

한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇠상수 α 추정 및 강지진동의 추계학적 모사

Estimation of Spectrum Decay Parameter α and Stochastic Prediction of Strong Ground Motions in Southeastern Korea

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

국문요약

한반도 남동부에서 관측된 지진기록을 이용하여 스펙트럼 감쇠상수 α 와 응력강하상수를 계산하였다. 특히, 스펙트럼 감쇠상수 α 는 관측소별로 부지고유의 특성을 반영하여 새로운 방법으로 계산하였다. 이 방법은 2단계의 계산과정으로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 코다(coda)파 정규화법을 이용하여 광역적 상수인 비탄성감쇠 Q 를 역산하고, 이로부터 스펙트럼의 거리종속적인 감쇠효과를 일으키는 α_q 값을 계산한다. 두 번째 단계에서는 앞서 계산된 α_q 값을 관측소별로 동일하게 적용하여 거리와 무관한 스펙트럼 감쇠효과인 부지고유의 α_s 값을 추정한다. 관측소에 관계없이 평균적으로 계산된 α 값의 진원거리(R)에 따른 경향은 $0.016+0.000157R$ 이다. 응력강하상수는 1999년 경주근방에서 세 차례 발생한 지진의 관측자료를 이용하여 조남대와 박창업⁽¹⁾의 방법으로 계산하였으며, 그 결과는 92-bar이다. 이들 상수를 이용하여 추계학적 모사법으로 한반도 남동부에서 발생 가능한 강지진동의 최대지반운동과 주파수에 따른 특성을 간접적으로 추정하였다. 이러한 추계학적 모사의 결과를 바탕으로 진원거리에 따른 지진동 감쇠공식을 유도하였으며 기존의 국내연구와 비교, 분석하였다.

주요어 : 응력강하상수, 스펙트럼 감쇠상수 α , 부지고유 α_s , 추계학적 모사법, 지진동 감쇠공식

ABSTRACT

We estimated the spectrum decay parameter α and the stress parameter ($\Delta\sigma$) in southeastern Korea. Especially, we propose a procedure to compute site-independent α_q and dependent α_s values, separately. This procedure is to use the coda normalization method for the computation of site independent Q or corresponding α_q value as the first step followed by the next step, the computation of α_s values for each site using the given α_q value evaluated at the first step. For the estimation of stress parameter, we used seismic data monitored from three earthquakes occurred near Gyeongju in 1999 with the method of Jo and Baag⁽¹⁾. In addition, we simulated strong ground motion using the α value and the stress parameter. In this case, we calculated the α value with conventional method. The α value of $0.016+0.000157R$ and the stress parameter of 92-bar was applied to the stochastic simulation. At last, we derived seismic attenuation equation using results of the stochastic prediction, and compared these results with some others reported previously.

Key words : stress drop parameter, spectrum decay parameter α , site-dependent α_s , stochastic simulation method, seismic attenuation equation

1. 서 론

한반도에서 지진피해가 있었음을 증명하는 다양한 역사 문헌들이 전해지고 있으나, 현대적 지진관측장비가 설치된 20세기 이후에는 한반도에서 강진의 발생이 거의 없었으며 또한 효과적으로 관측된 경우가 없기 때문에 국내에서의 강지진동 연구가 많은 어려움을 겪고 있다. 하지만, 과거 역사 문헌을 통해서 알 수 있듯이 한반도에도 강진의 발생가능성은 언제나 존재한다. 한반도와 같이 강진의 관측자료가 부족한 중약진 지진지역에서는 추계학적인 방법을 이용하여 강지진동의 특성을 파악할 수가 있다. 최근 국내에서는 박동희외⁽²⁾, 박동희외⁽³⁾, 조남대와 박창업⁽¹⁾, Junn et. al.⁽⁴⁾ 등 추계학적 모사법을 이용하여 간접적으로 강지진동의 특성을 규명하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

점진원을 가정하여 Brune⁽⁵⁾의 ω^{-2} 진원모델을 이용한 추계학적 강지진동 모사연구는 1980년대 초반부터 미국을 중심으로 Boore⁽⁶⁾, Atkinson⁽⁷⁾ 등에 의해서 활발히 진행되어왔다. 이들 연구는 일정한 주파수대역과 유한한 지속시간을 갖는 백색 가우스 잡음에 지진원의 특성을 갖는 진원 모델 스펙트럼을 포함시켜주어 합성지진파를 모사할 수 있다는 Hanks and McGuire⁽⁸⁾의 연구에 기초를 두고 있다.

추계학적인 방법을 이용하여 보다 정확한 강지진동의 특성을 파악하기 위해서는 그 지역의 특성에 맞는 스펙트럼 감쇠상수 α 와 응력강하상수, S파 전달속도, 매질의 밀도 등 다양한 입력자료를 사용하여야 한다. 추계학적 모사법에 적용되는 많은 지진상수 가운데 스펙트럼 감쇠상수 α 는 강지진운동의 전파특성을 규정하는 가장 중요한 상수이다. 지금까지는 한반도 남부의 넓은 지역을 대상으로 평균적인 스펙트럼 감쇠상수 α 를 추정하는 연구가 많은 비중을 차지하였으며, 특정 장소에서의 지역특성을 고려한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 이번 연구에서는 한반도 남동부의 지진관측소

* 서울대학교 대학원 지구환경과학부, 박사과정(대표저자 : endyjo@seismic.snu.ac.kr)

** 서울대학교 대학원 지구환경과학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 9. 2 / 심사종료일 : 2003. 11. 18)

에 기록된 가속도관측자료를 이용하여 각각의 관측소가 위치한 지역의 부지특성을 고려한 스펙트럼 감쇠상수 α 를 추정하였다.

지진원의 특성은 응력강하상수(stress drop parameter; $\Delta\sigma$)를 통해 추계학적 모사법에 적용된다. 이번 연구에서는 진원 위치가 거의 비슷하며 발진구조(source mechanism) 또한 매우 비슷한 특성을 보이는 1999년 3회 발생한 경주지진의 관측자료를 이용하여 응력강하상수를 추정하였다. 한반도 남동부를 중심으로 추정된 스펙트럼 감쇠상수 α 와 3회의 경주지진으로부터 계산된 응력강하상수를 추계학적 모사법에 적용하여 강지진동의 감쇠특성을 분석하였다. 또한 진원거리에 따른 최대지반가속도(PGA)와 최대지반속도(PGV), 그리고 고유진동수(f_N)를 만족하는 스펙트럼가속도(SA_{f_N})의 감쇠공식을 유도하여 지진공학에 적용할 수 있도록 하였다.

표 2 가속도 관측망의 위도, 경도 및 부지고유 α_s 값

관측소	위도(°N)	경도(°E)	α_s
WSA	35.712	129.477	0.029
WSB	35.672	129.407	0.0225
WSC	35.846	129.243	0.0124
WSN	35.706	129.469	0.0283
KRA	35.330	129.311	0.0325
KRB	35.245	129.210	0.0109
KOR	35.325	129.299	0.0240
UJA	37.093	129.378	0.034
TAG	35.876	128.619	0.00434
GKP	35.886	128.608	-0.0081
PUS	35.101	129.033	0.0181

2. 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇠상수 α 추정

2.1 지진자료

1999년 1월부터 2001년 4월까지 국내에서 발생한 지역규모 2.1~3.9인 16개 지진으로부터 한반도 남동부에 위치한 총 11개의 지진관측소에 기록된 44개의 지반가속도 자료를 이용하여 스펙트럼 감쇠상수 α 를 계산하였다. 지진발생에 관한 정보와 가속도 관측망에 관한 정보는 표 1과 표 2에 각각 제시하였다. 진앙의 위치 및 관측소의 위치는 그림 1에 제시하였다.

2.2 코다파 정규화법(coda normalization method)을 이용한 비탄성 감쇠상수 Q 및 지역감쇠율 $R^{-\gamma}$ 추정

S파의 비탄성 감쇠상수 Q 와 진원거리에 따른 지진파 전파에 의한 감쇠율($R^{-\gamma}$)을 계산하기 위하여 Frankel et. al.⁽⁹⁾의 방법에 기초를 둔 코다파 정규화법(coda normalization method)을 이용하여 계산하였다. 이러한 과정을 지진관측자료에 적용하면 부지증폭효과와 진원함수, 지진계의 응답함수 등이 제거된 S파의 전파특성함수만 남게되어, 지진파 전파특성을 나타내는 비탄성 감쇠상수 Q 와 진원거리에 따른 감쇠율

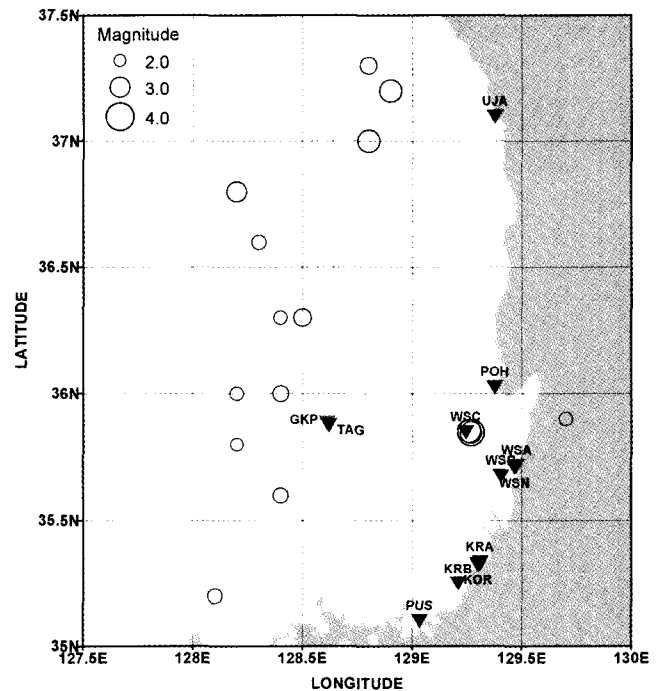


그림 1 한반도 남동부에서의 스펙트럼 감쇠상수 α 의 계산에 이용한 지진의 진앙 및 관측소의 위치도

($R^{-\gamma}$)를 역산해낼 수 있다.

S파의 스펙트럼 $A_S(f)$ 와 코다파의 스펙트럼 $A_{coda}(f)$ 는 다음과 같이 표현된다.

표 1 스펙트럼 감쇠상수 α 의 계산에 사용된 지진목록, 총 16개 지진으로부터 기록된 44개의 자료를 스펙트럼 감쇠상수 α 의 계산에 이용하였다.

발생일시	위도(°N)	경도(°E)	규모	발생일시	위도(°N)	경도(°E)	규모
1999/01/24	37.0	128.8	3.3	2000/04/15	36.6	128.3	2.3
1999/04/07	37.2	128.9	3.3	2000/05/09	35.2	128.1	2.3
1999/04/24	35.85	129.27	3.2	2000/05/19	36.3	128.5	2.7
1999/06/02	35.85	129.27	3.9	2000/08/06	36.3	128.4	2.2
1999/09/12	35.85	129.26	3.4	2000/09/23	35.6	128.4	2.4
1999/12/20	36.0	128.4	2.5	2000/10/08	37.3	128.8	2.6
1999/12/27	36.8	128.2	3.0	2001/02/14	36.0	128.2	2.2
2000/02/21	35.8	128.2	2.1	2001/04/16	35.9	129.7	2.2

$$A_S(f) = R_{\theta\phi} \cdot I(f) \cdot S(f) \cdot G(f) \cdot e^{-\pi f \alpha_s R} \cdot R^{-\gamma} \quad (1)$$

$$A_{coda}(f) = I(f) \cdot S(f) \cdot G(f) \cdot C(t_c, f) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 $I(f)$ 는 지진계의 응답함수, $S(f)$ 는 지진 원함수, $G(f)$ 는 주파수에 따른 부지의 증폭비이다. $R_{\theta\phi}$ 는 S파 또는 표면파의 방사형태상수이며, Q 와 β 는 각각 S파의 비탄성 감쇠상수 및 전파속도를 나타낸다. $C(t_c, f)$ 는 코다 파의 전파특성을 표현하는 코다파 감쇠함수(coda decay)를 나타내며 $t_c^{-1} e^{-\pi f t_c Q_c}$ 로 표현될 수 있다. 여기에서 t_c 와 Q_c 는 각각 코다파의 도달시간과 코다파의 비탄성 감쇠상수이다.

주파수(f_j)에 따른 가속도진폭 $A_S(f_j)$ 와 $A_{coda}(f_j)$ 는 지진파 포락함수(seismogram envelope)를 이용하여 계산된다. 먼저, S파 스펙트럼 $A_S(f_j)$ 과 코다파의 스펙트럼 $A_{coda}(f_j)$ 을 f_j 를 기준으로 가우시안 필터를 적용한 후, 필터링 된 스펙트럼을 시간영역으로 푸리에 역변환한다. f_j 를 기준으로 추출된 S파와 코다파의 시계열로부터 포락함수를 계산하여 $A_S(f_j)$ 와 $A_{coda}(f_j)$ 의 값을 결정한다. 지진파 포락함수 $E(t)$ 는 Hilbert 변환을 이용하여

$$E(t) = \sqrt{A^2(t) + H^2(t)} \quad (3)$$

과 같이 계산한다(Bracewell⁽¹⁰⁾). 식 (3)의 $A(t)$ 는 지진파의 시계열자료이며 $H(t)$ 는 $A(t)$ 의 Hilbert 변환식을 나타낸다.

그림 2는 진원거리 57km인 관측소에 기록된 자료를 이용한 S파와 코다파의 시계열원도우 정의방법을 보여준다. S파의 경우는 그림과 같이 최대진폭을 포함하는 영역을 선택하며, 코다파의 경우는 S파의 직접적인 영향을 배제할 수 있는 '충분한 시간' 이후의 자료를 선택하여 계산에 이용한다. 이번 연구에서는 지진규모와 코다파의 크기, 잡음의 크기를 고려하여 계산에 적용할 최대진원거리를 120km로 가정하여 지진발생시간(origin time)에서 S파 도달시간의 두 배(Aki⁽¹¹⁾)인 $2 \times \frac{120 \text{ km}}{\beta (\text{km/sec})}$ 초 이후의 자료를 코다파의 시계열원도우로 정의하였다.

이번 연구에서 1Hz부터 40Hz까지 1Hz 간격으로 중심 주파수를 설정하고, 각 중심주파수를 중심으로 2Hz 영역에서

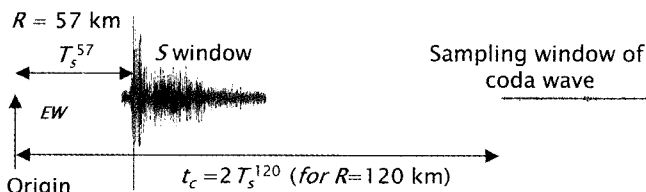


그림 2 S파 시계열원도우와 코다파 시계열원도우의 정의 방법. 진원거리 57km인 자료를 이용하여 설명하고 있다. T_s^R 은 S파의 진원거리 R 에 대한 주행시간 나타내며 t_c 는 코다파 시계열원도우의 시작시간을 나타낸다. 이번 연구에서는 사용 자료의 최대 진원거리를 120km로하여 $2T_s^{120}$ 를 t_c 로 정의하였다.

필터처리하여, 각 주파수에 대한 포락함수 시계열 $E(t)$ 를 계산하였다. 주파수별로 필터링된 지진파 포락함수 $E(t)$ 로부터 가속도진폭을 결정하는 방법은 $A_S(f_j)$ 와 $A_{coda}(f_j)$ 가 서로 다르다. 최대값(peak value)을 갖는 S파의 경우 최대값을 $A_S(f_j)$ 로 정의한다. 하지만 시간에 따라 진폭이 서서히 감소하는 코다파의 경우 최대값보다 고정된 시간영역에서의 평균값이 그 물리적 의미가 있다고 할 수 있다. 따라서 $A_{coda}(f_j)$ 는 진폭의 평균값으로 정의된다. 그림 3은 Hilbert 변환을 이용하여 계산된 지진파 포락함수(seismogram envelope)를 보여준다. S파의 경우 지진파 포락함수의 최대값을, 코다파의 경우 중앙부분의 평균값을 각각의 진폭으로 결정하게 된다. 총 20초의 코다파를 이용하였으며 자료의 중앙인 7.5~12.5초의 평균값을 $A_{coda}(f_j)$ 로 설정하였다.

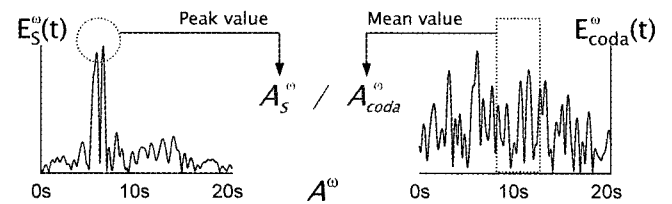


그림 3 코다파 정규화법(coda normalization method)에 적용하기 위한 S파와 코다파의 진폭결정방법. $E_S^{\omega}(t)$ 및 $E_{coda}^{\omega}(t)$ 는 각 주파수 ω 에 해당하는 S파와 코다파의 포락함수의 시계열을 나타낸다. 포락함수 $E_S^{\omega}(t)$ 의 최대진폭을 A_S^{ω} 로 하고, 포락함수 $E_{coda}^{\omega}(t)$ 의 중심부근의 평균값을 A_{coda}^{ω} 라 할 때, A_{coda}^{ω} 에 대한 A_S^{ω} 의 비(A^{ω})를 구하여 코다파 정규화법에 사용한다. 시계열의 포락함수 $E(t)$ 는 식 (3)과 같이 지진파 시계열과 Hilbert 변환을 이용하여 계산한다.

i 번째 지진관측자료의 j 번째 주파수에 대하여 식 (1)의 $A_{S_i}(f_j)$ 를 식 (2)의 $A_{C_i}(f_j)$ 로 나누어주면 응답함수, 진원함수, 증폭비가 서로 소거되며,

$$\ln A_i(f_j) = -\pi f_j R_i \alpha_q - \gamma \ln R_i + \ln[(R_{\theta\phi})_i - C_j] \quad (4)$$

와 같이 정리된다. 고주파 지진기록의 경우 S파 또는 표면파의 방사함수 $R_{\theta\phi}$ 가 일정하다고 가정하면 식 (4)의 $\ln[(R_{\theta\phi})_i - C_j]$ 부분을 b_j 로 치환하여

$$\begin{bmatrix} -\pi f_1 R_1 & -\ln R_1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\pi f_1 R_2 & -\ln R_2 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\pi f_1 R_M & -\ln R_M & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -\pi f_2 R_1 & -\ln R_1 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -\pi f_2 R_2 & -\ln R_2 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\pi f_2 R_M & -\ln R_M & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\pi f_j R_i & -\ln R_i & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\pi f_N R_M & -\ln R_M & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_q \\ \gamma \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_j \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln A_1(f_1) \\ \ln A_2(f_1) \\ \vdots \\ \ln A_M(f_1) \\ \ln A_1(f_2) \\ \ln A_2(f_2) \\ \vdots \\ \ln A_M(f_2) \\ \vdots \\ \ln A_i(f_j) \\ \vdots \\ \ln A_M(f_N) \end{bmatrix} \quad (5)$$

의 행렬식을 얻을 수 있다. 여기에서 $\alpha_q = (Q\beta)^{-1}$ 이다. 식 (5)의 행렬식을 최소자승법(least square method)으로 역산하면 광범위한 영역에서 α_q 값과 γ 값을 계산할 수 있다.

한반도 남동부에 적합한 x_q 와 γ 를 계산하기 위하여 1999년 1월 4일부터 2001년 4월 16일까지 발생한 16개 지진의 11개 관측소에서 관측된 50개의 관측자료를 이용하였다(표 1, 그림 1). 전단파속도 β 를 3.5km/sec로 가정할 때, 상수로 정의된 Q 값과 γ 값은 각각 1820, 0.87로 계산되었다.

2.3 부지고유 스펙트럼 감쇠상수 x 값 추정

스펙트럼 감쇠상수 x 는 진원거리에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$x = x_s + x_q R \tag{6}$$

지금까지의 다양한 연구결과로부터 산출된 스펙트럼 감쇠상수 x 는 한반도 남부 또는 남동부에 광범위하게 적용할 수 있는 값이었다. 식 (6)에서 진원거리(R)의 계수인 x_q 는 전파 경로에 따른 매질의 전파특성을 반영하는 값이므로 넓은 영역에 적용할 수 있는 광역상수로 정의된다. 하지만 x_s 는 관측지점에 기록된 지진파의 주파수특성 따라 서로 다른 값을 갖기 때문에 관측지점의 특성을 고려하여 계산하는 것이 합당하다. 이와 같은 특성을 고려하여, 이번 연구에서는 한반도 남동부에서 광범위하게 사용할 수 있는 광역상수 x_q 값을 계산한 후, 이 값을 고정시킨 상태에서 각 관측소에서의 부지고유 x_s 값을 계산하였다.

2.2에서 설명한 코다파 정규화 방법으로 계산된 Q 값으로부터 다음 식을 이용하여 x_q 값을 계산할 수 있다.

$$e^{\pi x_s R f} \equiv e^{-\frac{\pi R f}{Q \beta}} \Leftrightarrow x_q \equiv \frac{1}{Q \beta} \tag{7}$$

이와 같은 방법으로 계산된 x_q 값은 0.000157이다.

이렇게 추정된 x_q 값을 광역상수로 고정시킨 상태에서 각각의 관측점의 부지고유특성을 고려한 x_s 값을 추정한다. 과거의 연구에서는 모든 관측소의 지진자료를 함께 이용하여

평균적인 x_q 값과 x_s 값을 계산하였지만, 이번 연구에서는 넓은 지역을 대상으로 역산으로 계산한 x_q 값을 고정시킨 상태에서 관측소별로 지역특성을 고려한 x_s 값을 계산하였다. 그림 4에서 점으로 표시된 값이 각 스펙트럼의 x 값이며, 기울기는 광역상수 x_q 값을, 세로축의 절편은 x_s 값을 나타낸다.

표 2는 각 가속도 관측소에서 계산된 x_s 값이다. x_s 값이 클수록 그 부지의 감쇠효과가 상대적으로 큰 것으로 해석할 수 있다. 그림 5는 표 2의 결과를 지도상에 표시한 것이다. 해안에 위치한 관측소의 x_s 값이 내륙에 위치한 곳 보다 상대적으로 크게 계산되었다. 즉, 해안지역이 내륙지역보다 감쇠효과가 상대적으로 큰 것을 알 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 ω^{-2} 가속도모델 스펙트럼과 비교할 때, UJA와 KRA보다 GKP에서 고주파영역의 가속도 스펙트럼값이 상대적으로 크게 나타난 것으로 해석할 수 있다.

2.4 평균적 스펙트럼 감쇠상수 x 값 추정

또한 이번 연구에서는 강지진동의 추계학적 모사에 입력 자료로 사용하기 위하여 전체 관측자료를 이용하여 한반도 남동부에 적합한 스펙트럼 감쇠상수 x 를 계산하였다. 관측 위치에 관계없이 전체자료를 사용했을 뿐, x_q 와 x_s 의 계산 방법은 관측소별로 수행한 방법과 동일하다. 즉, 코다파 정규화법을 이용하여 x_q 값을 역산한 후, x_q 값을 고정시킨 상태에서 x_s 값을 회귀분석하였다. 그림 6은 이와 같이 전체자료를 이용하여 계산한 스펙트럼 감쇠상수 x 의 결과이다. x_q 를 고정시킨 상태에서 회귀분석한 경우와 그렇지 않은 경우의 결과가 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. x_q 를 고정시킨 경우 회귀분석결과 x_s 값은 0.016으로 계산되었다.

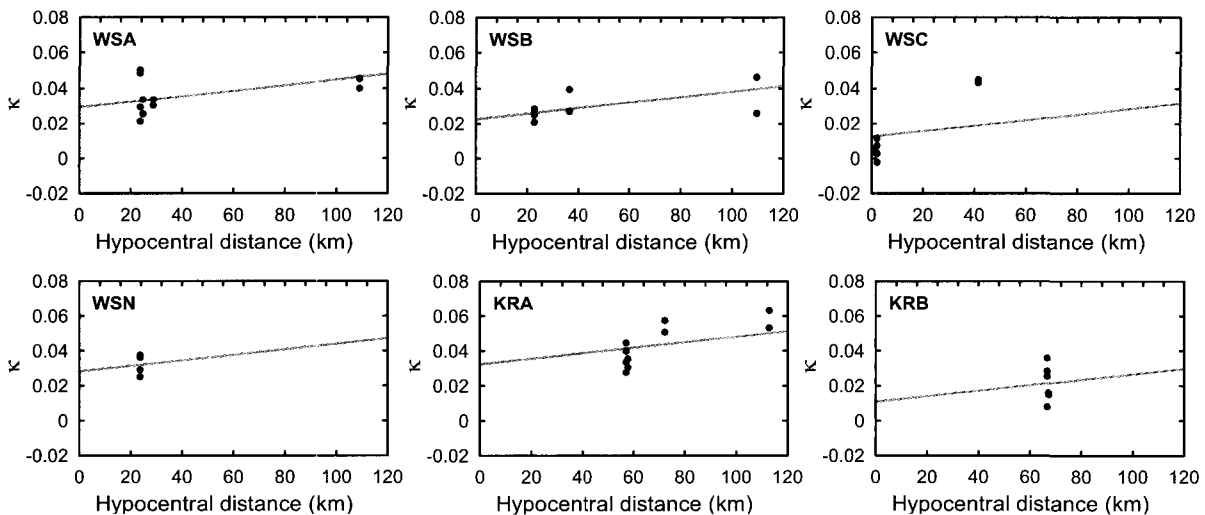


그림 4 x_q 값을 0.000157로 고정시킨 상태에서 부지고유 x_s 값의 회귀분석결과. x_s 값은 부지에 따라 다양한 값으로 추정되었다.(계속)

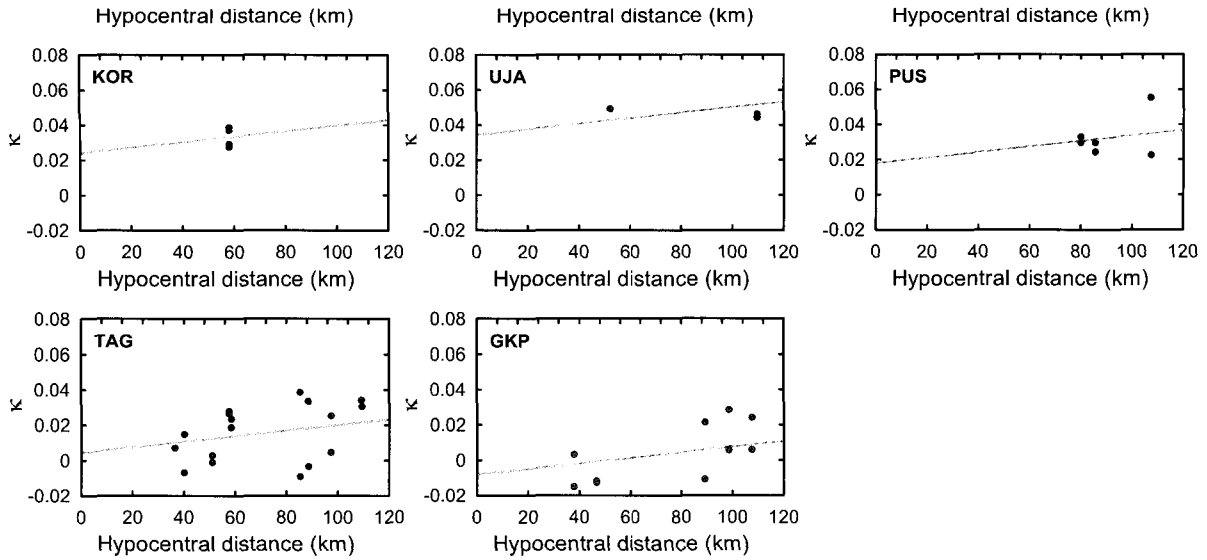


그림 4 κ_q 값을 0.000157로 고정시킨 상태에서 부지고유 κ_s 값의 회귀분석결과. κ_s 값은 부지에 따라 다양한 값으로 추정되었다.

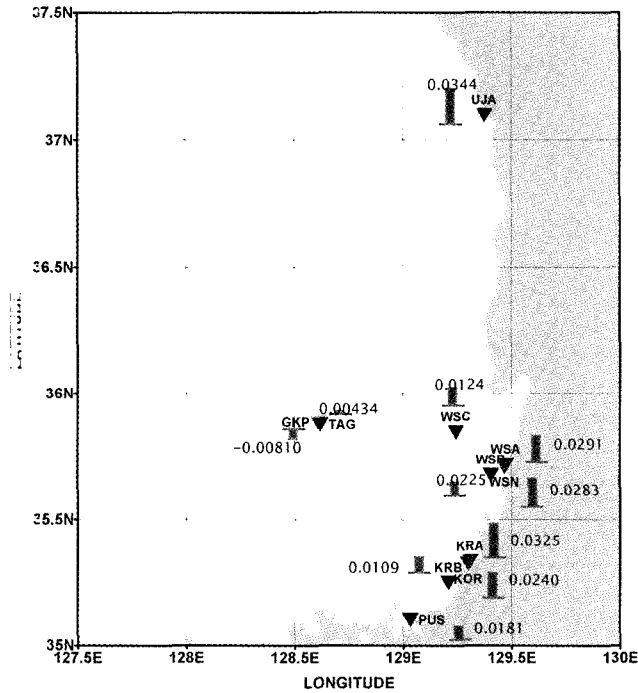


그림 5 부지고유 κ_s 값의 지역에 따른 분포도. 전체적으로 해안지역에 위치한 관측소에서 계산된 κ_s 값이 내륙지역보다 큰 값으로 계산되었다.

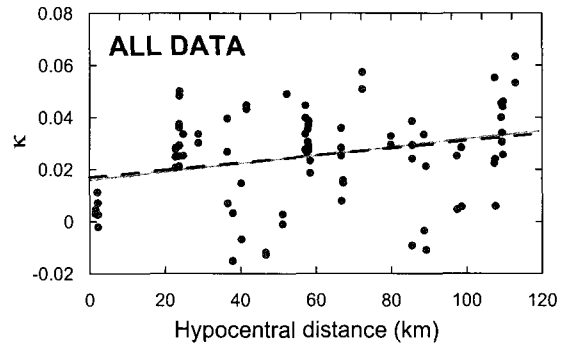


그림 6 관측위치에 관계없이 모든 지진자료를 이용한 스펙트럼 감쇠상수 κ 의 회귀분석결과. 실선은 κ_q 를 0.000157로 고정시킨 후 κ_s 를 추정된 결과이며, 점선은 κ_q 와 κ_s 를 동시에 회귀분석한 결과이다.

하기 위하여 표 3에서 제시한 총 15개의 관측자료를 이용하였다. 지진의 발생시기는 1999년 4월 24일, 6월 2일, 9월 12일이다. 또한 각 지진의 진원위치와 진원특성은 표 3과 그림 7에 제시되어있다. 그림 8은 세 지진의 발진구조(focal mechanism)를 보여준다. 발진구조는 각 지진기록의 초동극성(first-arrival polarity)을 격자검색방법(grid search method)에 적용하여 계산된다. 격자검색방법은 주향, 경사, 레이크의 값을 바꾸어가면서 계산된 초동극성의 값이 실제 관측결과와 같은 경우 발진구조의 해로 인정하는 방법으로, 하나의 지진에 대하여 여러 가지 해가 제시될 수 있다. 세 경주지진은 발생시기와 발생장소, 지진규모, 발진구조 등의 유사성을 고려할 때 동일한(혹은 유사한) 지진원으로부터 발생한 지진이라고 유추될 수 있다.

3. 응력강하상수 추정

3.1 지진자료 및 발진구조

1999년 경주에서 발생한 3개 지진의 응력강하상수를 계산

표 3 응력강하상수의 계산에 사용된 세 경주지진의 진원, 규모 및 발진구조(focal mechanism).

경주지진	위도(°N)	경도(°N)	깊이(km)	Mw	주향	경사	레이크
1999/04/24	35.85	129.27	6.76	3.2	155°	11°	15° 78° 55° 99°
1999/06/02	35.85	129.27	6.80	3.9	140°	10°	20° 80° 45° 105°
1999/09/12	35.85	129.26	6.93	3.4	100°	10°	80° 85° 10° 175°

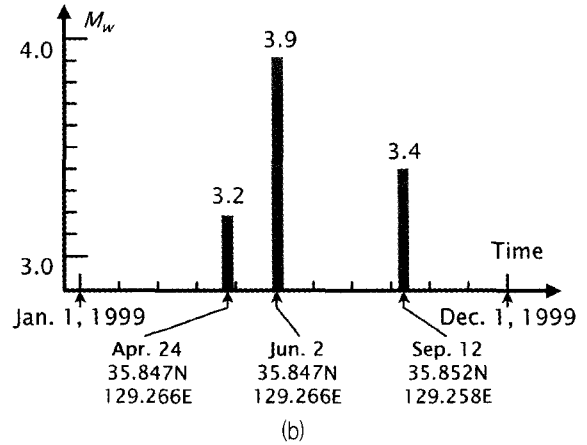
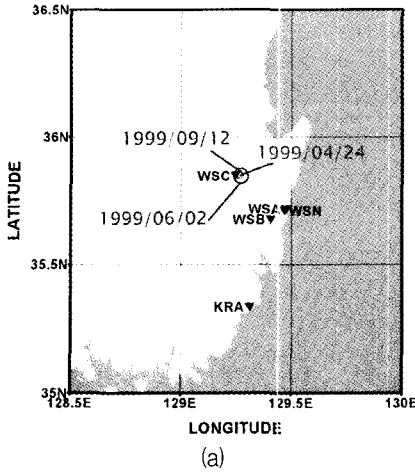


그림 7 응력강하상수의 계산에 사용된 3개의 경주지진의 진앙(a) 및 발생시기와 지진규모(b).

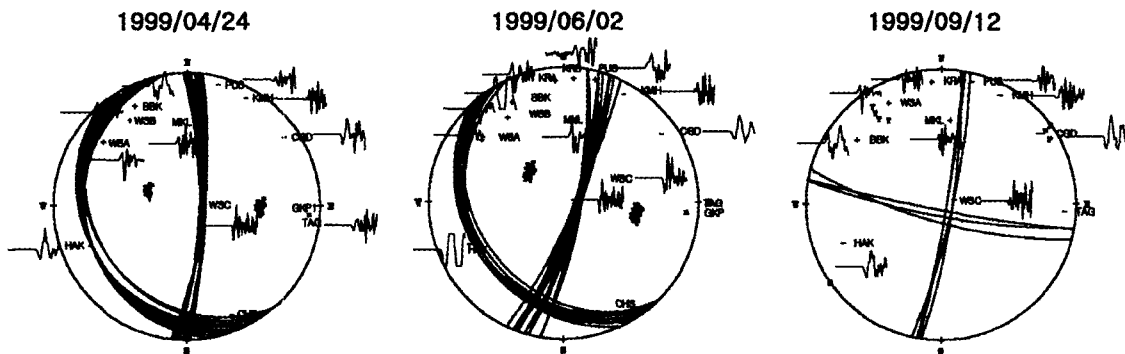


그림 8 3개 경주지진의 발진구조(focal mechanism). 세 지진 모두 NS방향 주향이동단층의 지진원 특성을 보인다.

3.2 응력강하상수 $\Delta\sigma$

관측자료로부터 응력강하상수를 계산하기 위하여 지진파 전파특성과 부지증폭효과, 응답스펙트럼을 제거한 지반변위의 진원스펙트럼을 먼저 계산하여야 한다. 진원스펙트럼의 전파특성은 앞서 계산한 스펙트럼 감쇠상수 α 와 지역감쇠 특성을 이용하여 관측소에 따라 서로 다르게 적용하였다. 이와 같이 계산된 진원스펙트럼에 수정 Andrews 방법(조남대

와 박창업⁽¹⁾)을 적용하여 0.5Hz~30Hz에서 응력강하상수를 계산하였다. 그림 9는 응력강하상수를 계산하는 순서도이다.

그림 10은 $\log(f)$ 좌표계에서 지반변위의 진원스펙트럼을 등간격으로 살펴볼 수 있도록 등로그간격으로 평활화(smoothing)하여 지진원별로 나타낸 것이다. 1999년 4월 24일, 6월 2일, 9월 12일에 발생한 경주지진으로부터 계산된 응력강하상수는 각각 99.7, 60.7, 98.9-bar이다. 각각의 지진으로부터 계산된 응력강하상수에 지진자료의 개수를 가중치로 하여 평균값을 계산하면 평균응력강하상수 92-bar를 얻을 수 있다. 계산된 응력강하상수는 국내 강진동 연구에서 보편적으로 사용하는 값인 50~100-bar와 큰 차이가 없다.

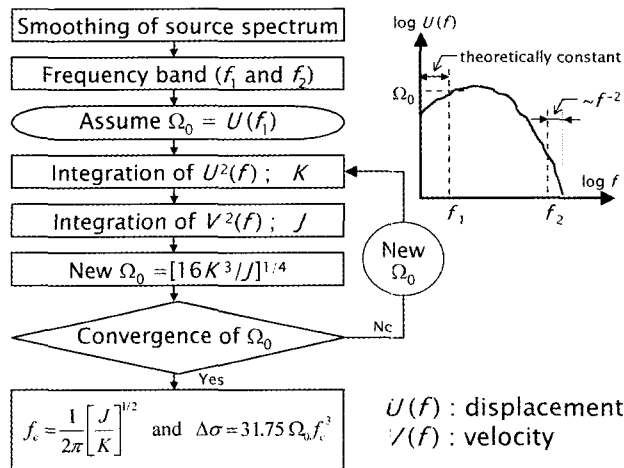


그림 9 응력강하상수의 계산과정. 관측자료를 진원거리와 지진파 전파특성을 고려하여 진원스펙트럼으로 보정한 후, 등로그간격으로 평활화(smoothing)하여 조남대와 박창업⁽¹⁾의 방법으로 계산하였다.

4. 추계학적 모사법을 이용한 한반도 남동부에서의 강지진동 특성

4.1 추계학적 모사법

Boore⁽³⁾에 의해서 제시된 강지진동 추계학적 모사법을 기초로 하여 한반도 남동부에서의 강진에 의한 지반의 움직임을 추정하였다. 계산에 사용된 방법은 조남대와 박창업⁽¹⁾의 연구에서 사용한 방법과 동일하다. 모델 가속도스펙트럼은 지진모멘트(M_0)와 진원거리(R), 그리고 주파수(f)의 함수

$$A(M_0, R, f) = \frac{\langle R_{\theta\phi} \rangle \cdot F \cdot V}{4\pi\rho\beta^3} \cdot \frac{2\pi f^{2_0}}{1+(f/f_c)} \cdot \frac{e^{-\pi f}}{R} \quad (8)$$

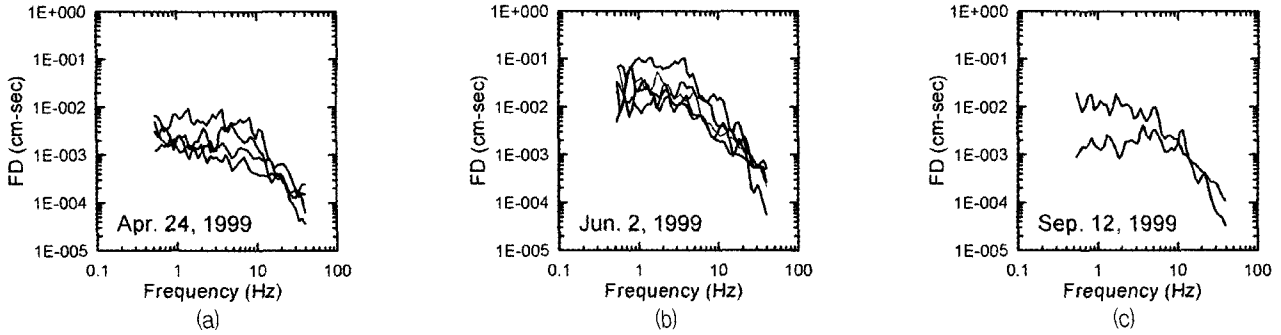


그림 10 진원거리와 지진파 전파특성을 이용하여 보정한 진원스펙트럼. 진원스펙트럼을 0.5Hz부터 40Hz까지 등로그간격으로 평활화(smoothing)하여 보여준다. 진원스펙트럼으로부터 계산된 응력강하상수는 (a) 99.7-bar, (b) 60.7-bar, (c) 98.9-bar이다. 각 지진별로 사용된 자료의 개수를 가중치로 주어 응력강하상수의 평균값(92-bar)을 계산하였다.

와 같은 형태로 나타낼 수 있다. ρ 와 β 는 진원 지역의 밀도와 S파속도이며 $\langle R_{\theta\phi} \rangle$ 는 평균 방사상수, F와 V는 자유면 증폭값과 수평성분의 분할비를 나타낸다. 이번 연구에서는 일반적으로 $\rho=2.7\text{g/cm}^3$, $\beta=3.5\text{km/sec}$, $\langle R_{\theta\phi} \rangle=0.63$, $F=2$, $V=0.707$ 을 적용한다. 또한, 모서리주파수(f_c)-지진모멘트(M_0)-응력강하($\Delta\sigma$)의 관계(Brune⁽⁵⁾)인

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma / M_0)^{1/3} \quad (9)$$

과 지진모멘트와 모멘트규모사이의 관계(Hanks and Kanamori⁽¹²⁾)인

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (10)$$

을 식 (8)에 적용하여 모델스펙트럼을 모멘트규모와 응력강하상수의 함수로 변형한다.

지진파의 규모와 진원거리에 따른 지진파 지속시간을 만족하고, 관측자료와 비슷한 모양을 갖는 합성지진파를 계산하기 위하여 시간영역에서는 적절한 형태창(shaping window)을 설정하여야 한다. 이 연구에서는 Saragoni and Hart⁽¹³⁾에 의해서 제시된 형태 창을 적용하였으며 지진파 지속시간(T_d)는

$$T_d = \frac{1}{f_c} + 0.05R \quad (11)$$

의 관계식(Boore⁽⁶⁾)을 계산에 사용하였다.

추계학적 모사법을 이용한 강지진동 모사에 적용된 각종 입력상수는 표 4에 제시하였다.

표 4 강지진동의 추계학적 모사에 사용된 지진상수

지진상수	값
$\langle R_{\theta\phi} \rangle$	0.63
F	2.0
V	0.707
ρ	2.7g/cm ³
β	3.5km/sec
$\Delta\sigma$	92-bar
α	0.016+0.000157R

4.2 진원거리에 따른 전파특성

추계학적 모사법을 이용하여 최대지반가속도(PGA)의 진원거리에 따른 전파특성을 계산하기 위하여, 관측점의 위치는 진원거리 10km부터 500km까지를 등로그간격으로 나누어 35가지 경우를 설정하였으며, 모멘트규모는 4.0부터 7.5까지 0.25간격으로 모두 15가지 경우를 설정하였다. 모멘트규모 7.5, 진원거리 500km인 경우는 계산상의 이유로 제외하였다. 이로부터 정의되는 총 524개의 거리-규모조건에 대하여 시계열의 시간간격을 0.01초로 설정하여 200회씩 모사를 수행하였다. 이러한 추계학적 모사의 결과로부터 지진동 감쇠공식(seismic attenuation equation)을 유도하였으며, 규모 4, 5, 6, 7에 대하여 실선으로 표시하였다. 진원거리 100km를 기준으로 근거리에서는 $1/R$ 로, 원거리에서는 $1/\sqrt{R}$ 로 진원거리에 따른 감쇠효과를 설정하였다. 이와 같이 계산된 최대지반가속도(PGA)의 진원거리에 따른 전파특성은 그림 11에 점()으로 표시하여 나타내었다.

추계학적인 방법으로 계산된 합성지진파를 이용하여 고유진동수(natural frequency; f_N)별로 스펙트럼가속도(SA_{f_N})를 계산하기 위하여 0.2Hz~100Hz의 17개 주파수를 선택하였다. 이렇게 계산된 최대지반가속도, 최대지반속도, 그리고 각각의 고유진동수에 해당하는 스펙트럼가속도를 이용하여 진원거리에 따른 지진동 감쇠공식(seismic attenuation equation)을 유도하였다.

4.3 지진동 감쇠공식

추계학적 모사법으로 계산된 최대지반가속도, 최대지반속도, 스펙트럼가속도의 진원거리에 따른 감쇠특성을 바탕으로 지진동 감쇠공식을

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

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

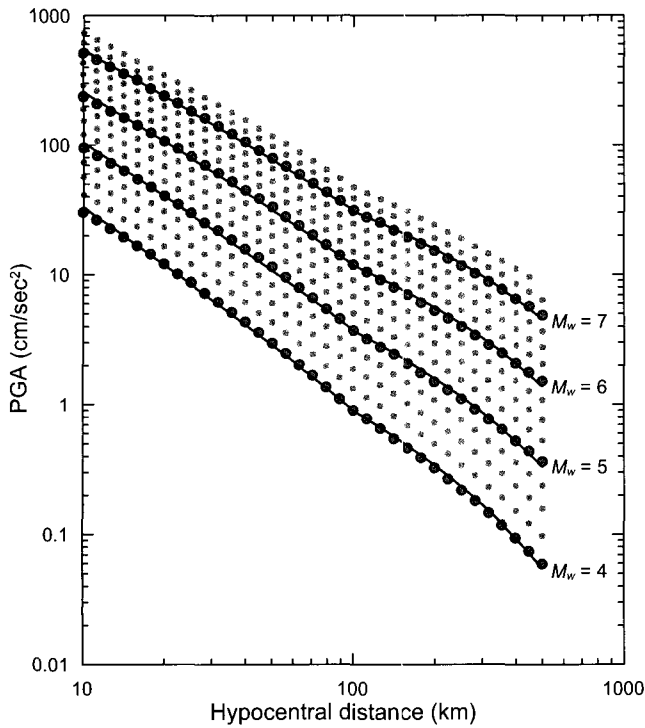


그림 11 추계학적 모사법으로 계산된 최대지반가속도의 진원거리와 모멘트규모에 따른 감쇠경향(※)과 강지진동의 추계학적 모사결과를 이용한 회귀분석 결과(실선), 모멘트규모 4, 5, 6, 7에 대한 감쇠경향은 ○로 표시하였다. 회귀분석을 위하여 진원거리는 10km부터 500km까지의 35개 관측점을 등로그간격으로 정의하고, 모멘트규모는 4.0부터 7.5까지 0.25간격으로 모두 15개의 경우를 정의하여, 총 524개의 강진동을 200회 모사하였다(모멘트규모 7.5, 진원거리 500km는 계산에서 제외).

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

각각의 고유진동수(f_N)에 대한 스펙트럼가속도(SA_{f_N}) 또한 식 (12)와 같은 형식을 적용하였다.

추계학적 모사법으로 계산된 최대지반가속도와 최대지반속도, 스펙트럼가속도 값을 최소자승법(least squares method)에 적용하여 식 (12)를 만족하는 ξ_i^k ($k=0, 1, 2; i=0, 1, 2, 3$)를 추정하였다. 이러한 방법을 통하여 추계학적 모사법의 결과와 가장 유사한 감쇠공식을 유도해내었다. 각각의 경우에 해당하는 감쇠공식의 계수는 표 6과 같다.

표 5 국내에서 연구된 주요 입력상수의 비교

연구자	사용된 지진자료	대상 지역	주요 입력상수		
			$\Delta\sigma$ (bars)	Q	α_s
조남대, 박창업(이번연구)	가속도자료	남동부	92	1820	0.016
김태경 ⁽¹⁴⁾	속도자료	남동부	-	1551	0.011
노명현, 이기화 ⁽¹⁵⁾	속도자료	남동부	50	1749	0.013
Junn et. al. ⁽⁴⁾	가속도자료	남부	65	1944	0.005
박동희 외 ⁽²⁾	속도자료	남부	105	1977	0.001
조남대, 박창업 ⁽¹⁾	속도자료	남부	100	1274	0.001

5. 결과 및 토의

5.1 부지고유 지진상수의 추정

스펙트럼 감쇠상수 α 에 관한 연구는 국내에서도 꾸준히 진행중이다. 하지만 지금까지는 넓은 영역에서 보편적으로 사용할 수 있는 α 값을 계산하는 것이 연구의 주된 목적이었다. 하지만 스펙트럼의 특성이 기록된 관측소별로 뚜렷이 차별되는 경우가 많았다. 만약 α_s 값이 부지특성을 반영하는 상수라고 가정한다면, α_s 값을 관측소별로 독립적으로 계산하여 비교하는 연구가 반드시 필요하다. 관측소별로 독립적인 α_s 값을 계산하기 위해서는 스펙트럼 감쇠상수 α 의 한 축을 담당하고 있는 α_q 에 대한 정의가 우선적으로 고려되어야 한다. 즉, α_q 값은 지진파 전파에 따른 비탄성감쇠효과를 나타내는 상수이므로 관측소별로 추정하는 것이 큰 의미가 없으므로, 모든 관측소와 지진원을 포함하는 넓은 지역에 걸쳐서 계산을 수행하여야 한다. 그러므로 α_q 는 광역상수로, α_s 는 부지고유상수로 정의하고 연구를 수행하였다. 이번 연구에서는 코다파를 이용하여 S파의 진원특성과 응답특성, 그리고 증폭특성을 제거하는 코다파 정규화법(coda normalization method)을 사용하여 α_q 값을 역산하였다. 계산에는 진원거리 10~120km의 자료가 이용되었으며, 이 과정에서 진원거리에 따른 감쇠율 $R^{-\gamma}$ 에서 γ 값 또한 0.5~1.0 사이의 의미 있는 값(0.87)으로 계산되었다. 이 결과를 관측소별로 적용하여 α_s 값을 추정하였다. 전체적으로 해안에 위치한 관측소의 α_s 값이 내륙에 위치한 곳 보다 상대적으로 크게 계산되었다. 이 결과는 진원스펙트럼의 모델로 사용한 Brune의 ω^{-2} 모델과 비교분석을 통하여 상대적인 특징으로 살펴보아야 한다. 즉, 상대적으로 큰 α_s 값을 갖는 관측소의 경우는 Brune의 모델과 비교하여 고주파영역의 스펙트럼 값이 작은 특징을 보이는 것이고, 상대적으로 작거나 음의 α_s 값을 갖는 관측소의 경우는 고주파영역의 스펙트럼 값이 큰 특징을 보이는 것이라고 할 수 있다. α_s 값의 추정에 사용한 자료의 개수는 관측소에 따라 최대 18개에서 최소 4개로 아적인 자료가 충분하지 않은 실정이다. 하지만 이번 연구와 같은 방법을 이용하여 각 관측소에서의 감쇠특성을 계산한다면 보다 세밀한 연구결과를 얻을 수 있을 것이다.

현재까지 국내에서 연구된 응력강하상수와 스펙트럼 감

표 6 이번 연구에서 계산된 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV), 고유진동수(f_N)에 따른 스펙트럼가속도(SA_{f_N})에 대한 지진동 감쇠 공식의 계수

조남대와 박창업 (2003)	ξ_0^0	ξ_1^0	ξ_2^0	ξ_3^0
	ξ_0^1	ξ_1^1	ξ_2^1	ξ_3^1
	ξ_0^2	ξ_1^2	ξ_2^2	ξ_3^2
PGA	0.1073829E+02 -0.2379955E-02 -0.2437218E+00	0.5909022E+00 0.2081359E-03 0.9498274E-01	-0.5622945E-01 -0.2046806E-04 -0.8804236E-02	0.2135007E-01 0.4192630E-04 -0.3302350E-02
PGV	0.7513920E+01 -0.1299858E-02 -0.1144479E+00	0.1119113E+01 0.3222150E-03 0.9003799E-01	-0.4618006E-01 -0.1030411E-04 -0.1312085E-01	0.2654139E-01 0.2250794E-04 -0.3402204E-02
SA _{0.2Hz}	0.6731095E+01 -0.5196814E-03 0.6926205E-02	0.2323737E+01 0.1328113E-03 0.4361181E-01	-0.1452073E+00 -0.6823221E-04 -0.3508588E-01	-0.8094733E-01 -0.2832873E-04 0.1742051E-03
SA _{0.5Hz}	0.8534918E+01 -0.9216384E-03 -0.2510739E-02	0.1975834E+01 0.1029102E-03 -0.1044567E-01	-0.3841183E+00 0.3059677E-04 -0.9174835E-02	-0.8836593E-01 -0.2285869E-05 0.1305197E-01
SA _{1Hz}	0.9574471E+01 -0.1201067E-02 -0.4482873E-01	0.1407301E+01 0.2135137E-03 -0.7829375E-02	-0.3616825E+00 -0.1240336E-04 0.1172807E-01	0.1356379E-01 -0.1801199E-04 0.1122670E-01
SA _{20Hz}	0.1028311E+02 -0.1727566E-02 -0.6770172E-01	0.1022973E+01 0.2257510E-03 0.1161061E-01	-0.2293124E+00 -0.1979166E-04 0.1220422E-01	0.5208072E-01 -0.4478247E-04 0.7685146E-02
SA _{2.5Hz}	0.1046708E+02 -0.1981859E-02 -0.7470912E-01	0.9201711E+00 0.1947900E-03 0.2464914E-01	-0.1891047E+00 -0.1047354E-05 0.9123649E-02	0.6227104E-01 -0.1831365E-04 0.2484847E-02
SA _{5Hz}	0.1098078E+02 -0.2909448E-02 -0.1091781E+00	0.7602870E+00 0.1791797E-03 0.4964908E-01	-0.1234234E+00 -0.2043263E-04 0.8457849E-02	0.3942925E-01 -0.1520987E-04 -0.1062450E-02
SA _{10Hz}	0.1134649E+02 -0.4039084E-02 -0.1669019E+00	0.6804339E+00 0.2812664E-03 0.6370032E-01	-0.7878242E-01 -0.4849561E-04 0.3722184E-02	0.2384670E-01 -0.8950855E-05 -0.2555152E-02
SA _{15Hz}	0.1162014E+02 -0.3833250E-02 -0.2710133E+00	0.6963896E+00 0.4891294E-03 0.5469073E-01	-0.8809640E-01 -0.1371375E-03 0.7720651E-02	0.1122811E-01 0.6258024E-05 -0.9933452E-03
SA _{20Hz}	0.1175708E+02 -0.3106195E-02 -0.3589872E+00	0.6434284E+00 0.4720461E-03 0.6756264E-01	-0.8494243E-01 -0.1606412E-03 0.6695342E-02	0.7371702E-02 0.1870089E-04 -0.2209978E-03
SA _{25Hz}	0.1170024E+02 -0.2545129E-02 -0.3919357E+00	0.6187744E+00 0.4335647E-03 0.7546093E-01	-0.7606734E-01 -0.1489975E-03 0.3510518E-02	0.1486226E-03 0.5173672E-05 0.2267451E-02
SA _{30Hz}	0.1151356E+02 -0.2252528E-02 -0.3813910E+00	0.6168970E+00 0.3899853E-03 0.7901342E-01	-0.7695161E-01 -0.1155294E-03 0.1160271E-02	-0.1061536E-01 -0.6416305E-05 0.5063261E-02
SA _{33.3Hz}	0.1137362E+02 -0.2202160E-02 -0.3616381E+00	0.5959553E+00 0.3325180E-03 0.8619232E-01	-0.6355692E-01 -0.8058573E-04 -0.3272819E-02	-0.2937394E-02 0.4250535E-05 0.3252890E-02
SA _{40Hz}	0.1109455E+02 -0.2192594E-02 -0.3156961E+00	0.6027679E+00 0.3001527E-03 0.8713405E-01	-0.6894276E-01 -0.7416999E-04 -0.2858062E-02	-0.2945360E-02 -0.1498243E-05 0.3723028E-02
SA _{50Hz}	0.1073730E+02 -0.2378179E-02 -0.2439530E+00	0.6210895E+00 0.2927693E-03 0.8453231E-01	-0.7174259E-01 -0.6072187E-04 -0.3283123E-02	0.8118381E-02 0.6773228E-05 0.1402293E-02
SA _{66.6Hz}	0.1076854E+02 -0.2273746E-02 -0.2567509E+00	0.6035452E+00 0.2657428E-03 0.8935522E-01	-0.6509470E-01 -0.4906359E-04 -0.5281806E-02	0.1080474E-01 0.9734645E-05 0.8185594E-03
SA _{80Hz}	0.1078848E+02 -0.2275320E-02 -0.2609012E+00	0.6150568E+00 0.2814592E-03 0.8661734E-01	-0.6726936E-01 -0.5396218E-04 -0.4794769E-02	0.5078630E-02 0.5901270E-05 0.2046896E-02
SA _{100Hz}	0.1074053E+02 -0.2366120E-02 -0.2453421E+00	0.6231113E+00 0.2990119E-03 0.8402141E-01	-0.7343420E-01 -0.6501398E-04 -0.2884034E-02	0.6729339E-02 0.3687702E-05 0.1729717E-02

쇠상수의 계산결과는 표 5에 제시하였다. 지반가속도자료를 이용하여 한반도 남부를 대상으로 계산된 Junn et al.⁽⁴⁾과 비교하면 이번 연구로 계산된 α_s 값은 상대적으로 크게 계산되었다. 이는 한반도 남동부에서의 α_s 값이 한반도 전체에서 계산된 값과 비교하여 상대적으로 큰 특징을 보인다고 할 수 있다. 또한 이번 연구의 대상지역과 같은 김태경⁽¹⁴⁾, 노명현과 이기화⁽¹⁵⁾의 연구결과와 비교하면 비슷한 값을 갖는다. 하지만 이들 연구에서 사용된 지진자료는 모두 속도자료이므로 고주파영역에서의 감쇠특성을 충분히 반영하기 어렵다는 단점이 있으므로 이번 연구와 직접적으로 비교하기 어렵다.

5.2 강진운동 전파특성

최근 국내에서는 강진운동의 추계학적 연구가 활발히 진행중이며 자료의 축적과 함께 연구결과도 조금씩 향상되는 추세이다. 이번 연구결과로 표 6에 제시된 지반운동의 진원 거리에 따른 감쇠특성을 기존의 연구와 비교분석하였다. 그림 12는 진원깊이를 10km로 가정한 경우 최대지반가속도의 진원 거리에 따른 감쇠특성을 보여준다. 그림 12-(a)는 조남대와 박창업⁽¹⁾, (b)는 Junn et al.⁽⁴⁾의 연구결과이며 (c)는 이번 연구결과이다. 그림 12-(b)는 해당 논문의 입력상수를 이용하여 재계산한 결과이며, 표 7에 감쇠식 및 계수가 제시되어 있다.

그림 12의 (a), (b) 및 (c)의 경우에 적용된 응력강하상수값은 각각 100-bar, 50-bar, 92-bar 이고, α_s 는 각각 0.00112, 0.00516, 0.016이다. 이번 연구에서 계산되어 지진동 감쇠공식 계산에 사용된 α_s 값이 기존의 연구결과와 비교하여 큰 값이기 때문

에 진원근처에서의 최대지반가속도가 상대적으로 작게 계산되었다.

이번 연구로부터 계산된 지진상수 및 지진동 감쇠공식 등은 한반도 남동부에서의 강지진동 연구에 유용한 기초자료로 사용될 수 있다. 또한 이번 연구에서 제시한 부지고유의 지진상수추정에 적용된 방법을 이용하여 보다 지역특성에 적합한 지진상수를 추정할 수 있으며, 이를 이용하여 지역특성을 고려한 지진공학적인 연구가 가능할 것이다.

감사의 글

이번 연구는 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통하여 실시된 한국과학재단 우수연구센터의 지원(과제번호: R11-1997-045-13001-0)에 의한 것입니다. 연구비지원에 대하여 감사합니다.

참고 문헌

1. 조남대, 박창업, "추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강지진동 연구", 한국지진공학회집, 제5권, 제4호, 2001, pp. 17-26.
2. 박동희, 이정모, 김성균, "한반도 동남부의 지진과 감쇠, 지진원 요소", 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제3호, 2000, pp. 99-106.
3. 박동희, 이정모, 박창업, 김준경, "한반도 동남부의 강지진동 모사와 감쇠식", 지질학회지, 제37권, 제1호, 2001, pp. 21-30.

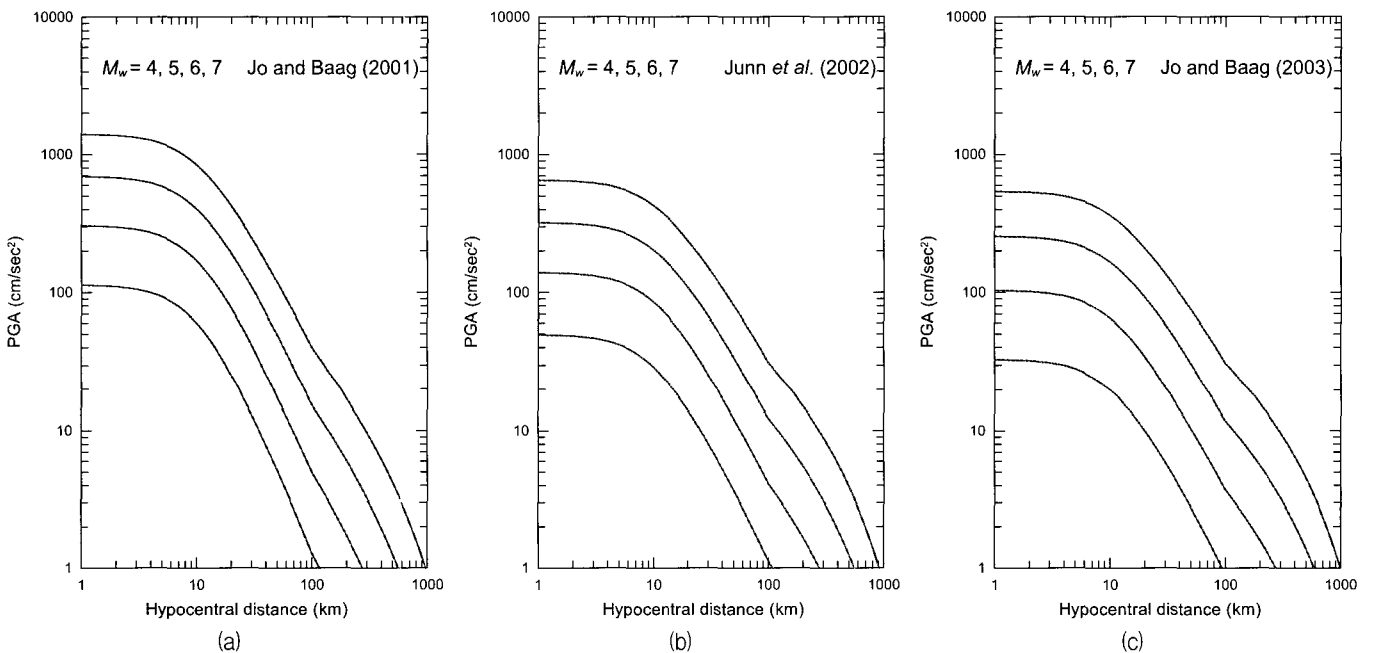


그림 12 한반도 남부에서 진원 거리에 따른 최대지반가속도 감쇠식의 비교. (a)는 조남대와 박창업⁽¹⁾의 연구결과이고, (b)는 Junn et al.⁽⁴⁾에서 제시된 입력상수들을 이용하여 이번 연구에서 계산된 결과이며 (c)는 이번 연구의 결과이다. 계산에 적용된 응력강하상수값은 (a), (b), (c) 각각 100-bar, 50-bar, 92-bar 이고, α_s 는 각각 0.00112, 0.00516, 0.016이다. 이번 연구에서 계산되어 지진동 감쇠공식 계산에 이번 연구에서 α_s 값이 기존의 연구보다 크게 계산되었기 때문에 (c)의 최대지반가속도가 (a)와 (b)보다 작은 값으로 유도된다. 진원의 깊이는 10km로 가정하여 도시하였다.

표 7 Junn et al.⁽⁴⁾의 강지진동 모사결과를 이용한 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV), 고유진동수(f_N)에 따른 스펙트럼가속도 (SA_{f_N})에 대한 지진동 감쇠공식의 계수

Junn et al. ⁽⁴⁾ (2002)	ξ_0^0	ξ_1^0	ξ_2^0	ξ_3^0
	ξ_0^1	ξ_1^1	ξ_2^1	ξ_3^1
	ξ_0^2	ξ_1^2	ξ_2^2	ξ_3^2
PGA	0.1114645E+02 -0.2438321E-02 -0.3214505E+00	0.5111930E+00 0.1401897E-03 0.1050434E+00	-0.3853722E-01 -0.1627163E-04 -0.9657898E-02	0.2917900E-01 0.5987778E-04 -0.6503183E-02
PGV	0.7384609E+01 -0.1262399E-02 -0.1160705E+00	0.1056846E+01 0.3119521E-03 0.9267443E-01	-0.1698236E-01 0.4105703E-05 -0.1666108E-01	0.2530663E-01 0.2917125E-04 -0.4067669E-02
SA _{0.2Hz}	0.6679639E+01 -0.4268119E-03 -0.3748490E-02	0.2312779E+01 0.1383544E-03 0.3117944E-01	-0.1835950E+00 -0.6610328E-04 -0.3036537E-01	-0.1049915E+00 -0.2221354E-04 0.4357376E-02
SA _{0.5Hz}	0.8391204E+01 -0.8670457E-03 -0.5087850E-02	0.1901998E+01 0.1252482E-03 -0.1642510E-01	-0.3754984E+00 0.3080874E-04 -0.8011376E-02	-0.8424903E-01 -0.6935354E-05 0.1472540E-01
SA _{1Hz}	0.9386812E+01 -0.1186256E-02 -0.4231625E-01	0.1314529E+01 0.2095747E-03 -0.3958590E-02	-0.3200693E+00 0.3484179E-04 0.6241463E-02	0.3229070E-01 -0.7968616E-06 0.7951086E-02
SA _{20Hz}	0.1011117E+02 -0.1637291E-02 -0.6899903E-01	0.9610123E+00 0.1860033E-03 0.1827010E-01	-0.2096819E+00 -0.1186325E-04 0.1170917E-01	0.6083578E-01 -0.1051503E-04 0.3687729E-02
SA _{2.5Hz}	0.1030184E+02 -0.1888695E-02 -0.7428584E-01	0.9021453E+00 0.2455878E-03 0.2072158E-01	-0.1805726E+00 -0.1284207E-04 0.1109936E-01	0.5009795E-01 -0.3434942E-04 0.4457693E-02
SA _{5Hz}	0.1084727E+02 -0.2849302E-02 -0.9839515E-01	0.7330039E+00 0.1656399E-03 0.5163813E-01	-0.9169242E-01 0.2732682E-04 0.1947579E-02	0.4096980E-01 -0.8976771E-05 -0.2287237E-02
SA _{10Hz}	0.1133266E+02 -0.4215788E-02 -0.1444768E+00	0.6680089E+00 0.2113797E-03 0.6382019E-01	-0.5951498E-01 0.4034869E-05 -0.7997216E-03	0.2461710E-01 -0.2937551E-05 -0.3305478E-02
SA _{15Hz}	0.1169969E+02 -0.4566555E-02 -0.2318781E+00	0.6790977E+00 0.3934160E-03 0.5541589E-01	-0.6339215E-01 -0.5055706E-04 0.1298223E-02	0.1666769E-01 0.9923913E-05 -0.2796287E-02
SA _{20Hz}	0.1204796E+02 -0.4088456E-02 -0.3472752E+00	0.6719820E+00 0.5042552E-03 0.5265308E-01	-0.7885674E-01 -0.1305098E-03 0.6952428E-02	0.3864920E-02 -0.1165089E-05 0.6982079E-03
SA _{25Hz}	0.1224261E+02 -0.3432570E-02 -0.4349781E+00	0.6742926E+00 0.5436587E-03 0.5099465E-01	-0.8553725E-01 -0.1642471E-03 0.9316633E-02	-0.1058695E-01 -0.2205037E-04 0.5008261E-02
SA _{30Hz}	0.1231987E+02 -0.2801424E-02 -0.4945453E+00	0.6395627E+00 0.4884727E-03 0.6088131E-01	-0.7677013E-01 -0.1373753E-03 0.5713646E-02	-0.1179564E-01 -0.1411377E-04 0.5153908E-02
SA _{33.3Hz}	0.1230647E+02 -0.2518396E-02 -0.5119765E+00	0.6111040E+00 0.4449132E-03 0.6862625E-01	-0.5620699E-01 -0.1023274E-03 -0.1084969E-03	0.2030193E-03 0.2944354E-05 0.2202524E-02
SA _{40Hz}	0.1214057E+02 -0.2101691E-02 -0.5120252E+00	0.5928565E+00 0.3677019E-03 0.7696832E-01	-0.5395531E-01 -0.7778444E-04 -0.2230499E-02	-0.6299189E-02 0.5086772E-05 0.3279765E-02
SA _{50Hz}	0.1112473E+02 -0.2464255E-02 -0.3168672E+00	0.5677875E+00 0.2699627E-03 0.8719838E-01	-0.5823449E-01 -0.4547497E-04 -0.3594819E-02	0.7614490E-02 0.1747847E-04 0.2954169E-03
SA _{66.6Hz}	0.1147164E+02 -0.2127181E-02 -0.3988770E+00	0.5369246E+00 0.2424084E-03 0.9444400E-01	-0.3790611E-01 -0.3209196E-04 -0.8028091E-02	0.1157227E-01 0.2603236E-04 -0.8212708E-03
SA _{80Hz}	0.1134925E+02 -0.2300472E-02 -0.3681670E+00	0.5569458E+00 0.2649736E-03 0.8949683E-01	-0.5244862E-01 -0.4335069E-04 -0.4764461E-02	0.4287288E-02 0.1975731E-04 0.9666400E-03
SA _{100Hz}	0.1114237E+02 -0.2451135E-02 -0.3211132E+00	0.5622232E+00 0.2602631E-03 0.8876983E-01	-0.5553188E-01 -0.3987933E-04 -0.4302999E-02	0.9048219E-02 0.2133045E-04 -0.1576145E-03

4. Junn, J.-G., Jo, N.-D., and Baag, C.-E., "Stochastic prediction of ground motions in southern Korea," *Geosciences Journal*, Vol.6, No.3, 2002, pp. 203-214.
5. Brune, J., "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes," *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 1970, pp. 997-5006
6. 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.
7. Atkinson, G., "Attenuation of strong ground motion in Canada from a random vibrations approach," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, 1984, pp. 2629-2653.
8. Hanks, T. and McGuire, R., "The character of high-frequency strong ground motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, 1981, pp. 2071-2095.
9. Frankel, A., McGarr, A., Bicknell, J., Mori, J., Seeber, L., and Cranswick, E., "Attenuation of high-frequency shear waves in the crust; measurements from New York state, South Africa, and southern California," *J. Geophys. Res.*, Vol. 95, 1990, pp. 17441-17447.
10. Bracewell, R., *The Fourier transform and its applications*, McGraw Hill, 1965.
11. Aki, K., "Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves," *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, 1969, pp. 615-631.
12. Hanks, T. and Kanamori, H., "A moment magnitude scale," *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, 1979, pp. 2348-2350.
13. Saragoni, G. and Hart, G., "Simulation of artificial earthquakes," *Earthquake Eng. Str. Dyn.*, Vol. 2, 1974, pp. 249-267.
14. 김태경, "경상분지의 지진파 감쇠와 지진관측소 부지효과", 경북대학교 석사학위논문, 2001.
15. 노명현, 이기화, "한반도 남동부 지역에서의 최대 지반운동치의 추정(I): 스펙트럼 파라미터의 추정", 지질학회지, 제30권, 1994, pp. 297-306.