

## 한반도 동남부의 지진파 감쇠와 지진원 요소

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

박동희, 이정모

경북대학교 지질학과  
대구광역시 북구 산격동 1370

김성균

전남대학교 지구환경과학부  
광주광역시 북구 용봉동 300

#### 요 약

한반도 동남부 지역에서 발생하고 관찰된 약진 또는 중진의 자료를 이용하여 이 지역의 quality factor와 지진원의 특성인 모서리주파수와, 응력강하량을 산정 하였다.  $x$ 의 통계학적 분포로부터 추정된  $Q$ 의 95% 신뢰구간은 1614 ~ 2334이다. 1998년 1월 18 울산 앞바다 지진과 1997년 6월 26일 경주지진의 지진원 요소를 구한 결과  $f_c$ 는 각각 4.24Hz, 2.94Hz,  $\Delta\sigma$ 는 각각 102.3bar 96.9bar로 추정되었다. 제한된 자료숫자로 인하여 이들의 통계학적 성질을 규명하지는 못하였지만 다른 연구자들의 기존결과와 유사한 값을 보인다. 본 연구의 결과는 강진동 모사에 직접 이용되며, 이지역에 위치한 원자력발전소 내진 설계 기본자료로 이용될 수 있다.

#### 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 Peninsular the are estimated from small and intermediate earthquake data in and around the area. The  $Q$  with 95% confidence level ranges from 1614 to 2334. The corner frequencies of the Ulsan Offshore Earthquakes (Jan, 18, 1998) and the Kyungju Earthquake (Jun, 26, 1997) are 4.24 Hz and 2.94 Hz, respectively, and the stress drops of those are 102.3 bars and 96.9 bars, respectively. Although, statistical properties of these parameters are not traceable due to the limited number of data sets, these are similar to the previous results carried out by independent researchers. The results can be used for the strong ground motion simulation in earthquake engineering.

## 1. 서론

지진의 진도는 지진원의 특성, 지진파를 전달하는 매질의 감쇠특성과, 수신지역반응에 의하여 결정된다. 이들을 선형체제(linear system)로 가정하면, 수신지역의 지진동은,

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

으로 나타난다. 여기서  $S(t)$ 는 지진원 시간함수(source time function),  $T(t)$ 는 진원에서 수신지역까지의 전달함수(transmission function), 그리고  $R(t)$ 는 수신지역반응(receiver function)을 의미하며, \*는 convolution을 의미한다. 지진원 시간함수는 모서리파수(corner frequency;  $f_c$ )와 응력강하량(stress drop;  $\Delta\sigma$ )에 의하여 특성화되고, 전달함수는 지진파의 속도와 전달경로에 따르는 시간지연(time delay), 기하학적 퍼짐(geometric spreading)과, 진동에너지의 비가역 변환에 의한 감쇠(attenuation)로 특성 지어 진다.

본 논문은 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 원자력발전소 내진 설계 기본자료로 이용될 수 있다.

## 2. 자료

한국자원 연구소는 1994년부터 전국적으로 15개의 지진관측소를 운영하고 있으며, 이 중 9개는 한반도 동남부에 위치한다 (그림 1 참조). 대부분의 수신기는 단주기형이며, 25Hz 저주파통과 9차 Butterworth 필터로 anti-aliasing 필터를 적용한 후 1초당 100개의 속도로 디지털자료로 기록한다. 본 연구에서는 1997년 5월 9일부터 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 27회의 지진을 선정하여 분석하였다(그림1 참조). 표 1은 본 연구에 사용된 지진과 기록된 관측소를 보여준다.

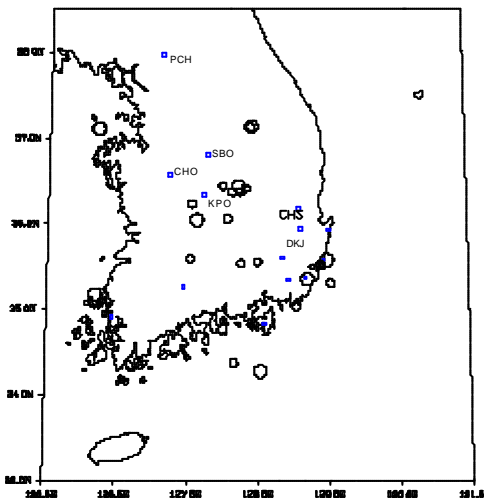


Figure 1. Map view of the earthquakes used in this work. Also shown are the seismic stations by open squares with the station names.

Table 1. Earthquake data used in this work.

DD-MM-YEAR	HH:MM:SS	LAT.	LONG.	M	Depth(km)	STATION		
09	05	1997	21:40:07	35.176	126.194	3.80	20.00	MUN
10	05	1997	00:56:45	36.128	128.400	2.80	5.83	KPO, MKL
19	05	1997	08:29:07	36.415	128.331	2.40	12.19	MKL
22	05	1997	07:52:38	36.041	127.630	3.90	5.94	KPO
15	06	1997	12:46:37	37.109	126.211	3.00	5.55	KPO, SPO
15	06	1997	08:45:30	37.105	126.205	3.20	6.28	SPO
*26	06	1997	03:50:23	35.481	129.141	4.30	14.66	CHS, SBO
30	06	1997	23:48:48	35.589	127.540	2.80	10.55	SPO
03	07	1997	19:42:02	36.370	128.148	2.40	7.92	CHS
05	08	1997	12:45:53	36.434	128.234	3.30	4.49	BEK
17	09	1997	09:33:18	35.354	129.217	3.10	10.69	HAK
26	09	1997	21:16:37	36.230	127.568	2.60	2.14	CHS, DKJ
11	10	1997	19:50:28	35.550	128.506	2.70	10.93	BEK, MAK
18	10	1997	19:35:31	37.131	128.413	3.00	1.51	HAK, MKL
13	01	1998	10:08:03	35.532	128.260	2.80	14.96	BEK
*18	01	1998	01:16:11	25.297	129.540	4.30	27.73	BEK, CGD, HAK, MKL
20	02	1998	01:22:31	35.308	129.543	2.20	26.04	DKJ
10	04	1998	19:00:36	35.035	129.050	2.30	13.69	CGD
15	04	1998	07:28:23	35.512	129.409	2.80	15.53	BEK, MAK
01	05	1998	07:16:58	36.054	128.072	2.60	7.22	CGD, HAK, MAK, MKL
07	06	1998	17:39:23	34.274	128.540	3.20	7.92	CGD, DKJ, MAK
19	06	1998	06:19:46	36.370	128.251	2.60	5.30	BEK, MKL
27	06	1998	22:27:10	35.498	129.279	1.40	13.16	CHS, HAK
07	07	1998	17:37:12	35.576	129.492	3.00	16.30	HAK
04	09	1998	15:45:42	34.373	128.160	2.20	12.71	CGD
24	04	1999	07:28:28	35.512	129.409	2.60	23.22	BEK, HAK, KJM
19	06	1999	18:24:04	36.440	128.005	2.60	12.82	BEK, MKL

\* denotes events used to estimate the stress drop.

### 3. 이론 및 분석방법

#### 3-1. Quality Factor (Q)

주파수에 무관한 quality factor를 가정하면, 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. Anderson 과 Hough는<sup>1</sup> 고주파수 영역에서 가속도 스펙트럼의 일반적인 모양을 감쇠매개변수 (attenuation parameter;  $\alpha$ )를 도입하여 다음과 같이,

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

일차항까지 기술하였다. 식 (3)은  $\ln a(f) = -\alpha f + c$  가되며 관측된 지진파의 스펙트럼에서 그 기울기가  $-\alpha$ 가 된다. 진앙거리( $R$ )에 따른  $\alpha$ 값의 통계적 분포는

$$\alpha(R) = \alpha_0 R + \alpha_s \quad (4)$$

로 나타나며, (2), (3), (4)식을 비교하면,

$$Q = \frac{1}{\alpha_0 v} \quad (5)$$

가 된다.

본 연구에서는 지진기록 중 횡파를 윈도우(window)하여 스펙트럼을 작성하고 선형회귀분석을 이용하여 진앙 거리에 따르는  $\alpha$ 값을 구하였다. 그림 (2)는 횡파 스펙트럼의 예로서 선

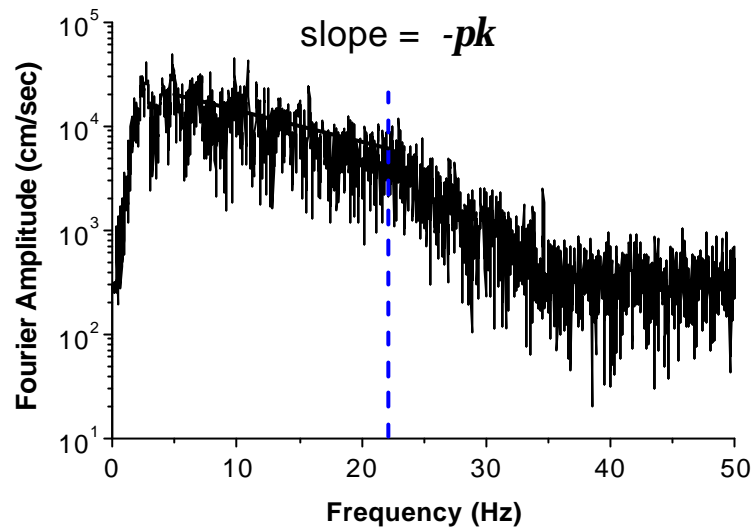


Figure 2. Fourier spectrum of the ground acceleration in linear-log plot to estimate  $\kappa$ .  
The thick line is the result of the linear regression, and its slope is  $-\pi\kappa$ .

형회귀분석 결과로 구한  $\kappa$ 값을 같이 표시하였다. 이상에서 얻어진  $\kappa$ 값을 식 (4)를 이용하여 선형회귀분석한 결과  $\kappa = 0.00014235R + 0.000436$  로 구해졌다. 그 결과는 그림 (3)에 도시하였다. 통계학적 성질을 살펴보면  $\kappa_q$ 의 표준편차(standard deviation)는 0.00001325로

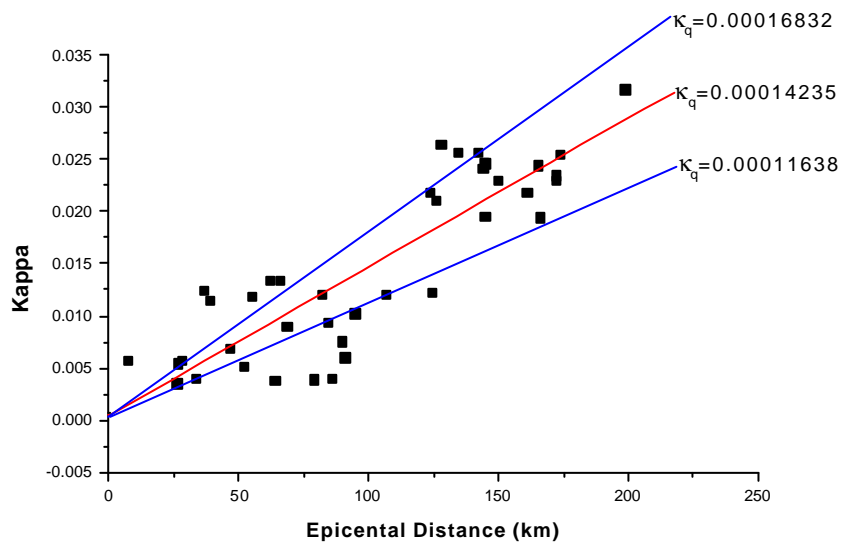


Figure 3. The plot of  $\kappa$  as a function of the epicentral distances ( $R$ ). The straight line represents the best fitting linear equation obtained by regression.

매우 양호한 분포를 보이나,  $x_s$ 의 표준편차는 0.00150으로 불량하다. 95% 신뢰구간을 취할 경우  $0.00011638 < x < 0.00016832$ 로 된다(그림 (3) 참조), 이들을 횡파속도  $v=3.68\text{km/sec}$ 을<sup>2</sup> 이용하여 식 (5)에 대입하면  $1614 < Q = 1908 < 2334$ 가 된다. 이는 조남대의<sup>3</sup> 1274보다 크며, 그 차이는 조남대가 선형회귀분석에서 anti-alias 필터영향을 무시하고 25Hz까지 주파수 선정한 것에 기인하는 것으로 사료된다. 또 노명현, 이기화에<sup>4</sup> 의한 1800은 상기 결과의 유효 구간에 포함된다. 참고로, Eastern North America에서 1900보다 큰  $Q$ 값이 Shin and Hermann에<sup>5</sup> 의하여 보고되었다. 반면 불량한  $x_s$ 값은 관측에 포함된 잡음과 해석 가능한 주파수 영역의 한계에서 기인하는 것으로 사료된다.

### 3-2. Source Parameters ( $f_c$ and $\Delta\sigma$ )

응력강하량이란 지진 전후에 단층면에 작용하는 전단 응력차를 말한다. 지진과 관련된 응력강하량의 다양한 평가기준 중의 하나는 지진 발생 후 응력의 변화를 가장 잘 나타내는 전체 단층면에 걸친 초기 응력준위(stress level)와 마지막 응력준위의 평균의 차이로 정의되는 정응력강하량(static stress drop)인데, 이는 직접적인 평가가 불가능하다. 지진자료를 이용하면 단층면상의 초기 응력과 운동마찰(kinetic friction)의 차이인 동응력강하량(dynamic stress drop)을 평가할 수 있다.

dynamic stress drop를 측정하는 데 가장 일반적으로 이용되는 방법은 Brune의 모델로<sup>67</sup>, 스펙트럼에서 직접  $f_c$ (corner frequency)와  $\Omega_0$ (zero frequency level)를 이용하여  $\sigma_B$ 를 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 횡파 속도를 의미한다. 또, 완전히 응력이 해방된다고 가정하면

$$\Delta\sigma = \frac{7M}{16r^3} = \sigma_B = kF\Omega_0 f_c^3 \quad (7)$$

으로 구해질 수 있다. 이 때  $k = \frac{7}{16} \left( \frac{2\pi}{2.34} \beta \right)^3$  이다.

Snoke는<sup>8</sup> Brune의 모델을 이용하기 위하여 스펙트럼에서 직접  $f_c$ 를 결정하는 경우 신뢰도가 떨어진다는 점을 한계점으로 지적하고,  $f_c$ 를 이용하는 대신 스펙트럼에서 관찰 가능한 매개변수를 도입하였다. 이 값은  $J$ 로 표시되는 지반속도(ground velocity) 제곱의 적분값이다. 만약 스펙트럼의 bandwidth가  $f_1$ 과  $f_2$ 라면

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

이고, 이때  $\omega = 2\pi f$ 이며,  $U(\omega)$ 는 주파수영역(frequency domain)에서 원지장(far field)의 변위이다. 이 때 스펙트럼이  $f < f_1$ 인 영역에서는 일정한 값을 가지며, 그이상의 주파수 ( $f > f_2$ )에서는 주파수의 제곱에 반비례하여 감소한다. 또한, 식(7)과 (8)의 결과로부터 모서리 주파수는 다음과 같이

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

주어진다. 한편, Andrew는<sup>9</sup> 다음과 같이 변위 제곱 값의 적분값  $K$ 를 도입하였다.

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

상기의  $K$ 와  $J$ 를 이용하면 관측기기의 주파수 한계를 배제한  $\Omega_0$ 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 결과에 기초를 두어 응력강하량을 다음과 같이 결정할 수 있다.

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

여기서,  $q = 1/(2\pi^3)$ ,  $k = \frac{7}{16} \left( \frac{2\pi}{2.34\beta} \right)^3$ ,  $\Phi = \left( \frac{4\pi\rho\beta^3}{R_{\omega} FV} \right) R$ 이며,  $\rho$ 는 밀도,  $R_{\omega}$ 는 횡파의 발산양상(radiation pattern),  $F$ 는 자유경계면(free surface)에서의 횡파의 증폭계수(amplification factor),  $V$ 는 횡파의 수평성분률(horizontal partition factor)이다.

본 연구에서는 상기 식들을 반복수행방법(iteration)을 이용하여  $\Omega_0$ 를 구하고 그 결과를 사용하여  $f_c$ 와 응력강하량을 구하였다.

일반적으로 응력강하량은 지진의 규모와 관련이 없는 양으로 알려져 있지만, 미소지진과 같은 작은 지진에 대해서는 확실하지 않다<sup>10</sup>. 본 연구에서는 안전을 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.

그림4는 분석한 변위 스펙트럼의 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 표 (2)에 제시하였다. 이는 조남대가<sup>8</sup> 1998년 1월 8일 울산지진에 대하여 구한 값(102 bar)과 거의 유사하며, Nho and Lee의<sup>4</sup> 50 bar와는 차이를 보인다.

#### 4. 결론

한반도 동남부 지역에서 발생하고 관찰된 27개의 약진 또는 중진의 자료를 이용하여 이 지역의 지진파 감쇠를 산정하고 지진원의 특성인 모서리 주파수와 응력강하량을 구하였다. 감쇠매개변수  $x_q$ 는 0.00014235,  $x_r$ 는 0.00016832로 산정 되었고,  $x_q$ 의 표준편차는 0.00001325로 매우 양호한 분포를 보이나,  $x_r$ 의 표준편차는 0.00150으로 불량하다. 이들로부터 95% 신뢰 구간을 가지는  $Q$ 의 범위를 구하면 1614 ~ 2334가 된다.

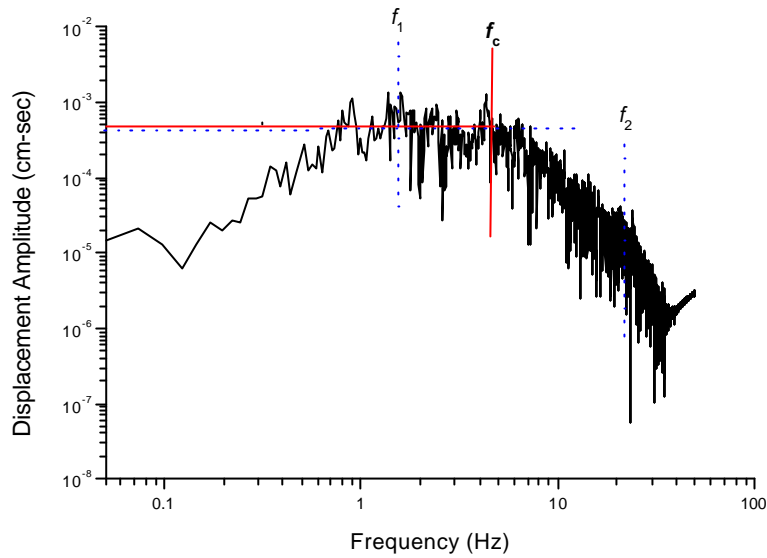


Figure 4. Fourier spectrum of the displacement. The dotted vertical lines indicate  $f_1$  and  $f_2$ , the frequency bandwidth used for the analysis. The dotted horizontal line is the chosen  $\Omega_0$  at the beginning of the iteration. The solid horizontal and vertical lines indicate  $\Omega_0$  and  $f_c$  respectively, resulted from the iterations using the Andrew's parameterization.

1998년 1월 18 울산 앞바다 지진과 1997년 6월 26일 경주지진의 지진원 요소를 구한 결과 모서리 주파수  $f_c$ 는 각각 4.24Hz, 2.94Hz, 응력강하량  $\Delta\sigma$ 는 각각 102.3 bar, 96.9 bar로 추정되었다. 제한된 자료숫자로 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.

Table 2. Estimated results and mean of  $\Omega_0$ ,  $f_c$ ,  $\Delta\sigma$

EVENT	STATION	R(km)	$\Omega_0$	$f_c$ (Hz)	$\Delta\sigma$ (bar)
98/01/18	BBK	32.3	0,00278702	3,45	76,49
	CGD	105.9	0,00026387	4,64	97,32
	HAK	69.9	0,00046281	4,66	149,31
	MKL	55.5	0,00049464	4,14	85,99
MEAN				4,22	102,28
97/06/26	SBO	127.7	0,00061413	2,67	79,00
	CHS	77.5	0,00155034	3,21	114,99
MEAN				2,94	96,99

## 5. 사사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업의 일환으로 수행된 것이다.

## 6.참고문헌

1. Anderson, J. and Hough, S., A model for the shape of the fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequency, *Bull. seism. Soc. Am.*, 74, 1969-1993, 1984.
2. 김성균, 한반도의 지각구조에 관한 연구, *지질학회지*, 31, 393-403, 1995.
3. 조남대, 추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강진동의 연구, 서울대학교 석사학위 논문, 1998.
4. 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* 30, 3, 297-306, 1994.
5. Shin, T.C. and Herrmann, R.B., Lg attenuation and source studies using Miramichi data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 384-397, 1987.
6. Brune, J.N., Tectonic stress and the spectra of seismic shear wave from earthquake, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009, 1970.
7. Brune, J.N., Correction, *J. Geophys. Res.* 76, 5002, 1971.
8. Snoke, J.A., Stable determination of (Brune) Stress drop, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 530-538, 1996.
9. Andrew, D.J., Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, in *Proc. 5th Maurice Ewing Symp. Earthquake Source Mechanics*, S. Das, K. Boatwright, and C.H. Scholtz, American Geophysical Union, Washington, D.C., 259-267, 1986.
10. 김성균, 고체지구물리학, 교학연구사 95pp, 1996.