP(f)$ from rock site stations

수평 성분의 기하 평균으로 사용할 경우 주파수 성분에서 부지 증폭의 영향이 없을 경우 1에 가까운 값을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 부지 증폭 효과의 영향을 줄이기 위해, $AMP(f)$ 가 1에 가깝게 측정된 관측소 (= rock site for site class B, NEHRP (BSSC, 2009))만을 선정하여 경로 감쇠 효과 평가에 활용하였으며 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2는 선정된 관측소에서의 부지 증폭 효과의 중간값(\hat{x})을 로그 영역에서의 표준 편차(StDev.)와 함께 나타낸 것이다. 각 관측소별 $AMP(f)$ 는 일부 주파수 성분에서 약간의 증폭 또는 감폭 값을 가지고 있으나 대부분의 주파수 성분에서 1에 가까운 값을 보이고 있다. 그러므로 본 연구에서 경로 감쇠 효과를 평가할 때 $AMP(f)$ 값은 전 주파수 영역에서 1로 가정하였다. $\exp(-\pi \kappa_0 f)$ 는 대상 지역에서의 부지 감쇠 효과를 나타내며 이 값은 유효한 주파수 범위에서 경로 효과와 부지 증폭 효과를 제거한 추계학적 점지진원 모델의 잔여 기울기에서 평가할 수 있다 [30, 31]. 본 연구에서 사용된 기하 평균 적용된 수평 성분의 스펙트럼은 부지 증폭 효과 ($AMP(f) \approx 1$)의 영향이 적고, 수평 성분의 스펙트럼의 형상과 매우 유사하기 때문에 평가될 경로 감쇠 효과는 수평 성분과 수직 성분의 지반 운동 모두에 적용 가능하다 [21].

3. 한반도 경로 감쇠 효과 평가

3.1 지반 운동 기록

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 2016년 경주 지진과 2017년 포항 지진의 진진, 본진, 여진 (10개의 지진 이벤트)에 대해 73 개의 한반도 지역 관측소에서 관측한 584 세트의 지반운동 기록 (3 x 584: 동서 방향 수평 성분, 남북 방향 수평 성분, 수직 성분)을 사용하였다. Fig. 3은 각 지반운동에 대한 지진 지역 규모 (M_L)와 진원 거리 (R) 정보를 나타내고 있다. 이 때, 진원 거리는 10 km에서 350 km까지 다양하게 분포하고 있다.

본 연구에서 기록은 한반도 내륙에 위치한 관측소를 대상으로 신호 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR) 값이 10 이상을 선정하여 사용하였다. 또

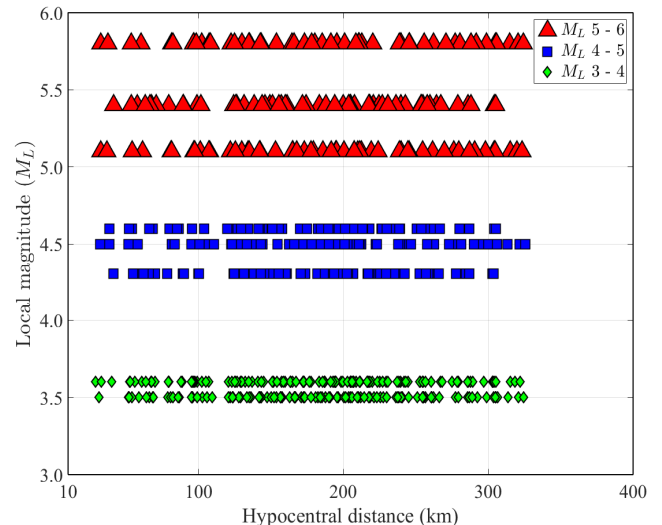


Fig. 3. Earthquake local magnitude and hypocentral distance of recording stations at rock site used in this study

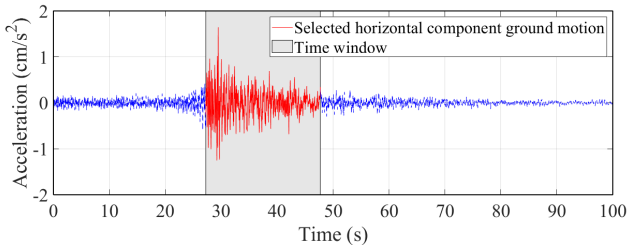


Fig. 4. An example of selected Horizontal component of ground motion acceleration obtained from the 2017 Pohang earthquake (M_L 5.4) recorded at Yesan (YSAB) station

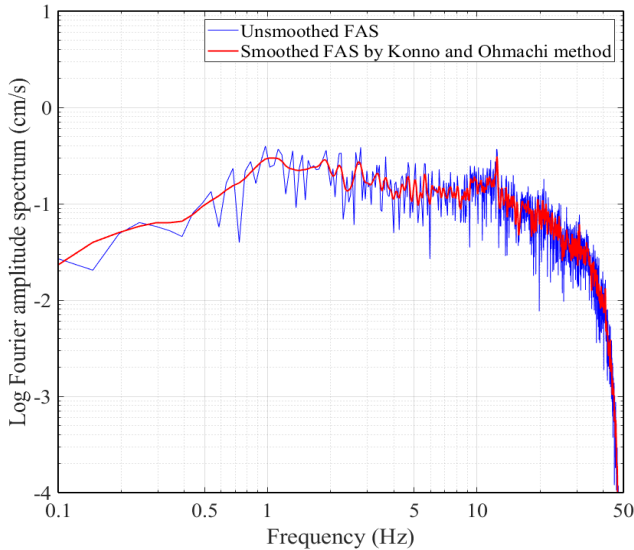


Fig. 5. An example of original and smoothed Fourier amplitude spectrum obtained from the 2016 Gyeonju earthquake (M_L 5.8) recorded at Daegwanryeong (DGY2) station.

한 기록은 초당 100 샘플을 가진 지반 운동 가속도 기록으로서, 40 Hz 이상에서 저역통과 안티 앨리어싱 필터 (anti-aliasing filter)가 적용되어 있다. 그리고 Papazafeiropoulos and Plevris [32]가 개발한 알고리즘을 활용하여, 선형 보정 (baseline correction)을 수행하였다. 그리고 관련 기존 연구 [33-36]에서는 S파의 주 에너지가 15초와 20초 사이의 시간창 내에 속해있음을 확인한 바 있으며 본 연구에서 사용한 지진파 자료 역시 이에 부합하였기 때문에 시간창은 S파가 도달한 시점에서 20.48초로서 모든 지진파에 적용하여 사용하였다. 그리고 기록의 불연속성에 의한 영향을 줄이기 위하여 10% 코사인 테이퍼 기법을 적용하였다. Fig. 4는 Event 6를 YSAB 관측소에서 기록한 단일 수평 성분의 지반 운동 및 시간창을 예시로서 함께 나타낸 것이다. 그리고 주파수 영역에서 경로 감쇠 효과 함수 평가를 안정적으로 수행하기 위해 수평 성분의 지반 운동에서 얻어진 푸리에 진폭 스펙트럼에 대하여 Konno and Ohmachi [37]가 제안한 알고리즘을 사용하여 평활화 기법을 수행한 뒤 기하 평균을 적용하였다. Fig. 5는 Event 2를 DGY2 관측소에서 기록한 수평 성분의 지반 운동에서 얻어진 푸리에 진폭 스펙트럼의 기하 평균을 평활화 기법을 수행한 것과 함께 나타낸 것이다. 본 연구에서는 관측소별-지진이벤트별 지반 운동 가속도 기록에 이와 같은 방법을 모두 적용하여 경로 감쇠 효과를 평가하였다.

3.2 경로 감쇠 효과 평가

한반도의 경로 감쇠 효과를 평가하기 위해 기존 연구들은 국내 관측된 지반 운동과 추계학적 점진진원 모델을 활용하였다 [9-16]. 이 중에서 일부 연구 [9-13]는 주파수와 무관한 $Q_s(f)$ 을 계산하였으며, 다른 연구 [14-16]는 주파수에 따른 $Q_s(f)$ 을 계산하여 비탄성 감쇠 효과를 평가한 바 있다.

그러나 Kim et al. [14]을 제외하면, 기존 연구들은 모두 거리에 따른 기하학적 경로 효과를 고정하여 계산하였다. 앞서 언급했던 바와 같이, 경로 감쇠 효과를 평가할 때 기하학적 감쇠 효과와 비탄성 감쇠 효과는 상호 간에 영향을 주기 때문에 동시에 분석될 필요가 있다 [15], [17], [21].

Atkinson and Mereu [17]는 캐나다 서부 지역에 대해 진원거리 70 km 이내에서 $R^{-1.1}$, 70 km에서 130 km 사이에서는 $70^{-1.1}(R/70)^0$ 를, 130 km 이상에선 표면파의 영향을 고려하여 $70^{-1.1}(130/70)^0(R/130)^{-0.5}$ 를 기하학적 감쇠 효과 함수로 평가하였다. 그리고 이에 대응하는 $Q_s(f) = 670f^{0.33}$ 을 얻었다. Atkinson and Boore [18]는 70 km 이내에서 $R^{-1.0}$ 로 기하학적 감쇠 효과 함수를 수정하여, 이에 대응하는 $Q_s(f) = 680f^{0.36}$ 을 얻었다. Atkinson [38]는 캐나다의 서부 지역과 미국 동북부 지역에 대해 진원거리 70 km 이내에서 $R^{-1.3}$, 70 km에서 140 km 사이에서는 $70^{-1.3}(R/70)^{0.2}$ 를, 140 km 이상에선 $70^{-1.3}(140/70)^{0.2}(R/140)^{-0.5}$ 를 기하학적 감쇠 효과 함수로 평가하였다. 그리고 이에 대응하는 $Q_s(f) = 893f^{0.32}$ 을 얻었다. Zandieh and Pezeshk [21]는 뉴 마드리드 지역에 대해 진원거리 70 km 이내에서 $R^{-1.0}$, 70 km에서 140 km 사이에서는 $70^{-1.0}(R/70)^{0.25}$ 를, 140 km 이상에선 $70^{-1.0}(140/70)^{0.25}(R/140)^{-0.5}$ 를 기하학적 감쇠 효과 함수로 사용하였다. 이에 대응하는 비탄성 감쇠 효과 함수의 Q 값은 $Q_s(f) = 614f^{0.32}$ 을 얻었다.

그리고 대부분의 연구 결과 [4, 5], [9-21], [24, 25]는 가까운 진원거리에서는 $R^{-1.0}$ 에서 $R^{-1.3}$, 먼 거리의 진원거리에서는 표면파의 영향에 의해 $R^{-0.5}$ 를 기하학적 감쇠 효과 함수에 반영하여 사용하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 기하학적 효과 함수 매개변수에 대한 조합 중 b_1 는 -1.0에서 -1.3사이로 0.1 간격으로 고려하였으며, b_3 은 -0.5로 고정하였다. 나머지 매개변수 조합 (b_2, R_1, R_2)은 Zandieh and Pezeshk [21]가 제안한 범위를 활용하였다. 그리고 경로 감쇠 효과를 평가하기 위해 우선 식 (1)의 추계학적 점진진원 모델 중 $Path_{ij}(R, f)$ 와 $Site(f)$ 을 이항하고 수식에 로그를 적용하여 식 (3)으로 재정리하였다. 여기서, $Site(f)$ 중 부지증폭효과는 본 연구의 절차상 무시할 수 있다는 가정 하에 부지 감쇠효과 [$\exp(-\pi\kappa_0 f)$]만 고려되었다.

$$\begin{aligned} \log Source_{ij}(f) &= \log A_{ij}(f) - \log Path_{ij}(R, f) - \log \exp(-\pi\kappa_0 f) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $Source_{ij}(f)$ 는 지진 이벤트 i 와 지진 관측소 j 에서 평가된 지진원 효과 함수이다. $A_{ij}(f)$ 는 식 (1)에서 추계학적 점진진원 모델 [$A(f)$]에 대응되는 항으로서 본 연구에서는 각 관측소 및 지진 이벤트에서 기록된 지반 운동 가속도의 푸리에 진폭 스펙트럼 값이다. 여기서, 지진 이벤트 i 와 지진 관측소 j 에서 관측된 수평 성분 지반 운동 가속도의 푸리에 진폭 응답 스펙트럼을 기하 평균한 값이다. $Path_{ij}(R, f)$ 는 지진 이벤트 i 와 지진 관측소 j

에서 평가된 경로 감쇠 효과 값이다. 이 때, $AMP(f)$ 는 전 주파수에서 1로 가정하여 제외하였다.

본 연구는 Zandieh and Pezeshk [21]가 제안한 방식을 채택하여, 목표 함수 ($Obj(f)$)가 최소값을 갖는 경로 감쇠 효과의 매개변수 조합 ($b_1, b_2, b_3, R_1, R_2, Q_S(f)$)을 전역 그리드 탐색법 (global grid search)을 사용하여 평가하였으며, 이는 식 (4)에 나타내었다.

$$Obj(f) = \frac{1}{M} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left| \log Source_{ij}(f) - \overline{\log Source_{ij}(f)} \right| \quad (4)$$

여기서, N 은 관측소의 개수를 의미한다. M 은 지진 이벤트의 개수를 의미한다. $\overline{\log Source_{ij}(f)}$ 는 지진 이벤트 i 에 대한 $\log Source_{ij}(f)$ 의 평균값이다. 식 (4)를 이용하여 목표 함수를 평가할 때, $\exp(-\pi\kappa_0 f)$ 는 암반 지역에서 동일한 대표 값을 가진다고 가정하여 경로 감쇠 효과 함수 평가에서 제외하였다 [31]. 경로 감쇠 효과를 평가하기 위한 절차는 다음과 같다. 식 (3)의 $Path_{ij}(R, f)$ 대신 지진 이벤트 i 와 지진 관측소 j 에 대응하는 R_{ij} 과 함께 전역 그리드 탐색법에 의해 매회 새롭게 변경되는 매개변수 조합 ($b_1, b_2, b_3, R_1, R_2, Q_S(f)$)에 의한 수식 $Path(R_{ij}, f) = G(R_{ij}) \times \exp(-\pi f R_{ij} / Q_S(f) \beta_S)$ 을 반영하여 식 (3)을 결정한다. 그리고 식 (4)를 활용하여 최적화된 식 (3)을 결정하여 이에 적합한 경로 감쇠 효과 (Proposed path effect)를 결정한다. 평가 결과 본 연구에서는 기하학적 감쇠 효과 함수의 매개변수 조합 (b_1, b_2, b_3, R_1, R_2)에 대하여 -1.3, 0.4, -0.5, 70 km, 100 km를 평가값으로 산출하였다. 그리고 평가된 각 주파수 성분 별 $Q_S(f)$ 를 Fig. 6에 나타내었다. 비탄성 감쇠 효과 함수는 1 Hz 이상의 고주파수 영역에서 추계학적 점진원 모델에 주로 영향을 주기 때문에, 본 연구에서는 1 Hz 이상의 고주파수에 대응하는 $Q_S(f)$ 을 회귀 분석 방법을 수행하였다. 이에 대한 추정 값으로 $Q_S(f) = 366f^{0.48}$ 을 산출하였다.

Fig. 7은 각 주파수 성분별로 평가된 각 관측소 별 경로 감쇠 효과 (Estimated path effect)와 이에 대응하는 경로 감쇠 효과 함수 (Proposed path effect)를 주파수 값 1, 2, 5, 10 Hz에서 함께 나타낸 것이다. 이 그림에서는 또한 평가된 각 관측소별 경로 감쇠 효과에 대하여 로그 영역에서 잔차 (residuals) 및 제곱평균제곱근 (Root mean square, RMS)을 함께 계산하였는데, 평균 잔차가 0에 가깝게 나타났으므로 본 연구에서 최적화 해석을 통해 평가한 경로 감쇠 효과는 적절한 것으로 판단된다.

한편, 본 연구 결과에서 얻은 경로 감쇠 효과 함수와 기존 국내 연구 결과 [9-16]와 함께 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 제안된 경로 감쇠 효과는 대부분의 기존 국내 연구에 비해 상대적으로 작은 반면에 Jeong and Lee [16]의 연구와 가까운 진원 거리에서 다소 유사한 것을 확인할 수 있는데 이는

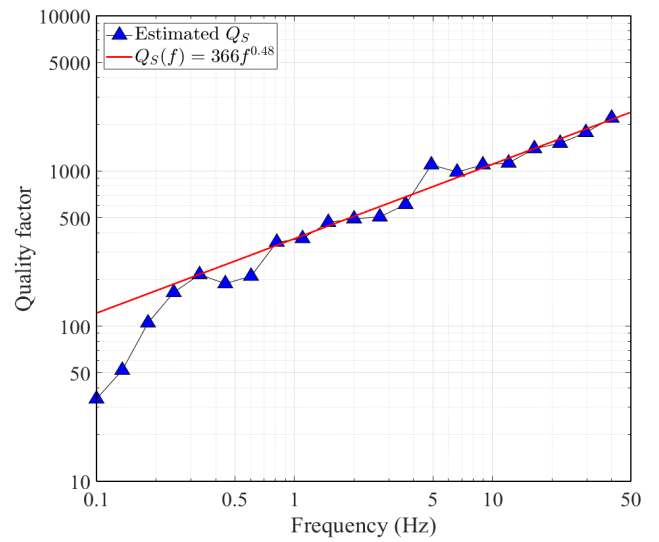


Fig. 6. Estimated and fitted for Inelastic attenuation effect function

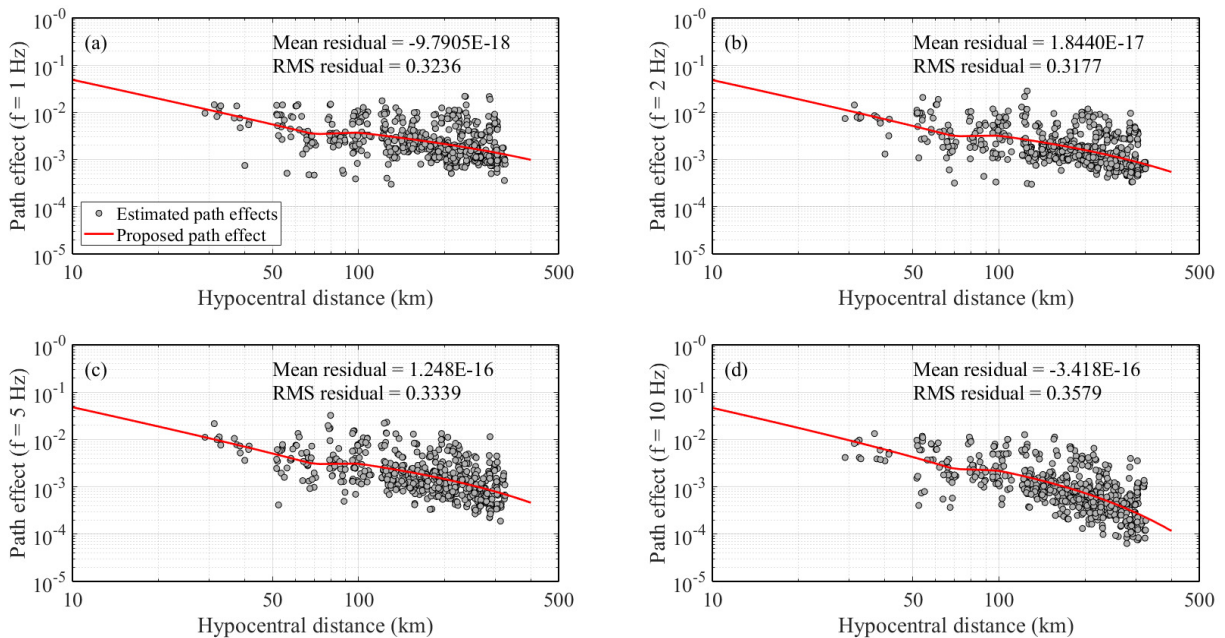


Fig. 7. Estimated path effects from each observed ground motion recording and proposed path effect: (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 5 Hz, (d) 10 Hz

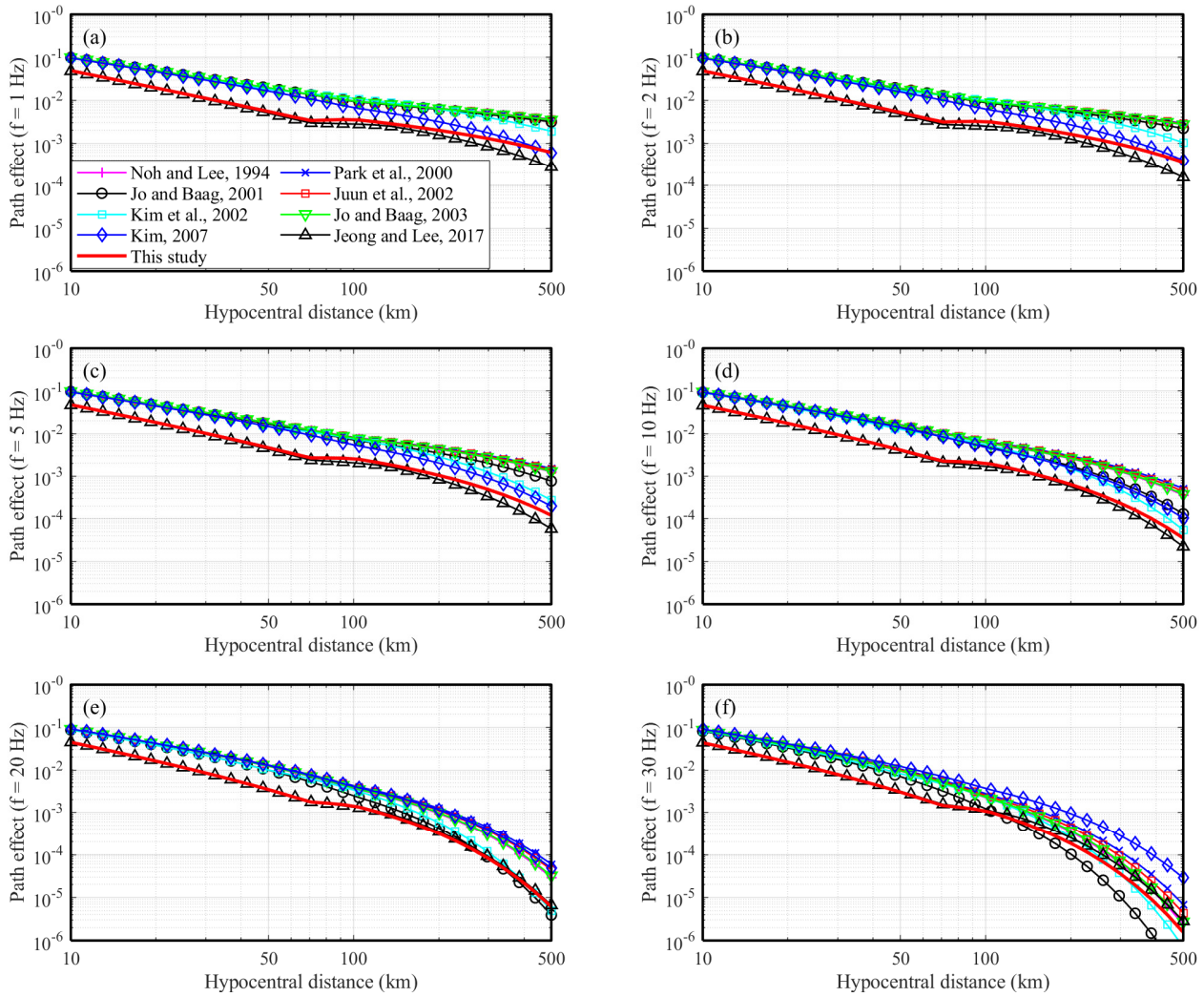


Fig. 8. Comparison between previous and proposed the path effects: (a) 1 Hz, (b) 2 Hz, (c) 5 Hz, (d) 10 Hz, (e) 20 Hz, (f) 30 Hz

Jeong and Lee [16]가 비탄성 감쇠 효과를 평가하기 위해 사용한 기하학적 감쇠 효과는 본 연구에서 평가된 기하학적 감쇠 효과와 다소 유사하며, 따라서 결과적으로 평가된 경로 감쇠 효과 또한 유사한 값을 갖기 때문인 것으로 판단된다. 이 때, Jeong and Lee [16]은 Atkinson [38]가 캐나다 서부 지역과 미국 동북부 지역에서 평가한 기하학적 감쇠 효과를 사용하였다. 이로 미루어 볼 때, 한반도 지역은 이들 지역과 가까운 진원 거리에서는 유사한 지진 감쇠 특성을 가지고 있을 것으로 판단된다.

3.3 경로 감쇠 효과 검증

본 연구에서 제안된 경로 감쇠 효과 함수를 검증하기 위하여 수평 성분의 지반 운동 기록에 대한 최대 지반 가속도 (Peak ground acceleration, PGA)와 5% 감쇠비 적용된 유사스펙트럼 가속도 (Pseudo spectral acceleration, PSA)의 기하 평균을 추계학적 점지진원 모델을 사용하여 모사된 인공 지반 운동과 비교해보고자 한다. 이 때, 인공 지반운동은 Boore [4]가 소개한 절차에 따라서 추계학적 점지진원 모델과 형태창 모델이 적용된 백색 잡음을 활용하여 모사하였다. 이 때, Saragoni and Hart [39]에 의해 제시된 형태창을 적용하였다. 여기서 점지진원 모델에는 3.2절에서 계산된

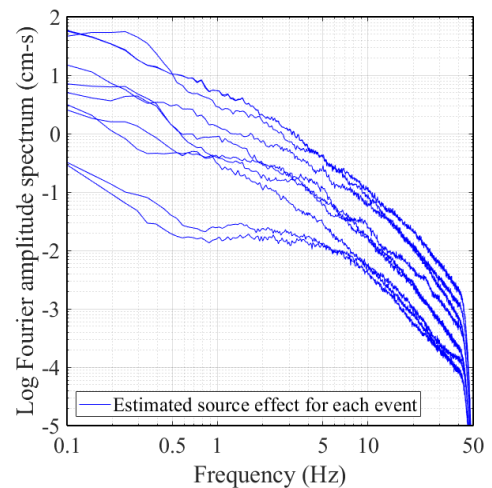


Fig. 9. Estimated source effect function used in this study

지진원 효과 함수를 사용하였는데, 이는 특정 지진 이벤트별로 사용하였을 시 ω^2 모델에 비해서 지진학적 특성을 더욱 정확하게 반영할 수 있다 (Fig. 9). 그리고 지반 운동의 지속시간 (T_d)은 정규화된 Arias Intensity Energy

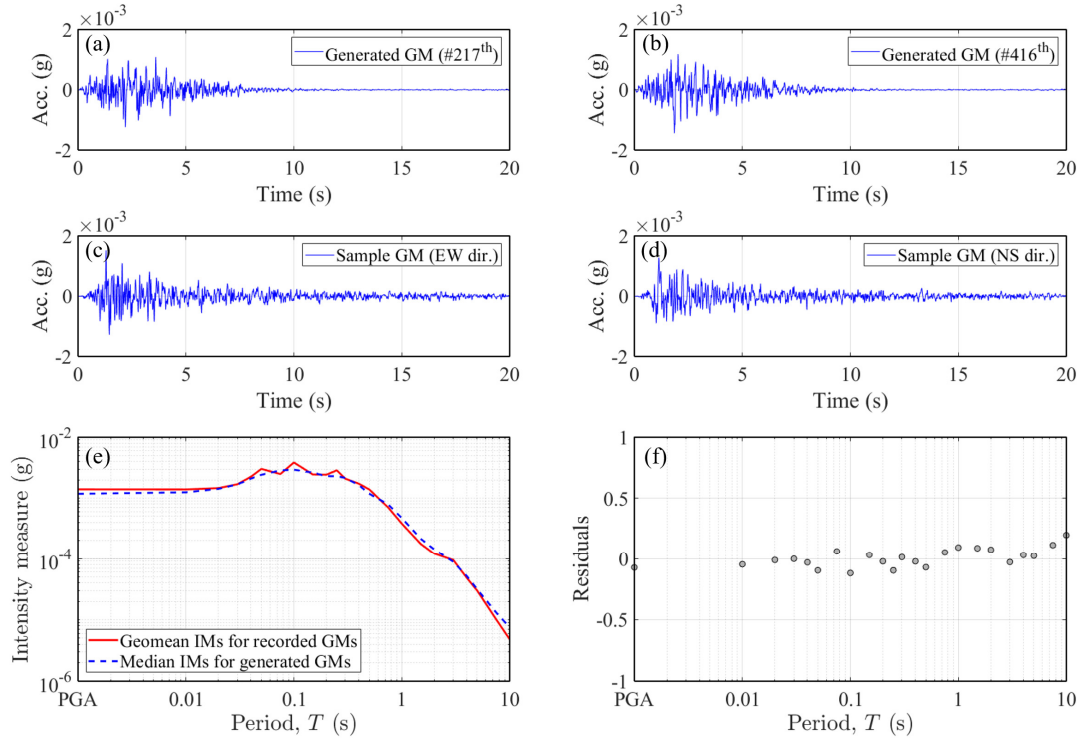


Fig. 10. Path attenuation effect verification procedure to compare generated and recorded ground motion for sample station and earthquake event: (a-b) generated ground motions (c-d) recorded horizontal component ground motions (e) Intensity measure (f) residuals at each period

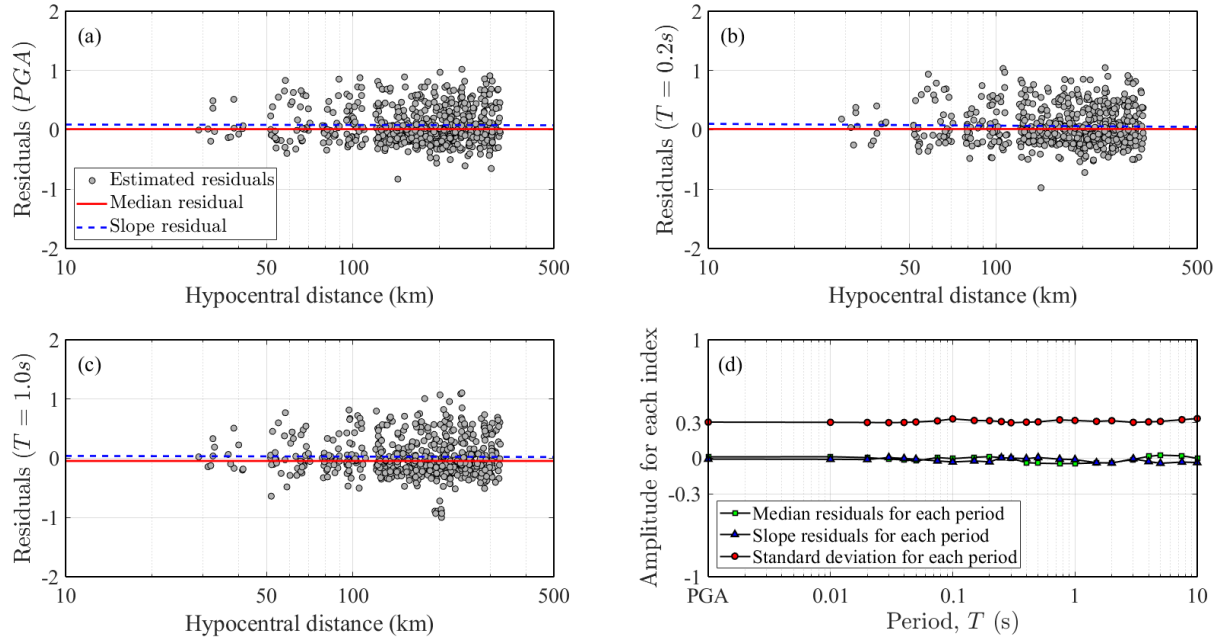


Fig. 11. Estimated residuals with mean, slope, and standard deviation: (a) PGA, (b) T=0.2s, (c) T=1.0s, (d) Total

[$E(t)$] 통해 계산된 에너지의 5% 도달 시점과 95% 도달 시점 사이의 간격으로 정의하였으며, 식 (5)에 나타냈다.

$$E(t) = \frac{\int_0^t Acc^2(t) dt}{\int_0^{20.48s} Acc^2(t) dt} \quad (5)$$

여기서, $Acc(t)$ 는 각 관측소별 관측된 지반 운동 가속도 기록이다.

지진 이벤트별 관측소별로 PGA와 PSA와 같은 지진 강도 (Intensity measure, IM) 수준을 비교하기 위해서, 모사된 인공 지반운동은 수치 해석 프로그램에서 발생한 불필요한 분산을 충분히 제거하기 위해서 1000회씩 모사한 뒤 중간 값을 취하여 대표 지진 강도를 결정하였으며 실제 지반운동은 두 수평 방향 지반운동의 지진 강도의 기하평균을 취하여 이를 결정하였

다. Fig. 10은 임의의 지진 이벤트와 관측소에서 경로 감쇠 효과 검증에 위한 중간 과정을 설명하는 그림이다. Fig. 10(a-b)는 모사한 임의의 지반운동(217번째, 416번째)을 나타낸 것이며, Fig. 10(c-d)는 두수평 방향의 실제 지반운동을 나타낸 것이다. Fig. 10(e)에서 결정된 각 지진 강도를 비교하여 나타내었으며, 이에 대한 편차들(residuals)은 상용로그 영역에서의 차이를 비교하는 것으로 Fig. 10(f)에 나타냈다. 이를 본 연구에서 사용한 모든 지진 이벤트 및 관측소로 확장하면 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 11(a-c)는 수평 성분의 지반 운동 기록과 인공 지반 운동을 현행 내진 설계 기준(KDS 41 17 00; ASCE 7-16)에서 일반적으로 고려하고 있는 PGA와 주기 0.2초, 1.0초에 대한 PSA에서 비교한 것을 편차의 중간 값 및 기울기와 함께 나타낸 것이다. 여기서, 편차의 기울기(slope residual)는 진원거리별로 편차들(residuals)이 편향됨(biased)을 평가하는 지표 중 하나로서, 기울기가 0에 가까울수록 본 연구의 목적인 경로 효과가 적합하게 평가되었음을 확인할 수 있다. 이 그림에서 편차의 중간 값과 기울기는 0에 가깝게 평가되었다. Fig. 11(d)는 Fig. 11(a-c)에서 나타난 편차의 중간 값 및 기울기를 PGA와 주기 0.01초-10초에서 표준 편차와 함께 나타낸 것이다. 이 그림에서 각 중간 값 및 기울기는 0에 가깝게 평가되었고, 표준 편차 또한 일반적으로 고려되는 지반 운동의 상용로그에서의 표준 편차 값인 0.3에 가까운 일관성 있는 값을 보이고 있다. 여기서 경로 효과 함수에 대한 평가가 적절하지 못하여 진원거리에 따른 점차 편향이 발생할 경우, 앞서 설명한 편차의 중간 값, 기울기 값은 보다 0에서 떨어진 값이 측정될 것이고, 표준 편차 또한 본 연구에서 평가된 0.3보다 크게 평가될 것이다. 따라서 이로 미루어 볼 때, 본 연구에서 평가한 경로 감쇠 효과 함수는 적절한 것으로 판단 된다.

4. 결론

본 연구에서는 추계학적 점지진원 모델과 2016년 경주 지진, 2017년 포항 지진에 대한 지반 운동을 사용하여 한반도에 대한 지반 운동의 특성 중 경로 감쇠 효과를 평가 및 검증하였으며 결과는 다음과 같다.

- 1) 추계학적 점지진원 모델과 지반 운동 기록을 사용하여, 경로 감쇠 효과 함수를 구성하고 있는 기하학적 감쇠 효과 함수와 비탄성 감쇠 효과 함수에 대한 매개변수 조합을 본 연구에서 사용한 목표 함수(Obj(f))가 최솟값을 가지도록 전역 그리드 탐색법을 사용하여 동시에 평가하였다.
- 2) 제안된 경로 감쇠 효과 함수를 검증하기 위해서 추계학적 점지진원 모델 중 경로 효과를 제외한 나머지 지진원 효과와 부지 효과는 지진 이벤트 별로 관측된 지반 운동 기록과 동일한 조건을 가지도록 모델에 반영하여 지반 운동을 모사하였다. 모사된 지반 운동과 관측된 지반 운동 기록에 대한 PGA와 PSA를 비교한 결과, 제안된 경로 감쇠 효과 함수는 타당한 것으로 나타났다.
- 3) 제안된 경로 효과 함수를 반영한 추계학적 점지진원 모델은 국내 지반 운동을 적절하게 재현할 수 있으며, 더 나아가 지반운동 예측식 및 확률론적 지진 재해도 해석과 같은 지진 공학 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2019년도 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원(19CTAP-C152179-01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. National Emergency Management Agency (NEMA). Active Fault Map and Seismic Hazard Map. National Emergency Management Agency. c2012.
2. Korea Meteorological Administration (KMA). Historical Earthquake Records in Korea. Korea Meteorological Administration. c2012.
3. Lee K, Yang WS. Historical Seismicity of Korea. Bulletin of the Seismological Society of America. 2006;96:846-855.
4. Boore DM. Prediction of Ground Motion Using the Stochastic Method. Pure and Applied Geophysics. 2003;160:635-676.
5. Boore DM. Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motion Based on Seismological Models of the Radiated Spectra. Bulletin of the Seismological Society of America. 1983;73:1865-1893.
6. Aki K. Scaling law of seismic spectrum. Journal of Geophysical Research. 1967;72:1217-1231.
7. Brune J. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves. Journal of Geophysical Research. 1970;75:4997-5009.
8. Brune J. Correction: Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves. Journal of Geophysical Research. 1971;76:5002.
9. Noh MH, Lee KH. Estimation of Peak Ground Motions in the Southeastern Part of the Korean Peninsula (I): Estimation of Spectral Parameters. Journal of the Geological Society of Korea. 1994;30:297-306.
10. Park DH, Lee JM, Kim SK. Attenuation and Source Parameters of Earthquakes in the Southeastern Part of the Korean Peninsula. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. 2000;4:99-105.
11. Jo ND, Baag CE. Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southern Korea. Journal of Earthquake Engineering Society of Korea. 2001;5:17-26.
12. Jo ND, Baag CE. Estimation of Spectrum Decay Parameter α and Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southeastern Korea. Journal of Earthquake Engineering Society of Korea. 2003;7:59-70.
13. Juun JG, Jo ND, Baag CE. Stochastic Prediction of Ground Motions in Southern Korea. Geosciences Journal. 2002;6:203-214.
14. Kim SK, Kim SK, Chi HC. Attenuation of Peak Spectral Amplitude of Acceleration in the Southern Part of the Korean Peninsula. Journal of the Geological Society of Korea. 2002;38:237-250.
15. Kim SK. Seismic Wave Attenuation in the Southern Korean Peninsula: Comparison by the Applied Method and used Data. Journal of the Geological Society of Korea. 2007;43:207-217.
16. Jeong GH, Lee HS. An Earthquake Ground Motion Model (GMM) for Korean Peninsula. The 2017 World Congress on Advances in Struc-

- tural Engineering and Mechanics (ASEM17), Ilsan, Korea, c2017.
17. Atkinson GM, Mereu RF. The Shape of Ground Motion Attenuation Curves in Southeastern Canada. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992;82:2014–2031.
 18. Atkinson GM, Boore DM. New Ground Motion Relations for Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995;85:17–30.
 19. Atkinson GM, Boore DM. Evaluation of Models for Earthquake Source Spectra in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998;88:917–934.
 20. Atkinson GM, Boore DM. Ground Motion Prediction Equations for Earthquakes in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006;96:2181–2205.
 21. Zandieh A, Pezeshk S. Investigation of Geometrical Spreading and Quality Factor Functions in the New Madrid Seismic Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010;100:2185–2195.
 22. Rietbrock A, Strasser F, Edwards B. A Stochastic Earthquake Ground-Motion Prediction Model for the United Kingdom. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013;103:57–77.
 23. Boore DM, Alessandro CD, Abrahamson NA. A Generalization of the Double-Corner-Frequency Source Spectral Model and Its Use in the SCEC BBP Validation Exercise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014;104:2387–2398.
 24. Drouet S, Cotton F. Regional Stochastic GMPEs in Low-Seismicity Areas: Scaling and Aleatory Variability Analysis—Application to the French Alps. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015;105:1883–1902.
 25. Pezeshk S, Zandieh A, Campbell KW, Tavakoli B. Ground-Motion Prediction Equations for Central and Eastern North America Using the Hybrid Empirical Method and NGA-West2 Empirical Ground-Motion Models. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018;108:2278–2304.
 26. Hanks T, McGurire R. The Character of High Frequency Strong Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981;71:2071–2095.
 27. Atkinson GM, Cassidy J. Integrated Use of Seismograph and Strong Motion Data to Determine Soil Amplification in the Fraser Delta: Results from the Duvall and Georgia Strait Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000;90:1028–1040.
 28. Nakamura Y. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research*, 1989;30:25–33.
 29. Zhao JX, Irikura K, Zhang J, Yoshimitsu F, Somerville PG, Asano A, Ohno Y, Ouchi T, Takahashi T, Ogawa H. An Empirical Site-Classification Method for Strong-Motion Stations in Japan Using H/V Response Spectral Ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006;96:914–925.
 30. 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;74:1969–1993.
 31. Hashash YMA, Kottke AR, Stewart JP, Campbell KW, Kim B, Moss C, Nikolaou S, Rathje EM, Silva WJ. Reference Rock Site Condition for Central and Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014;104:684–701.
 32. Papazafeiropoulos G, Plevris V. OpenSeismoMatlab: A New Open-source Software for Strong Ground Motion Data Processing. *Heliyon*, 2018;4:e00784.
 33. Chung TW, Yoshimoto K. Multiple Lapse Time Window Analysis using Focal Mechanism. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 2012;15(2):85–91.
 34. Chung TW, Rachman AN. Multiple Lapse Time Window Analysis of the Korean Peninsula Considering Focal Depth. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 2013;16(4):293–299.
 35. Ogiso M, Aoki S, Hishiba M. Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors. *Earth, Planets and Space*, 2016;68:83.
 36. Chimoto K, Yamanaka H. S-Wave velocity structure exploration of sedimentary layers using seismic interferometry on strong motion records. *Exploration Geophysics*, 2019;50(6):625–633.
 37. Konno K, Ohmachi T. Ground-motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998;88:228–241.
 38. Atkinson GM. Empirical Attenuation of Ground Motion Spectral Amplitudes in Southeastern Canada and the Northeastern United States. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004;94:1079–1095.
 39. Saragoni G, Hart G. Simulation of Artificial Earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1974;2:249–267.