

추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강지진동 연구

Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southern Korea

조 남 대*
Jo, Nam Dae

박 창 업**
Baag, Chang Eob

국문요약

한반도 남부에서 발생 가능한 강지진동의 최대 지반운동과 주파수에 따른 특성을 추계학적 모사법을 이용하여 간접적으로 추정하였다. 또한 추계학적 모사법에 적용할 진원과 지진파 감쇠에 관한 입력자료를 계산하였다. 응력강하($\Delta\sigma$)는 한반도 남부와 미국 동부 및 중국의 연구결과를 종합하여 100-bar로 추정하였다. 감쇠상수 x 는 1996년 9월부터 1997년 12월까지 발생한 지진 중 비교적 기록상태가 양호한 57개의 관측자료를 이용하여 계산하였으며 진원거리(R)에 대하여 $0.00112+0.000224R$ 로 추정되었다. 이와 같은 응력강하($\Delta\sigma$)와 감쇠상수 x 등의 입력자료를 추계학적 모사법에 적용한 결과를 바탕으로 진원거리에 따른 강지진동 감쇠공식을 유도하였다.

주요어 : 추계학적 모사법, 응력강하($\Delta\sigma$), 감쇠상수 x , 최대지반가속도, 지진동 감쇠공식

ABSTRACT

In order to estimate peak ground motions and frequency characteristics of strong ground motions in southern Korea, we employed the stochastic simulation method with the moment magnitude(M_w) and the hypocentral distance(R). We estimated some input parameters that account for specific properties of source and propagation processes, and applied them to the stochastic simulation method. The stress drop($\Delta\sigma$) of 100-bar was estimated considering results of research in ENA, China, and southern Korea. The attenuation parameter x was calculated by analyzing 57 seismograms recorded from September 1996 to October 1997 and the estimation result of the attenuation parameter x is $0.00112+0.000224R$ where R is hypocenter distance. We estimated strong ground motion relations using the stochastic simulation method with suitable input parameters(e.g. $\Delta\sigma$, x , and so on). At last, we derived relations between hypocentral distances and ground motions(seismic attenuation equation) using results of the stochastic prediction.

Key words : stochastic simulation method, stress drop($\Delta\sigma$), attenuation parameter x , peak ground acceleration(PGA), seismic attenuation equation

1. 서 론

한반도에서 강한 지진활동의 빈도가 일본이나 미국 서부 지역에 비해 상대적으로 작은 것은 한반도가 미국 동부와 같은 판내부 지진환경이기 때문이라고도 할 수 있다. 하지만 판내부 지진환경일지라도 강진이 발생할 수 있는 가능성은 언제나 존재하며 이에 대비하고 있어야 한다. 즉, 한반도에는 역사시대에 강한 지진활동이 상당수 있었다. 하지만 근대 및 현대적 관측장비가 이용되어진 20세기에는 강지진동의 발생빈도가 작아서 지진 관측자료가 충분히 축적되어있지 않은 실정이다. 이와 같이 강진의 빈도가 작아서 강진의 성격에 대한 현대적인 분석에 필요한 충분한 자료가 없을 경우에는 지진학적 특성을 포함하는 진원모델 및 다양한 입력상수를 이용하여 추계학적인 방법을 통해 한반도에서 앞으로 발생할 수 있는 강지진동에 의한 지반의 움직임과 주파수에 따른 변화를 지진규모와 진원거리에 따라 간접적으로 유추할 수 있다.

점진원을 가정한 Brune⁽¹⁾의 ω^2 진원모델을 이용한 강지진동의 추계학적 연구는 1980년대 초반부터 미국을 중심으로 활발히 연구되어왔다. 미국 서부와 동부를 대상으로 Boore⁽²⁾,

Atkinson⁽³⁾에 의하여 강지진동의 추계학적 연구가 진행되어왔으며 그 이후 Atkinson and Boore⁽⁴⁾, Toro and McGuire⁽⁵⁾, Atkinson and Boore⁽⁶⁾ 등으로 계속되어왔다. 이들 연구는 일정한 주파수대역과 유한한 지속시간을 갖는 백색 가우스 잡음에 지진원의 특성을 갖는 진원 모델 스펙트럼을 포함시켜 주어 합성지진파를 계산할 수 있다는 Hanks and McGuire⁽⁷⁾의 연구결과에 기초를 두고 있다.

한반도에서는 최근까지 지진관측장비가 충분히 갖추어지지 않았고 축적된 지진자료가 많이 않았기 때문에 강지진동 연구가 활발히 진행되지 않았지만, 최근 영월지진(1996년 12월 13일, 규모 4.5)의 발생을 계기로 하여 강지진동 연구가 활발히 진행되고 있다. 노명현과 이기화^{(8),(9)}는 한반도 남동부를 대상으로 강지진동 연구를 실시하였으며 최근에는 Baag et al.⁽¹⁰⁾, Park et al.⁽¹¹⁾, 박동희외⁽¹²⁾, 이정모외⁽¹³⁾, Baag et al.⁽¹⁴⁾, Jo⁽¹⁵⁾ 등에 의하여 강지진동 연구가 진행되고 있다.

추계학적 모사법을 이용하여 강지진동에 의한 지반의 움직임을 추정하기 위해서는 진원, 지진파 전파경로, 그리고 관측점에서의 특성을 파악하여 입력자료로 사용하여야 한다. 계산에 사용되는 입력자료로는 전단파 전달속도(β), 지각밀도(ρ), 지진파 평균방사상수($\langle R_{\theta\pi} \rangle$), 모서리주파수(f_s), 응력강하($\Delta\sigma$), 감쇠상수 x 등이 있다. 이들 입력자료 중 응력강하($\Delta\sigma$)와 감쇠상수 x 는 진원의 특성과 전파경로 및 관측점에서의 지진학적 특성을 표현하는 가장 중요한 자료

* 학생회원 · 서울대학교 대학원 지구환경과학부 박사과정
(대표저자 : rinbi@seismic.snu.ac.kr)

** 정회원 · 서울대학교 대학원 지구환경과학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 3. 22 / 심사종료일 : 2001. 6. 28)

로 사용된다. 이번 연구에서는 한반도 남부에서 관측된 여러 지진기록자료를 이용하여 응력강하와 감쇠상수 κ 를 계산하였으며 이외의 입력자료는 기존의 연구로부터 참조하여 이용하였다.

다양한 방법으로 결정된 입력자료를 추계학적 모사법에 적용하여 한반도 남부에서의 강지진동에 의한 지반의 움직임을 추정하였으며, 이를 바탕으로 한반도 남부에서 진원거리에 따른 지반진동의 변화식(지진동 감쇠공식)을 유도하였다.

2. 추계학적 모사법

Boore⁽²⁾에 의해서 제시된 강지진동 추계학적 모사법을 기초로 하여 한반도 남부에서의 강진에 의한 지반의 움직임을 추정하였다. 추계학적 모사법에서 강진에 의한 지반의 움직임은 백색 가우스 잡음(white Gaussian noise)을 이용하여 표현된다. 즉, 지진학적으로 의미있는 주파수 대역에서 정의되고 진원의 크기와 전파경로에 해당하는 적절한 지속시간을 갖는 백색 가우스 잡음을 기본시계열로 사용한다. 이러한 백색 가우스 잡음에 진원과 전파경로의 특성에 맞는 모델 스펙트럼을 적용하는 추계학적인 방법으로 합성지진파를 계산해 낼 수 있다. 이러한 모사 과정을 수 차례 반복하여, 주어진 모멘트규모(M_w)와 진원거리(R)에 따른 지반 움직임의 특성을 파악할 수 있다.

백색 가우스 잡음에 진원 모델로 적용할 모델 가속도스펙트럼은 지진모멘트(M_0)와 진원거리(R), 그리고 주파수(f)의 함수인 식 (1)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$A(M_0, R, f) = \frac{\langle R_{\theta\theta} \rangle \cdot F \cdot V}{4\pi\rho\beta^3} \cdot \frac{2\pi f^2 M_0}{1+(f/f_c)} \cdot \frac{e^{-\kappa x f}}{R} \quad (1)$$

우변의 첫 번째 항은 진원 및 지진파 전파에 관한 일반적인 상수로 구성되어 있다. ρ 와 β 는 진원 지역의 밀도와 전단파 속도이며 각각 2.7g/cm^3 과 3.5km/sec 를 적용하였다. $\langle R_{\theta\theta} \rangle$ 는 평균 방사상수이며 이번 연구에서는 0.63을 적용하였다. F 와 V 는 자유면 증폭값과 수평성분의 분할비를 나타내며 입력값으로는 각각 2와 0.707을 사용하였다. 우변의 두 번째 항은 지진원함수항으로 지진모멘트(M_0)와 코너주파수(f_c)로 표현되는 Brune⁽¹⁾의 ω^2 스펙트럼이 사용되었다. 우변의 마지막 항은 스펙트럼의 감쇠를 표현해주는 항으로 감쇠상수 κ 로 표현되는 카파필터(kappa filter, $e^{-\kappa x f}$)와 진원거리에 따른 기하학적 감쇠효과의 곱으로 표현된다. 이 중 기하학적 감쇠효과는, 진원거리가 먼 경우에 지반의 움직임에 큰 영향을 줄 수 있는 표면파(Lg)를 고려하여, 100km를 기준으로 가까운 경우에는 $1/R$ 을 먼 경우에는 $1/\sqrt{R}$ 을 사용하였다.

모서리주파수(f_c)-지진모멘트(M_0)-응력강하($\Delta\sigma$)의 관계(Brune⁽¹⁾),

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma/M_0)^{1/3} \quad (2)$$

를 이용하여 모서리주파수를 지진모멘트와 응력강하의 함수로 표현할 수 있다. 응력강하는 진원의 특성으로 그 지역의 지진관측자료를 이용하여 계산할 수 있다. 따라서 식 (1)에서 변수 M_0 , R , f 를 제외한 모든 입력자료는 대상지역에만 적용될 수 있는 고유한 값으로 가정된다.

지진모멘트와 모멘트규모사이의 관계식(Hanks and Kanamori⁽¹⁶⁾),

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (3)$$

을 식 (1)에 적용한다면 한 지역에서의 모델 스펙트럼은 모멘트규모와 진원거리만의 함수라고 할 수 있으며, 따라서 주어진 모멘트규모(M_w)와 진원거리(R)에 따라 진원의 특성에 맞는 ω^2 모델에 해당하는 스펙트럼이 결정된다.

시간영역에서, 지진의 크기 및 진원거리에 적합한 지진파의 지속시간(time duration)을 가지고 또 실제 지진기록자료와 형태가 비슷한 합성지진파를 얻기 위하여 적절한 형태창(shaping window)을 설정하여야 한다. 이 형태창 설정에 사용될 지진파의 지속시간은 Herrmann⁽¹⁷⁾을 이용하여 식 (4)와 같은 함수를 사용하였다.

$$T_d = \frac{1}{f_c} + 0.05R \quad (4)$$

식 (4)의 우변 첫 번째 항은 진원의 크기에 따른 지속시간의 길이(source duration)를, 두 번째 항은 진원거리에 따른 지속시간의 길이(path duration)를 나타낸다. Saragoni and Hart⁽¹⁸⁾에 의해서 제시된 형태 창은 Boore⁽²⁾, Atkinson and Boore⁽⁵⁾ 등 기존의 많은 강지진동 연구에서 주로 사용되는 것으로 이번 연구에도 Saragoni and Hart⁽¹⁸⁾의 형태 창을 사용하였다.

3. 응력강하($\Delta\sigma$) 및 감쇠상수 κ 의 계산

3.1 저주파 극한값의 반복계산에 의한 응력강하($\Delta\sigma$)의 산출

추계학적 모사법을 이용하여 강진에 의한 지반의 움직임을 추정하기 위하여 진원에 의한 입력상수로는 Brune의 응력강하가 주로 사용되어진다. Brune은 앞서 제시한 식 (2)와 같이 코너주파수-지진모멘트-응력강하의 상관관계를 제시하였다. 이러한 Brune의 응력강하는 관측된 강지진동의 변위 스펙트럼을 이용하여 직접 계산할 수 있다.

Brune의 응력강하값을 계산하기 위하여 Snoke⁽¹⁹⁾는 식

$$J = 2 \int_0^\infty |\omega U(\omega)|^2 df = \frac{2}{3} (\Omega_0 \omega_1)^2 f_1 + 2 \int_{f_1}^{f_2} |\omega U(\omega)|^2 df + 2 |\omega_2 U(\omega_2)|^2 f_2 \quad (5)$$

에서 구해지는 적분값 J 를 이용하였다. Andrews는 식 (5)와 다음의 식

$$K = 2 \int_0^\infty |U(\omega)|^2 d\omega = 2|U(\omega_1)|^2 f_1 + 2 \int_{f_1}^{f_2} |U(\omega)|^2 d\omega + \frac{2}{3} |U(\omega_2)|^2 f_2 \quad (6)$$

을 각각 독립적으로 계산하여 구해진 적분값 J 와 K 를

$$\Omega_0 = 2 \left[\frac{K^3}{J} \right]^{1/4} \quad (7)$$

에 대입하여 변위스펙트럼의 저주파 극한값인 Ω_0 값을 결정적으로 얻었다.

이들 식 (5)와 식 (6)에서 $U(\omega)$ 는 변위스펙트럼을 나타낸다. 이번 연구에서는 Snoke⁽¹⁹⁾와 Andrews⁽²⁰⁾의 방법을 복합적으로 이용하고 새롭게 고안한 반복계산을 수행하여 Ω_0 를 구하고 Brune의 응력강하를 계산하였다. 즉, 변위 스펙트럼의 저주파 극한값인 Ω_0 의 초기값을 $U(\omega_1)$ 으로 설정하고 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 스펙트럼 구간 $[f_1, f_2]$ 에서 적분값 J 와 K 를 계산한다. 이때 구간 $[f_1, f_2]$ 은 스펙트럼의 모서리주파수를 포함하고 있어야 한다. 계산된 J 와 K 를 식 (7)에 대입하여 새로운 Ω_0 값을 계산하고 이 값을 다시 식 (5)에 대입하여 새로운 적분값 J 를 계산한다. 이와 같은 방법을 반복수행하면 Ω_0 값이 안정적으로 계산된다. 이 값을 다음의 식

$$f_c = \left[\frac{J}{2\pi^3 \Omega_0^2} \right]^{1/3} \quad (8)$$

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2\pi^3} \cdot \frac{7}{16} \left(\frac{2\pi}{2.34\beta} \right)^3 \cdot \frac{4\pi\rho\beta^3 R}{\langle R_{\theta\theta} \rangle \cdot F \cdot V} \cdot \frac{J}{\Omega_0} \quad (9)$$

에 대입하여 모서리주파수와 응력강하값을 계산한다.

한반도 남부에서 관측된 중규모 이상의 지진관측자료가 충분하지 않기 때문에, 지역규모 4.3(기상청 발표)인 중규모의 울산앞바다지진(1998/01/08)에 대해 자원연구소 지진관측망에서 기록된 9개의 자료 중에서 최대 진폭이 완전히 기록되고 비교적 잡음이 적은 여섯 개의 자료를 이용하여 Brune의 응력강하를 계산하였다. 이번 연구에서는 적절한 f_1 과 f_2 를 찾아내기 위하여 여러차례 계산을 수행하였으며, 최종적으로는 주파수영역 0.7~10.0Hz에서 응력강하를 계산하였다. Fig. 1은 울산앞바다지진의 진앙 및 관측점의 위치를 보여준다. Fig. 2는 응력강하 계산에 사용한 지진의 진폭스펙트럼을 보여준다. 계산된 응력강하는 101.2-bar이다. 이와 함께 계산된 울산앞바다지진의 모멘트 규모는 3.71로 지역규모에 비하여 작은 값으로 계산되었다.

한반도와 유사한 관내부 지진환경에 해당하는 미국 동부의 경우 응력강하값으로 100~120-bar를 주로 사용한다(Toro et al.⁽²¹⁾). 또한 동북 중국에서는 규모 7 이상의 지진으로부터 20~72-bar의 값을 얻었다(Ma et al.⁽²²⁾). 이 연구에서 계산된 한반도 남부의 응력강하값 101-bar는 동북부 중국보다는 오히려 미국 동부의 값과 유사하다. 어느 지역에서 계산된 응력강하값은 어느 정도의 범위를 가지고 다양한 값을 가질

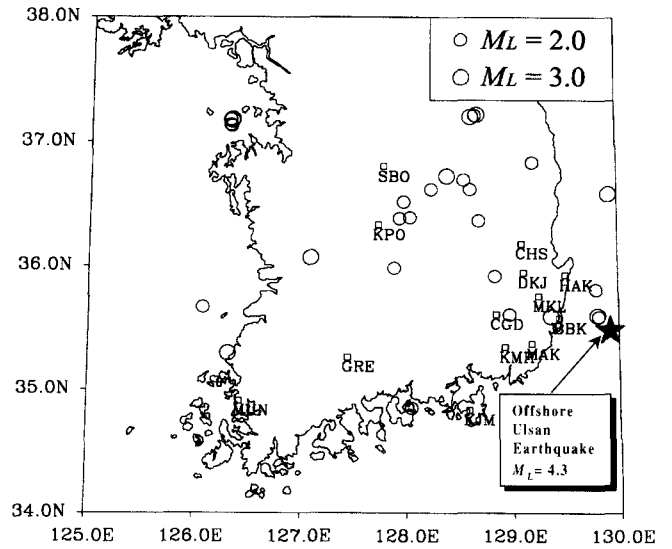


Fig. 1 Location map of the 1998/01/18 offshore Ulsan earthquake (★) and other small earthquakes (○) from September 1996 to October 1997. The stress drop ($\Delta\sigma$) is estimated using seismic data from the offshore Ulsan earthquake and the attenuation parameter α is from other small earthquakes. Symbols of the square (□) indicate locations of seismic stations

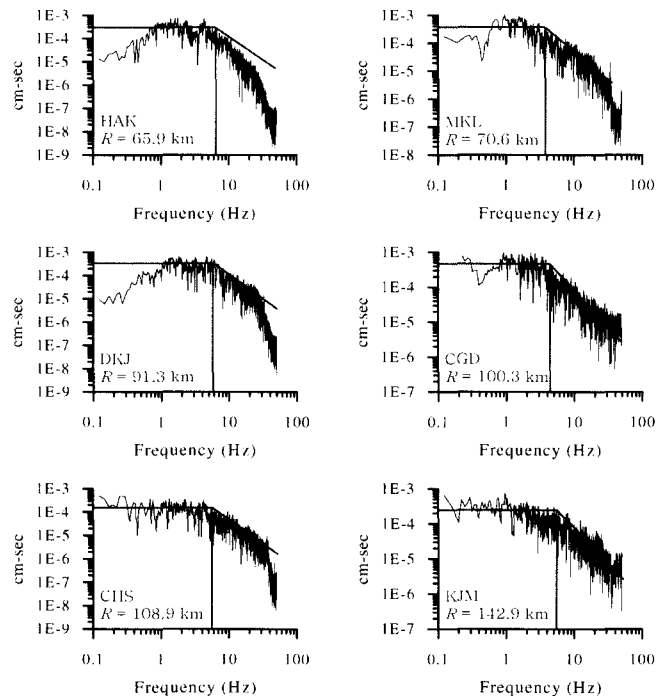


Fig. 2 Fourier amplitude spectra of displacements obtained from the offshore Ulsan earthquake. Using these spectra, $\Delta\sigma$ of 101.2 bars and M_w of 3.71 are estimated. The seismic station name and the hypocentral distance are specified on each spectrum

수 있으므로 이번 연구에서는 응력강하를 100-bar로 설정하여 강지진 연구의 입력자료로 사용하였다. 앞으로 많은 중진 및 강진에 의한 지반운동자료가 축적되면 이들 자료로부터 한반도에 적합한 응력강하값을 새롭게 계산할 수 있을 것이다. 이번 연구에 사용한 응력강하 100-bar는 한반도 남부에서 발생하는 지진의 최대응력강하값으로 보는 것이 바람직하다.

3.2 감쇠상수 κ

한반도 남부에 적합한 감쇠상수 κ 를 계산하기 위하여 자원연구소 지진관측망에 기록된 중소규모 지진자료를 이용하였다. 1996년 9월부터 1997년 8월까지 발생한 30개의 지진으로부터 얻은 자료 중에서 비교적 잡음이 적은 57개의 자료를 계산에 이용하였으며, 이들 지진의 목록은 Table 1에 제시된 바와 같다. 지진파의 감쇠특성은 진원의 크기보다 지진파의 전파경로와 더욱 밀접한 관계를 가지므로 중소규모의 지진을 이용하여 계산된 감쇠특성의 결과를 개략적으로 큰 규모의 지진에도 적용할 수 있다. Fig. 1은 감쇠상수 κ 의 계산에 사용한 지진의 진앙 및 관측점의 위치를 보여준다. 강지진동의 감쇠상수 κ 를 계산하기 위해서는 지반 가속도 관측자료가 필요하지만 관측 장비의 미비 등의 이유로 연구기간 동안에는 지반 속도자료만을 획득할 수 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 속도자료를 시간으로 1차 미분하여 가속도 자료로 변환하였으며 이러한 방법으로 속도자료로부터 변환된 가속도 자료를 감쇠상수 계산에 사용하였다.

계산에 사용한 지진자료는 1초당 100개의 속도자료를 포함하고 있는 단주기 관측자료이다. 따라서 푸리에 영역에서의 최대 주파수는 50Hz이며 25Hz부터 50Hz까지는 알리아싱 방지필터(anti-aliasing filter)가 적용되었다. 따라서 25Hz 이상 고주파수 영역에서의 스펙트럼 기울기는 실제 지진파의 감쇠경향이라고는 볼 수 없다. 따라서 모서리주파수 부근에서부터 25Hz까지 측정된 기울기를 이용하여 감쇠상수 κ 를 계산하였다.

앞서 제시한 57개의 지진관측자료로부터 계산된 감쇠상수 κ 의 진원거리에 따른 변화를 그래프로 나타내면 Fig. 3의 점으로 표시된다. 감쇠상수 κ 는 진원거리에 따라 증가하는 경향을 보이며 이러한 경향을 표현할 수 있는 선형회기식은

$$\kappa = \kappa_s + \kappa_r R = 0.00112 + 0.000224R \quad (10)$$

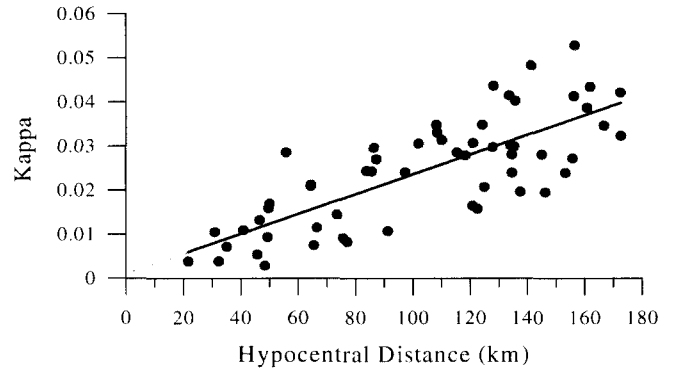


Fig. 3 Hypocentral distance dependency of the attenuation parameter κ . The linear trend of kappa value distribution in hypocentral distance are fitted by least squares method and is presented by thick solid line. The fitted linear function is described by $\kappa = 0.00112 + 0.000224R$, where R represents hypocentral distance in km

과 같다. 식 (10)의 상수항인 κ_s 의 경우 미국 동부($\kappa_s = 0.006$)나 미국 서부($\kappa_s = 0.02 \sim 0.04$)와 비교하여 상당히 작은 값인 0.00112로 계산되었다. 일반적으로 주파수의 함수로 정의되는 비탄성 감쇠 Q 를 상수로 가정한다면 식 (11)과 같은 관계를 생각할 수 있으며, 이로부터 얻어진 비탄성 감쇠상수 Q 값은 1274.361이다.

$$e^{-\frac{\pi R}{Q\beta}} \equiv e^{-\kappa R} \quad (11)$$

4. 한반도 남부에서의 강지진동 추정

4.1 모델 스펙트럼 및 합성 지진파 계산

지금까지 살펴본 응력강하와 감쇠상수 κ 등 Table 2에 제시한 입력자료를 이용하여 추계학적 모사법에 사용할 모델 스펙트럼을 계산해보았다. 또한 계산된 모델 스펙트럼을

Table 1 List of 30 earthquakes used for estimating the attenuation parameter κ

Date	Latitude(°N)	Longitude(°E)	Depth(km)	M_L	Date	Latitude(°N)	Longitude(°E)	Depth(km)	M_L
1996/09/27	35.5972	129.8095	18.86	3.1	1997/06/15	37.1813	126.3523	5.55	3.0
1996/09/29	35.5892	129.8197	16.76	2.7	1997/06/15	37.1758	126.3425	6.28	3.2
1996/12/11	35.8097	129.7967	18.97	2.5	1997/06/15	37.1782	126.3385	5.63	2.7
1996/12/18	36.8333	129.2082	4.84	2.9	1997/06/15	37.1383	126.3333	7.40	2.4
1996/12/29	36.3903	128.0403	4.45	2.8	1997/06/15	37.1293	126.3417	7.76	2.4
1997/01/08	36.3667	128.6922	12.46	2.6	1997/06/16	35.6058	128.9773	1.42	2.9
1997/01/11	36.6163	128.6142	14.77	2.5	1997/06/30	35.9812	127.8997	10.55	2.8
1997/03/17	36.5855	129.9218	4.78	3.0	1997/07/03	36.6167	128.2467	7.92	2.4
1997/03/26	35.2897	130.1872	17.73	2.6	1997/08/05	37.2000	128.6213	4.69	3.2
1997/05/09	35.2940	126.3242	20.00	3.8	1997/08/05	36.7242	128.3907	4.49	3.3
1997/05/10	37.2123	128.6667	5.83	2.8	1997/09/17	35.5907	129.3627	10.69	3.1
1997/05/19	36.6922	128.5523	12.19	2.4	1997/09/26	36.3833	127.9473	2.14	2.6
1997/05/19	35.6667	126.0833	5.20	2.8	1997/10/02	34.8483	128.0588	6.09	2.8
1997/05/22	36.0687	127.1050	5.94	3.9	1997/10/11	35.9175	128.8448	10.93	2.7
1997/06/04	36.5158	127.9833	7.80	2.3	1997/10/18	37.2185	128.6892	1.51	3.0

Table 2 List of input parameters applied to stochastic prediction of strong ground motions

Input parameter	Value
$\langle R_{\theta\theta} \rangle$	0.63
F	2.0
V	0.707
ρ	2.7g/cm ³
β	3.5km/sec
$\Delta\sigma$	100-bar
χ	0.00112+0.000224 R
	($Q=1274.361$ derived from χ_s)

검증하기 위하여 울산앞바다지진(1998/01/08)과 비교 해 보았다. Fig. 4는 모멘트규모 3.71인 울산앞바다지진의 진폭스펙트럼과 입력자료를 이용하여 계산한 ω^2 모델 스펙트럼을 비교한 그림이다. 1Hz~25Hz의 구간에서 실제 스펙트럼과 모델 스펙트럼의 주파수적 특성이 서로 유사함을 알 수 있다.

이와 같이 검증된 입력자료 및 모델 스펙트럼을 이용하여 합성지진파를 계산하였다. 합성지진파는 추계학적 방법을 이용하여 가우스의 무작위 백색잡음과 모델 스펙트럼을 이용하여 계산한다. Fig. 5는 울산앞바다지진의 가속도 변환자료와 모멘트규모 3.71인 경우에 추계학적 방법으로 계산된 합성 지진파자료를 비교한 것이다. 진원거리가 짧은 경우 합성지진파의 최대진폭이 관측자료보다 크게 계산된다. 이것은 진원거리가 짧은 경우 Q 값(혹은 χ_s)보다 상대적으로 큰 영향을 주는 χ_s 가 너무 작게 계산되고 이러한 영향이 25Hz 이상의 영역에도 적용되었기 때문이다. 이와 반대로 진원거리가 먼 경우에는 χ_s 에 의한 영향이 상대적으로 작아

Observed Accelerograms : Synthetic Accelerograms :

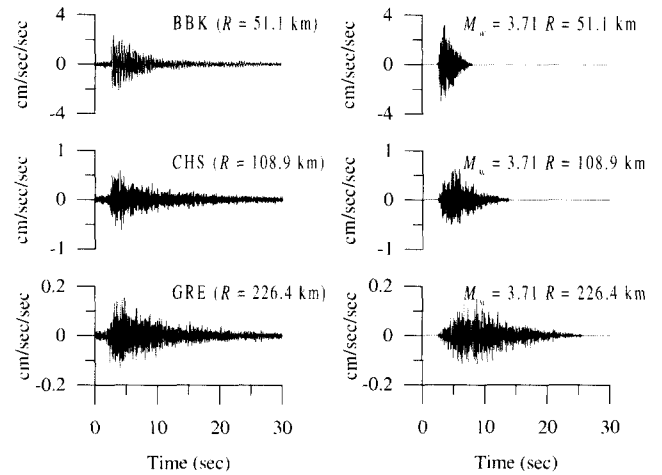


Fig. 5 Comparisons between observed and simulated time series of acceleration. Each observed accelerograms is converted from the velocity seismogram of the offshore Ulsan earthquake

지고 Q 값에 의한 영향이 상대적으로 커지기 때문에 관측자료와 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 또한 합성지진파자료는 방사형태(radiation pattern)를 고려하지 않았으며 따라서 관측자료와 정확하게 일치할 수는 없다. 이와 같이 여러 가지 외적인 요소들을 고려할 때, 계산된 합성지진파 자료의 최대진폭 및 지진파지속시간 등 지진학적 특성은 실제 관측자료와 유사하다고 할 수 있다.

이와 같이 두 가지 검증과정을 통하여 이번 연구에서 사용한 입력상수가 한반도 남부에서의 진원과 전파경로 및 관측점에서의 특성을 잘 표현하며 추계학적 모사법 또한 한반도 남부에서 잘 적용됨을 알 수 있다.

4.2 응답스펙트럼의 계산

Table 2에 제시된 입력자료를 추계학적 모사법에 적용하여 한반도 남부에서의 강진에 의한 지반의 움직임을 추정해보았다. 각각의 모멘트규모-진원거리에 대하여 200회 모사를 수행하여 평균값을 계산하였다. 모멘트규모 4, 5, 6, 7인 경우 감쇠율(damping factor)이 5%인 의사가속도의 응답스펙트럼(pseudo-acceleration response spectra)을 진원거리 10km, 50km, 100km에 대하여 계산하면 Fig. 6과 같다. 주파수대역 0.2Hz~100Hz 사이의 영역에 대하여 계산을 수행하였다. Fig. 6을 살펴보면 진원거리가 10km인 경우의 응답스펙트럼은 약 35Hz 부근에서 감쇠하기 시작하며, 진원거리가 50km인 경우에는 약 20Hz부터, 100km인 경우에는 약 10Hz부터 응답스펙트럼이 감쇠하기 시작한다. 일반적으로 한반도와 비슷한 판내부 지진환경인 미국 동부의 경우 진원거리가 10km일 때 약 10~20Hz부터 감쇠가 시작된다. 하지만 이번 연구결과는 이보다 높은 주파수인 약 35Hz 부근에서 감쇠가 시작된다. 이번 연구의 계산 결과가 미국 동부의 경우와 상당히 큰 차이를 보이는 것은 감쇠상수 χ 의 상수항인 χ_s 값이 실제 감쇠특성보다 작은 값으로 계산되었기 때문일 가

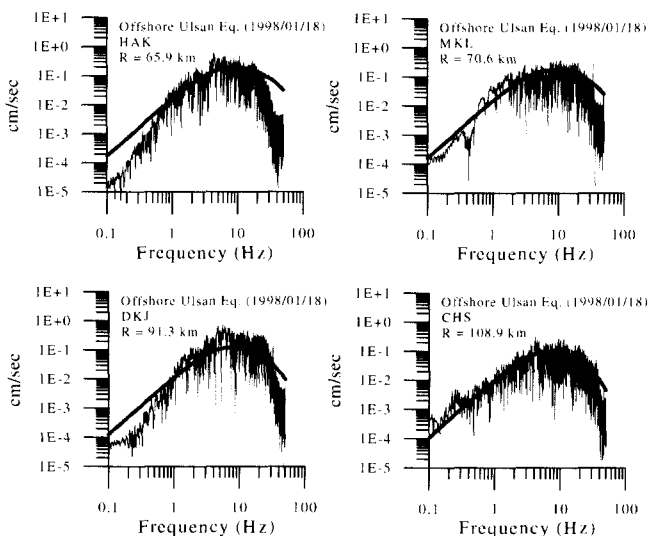


Fig. 4 Comparisons of Fourier amplitude spectra of accelerations from model(smooth curves) and observed spectra(jagged curves) of the offshore Ulsan earthquake. These model amplitude spectra of high frequency(1~30Hz) are similar to the observed ones

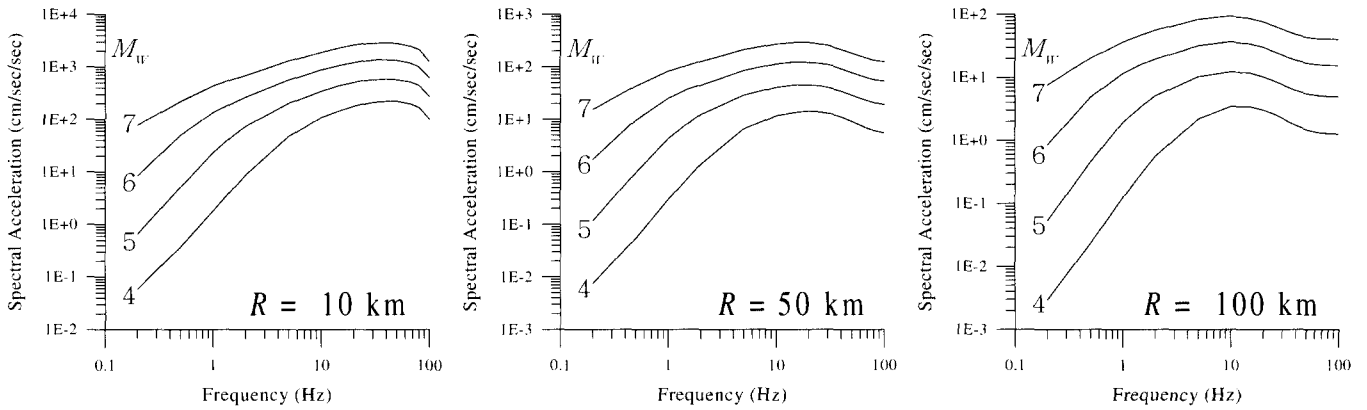


Fig. 6 The 5% damped pseudo-acceleration response spectra simulated 200 times using the stochastic method

능성이 있으며 앞으로 x_s 값은 보다 양질의 자료를 통해서 검토 및 개선되어야 할 필요가 있다.

4.3 진원거리에 따른 지반거동특성

Fig. 7은 최대지반가속도(PGA)의 진원거리에 따른 변화 그래프이다. 그림에서 별표(☆)로 표시된 값은 추계학적 모사법을 이용하여 계산된 최대지반가속도이다. 최대지반가속도의 진원거리에 따른 변화를 추정하기 위하여 진원거리 10km~500km 사이를 0.05씩 등로그간격으로 나누어 각각의 모멘트 규모에 35개의 관측점을 설정하여 계산하였으며, 또한 모멘트 규모를 4.0부터 0.25간격으로 증가시켜 최대 7.5까지 모두 15개의 규모에 대하여 계산을 수행하였다. 따라서 총 525개 경우의 최대지반가속도를 계산하였다. 이러한 추계학적 모사법의 결과로부터 지진동 감쇠공식(seismic attenuation equation)을 유도하여 4개의 규모에 대하여 실선으로 표시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 진원거리에 따른 감쇠효과는 진원거리 100km를 기준으로 하여 서로 다르게 설정해 주었기 때문에 Fig. 7에서 보는 바와 같이 진원거리 100km 앞뒤에서 최대지반가속도의 감쇠경향이 서로 다를 수 있다.

계산된 결과를 실제 관측자료와 비교하기 위하여 모멘트 규모 3.71인 울산앞바다지진(1999)의 가속도자료의 수평횡단 성분(transverse component) 최대지반가속도를 Fig. 7에 'U'로 표시하였으며, 모멘트규모 3.71인 경우의 추계학적 모사법에 의한 결과는 굵은 점선으로 표시하였다. 울산앞바다지진으로부터 관측된 최대지반가속도인 'U'점이 추계학적 모사법의 결과인 굵은 점선을 중심으로 분포하는 것을 쉽게 알 수 있다. 최대지반가속도(PGA) 외에도 최대지반속도(PGV) 역시 그와 동일한 모멘트규모-진원거리 조건에서 추계학적 모사법으로 계산하였다. 고유진동수(natural frequency) 대역 0.2Hz~100Hz에서 17개의 주파수를 선택하여 스펙트럼가속도(SA)를 계산하였다. 이렇게 계산된 최대지반가속도, 최대지반속도, 그리고 각각의 고유진동수에 해당하는 스펙트럼가속도를 이용하여 진원거리에 따른 지진동 감쇠공식(seismic attenuation equation)을 유도하였다.

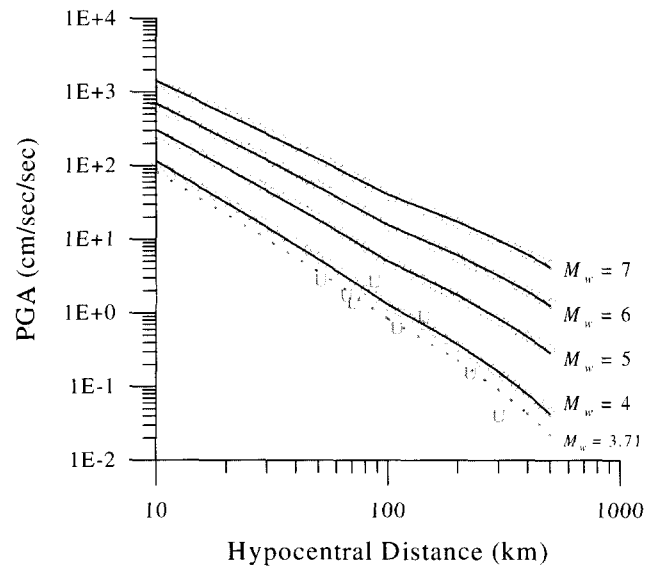


Fig. 7 Hypocentral distance dependence of PGA for $M_w=4, 5, 6,$ and 7 . The traces indicated by the symbol star (\star) show results of the stochastic simulation method. Solid lines depicts curves of attenuation equations derived from results of the stochastic simulation method. The symbol 'U' represent observed data recorded by the offshore Ulsan earthquake of $M_w=3.71$

4.4 강진동 감쇠공식 유추

추계학적 모사법에 의해서 추정된 강진동에 의한 지반 움직임의 특성을 식 (12)와 같은 형태로 표현하였다.

$$\ln SA (\text{cm/sec}^2) = c_0 + c_1 R + c_2 \ln R - \ln[\min(R, 100)] - \frac{1}{2} \ln[\max(R, 100)] \quad (12)$$

여기에서 상수항 $c_k (k=0, 1, 2)$ 는 다음과 같이 모멘트규모 (M_w)의 2차식으로 정의된다.

$$c_k = \xi_0^k + \xi_1^k (M_w - 6) + \xi_2^k (M_w - 6)^2 + \xi_3^k (M_w - 6)^3, \quad k = 0, 1, 2 \quad (13)$$

식 (13)에서 계수 및 상수로 사용된 $\xi_k (k=0, 1, 2)$ 는 강지진동의 추계학적 모사결과로부터 계산되어진다. 식 (12)에서

자연로그(ln)항의 계수를 진원거리에 따라 서로 다르게 설정한 이유는 진원거리에 따른 감쇠효과를 더욱 세밀하게 보기 위해서이다. 이러한 설정으로부터 진원거리 100km를 기준으로 좌우의 감쇠효과가 서로 다르게 나타나는 효과를 얻을 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 추계학적 모사법으로 계산된 525개의 결과를 식 (12)에 대입하고 다중최소자승법(multiple least squares method)을 이용하여 각각의 계수 (ξ_i^k , $k = 0, 1, 2$; $i = 0, 1, 2, 3$)를 구하였다. 이러한 방법을 통하여 추계학적 모사법의 결과와 가장 유사한 감쇠공식을 유도해내었다. 각각의 경우에 해당하는 감쇠공식의 계수는 Table 3과 같다.

5. 결과 및 토의

응력강하는 축적된 응력(stress) 중에서 지진발생으로 인해 해소되는 응력값으로 지진원의 특성을 파악하는 중요한 상수로 사용된다. 응력강하는 정의에 따라 정적응력강하(static stress drop)와 동적응력강하(dynamic stress drop)로 분류할 수 있다. 그러나 지진관측자료로부터 정적응력강하를 직접 구하는 것은 어려운 일이다. 이러한 응력강하 계산의 한계로 인하여 강진동 연구에는 Brune의 응력강하가 일반적으로 사용되어진다. Brune의 응력강하는 변위 스펙트럼에서 코너주파수와 극저주파수에서의 진폭으로 결정된다. 여러 연구자에 의해서 Brune의 응력강하를 계산하는 기법이 개발되어져 왔으며 이번 연구에서는 앞서 제시한 Snook⁽¹⁹⁾와 Andrews⁽²⁰⁾의 방법을 접목시키면서도 반복적인 계산법을 사용하였다. 이번 연구에서 계산된 응력강하값을 근거로 하여, 강진동 모사에 입력자료로 사용한 100-bar는 미국 동부에서 주로 사용하는 값과 비슷하다. 일반적으로 판내부 지진환경인 경우의 응력강하(약 100-bar)는 판경계부 지진환경인 경우(약 50-bar)보다 큰 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Kanamori and Anderson⁽²³⁾). 따라서 울산앞바다지진(1998/01/08)의 관측자료를 이용하여 응력강하를 계산한 결과인 100.2-bar는 한반도와 같은 판내부 지진환경인 미국 동부와 비교할 때 의미있는 값이라고 할 수 있다.

응력강하는 지진의 발생 메커니즘과 밀접한 관계를 맺고 있다. 하지만 같은 지진구역의 지진으로부터 언제나 같은 크기의 응력강하가 발생한다고는 할 수 없다. 즉, 응력강하 100-bar라는 수치는 입력상수(input parameter)로서의 의미이며 한반도 남부에서 발생하는 모든 지진의 응력강하가 100-bar라는 설명은 아니다. 이러한 이유로 Atkinson and Beresnev⁽²⁴⁾는 추계학적 모사법을 이용한 강진동 연구에서 응력강하(stress drop)라는 표현은 옳지 않으며 응력상수(stress parameter)라는 표현이 적당하다는 견해를 밝히고 있다. 따라서 한반도 남부에서 발생하는 강진동에 적용한 상수인 100-bar는 입력상수의 의미로 받아들여지는 것이 타당하다.

응력강하값을 정확히 계산하기 위해서는 저주파성분의 특성과 고주파성분의 특성을 모두 표현할 수 있는 광대역

지진관측기록이 필요하다. 하지만 이번 연구에 사용한 울산 앞바다지진의 관측자료는 단주기 관측자료이다. 따라서 지진파의 주파수적 특성의 기록에는 어느 정도 한계를 갖는다. 또한 한반도에서 발생한 지진 중 규모 5.0이상의 디지털 지진기록은 전무한 상태이다. 따라서 강진동의 진원적 특성인 응력강하를 계산하기 위해서는 규모 4.0정도의 지진자료를 사용하거나 자료가 부족한 경우에는 규모 4.0이하의 소규모 지진자료를 사용하여 큰 규모인 경우를 유추해야만 한다. 이러한 한계상황 때문에 응력강하의 계산에는 많은 어려움이 따른다. 최근 급증하고 있는 광대역 지진관측망 및 지진관측자료를 이용하여 응력강하를 계산하여 검토하는 과정을 통해서 현재보다 타당한 연구결과를 도출해 낼 수 있을 것이다.

이번 연구로부터 식 (10)에 제시된 감쇠상수 α 는 계산에 사용한 지진관측자료의 한계로 인하여 약간의 문제점이 있다. 일반적으로 실제 가속도 관측자료를 이용하여 계산한 미국 동부에서는 α_s 값이 0.006(EPRI⁽²⁵⁾)이며, 미국 서부에서는 0.02(Boore et al.⁽²⁶⁾)이다. Anderson and Hough⁽²⁷⁾는 처음으로 감쇠상수 α 를 도입하면서 미국 서부에서 α_s 값으로 0.04를 제시하였으며, Boore et al.⁽²⁷⁾는 이 값이 계산되어질 수 있는 가장 큰 α_s 값이라고 설명하였다. 따라서, 한반도 남부에서 α_s 값으로 설명할 수 있는 감쇠특성도 위의 범위에서 정의될 가능성이 높다고 할 수 있으며, 이번 연구에서 계산된 α_s 값은 0.00112로 실제 감쇠특성보다 작게 계산되었을 가능성이 높다는 이유도 여기에 있다.

이렇게 계산된 이유는 다음과 같이 두 가지 요인으로 설명할 수 있다. 첫 번째 이유는 속도자료를 가속도자료로 변환시키는 과정상의 오류이다. 즉, 속도자료를 가속도자료로 변환시키는 과정에서 고주파성분의 잡음이 실제보다 크게 증폭된다. 고주파영역의 잡음이 증폭된 가속도자료로부터 감쇠상수를 계산한다면 그 부분에서의 감쇠특성이 제대로 계산에 반영되지 않게 된다. 두 번째 이유는 알리아싱 방지필터(anti-aliasing filter)에 의한 계산 영역의 제한을 들 수 있다. 이번 연구에 사용한 지진자료는 1초당 100회 샘플링을 한 단주기 지진자료이다. 따라서 스펙트럼상에 표현할 수 있는 최대주파수(Nyquist frequency)는 50Hz이다. 또한 지진계에 기록된 아날로그자료는 최대주파수의 1/2인 주파수부터 알리아싱 방지필터를 사용한 후 디지털화하여 기록한다. 이때 알리아싱 방지필터에 의한 영향이 25Hz 이상의 주파수영역에 작용하여 이 영역의 자료를 사용할 수 없다. 그러므로 이번 연구에서 감쇠상수 α 를 계산하기 위하여 최대 25Hz까지의 자료만을 사용하였다. 이러한 경우 25Hz 이상 고주파수 영역에서 나타날 수 있는 진폭스펙트럼의 갑작스러운 감쇠특성이 감쇠상수 α 계산에 포함되지 않는다. 따라서, 코너주파수 이상의 주파수 영역에서 평균적인 감쇠특성이 고주파영역의 자료를 사용할 수 없는 경우에는 상대적으로 작게 나타날 수도 있다. 그러나 감쇠상수 α 를 처음으로 제시한 Anderson and Hough⁽²⁷⁾는 25Hz까지의 자료만을 사용하여 계산하였지만, 그들은 코너주파수가 작은 큰 규모의 지진을

Table 3 Coefficients of attenuation equations of PGA, PGV, and SA for 17 natural frequencies

	ξ_0^0 ξ_0^1 ξ_0^2	ξ_1^0 ξ_1^1 ξ_1^2	ξ_2^0 ξ_2^1 ξ_2^2	ξ_3^0 ξ_3^1 ξ_3^2
PGA	0.1250737E+02 -0.1928185E-02 -0.5795112E+00	0.4874629E+00 0.2251016E-03 0.1138817E+00	-0.2940726E-01 -0.6378615E-04 -0.1162326E-01	0.1737204E-01 0.6967121E-04 -0.3646674E-02
PGV	0.7789091E+01 -0.1438029E-02 -0.1520985E+00	0.9951892E+00 0.3451011E-03 0.1126463E+00	0.6154327E-02 0.2012708E-05 -0.2305941E-01	0.1879802E-01 0.5240958E-04 -0.3356242E-02
0.2Hz	0.6748878E+01 -0.6739686E-03 0.1573299E-01	0.2338012E+01 0.1588440E-03 0.4329298E-01	-0.6346509E-01 0.4959807E-04 -0.5439613E-01	-0.7885718E-01 0.8969257E-05 -0.1811300E-02
0.5Hz	0.8570785E+01 -0.1020099E-02 -0.5191000E-02	0.1988713E+01 0.1655902E-03 -0.1211347E-01	-0.3460281E+00 0.3172894E-04 -0.1608667E-01	-0.1060035E+00 -0.1811364E-04 0.1661280E-01
1Hz	0.9671624E+01 -0.1415998E-02 -0.4075062E-01	0.1499344E+01 0.2881096E-03 -0.2460636E-01	-0.3644449E+00 -0.4374041E-04 0.1240709E-01	-0.2773117E-01 -0.6945151E-04 0.2094933E-01
1.5Hz	0.1010845E+02 -0.1822406E-02 -0.5015443E-01	0.1177525E+01 0.1996771E-03 0.3010483E-02	-0.2589597E+00 0.4401315E-05 0.5349041E-02	0.3796346E-01 -0.3307164E-04 0.9949567E-02
2Hz	0.1044486E+02 -0.2089994E-02 -0.7449488E-01	0.9862914E+00 0.1771030E-03 0.2197406E-01	-0.2249107E+00 -0.2890120E-04 0.1124348E-01	0.5453894E-01 -0.3634473E-04 0.7173960E-02
5Hz	0.1129348E+02 -0.3752774E-02 -0.1224307E+00	0.7542715E+00 0.2174637E-03 0.4852117E-01	-0.1212122E+00 -0.2620464E-04 0.9174080E-02	0.3864998E-01 -0.1122502E-04 0.5765749E-04
10Hz	0.1203651E+02 -0.5181439E-02 -0.2277337E+00	0.6994448E+00 0.4523458E-03 0.5360536E-01	-0.8729106E-01 -0.9517054E-04 0.7104984E-02	0.2693829E-01 0.1188106E-06 -0.3338512E-02
15Hz	0.1273133E+02 -0.4891834E-02 -0.4034467E+00	0.7211926E+00 0.6691358E-03 0.4179534E-01	-0.1060212E+00 -0.2312276E-03 0.1573228E-01	0.9376594E-02 0.1039735E-04 -0.6931448E-04
20Hz	0.1327677E+02 -0.4033404E-02 -0.5670292E+00	0.7183055E+00 0.7191665E-03 0.4196827E-01	-0.9757102E-01 -0.2633597E-03 0.1442712E-01	-0.2127865E-02 0.1008616E-04 0.2569584E-02
25Hz	0.1369225E+02 -0.3130929E-02 -0.7019140E+00	0.7101845E+00 0.7757396E-03 0.4086220E-01	-0.1099341E+00 -0.3122398E-03 0.1865621E-01	-0.1989956E-01 -0.3272674E-04 0.8626813E-02
30Hz	0.1397627E+02 -0.2361991E-02 -0.8021511E+00	0.6931092E+00 0.7552491E-03 0.4576871E-01	-0.1044502E+00 -0.2922865E-03 0.1612178E-01	-0.3057737E-01 -0.4473776E-04 0.1142429E-01
33.3Hz	0.1408802E+02 -0.1996845E-02 -0.8450261E+00	0.6881877E+00 0.7553017E-03 0.4666365E-01	-0.1077472E+00 -0.2883635E-03 0.1629080E-01	-0.4042628E-01 -0.5838245E-04 0.1406417E-01
40Hz	0.1419453E+02 -0.1388304E-02 -0.9020459E+00	0.6217579E+00 0.6137653E-03 0.6704552E-01	-0.6343699E-01 -0.2126977E-03 0.3816445E-02	-0.1979969E-01 -0.1891667E-04 0.8166676E-02
50Hz	0.1419907E+02 -0.8422372E-03 -0.9369055E+00	0.5743998E+00 0.4792472E-03 0.8335114E-01	-0.4927236E-01 -0.1525942E-03 -0.2275068E-02	-0.1152787E-01 0.1394868E-04 0.4925720E-02
66.6Hz	0.1389090E+02 -0.6497159E-03 -0.8955081E+00	0.5020468E+00 0.3062205E-03 0.1061274E+00	-0.2180853E-01 -0.6481423E-04 -0.1219753E-01	0.7728362E-02 0.6089736E-04 -0.1032077E-02
80Hz	0.1351537E+02 -0.8420019E-03 -0.8189346E+00	0.4934793E+00 0.2564498E-03 0.1104468E+00	-0.2215986E-01 -0.5001147E-04 -0.1302738E-01	0.7716247E-02 0.6699587E-04 -0.1323833E-02
100Hz	0.1248950E+02 -0.1958068E-02 -0.5751957E+00	0.5191206E+00 0.3182504E-03 0.1024854E+00	-0.4119159E-01 -0.8564197E-04 -0.7594097E-02	0.6135283E-02 0.4281308E-04 0.3678573E-03

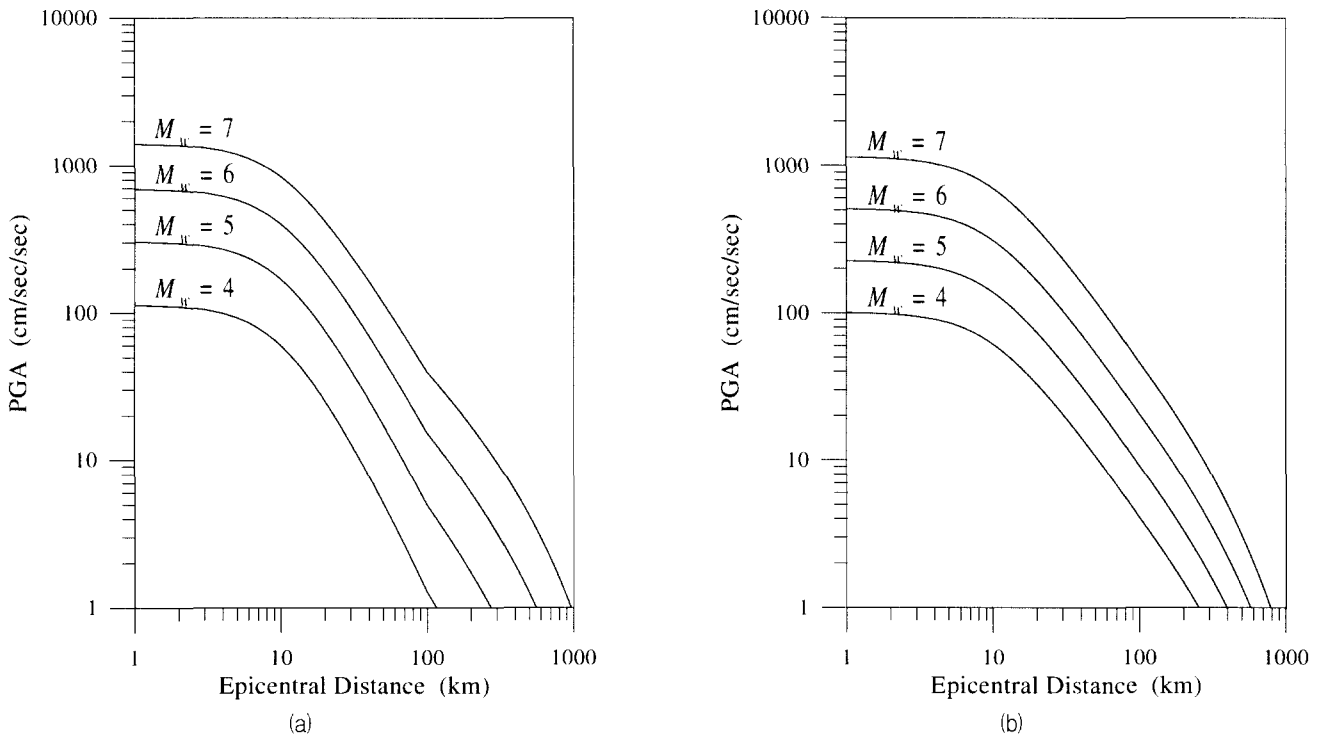


Fig. 8 Comparisons of attenuation relations from (a) southern Korea derived in this study and (b) ENA by Toro et al.(1997). Near the epicenter, PGA of southern Korea is predicted larger than that of ENA, due to the higher α_s value of southern Korea than that of ENA

사용하였으며, 지역특성상 감쇠효과가 큰 지역을 대상으로 연구를 진행하였기 때문에 큰 문제가 없었던 것으로 보인다.

앞서 언급한 두 가지 이유 때문에 α_s 값이 실제 감쇠경향보다 작게 계산되었을지라도 각각의 지진관측자료에 동일한 영향이 가해졌다고 가정한다면 감쇠상수 α 의 거리에 따른 기울기인 α_0 값은 올바른 계산결과라 할 수 있다.

최근 한반도에서 강진에 관한 관심이 고조되고 있으며 작은 규모의 지진에 대한 관측자료이기는 하지만 가속도 관측자료가 많이 보고되고 있다. 이러한 가속도 관측자료를 이용하여 감쇠상수 α 를 계산한다면 앞에서 언급한 두 가지의 문제점을 해결할 수 있으며, 현재 연구결과보다 적절한 감쇠상수 α 를 계산할 수 있을 것이다.

Fig 8(a)는 이번 연구에서 한반도 남부에서의 모멘트 규모별로 계산된 진앙거리-최대지반가속도 그래프이며, Fig. 8(b)는 Toro et al.⁽²¹⁾에 의하여 한반도와 같은 판내부 지진환경인 미국 동부에서 개발된 진앙 거리에 따른 최대지반가속도의 그래프이다. 지진환경이 비슷한 두 지역을 비교해볼 때 진앙근방에서의 최대지반가속도는 한반도의 값이 미국 동부의 값과 비교하여 좀 더 큰 값으로 계산되어졌다. 이러한 현상은 α_s 값이 실제 감쇠특성보다 작은 값으로 계산되었기 때문으로 여겨진다. 이와 반대로 한반도 남부에서 계산된 그래프의 감쇠 기울기는 미국 동부의 것보다 큰 값을 쉽게 파악할 수 있다. 이것은 진원거리가 멀어짐에 따라 비탄성 감쇠효과가 크게 작용하기 때문으로 한반도 남부에서의 비탄성 감쇠효과가 미국 동부보다 크다고 말할 수 있다. 이것은 한반도 남부의 지각이 미국 동부의 지각보다 지진파의 감쇠 요인이 크다는 것을 설명하는 것이다. 이 두 가지 현상

으로부터 한반도 남부의 지진원은 미국의 동부와 같은 판내부 지진환경의 특성을 보이고 있으나 지진파가 전파되는 지각의 감쇠효과는 미국의 동부보다 더 크게 나타남을 알 수 있다.

이번 연구로부터 계산된 응력강하($\Delta\sigma$)와 감쇠상수 α 및 지진동 감쇠공식 등은 한반도 남부에서의 강지진동 연구에 유용한 기초자료로 사용될 수 있으며 양질의 관측 자료가 축적되고 다양한 계산방법이 적용된다면 한반도 남부에 보다 적합한 연구결과를 얻어낼 수 있을 것이다.

감사의 글

이번 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통하여 실시된 한국과학재단 우수연구센터 지원(과제번호: 2000G0101)에 의한 것입니다. 연구비 지원에 대하여 감사드립니다.

참고 문헌

1. Brune, J., "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes," *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 1970, pp. 997-5006.
2. Boore, D., "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 73, 1983, pp. 1865-1894.
3. Atkinson, G., "Attenuation of strong ground motion in Canada from a random vibrations approach," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, 1984, pp. 2629-2653.

4. Atkinson, G. and Boore, D., "Stochastic point-source modeling of ground motions in the Cascadia region," *Seismological Research Letters*, Vol. 68, 1997, pp. 74-85.
5. Toro, G. and McGuire, R., "An investigation into earthquake ground motion characteristics in eastern North America," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 77, 1987, pp. 468-489.
6. Atkinson, G. and Boore, D., "Ground motion relations for eastern North America," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 85, 1995, pp. 17-30.
7. Hanks, T. and McGuire, R., "The character of high-frequency strong ground motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, 1981, pp. 2071-2095.
8. 노명현, 이기화, "한반도 남동부 지역에서의 최대 지반운동치의 추정(I): 스펙트럼 파라미터의 추정", *지질학회지*, 제30권, 1994, pp. 297-306.
9. 노명현, 이기화, "한반도 남동부 지역에서의 최대 지반운동치의 추정(II): 예측공식의 개발", *지질학회지*, 제31권, 1994, pp. 175-187.
10. Baag, C. E., Chang, S. J., Jo, N. D., and Shin, J. S., "Evaluation of seismic hazard in the southern part of Korea," *2nd International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Region of Moderate Seismicity*, Korea Earthquake Engineering Research Center, Seoul, Korea, 1998, pp. 31-50.
11. Park, J. U., Noh, M. H., and Lee, K., "Development of attenuation equations of ground motions in the southern part of the Korean Peninsula," *Jour. Earthq. Eng. Soc. Kor.*, Vol. 3, 1999, pp. 21-28.
12. 박동희, 이정모, 김성균, "한반도 동남부의 지진과 감쇠와 지진원 요소", *한국지진공학회논문집*, 2001, 인쇄중.
13. 이정모, 박동희, 박창엽, "한반도 동남부의 강진동 모사와 감쇠식", 2000년 춘계학술발표회 논문집, 한국지진공학회, pp. 70-77.
14. Baag, C. E., Chang, S. J., Jo, N. D., and Shin, J. S., "Evaluation of seismic hazard in the southern part of Korea," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2000, submitted.
15. Jo, N. D., "Stochastic prediction of strong ground motions in southern Korea," M.S. Thesis, Seoul National University, 1999, p. 129.
16. Hanks, T. and McGuire, R., "The character of high-frequency strong ground motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, 1981, pp. 2071-2095.
17. Herrmann, R., "An extension of random vibration theory estimates of strong ground motion to large distances," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 75, 1985, pp. 1447-1453.
18. Saragoni, G. and Hart, G., "Simulation of artificial earthquakes," *Earthquake Eng. Str. Dyn.*, Vol. 2, 1974, pp. 249-267.
19. Snoke, A., "Stable determination of (Brune) stress drops," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 77, 1987, pp. 530-538.
20. Andrews, D. J., "Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size," *5th Maurice Ewing Symp. Earthquake Source Mechanics*, American Geophysical Union, Washington, D.C., 1981, pp. 259-267.
21. Toro, G., Norman, A., and John, S., "Model of strong ground motions from earthquakes I central and eastern North America: Best estimates and uncertainties," *Seismological Research Letters*, Vol. 68, 1997, pp. 41-57.
22. Ma, Z., Fu, Z., Zhang, Y., Wang, C., Zhang, G., and Liu, D., *Earthquake Prediction : Nine Major Earthquakes in China (1996-1976)*, Seismological Press Beijing, Beijing, 1990, pp. 10-17.
23. Kanamori, H. and Anderson, D. L., "Theoretical basis of some empirical relations in seismology," *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. 65, 1975, pp. 1073-1095.
24. Atkinson, G. and Beresnev, I., "Dont call it stress drop", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, 1997, pp. 3-4.
25. Electric Power Research Institute(EPRI), "Guidelines for determining design basis ground motions. Volume 1: Method and guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America," TR112293, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, November, 1993.
26. Boore, D., Joyner, W., and Wennerberg, L., "Fitting the stochastic ω^{-2} source model to observed response spectra in western North America: Trade-off between $\Delta\sigma$ and κ ," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 82, 1992, pp. 1956-1963.
27. Anderson, J. and Hough, S., "A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, 1984, pp. 1969-1993.