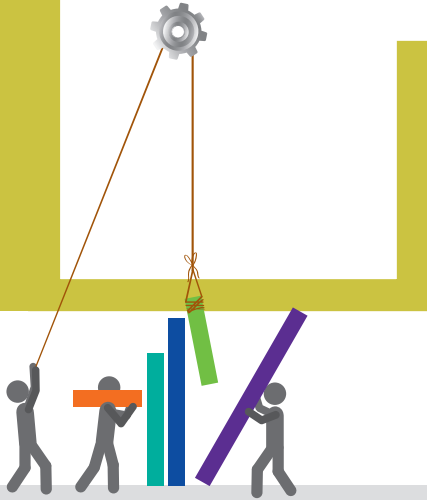


# 지반운동 예측식을 이용한 부지응답스펙트럼 작성

## Generating Site-Specific Response Spectrum Based on the Ground Motion Prediction Equation



SCIENTIFIC ARTICLE

### 1. 머리말

지반운동의 응답스펙트럼은 지진으로 인한 지반운동의 특성을 파악하고 구조물의 응답을 평가하기 위해서 오랫동안 국내외에서 구조물 설계와 성능평가에 활용되고 있다. 응답스펙트럼은 특정지역의 지진위험도를 평가하기 위한 기본요소로 사용되며, 부지별 고유의 지질 조건 및 지반 동적 특성과 관련된 부지 효과(site effects)에 따라 특정 주기 부근에서 증폭 또는 감폭되어 나타난다. 이러한 중요성에 입각하여 국내외에서는 응답스펙트럼에 대한 연구의 일환으로 특정지역에서 발생가능한 지반운동의 최대 지반 가속도(Peak ground acceleration, PGA)와 스펙트럴 형상(Spectral shape)을 예측하고 이에 근거하여 부지 응답스펙트럼(Site-specific response spectrum)을 작성하기 위한 노력들이 지속되어 왔다. 이에 본 고에서는 지반운동에 영향을 미치는 주요 변수에 근거한 지반운동예측식에 대해 소개하며 이를 토대로 특정 지역의 부지응답스펙트럼을 작성하는 방법에 대해 기술하고자 한다.

### 2. 지반운동 예측식(Ground Motion Prediction Equation, GMPE)

#### 2.1 지반 감쇠식에 따른 최대지반가속도 예측

지반 감쇠식은 지진이 발생하여 지진파가 전파되어 갈 때 진원지로부터 거리가 멀어짐에 따라 지진에너지가 감소되는 정도를 나타내는 식으로 진원지에서 건축물이 위치한 지역 사이의 지반 특성에 따라 큰 차이를 보인다(Fig. 1). 지반 감쇠식은 지진발생시 관심지역의 최대지반가속도를 예측하기 위한 관계식으로 과거 지진발생시 진앙지에서 최대 지반운동과 거리별 관측된 지반가속도 값 등의 관측 자료를 기초로 작성된다.



신 동 현 Shin, Dong Hyeon

서울시립대학교,  
건축공학과 박사과정  
thymos19@gmail.com



김 형 준 Kim, Hyung Joon

서울시립대학교,  
건축공학과 부교수  
hyungjoonkim@uos.ac.kr

Model	Region	Reference	Weighting	Equation
1	South Korea	Bagg, 1998	0.5	$\ln PGA = 0.4 + 1.2M - 0.76 \ln R - 0.0094R$ where, $R = \sqrt{R_{epi}^2 + 10^2}$
2	Central, Eastern North America	Toro, Abrahamson and Schneider, 1997	0.3	$\ln PGA = 1.76 + 1.2M - 1.28 \ln R - 0.0018R + 0.05 \max(\ln(R/100), 0)$ where, $R = \sqrt{R_{epi}^2 + 9.3^2}$
3	North China	Zhixin, Xiaobai and Jingru, 1984	0.2	$\ln PGA = 5.0244 + 0.5442M - 1.002 \ln(R_{epi} + 8)$

Table. 1 최대 지반가속도 예측에 선정된 감쇠식

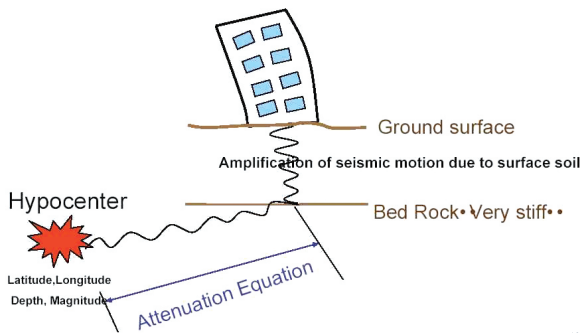
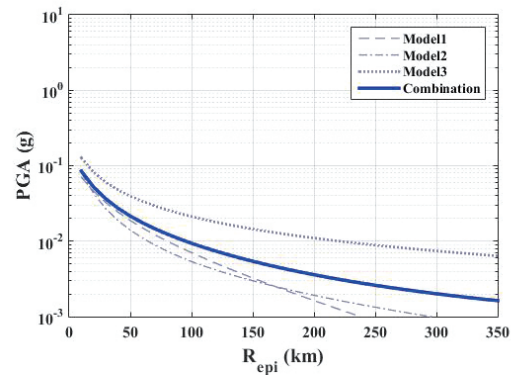


Fig. 1 지반 감쇠식의 개념

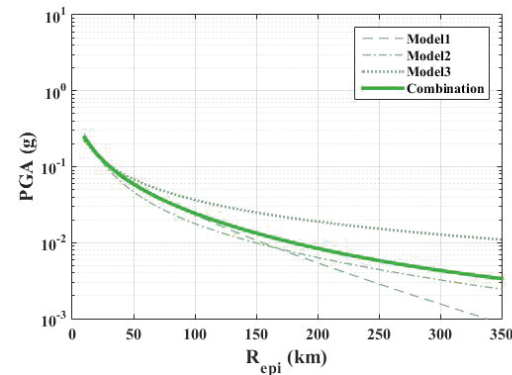
국내에서는 한국원자력연구원이 가장 활발히 지반감쇠식을 연구하는 기관 중의 하나로 여러 연구자들에 의해 관련 논문들이 발표되고 있다. 대표적으로 최인길 등 (2004)이 발표한 논문에 의하면 국내 원자력 발전소 부지에서 사용한 지반 감쇠식을 소개하고 있는데 1) 국내 지진데이터와 지반 특성을 고려한 감쇠식, 2) 미국 중동부 지역의 대표 감쇠식, 3) 중국 지역의 감쇠식을 모두 사용하고 중요도에 따른 가중치를 선정하여 최대 지반가속도를 예측하였다. 지반 감쇠식에는 부지응답에 영향을 미치는 주요변수로서 지진규모 Magnitude, M, 진앙거리 Epicentral distance,  $R_{epi}$ 가 사용되었으며 각 감쇠식을 정리하면 Table 1과 같다. Fig. 2에서는 해당 연구에서 고려한 지반 감쇠식을 활용하여 지진 규모(M=5, 6, 7)별 진앙거리 증가에 따른 최대지반가속도 예측 값의 변화를 나타내고 있다.

## 2.2 스펙트럴 가속도응답 예측

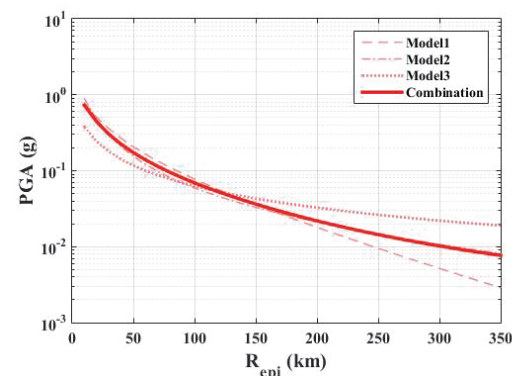
스펙트럴 가속도를 예측하기 위한 연구들은 강진지역인 이탈리아, 그리스, 일본, 미 서부를 중심으로 각 지역



a. 지진규모 M=5.0

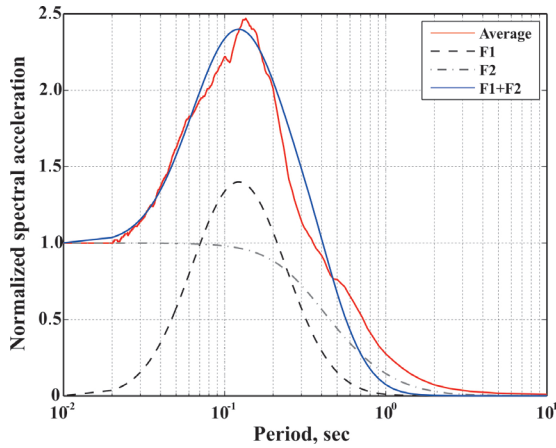


b. 지진규모 M=6.0

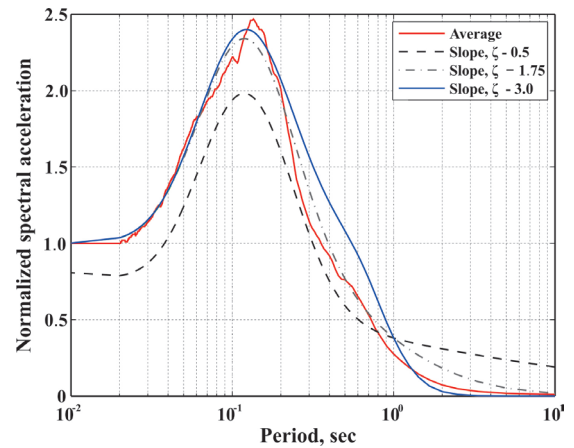


c. 지진규모 M=7.0

Fig. 2 규모에 따른 최대지반가속도 예측 값



a. Approximation function fit to average spectral shape



b. Approximating the influence of post-peak slope

Fig. 3 근사스펙트럴 함수의 생성과정 - 오대산 지진(2007)의 예(신동현 등, 2016)

의 지역적 특성을 반영하여 발전되어 왔다(Ambraseys et al., 1996; Kanno et al. 2006). 국내에서도 최대 지반가속도를 예측하기 위한 유사한 연구들이 다수 수행되었으며 해당 연구들에서는 중약진 지역으로서 한반도의 지진원 및 지반운동 특성을 고려하여 건축물 내진설계에 사용되는 스펙트럴 가속도를 예측하고자 하였다.

신동현 등(2016)의 연구에서는 구조물의 지진응답에 중요한 영향을 미치는 스펙트럴 가속도를 예측하기 위한 연구의 일환으로 강진지역의 지반운동 예측에 널리 활용되고 있는 Graizer and Kalkan의 연구(2009)에 기반하여 국내 지반운동 특성에 맞는 스펙트럴 가속도 예측 방법을 제시하였다. 해당 연구에서는 지반운동에 영향을 미치는 변수들을 진앙거리( $R$ ), 지진규모( $M$ ), 전단파 속도( $V_{S30}$ )로 분류한 후 다중회귀분석을 통하여 서로간의 상관관계분석을 수행하여 경험식(empirical equation)과 예측계수(estimator coefficient)를 제시하고 있다. 이때 스펙트럴 형상을 결정짓는 변수들을

- 1) 스펙트럴 형상의 최대값,  $I(M, R)$ ,
- 2) 스펙트럴 형상의 최댓값을 나타내는 주기(지배주기),  $\mu(M, R, V_{S30})$ ,
- 3) 스펙트럴 형상의 폭,  $S(M, R)$ ,
- 4) 최댓값 이후(post-peak) 그래프 기울기의 변곡점 위치,  $T_{SP}(M, R, V_{S30})$

등 총 4가지로 분류하여 각각의 수치들을 진앙거리( $R$ ), 지진규모( $M$ ), 전단파속도( $V_{S30}$ )에 의해 결정되도록 통계적으로 처리하였다.

Fig. 3의 오대산 지진(2007,  $M=4.55$ )에 대한 평균 스펙트럴 형상에서 예시적으로 제시하는 바와 같이 식 (1)로 표현되는 지배주기 중심으로 좌우 대칭을 이루는 종모양의 포락함수,  $F_1(T)$ 와 식 (2)로 표현되는 초기값 이후 단조감소 경향을 나타내는 함수,  $F_2(T)$ 를 토대로 스펙트럴 형상을 예측하는 근사 스펙트럴 형상 함수가 제안되었다.

$$F_1(T) = I(M, R) e^{\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(T) + \mu(M, R, V_{S30})}{S(M, R)} \right)^2} \quad (1)$$

$$F_2(T) = \left[ \left( 1 - \left( \frac{T}{T_{SP}} \right)^\zeta \right)^2 + 4D_{SP}^2 \left( \frac{T}{T_{SP}} \right)^\zeta \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서,  $T$ 는  $F_1(T)$ 와  $F_2(T)$ 의 함수관계를 정하기 위한 매개변수로서 주기(초)이다.  $D_{SP}$ 는 스펙트럴 형상의 최댓값 이후에 나타나는 감쇠정도를 나타내며,  $\zeta$ 는 장주기에서 스펙트럴 형상의 감쇠정도를 나타낸다. Fig. 6(b)에서는 장주기 영역에서 평균 스펙트럴 형상을 근사 스펙트럴 형상 함수의 계수를 통해 최적화시키는 과정을 나타내고 있다. 이 때 스펙트럴 형상의 최댓값, 지배주기 및 폭을 결정하여 초기 근사 스펙트럴 형상 함수를 추

$I(M,R)$			$\mu(M,R,V_{S30})$				$T_{SP}(M,R,V_{S30})$				$S(M,R)$		
$a_1$	$a_2$	$a_3$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$s_1$	$s_2$	$s_3$
1.7816	-3.9698	-0.0014	-0.00137	-0.28777	-0.000202	3.6138	-0.0000421	0.079730	-0.00000267	-0.04886	0.000259	0.08872	0.27630

Table 2 근사 스펙트럴 형상함수에 대한 하위 함수의 예측계수(신동현 등, 2016)

정한다. 이후  $D_{SP}=1.75$ ,  $\zeta=1.25$ 의 수치로 곡선 근사curve fitting하여 장주기에서의 스펙트럴 형상 함수를 평균 스펙트럴 형상에 최적으로 근사화시켰다. 앞서 언급한  $F_1(T)$ 와  $F_2(T)$ 를 더한 식을 기본 계형으로 하여 예측하고자 하는 지진기록의 근사 스펙트럴 형상 함수,  $SA_{norm}(T)$ 는 다음 식 (3)과 같이 정리된다.

$$SA_{norm}(T) = I(M,R)e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(T)+\mu(M,R,V_{S30})}{S(M,R)}\right)^2} + [(1+(T/T_{SP})^\zeta)^2 + 4D^{2SP}(T/T_{SP})^\zeta]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

이 때, 그래프 형상을 결정하는 변수들( $\mu, S, T_{SP}$ )과 지반운동을 대표하는 변수들( $M, R, V_{S30}$ )간의 일대일 상관관계를 분석하여 식 (4)~(7)과 같이 하위함수를 작성하였다.

$$\mu(M, R, V_{S30}) = m_1R + m_2M + m_3V_{S30} + m_4 \quad (4)$$

$$T_{SP}(M, R, V_{S30}) = t_1R + t_2M + t_3V_{S30} + t_4 \quad (5)$$

$$S(M, R) = s_1R + s_2M + s_3 \quad (6)$$

$$I(M, R) = (a_1M + a_2)e^{a_3R} \quad (7)$$

여기서  $m_1 \sim m_4, t_1 \sim t_4, s_1 \sim s_3$  그리고  $a_1 \sim a_3$ 는 하위함수와 실제값 간의 오차를 최소화하는 예측계수 estimator coefficient이다. 이와 같은 예측계수의 도출은 변수  $I, \mu, S, T_{SP}$ 를 출력변수로 하고, 하위함수의 변수  $M, R, V_{S30}$ 를 예측변수로 고려하는 다중선형회귀분석의 방법을 사용한다. Table 2에서는 제시된 예측계수들을 정리하였다.

Fig. 4에는 최근 경북 경주 남남서 8km 떨어진 지역에서 발생한 지진(경주지진, '16. 9. 13, 규모 5.8)에 대하여 관

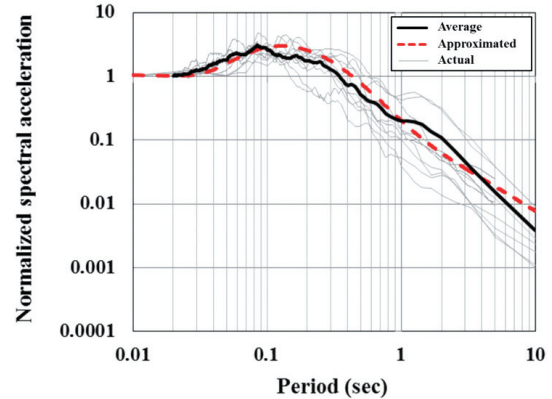


Fig. 4 관측소 계측 데이터와 예측된 스펙트럴 형상의 비교(경주지진의 예)

측소에서 계측된 응답스펙트럼의 스펙트럴 형상과 근사 스펙트럴 형상 함수를 통해 예측된 스펙트럴 형상을 비교하고 있다. 경주지진의 경우 지진계측이 시작된 1978년 이후 관측된 지진기록 중에서 가장 큰 규모의 지진이 며, 비교적 많은 관측소에서 일정 크기 이상의 지진파가 계측되어 스펙트럼 분석에 의미가 있다고 볼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 근사 스펙트럴 형상 함수에 의해 예측된 스펙트럴 형상이 관측소에서 계측된 응답스펙트럼의 평균 스펙트럴 형상과 전체적인 그래프 경향이 유사하게 나타났으며 스펙트럴 형상의 최댓값과 최댓값 이후의 감소경향이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 지반운동 예측식을 이용한 부지응답스펙트럼 작성

앞서 언급한 지반운동예측식을 활용하여 특정지역의 부지응답스펙트럼을 작성하기 위해서는 진앙거리와 지진규모를 바탕으로 대상 부지에서 발생 가능한 최대지반가속도(PGA)를 예측하고 이후 앞서 고려한 진앙거리, 지진규모에 추가적으로 상부 30m 깊이 평균전단파속도



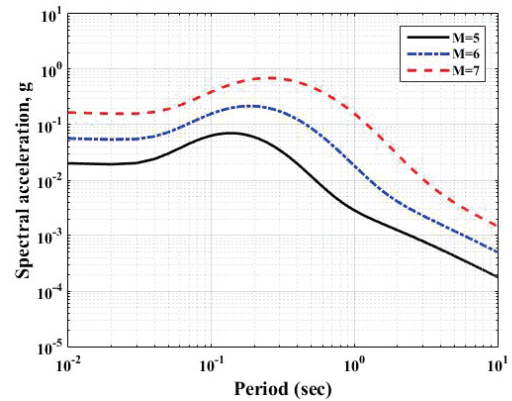
를 변수로 스펙트럴 형상을 도출하는 과정이 선행되어야 한다. 여기서 근사 스펙트럴 형상 함수를 통해 예측한 특정 부지의 스펙트럴 형상은 최대지반가속도에 대한 주기별 스펙트럴 가속도를 정규화한 결과로써, 이를 통해 부지 응답스펙트럼 Site-specific response spectrum 을 작성하기 위해서는 식 (8)과 같이 도출한 스펙트럴 형상을 예측한 최대지반가속도에 앵커링anchoring 하는 과정이 요구된다.

$$SA = PGA \times SA_{norm} \quad (8)$$

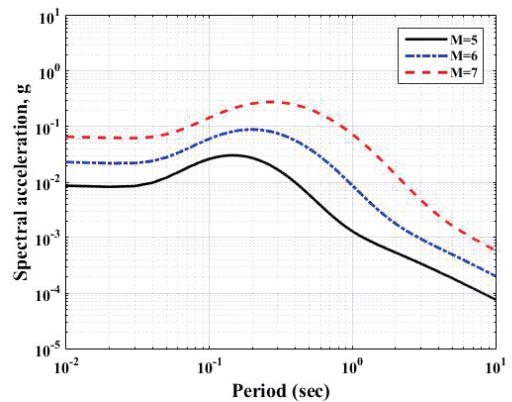
이와 같은 과정을 토대로 특정지역에 대한 부지응답스펙트럼을 예측하는 과정을 예시를 통해 정리하였다. 부지응답스펙트럼을 작성하고 하는 특정지역으로 활성단층으로부터의 진앙거리가 50km, 100km, 200km에 위치한 3개의 부지를 가정하였으며 해당 부지들은 모두 SD지반에 해당하는 상부 30m 깊이 평균전단파속도 250m/sec를 가지는 것으로 가정하였다. 우선 발생한 지진의 규모가 5.0, 6.0, 7.0인 경우에 대하여 각각 대상 부지의 최대지반가속도 값을 예측하였으며 이를 Table 3에 정리하였다. 대상 부지의 최대지반가속도 값은 지진 규모가 커질수록 증가하며 진앙거리가 커질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이후 근사 스펙트럴 형상 함수를 활용하여 고려한 지진규모(M=5.0, 6.0, 7.0)와 진앙거리(R=50, 100, 200km) 및 상부 30m 깊이 평균전단파속도(V<sub>S30</sub>=250m/sec)를 변수로 스펙트럴 형상함수를 작성하여 앞서 예측한 최대지반가속도 값에 앵커링하면 Fig. 5와 같이 부지응답스펙트럼을 작성할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 예측된 부지응답스펙트럼은 진앙거리가 커지고 지진규모가 커질수록 진앙거리가 장주기 영역으로 이동하는 특징을 적절히 반영하고 있다.

지진규모	진앙거리		
	50km	100km	200km
M=5.0	0.021	0.009	0.004
M=6.0	0.059	0.024	0.008
M=7.0	0.173	0.069	0.022

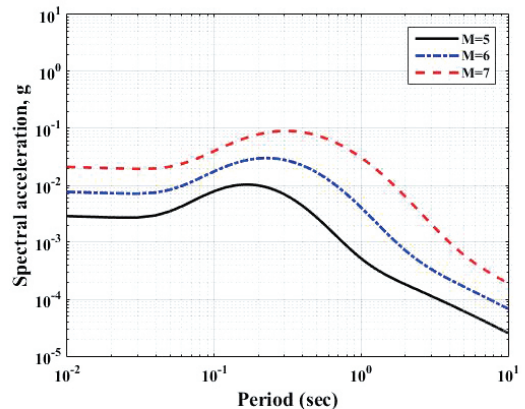
Table. 3 대상 부지의 최대지반가속도 예측값(단위 : g)



a. 진앙거리 50km 부지



b. 진앙거리 100km 부지




c. 진앙거리 200km 부지

Fig. 5 부지응답스펙트럼의 작성결과

#### 4. 맺음말

본 고에서는 구조실무자들에게 익숙한 지진규모, 진앙거리, 전단파 속도 등의 공학적 지표를 활용하여 특정 지역의 최대지반가속도와 스펙트럴 형상을 예측할 수

있는 방법과 이를 이용하여 응답스펙트럼을 예측하는 방법에 대하여 기술하였다. 이를 통하여 향후 국내 주요 지역에 대한 구조물 설계 및 성능평가지 활용되는 부지 응답스펙트럼을 작성함에 있어 적용성을 향상시키는데 도움이 되고자 하였다. 

● **참고문헌 references** ●

- 1 최인길, Masato, N., 전영선, 연관희 (2004) 확률론적 지진재해도를 이용한 시나리오 지진의 결정기법에 관한 연구, 한국지진공학회논문집, 8(6), pp. 23-29.
- 2 Toro, G.R., Abrahamson, N.A. and Schneider, J.F. (1997) Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: Best estimates and uncertainties, Seismology Research Letters, 68(1), pp. 41-57.

● **참고문헌 references** ●

- 3 Baag, C.E. (1997) Seismic wave attenuation in the Korean peninsula. International Workshop & Seminar on Probabilistic Seismic Hazard Analysis held at Daejeon on Nov., pp. 17-20.
- 4 Zhixin, Xiaobai and Jingru (1984) Attenuation relation of ground motion in northern China, Proceedings of Eighth World Conference on Earthquake Engineering Vol II, 8(2), pp. 335-342
- 5 Abroseys N. N., Simpson, K. A., Bommer, J. J., (1996) Prediction of horizontal response spectra in Europe, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 25, pp. 371-400.
- 6 Kanno T., Narita A., Morikawa N., Fujiwara Y. (2006) A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, Bull. Seismol. Soc. Am., 96, pp. 879-897.
- 7 Graizer V., Kalkan E. (2009) Prediction of spectral acceleration response ordinates based on PGA attenuation, Earthquake Spectra, 25(1), pp. 39-69.
- 8 신동현, 홍석재, 김형준 (2016) 국내 지진기록의 통계적 분석에 기반한 스펙트럴 가속도 응답 예측기법, 한국지진공학회 논문집, 20(1), pp. 45-54.