

우리나라 건축물 설계 스펙트럼에 상응하는 지진규모와 진앙거리의 추정

Estimation of Earthquake Magnitude-Distance Combination Corresponding to Design Spectrum in Korean Building Code 2016

정기현^{1)*} · 이한선¹⁾ · 황경란¹⁾

Jeong, Gi Hyun^{1)*} · Lee, Han Seon¹⁾ · Hwang, Kyung Ran¹⁾

¹⁾고려대학교 건축사회환경공학부

¹⁾School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

/ A B S T R A C T /

In this study, to estimate the combination of earthquake magnitude (M_w) and distance (R) corresponding to the design spectrum defined in Korean Building Code (KBC) 2016, the response spectra predicted from the attenuation relationships with the variation of M_w (5.0~7.0) and R (10~30km) are compared with the design spectrum in KBC 2016. Four attenuation relationships, which were developed based on local site characteristics and seismological parameters in Southern Korea and Eastern North America (ENA), are used. As a result, the scenario ground motions represented by the combinations of M_w and R corresponding to the design spectrum for Seoul defined in KBC 2016 are estimated as (1) when $R=10$ km, $M_w=6.2\sim6.7$; (2) when $R=15$ km, $M_w=6.5\sim6.9$; and (3) when $R=20$ km, $M_w=6.7\sim7.1$.

Key words: Design earthquake, Scenario ground motion, Attenuation relationship, Response spectrum

1. 서론

2015년 12월 전북 익산에서 규모 3.9의 지진이 발생한 이후, 지진 및 내진 설계에 대한 대중의 관심이 높아지고 있다. 기상청과 언론에서는 지진의 세기를 규모로 표현하고 있기 때문에, 대중은 내진설계가 된 건물이라면 어느 정도 규모의 지진을 견딜 수 있는지 의문을 갖게 된다.

일반적으로 지진은 지반 단층의 파열과 지반 운동 모두를 포괄한다. 그러나 내진 설계에서는 지반 운동에 저항하는 것이 주목적이므로 지진 규모와 거리보다 유효 지반 가속도 또는 최대 지반 가속도와 같은 지반 운동의 크기로 지진의 세기를 표현한다. 이러한 이유로 현재까지 건축구조기준 (KBC 2016 [1])에서 정의하는 설계지진은 지진 규모와 거리로 표현된 적이 없다.

지반운동은 계측장비를 이용하여 기록되기도 하지만, 확률론적 및 추계론적 방법을 이용하여 예측하기도 한다. 이러한 예측방법은 관측된 데이터

를 기반으로 분석이 수행되며, 데이터가 양과 질이 높아질수록 예측의 정확도가 증가한다. 미국의 PEER에서는 미 서부와 동부를 대상으로 Next Generation Attenuation(NGA) 프로젝트를 진행하여 관측된 지진파를 기록 수집하고, 이를 바탕으로 지진재해도 분석과 지진 규모, 거리, 지반특성 및 지진단층에 따른 감쇠관계를 연구해왔다[2-4]. 우리나라는 현대화된 지진 관측장비를 설치한 이후로 강진발생이 거의 없었기 때문에 지반운동을 예측하기 어려움이 있었으나, 추계학적 방법을 이용하여 강진동 추정연구를 수행하려 노력하고 있다[5, 6]. 기 수행된 예측 연구를 활용하면 지반운동의 특성을 이용하여 지진의 규모와 거리를 역추정하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 건축물의 설계지진에 상응하는 지진 규모 및 거리를 추정하기 위해, 중앙진지역을 대상으로 개발된 감쇠식을 이용하여 규모 및 거리를 달리한 지진파의 응답 스펙트럼을 작성하고, 현 설계 스펙트럼[1]과 비교하였다.

2. 발생가능한 지진과 지진재해도 분해

시나리오 분석을 수행하기 위해 시나리오 지진을 선정하는 대표적인 방법

*Corresponding author: Jeong, Gi Hyun

E-mail: ghaposcale@korea.ac.kr

(Received January 18, 2016; Revised September 26, 2016; Accepted November 24, 2016)

은 결정론적 또는 확률론적인 산정법이 있으며, 역사 지진이나 임의의 지진을 이용하기도 한다. 결정론적 시나리오 지진의 경우 지진의 제한(규모, 거리)을 직접 지정하는 방법이며, 확률론적 시나리오 지진은 재해도 분석을 통해 연간 발생 초과확률에 따라 산정되는 지진이다. 역사 지진을 시나리오 지진으로 활용하는 방법도 있으나, 우리나라의 경우 과거 발생했던 지진은 고문헌에서만 존재할 뿐 정확히 계측된 자료가 존재하지 않으므로 적합하지 않다.

확률론적 시나리오 지진은 확률론적 지진 재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis; PSHA)으로 산정할 수 있으며 이 이론적인 기초는 Cornell[7]에 의해 제안되었다. 이는 임의 부지에서 지진의 연간 발생 초과확률과 지진동강도(최대지반가속도(PGA), 주기별 스펙트럼가속도 등)와의 관계를 분석하는 이론이다. 그 결과로 재해도 곡선을 얻을 수 있으며, Fig. 1과 같이 대상 지역(예: San Jose [8])의 지진 연간 발생 초과확률에 따른 PGA를 예측할 수 있다. 그러나 재해도 분석을 통해 구조물의 동적 해석 시 필요한 지진동 특성(지속시간, 주기 특성 등)에 관한 모든 정보를 얻기는 어렵다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 지진 재해도 분해(Disaggregation of seismic hazard)연구[9]가 수행되었으며, 최근 우리나라에서도 관련 연구가 수행되고 있다[10].

지진 재해도 분석으로는 대상 지역의 지진단층 및 지진원을 파악하여, 규모와 거리에 따른 지진발생확률을 예측할 수 있다. 반면 지진 재해도 분해는 역으로 지진발생확률을 기반으로 지진의 규모와 거리를 추정할 수 있다. 예를 들어, 지진재해도 분석을 통해 대상지역으로부터 20 km 떨어진 지역에서 발생할 수 있는 규모 4.7 지진 또는 70 km 떨어진 지역에서 발생할 수 있는 규모 6.1 지진으로 인해 최대지반가속도가 0.1 g를 넘는 지진의 연간 발생확률이 1%라는 결론을 얻을 수 있다. 반면, 지진 재해도 분해를 수행하면 최대지반가속도가 0.1 g를 넘는 지진의 연간 발생확률이 1%인 지역에 발생 가능한 지진은 대상지역으로부터 20 km 떨어진 지역에서 발생할 수 있는 규모 4.7 지진 또는 70 km 떨어진 지역에서 발생할 수 있는 규모 6.1 지진이라는 결과를 도출할 수 있으며, 이를 시나리오 지진으로 이용할 수 있다. 이와 같은 분석을 수행하기 위해서는 대상지역의 지질과 지진에 관한 수학적 데이터가 필요하나, 우리나라에는 아직 충분한 기록이 있지 않음으로 우리나라에서 확률론적 방식을 활용하는 데는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 확률론적 지진 재해도 분해를 수행하지 않고 확률론적 지진 재해도 분석 연구를 기반으로 수립된 건축물의 설계 스펙트럼을 바탕으로 결정론적 산정법을 이용하여 발생 가능한 지진의 규모와 거리를 예측하고자 한다.

3. 우리나라 건축물의 설계지진

현재 우리나라 건축구조기준(KBC 2016 [1])에서는 최대지진(Maximum Considered Earthquake)을 재현주기 2400년의 지진위험도를 정의하고 있으며, 이는 50년에 2% 초과 발생 확률을 가진 지진과 유사하다. KBC 2016에서는 최대지진에 따른 유효지반가속도(지역계수, S) 값도 제시하고 있으며, 설계 스펙트럼 값은 최대지진 유효스펙트럼가속도의 2/3값으로 정의하였다. 이러한 정의는 International Building Code (IBC) [11] 내진설계의 철학을 반영한 것이다. IBC 설계스펙트럼은 지반을 5단계인 A~E로 분류하고, 그에 부합하는 설계스펙트럼을 제공하고 있다. KBC 2016에서는 IBC 2015와 유사한 형태로 설계스펙트럼을 제시하고 있으며, Fig. 2와 같이 S_c 와 S_D 지반에서 기반암까지의 깊이가 20 m 이하일 때 다소 증가된 가속도 일정구간의 스펙트럼 값과 감소된 속도일정구간의 스펙트럼 값을 지진 설계스펙트럼을 추가로 제공한다.

이렇듯 우리나라를 비롯한 해외의 국가 및 기관에서 지정하는 설계지진은 지진의 발생확률과 그에 따른 스펙트럼 가속도 값으로서 표현이 가능하며, 이는 앞서 말한 지진재해도 분석을 통해 얻을 수 있는 발생확률과 등재해도곡선을 이용해 정의 되었다. 등재해도 곡선은 근거리에서 발생한 지진과 원거리에서 발생한 지진의 영향을 반영하여 거리와 지진규모 변화에 따른 스펙트럼 가속도를 모두 나타낼 수 있다. 건축물의 설계 기준 또한 이러한 개념을 적용하였기 때문에 설계 지진에 부합하는 시나리오 지진은 특정 규모 및 거리의 지진이 아닌 근거리에서 발생한 작은 규모의 지진, 원거리에서 발생한 큰 규모의 지진에 의한 영향을 모두 반영한 결과이다. 원거리에서 발생한 지진은 비교적 장주기 영역에 큰 영향을 주고, 근거리에서 발생한 지진은 단주기 영역에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다.

유럽에서는 구조물 설계에 관한 통합기준인 Eurocode를 작성하였으며, 그 중 Eurocode 8(EC8)[12]은 내진설계에 관한 내용을 다룬다. EC8은 우리나라와는 달리 재현주기 475년(50년에 10%초과 발생 확률) 지진에 대해서는 구조요소의 비붕괴(No Collapse)를 목적으로 설계를 수행하며, 재현주기 95년(10년에 10%초과 발생 확률) 지진에 대해서는 구조재와 비구조재의 손상을 제한하는 목적으로 설계를 수행한다. 또한 EC8에서는 설계지진의 응답 스펙트럼을 두 가지(Type 1, 2)로 구분하여 제시하고 있다. 이는 지진원과 지진 규모에 따라 개발되었으며, 대상지역의 예상 표면파 규모

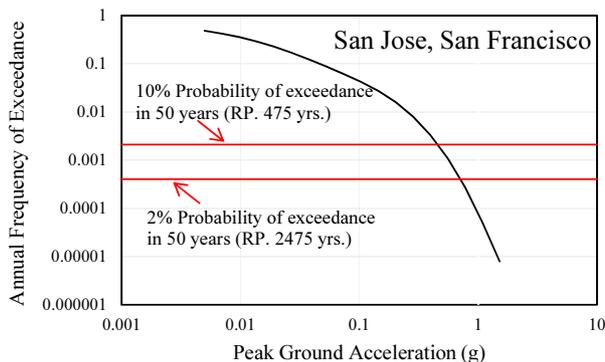


Fig. 1. Example of hazard curve (San Jose, San Francisco[8])

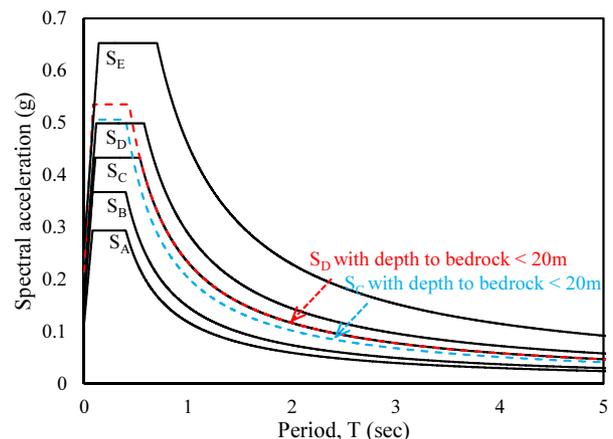


Fig. 2. Design spectra of KBC2016

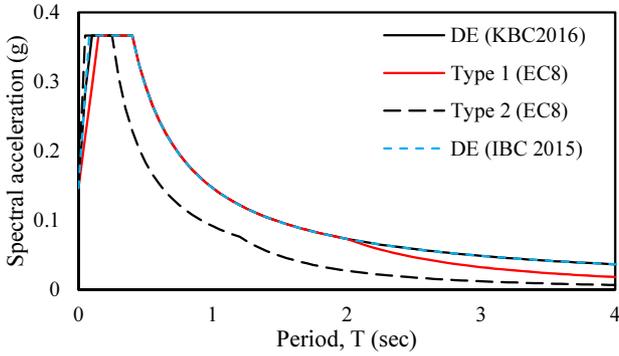


Fig. 3. Comparison of design spectra defined in KBC 2016, Eurocode 8, and IBC 2015

(surface-wave magnitude, M_s)가 5.5 이상(중진 및 강진)일 경우 Type 1을, 5.5 미만(약진)일 경우 Type 2를 사용하도록 추천하고 있다.

Fig. 3은 KBC2016과 EC8, IBC 2015의 설계 스펙트럼 형태를 비교하였다. KBC2016의 설계 스펙트럼은 서울지역(유효지반가속도, $S=0.22g$) 암반지반(Site Class: S_B , $v_{s,30}=760\sim 1500$ m/s)을 대상으로 작성하였다. EC8의 설계 스펙트럼은 이에 상응하는 암반지반(Ground type: A, $v_{s,30} > 800$ m/s)의 두 가지 종류(Type 1, 2) 스펙트럼을 모두 작성하였으며, IBC 2015의 설계 스펙트럼 또한 KBC2016에 상응하는 암반지반(Site Class: B, $v_{s,30}=760\sim 1500$ m/s)을 대상으로 작성하였다. 다만 EC8와 IBC 2015 스펙트럼의 최댓값은 KBC 2016 스펙트럼의 최댓값과 같도록 조정하여 작성하였으며, IBC의 T_L (Long-period transition period, 장주기를 구분짓는 모서리 주기)은 8로 가정하였다.

비교 결과, KBC 2016의 설계 스펙트럼은 EC8의 Type 1($M_s \geq 5.5$) 및 IBC 2015의 설계 스펙트럼과 거의 유사하였다. 단, EC8의 Type 1과 IBC 2015 스펙트럼은 변위일정구간이 2초와 가정된 T_L 인 8초부터 시작하는 반면, KBC 2016의 스펙트럼은 이를 반영하고 있지 않다. EC8의 약진지역을 위한 Type 2 스펙트럼($M_s < 5.5$)은 KBC 2016 스펙트럼과 큰 차이를 보인다. 특히 KBC 2016의 스펙트럼에서 가속도 일정구간이 0.4초까지 인 것에 비해 Type 2 스펙트럼의 가속도 일정구간은 0.25초까지로 매우 짧았다. 이후 Type 2 스펙트럼의 속도 및 변위 일정구간에서도 스펙트럼 가속도 값이 KBC 2016의 값에 비해 상당히 작게 나타났다.

4장에서는 기존에 개발된 감쇠식에 지진 규모(5.0~7.0) 및 거리(10~30 km)를 달리 적용한 지진파의 응답 스펙트럼을 작성하였으며, KBC 2016의 설계 스펙트럼 뿐만 아니라, EC8 Type 2($M_s < 5.5$)의 설계 스펙트럼도 같이 비교하였다.

4. 발생가능한 지진과 설계지진 응답스펙트럼

일반적으로 설계 스펙트럼은 발생 가능한 지진 스펙트럼의 평균값(median response spectrum)에 표준편차(+1 σ)를 더하여 정의하고 있다 [13]. 본 연구에서는 설계 스펙트럼으로서 이상화된 평균+표준편차 응답 스펙트럼과 시나리오 지진파의 등재해도 스펙트럼을 상호 비교하여 설계지진의 지진 규모 및 거리를 역 추정하였다.

Table 1. Definition of distance in each attenuation relationship

Attenuation relationship	Definition of distance
Jo & Baag [14], Eq. (1)	R_h : hypocentral distance
Campbell [15], Eq. (3)	r_{rup} : closest distance to fault rupture
Boore & Atkinson [16], Eq. (4)	R_{JB} : Joyner-Boore distance defined as the closest distance to the surface projection of the fault
Pezeshk et al. [17], Eq. (5)	R_{rup} : closest distance of fault rupture

시나리오 지진파는 지진 규모와 거리를 변수로 둔 총 4가지의 감쇠식(attenuation relationship, or ground motion prediction equation) [14-17]을 사용하였다. 이때 규모는 모멘트 규모(moment magnitude, M_w)를 사용한 반면, 거리의 정의는 각각의 감쇠식마다 달랐으며 이는 Table 1에 정리하였다. 지진의 규모를 나타내는 정의는 대표적으로 국지 규모 M_L , 표면파에 의한 규모 M_s , 체적파에 의한 규모 m_b , 모멘트 규모 M_w 가 있다. M_L 은 600 km 이내의 거리에서 발생한 지진에 대해 지진파의 변위 진폭에 따라 결정된다. 이와 동일한 원리로 600 km 이상 원거리 지진의 지진파를 이용하여 규모를 구할 수 있는데, 체적파 중 P파, 표면파 중 레일라이파를 이용하여 구한 규모가 m_b , M_s 이다. 그러나 규모 6.5를 기준으로 m_b 는 6.5 이상에서 저평가 되며 M_s 는 6.5 이하에서 저평가 되는 경향이 있다. M_w 는 지진파의 진동수에 관계가 없으며 작은 크기의 지진부터 규모 9.5까지의 큰 지진에도 적용이 가능하기에, m_b 와 M_s 가 가지는 문제점을 해결하였다. M_w 는 지진 에너지의 대수(log)값에 비례하고 있다. 본 연구에서 사용된 감쇠식은 국내 개발감쇠식과 미국 중동부를 대상으로 개발된 감쇠식이 사용되었는데, 미국의 감쇠식의 적용성은 강수영 등[18]에 의해서도 시도된 바 있으며, 그 연구에 따르면 미국의 감쇠식은 일반적으로 규모 5 이상 주파수 1 Hz 이상에 적합하다고 표현하였다.

본 연구에서는 편의상 거리를 모두 R 로 표현하였다. Jo & Baag[14]의 감쇠식 사용 시 시나리오 지진의 거리(R)를 진앙거리(epicentral distance)로 정의하여 가정한 깊이로 진원 거리(R_h)를 산정하였으며, Campbell[15], Boore & Atkinson [16], Pezeshk et al. [17]의 식사용 시 시나리오 지진의 거리 R 은 각각 r_{rup} , R_{JB} , R_{rup} 로 정의하였다. 사용된 감쇠식은 모두 암반지반을 대상으로 개발되었으므로, 본 연구에서 비교한 설계 스펙트럼은 모두 암반지반(KBC: S_B)으로 작성하였다. 또한 본 논문에서 작성된 모든 스펙트럼은 5% 감쇠율을 적용하였다.

2003년 Jo and Baag[14]은 우리나라의 지역적 특성을 반영하여 강진동을 추정하기 위해 한반도 남동부에서 관측된 16개의 지진(44개 지진파)으로 감쇠식을 개발하였다. 식 (1)과 (2)는 지진규모와 진앙거리에 따른 감쇠 관계를 나타내며, PGA와 주파수 별 스펙트럼 가속도값의 평균(median)을 추정할 수 있다.

$$\ln PGA \text{ (cm/sec}^2\text{)} = C_0 + C_1 R_h + C_2 \ln R_h - \ln[\min(R_h, 100)] - \frac{1}{2} \ln[\max(R_h, 100)] \quad (1)$$

$$C_k = \xi_0^k + \xi_1^k (M_w - 6) + \xi_2^k (M_w - 6)^2 + \xi_3^k (M_w - 6)^3 \quad k=0,1,2 \quad (2)$$

식(1)에서 R_h 은 진원 거리, C_0, C_1, C_2 는 모멘트 규모(M_w)에 따라 결정되

는 상수 값이며, 이는 식 (2)에 나타나있다. 식 (2)의 ξ 값은 최대지반가속도 (PGA), 최대지반속도(PGV) 및 고유 진동수에 따른 스펙트럼 가속도(S_a)에 대한 지진동 감쇠식의 계수이다. 진원 깊이는 10 km로 가정[14]하였으며, 가 정된 진원 깊이(focal depth)와 진앙 거리(epicentral distance)로 진원 거리를 구하여 사용하였다.

Fig. 4는 Jo and Baag의 감쇠식(식(1)과(2))으로 작성된 지진파의 등재 해도스펙트럼과 KBC2016 및 EC8 Type 2의 설계 스펙트럼과 비교하였다. Jo and Baag의 감쇠식은 진장근처에서만 최대지반가속도가 상대적으로 작게 계산되는 경향이 있다. 이 감쇠식의 개발 이후에 연관희 등[19]이 개발한 감쇠식은 국내의 내륙지방에서 발생한 지진으로 개발한 Jo and Baag의 감쇠식[14]와는 다르게 바다에서 발생한 지진을 포함하고 있으며, 기존 감쇠식보다 근거리 지진동 수준을 대체적으로 크게 평가하고 있다. 거리에 따라 규모(5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0)를 달리하여 비교하였으며, 거리는 10 km(Fig. 4(a)), 15 km(Fig. 4(b)), 20 km(Fig. 4(c)), 30 km(Fig. 4(d))로 분류하였다.

Fig. 4(a) ($R = 10$ km)에서, 규모 6.5 지진파의 스펙트럼은 주기가 0.3초 보다 작을 때 KBC 2016 설계 스펙트럼 가속도보다 큰 값을 보였지만, 0.3초 보다 클 경우 설계 스펙트럼의 값과 거의 유사하였다. Fig. 4(a)에서 규모 6.0 지진의 경우, 0.1초 주기에서의 스펙트럼 가속도 값이 설계지진 스펙트럼의 가속도 값 과 유사하게 나타났지만 그 이후 구간은 설계지진에 비해 급격히 줄어들었다. $R = 15$ km(Fig. 4(b))일 때에도 규모 6.5의 시나리오 지진파의 스펙트럼이 KBC 2016의 설계 스펙트럼과 가장 유사한 형태를 보였다. 반면 $R = 20$

km(Fig. 4(c)), $R = 30$ km(Fig. 4(d))인 지진파 스펙트럼은 규모와 상관없이 전체 주기에서 KBC 2016 설계 스펙트럼의 가속도 값보다 작게 나타났다. 또한 KBC 2016 최대지진의 스펙트럼은 $M_w = 7.0, R = 15$ km의 지진파의 스펙트럼과 가장 유사하였다.

우리나라와 지진학적으로 유사한 지역인 미국 동북부지역(Eastern North America, ENA)를 대상으로 개발된 감쇠식(Campbell[15], Boore and Atkinson[16], Pezeshk et al.[17])을 추가적으로 선정하였다. 식 (3)은 Campbell[15]이 개발한 감쇠식으로 지진규모(M_w)와 거리(파열 단층에서부터 부지까지의 최단거리, r_{rup})에 대한 함수로 이루어져 있다.

$$\ln Y = c_1 + f_1(M_w) + f_2(M_w, r_{rup}) + f_3(r_{rup}) \quad (3)$$

식 (3)에서 c_1 은 PGA, PGV 및 고유주기에 따른 S_a 에 대한 감쇠식 계수이며, $f_1(M_w)$ 는 지진규모에 따른 감쇠관계를 적용하며, $f_2(M_w, r_{rup})$ 는 규모와 거리의 감쇠관계를, $f_3(r_{rup})$ 는 거리에 의한 감쇠관계를 적용한 식이다.

식 (4)는 2008년 Boore and Atkinson[16]이 개발한 ENA 지역의 감쇠 식이다. 식 (4)는 F_M, F_D, F_S 로 규모(M_w)와 거리(파열 단층면의 투사면에서부터 부지까지의 최단거리, Joyner-Boore distance = R_{JB}), 지반의 종류 (V_{S30})에 대한 함수로 구성되어 있다. 또한 불확실성을 반영하기 위해 주기 별 표준편차(σ)항이 존재하며, ε 를 이용하여 상수 배한 표준편차를 적용 할 수 있다.

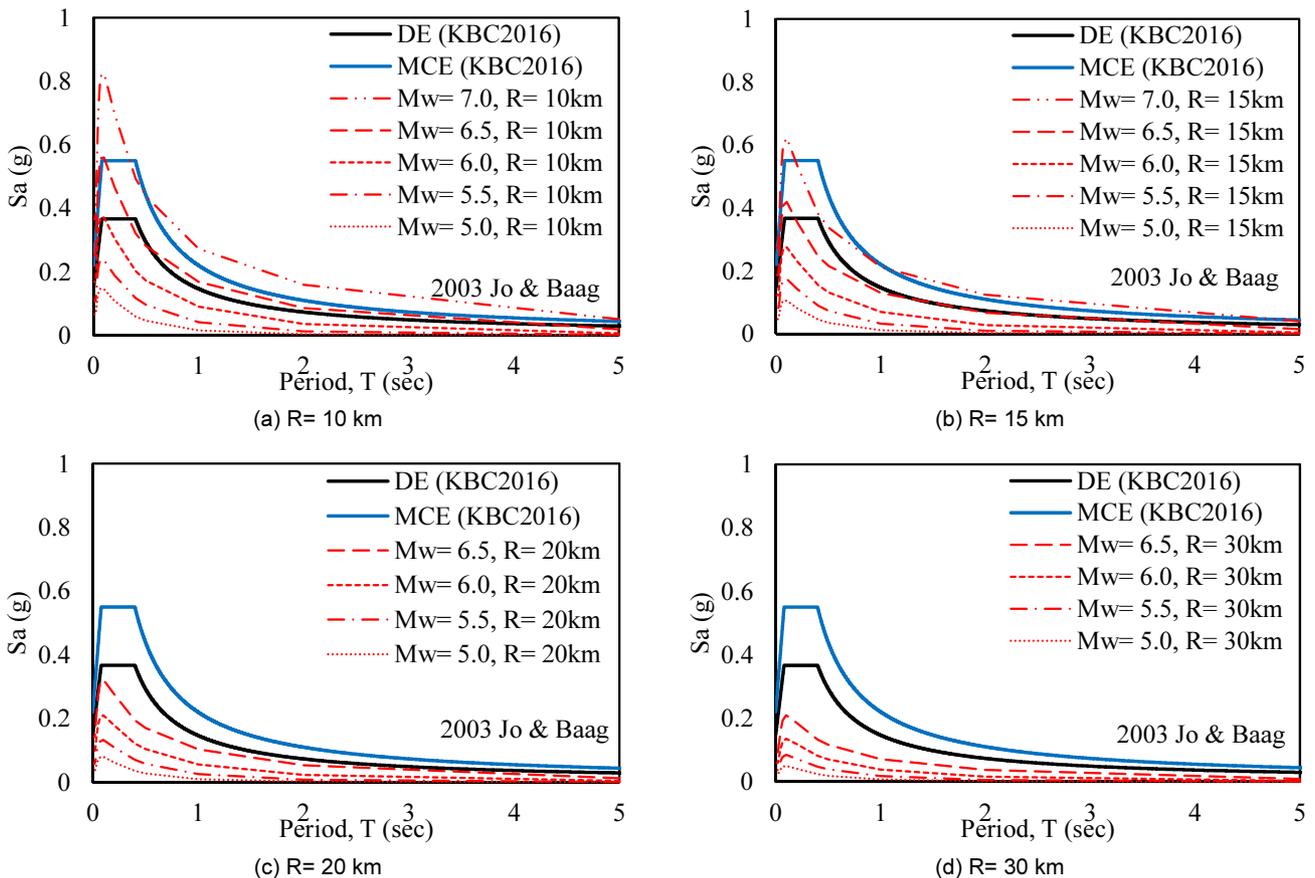


Fig. 4. Comparison of acceleration response spectra predicted from attenuation relationship of Jo & Baag (Eq. (1))

$$\ln Y = F_M(M_w) + F_D(R_{JB}, M_w) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M_w) + \epsilon \sigma_T \quad (4)$$

식 (4)는 단층의 파열양상(Unspecified, Strike-slip, Normal, Thrust / reverse)에 따른 영향을 반영하였다. 우리나라는 판내부(intraplate)라는 지역특성상 단층이 파열로 인한 지진이 발생할 가능성이 낮기 때문에, 식 (4)에서는 Unspecified로 분류하여 스펙트럼을 작성하였다.

식 (5)는 2011년 Pezeshk et al.[17]이 개발한 ENA 지역의 감쇠식으로 지진규모(M_w)와 거리에 대한 변수(R)로 구성된 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \log(\bar{Y}) &= c_1 + c_2 M_w + c_3 M_w^2 + (c_4 + c_5 M_w) \times \min(\log(R), \log(70)) \\ &+ (c_6 + c_7 M_w) \times \max[\min(\log(R/70), \log(140/70)), 0] \\ &+ (c_8 + c_9 M_w) \times \max(\log(R/140), 0) + c_{10} R \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 진앙거리에 대한 변수 R 은 R_{rup} (파열 단층에서부터 부지까지의 최단거리)의 제곱과 진원깊이에 관련한 상수 c (고유주기에 따라 5.9~7.3)의 제곱을 합하여 제곱근을 구한 값이다. 이는 우리나라에서 가정하는 진원깊이(10 km)보다 작은 값이다. 그러나 앞서 언급하였듯이 본 식

에서 시나리오 지진파의 R 은 R_{rup} 로 가정하였다.

Figs. 5, 6, 7은 각각 식 (3), 식 (4), 식 (5)를 이용하여 작성된 시나리오 지진파의 스펙트럼과 KBC 2016의 설계 스펙트럼을 비교하였다. 또한 각 그림은 거리에 따라 규모 5~6.5 또는 5~7.0로 달리하여 비교하였으며, 거리(R)는 (a) 10 km, (b) 15 km, (c) 20 km, (d) 30 km로 분류하였다.

Campbell의 감쇠식(식 (3))을 이용하였을 경우, KBC 2016의 설계 스펙트럼과 가장 유사한 시나리오 지진파는 (i) $R = 10$ km (Fig. 5(a)) 일 때 규모 6.0~6.5 사이, (ii) $R = 15$ km (Fig. 5(b))일 때 규모 6.5, (iii) $R = 20$ km 및 30 km (Figs. 5(c), (d))일 때는 규모 6.5 이상으로 추정된다. 또한 KBC 2016의 최대지진에 상응하는 시나리오 지진파는 $M_w = 6.5$, $R = 10$ km로 나타났다. Campbell의 감쇠식을 사용한 시나리오 지진파의 스펙트럼은 Jo and Baag의 감쇠식의 결과(Fig. 4)에 비해 단주기 영역(주기 0~0.4초)에서 상당히 큰 가속도 값을 보이나, KBC 2016의 설계 스펙트럼의 가속도 일정구간 이후 보다 유사한 형태를 보였다.

Boore and Atkinson의 감쇠식(식 (4))으로 도출된 시나리오 지진파의 스펙트럼은 Fig. 6에 주어져 있다. 여기에 사용된 시나리오 지진파는 식 (4)에서 표준편차($\epsilon \sigma$) 항을 반영하지 않았다. 이러한 시나리오 지진파의 스펙트럼(Fig. 6)은 지진 규모에 비해 다른 감쇠식의 결과(Figs. 4, 5, 7)보다 전 주기에서 스펙트럼 가속도 값이 작게 나타났다. KBC 2016의 설계 스펙트럼과 가장 유사한 시나리오 지진파는 $R = 10$ km (Fig. 6(a)) 일 때 M_w 는

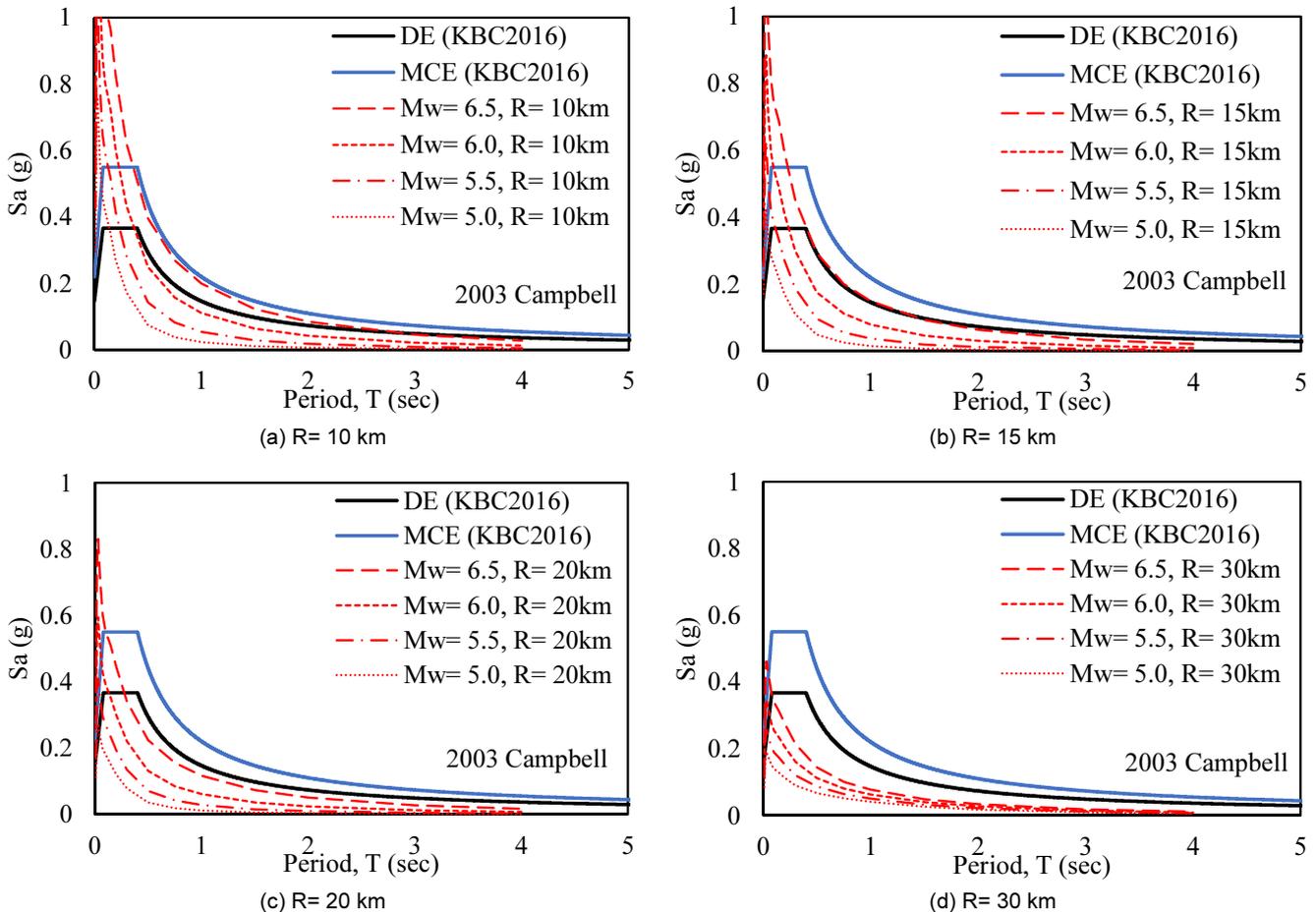


Fig. 5. Comparison of acceleration response spectra predicted from attenuation relationship of Campbell (Eq. (3))

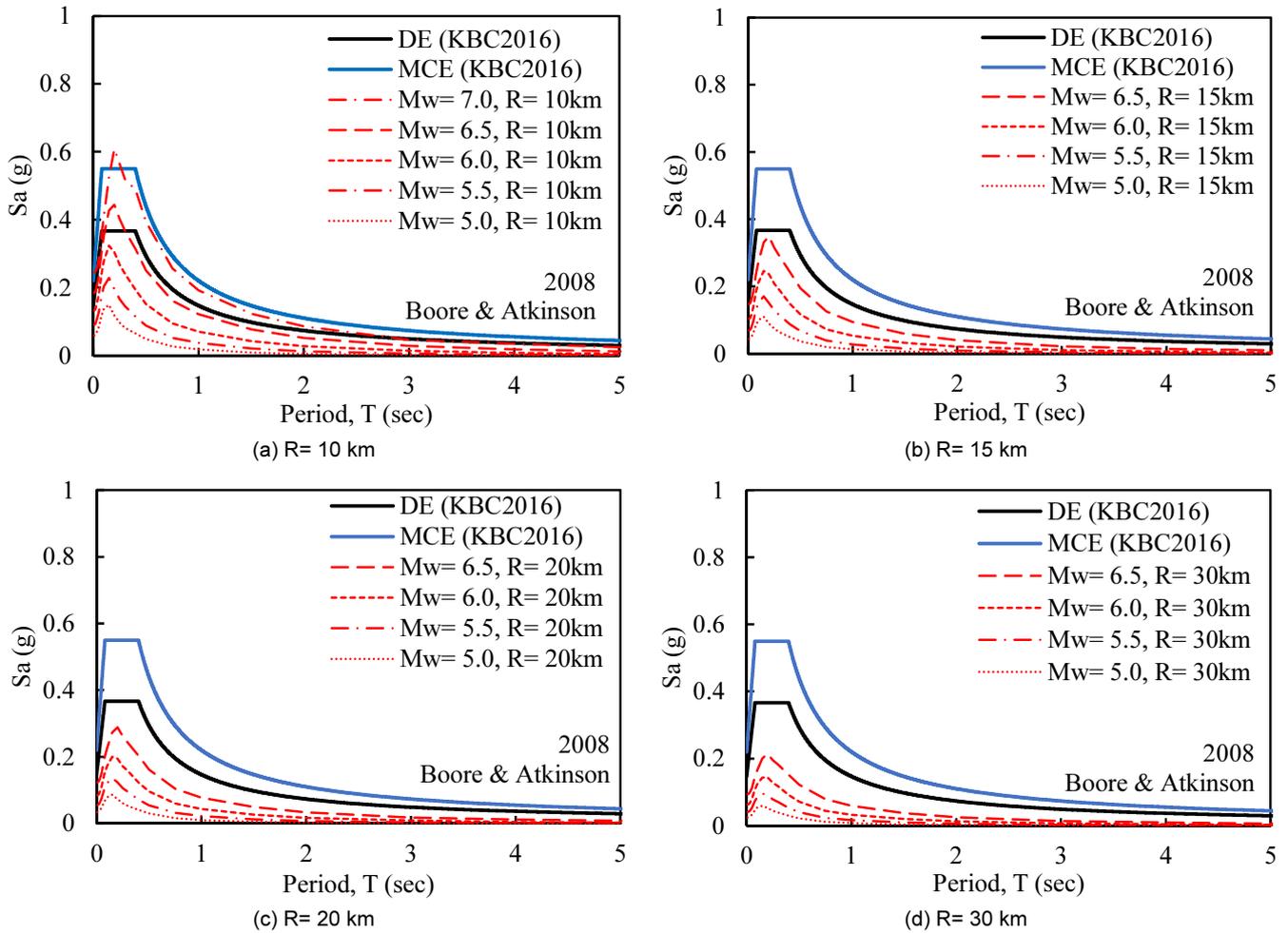


Fig. 6. Comparison of acceleration response spectra predicted from attenuation relationship of Boore & Atkinson (Eq. (4))

6.5~7.0 사이였다. 반면, $R = 15 \text{ km}, 20 \text{ km}, 30 \text{ km}$ 이고 M_w 가 6.5일 때의 스펙트럼은 KBC 2016의 설계 스펙트럼보다 훨씬 작은 가속도 값이 나타났다. 또한 KBC 2016의 최대지진의 스펙트럼은 $M_w = 7.0, R = 10 \text{ km}$ 시나리오 지진파보다도 크게 나타났다.

Pezeshk의 감쇠식(식(5))을 이용한 시나리오 지진파 스펙트럼(Fig. 7)은 단주기에서 Campbell 감쇠식의 결과(Fig. 5)와 유사하게 상당히 큰 가속도 값을 보이나, 최댓값 이후 급격히 가속도가 줄어 들면서, 특히 1초 이후 Boore and Atkinson의 감쇠식의 결과(Fig. 6)보다도 작은 가속도 값을 가지며, KBC 2016의 설계 스펙트럼과도 가장 다른 형태를 보였다. $R = 10 \text{ km}$ (Fig. 7(a))일 때, KBC 2016의 설계 스펙트럼과 유사한 시나리오 지진파는 $M_w = 6.5 \sim 7.0$ 사이로 추정된다. $R = 15 \text{ km}, 20 \text{ km}, 30 \text{ km}$ 이고 M_w 가 6.5일 때의 스펙트럼은 Boore and Atkinson의 감쇠식(식(4))의 결과와 마찬가지로 KBC 2016의 설계 스펙트럼보다 훨씬 작은 가속도 값을 보였다.

감쇠식에서는 지진파를 예측하기 위해 규모와 거리뿐만 아니라 불확실성까지 반영할 수 있다. 본 연구에서는 추가적으로 Boore and Atkinson의 감쇠식(식(4))에서 표준편차($+1\sigma$)를 반영한 시나리오 지진파의 스펙트럼을 작성하여, 설계 스펙트럼과 Fig. 8과 같이 비교하였다. $+1\sigma$ 한 시나리오 지진파 스펙트럼은 표준편차를 적용하지 않은 스펙트럼(Fig. 6)보다 약 1.5~2

배 큰 가속도 값을 가지는 것을 알 수 있었다. KBC 2016의 설계 스펙트럼과 가장 비슷한 결과를 나타낸 시나리오 지진파(Fig. 8)는 (i) $M_w = 6.0, R = 10 \text{ km}$, (ii) $M_w = 6.0 \sim 6.5, R = 15 \text{ km}$, (iii) $M_w = 6.5, R = 20 \text{ km}$, (iv) $M_w = 6.7, R = 30 \text{ km}$ 였으며, KBC 최대지진의 스펙트럼과 가장 유사한 결과를 보인 시나리오 지진파는 (i) $M_w = 6.5, R = 10 \text{ km}$, (ii) $M_w = 6.9, R = 20 \text{ km}$ 였다.

각각의 감쇠식으로 얻어진 시나리오 지진파 스펙트럼(Figs. 4~7) 결과를 바탕으로 최적화(try-error 방식)를 통하여, KBC 2016 설계 스펙트럼 및 최대지진 스펙트럼과 가장 유사한 시나리오 지진파의 스펙트럼을 선정하였으며, 이는 Fig. 9에 주어졌다. 설계 스펙트럼과 유사한 스펙트럼을 갖는 시나리오 지진파(Fig. 9(a))의 범위는 (i) $R = 10 \text{ km}$ 일 때, $M_w = 6.2 \sim 6.7$, (ii) $R = 15 \text{ km}$ 일 때, $M_w = 6.5 \sim 6.9$, (iii) $R = 20 \text{ km}$ 일 때, $M_w = 6.7 \sim 7.1$ 이었다. 최대지진의 스펙트럼과 유사한 스펙트럼을 갖는 시나리오 지진파(Fig. 9(b))의 범위는 $R = 10 \text{ km}$ 일 때, $M_w = 6.6 \sim 7.1$ 로, 설계지진에 비해 모멘트 규모는 약 0.4~0.5 정도 크게 나타났다.

우리나라의 감쇠식을 비롯한 미국 중동부의 감쇠식을 이용하여 KBC2016의 설계 스펙트럼에 부합한 지진의 규모와 거리를 추정하는 결과는 Table 2에 정리하였으며, 표준편차($+1\sigma$)를 반영한 결과는 Table 3에 정리하였다.

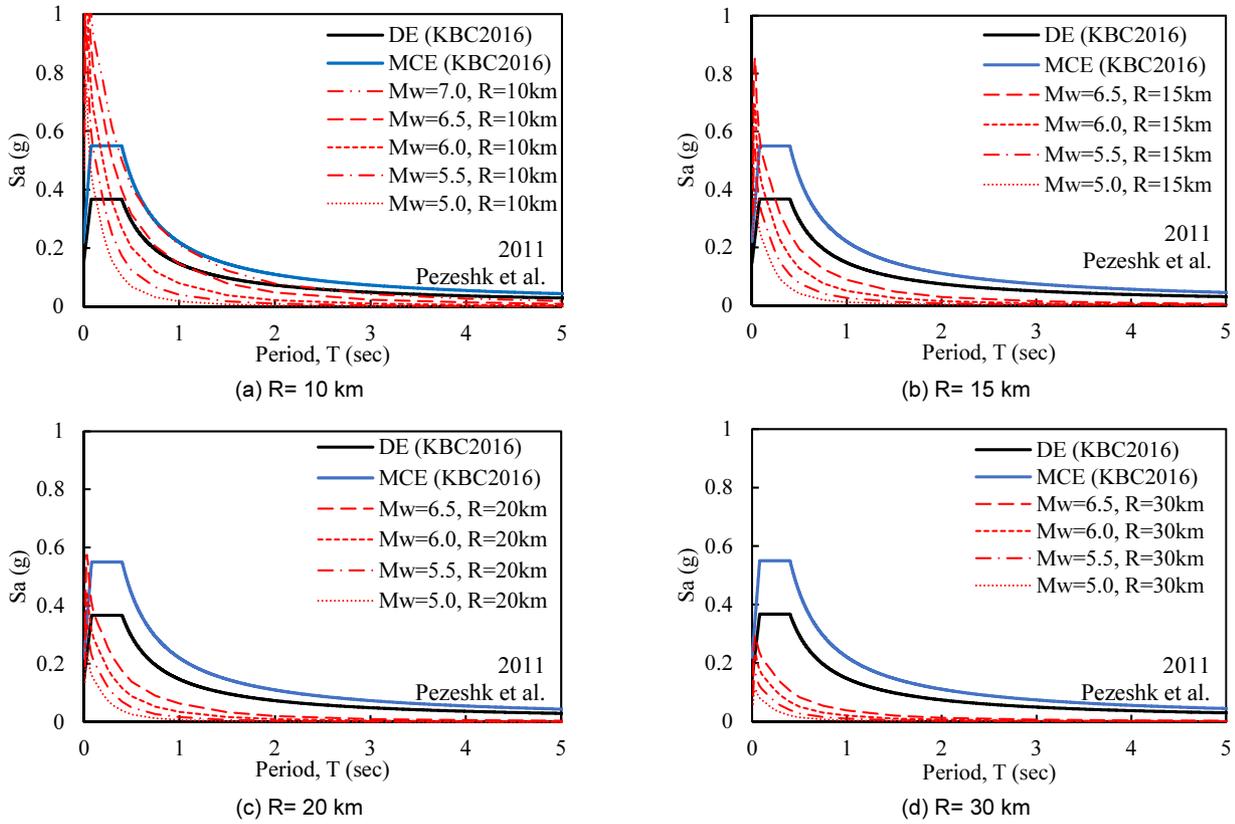


Fig. 7. Comparison of acceleration response spectra predicted from attenuation relationship of Pezeshk et al. (Eq. (5))

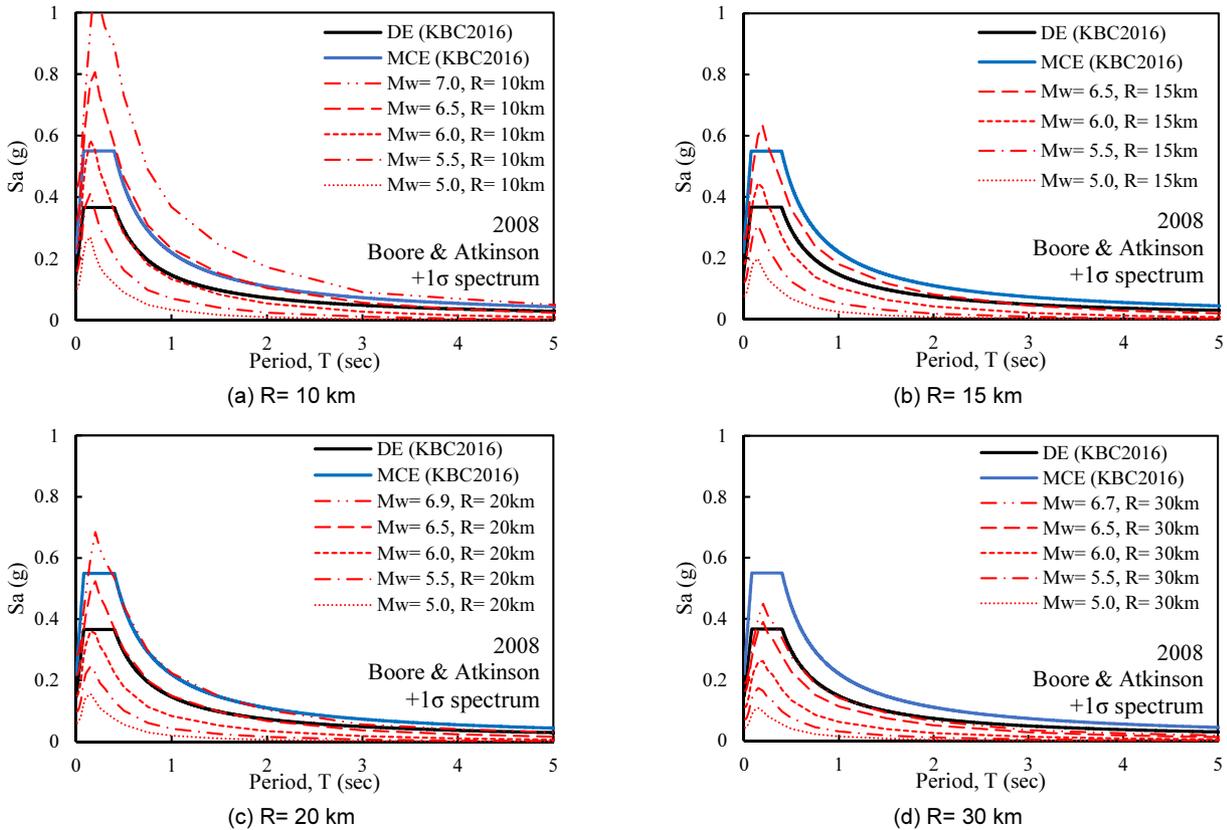


Fig. 8. Comparison of acceleration response spectra predicted from attenuation relationship of Boore & Atkinson with standard deviation (+1 σ) (Eq. (4))

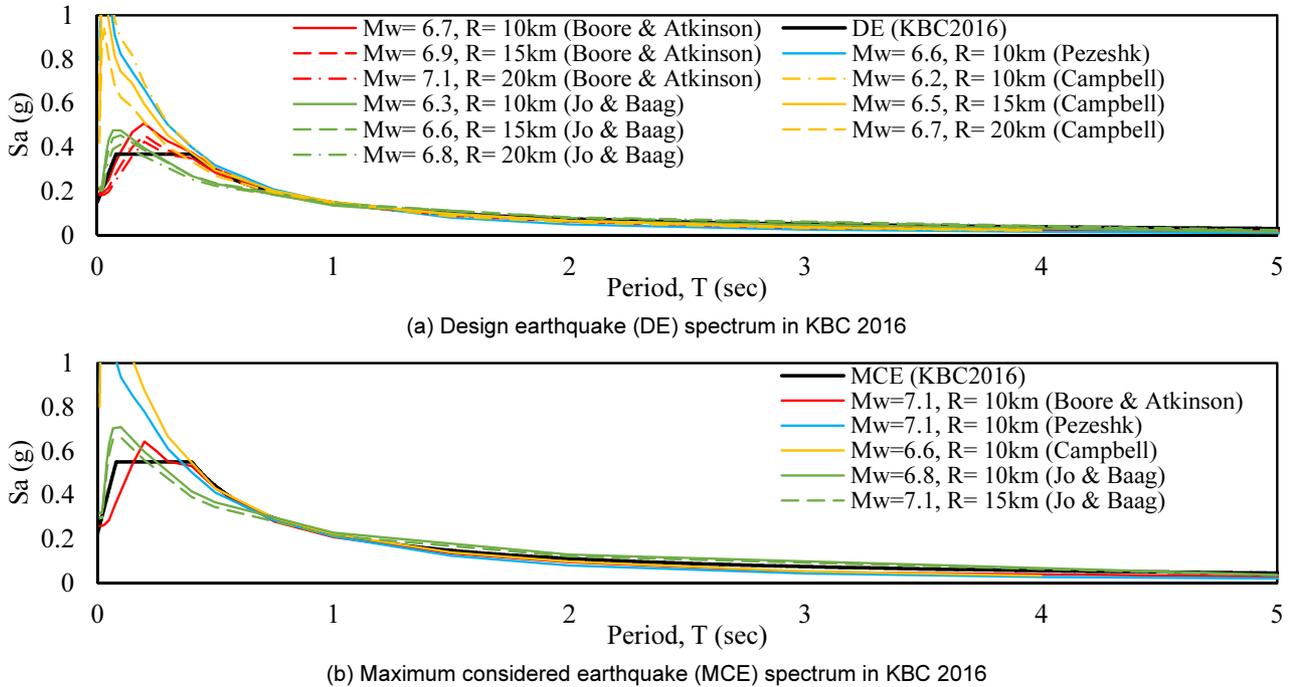


Fig. 9. Comparison of acceleration response spectra predicted from all attenuation relationships

Table 2. Scenario ground motions predicted from attenuation relationship

Attenuation relationship	(a) DE (KBC2016)		(b) MCE (KBC2016)	
	M_w	R (km)	M_w	R (km)
Jo & Baag [14]	6.3	10	6.8	10
	6.6	15		
	6.8	20	7.1	15
Campbell [15]	6.2	10	6.6	10
	6.5	15		
	6.7	20		
Boore & Atkinson [16]	6.7	10	7.1	10
	6.9	15		
	7.1	20		
Pezeshk et al. [17]	6.6	10	7.1	10

Table 3. Scenario ground motions predicted from attenuation relationship of Boore & Atkinson with standard deviation (+1 σ)

Attenuation relationship	(a) DE (KBC2016)		(b) MCE (KBC2016)	
	M_w	R (km)	M_w	R (km)
Boore & Atkinson [16]	6.0	10	6.5	10
	6.5	20		
	6.7	30	6.9	20

5. 결론

본 연구에서는 우리나라 건축물의 설계 지진에 상응하는 지진 규모와 거리를 알아보기 위해, 감쇠식을 이용하여 규모 및 거리를 달리한 시나리오 지진파의 응답 스펙트럼을 작성하였으며, 이를 KBC 2016[1]의 설계 스펙트

럼과 비교하였다. 감쇠식은 총 4 가지를 사용하였다. 우리나라의 지진학적 특성을 바탕으로 개발된 Jo and Baag의 감쇠식[14]과 미국 동북부지역을 대상으로 수립된 Campbell[15], Boore and Atkinson[16], Pezeshk et al.[17]의 감쇠식을 이용하여, 규모와 거리를 변수로 둔 지진파의 등재해도 스펙트럼을 작성하였다.

우리나라 KBC 2016 설계 스펙트럼(지진구역 1, $S=0.22g$)에 상응하는 시나리오 지진의 모멘트 규모(M_w) 및 거리(R)를 추정한 결과 (Table 2(a)), 시나리오 지진파의 범위는 (i) $R=10$ km 일 때, $M_w=6.2\sim 6.7$, (ii) $R=15$ km 일 때, $M_w=6.5\sim 6.9$, (iii) $R=20$ km 일 때, $M_w=6.7\sim 7.1$ 이었다. KBC 2016의 최대지진 스펙트럼에 상응하는 시나리오 지진도 Table 2(b)와 같이 예측하였다.

Boore & Atkinson[16]의 감쇠식에서 표준편차(+1 σ)를 반영한 등재해도 스펙트럼은 표준편차를 적용하지 않은 것보다 약 1.5~2배 큰 스펙트럼 가속도 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 또한 동일 거리에서 규모도 약 0.4~0.7 정도로 작게 나타나, KBC 2016의 설계 스펙트럼과 유사한 시나리오 지진파 (Table 3(a))는 (i) $M_w=6.0, R=10$ km (ii) $M_w=6.5, R=15$ km, (iii) $M_w=6.7, R=20$ km이었다. KBC 2016의 최대지진 스펙트럼에 상응하는 시나리오 지진도 Table 3(b)와 같이 예측하였다.

규모 5.5 미만에 사용하도록 권고되고 있는 EC8의 Type 2 설계 스펙트럼이지만, KBC 2016의 설계 스펙트럼 값(S_{DS}, S_{DI})을 적용할 경우 추정되는 모멘트 규모는 모두 5.5 이상으로 나타났다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비지원(16AUDP-B066083-04)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. AIK, Architectural Institute of Korea, Korean Building Code, KBC 2016. c2016.
2. Power M, Chiou B, Abrahamson N, Bozorgnia Y, Shantz T, Roblee C. An overview of the NGA Project. *Earthquake Spectra*, 2008; 24(1):3-21.
3. Chiou B, Darragh R, Gregor N, Silva W. NGA Project Strong-Motion Database. *Earthquake Spectra*, 2008; 24(1): 23-44.
4. Abrahamson N, Atkinson G, Boore D, Bozorgnia Y, Campbell K, Chiou B, Idriss IM, Silva W, Youngs R. Comparisons of the NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, 2008; 24(1): 45-66.
5. Jo ND, Baag CE. Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southern Korea. *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2001; 5(4): 17-26.
6. Nakajima M, Choi IK, Ohtori Y, Choun YS. Evaluation of seismic hazard curves and scenario earthquakes for Korean sites based on probabilistic seismic hazard analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 2007;273(3):277-288.
7. Cornell CA. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968; 58(5): 1583-1606.
8. USGS (U.S. Geological Survey) Official Website [Internet]. Available from: <http://www.usgs.gov/>.
9. McGuire RK. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995; 85(5): 1275-1284.
10. Choi IK, Nakajima M, Choun YS, Yun KH. Study on the Scenario Determining Methods Based on the Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2004; 8(6): 23-29.
11. International Code Council, Building Officials, and Code Administrators. *International Building Code, IBC 2015*. Dearborn Trade Publishing, c2015.
12. CEN, Comite European do Normalisation, Brussels, Eurobean Standard EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, c2004.
13. Chopra AK. *Dynamic of Structures Vol. 3*. New Jersey: Prentice Hall, c2007. 876 p.
14. Jo ND, Baag CE. Estimation of Spectrum Decay Parameter χ and Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southeastern Korea. *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2003;7(6):59-70.
15. Campbell KW. Prediction of Strong Ground Motion Using the Hybrid Empirical Method and Its Use in the Development of Ground-Motion (Attenuation) Relations in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003; 93(3): 1012-1033.
16. 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. *Earthquake Spectra*, 2008; 24(1): 99-138.
17. Pezeshk S, Zandieh A, & Tavakoli B. Hybrid Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America Using NGA Models and Updated Seismological Parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011; 101(4): 1859-1870.
18. Kang, SY, Kim KH, Suk BC, Yoo HS. Attenuation Relations in Hazus for Earthquake Loss Estimations in Korea. *Earthquake Engineering Society of Korea*, 2007; 11(6): 15-21
19. Yun KH, Park DH, Choi WH, Chang CJ, Lee DS. Development of site-specific ground-motion attenuation relations for Nuclear Power Plant sites and study on their characteristics. *Earthquake Engineering Society of Korea fall workshop; Mokpo*, 2005 Sep; 23-24:418-430.