지진원 및 파동 전파 이론에 기반한 GMPE 연구

2026.05.22.

31104 박강민

국문요약

본 연구에서는 지진 관측 자료에 기반한 기존의 통계적, 반(半)경험적 지반운동 예측 방정식(GMPE)의 한계를 보완하고자, 지진파 전파의 물리적 원리를 엄밀하게 적용한 물리 기반 GMPE를 도출하고 그 실효성을 평가하였다. 표면파의 조화 변위 및 가속도 편미분 공식을 바탕으로 단일주파수 성분식을 물리적으로 유도하였으며, 대륙 상층 지각의 평균 밀도와 한반도 전단파 속도, 비탄성 감쇠 함수(Q) 등 지구물리학적 상수를 적용하여 수식을 단순화하였다. 이후 로그정규분포 확률밀도함수를 결합한 주파수 전역화 과정을 통해 최종 GMPE 모델을 확립하였다. 국내 주요 지진 데이터를 바탕으로 수치적분을 수행하여 파라미터 최적화($a \approx 0.0358$)를 진행한 결과, 결정계수(R^2)는 39.41%, MAE(평균절대오차)는 0.2295, RMSE(평균제곱근오차)는 0.2889로 산출되었다. 이는 자연계 데이터의 높은 무작위성을 고려할 때 본 물리 기반 모델이 유의미한 설명력을 가짐을 시사한다. 나아가, 향후 Brune의 ω^2 지진원 스펙트럼과 주파수 의존형 품질계수($Q(f)$)를 도입함으로써 모델의 예측 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 최대지반가속도(PGA), 지반운동 예측 방정식(GMPE), 물리 기반 모델, 수치적분, 사다리꼴 공식

1. 서론

1-1. 연구 동기

2016년 9월 12일 발생한 리히터 규모(M_L) 5.8의 경주 지진 이후, 지진에 대한 국민적 관심과 경각심은 그 어느 때보다 높아졌다. 본 연구자 또한 이러한 사회적 관심의 흐름 속에서 ‘한국형 지진 시뮬레이터(KES)’를 직접 제작해보고, 다수의 지구물리학 문헌을 탐구하며 지진의 발생 메커니즘을 학습해 왔다. 학습 과정에서 현재 널리 사용되는 대부분의 지반운동 예측 방정식(GMPE)은 지진 관측 자료를 기반으로 한 통계적 혹은 반(半)경험적 방식에 의존하고 있다는 점을 확인하였다. 반면, 지진파 전파의 물리적 원리를 엄밀하게 적용하여 산출한 물리 기반 GMPE 연구는 상대적으로 드물다는 점에 주목하였다. 이에 본 연구에서는 지진파의 물리적 파동 방정식을 직접 활용하여 GMPE를 도출하고, 이를 기존의 통계적 모델과 비교 및 검증함으로써 물리 기반 모델의 정확성과 실효성을 평가해보고자 한다.

1-2. 이론적 배경

연구에 본격적으로 들어가기 전에, 본 연구에서 이용할 여러 공식과 물리적 의미를 알아본다. 먼저, 최대지반가속도(PGA)는 지반이 움직이는 가속도의 최댓값으로, 보통 PGA는 gal(cm/s²)으로 표현을 한다. 단, 본 연구에서는 m/s²단위로 PGA를 표현한 후 cm/s²로 변환하는 과정을 거칠 예정이다. PGA는 지진의 진도를 산출하는

데 매우 중요한 역할을 하고, PGA의 값만으로도 지반이 어느 정도의 세기로 흔들렸는지를 알 수 있으므로 지진공학적으로 중요한 값임을 알 수 있다. 또한, 지진파는 P파 및 S파, 표면파(레일리파, 러브파)로 나뉘어져 있는데, 본 연구에서는 표면파를 이용한 단일주파수 성분식을 산출 한 후, 이를 전역화 과정을 거쳐 GMPE로 확장할 것이다.

2. 단일주파수 성분식의 물리적 도출

입자의 조화 변위를 구하는 식은 식 (1)과 같다.

$$u = A \times \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)$$

식 (1)

식 (1)에서 A는 지진파의 진폭(m)이며, λ는 지진파의 파장(m), T는 파동의 주기(s)이다. 식 (1)을 각주파수(ω)와 파수(k)의 정의인 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 식 (4)와 같이 변형할 수 있다.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \omega = \frac{2\pi}{T} \qquad u = A \times \sin(kx - \omega t)$$

식 (2) 식 (3) 식 (4)

여기서 식 (4)는 입자의 조화 변위이다. 식 (4)를 시간 t에 대하여 편미분을 하면 식 (5)와 같은 형태가 되는데, 이는 입자의 조화 가속도를 의미한다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -A\omega^2 \sin(kx - \omega t)$$

식 (5)

여기서, PGA는 가속도의 최댓값이므로 sine 함수의 최댓값인 1을 식 (5)에 적용한 후, 절댓값을 공식에 적용하면, 단일 조화파의 PGA(m/s^2)는 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$PGA = A\omega^2$$

식 (6)

또한, 진폭 A의 비탄성 감쇠 공식은 식 (7)과 같다.

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{\pi}{Q} \times \frac{r}{\lambda}\right)$$

식 (7)

식 (7)에서 A_0는 감쇠 이전의 진폭이며, Q는 주기당 에너지의 손실의 비인 Q인자, r은 진앙으로부터 거리(m)이다. 한편, 표면파 규모(M_s)의 에너지(J) 공식은 식 (8)과 같다. 즉, 표면파의 단위 부피당 에너지(J/m^3)는 식 (9)와 같다.

$$E = 10^{4.8 + 1.5M_s} \qquad I_{av} = \frac{10^{4.8 + 1.5M_s}}{2\pi r d v \tau}$$

식 (8) 식 (9)

식 (9)에서 d는 표면파의 유효 깊이, v는 파동의 속도이며, τ는 파동의 지속 시간의 폭이다. 본 연구에서는 이를 T로 근사하여 식 (9)를 식 (10)과 같이 변형하여 작성하였다.

$$I_{av}(r) = \frac{10^{4.8+1.5M_s}}{2\pi r d v T}$$

식 (10)

조화파의 단위 부피당 에너지(J/m³)는 식 (11)과 같이 표현될 수 있으므로, 식 (11)을 진폭 A에 대한 식으로 표현하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{av}(r) = \frac{1}{2}\rho\omega^2 A^2$$

식 (11)

$$A = \frac{1}{\omega}\sqrt[2]{\frac{2I_{av}(r)}{\rho}}$$

식 (12)

식 (13)은 식 (10)을 식 (12)의 $I_{av}(r)$에 적용한 식이다. 식 (13)을 식 (14)의 A_0에 대입하여 식을 정리해주면 식 (15)와 같은 형태가 나오게 된다.

$$A_0 = \frac{1}{\omega}\sqrt[2]{\frac{10^{4.8+1.5M_s}}{\pi\rho r d v T}}$$

식 (13)

$$PGA = A_0 \exp(-\frac{\pi}{Q}\times\frac{r}{\lambda})\omega^2$$

식 (14)

$$PGA = \sqrt[2]{\frac{10^{4.8+1.5M_s}}{\pi\rho r d v T}} \times \exp(-\frac{\pi}{Q}\times\frac{r}{\lambda})\omega$$

식 (15)

본 보고서에서는 산출한 단일주파수 성분식을 최종적으로 GMPE로 확장하는 것이 목표이므로, 여러 상수들을 단순화시키는 작업을 거쳐야한다.

3. 물리적으로 산출한 단일주파수 성분식의 단순화

먼저 식 (15)에서 λ와 ω, T를 정의에 따라 단순화 후, 식을 정리하면 식 (16)와 같은 형태로 정리된다.

$$PGA = \sqrt[2]{\frac{f}{\pi\rho r d v}} \times \exp(-\frac{\pi}{Q}\times\frac{fr}{v}) \times 2\pi f \times 10^{2.4+0.75M_s}$$

식 (16)

식 (16)는 표면파를 바탕으로 계산된 공식이므로, ρ를 지각의 평균 밀도로, v를 한반도의 표면파 속도를 이용하여 대입할 것이다. 대륙 상층 화강암 지각의 평균 밀도[1)]는 2700kg/m³로 가정하겠다. 그리고 v는 지각의 일반적인 상태인 포아송체라고 가정한다면 표면파의 속도는 전단파의 약 0.92배[2)]이다. 한반도의 평균 전단파 속도[3)]는 지표 부근에서 2.6km/s, 깊이 1km에서는 약 3.2km/s이다. 평균 전단파 속도를 중앙값인 2.9km/s라고 둔다면, 한반도의 평균적인 표면파의 속도는 약 2.67km/s (2670m/s)라고 예측할 수 있다. 또한, 한반도의 비탄성 감쇠함수인 Q[4)]는 1274.361이므로, 식 (16)을 식 (17)과 같이 작성할 수 있다.

$$PGA = \sqrt[2]{\frac{f}{7209000\pi rd}} \times \exp(-\frac{\pi}{1274.361} \times \frac{fr}{2670}) \times 2\pi f \times 10^{2.4+0.75M_s}$$

식 (17)

또한, 유효 깊이인 d는 레일리파 기준 파장의 0.4배[5]이므로, d를 주파수 f에 대한 식인 식 (18)과 같이 작성할 수 있다. 여기서, v는 2670m/s이므로 식 (19)와 같이 작성할 수 있다. 즉, 식 (17)의 d를 식 (19)로 대입하여 식 (20)으로 쓸 수 있다.

$$d = 0.4\frac{v}{f} \qquad d = \frac{1068}{f}$$

식 (18) 식 (19)

$$PGA = \sqrt[2]{\frac{f^2}{9141012000\pi r}} \times \exp(-\frac{\pi}{1274.361} \times \frac{fr}{2670}) \times 2\pi f \times 10^{2.4+0.75M_s}$$

식 (20)

식 (20)을 정리하여 간단히 나타나게 되면 식 (21)과 같이 정리가 됨을 알 수 있다.

$$PGA = \frac{2\pi}{95613} f^2 \times \sqrt[2]{\frac{1}{\pi r}} \times \exp(-\frac{\pi fr}{3402543.87}) \times 10^{2.4+0.75M_s}$$

식 (21)

식 (21)에서 수할 수 있는 PGA는 m/s^2단위이므로, 일반적으로 많이 이용하는 cm/s^2 단위로 변환하게 되면 식 (22)와 같은 공식이 된다는 것을 알 수 있다.

$$PGA(gal) = \frac{200\pi}{95613} f^2 \times \sqrt[2]{\frac{1}{\pi r}} \times \exp(-\frac{\pi fr}{3402543.87}) \times 10^{2.4+0.75M_s}$$

식 (22)

또한, M_s를 M_w와 같다고 가정하도록 하겠다. 단, 이 가정은 $M_w > 8$의 거대 지진에서는 큰 오차가 발생할 수 있음을 본 연구의 한계로 둔다.

4. GMPE로의 확장

본 연구에서 제시한 식 (22)는 단일주파수의 gal 성분식이다. 지진의 PGA값은 단일 주파수로만 정의되지 않기에, 이를 GMPE로 확장하려면 주파수의 전역화 과정을 거쳐야한다. 식 (22)를 $a_f(f,r,M_s)$라고 정의한다면, 이를 이용한 GMPE 식은 식 (23)과 같게 된다.

$$PGA(r,M_s) = a\sqrt[2]{\int_{f_1}^{f_2} a_f(f,r,M_s)^2 S(f)\,df}$$

식 (23)

식 (23)에서의 f_1은 지진파의 최저주파수, f_2는 최고 주파수이다. 또한, $S(f)$는 로그정규분포의 확률밀도함수로, 식 (24)와 같다.

$$S(f) = \frac{1}{f\sigma\sqrt[2]{2\pi}} e^{-\frac{(\ln f - \ln f_c)^2}{2\sigma^2}}$$

식 (24)

식 (24)에서 f_c는 PGA의 중심 주파수로, 본 보고서에서는 5Hz로 가정하며, 로그 정규 σ를 0.7로 가정하겠다. 보통 PGA는 고주파 성분에 민감하며, 주로 강진동 분석에서 수 Hz ~ 수십 Hz의 대역을 다루기에 이와 같은 가정값을 설정하였다. 가정값을 식 (24)에 적용한다면 식 (25)와 같은 형태가 된다.

$$S(f) = \frac{7}{10f\sqrt[2]{2\pi}} e^{-\frac{(\ln f - \ln 5)^2}{0.98}}$$

식 (25)

식 (23)에 식 (22)와 식 (25)를 적용한뒤, f_1을 0.5Hz, f_2를 20Hz로 가정하면 식 (26)과 같은 형태가 된다.

$$PGA(r, M_s) = a\sqrt[2]{\int_{0.5}^{20} \left(\frac{200\pi}{95613} f^2 \times \sqrt[2]{\frac{1}{\pi r}} \times e^{\left(-\frac{\pi f r}{3402534.87}\right)} \times 10^{2.4 + 0.75M_s}\right)^2 \times \frac{7}{10f\sqrt[2]{2\pi}} e^{-\frac{(\ln f - \ln 5)^2}{0.98}} df}$$

식 (26)

5. 물리적 산출 GMPE의 검토

물리적으로 산출한 GMPE인 식 (26)의 정확도를 검토하기 위해, 국내 주요 지진의 규모별 지반운동 특성 및 관측소별 가속도 계측 데이터를 바탕으로 수치적분을 수행한 결과, 상수 a값이 약 0.03585일 때, 평균절대오차(MAE)값은 1.672(gal), 평균제곱근오차(RMSE)값은 4.44(gal)로 산출되었다. 또한, 결정계수(R^2)은 63.21%, Bias는 0.4077gal로 나타났다. 또한, 상용로그를 적용한 경우, MAE 0.229, RMSE 0.2889로 산출되었다. 또한, R^2은 39.41%로 나타났다. 단, 식 (26)은 로그 정규식을 이용하였고, Q값 또한 주파수에 비의존적인 상숫값을 이용하였으며, 지반 조건(30m깊이까지의 평균 전단파 속도, V_{s30})을 고려하지 않았다는 한계점이 있다. 따라서, 추후 연구에서 Brune ω^2 지진원 스펙트럼 지반 조건과 주파수 의존형 Q값을 넣은 계량형 GMPE를 제작한다면 더욱 높은 정확도를 기대할 수 있을 것이다.

---

1) William Lowrie, 「기본 지구물리학」, 임형래, 엄주영, 오주원, 시그마프레스, 2022, 127쪽
2) William Lowrie, 「기본 지구물리학」, 임형래, 엄주영, 오주원, 시그마프레스, 2022, 174쪽
3) 정희옥, 장용석, 조봉곤, 「Upper-Crust Shear-Wave Velocity of South Korea Constrained by Explosion and Earthquake Data」, 대한지질학회, 2011, 60쪽
4) 조남대, 박창업, 「추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강지진동 연구」, 한국지진공학회, 2001, 20쪽
5) William Lowrie, 「기본 지구물리학」, 임형래, 엄주영, 오주원, 시그마프레스, 2022, 174쪽