

KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE

Enhancing the accuracy of EXSIM-based stochastic ground motion modeling with correction factors for path, topographic, and site effects

¹서환우, ²하정곤, ³김민규

¹한국원자력연구원 구조지진안전연구부 박사후연수생 (E-mail: hwanwooseo@kaeri.re.kr)

²한국원자력연구원 구조지진안전연구부 선임연구원

³한국원자력연구원 구조지진안전연구부 책임연구원

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는

한국원자력연구원

CONTENTS

- 01 연구배경 및 목표
- 02 데이터 수집 및 처리
- 03 EXSIM 모델링 및 평가
- 04 보정모델 개발 및 평가
- 05 결론 및 향후연구

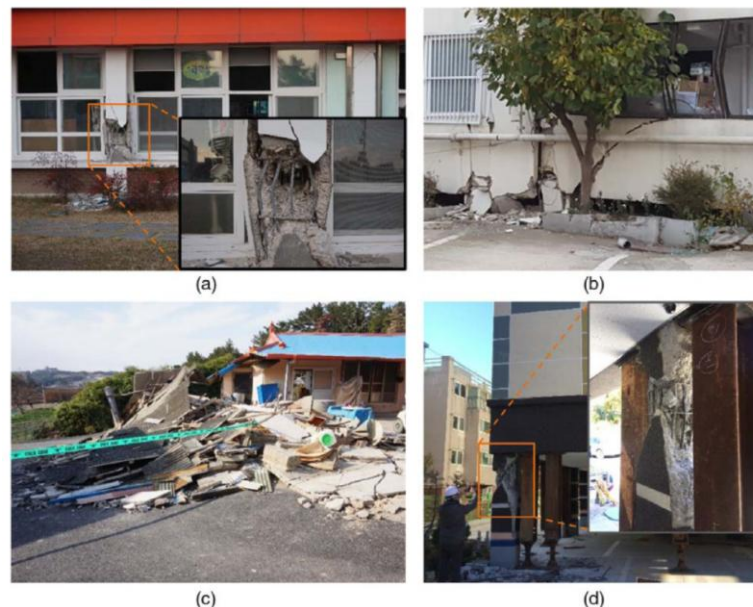
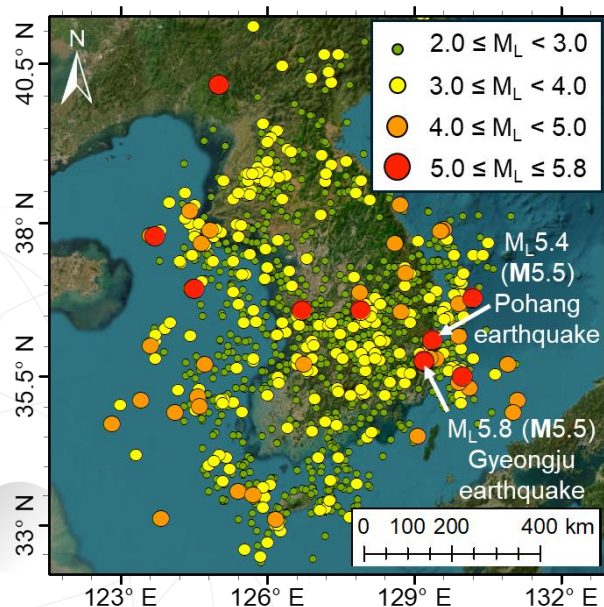
연구 배경 및 목표

연구 배경

국내 지진 환경 및 현황:

- 판내부 지진환경으로 중·소규모 지진이 주로 발생함(1978년 이후 $M_L \geq 3.0$ 지진 458회, $M_L \geq 5.0$ 지진 10회)
- 2016년 $M_L 5.8$ (**M5.5**) 경주지진 & 2017년 $M_L 5.4$ (**M5.5**) 포항지진 발생 (국내 최대 규모 지진)
- 다수의 구조물 손상 발생 → 지진 안전성 향상 및 정확한 지진동 예측 필요성 대두

1978-2024 지진



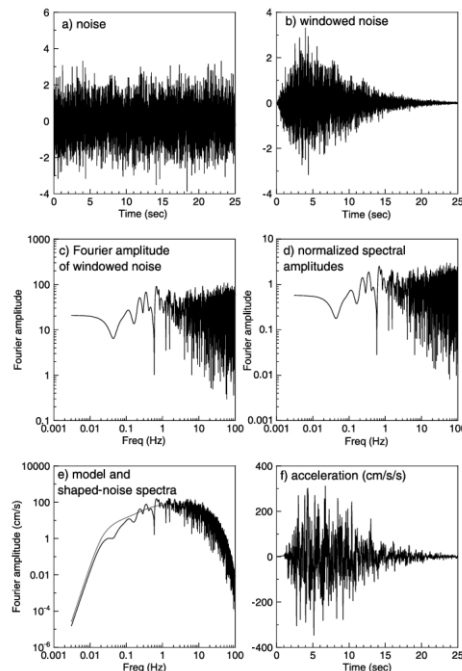
Source: Kang et al. (2019)

연구 배경 및 목표

연구 배경

추계학적 지진동 모델링(EXSIM):

- 국내에서는 지진동을 예측하기 위한 방법 중 하나로 추계학적 지진동 모델링을 활용하고 있음(Jee and Han, 2021; Choi, 2021) → 지진원 특성(단층의 기하, 크기 등)을 고려하여 지진동 세기 산정 가능
- 추계학적 지진동 모델링: 단층 파열의 불균질성이나 지진파의 산란·간섭과 같은 결정론적으로 기술하기 어려운 복잡한 물리 과정을 모사하기 위해 무작위성(Randomness)을 도입하는 모델



모델 스펙트럼 산정 방법

$$1) A(M_0; R; f) = S(M_0; f)P(R; f)Site(f)$$

$$2) S(M_0; f) = \frac{CM_0 4\pi^2 f^2}{1 + \frac{f^2}{f_0^2}} \quad \text{지진원 파라미터}$$

$$3) P(R; f) = D_g(R)D_q(R; f) \quad \text{경로 파라미터}$$

$$4) Site(f) = A(f)D(f) \quad \text{부지 파라미터}$$

Source: Boore (2003)

연구 배경 및 목표

연구 배경

❏ 추계학적 지진동 모델링(EXSIM) 한계 및 보정 연구의 필요성:

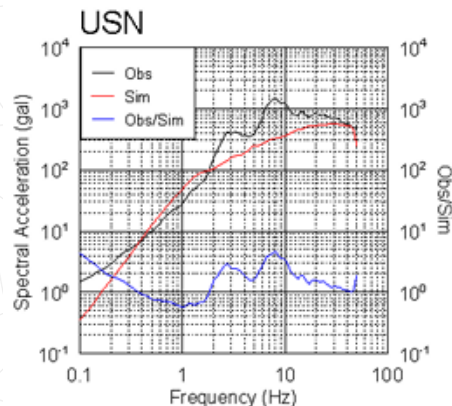
❏ EXSIM 모델의 한계:

- 지진원: 파열 과정을 단순하게 가정 (예, 파열 전파 방향성 효과 미반영)
- 단순화된 경로 효과 가정: 지진파의 복잡한 전달 경로 효과를 단순하게 가정 (예, 평균적인 Q 모델 사용)
- 지형/부지 특성 반영 부족: 복잡한 지형 효과 및 국지적 부지 증폭 특성을 충분히 반영하지 못함

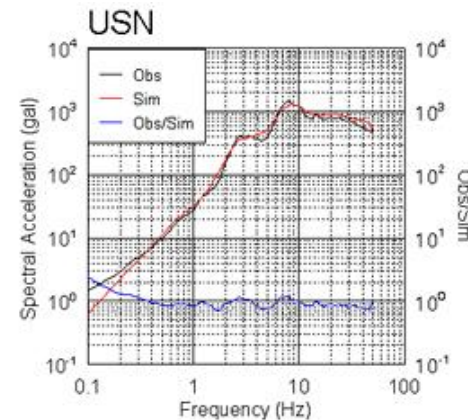
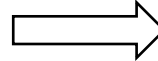
→ 이러한 한계로 실제 물리적 특성을 반영하지 못해 관측값과 예측값의 차이가 발생함

→ 잔차를 줄이기 위해 보정 연구가 필요함

❏ Choi (2021): 관측소 별로 조정인자를 도입하여 보정함 → 관측소 외에서 보정할 수 없음



조정인자



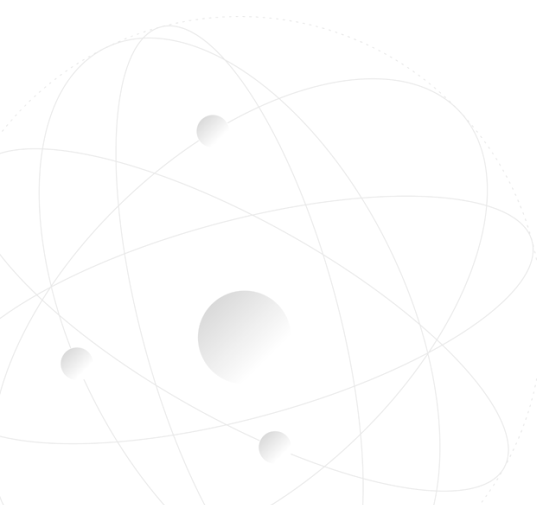
Source: Choi (2021)

연구 배경 및 목표

연구 목표

- EXSIM 모델의 예측 정확도 개선
 - 모델 단순화로 인해 관측값과 예측값 차이 발생
 - 지진원, 경로, 부지 효과 보정을 통해 잔차 최소화

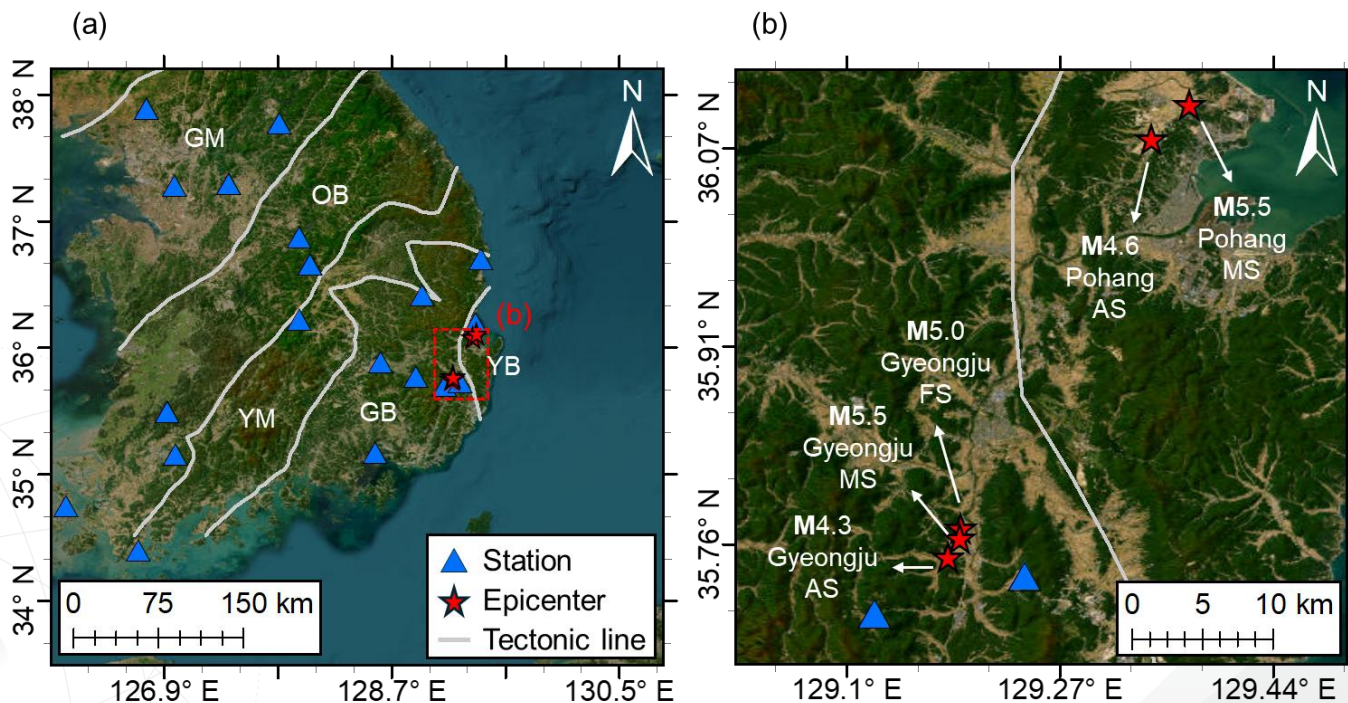
- 범용적 보정모델 개발
 - 선행 연구(Choi, 2021)는 관측소 지점에만 적용 가능함
 - 관측소 외 지점에서 활용 가능한 범용적인 보정 모델 개발



계측 데이터 수집 및 처리

계측 데이터 수집

- KMA+KIGAM 지표면 관측소 19개소에서 2016 경주지진과 2017 포항지진 데이터를 수집함
 - 관측소 V_{S30} 범위: 784–1472 m/s
 - 경주 전진(M5.0), 경주 본진(M5.5), 경주 여진(M4.3), 포항 본진(M5.5), 포항 여진(M4.6) 데이터 활용



GM: 경기 육괴/ OB: 옥천 벨트/ YM: 영남 육괴/ GB: 경상분지/ YB: 연일분지

계측 데이터 수집 및 처리

계측 데이터 처리

데이터 처리 과정:

Read uncorrected acceleration time series

Convert digital count values into physical values (e.g., gravitational acceleration)

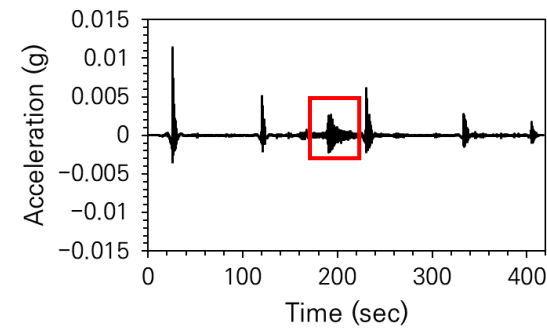
Detrend the data to remove linear trend

Visual inspection and data screening

Separate noise and signal using the P-wave arrival picking algorithm of Kalkan (2016)

Apply cosine tapering and zero padding to both noise and signal

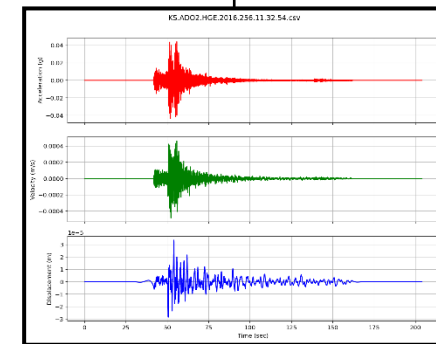
Convert to frequency domain using FFT and apply smoothing to the amplitude spectra



Determine high and low pass corner frequencies based on signal-to-noise (SNR) ≥ 3

Apply acausal Butterworth **bandpass filter** using fcHP and fcLP

Perform a 6th-order polynomial **baseline correction**



가속도
속도
변위

Calculate ground motion parameters (PGA, RotD50)

계측 데이터 수집 및 처리

계측 데이터 처리

RotD50 응답스펙트럼 산정:

- NGA-West2 project부터 Boore (2010)가 제안한 RotD50 응답스펙트럼이 활발히 활용됨(Boore and Kishida, 2017; Ancheta et al., 2013)
- RotD50은 특정 센서 방향에 의존하지 않고(Orientation-independent), 수평성분의 지진동 특성을 대표할 수 있음

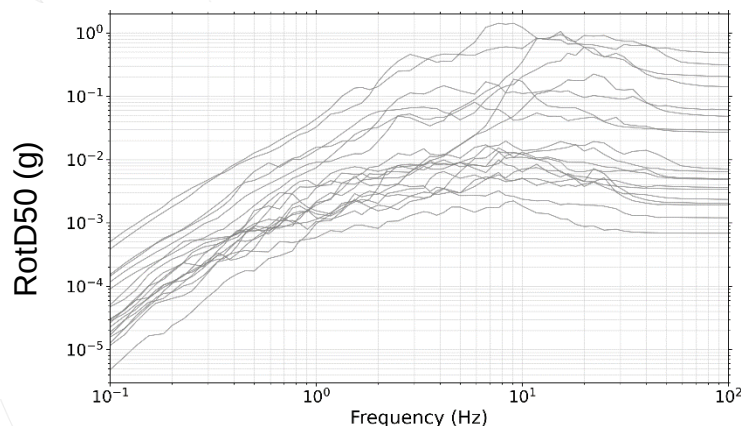
$$GM = \sqrt{Sa_{EW} \times Sa_{NS}}$$

$$\text{RotD50: } a_{rot}(t; \theta) = a_1 \cos \theta + a_2 \sin \theta$$

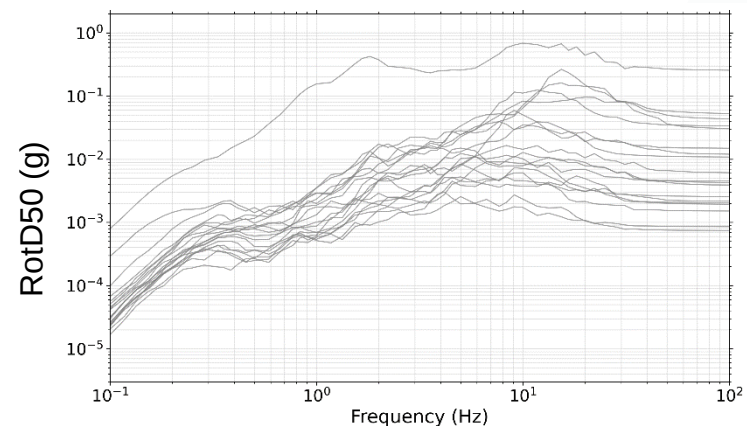
→ Geometric mean (기하평균) 방법

→ θ (0이상 180°미만) 별로 응답스펙트럼 생성 후 주기 별 중간값을 찾고, 연결한 것이 RotD50 응답스펙트럼

경주 본진 RotD50 응답스펙트럼



포항 본진 RotD50 응답스펙트럼



EXSIM 모델링 및 평가

EXSIM 모델링

- 토층에 의한 지진파 증폭 효과를 제외하기 위해, 암반($V_{S30} = 760$ m/s) 조건을 가정하여 경주지진과 포항지진에 대한 EXSIM 모델링을 수행함
- 모델 파라미터:

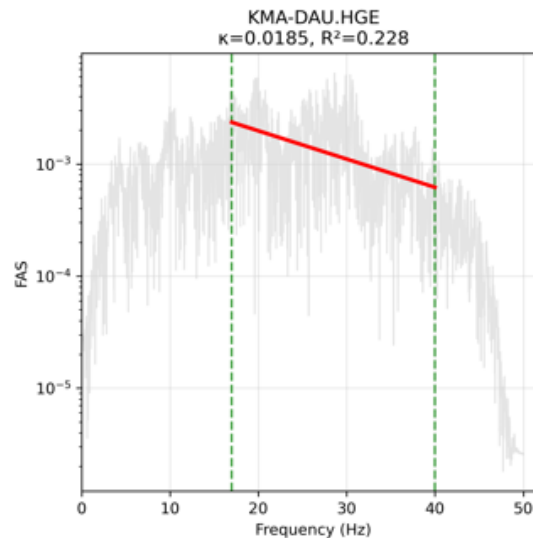
Parameter (unit)	Gyeongju foreshock	Gyeongju mainshock	Gyeongju aftershock	Pohang mainshock	Pohang aftershock	Reference
Moment magnitude (M)	5.0	5.5	4.3	5.5	4.6	Son et al. (2018); KCG (2019); KMA (2018)
Hypocenter (Lat/Lon)	35.7698/ 129.1911	35.7621/ 129.1903	35.7468/ 129.1810	36.1061/ 129.3726	36.0786/ 129.3424	
Hypocenter depth (km)	15	14.5	15.8	4.27	4.447	Woo et al. (2019); KCG (2019); KMA (2018)
Fault length/width (km)	3/3.1	5.5/3.7	1/0.7	6/5	1.78/1.38	Woo et al. (2019); Song and Lee (2019); Woo et al. (2020)
Subfault length/width (km)	1/1.033	1.1/0.925	0.25/0.233	1/1	0.356/0.345	-
Strike/Dip (°)	27/71	24/70	32/72	214/51	34/52	Woo et al. (2019); KCG (2019); Woo et al. (2020)
Stress drop (bar)	47.5	82.7	24.7	19.2	10.8	Chai et al. (2020)
Geometrical spreading	R^{-1} for $R \leq 40$ km; $R^{-1.3}$ for $40 < R \leq 60$ km; $R^{-0.1}$ for $60 < R \leq 250$ km; $R^{-0.5}$ for $R > 250$ km					Jeon (2004)
Path duration (s)	0.173R for $R \leq 15$ km; 0.745R - 8.585 for $15 < R \leq 35$ km; 0.507R + 9.755 for $35 < R \leq 50$ km; 25.1 for $50 < R \leq 125$ km; 0.045R + 19.475 for $125 < R \leq 200$ km; 0.091R + 10.3 for $200 < R \leq 392$ km; 0.111R + 25.588 for $R > 392$ km					Boore and Thompson (2015)
Site amplification	Site amplification factors for $V_{S30} = 760$ m/s					Atkinson and Boore (2006)

EXSIM 모델링 및 평가

EXSIM 모델링

모델 파라미터:

* κ_0 는 관측소 별로 계측 데이터를 활용하여 산정함



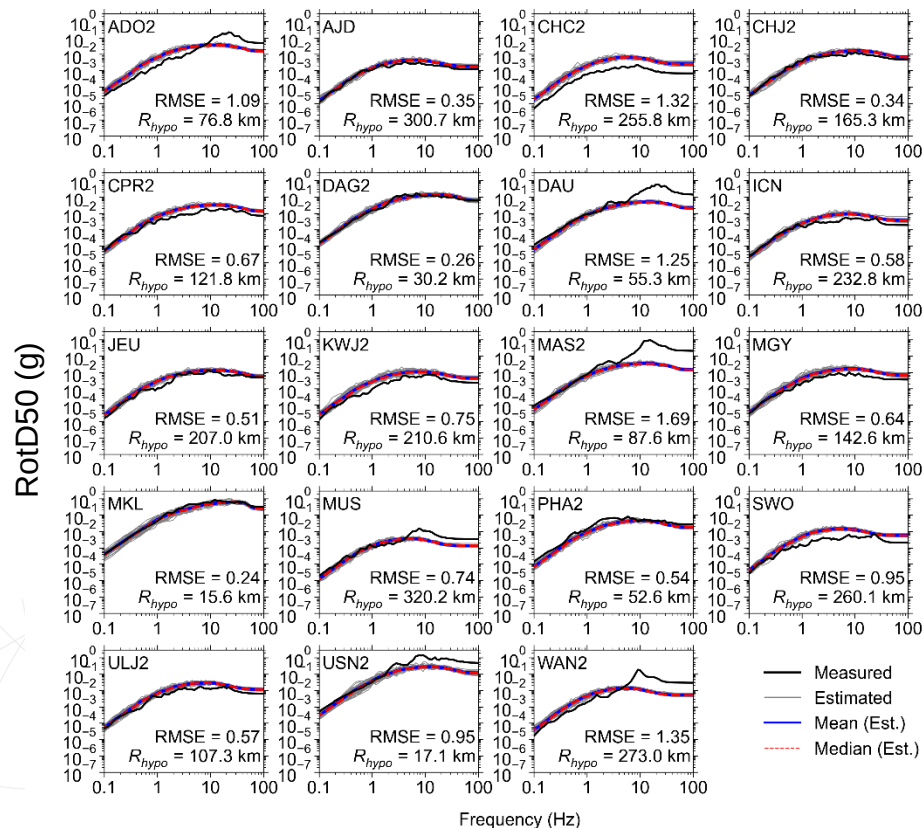
Parameter (unit)	Gyeongju foreshock	Gyeongju mainshock	Gyeongju aftershock	Pohang mainshock	Pohang aftershock	Reference
Anelastic attenuation	$\max(87,383f^{0.644})$ for GB; $\max(26,199f^{0.887})$ for GM; $\max(29,196f^{0.833})$ for OB; $\max(429,895f^{0.319})$ for YB; $\max(195,546f^{0.447})$ for YM					Chung and Sato (2001); Kim et al. (2004); Kim et al. (2006); Kim (2007); Park et al. (2007); Atkinson and Assatourians (2015); Jeon (2004); Jee and Han (2020); Atkinson and Boore (2006); Pezeshk et al. (2018)
Crustal density/shear wave velocity ($V_s^{crustal}$) (gm/cm ³ , km/s)	2.8/3.7					Atkinson and Assatourians (2015)
Rupture velocity (km/s)	$0.8V_s^{crustal}$					Atkinson and Assatourians (2015)
Slip model	Random					-
Number of simulations for each earthquake	50					-

EXSIM 모델링 및 평가

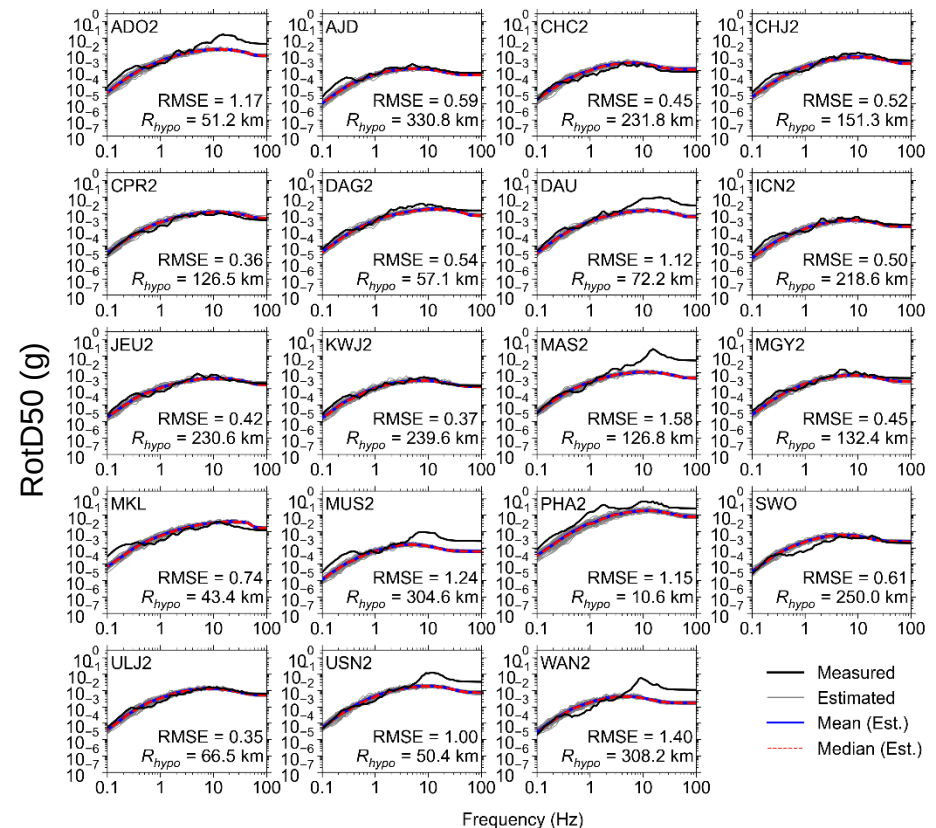
EXSIM 모델링 평가

- 경주, 포항 본진 계측값과 예측값 비교: 일부 관측소에서는 3Hz 이상 주파수에서 잔차가 크게 나타남
- EXSIM 모델이 지진원, 경로, 부지 효과를 충분히 반영하지 못해 정밀한 예측에 한계가 발생함

경주 본진 결과 비교



포항 본진 결과 비교

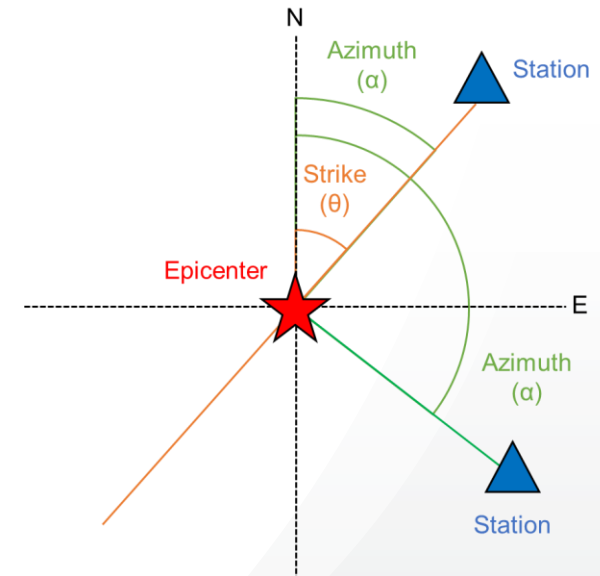


보정모델 개발 및 평가

보정모델 개발

- 보정모델 = EXSIM의 잔차($R_0 = \ln Sa^{Mea} - \ln Sa_{EXSIM}^{est}$)를 줄여 모델의 예측 성능을 높이는 모델
- 보정모델 내 9개 변수 고려함

구분	변수	설명
지진원 효과	M	모멘트 규모 (Moment magnitude)
	$\Delta\sigma$	응력 강하 (Stress drop)
	S_{align}	단층 주향(θ)-방위각 일치도 (Strike alignment = $(\cos(\alpha - \theta))^2$)
경로 효과	R_{hypo}	진원 거리 (Hypocentral distance)
	α	방위각 (Azimuth)
부지 효과	ϕ	사면 경사 방향 (Aspect)
	h_r^{1000}	1000m 반경 내 상대고도 (Relative elevation within a radius of 1000 m)
	β	사면 경사 (Slope)
	V_{S30}	30m 깊이 까지의 평균 전단파속도 (Average shear wave velocity up to 30 m depth)



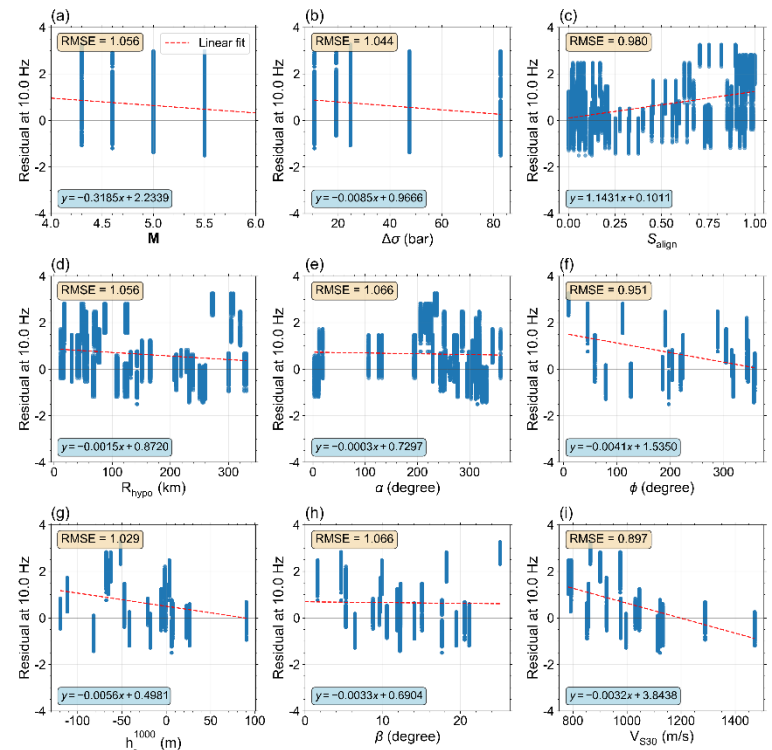
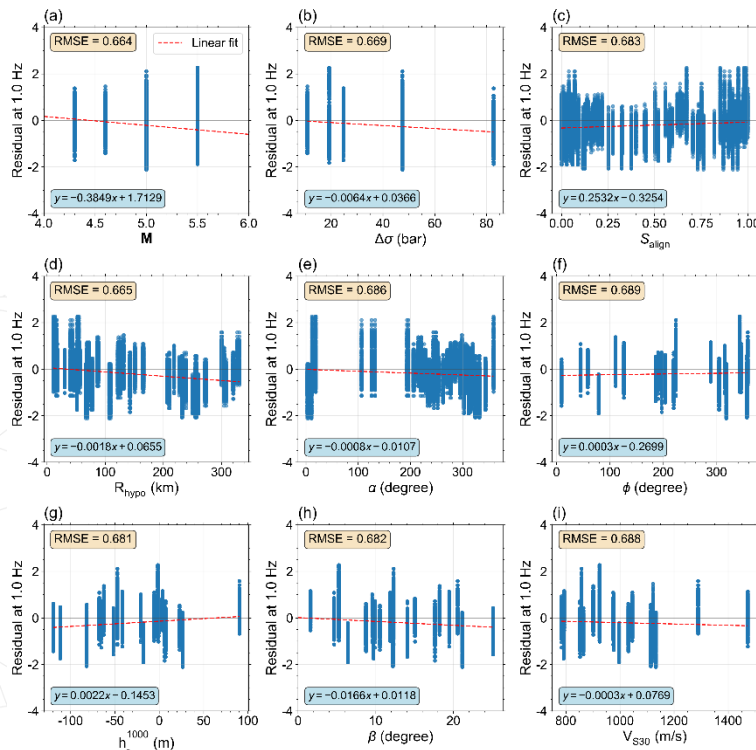
보정모델 개발 및 평가

보정모델 개발

변수 별 잔차 경향 분석:

- 저주파(1Hz)와 고주파(10Hz)에서 변수·잔차 관계가 상이함
- 부지(지형)효과 예시: 상대고도, 사면경사 방향, V_{S30} 의 경우 고주파에서 잔차와 뚜렷한 경향성을 보임

→ EXSIM에서 고주파수에 대해 부지(지형)효과로 인한 지진파 증폭을 충분히 반영하지 못함



보정모델 개발 및 평가

보정모델 개발

2단계를 거쳐 보정 수행

- 1단계: MLM(다중 선형 회귀모델)을 활용하여 $R_0 (= \ln Sa^{Mea} - \ln Sa_{EXSIM}^{est})$ 을 예측함

$$\hat{R}_0^{MLM} = b_0 + \underbrace{b_1 \ln(\mathbf{M}) + b_2 \ln(\Delta\sigma) + b_3 S_{align}}_{\text{Source}} + \underbrace{b_4 \ln(R_{hypo}) + b_5 \sin \alpha + b_6 \cos \alpha + b_7 \sin \phi + b_8 \cos \phi}_{\text{Path}} + \underbrace{b_9 h_r^{1000} + b_{10} \ln(1 + \beta) + b_{11} \ln V_{S30}}_{\text{Site}}$$

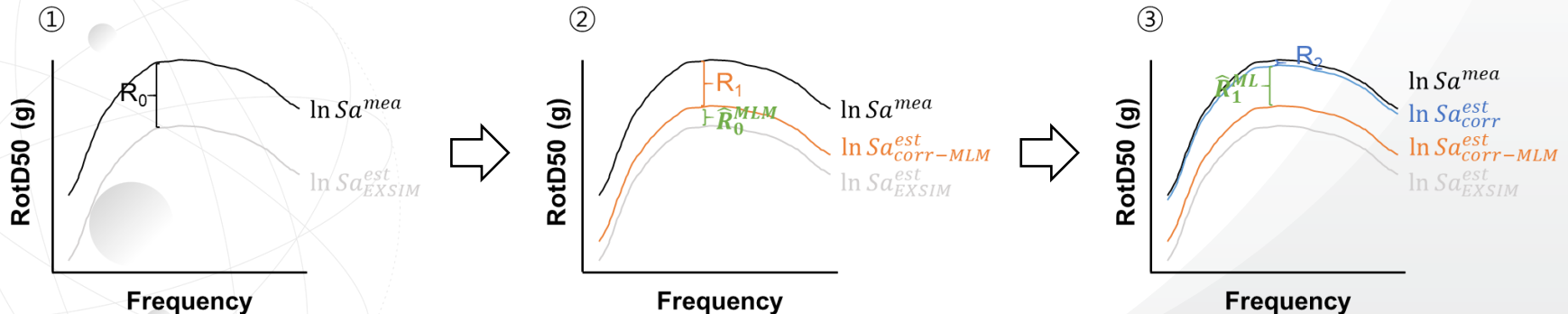
- MLM은 선형 관계만 반영하기 때문에, 잔여잔차($R1 = R0 - \hat{R}_0^{MLM}$)가 발생함

- 2단계: ML(머신러닝)을 활용하여 R_1 을 예측함

$$\hat{R}_1^{ML} = f_{ML}(\ln(f), \ln(\mathbf{M}), \ln(\Delta\sigma), S_{align}, \ln(R_{hypo}), \sin \alpha, \cos \alpha, \sin \phi, \cos \phi, h_r^{1000}, \ln(1 + \beta), \ln V_{S30})$$

- 5개 머신러닝 알고리즘(RF, GB, XGB, LGB, DNN)을 활용함

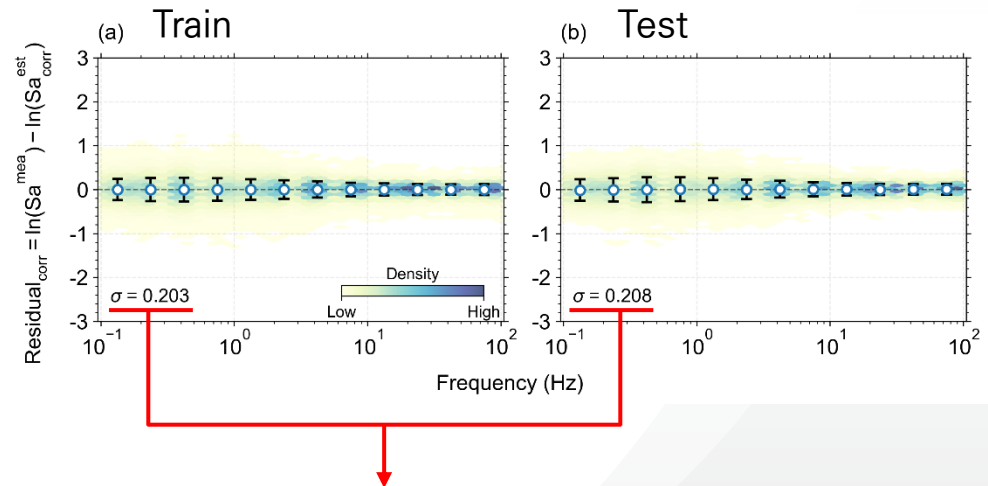
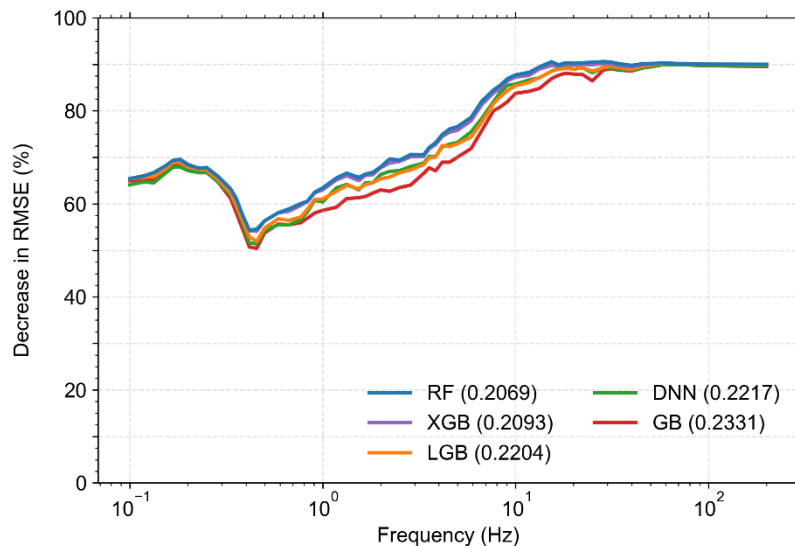
최종 보정결과(Sa_{corr}^{est}) = $Sa_{EXSIM}^{est} \times e^{(\hat{R}_0^{MLM} + \hat{R}_1^{ML})}$



보정모델 개발 및 평가

보정모델 평가

- 보정 이후 보정 전 보다 전체 주파수에서 50% 이상 RMSE가 감소하였으며, 10Hz 이상의 고주파수에서는 80~90% 개선됨
- 5개 ML 알고리즘 중 RF가 가장 성능이 좋음 (전체 주파수에 대한 RMSE: 0.2069)
- 과적합 여부를 판단하기 위해 Train 데이터 성능과 Test 데이터 성능을 비교함
 - Train 데이터 성능과 Test 데이터 성능 차이가 거의 없으며, 과적합이 발생하지 않은 것으로 판단할 수 있음



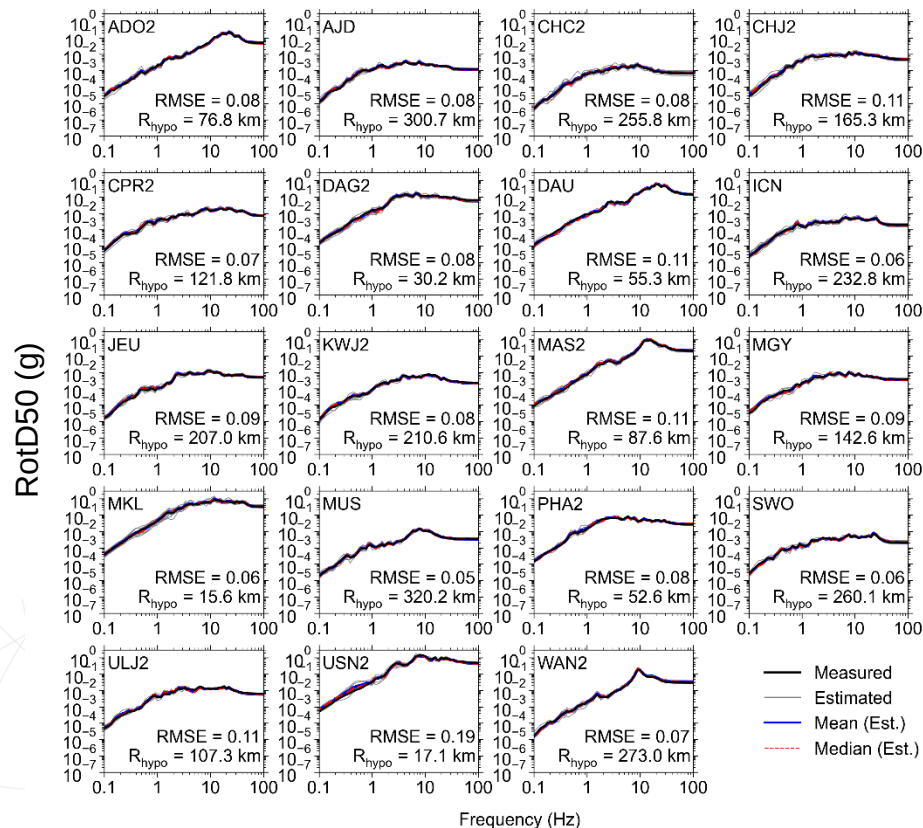
전체 주파수 범위에 대한 Residual의 표준편차

보정모델 개발 및 평가

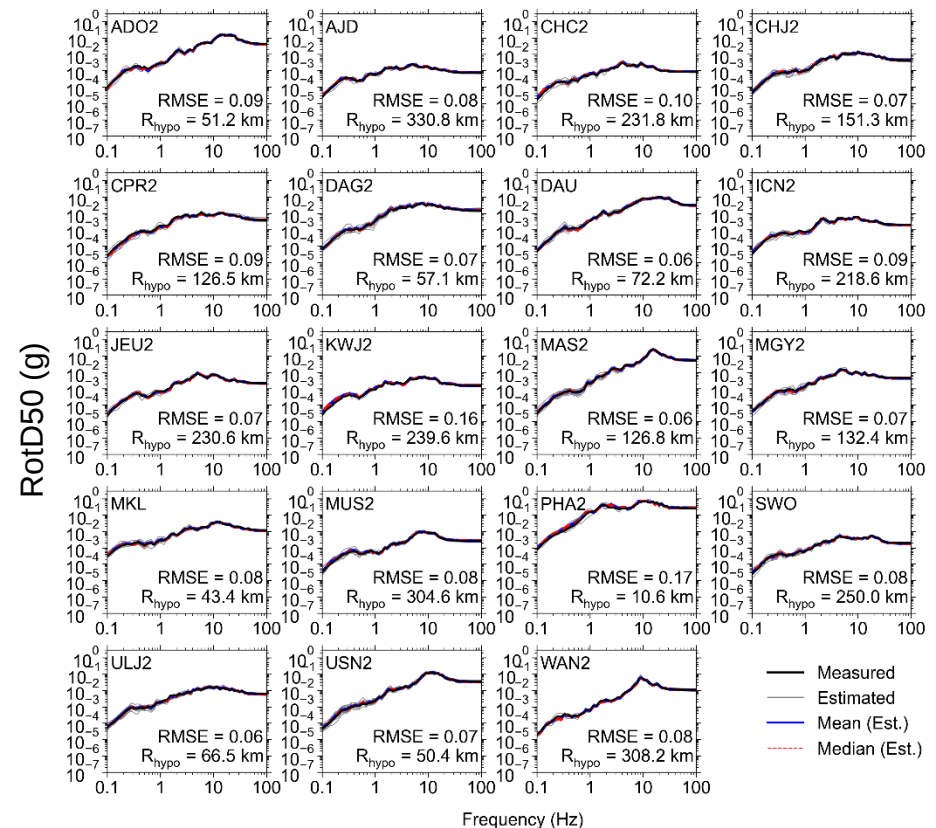
보정모델 평가

- 보정 전과 비교하였을 때, 고주파수에서 잔차가 크게 감소함
- 각 관측소에 대해 계측값과 보정된 예측값이 거의 일치함

보정모델 적용: 경주 본진 결과



보정모델 적용: 포항 본진 결과



결론 및 향후연구

결론

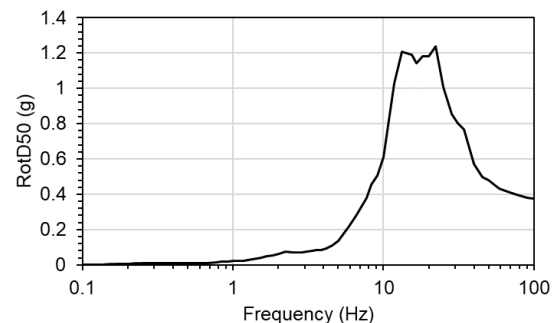
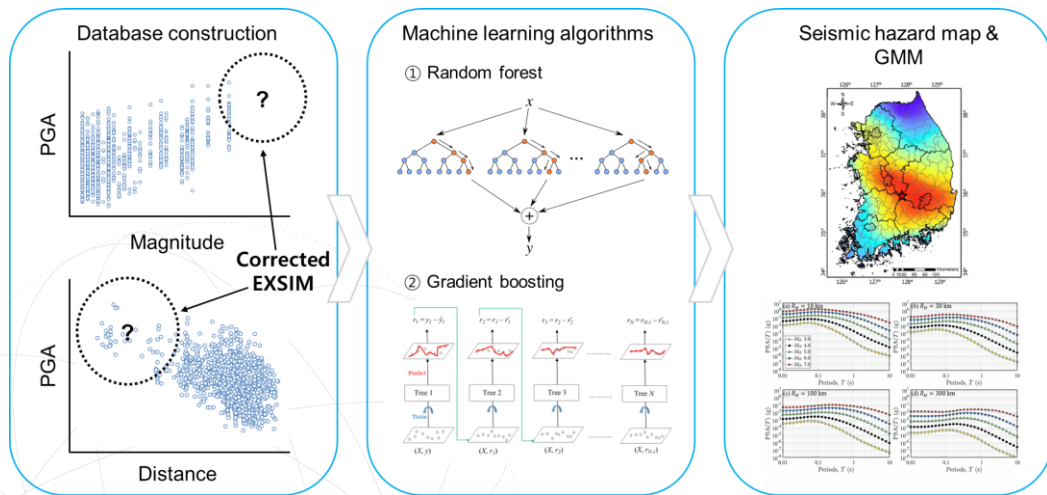
- ❑ EXSIM 모델 예측 성능 개선: 국내 지진(M4.3~5.5) 데이터를 활용한 2단계 잔차 보정 모델을 개발하여 EXSIM 예측 성능이 최대 90%까지 개선됨
- ❑ 범용적이고 안정적인 보정 모델 개발: 기존 관측소에 국한되지 않으며 관측소 외 지점에 적용할 수 있는 범용적이고 과적합 없는 안정적인 보정 모델을 개발함
- ❑ 지진동 예측 신뢰성 확보 기반 마련: 관측 데이터가 부재한 지역에서도 신뢰성 있는 지진동 예측을 가능하게 함. 향후 내진성능 평가 및 PSHA 수행 시 불확실성을 저감하고 지진 안전성을 향상하는데 기여할 수 있음

결론 및 향후연구

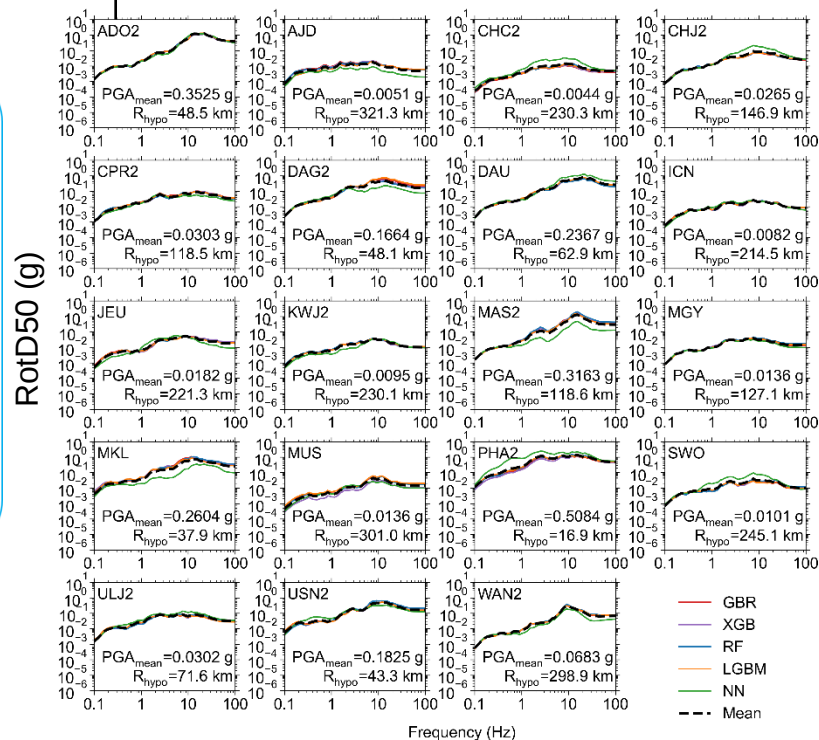
향후연구

❑ GMM 개발(계측 데이터 + 합성 데이터):

- 규모 6~7 시나리오 지진에 대한 합성 데이터를 생성하고 DB를 구축하고자 함
- DB를 바탕으로 GMM 개발을 하고자 함



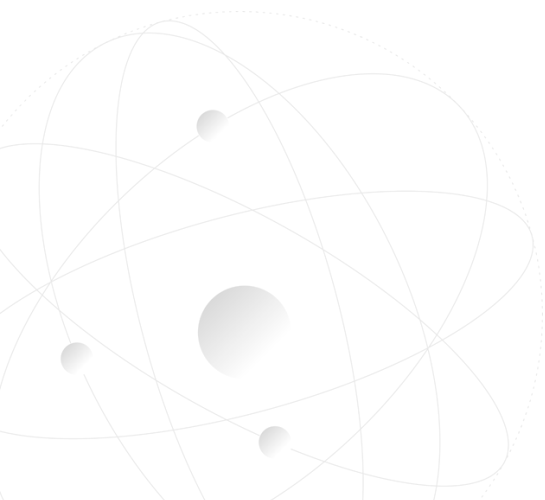
시나리오 지진(M6.66) 예측 결과

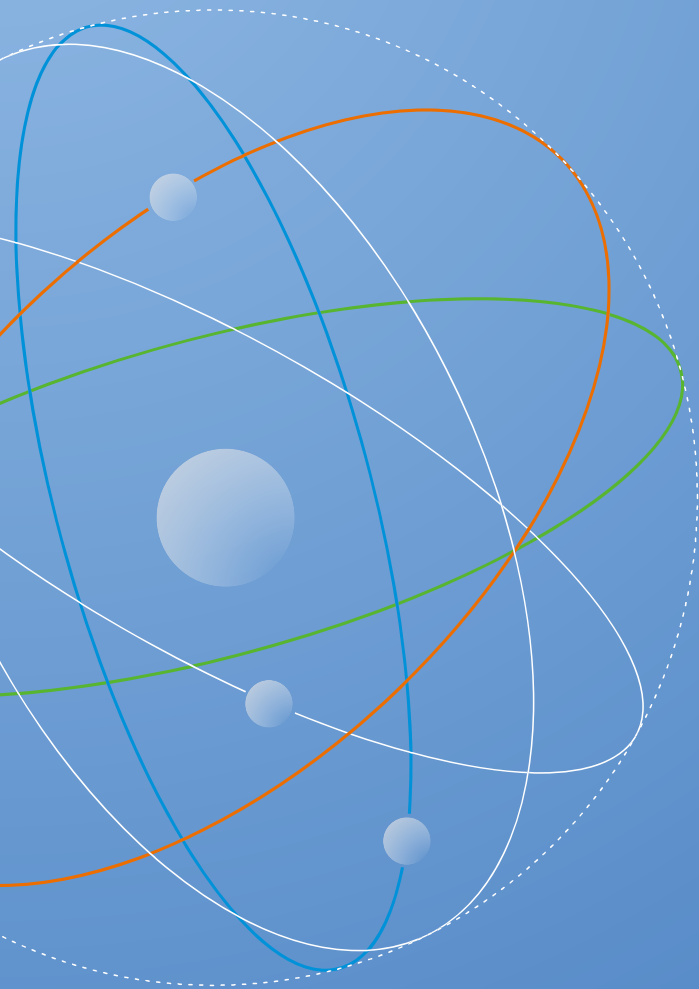


- 1. Ancheta et al. (2013) " PEER NGA-West2 Database " , Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- 2. Boore (2003) " Simulation of ground motion using the stochastic method " , Pure and Applied Geophysics, 160(3), 635–677.
- 3. Boore (2010) " Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion " , Bulletin of the Seismological Society of America, 100(4), 1830–1835.
- 4. Boore and Kishida (2017) "Relations between some horizontal-component ground motion intensity measures used in practice", Bulletin of the Seismological Society of America, 107(1), 334–343.
- 5. Choi (2021) "Stochastic strong ground motion simulation at South Korean Metropolises' seismic stations based on the 2016 Gyeongju Earthquake causative fault", Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 25(6), 233–240.
- 6. Gwon et al. (2021) "A study on the characteristics of fault activity in the southern part of the Ulsan fault using paleoseismic method", Journal of the Geological Society of Korea, 57(2), 109–121.
- 7. Ha et al. (2025) "Quaternary surface ruptures of the inherited mature Yangsan Fault: implications for intraplate earthquakes in southeastern Korea", Solid Earth, 16(2), 197–231
- 8. Jee and Han (2020) "Estimation of path attenuation effect from ground motion in the Korean Peninsula using stochastic point-source model", Journal of Earthquake Engineering of Korea, 24(1), 9–17.
- 9. Kang et al. (2019) "Earthquake-induced ground deformations in the low-seismicity region: A case of the 2017 M5.4 Pohang, South Korea, Earthquake", Earthquake Spectra, 35(3), 1235–1260.
- 10. Kim and Lee (2021) "Assessment of historical earthquake magnitudes and epicenters using ground motion simulations", Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, 25(2), 59–69.
- 11. Park et al. (2020) "Six major historical earthquakes in the Seoul Metropolitan area during the Joseon Dynasty (1392–1910)", Bulletin of the Seismological Society, 110(6), 3037–3049.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. RS-2022-KP002850).





더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



감사합니다.
Q&A



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute