

층상구조에서 지진파 전파경로를 고려하여 수정된  
경험 Green 함수를 이용한 지반운동 모사

Site-Specific Ground Motions based on Empirical Green's Function  
modified for the Path Effects in Layered Media

조 남 대 \*      박 창 업 \*\*  
Jo, Nam-Dae      Baag, Chang-Eob

---

ABSTRACT

Seismic parameters for computation of ground motions in Southern Korea are obtained from recently recorded data, and site-independent regional and site-dependent local strong ground motions are predicted using efficient computational techniques. For the computation of ground motions, we devised an efficient procedure to compute site-independent  $x_q$  and dependent  $x_s$  values separately. The first step of this procedure is to use the coda normalization method for computation of site independent  $Q$  or corresponding  $x_q$  value. The next step is the computation of  $x_s$  values for each site separately using the given  $x_q$  value. For computation of ground motions the empirical Green's function (EGF) is modified to account for the depth and distance variations of subevents on a finite fault plane using the theoretical Green's function. It is computed using wavenumber integration technique in layered media. The site dependent ground motions at seismic stations in southeastern local area were properly simulated using the modified empirical Green's function method in layered medium. The proposed method and procedures for estimation of site dependent seismic parameters and ground motions could be efficiently used in the low and moderate seismicity regions.

---

1. 서론

미래에 발생할 수 있는 지진에 의한 재난의 완화를 준비하기 위하여, 그 지역에서 발생할 수 있는 강지진동의 최고치와 발생 가능한 지진의 각 규모에 해당하는 스펙트럼에 관하여 많은 연구를 수행하여야 한다. 만일 그 지역을 대표할 수 있는 수 개의 제한된 지진요소를 안다면 미래의 임의

---

\* 서울대학교 지구환경과학부 박사과정, 학생회원  
\*\* 서울대학교 지구환경과학부 교수, 정회원

의 지진에 의한 강지진동은 합성지진파 계산에 의하여 추정될 수 있다. 이로부터 계산된 지진 기록으로부터 가속도 최고치, 진동시간 또는 응답스펙트럼과 같은 공학적 요소를 얻을 수 있다. 특히 원자력 발전소, 항만, 댐, 대도시 등 강진이 발생한 경우 대규모의 피해가 예상되는 지역에 대해서는 중점적인 연구가 필요하다.

한국에서는 역사시대, 특히 15세기와 18세기 사이에 파괴적인 지진이 많이 발생하였다. 하지만 20세기에는 단지 소규모 또는 중규모의 지진만이 발생하였다. 또한 20세기에도 양질의 지진기록이 축적되는 기간은 대단히 짧았으며 더구나 가속도 관측망은 최근 수 년 동안 설치되어왔다. 이와 같이 한국에서는 중규모 또는 대규모 지진에 의한 강지진동 자료가 부족하므로 지진학적 요소에 기초를 둔 합성 지진파 계산이 불가피하다. 강지진동의 추정에는 지진모멘트, 코너주파수, 응력강하상수, 지진파 전파상수 등이 입력자료로 사용된다. 이중 전파상수는  $x$ 와 지역감쇠효과( $R^{-\gamma}$ )로 구분할 수 있으며, 전파상수  $x$ 는 진원거리에 따라서  $x = x_s + x_g R$ 의 형태로 표현되어진다.

이번 연구에서는 넓은 지역에서 비슷한 특성을 보이는  $x_g$ 값과 관측지점의 특성을 고려한  $x_s$ 값을 계산하는 방법을 제시한다.  $x_g$ 값과 지역감쇠효과( $R^{-\gamma}$ )의  $\gamma$ 값은 coda파를 이용한 스펙트럼 정규화법(coda normalization method)<sup>(1)</sup>을 이용하여 계산된다. 이와 같이 계산된  $x_g$ 값을 이용하여 각 관측점에서의  $x_s$ 값을 계산한다. 이렇게 계산된  $x_s$ 값은 관측점의 지역특성이 반영된 결과이다. 계산된 결과를 경험 Green 함수(Empirical Green's Function; EGF)에 적용하여 각 관측점에서의 지반운동을 모사할 수 있다. 경험 Green 함수(EGF)란 큰 규모의 지진과 동일한 진원특성을 지닌 작은 지진의 진원함수이다. 일반적으로 강진동 모사에는 큰 규모 지진의 여진(aftershock) 중에서 적당한 크기의 여진이 경험 Green 함수로 사용된다. 경험 Green 함수를 이용한 강진운동의 모사는 복합단층진원모델의 단층면을 구성하는 각 요소들의 진원함수를 경험 Green 함수로 가정하여 이루어진다. 이 경우 강진의 진원함수를 함수식으로 정의하지 않아도 된다는 장점이 있다. 일반적으로 경험 Green 함수를 이용하는 경우 지각 속도를 일정한 값으로 하여 지반운동을 계산하였다. 하지만 진원 깊이가 서로 다른 경우 관측점에서 기록되는 지반운동은 서로 다른 특성을 보인다. 따라서 복합단층진원모델에서의 단층요소마다 진원의 깊이와 전파경로를 고려하여 경험 Green 함수를 수정하여야 한다. 이번 연구에서는 지각의 속도구조를 층상구조로 정의하고 진원의 깊이 및 전파경로의 특성을 고려하여 강진운동을 모사하였다. 전파경로의 특성은 파수적분법을 이용하여 층상구조에서 계산된 합성지진파를 이용하였다. 경험 Green 함수로는 1999년에 경주근방에서 3회 발생한 지진(4월 24일, 6월 2일, 9월 12일 발생)의 관측자료 중 진원거리가 120km 이내의 자료만을 사용하였다.

## 2. 지역특성을 고려한 지진상수 추정

### 2.1. 전파상수

전파상수  $x$ 는 진원거리에 따라 식 (1)과 같이 표현된다.

$$x = x_s + x_g R \quad (1)$$

지금까지의 다양한 연구결과로부터 산출된 전파상수  $x$ 는 한반도 남부 또는 남동부에 광범위하게 적용할 수 있는 값이었다. 식 (1)에서 진원거리( $R$ )의 계수인  $x_g$ 는 전파경로에 따른 매질의 전파특

성을 반영하는 값이므로 광역적인 상수로 계산될 수 있다. 하지만  $x_s$ 의 경우 관측지점의 증폭 및 감쇠특성에 따라 서로 다른 값을 갖는다. 따라서  $x_s$ 의 경우 관측지점의 특성을 고려하여 계산하는 것이 합당한 방법이다. 이와 같은 전파상수의 특성을 고려하여, 한반도 남부에서 광범위하게 사용할 수 있는  $x_s$ 값을 계산한 후, 이 값을 고정시킨 상태에서 각 관측점에서의  $x_s$ 값을 계산하였다.

S 파의 비탄성 감쇠상수 Q와 진원거리에 따른 감쇠율 ( $R^{-\gamma}$ )을 계산하기 위하여 coda파를 이용한 스펙트럼 정규화법(coda normalization method)<sup>(1)</sup>을 도입하였다. S 파의 스펙트럼  $A_S(f)$ 와 coda 파의 스펙트럼  $A_C(f)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} A_S(f) &= R_{0\theta} \cdot I(f) \cdot S(f) \cdot G(f) \cdot e^{-xQ^{-1}\beta^{-1}R} \cdot R^{-\gamma} \\ A_C(f) &= I(f) \cdot S(f) \cdot G(f) \cdot C(t_c, f) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서  $I(f)$ 는 지진계의 응답함수,  $S(f)$ 는 진원함수,  $G(f)$ 는 주파수에 따른 부지의 증폭비이며,  $C(t_c, f)$ 는 coda파의 전파특성을 표현하는 coda 감쇠함수(coda decay)이다.  $A_S(f)$ 를  $A_C(f)$ 로 나누면 응답함수, 진원함수, 증폭비가 서로 소거되며, 결과적으로 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\ln A_i(f_i) = -\pi f_i R_i Q^{-1} \beta^{-1} - \gamma \ln R_i + \ln R_{0\theta} + \ln t_c + \pi f_i t_c / Q_c \quad (3)$$

$i$ 와  $j$ 는 각각 관측자료와 주파수를 지시한다. 위의 식을 행렬형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} -\pi f_1 R_1 \beta^{-1} & -\ln R_1 & 1 & 0 & \dots \\ -\pi f_1 R_2 \beta^{-1} & -\ln R_2 & 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\pi f_2 R_1 \beta^{-1} & -\ln R_1 & 0 & 1 & \dots \\ -\pi f_2 R_2 \beta^{-1} & -\ln R_2 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\pi f_j R_j \beta^{-1} & -\ln R_j & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q^{-1} \\ \gamma \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_j \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln A_1(f_1) \\ \ln A_2(f_1) \\ \vdots \\ \ln A_1(f_2) \\ \ln A_2(f_2) \\ \vdots \\ \ln A_i(f_j) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

행렬식에 제시된  $b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_n$ 값은 계산에 적용한 주파수  $f$ 에 따라  $\ln R_{0\theta} + \ln t_c + \pi f_i t_c / Q_c$ 에 해당하는 값이다. 비탄성 감쇠상수 Q값은  $x_s$ 로 변환이 가능하므로( $x_s = (Q\beta)^{-1}$ ), 광범위한 영역에서  $x_s$ 값을 계산할 수 있다.

$x_s$ 값을 계산하기 위하여 1999년 1월 4일부터 2001년 4월 16일까지 한반도 남부에서 발생한 16개 지진의 11개 관측소에서 관측된 50개의 관측자료를 이용하였다(표 1, 그림 1). Q값과  $\gamma$ 값의 계산결과는 각각 2022.58, 0.7649이며, Q값으로부터 산출되는  $x_s$ 값은 0.0001413이다.

$x_s$ 값을 고정시킨 상태에서 각각의 관측점의 특성을 고려한  $x_s$ 값을 그림 2와 같이 추정하면 표 2와 그림 3의 결과를 얻을 수 있다. UJA(울진원전관측소)와 KRA(고리원전관측소)에서는 0.03 이상의 비교적 큰 값을 얻었으며, 이와는 반대로 GKP(경북대관측소)에서는 음의 값인 -0.01087이 계산결과로 얻어졌다. 즉 Brune의  $\omega^2$  진원모델과 비교할 때, UJA와 KRA에서는 고주파영역의 가속도 스펙트럼값이 작은 특성을 보이며, GKP에서는 비교적 큰 특성을 보인다.  $x_s$ 값의 추정에 사용한 자료의 개수는 관측소에 따라 최대 18개에서 최소 4개로 아직은 자료가 충분하지 않은 실정이다. 하지만 이러한 방법을 이용하여 각 관측소에서의 감쇠특성을 계산한다면 보다 세밀한 연구결과를 얻을 수 있을 것이다.

## 2.2. 응력강하상수

1999년 경주에서 발생한 3개 지진의 응력강하상수를 계산하기 위하여 총 15개의 관측자료를 이용하였다. 지진의 발생시기는 1999년 4월 24일, 6월 2일, 9월 12일로 그림 4에 제시되어 있다. 또한 각 지진의 진원위치와 진원특성은 표 3과 그림 5에 제시되어 있다. 진원스펙트럼의 전파특성은 앞서 계산한 전파상수  $x$ 와 지역감쇠특성을 이용하여 관측소에 따라 서로 다르게 적용해주었다. 응력강하상수의 계산은 수정 Andrews 방법(조남대와 박창업)<sup>(2)</sup>을 진원스펙트럼에 적용하여 1Hz~30Hz에서 수행하였다.

그림 6은 응력강하상수를 계산한 결과를 보여주고 있다. 3개의 경주지진으로부터 계산된 응력강하상수는 차례대로 48, 44, 99-bar이다. 사용된 자료의 개수로 가중치를 주어 평균값을 계산하면 78-bar이다. 각각의 지진으로부터 계산된 모멘트규모와 응력강하상수는 표 4에 제시되어 있다. 이와 같이 계산된 응력강하상수는 복합단층진원모델에 적용되어 단층면의 상대변위를 지정해준다.

## 3. 경험 Green 함수를 이용한 지반운동 모사

### 3.1. 경험 Green 함수

Frankel<sup>(3)</sup>은 1989년에 발생한 Loma Prieta 지진을 모사하기 위해서 Loma Prieta 지진의 여진 관측 자료를 경험 Green 함수로 적용하였다. 그 결과 모멘트규모 7.0의 Loma Prieta 지진에 의한 지반운동을 모사할 수 있었다. 이번 연구에서는 1999년 경주근방에서 3회 발생한 지진관측자료를 경험 Green 함수로 이용하여 비슷한 진원특성을 갖는 강진에 의한 지반운동을 모사하였다.

작은 크기의 경험 Green 함수를 이용하여 강진운동을 모사하기 위해서는 경험 Green 함수를 복합 단층진원모델의 특성 및 파동의 전파특성에 맞게 시간영역에서 중첩해주어야 한다. 하지만 이렇게 모사된 결과는 실제 강진운동의 주파수 특성과 일치하지 않는다. 큰 규모의 지진과 작은 규모의 지진은 코너주파수의 위치가 서로 다르며, 따라서 경험 Green 함수의 중첩만으로는 큰 규모 지진에 의한 지반운동의 저주파 특성을 설명할 수 없기 때문이다. 강진운동의 저주파적 특성을 모사하기 위하여 Frankel<sup>(3)</sup>은 RSVF(Relative slip velocity function)를 도입하였다. 즉, 경험 Green 함수의 중첩으로 모사된 강진운동의 저주파 스펙트럼값을 RSVF를 이용하여 인위적으로 올려준다. 이러한 방법으로 실제 강진운동과 주파수적 특성이 유사한 합성지진파를 모사할 수 있다.

### 3.2. 층상구조에서 지진파 전파특성 고려

기존의 경험 Green 함수를 이용한 강진운동 모사는 지진파의 전파경로에 대한 구체적인 특성을 적용하지 않았다. 따라서 전파경로의 차이로 생기는 각 단층요소에서의 경험 Green 함수의 변화에 대한 고려도 전혀 없었다. 즉, 실제 지진자료로부터 계산된 경험 Green 함수를 모든 단층면에 동일하게 적용하여 강진운동을 모사하였다. 그러나 관측점에서 기록된 경험 Green 함수는 지진원 함수와 지진파의 전파경로함수가 서로 컨볼루션(convolution)되어 있는 형태이므로, 전파경로에 따른 효과를 단층면을 구성하는 각각의 단층요소마다 보정해주어야 한다. 그림 7은 지각의 층상구조와 지진파 전파경로의 특성을 반영하는 방법을 설명해준다. 즉, 각 단층요소에서의 수정된 경험 Green 함수( $EGF_i$ )를 계산하기 위하여 경험 Green 함수( $EGF_0$ )를 실제 지진발생위치에서의 전파경로 특성( $P_0$ )만 반영된 Green 함수( $G_0$ )로 디컨볼루션 한 후, 다시 각 단층요소에서의 Green 함수( $G_i$ )로

컨볼루션한다. 지진파의 경로( $P$ )를 만족하는 Green 함수( $G$ )는 파수적분법(wavenumber integration)을 이용한 층상구조내에서의 완전파 계산으로부터 얻어진다. 파수적분법 계산에는 Chang and Baag<sup>(4)</sup>의 층상지각구조모델을 적용하였다.

### 3.3. 지반운동 모사

모멘트규모 7.0의 강지진동 모사를 위하여 40km×15km의 단층모델을 설정하였다. 단층의 상부를 지하 5km에 위치시켰으며, 단층의 중앙부는 1999년 3개의 경주지진의 위치와 동일한 북위 35.85°, 동경 129.26°에 위치하였다. 표 3에 제시된 바와 같이 3개 경주지진의 발진구조는 북북동 방향의 해와 동남동방향의 해로 계산된다. 이번 연구에서는 두 개의 해 중, 북북동방향의 해를 단층모델의 방향으로 선택하였으며, 단층의 주향을 N15°E, 경사를 SE80°로 설정하였다. 하지만 이번 연구에 적용한 단층모델의 방향 및 크기 등은 실제 경주 지역의 단층방향과는 무관하며 오직 복합단층진원모델로서만 그 의미가 있다. 앞으로 더욱 많은 연구를 통해서 지역 특성을 고려한 단층의 방향 및 단층면의 특성을 규명해 나가야 할 것이다.

복합단층진원모델의 단층면은 두 개의 서로 다른 응력강하상수를 갖는 영역으로 구분하여 그 효과를 계산하였다. 즉, 단층면 전체가 동일한 변위를 일으키는 것이 아니라, 상대적으로 응력강하가 크거나 작은 구역을 설정하여 주변과 다른 크기의 변위를 발생시키도록 하였다. 이번 연구에서는 주변보다 두 배 큰 응력강하상수를 갖는 구역을 단층면의 양쪽 중앙부에 위치시켜 그 효과가 강지진동 모사 결과에 반영되도록 하였다. 경험 Green 함수는 1999년 경주근방에서 발생한 3회의 지진에 대하여 10곳의 관측소에서 기록한 총 20개의 자료를 사용하였다.

## 4. 결과 및 토의

그림 8은 1999년 6월 2일 경주지진을 경험 Green 함수로 이용하여 모멘트 규모 7.0의 강진에 의한 지반운동을 모사한 결과의 예이다. 강진운동의 지속시간 및 최대지반가속도 등의 특성과 주파수적 특성이 실제 큰 규모의 지진특성과 비슷함을 알 수 있다.

그림 9는 최대지반가속도에 관한 기존의 연구결과와 비교한 그림이다. 진원거리 60km 근방의 계산결과가 Brune의 점진원모델을 이용한 연구결과보다 비교적 큰 값으로 계산되는 등 단층과 가까운 지역에서의 진원거리에 따른 감쇠정도가 기존연구보다 작은 특징을 보였다. 천정구등<sup>(5)</sup>은 복합단층진원모델을 이용한 경우의 진원거리에 따른 감쇠정도가 점진원모델을 이용한 경우보다 작다고 제시하였으며, 이번 연구의 결과도 이에 부합된다고 할 수 있다.

## 5. 결론

이번 연구에서는 지역적 특성을 고려하여 전파상수의 특성을 추정하였으며, 이를 이용하여 1999년 발생한 3회의 경주지진의 응력강하상수를 계산하였다. 또한 경험 Green 함수를 이용한 강지진동 모사방법을 복합단층진원모델과 지진파 전파특성에 맞게 수정하여 강지진동을 모사하였다. 그 결과 Brune의 점진원모델을 이용한 모사 결과<sup>(1)(5)</sup>보다는 큰 값으로 계산되었지만 복합단층진원모델을 이용한 추계학적 모사결과<sup>(5)</sup>와는 비슷한 특성을 보인다.

이번 연구로부터 제시된 지역 특성을 고려하여 지진상수를 추정하는 방법과, 지구구조의 특성을 고려하여 수정된 경험 Green 함수로 특정 지역의 강진운동을 모사하는 방법은 강진의 관측자료가 부족한 중약진 지역에서 효과적으로 사용될 수 있다.

#### 참고문헌

1. Frankel, A., McGarr, A., Bicknell, J., Mori, J., Seeber, L., and Cranswick, E. (1990), "Attenuation of high-frequency shear waves in the crust; measurements from New York state, South Africa, and southern California", J. Geophys. Res., Vol.95, pp.441-17447.
2. 조남대, 박창업 (2001), "추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강지진동 연구", 지진 공학회논문집, Vol.5, No.4, 인쇄중.
3. Frankel, A. (1995), "Simulating strong motions of large earthquakes using recordings of small earthquakes; The Loma Prieta mainshock as a test case", Bull. Seism. Soc. Am., Vol.85, No.4, pp.1144-1160.
4. Chang, S. J., and Baag, C.-E. (2001), "Crustal velocity structure in southeastern Korea from broadband seismic data", in preparation.
5. 전정구, 조남대, 박창업 (2001), "유한단층 효과를 고려한 한반도 남부 강지진동의 추계학적 모사", 준비중.

Table 1. List of events used for estimations of site-dependent spectral decay constant  $\chi_s$ .

Year	Month	Day	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Mag.	Year	Month	Day	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Mag.
1999	1	24	37	128.8	3.3	2000	4	15	36.6	128.3	2.3
1999	4	7	37.2	128.9	3.3	2000	5	9	35.2	128.1	2.3
1999	4	24	35.85	129.27	3.1	2000	5	19	36.3	128.5	2.7
1999	6	2	35.85	129.27	3.8	2000	8	6	36.3	128.4	2.2
1999	9	12	35.85	129.26	3.4	2000	9	23	35.6	128.4	2.4
1999	12	20	36	128.4	2.5	2000	10	8	37.3	128.8	2.6
1999	12	27	36.8	128.2	3	2001	2	14	36	128.2	2.2
2000	2	21	35.8	128.2	2.1	2001	4	16	35.9	129.7	2.2

Table 2. Computed site-dependent  $\chi_s$  values at stations.

Station	WSA	WSB	WSC	WSN	KRA	KRB	KOR	UJA	TAG	GKP	PUS
$\chi_s$	0.02647	0.01337	0.01732	0.02885	0.033	0.01513	0.02577	0.03588	0.002665	-0.01087	0.01302

Table 3. Source orientations of the three 1999 Gyeongju earthquakes.

Event	Latitude	Longitude	Depth (km)	Strike (°)		Dip (°)		Rake (°)	
1999-04-24	35.8467°N	129.2665°E	6.76	155	11	15	78	55	99
1999-06-02	35.8467°N	129.2672°E	6.8	140	10	20	80	45	105
1999-09-12	35.8522°N	129.2578°E	6.93	100	10	80	85	10	175

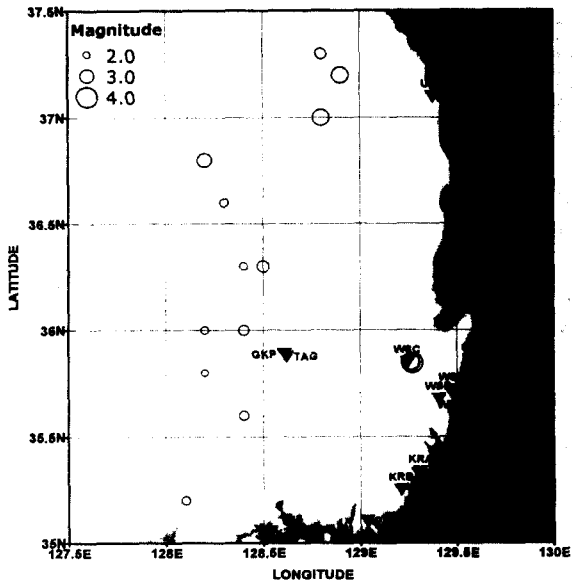


Figure 1. Distribution of epicenters and stations used for the estimation of spectral decay constant  $\alpha_s$ .

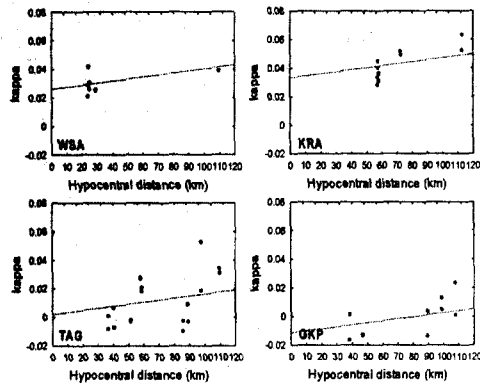


Figure 2. Example for determination of site-dependent  $\alpha_s$  value at each station for a fixed  $\alpha_f$  value.

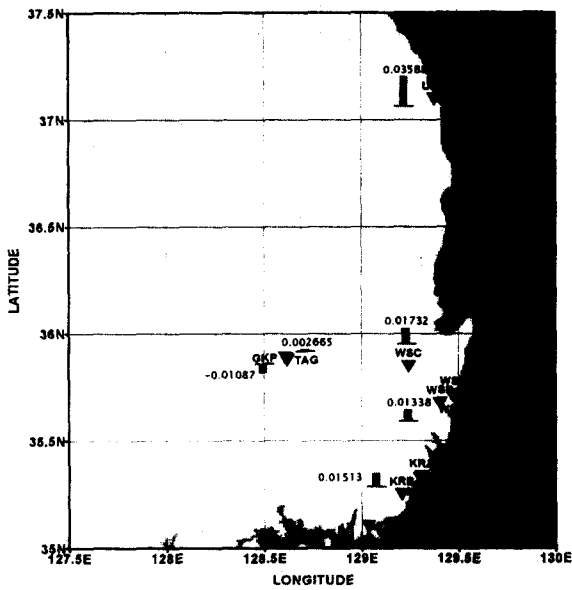


Figure 3. Distribution of site-dependent  $\alpha_s$  value.

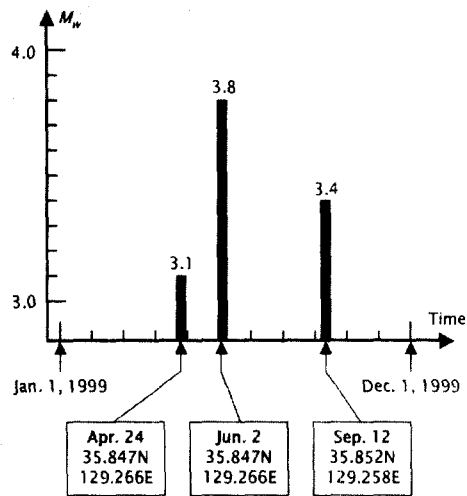


Figure 4. Temporal variation of magnitude of the three 1999 Gyeongju earthquakes.

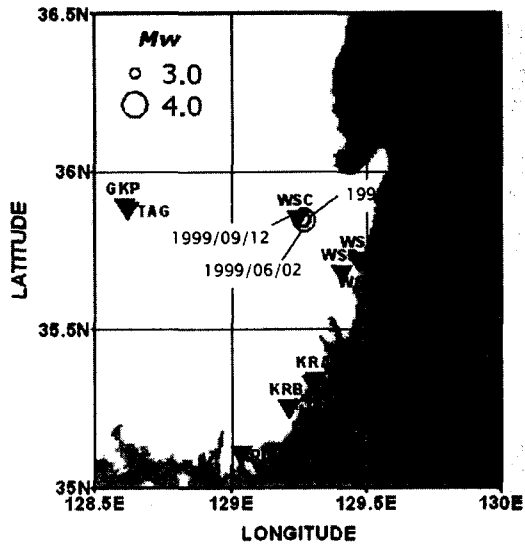


Figure 5. Locations of the three 1999 Gyeongju earthquakes and seismic stations.

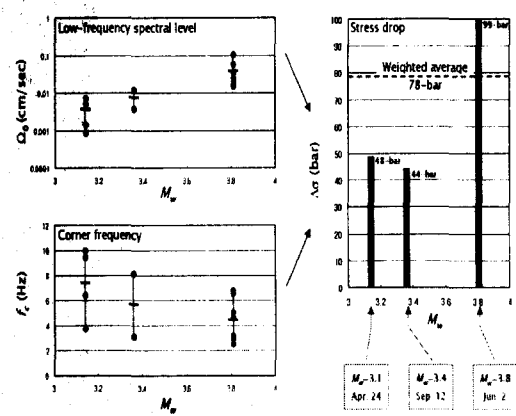
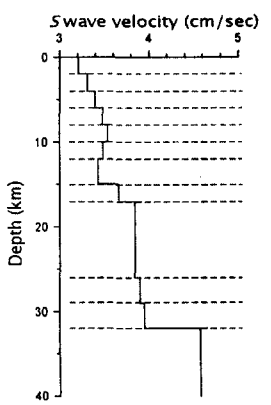
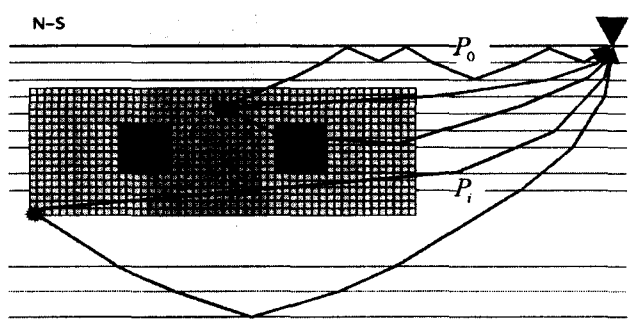


Figure 6. Computed source parameters of the three 1999 Gyeongju earthquakes.

Velocity structure



Subfault model and wave propagation path



$$EGF_i = EGF_0 * G_0^{-1} * G_i$$

- $EGF_0$ : EGF from data
- $EGF_i$ : corrected EGF
- $G_0$ : Theoretical Green's function for path  $P_0$
- $G_i$ : Theoretical Green's function for path  $P_i$

Figure 7. Schematic diagram for the concept of the path correction of the EGF in layered structure.



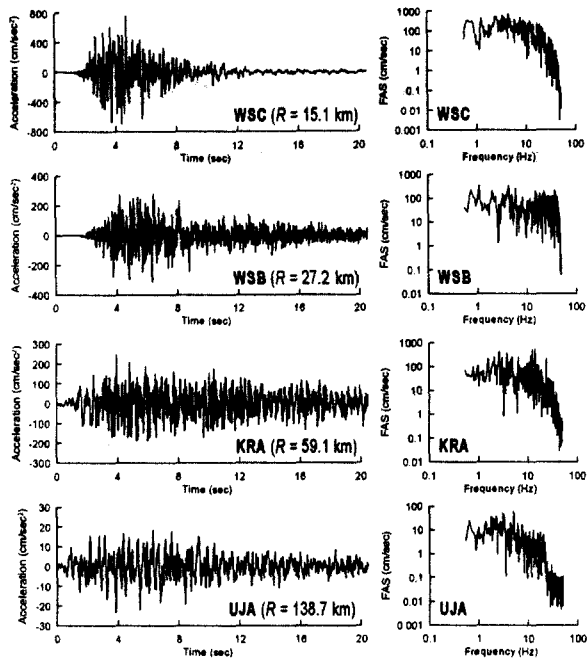


Figure 8. Synthetic seismograms obtained using path-corrected EGFs of the 1999/06/02 Gyeongju earthquake.

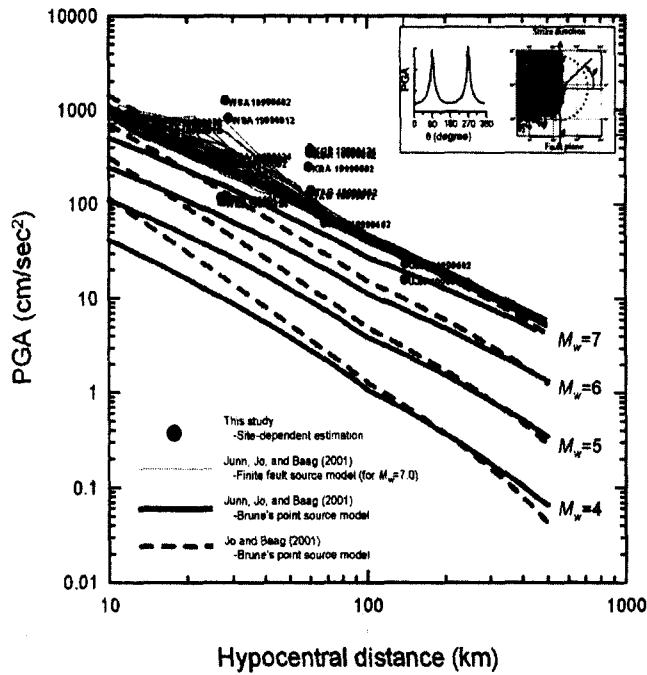


Figure 9. Comparison of the simulated site-dependent local ground motions with regional estimations obtained by stochastic simulations.