

국내 지진파 크기의 공간적 상관 모델 개발

Spatial Variation Model of Ground Motion Intensity Measures in South Korea

류봉석¹⁾ · Kwak Dongyup²⁾ · 김지현^{3)*}

Ryu, Bongseok¹⁾ · Kwak, Dongyup²⁾ · Kim, Ji Hyeon^{3)*}

¹⁾한양대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, ²⁾한양대학교 에리카 건설환경공학과 부교수, ³⁾한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 선임연구원

¹⁾Ph.D. Candidate, Department of Civil, Environmental, and System Engineering, Hanyang University, ²⁾Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University ERICA, ³⁾Senior Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute

/ A B S T R A C T /

A seismic intensity map, which describes ground motion distribution due to an earthquake, is crucial for disaster evaluation after the event. The ShakeMap system, developed and disseminated by the USGS, is widely used to generate intensity maps in many countries. The system utilizes a semi-variogram model to interpolate the measured intensities at seismic stations spatially. However, the default semi-variogram model embedded in ShakeMap is based on data from high seismic regions, which may not be suitable for the Korean Peninsula, categorized as a low-to-moderate seismic region. To address this discrepancy, this study aims to develop the region-specific semi-variogram model using local records and a region-specific ground motion model (GMM). To achieve this, we followed these steps: 1) collected records from significant earthquake events in South Korea, 2) calculated residuals between the observed intensities and predictions by the GMM, and 3) created semi-variogram models using weighted least squares regression to better fit short separation distances for PGA, PGV, SA0.2, and SA1.0. We compared the developed semi-variogram models with conventional models embedded in ShakeMap. Validation tests showed that the region-specific semi-variogram model reduced the mean squared error of intensity predictions by approximately 3.5% compared to the conventional model.

Key words: Ground motion, Intensity measures, Spatial correlation, Semi-variogram

1. 서론

진도지도는 지진 크기를 나타내는 진도 분포 시각화에 사용된다. 지진 발생 후 이러한 진도지도의 신속한 작성은 긴급 구조 활동과 재난 대응에 필수적인 자료를 제공하고, 재난 후 피해 평가에도 중요한 역할을 한다. 현재 국내를 포함하여 전세계적으로 활발히 사용되는 대표적인 진도지도 생성 시스템은 미국 지질조사국(USGS)의 ShakeMap이다[1]. ShakeMap은 지진파 데이터를 실시간으로 수집하고 지반운동예측모델과 비교분석하여 지진 발생 지역의 진도 분포를 지도 형식으로 제공하며, 지진파의 공간적 변동성을 고려하여 임의의 지역에서의 진도를 생성한다[2].

지진파의 크기는 지진의 규모, 진원 깊이, 경로 특성, 부지 효과 등에 따라

복잡한 공간적 변동성을 보인다. 특히, 지역에 따라 지진파의 집중, 산란, 증폭 등의 원인으로 크기가 급격히 변화할 수 있다. 이러한 지진파의 공간적 변동성은 공간적 상관성 모델로 나타낼 수 있다. 캘리포니아, 일본, 대만 등 지진활동이 활발한 지역에서는 과거 지진 사례를 활용하여 많은 세미베리오그램(semi-variogram) 모델이 존재한다. 세미베리오그램은 두 지점 사이의 거리에 따른 지진파 크기의 상관성을 나타내며, 진도 분포 모델링에 활용된다. Jayaram and Baker는 미국과 대만의 총 7개 지진의 지진 데이터를 이용하여 세미베리오그램 모델을 개발하였으며[3], Loth and Baker는 미국, 대만, 일본, 멕시코 지역에서 발생한 8개의 지진에 대한 지진파를 수집하여 지진파 크기 간의 세미베리오그램 모델을 제시하였다[4]. Esposito and Iervolino는 유럽의 지진파 데이터를 바탕으로 지진파 상관성을 분석하고 해당 지역의 특성에 맞는 모델을 제안하였다[5]. 각 지역의 지진 및 지질 특성은 독립적이므로, 해당 지역에 적합한 공간적 상관성 모델 개발이 필요하나, 아직까지 국내 지진파를 활용한 세미베리오그램 모델은 연구가 미미하다.

현재 ShakeMap의 기본 패키지에는 공간적 상관성 모델로 Loth and

*Corresponding author: Kim, Ji Hyeon

E-mail: jhkim06@krii.re.kr

(Received November 20, 2024; Revised December 10, 2024; Accepted December 10, 2024)

Baker(LB13)를 사용한다[4]. 그러나 국내의 지진, 지질 및 지형 특성을 고려하였을 때 이러한 외국 모델이 국내 상황에 적합한지는 의문이다. 국내는 지진 발생 빈도가 낮고 규모가 작은 편이며, 지반 구조 또한 지진활동이 활발한 캘리포니아, 대만, 일본과 같은 지역과는 큰 차이를 보인다. 예를 들어, 국내에서는 경로 감쇠 효과가 상대적으로 적어 지진파가 더 멀리 전파되며, 토층의 깊이가 얕아 높은 주파수 대역에서 부지효과가 두드러진다[6, 7]. 따라서, 국내의 지질 및 지진 특성에 맞는 공간적 상관성 모델을 개발하는 것이 필요하다.

이번 연구에서는 국내에서 발생한 지진 데이터를 활용하여 국내 지진 환경에 적합한 세미베리오그램 모델을 개발하는 것을 목표로 한다. 연구목표 달성을 위해 1) 국내에서 기록된 지진 데이터를 수집하여 전처리를 수행하였고, 2) 지반운동예측모델과 비교하여 최대지반가속도(PGA)의 잔차를 계산한 후, 3) 잔차의 세미베리오그램 모델을 개발하였다. 추가적으로, 이번 연구에서 개발한 국내 세미베리오그램 모델을 기존의 국외 모델들과 비교하였으며, ShakeMap에 적용하여 진도지도도를 작성하였다. 기존 ShakeMap 결과와 새로운 세미베리오그램 모델을 활용한 결과를 비교하여 모델 차이에 따른 진도 분포의 영향을 비교하였으며, 새로운 모델을 활용함으로써 진도 분포 예측의 정확도가 개선되었음을 확인하였다. 이번 연구를 통해 지진파 크기 보간 정확도를 높여 보다 더욱 정밀한 진도지도도를 제공할 수 있을 것으로 기대되며, 더 나아가 지진 재해에 대한 빠르고 정확한 대응 체계 마련에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

2. 지진파 데이터 및 지반운동예측모델

2.1 지진파 데이터

이번 연구에서는 국내 지진 데이터 및 지반운동예측모델(Ground Motion Model, GMM)을 바탕으로 공간적 상관성 모델을 개발하였다. GMM은 지진의 규모, 진원거리, 부지 조건 등을 고려하여 특정 위치에서의 지진파 크기를 예측하는 모델을 나타낸다[8, 9]. 이를 위해, 먼저 국내에서 발생한 주요 지진들에 대해 국가지진종합정보시스템(NECIS)과 KIGAM Quake에서 예측데이터를 수집하였다[10, 11]. 2009년 이후 국내에서 발생한 규모 M_L 3.5에서 M_L 5.8 사이의 총 33개의 지진을 대상으로, 진원거리가 200 km 이내의 관측소에서 기록된 8,430개의 EW, NS 방향 속도 및 가속도 데이터를 수집하였다. Fig. 1은 이번 연구에서 사용된 주요 지진의 규모의 크기와 진원 위치를 나타내며, Table 1은 지진 이벤트에 대한 정보와 각 이벤트 별 수집된 관측소 수를 나타낸다. Fig. 2는 관측소별 토층평균전단파속도(VSSO)와기반암깊이(BRDP)에 따른 분포, 그리고 KDS 내진설계 일람[12]의 지반분류 경계를 나타낸다. 지진 데이터의 시간적 및 공간적 범위를 고려하여, 가능한 한 다양한 지반 조건과 진원거리를 포함한 데이터셋을 구성하였다.

NECIS와 KIGAM Quake로부터 수집된 지진 데이터는 미니시드 형태로, 분석에 활용할 수 있는 물리량으로의 변환이 필요하다. 이를 위해 다음과 같은 계기 보정 및 노이즈 제거 과정을 포함한 전처리를 수행하였다[13, 14].

- 1) 계기 보정: 각 관측소에 대해 NECIS와 KIGAM Quake에서 제공하는 기록계 및 센서 정보를 바탕으로 관측장비의 응답 특성을 제거하여

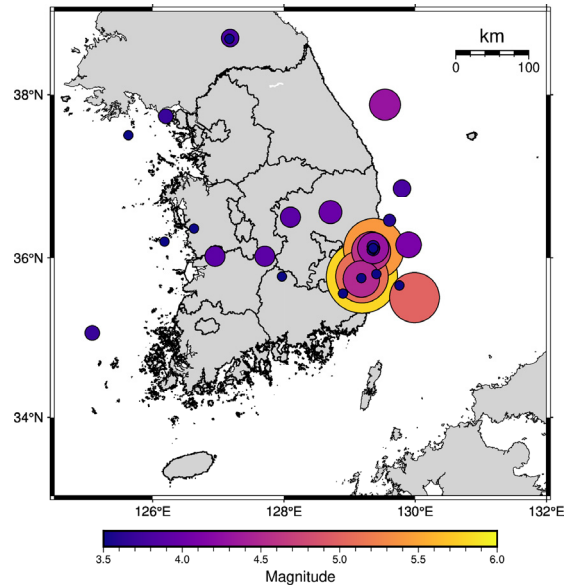


Fig. 1. Epicenters and magnitude for 33 earthquake events used for semi-variogram model development

Table 1. List of earthquake events and number of stations used for semi-variogram model development

Earthquake time (UTC)	Mag. (ML)	Epicenter		Number of stations
		Lat (°N)	Lon (°E)	
2009/05/01 22:58:28	4.0	36.56	128.71	69
2012/05/11 03:46:04	3.9	36.02	127.71	104
2013/02/05 12:25:36	3.5	35.77	127.97	93
2013/07/12 17:02:44	3.5	36.20	126.18	74
2013/10/11 07:06:25	3.6	36.46	129.61	61
2014/07/03 12:57:11	3.5	35.66	129.76	49
2014/09/23 06:27:58	3.5	35.80	129.41	70
2015/01/08 11:15:18	3.5	37.51	125.63	43
2015/12/21 19:31:24	3.9	36.02	126.95	99
2016/07/05 11:33:03	5.0	35.51	129.99	43
2016/09/12 10:44:32	5.1	35.77	129.19	100
2016/09/12 11:32:54	5.8	35.76	129.19	98
2016/09/19 11:33:58	4.5	35.74	129.18	98
2016/09/21 02:53:54	3.5	35.75	129.18	100
2016/11/13 12:52:57	3.5	36.36	126.63	118
2017/11/15 05:29:31	5.4	36.11	129.37	89
2017/11/15 05:32:59	3.6	36.10	129.36	88
2017/11/15 06:09:49	3.5	36.09	129.34	88
2017/11/15 07:49:30	4.3	36.12	129.36	89
2017/11/16 00:02:42	3.6	36.12	129.37	87
2017/11/19 14:45:47	3.5	36.12	129.36	89
2017/11/19 21:05:15	3.6	36.14	129.36	89
2017/12/25 07:19:22	3.5	36.11	129.36	94
2018/02/10 20:03:03	4.6	36.08	129.33	118
2019/02/10 03:53:38	4.1	36.16	129.90	91
2019/04/19 02:16:43	4.3	37.88	129.54	92
2019/04/21 20:45:19	3.8	36.86	129.80	126
2019/07/21 02:04:18	3.9	36.50	128.10	252
2019/09/21 06:11:16	3.5	38.67	127.17	80
2019/12/29 15:32:08	3.5	35.56	128.90	176
2020/05/11 10:45:06	3.8	38.68	127.18	84
2021/04/19 05:20:27	3.7	35.07	125.08	56
2023/01/08 16:28:15	3.7	37.74	126.20	99

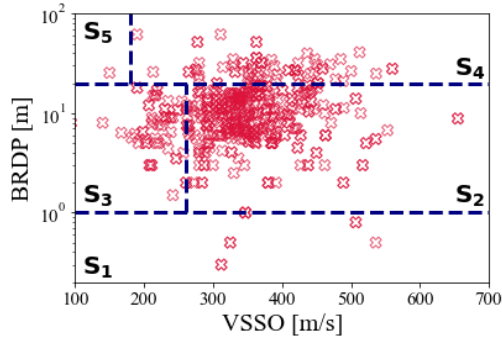


Fig. 2. Distribution of mean shear-wave velocity of soil layer (VSSO) and bedrock depth (BRDP) at seismic stations

계기 보정을 진행.

- 2) 노이즈 제거: 관측 데이터에는 다양한 형태의 잡음이 포함될 수 있으므로, 밴드패스 필터링을 통해 노이즈를 제거. 신호대잡음비(SNR)가 3이 되는 주파수를 확인하여 모서리주파수(f_c)로 선택하고, Butterworth 필터에 적용하여 유의미한 지진파를 추출[14-16].
- 3) 기본선 보정: 속도 및 가속도 시간이력을 수치 적분할 때 발생하는 영구변위를 제거하기 위해 변위 시간이력에서 기본선 보정을 진행.
- 4) RotD50 계산: 수평 방향 데이터의 계측 방향에 따라 계기진도 값이 달라지는 것을 고려하여, 수평2성분에 대해 각도별 값의 중위값인 RotD50을 계산[17].
- 5) 이상 지진파 분류: SNR 비교 시 계측기록에 잡음이 많은 경우나 기본선 보정 이후에도 영구변위가 남은 경우 이상 지진파로 분류.

Fig. 3(a)는 규모 5.4, 진원거리 11.6 km 지진파의 필터 전후 시간이력과 Fourier 스펙트럼(FAS) 차이를 보여주며, Fig. 3(b)는 규모 3.7, 진원거리 198.9 km 지진파의 필터 전후 시간이력과 FAS를 보여준다. 지진파의 크기가 큰 경우 노이즈의 영향이 적어 필터 전후의 지진파 개형에 큰 차이가 없지만, 지진파의 크기가 작은 경우 노이즈의 영향이 크기 때문에 유의미한 지진파의 성분을 추출하기 위해서는 노이즈 제거 과정이 필수적이다. 또한, Fig. 4는 기록 내 잡음이 상당부분 포함되어 있어 이상 지진파로 분류된 예시를 나타낸다. 이상 지진파는 필터 후에도 유의미한 지진파 성분을 추출하기 어려운 지진파로, 분석에서 제외하였다.

전체 데이터 4,215개 중 전처리 이후 이상 지진파로 분류된 379개를 제외한 나머지 3,836개를 모델 개발에 활용하였다. Fig. 5는 전처리 과정에서 이상 지진파가 분류된 결과를 바탕으로 RotD50 기준 수집된 지진파의 PGA와 진원거리(R_{hypo})와의 관계를 나타낸다. 전처리의 결과로 R_{hypo} 가 멀고 PGA가 작은 구간에 속하는 데이터가 주로 제외되었다.

2.2 지반운동예측모델

이번 연구에서는 국내 지진파 데이터의 특성을 반영한 GMM을 사용하였다. 사용된 GMM은 기반암에서의 지진파 크기를 예측하는 기반암 GMM과 부지효과모델로 나뉜다. 기반암 GMM은 연암 이상의 기반암에 존재하는 국내 가속도계 기록에 기반하여 개발된 모델을 사용하였으며[18], 부지효과모델은 국내 토층의 전단파속도 추상도를 활용한 지반응답해석결

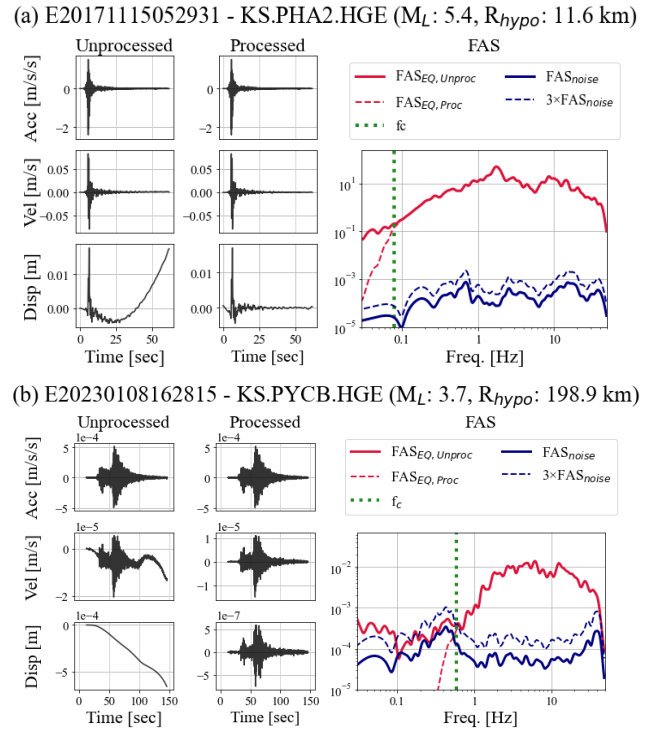


Fig. 3. Comparison of time-histories and Fourier amplitude spectra (FAS) before and after pre-processing for seismic records: (a) M_L 5.4, R_{hypo} 11.6 km, (b) M_L 3.7, R_{hypo} 198.9 km

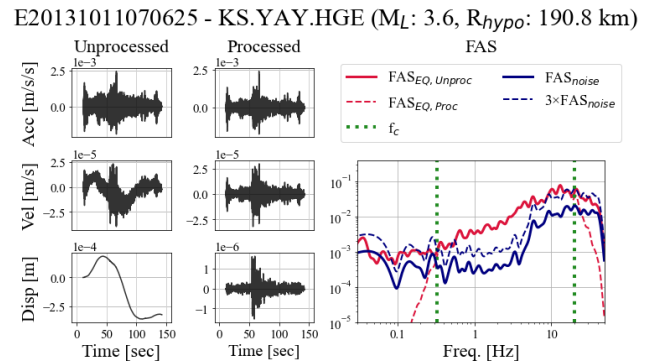


Fig. 4. Example of seismic records classified as abnormal data due to high noise levels

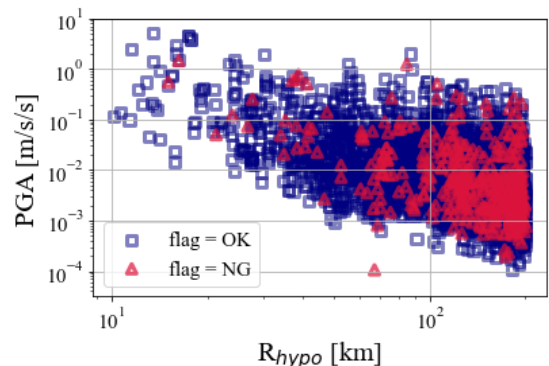


Fig. 5. Distribution of PGA versus hypocentral distances (R_{hypo}) for unfiltered (OK)/filtered (NG) data

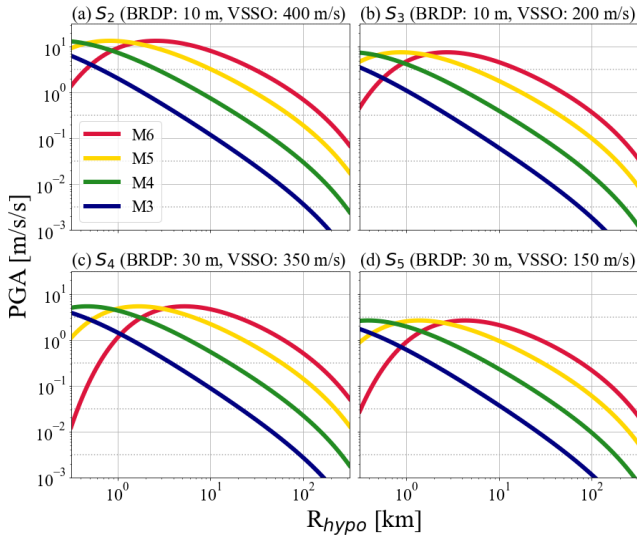


Fig. 6. PGA at the surface level versus hypocentral distance (R_{hypo}) based on GMM for magnitude 3, 4, 5, and 6 across site classes of (a) S_2 , (b) S_3 , (c) S_4 , and (d) S_5

과로부터 도출된 모델을 활용하였다[19]. 기반암 GMM의 입력 파라미터로는 규모와 진원거리, 부지효과모델로는 VSSO와 BRDP를 사용한다. GMM을 통해 각 지진에 대해 예상되는 지진파 크기를 계산하고, 이를 실제 관측된 지진파 데이터와 비교하여 잔차를 도출하였다. 잔차는 지진파 크기의 예측과 실제 관측 사이의 차이를 의미하며, 이러한 잔차의 공간적 분포를 분석함으로써 세미베리오그램 모델을 개발할 수 있다.

Fig. 6은 사용한 GMM의 PGA와 진원거리에 대한 관계를 보여준다. 국내 내진설계기준의 각 지반분류를 대표하는 지반조건을 BRDP와 VSSO로 설정하여 각각의 PGA- R_{hypo} 관계를 규모 3, 4, 5, 6에 따라 도시하였다. 규모가 크고 진원거리가 가까울수록 강한 에너지로 인한 비선형 감쇠가 발생하며, BRDP가 깊고, VSSO가 느린 지반분류 4(S_4)와 5(S_5)에서 두드러진다. 같은 규모와 거리 조건에서 BRDP가 얇고 VSSO가 빠른 지반분류 2(S_2)에서는 강한 지반 강성으로 인해 비선형 감쇠가 덜 나타나는 반면, BRDP가 깊고 VSSO가 느린 S_5 에서는 더 큰 감쇠가 발생한다. 이러한 경향은 사용한 GMM이 토층의 비선형성을 반영하는 것을 나타낸다.

3. 세미베리오그램 모델 개발

세미베리오그램(semi-variogram, $\gamma(h)$)은 두 지점 사이의 거리 h 에 따른 두 벡터 간의 반분산을 의미하며, 다음과 같이 계산할 수 있다[20].

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

여기서, $Z(x_i)$ 는 x_i 에 위치한 변수값, $Z(x_i + h)$ 는 x_i 에서 h 만큼 떨어진 위치에서의 변수값을 의미한다. 이러한 세미베리오그램을 통해 지진파 크기 간 공간적 상관성을 파악하여 진도지도 생성 시 필요한 공간적 보간을 진행할 수 있다.

세미베리오그램 모델은 세미베리오그램을 이격거리 h 에 대해 예측하는 모델로, 모델의 함수에 따라 구형모델, 지수모델, 가우시안 모델 등으로 표현될 수 있다[20, 21]. Loth and Baker은 두 개의 지수함수 식을 사용한 모델을 사용했으며, 그 함수는 다음과 같이 표현된다[4].

$$\gamma(h) = s_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{r_1}\right) \right) + s_2 \left(1 - \exp\left(-\frac{3h}{r_2}\right) \right) + nI_{h=0} \quad (2)$$

여기서, $I_{h=0}$ 은 h 가 0일 때 1이고 그 외 경우에 0인 지시함수이며, s_1, s_2, r_1, r_2, n 은 회귀계수를 의미한다. r_1 은 r_2 보다 작으며, 근거리에서의 세미베리오그램 분포에 대한 피팅을 위해 s_1 과 함께 사용되고, s_2 및 r_2 는 원거리에서의 세미베리오그램 분포 피팅에 사용된다. n 은 매우 가까운 거리에서 관측된 값 사이에 존재하는 불규칙성을 나타내기 위해 사용되며, Nugget이라 표현한다. $s_1 + s_2 + n$ 은 세미베리오그램이 거리 증가에 따라 상관성이 더 이상 증가하지 않는 최대 분산을 의미하며 Sill이라 표현한다. 위 식에서 상관성이 유의미하게 유지되는 최대 거리를 표현하는 Range는 r_2 이며, 이 거리를 초과하면 상관성이 거의 없다고 볼 수 있다.

이번 연구에서는 다음의 절차에 따라 국내 지진파의 세미베리오그램 모델을 개발하였다.

- 1) 2.1절의 예측된 지진파와 2.2절의 지반운동예측모델(GMM)을 활용하여 잔차(ϵ)를 계산한다.

$$\epsilon = \ln(Y) - \ln(\hat{Y}) \quad (3)$$

여기서, Y 는 예측 지진파의 크기(예: PGA, PGV)를 나타내며, \hat{Y} 는 GMM으로부터 추정된 크기를 나타낸다.

- 2) 각 지진의 지진기록에 대한 잔차의 평균($\bar{\epsilon}$)과 표준편차(σ)를 계산 후 정규화된 잔차(ϵ_n)를 계산한다.

$$\epsilon_n = \frac{\epsilon - \bar{\epsilon}}{\sigma} \quad (4)$$

- 3) 이격거리가 h 인 각 관측소 간의 정규화된 잔차의 SSD(squared semi-difference)를 계산한다.

$$SSD_i(h) = \frac{1}{2} [\epsilon(x_i) - \epsilon(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

- 4) h 를 0-200 km 구간에서 30개의 등간격 그룹으로 구분하고, 각 그룹에서의 SSD 평균을 계산하여 경험적 세미베리오그램을 계산한다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} SSD_i(h) \quad (6)$$

- 5) SSD의 평균에 대한 예측 모델을 식 (2)를 활용하여 회귀분석을 통해 회귀계수를 획득한다. 이때 이격거리 h 가 작은 근거리의 공간적 상관성에

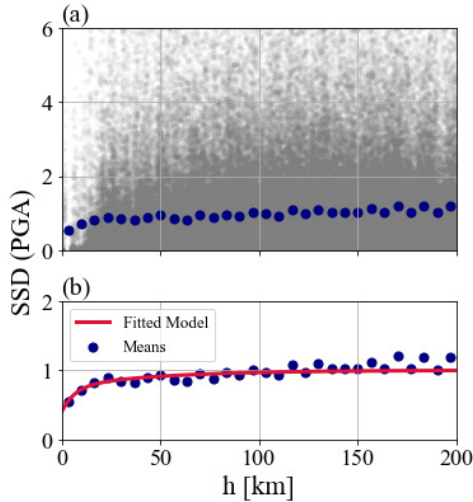


Fig. 7. (a) Distribution of squared semi-difference (SSD) and (b) semi-variogram with fitted model for PGA

Table 2. Coefficients of semi-variogram models for PGA, PGV, SA_{0.2}, and SA_{1.0}

IM	s ₁	s ₂	r ₁	r ₂	n
PGA	0.362	0.242	20	150	0.396
PGV	0.187	0.374	20	150	0.438
SA _{0.2}	0.379	0.322	20	150	0.299
SA _{1.0}	0.275	0.374	20	150	0.350

중점을 두기 위해, 각 그룹의 평균 h 의 역수를 가중치 ω 로 적용한 가중최소제곱법(weighted least square regression)을 활용하여 회귀분석을 수행한다.

Fig. 7(a)는 지진파의 PGA에 대해 모든 관측소 쌍의 이격거리 h 에 대한 SSD 분포를 보여주며, Fig. 7(b)는 SSD의 평균과 회귀분석으로부터 결정된 세미베리오그램 모델을 보여준다. Table 2는 PGA, PGV, SA_{0.2}, SA_{1.0}에 대해 위의 방법을 토대로 결정된 국내 지진파 데이터의 세미베리오그램 모델 회귀계수를 나타낸다.

4. 고찰

4.1 세미베리오그램 모델 비교

이번 연구에서 개발된 국내 세미베리오그램 모델과 Jayaram and Baker (2009) (JB09), Esposito and Iervolino (2011) (EI11), Loth and Baker (2013) (LB13)에서 제안한 국외 세미베리오그램 모델들과 비교 분석을 수행하였다. JB09의 모델은 미국과 대만의 지진 데이터를 기반으로 개발되었으며, VS30의 균집화 유무에 따라 2가지 세미베리오그램 모델을 제안한다. EI11은 유럽 지진 네트워크인 ESD와 이탈리아 지진 네트워크인 ITACA의 지진파 데이터를 바탕으로 PGA와 PGV에 대한 세미베리오그램 모델을 제안하였다. LB13은 미국, 대만, 일본, 멕시코 지역에서 발생한 지진 데이터

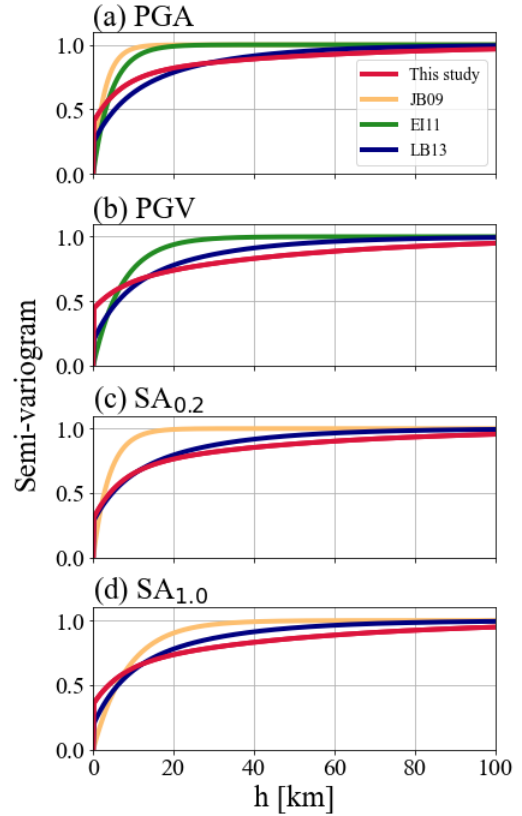


Fig. 8. Comparison of semi-variogram models between domestic and international models for (a) PGA, (b) PGV, (c) SA_{0.2}, and (d) SA_{1.0}

를 사용하여 개발되었으며, 각 응답스펙트럼과의 세미베리오그램 모델 또한 제시한다. 특히 ShakeMap에서는 LB13 활용 시 PGA는 0.01초 응답스펙트럼(SA_{0.01})으로, PGV는 1초 응답스펙트럼(SA_{1.0})으로 각각 근사하여 적용한다[1].

Fig. 8는 PGA, PGV, SA_{0.2}, SA_{1.0}에 대한 세미베리오그램 모델을 보여준다. PGA의 세미베리오그램 모델은 JB09, EI11, LB13의 모든 국외 모델에서 제시하고 있으나, PGV는 EI11, LB13에서만 제시되며, SA_{0.2}와 SA_{1.0}은 JB09, LB13만이 모델을 제시하고 있다. 이번 연구에서 개발한 국내 모델과 비교하였을 때, JB09와 EI11은 매우 짧은 거리에서 세미베리오그램이 Sill(상관성이 증가하지 않는 최대 분산)에 도달하는 것을 알 수 있다. LB13은 다른 두 모델에 비해 국내 모델과 유사하다. LB13은 JB09, EI11과 같은 특정 지역이 아닌 국외의 다양한 지역에서의 지진파를 기반으로 개발되었기 때문에 지진파의 평균적 공간적 상관성 모델을 나타내는 것으로 추정되며, 그에 따라 다른 두 모델에 비해 국내 모델과 유사하게 나타나는 것으로 판단된다. LB13과 국내 모델은 주기에 따라 10 - 30 km 범위에서 교차한다. 이는 교차지점보다 짧은 이격거리에서는 더 높은 공간적 상관성(낮은 세미베리오그램)을 나타내며, 그 이상의 거리에서는 더 낮은 공간적 상관성(높은 세미베리오그램)을 나타낸다. 따라서 국내 모델의 특징은 국외 모델에 비해 더 넓은 지역에서 공간적 상관성이 높게 유지된다. 이는 국외 모델이 개발된 활성단층 지역에 비해 판내부에 속하는 국내 암반은 그 특성의 불확실성이 작으며 감쇠효과가 적기 때문인 것으로 판단된다.

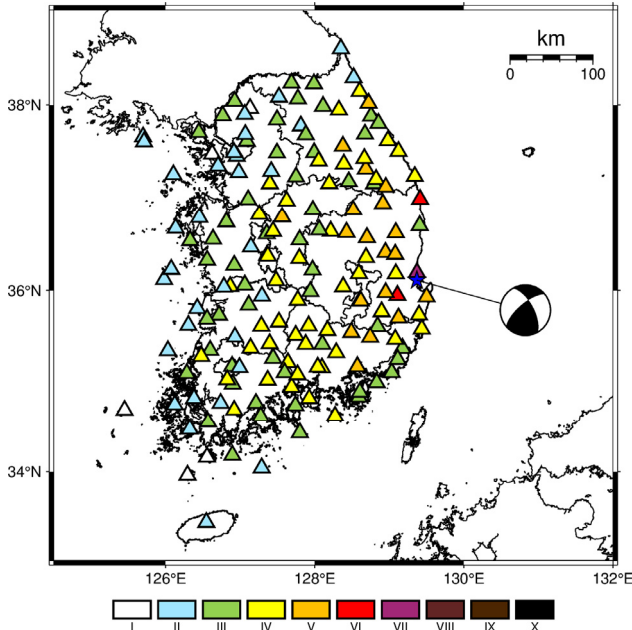


Fig. 9. Distribution of MMI values recorded at 164 seismic stations for 2017 M_L 5.4 Pohang earthquake

4.2 진도지도 비교

ShakeMap은 지진 발생 시 기기 관측 자료와 GMM을 바탕으로 진도 분포를 작성하는 시스템이다[22]. ShakeMap의 기본 적용사항은 LB13의 세미베리오그램 모델을 적용하여 공간적 상관성을 반영하지만, 이는 국내의 지질 및 지진 특성을 충분히 반영하지 못한다. 반면, 이번 연구에서 개발한 세미베리오그램 모델은 국내 데이터를 활용함으로써 국내의 지질 및 지진 환경을 고려하여 개발되었기 때문에, 더 정확한 진도 분포 예측을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 평가하기 위해, 이번 모델을 적용한 ShakeMap 진도 지도 결과와 기존의 LB13을 적용한 ShakeMap 진도 지도 결과를 비교하였다. 예시에 사용된 지진은 2017년 M_L 5.4 포항지진이며, 2.1 절의 지진파 전처리를 통해 이상 지진파로 분류되지 않은 164개 관측소의 가속도 데이터를 활용하였다. 이때 지표형 센서는 계측기록 그대로 사용하고, 시추형 센서 기록은 2.2 절의 부지효과모델을 적용하여 지표면 진도로 계산하였다. Fig. 9은 2017년 포항지진에 대해 164개 관측소 위치에서의 지표면 진도 분포를 나타낸다.

Fig. 10는 2017년 포항지진에 대해 두 모델을 적용한 ShakeMap 진도 지도를 비교한 결과이다. Fig. 10(a)는 기존의 LB13 모델을 적용한 결과를, Fig. 10(b)는 이번 연구에서 개발한 모델을 적용한 결과를 보여준다. 2017년 포항지진 당시 관측소가 조밀하게 설치되어 있어 공간적 상관성의 변화에 따른 진도 변화는 넓은 지역 관점에서는 큰 차이가 보이지 않으나, 이번 모델이 조금 더 스무딩 된 결과를 보여준다. 예를 들어, Fig. 10(a)는 진도 V가 강원도-경상도 경계 및 낙동강 하구 지역에서, 진도 III이 강화도 지역에서 독립적으로 섬과 같이 표출되나, Fig. 10(b)에서는 섬 형식의 진도가 보이지 않는다.

진도 예측의 정확성 향상을 검증하기 위해, Fig. 8에 도시된 164개 관측소 중에서 무작위로 10% 관측소를 테스트 데이터로 분류하고, 나머지 90%

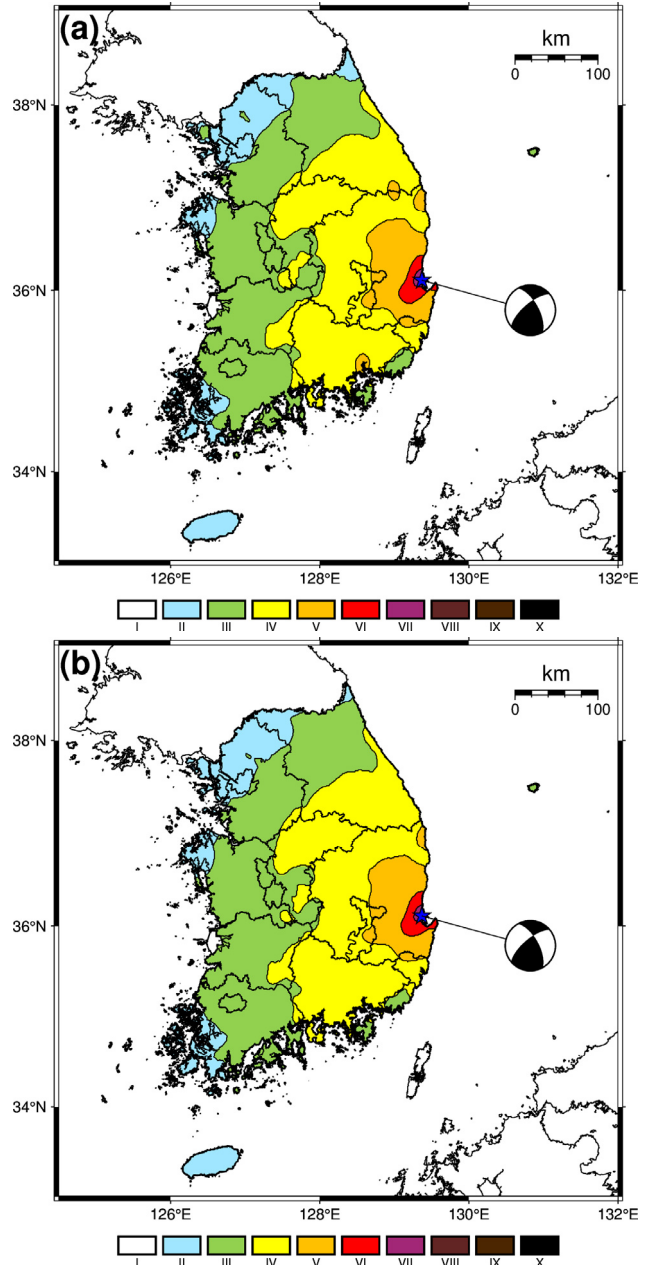


Fig. 10. Comparison of intensity maps for M_L 5.4 Pohang earthquake using (a) default semi-variogram model (Loth and Baker, 2013) and (b) one developed in this study

데이터로 진도지도를 작성 후 테스트 데이터에 대한 예측 정확성을 확인하였다. 총 500번의 검증 시험으로부터 관측된 진도와 예측된 진도 간의 평균제곱오차(Mean Squared Error, MSE)를 계산한 결과, 기존 LB13 모델을 활용하였을 때의 MSE는 0.4617이었으나, 이번 연구에서 개발한 모델을 사용한 경우 MSE 값이 0.4456으로 약 3.5% 감소한 것을 확인하였다. 이는 이번 연구의 모델이 기존 모델보다 더 나은 예측 성능을 가짐을 의미한다.

5. 결론

이번 연구에서는 국내 지진 데이터 및 국내 특화 지반운동예측모델

(GMM)을 바탕으로 지진파 잔차의 세미베리오프로그램 모델을 개발하였다. 그 후 개발된 모델을 국외 모델과 비교하여 지진파의 공간적 상관성 차이를 분석하였고, 국내 세미베리오프로그램 모델을 활용한 진도지도와 기존의 방법에 기반한 진도지도를 비교하여 국내 모델 사용 시의 진도지도 예측 정확성 향상을 검증하였다. 이번 연구의 주요 내용은 다음과 같다:

- 1) 국내 특화 세미베리오프로그램 모델 개발: 국내 지진 데이터를 수집하고 국내 특화 GMM을 활용하여 지진파의 잔차에 대한 경험적 세미베리오프로그램을 계산하였다. 그 후 복합 지수함수 형태를 활용하여 세미베리오프로그램 모델을 제안하였다.
- 2) 모델 비교: 미국, 대만, 일본, 이탈리아 등 지진 활동이 활발한 지역에서 개발된 기존의 국외 세미베리오프로그램 모델들과 국내 세미베리오프로그램 모델의 차이를 분석하였다. 국내 세미베리오프로그램 모델은 근거리에서는 국외 모델과 비교하여 상대적으로 공간적 상관성이 낮으나, 장거리에서는 높은 공간적 상관성을 나타냈다. 이는 지진이 활발한 국외지역보다 지진파의 감쇠 효과가 늦게 나타나는 국내의 지반 특성을 반영한다고 할 수 있다.
- 3) 진도 예측 정확성 향상: 이번 연구에서 개발된 세미베리오프로그램 모델을 ShakeMap에 적용하여 2017년 포항지진에 대한 진도지도를 분석한 결과, ShakeMap에 기본으로 탑재되어 있는 공간적 상관성 모델을 사용할 때보다 평균제곱오차가 약 3.5% 감소하였다. 이는 국내 특화 공간적 상관성 모델을 사용하였을 때 진도 예측의 정확성이 향상된다는 것을 의미한다.

이번 연구는 국내 지진 환경에 맞춘 공간적 상관성 모델 개발의 필요성을 제시하고, 국내 특화 세미베리오프로그램 모델 개발을 통해 진도지도의 예측 정확성을 향상시켰다. 감소량의 절대적인 크기는 3.5%로 크지 않으나, 기존 ShakeMap에서 사용 중인 국외 지진파 공간적 상관성 모델의 국내 적합성을 확인하는 데 의미가 있다. 앞으로도 다양한 지진 데이터를 추가적으로 분석하고, 모델의 정교화를 통해 진도지도 생성에 더욱 신뢰성 있는 공간적 상관성 모델을 제공하고자 한다. 이러한 진도지도 예측 성능 향상을 통해, 지진 발생 후의 긴급 구조 활동 및 피해 평가, 재난 대응 체계 구축에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(철도교통의 지진재해에 대한 리질리언스 기반 예방 복구지원 기술 개발, PK2402A5) 및 한국기상산업기술원 연구사업(지진·지진해일·화산 감시 응용기술 개발, RS-2023-00249443)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Worden CB, Thompson EM, Hearne M, Wald DJ. ShakeMap Manual Online: technical manual, user's guide, and software guide, US Geological Survey [Internet]. 2020. Available from: <http://cbworden.github.io/shakemap/>
2. Worden CB, Wald DJ, Allen TI, Lin K, Garcia D, Cua G. A revised ground-motion and intensity interpolation scheme for ShakeMap. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010 Dec 1;100(6):3083–3096.
3. Jayaram N, Baker JW. Correlation model for spatially distributed ground-motion intensities. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2009 Dec;38(15):1687–1708.
4. Loth C, Baker JW. A spatial cross-correlation model of spectral accelerations at multiple periods. *Earthq Eng Struct Dyn*. 2013 Mar;42(3):397–417.
5. Esposito S, Iervolino I. PGA and PGV spatial correlation models based on European multievent datasets. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2011 Oct 1;101(5):2532–2541.
6. Chung TW, Sato H. Attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of southeastern South Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2001 Dec 1;91(6):1867–1874.
7. Kim KD, Chung TW, Kyung JB. Attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of Choongchung provinces, central South Korea. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2004 Jun 1;94(3):1070–1078.
8. Boore DM, Atkinson GM. Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthq Spectra*. 2008;24(1):99–138.
9. Boore DM, Stewart JP, Seyhan E, Atkinson GM. NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes. *Earthq Spectra*. 2014 Aug;30(3):1057–1085.
10. Korea Meteorological Administration (KMA). NECIS: National Earthquake Comprehensive Information System. [Internet]. Available from: <http://necis.kma.go.kr/>
11. Lee MG, Kim Y, Cho HI, Kim HS, Sun CG, Seong YJ, Che IY. KIGAM Quake: An open platform for seismological data and earthquake research information. *Geomech Eng*. 2024 Jan 1;37(3):279.
12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). Korean Design Standard, KDS 17 10 00: Seismic Design - General; c2024.
13. Dawood HM, Rodriguez-Marek A, Bayless J, Goulet C, Thompson E. A flatfile for the KiK-net database processed using an automated protocol. *Earthq Spectra*. 2016 May;32(2):1281–1302.
14. Choi I, Ahn JK, Kwak D. A fundamental study on the database of response history for historical earthquake records on the Korean Peninsula. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*. 2019;39(6):821–831.
15. Boore DM, Azari Sisi A, Akkar S. Using pad-stripped acausally filtered strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2012 Apr 1;102(2):751–760.
16. Boore DM, Bommer JJ. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2005 Feb 1;25(2):93–115.
17. Boore DM. Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010 Aug 1;100(4):1830–1835.

18. Kwak D, Ryu B. Ground motion model extrapolated to large magnitudes by combining local and international records. SSA Ground Motion Modeling 2023 Program, 2023;19.
19. Ryu B, Kwak D. Development of nonlinear site amplification model based on average shear-wave velocity of soil layer and bedrock depth. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2024; 10(28):1053–1057.
20. Matheron G. Principles of geostatistics. *Economic geology*, 1963 Dec 1;58(8):1246–1266.
21. Chiles JP, Delfiner P. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. 2nd ed. John Wiley & Sons; c2012.
22. Engler DT, Worden CB, Thompson EM, Jaiswal KS. Partitioning ground motion uncertainty when conditioned on station data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2022 Apr 1;112(2): 1060–1079.