

# 한반도 동남부의 지진파 감쇠와 지진원 요소

## Attenuation and Source Parameters of Earthquakes in the Southeastern Part of the Korean Peninsula

박 동 희\*                      이 정 모\*\*                      김 성 균\*\*\*  
Park, Dong Hee              Lee, Jung Mo                  Kim, Sung Kyun

### 국문요약

한반도 동남부 지역에서 발생하고 관찰된 약진 또는 중진의 자료를 이용하여 이 지역의  $Q$ 값과 지진원의 특성인 모서리주파수( $f_c$ ), 응력강하량( $\Delta\sigma$ ) 및 모멘트규모( $M_w$ )를 산정하였다. 가속도 스펙트럼의 경사와 편린된  $x$ 의 통계학적 분포로부터 추정된  $Q$ 의 95% 신뢰범위는 1656~2454이다. 1998년 1월 18일 울산 앞바다 지진과 1997년 6월 26일 경주지진의 지진원 요소를 구한 결과  $f_c$ 는 각각 4.22Hz, 2.94Hz,  $\Delta\sigma$ 는 각각 106.8bar, 106.2bar,  $M_w$ 는 각각 3.9, 4.0으로 추정되었다.

제한된 자료수로 인하여 이들의 통계학적 성질을 충분히 규명하지는 못하였지만 다른 연구자들의 기존결과와 유사한 값을 보인다. 본 연구의 결과는 강진동 모사에 직접 이용가능하며, 이 지역에 위치한 원자력발전소의 내진 안전성 검토에도 이용될 수 있다.

주요어 :  $Q$ 값, 모서리주파수, 응력강하량, 모멘트규모

### ABSTRACT

The quality factor and the seismic source parameters such as the corner frequency and the stress drop in the southeastern part of the Korean Peninsula are estimated from small and moderate-sized earthquake data in and around the area. The resulting  $Q$  value at 95% confidence level ranges from 1656 to 2454. The source parameters of two moderate-sized earthquakes, the Ulsan Offshore Earthquake(local magnitude 4.3, Jan. 18, 1998) and the Kyungju Earthquake (local magnitude 4.3, Jun. 26, 1997), are estimated. The corner frequencies are 4.22 Hz and 2.94 Hz, the stress drops are 106.8 bars and 106.2 bars, and the moment magnitudes are 3.9 and 4.0 respectively.

Although, statistical properties of these parameters are not traceable due to the limited number of data sets, they are similar to those of the previous studies carried out by other researchers. The results can be used for the strong ground motion simulation in earthquake engineering and in the construction of seismic hazard map.

**Key words** : quality factor, corner frequency, stress drop, moment magnitude

## 1. 서 론

지진의 진도(intensity)는 지진원의 특성, 지진파를 전달하는 매질의 전파특성 중의 하나인 감쇠상수와 수진지역의 응답에 의하여 결정된다. 이들을 선형시스템으로 가정하면 수진지역의 지진동은,

$$W(t) = S(t) * T(t) * R(t) \quad (1)$$

로 나타난다. 여기서  $S(t)$ 는 지진원 시간함수(source time function),  $T(t)$ 는 진원에서 수진 지역까지의 전달함수(transmission function), 그리고  $R(t)$ 는 수진지역 응답함수(receiver function)를 의미하며, \*는 convolution을 의미한다. 지진원 시간함수는 모서리주파수(corner frequency;  $f_c$ )와 응력강하량(stress drop;  $\Delta\sigma$ )에 의하여 특성화되고, 전달함수는 지진파의 속도구조(velocity structure), 기하학적 퍼짐(geometric spreading)과

\* 경북대학교(현재 한국전력공사 전력연구원)

\*\* 정회원 경북대학교 지질학과, 교수

\*\*\* 정회원 · 전남대학교 지구환경과학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

진동에너지의 비가역 변환에 의한 감쇠(attenuation)로 특성지어진다.

본 논문에서는 한반도 동남부 지역에서 발생하고 관찰된 약진 또는 중진 자료를 이용하여 이 지역의 지진파 감쇠를 산정하고, 지진원의 특성인 모서리주파수와 응력강하량을 구하였다. 본 연구의 결과는 강진동 모사(strong ground motion simulation)에 직접 이용되며, 이 지역에 위치한 원자력발전소의 내진 안전성 검토에도 이용될 수 있다.

## 2. 자 료

한국자원 연구소는 1994년부터 전국적으로 15개의 지진관측소를 운영하고 있으며, 이 중 9개는 한반도 동남부에 위치한다(Fig. 1 참조). 대부분의 수진기는 단주기형이며, 25Hz 저주파 통과 9차 Butterworth 필터로 anti-aliasing 필터를 적용한 후 1초당 100개의 속도로 디지털자료로 기록한다. 본 연구에서는 1997년 5월 10일부터 1999년 6월 19일까지 한반도 동남부에서 발생한 규모 1.4 이상의 지진을 대상으로 하였다. 이 기간 중 80회 이상의 지진이 발생하였으나 상기 관측소 중 최소한 한 곳 이상에서 신호

대 잡음비가 높은 기록자료를 보이는 26회의 지진(Fig. 1)을 선정하였다. 선정된 자료로부터 한국자원연구소의 지진목록<sup>(1)-(3)</sup>에 보고된 진원지를 이용하여, 관측된 두 수평성분에서 방사선 방향(radial direction)과 접선방향(tangential direction)을 추출한 후 접선방향 성분에서 SH파의 시작부분부터 30초간을 윈도우(window)하여 자료를 분석하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 지진파 기록된 관측소를 나타내었다.

## 3. 이론 및 분석방법

### 3.1 Q값

주파수에 따른 탄성과 진폭은,

$$a(f) = A_0 \exp\left(-\frac{\pi f R}{Qv}\right) \quad (2)$$

가 된다. 여기서  $f$ 는 주파수,  $v$ 는 해당 지진파 속도, 그리고  $R$ 는 진앙거리이다. Anderson과 Hough<sup>(4)</sup>는 S파의 고주파수 영역에서 가속도 스펙트럼의 일반적인 모양을 스펙트럼 감쇠변수(spectral decay,  $x$ )를 도입하여 다음 식과 같이 일차항까지 기술하였다.

$$a(f) = A_0 e^{-\pi x f}, \quad f > f_c \quad (3)$$

윗 식의 양변에 자연대수를 취하면  $\ln a(f) = -\pi x f + c$ 가 되며 관측된 지진파의 스펙트럼에서 그 기울기가  $-\pi x$ 가 된다. 진앙거리  $R$ 에 따른  $x$ 값의 통계적 분포는

$$x(R) = x_q R + x_s \quad (4)$$

로 나타낼 수 있으며, 식 (2), (3), (4)를 비교하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{1}{x_q v} \quad (5)$$

본 연구에서는 윗 식들을 이용하여  $Q$ 값을 계산하였다. 먼저 지진기록 중 S파 부분에 설정

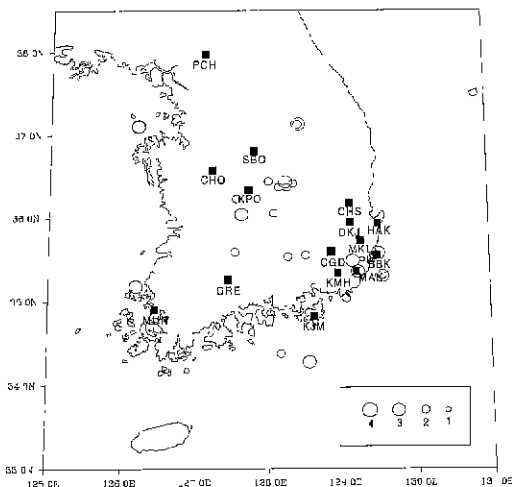


Fig. 1 Map view of the earthquakes used in this work. Also shown are the seismic stations by black squares with the station name

Table 1 Earthquake data used in this work

EVENT			Latitude	Longitude	M <sub>L</sub>	STATION
1997	05	10	36.128	128.400	2.8	KPO, MKL
1997	05	19	36.415	128.331	2.4	MKL
1997	05	22	36.041	127.630	3.9	KPO
1997	06	15	37.109	126.211	3.0	KPO, SPO
1997	06	15	37.105	126.205	3.2	SPO
*1997	06	26	35.481	129.141	4.3	CHS, SPO
1997	06	30	35.589	127.540	2.8	SPO
1997	07	03	36.370	128.148	2.4	CHS
1997	08	05	36.434	128.234	3.3	BBK
1997	09	17	35.354	129.217	3.1	HAK
1997	09	26	36.230	127.568	2.6	CHS, DKJ
1997	10	11	35.550	128.506	2.7	BBK, MAK
1997	10	18	37.131	128.413	3.0	HAK, MKL
1998	01	13	35.532	128.260	2.8	BBK
*1998	01	18	35.297	129.540	4.3	BBK, CGD, HAK, MKL
1998	02	20	35.308	129.543	2.2	DKJ
1998	04	10	35.035	129.050	2.3	CGD
1998	04	15	35.512	129.409	2.8	BBK, MKL
1998	05	01	36.054	128.072	2.6	CGD, HAK, MAK, MKL
1998	06	07	34.274	128.540	3.2	CGD, DKJ, MAK
1998	06	19	36.370	128.251	2.6	BBK, MKL
1998	06	27	35.498	129.279	1.4	CHS, HAK
1998	07	07	35.576	129.492	3.0	HAK
1998	09	04	34.373	128.160	2.2	CGD
1999	04	24	35.512	129.409	2.6	BBK, HAK, KJM
1999	06	19	36.440	128.005	2.6	BBK

\* denotes events used to estimate the stress drop

한 시간차를 통과한 신호에 대한 스펙트럼을 계산한 후 이 스펙트럼의 기울기로부터  $\alpha$ 를 계산하여 식 (4)에 선형회귀분석을 적용하여  $\alpha_q$  값을 구한다. 그 결과 식 (5)에서 주파수와 무관한 Q값을 얻는다. Fig. 2는 S파 스펙트럼의 예로서 선형회귀직선을 같이 표시하였다.

한편,  $\alpha$ 의 거리에 따른 변화를 Fig. 3에 도시하였으며, 식 (4)를 이용하여 선형회귀분석한 결과  $\alpha = 0.0001374R + 0.00131$ 로 나타난다. 이들의 통계학적 성질을 살펴보면  $\alpha_q$ 의 표준편차는

0.00001361로 매우 양호한 분포를 보이나,  $\alpha_q$ 의 표준편차는 0.00150으로 오히려 표준편차가 평균 값보다 크게 나타나 불량한 신뢰도를 가지는데 이는 관측에 포함된 잡음과 해석 가능한 주파수 영역의 한계에서 기인하는 것으로 사료된다.  $\alpha_q$  값에 표준편차의 약 2배가 되는 95% 신뢰구간을 취할 경우  $0.0001107 < \alpha_q < 0.0001640$ 가 되고(Fig. 4), 이를 김성균<sup>(5)</sup>에 의한 횡파속도  $v = 3.68 \text{ km/sec}$  이용하여 식 (5)에 대입하면  $1656 < Q = 1977 < 2454$ 가 된다. 이 Q값은 조남대<sup>(6)</sup>의 1274보다 큰 값

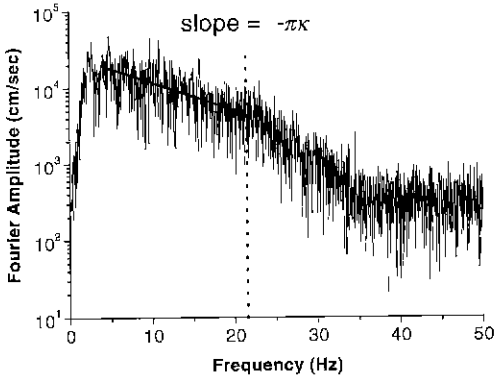


Fig. 2 An example Fourier spectrum of the ground acceleration in linear-log plot to estimate  $\kappa$ . The thick line is the result of the linear regression, and its slope is  $-\pi\kappa$

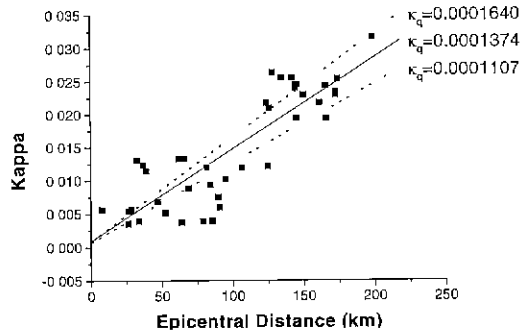


Fig. 3 The plot of  $\kappa$  as a function of the epicentral distances ( $R$ ). The straight line represents the best fitting linear equation obtained regression

으로, 그 차이는 조남대가 선형회귀분석에서 anti-alias필터의 영향을 무시하고 25Hz까지 주파수를 선정한 것에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 Noh와 Lee<sup>(7)</sup>에 의한 1800은 상기결과의 유효구간에 포함되며, Park et al.<sup>(8)</sup>에 의하여 구해진  $\kappa_0$  값, 0.00016은 본 연구에서 구해진  $\kappa_0$ 의 유효구간의 상한값에 해당된다. 참고로 한반도와 유사한 판내부 지진에 속하는 미국 북동부지역에서의 주파수에 무관한  $Q$ 값의 결과를 고찰해 보면 Shin과 Herrmann<sup>(9)</sup>에 의해 1900과 Atkinson과 Mereu<sup>(10)</sup>에 의해 2000이 보고된 바 있다.

### 3.2 지진원 상수( $f_c$ , $\Delta\sigma$ , 및 $M_w$ )

응력강하량이란 지진 전후에 단층면에 작용하는 응력차를 말하는 것으로, 일반적으로 해구 내측의 천발지진의 경우에는 30bar 전후, 판내부 지진의 경우 100bar 전후로서 지역적으로 달라지는 것으로 알려져 있다.<sup>(11)</sup> 응력강하량을 평가하는 데에는 여러가지 기준이 있다. 이 중 정 응력강하량(static stress drop)은 강성률, 단층 이동거리, 단층면의 깊이를 곱한 값으로 지진발생 후 응력의 변화를 가장 잘 나타낼 수 있으나, 직접적인 평가가 불가능하다. 반면 지진자료를 이용하면, 단층면상의 초기 응력과 운동마찰(frictional stress)의 차이인 동응력강하량

(dynamic stress drop)을 평가할 수 있다.

동응력강하량을 측정하는 데 가장 일반적으로 이용되는 방법은 Brune<sup>(12),(13)</sup>의 모델로 스펙트럼에서 직접 모서리주파수(corner frequency),  $f_c$ 와  $\Omega_0$  (zero frequency level)를 이용하여 동응력강하량( $\sigma_B$ )을 구하는 방법이다. Brune에 의하면 지진원을 반지름이  $r$ 인 원형(circular source)이고, 매질이 이상적인 탄성체라 가정하면 지진원 변수 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$r = \frac{2.34\beta}{2\pi f_c} \quad (6)$$

여기서  $\beta$ 는 S파 속도를 의미한다. 또, 완전히 응력이 방출된다고 가정하면

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} = \sigma_B = k\Phi\Omega_0 f_c^3 \quad (7)$$

으로 구해질 수 있다. 이 때  $k = \frac{7}{16} \left( \frac{2\pi}{2.34} \beta \right)^3$ ,  $\Phi = \left( \frac{4\pi\rho\beta^3}{R_{\theta\phi} FV} \right) R$ 이고, 여기서  $R$ 은 진앙거리이며, 이 밖의 상수에 대한 설명은 Table 2에 나타내었다.

Snoko<sup>(14)</sup>는 Brune의 모델을 이용하기 위하여 스펙트럼에서 직접  $f_c$ 를 결정하는 경우 신뢰도

Table 2 Parameters of each equations

Parameter	Description of parameter	Value of parameter
$\beta$	Shear wave velocity near the source	3.68 km/s
$\rho$	Density of the medium near the source	2.7 g/cm <sup>3</sup>
$F$	Free surface effect(SH wave)	2
$R_{\phi}$	Average radiation pattern(S wave)	0.63
$V$	horizontal partition factor	0.707

가 떨어진다는 점을 지적하고,  $f_c$ 를 이용하는 대신 스펙트럼에서 관찰 가능한 대개변수를 도입하였다. 이 값은 주파수 영역에서의 원지장(far field)의 변위 ( $U(\omega)$ )에 각주파수(angular frequency)를 곱한 후 제곱하여 적분한 값인  $J$ 로 표시하였다. 스펙트럼의 유효대역폭이  $f_1$ 과  $f_2$  사이라면  $J$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J = 2 \int_0^{\infty} |\omega U(\omega)|^2 df = \frac{2}{3} |\Omega_0 \omega_1|^2 f_1 + 2 \int_{f_1}^{f_2} |\omega U(\omega)|^2 df + 2 |\omega_2 U(\omega_2)|^2 f_2 \quad (8)$$

이 때  $\omega = 2\pi f$ 이다. 위 식의 우변의 첫 번째 항과 세 번째항은 이론식에 의한 교정항(correction term)으로 주파수가  $f_1$ 보다 작은 범위( $f < f_1$ )에서는 일정한 값을 가지며, 그 이상의 주파수( $f > f_2$ )에서는 주파수의 제곱에 반비례하여 감소한다는 가정에서 추정되는 값이다. 또한, 식 (7)과 (8)의 결과로부터 모서리 주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_c = \left[ \frac{J}{2\pi^3 \Omega_0^2} \right]^{1/3} \quad (9)$$

한편, Andrew<sup>(15)</sup>는 다음과 같이 변위 제곱 값의 적분값  $K$ 를 도입하였다.

$$K = 2 \int_0^{\infty} |U(\omega)|^2 df = 2 |U(\omega_1)|^2 f_1 + 2 \int_{f_1}^{f_2} |U(\omega)|^2 df + \frac{2}{3} |U(\omega_2)|^2 f_2 \quad (10)$$

상기의  $K$ 와  $J$ 를 이용하여  $\Omega_0$  값을 추정할 수

있으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$\Omega_0 = \left[ \frac{4K^3}{J} \right]^{1/4} \quad (11)$$

상기 (8), (9), (10), (11)의 식으로부터 얻어진 결과로부터 응력강하량은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta\sigma = \sigma_B(\Omega_0, J) = qk\Phi \frac{J}{\Omega_0} \quad (12)$$

여기서,  $q = 1/(2\pi^3)$ 이다.

지진모멘트(seismic moment,  $M_0$ )는 단층운동으로서 지진의 크기에 해당하는 양으로, 위 상수들을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_0 = \Phi \Omega_0 \quad (13)$$

또한, 지진모멘트는 지진의 규모와도 관련이 있다고 생각할 수 있다. 그러나 지진규모는 지진의 크기를 나타내는 편의적인 척도에 지나지 않으며, 엄격한 의미의 물리량으로 보기 어렵다. 따라서 지진모멘트를 지진규모의 새로운 척도로 도입할 수 있다. 모멘트 규모는 지진 모멘트와 관련하여 여러 지질학적 조건을 연구하여 발생할 지진을 정량적으로 예측하는데 가장 유용한 물리적 개념을 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 하지만 한반도의 지진은 국지규모(local magnitude)로 보고되고 있으며, 또한 모멘트 규모와 국지규모 사이의 관계에 대한 정확한 수식이 정립되지 않는 상황이다.

Hanks와 Kanamori<sup>(16)</sup>에 의하면 지진모멘트와 모멘트 규모(moment magnitude,  $M_w$ ) 사이의

관계식은 다음과 같다.

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (14)$$

본 연구에서는 상기 식 (8), (10), (11)을 반복수행방법(iteration)을 이용하여  $\Omega_0$ 를 구하고 그 결과를 사용하여 모서리 주파수, 응력강하량, 모멘트규모를 구하였다.

일반적으로 응력강하량은 지진의 규모와 관련이 없는 양으로 알려져 있지만, 미소지진과 같은 작은 지진에 대해서는 확실하지 않다. 본 연구에서는 결과의 안전성을 위하여  $M > 4.0$ 이상의 지진을 선정하여 응력강하량을 구하였다. 한반도에서 일어난 지진의 대부분이 미소지진임은 물론이고  $M > 4.0$ 이상의 지진들 중에도 일부는 기록이 포화(saturate)되어 있어서 제한된 자료를 이용할 수밖에 없었다. 선정된 데이터는 1997년 6월 26일 경주지진( $M=4.3$ )과, 1998년 1월 18일의 울산 앞바다지진( $M=4.3$ )으로, 지진의 기록 중 온전하게 기록된 각각 2개 4개의 자료를 분석하여 응력강하량을 구하였다.

Fig 4는 분석한 변위스펙트럼의 예로서, 수직점선은  $f_1$ 과  $f_2$ 를 나타내고 수평점선은  $\Omega_0$ 의 반복계산을 위한 시작 값을 표시하며 반복수행의 결과로 얻어진  $\Omega_0$ 와  $f_c$ 를 각각 수평실선과 수직실선으로 표시하였다. 분석결과는 Table 3에 나타내었다. 이는 조남대<sup>(6)</sup>가 1998년 1월 8일 울산지진에 의하여 구한 값(102bar)과 거의 유

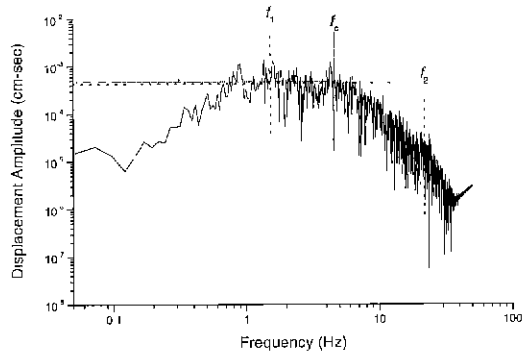


Fig 4 An example Fourier spectrum of displacement that converted from the velocity seismogram of the Ulsan offshore eq.(98/01/18). The dotted vertical lines,  $f_1$  and  $f_2$ , indicates bandwidth used for the analysis. The dotted horizontal line is the chosen  $\Omega_0$  at the beginning of the iteration. The solid horizontal and vertical lines indicate  $\Omega_0$  and  $f_c$ , respectively, resulted from the iterations using the Andrew's parameterization

사하고, Noh와 Lee<sup>(7)</sup>의 50~100의 상한과 유사하다.

#### 4. 결 론

한반도 동남부 지역에서 발생하고 관찰된 26개의 약진 또는 중진의 자료를 이용하여 이 지역의 지진파 감쇠를 나타내는  $Q$  값을 산정하고, 지진원의 특성과 관련된 모서리 주파수와 응력강하량을 구하였다. 감쇠매개변수  $x_q$ 는 0.0001374,  $x_s$ 는 0.00131로 산정 되었고,  $x_q$ 의 표준편차는

Table 3 Estimated source parameters and mean values

EVENT	STATION	R(km)	$\Omega_0$	$f_c$ (Hz)	$\Delta \sigma$ (bar)	$M_w$
97/06/26	CHS	46.2	0.00130912	3.87	107.4	3.9
	SBO	171.5	0.00061413	2.67	105.7	4.1
MEAN				2.94	106.2	4.0
98/01/18	BBK	42.9	0.00278702	3.45	101.9	4.2
	CHS	108.5	0.00026367	4.64	97.3	3.8
	HAK	58.9	0.00016281	4.66	127.7	3.8
	MKL	78.6	0.00019164	4.14	100.5	3.8
MEAN				4.22	106.8	3.9

0.00001361로 매우 양호한 분포를 보이거나,  $\kappa_s$ 의 표준편차는 0.00150으로 불량하다. 이들로부터 95% 신뢰구간을 가지는  $Q$ 의 범위를 구하면 1656~2454가 된다. 1998년 1월 18일 울산 앞바다 지진과 1997년 6월 26일 경주지진의 지진원 요소를 구한 결과, 모서리 주파수( $f_c$ )는 각각 4.22Hz, 2.94Hz, 응력강하량( $\Delta\sigma$ )는 각각 106.8bar, 106.2bar 모델트 규모( $M_w$ )는 3.9, 4.0로 추정되었다.

제한된 자료수로 인하여 이들의 통계학적 성질을 규명하지는 못하였지만 다른 연구자들의 기존결과와 유사한 값을 보인다. 향후 관측소가 증가하고 양질의 자료가 누적되면 더욱 신뢰도 높은 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업의 일환으로 수행된 것이다.

### 참고 문헌

1. 지현철, 류창하, 신인철, "경상분지에서의 지진연구(III)", 연구보고서, KR-96(C)-4, 한국자원연구소, 대전, 1996, pp. 127.
2. 지현철, 류창하, 신인철, "경상분지에서의 지진연구(IV)", 연구보고서, KR-97(C)-3, 한국자원연구소, 대전, 1997, pp. 124.
3. 지현철, 이희일, 전정수, 김동균, 박정호, 김근영, "지진공학연구", 연구보고서, KR-98(C)-06, 한국자원연구소, 대전, 1998, pp. 197.
4. Anderson, J. and Hough, S., "A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequency," *Bull. seism. Soc. Am.*, Vol. 74, 1984, pp. 1969-1993.
5. 김성균, "한반도의 지각구조에 관한 연구", 지질학회지, 제31권, 1995, pp. 393-403.
6. 조남대, "추계학적 모사법을 이용한 한반도

- 남부에서의 강진동의 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 1998, pp. 129.
7. Noh, M. and Lee, K., "Estimation of peak ground motions in the southeastern part of the Korean Peninsula(I) : estimation of spectral parameters," *Jour. Geol. Soc. Korea*, Vol. 30, No. 3, 1994, pp. 297-306.
8. Park, J., Noh, M., and Lee, K., "Development of attenuation equations of ground motions in the southern part of the Korean peninsula", *Jour. Eq. Eng. Soc. Korea*, Vol. 3, No. 1, 1999, pp. 21-27.
9. Shin, T. C. and Herrmann, R. B., "Lg attenuation and source studies using Miramichi data," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 77, 1987, pp. 384-397.
10. Atkinson, G. and Mereu, R., "The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 82, 1992, pp. 2014-2031.
11. 김성균, 고체지구물리학, 교학연구사, 서울, 1996, pp. 250.
12. Brune, J. N., "Tectonic stress and the spectra of seismic shear wave from earthquake," *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 1970, pp. 4997-5009.
13. Brune, J. N., "Correction," *J. Geophys., Res.*, Vol. 76, 1971, pp. 5002.
14. Snoke, J. A., "Stable determination of (Brune) stress drop," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 77, 1986, pp. 530-538.
15. Andrew, D. J., "Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size," *5th Maurice Ewing Symp. Earthquake Source Mechanics, Proceedings*, American Geophysical Union, 1986, pp. 259-267.
16. Hanks, T. and Kanamori, H., "A moment magnitude scale," *Geophys. Res.* Vol. 85, 1979, pp. 2348-2350.