진원함수를 고려한 다중지연시간창 해석

정태웅^{1*} · 요시모토 카즈오²

¹세종대 에너지자원공학과

²요코하마시립대 나노바이오과학대학원 Yokohama 236-0027, Japan

Multiple Lapse Time Window Analysis using Focal Mechanism

Tae Woong Chung^{1*} and Kazuo Yoshimoto²

¹Department Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong Univ. Seoul 143-747, Korea

²Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University, Yokohama 236-0027, Japan

요 약: 고유감쇠 분리를 위한 다중지연시간창(MLTW) 해석은 진원의 방사 형태에 크게 의존하여 제 1차 시간창의 분산이 매우 크다. 이를 보완하기 위하여 진원의 방위각에 따라 고르게 분포하는 많은 자료를 사용하여야 한다. 만일 진원함수를 알고 있는 자료를 이용하면 이러한 오차를 줄이게 되어 적은 자료 및 방위각 분포에 상관없는 자료연구가 가능할 수 있다. Yoshimoto(2000)의 DSMC에 진원구조를 계산하는 알고리즘을 결합하여 MLTW 해석을 시도하였다. 진원함수를 고려한 MLTW법에서 같은 단층면해를 이용해야 하는 제약으로 최소자승을 이용할 수 있는 자료 수가 극히 제한된다. 따라서 진원구조 계산 알고리즘을 기존 다량의 자료를 이용하는 역산 방법에 적용하는 것이 불가능하다는 것을 확인하였다. 즉, 제 1차 시간창의 분산이 줄어든 대신 완곡한 이론곡선을 구하기에는 자료가 턱없이 부족함을 확인하였다. 자료를 더 확보해야 한다는 일반적인 해결책 이외에, 새로운 제약조건을 부과하기 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

주요어: 다중지연시간창 (MLTW), 제 1창, 진원함수, DSMC법, 제약조건

Abstract: Multiple Lapse Time Window (MLTW) analysis for obtaining intrinsic attenuation value require numerous data without directional bias to compensate focal mechanism. The first window of MLTW, therefore, shows large deviation in fitting smoothed theoretical curve. The information on the focal mechanism may reduce burdens of number and distribution. This study combined algorithm of computing focal mechanism to DSMC method by Yoshimoto (2000). However, the MLTW method based on the numerous data was not applicable to this study, because of the limited data to the almost same fault plane solution. This study showed that the available data was too insufficient to construct smoothed theoretical curve, although the deviation of the first window was improved. Instead of conventional solution by more data, the study seems to be needed for new constraints to obtain smoothed curve.

Keywords: MLTW, first window, focal mechanism, DSMC method, new constraints

서론

우리나라를 포함한 동아시아 일대에 미증유의 방사능피해 공포를 초래한 2011년 3월 토호쿠 앞바다 대지진은 진앙거리 약 400 km 정도 멀리 떨어진 일본현대 건축의 상징 도쿄타워 폭대기도 회개 하는 등 수도인 동경 일대까지 큰 지진동 피해를 초래한 바 있다. 우리나라도 2005년 3월 규모 7.0의 일본 후쿠오카 지진으로 진앙에 가까운 경상도 일대에서 진도 4급

의 지진동을 일으켰고 500 km 이상 떨어진 멀리 수도권 지역에서도 강한 진동이 감지되는 등, 먼지진에 의한 피해 가능성이 환기되었고, 정부차원에서 구조물에 대한 내진설계 점검이 강화되는 계기가 되었다.

지진동의 진원 거리에 따른 감쇠값(Q^{-1})은 내진설계에 있어서 지반의 진동을 정량적으로 예측하기 위해 필수적인 정보이다. 또한 Q^{-1} 값은 지진관측 자료만 있으면 비교적 간단한 방법으로 구할 수 있어서 세계 광범위한 지역에서 많은 조사가 이루어지고 있는데, 한반도의 Q^{-1} 값은 세계의 지진 안정지역에 해당하는 낮은 값이 보고된 바 있다(e.g. Chung and Sato, 2001; Chung *et al.*, 2007).

감쇠상수 Q^{-1} 는 고유감쇠(Q_f^{-1})와 산란감쇠(Q_s^{-1})가 합하여진

2012년 4월 24일 접수; 2012년 5월 20일 수정; 2012년 5월 21일 채택;
*Corresponding author

E-mail: chungtw@sejong.ac.kr

Address: Kunja-dong 98, Kwangjin-ku, Seoul 143-747, Korea

값으로 Q_i^{-1} 는 얼마나 지진파의 탄성에너지가 열이나 다른 형태의 에너지로 전환되었는지를 추정하는 척도라면, Q_s^{-1} 는 지진파의 반사와 굴절, 위상의 변화를 나타내는 척도이다. Q_i^{-1} 값은 S파 직접파와 코다파의 진폭을 감쇠시키고, Q_s^{-1} 는 S파 직접파는 감쇠시키는 반면 코다파는 증폭시키게 된다는 다중 산란모델에 착안하여 다중지연시간창(Multiple Lapse Time Window; MLTW)법에 의해 이론값과 관측되어지는 코다파 포락선값을 비교하는 방법으로 Q_i^{-1} 와 Q_s^{-1} 값을 분리하는 방법이 개발되었다(Hoshiba *et al.*, 1991; Fehler *et al.*, 1992).

그런데, MLTW법은 다량의 자료를 최소자승적으로 구하는 관계로 우리나라의 연구에서는 지역적 차이를 고려하지 못하였다(Chung *et al.*, 2010). 또한 해석과정에서 진원구조에 따른 파형의 변화로 적은 수의 자료에서는 결과값에 대한 신뢰도가 제한적이다. 본 연구에서는 지진자료의 진원구조를 고려한 방법을 개발, 이의 적용을 시도하였다. 진원구조를 고려한 MLTW 해석은 적은 자료에 대하여 보다 정밀한 결과가 산출될 것으로 기대한다.

다중지연시간창(MLTW) 해석

감쇠상수 Q^{-1} 는 고유감쇠(Q_i^{-1})와 산란감쇠(Q_s^{-1})가 합하여진 값으로 고유감쇠 Q_i^{-1} 가 지진파의 탄성에너지를 열이나 다른 형태의 에너지로 전환하는 척도라면, 산란감쇠 Q_s^{-1} 는 지진파의 반사와 굴절, 위상의 변화를 나타내는 척도이다. 실험에

Fig. 1. The exampled data for used in Multiple Lapse Time Window (MLTW) analysis. The grey lines denote to 15s windows from the onset of S-wave. Graph title denotes origin time (21Nov2001,1hr49min10.9s), station (CPN = Choopungryong), record (ELN; short period, Low gain, North-south), hypocenter (61.22 km). Graph was made by using RSEIS package (Chung *et al.*, 2008; Lees, 2008b) with R (R Development Core Team, 2006).

의하면 고유감쇠는 부분용융에 더욱 민감하다고 하며(e.g. Stocker and Gordon, 1975; Kampfmann and Berckhemer, 1985), 그로 인하여 화산 지역의 마그마를 탐색하기 위해 고유감쇠값을 조사하는 연구가 행하여진 바 있다(e.g. Chung *et al.*, 2009).

화산지역을 비롯, 지각의 감쇠구조 연구는 주로 코다 Q 값

Fig. 2. Normalized energy corrected for geometrical spreading versus hypocentral distance for five frequency bands. The crosses, triangles, and circles represent measurements for the first (0 ~ 15 s), second (15 ~ 30 s) and third time windows (30 ~ 45 s). Averaged (4 km width) values for each of the scatter plots are shown the same corresponding symbols in black. Observed values are from S. Korea (Chung and Yun, 2009).

측정을 중심으로 이루어져 왔는데(e.g. 정태웅 외, 2004), 코다 Q 값 연구는 S파가 Source에서 지각의 불순물, 즉 산란체에 한번만 산란되어 Receiver에 이르게 된다는 단일산란모델을 바탕으로 이루어져 왔다(e.g. Aki, 1969, Aki and Chouet, 1975). 이러한 단일산란모델은 고유감쇠와 산란감쇠를 분리해 낼 수가 없어서 다중산란모델이 도입되었는데, 다중산란모델은 고유감쇠 Q_i^{-1} 값은 S파 직접파와 코다파의 진폭을 감쇠시키고, 산란감쇠 Q_s^{-1} 는 S파 직접파는 감쇠시키는 반면 코다파는 증폭시키는 게 된다는 점에 착안하여 고유감쇠값과 산란감쇠값을 분리하는데 이용되게 되었다. 다중산란에 대하여 수치적인 모델을 Hoshiba (1991)가 제시하였고 Zeng *et al.* (1991)과 Sato (1993)가 해석적인 모델을 내놓았다.

이와 같이 제시된 다중산란모델의 이론값과 관측되어지는 코다파 포락선값을 비교를 통하여 고유감쇠와 산란감쇠를 분리하는 다중지연시간창 해석법 Multiple Lapse Time Window method (MLTW법)가 Hoshiba *et al.* (1991)과 Fehler *et al.* (1992)에 의해 개발되어 널리 쓰이게 되었다(e.g. Sato and Fehler, 1998).

MLTW해석법은 S파 지진파 자료를 그 도달시간부터 15초 길이의 3 시간창 부분으로 나눌 수 있다는 점이다(Fig. 1). 첫 시간창은 S파 직접파의 주에너지 전달부분이고, 두 번째 및 세 번째 시간창은 산란 에너지 부분이다. 각 자료는 S파 신호 대비 P파 이전의 잡음비가 2 이상인 자료만을 골랐다. 세 개의 시간창의 지진파 에너지는 각각 1-2, 2-4, 4-8, 8-16, 16-32 Hz의 대역필터를 통과시킨 후 각 제공하여 더하여 산정된다

(Fig. 2).

각각 다른 지진 Source와 관측점 자료를 보정하기 위하여 코다규격화법(Aki, 1980)이 적용되고 있다(e.g. Hoshiba, 1993). 코다규격화를 위한 코다스펙트럼은 S파 주시시간의 약 2배 정도의 시간부근의 5초간의 시간창에 대한 코다파를 제공하여 얻는다(e.g. Chung and Sato, 2001). 각 자료의 지진파 전파에 따른 기하학적 보정은 진원거리 r 의 함수를 곱하여서 보정한다. 이와같이 보정된 관측값은 4 km 간격으로 평균되어 세 곡선으로 나타내는데, 맨 위 쪽의 곡선이 첫 번째 시간창 값이고 두 번째가 그 다음 시간창, 맨 아래 곡선이 세 번째 시간창으로 시간이 지날수록 에너지가 줄어드는 상황을 재현하고 있다(Fig. 3).

Fig. 2의 관측값 세 곡선에 대하여 해석적 방법(Zeng *et al.*, 1991; Sato, 1993) 혹은 수치적 방법(Hoshiba, 1991)에 의한 이론곡선을 최소자승법으로 맞추어 이 때의 고유감쇠계수 $\eta_i (= \frac{2\pi f}{Q_i^{-1}}$, 여기서 f 는 주파수, v 는 모델속도)와 산란감쇠계수 $\eta_s (= \frac{2\pi f}{Q_s^{-1}})$ 의 값에 따라 그래프에 나타난 것처럼 완곡한 곡선이 이루어진다. 이론곡선을 구하는 수치적인 방법을 확장한 Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)법 (Yoshimoto, 2000)은 지각모델의 각 층에서 속도경사를 고려할 수 있고 한 반도 전역의 해석에서 그 유용성이 확인된 바 있다(Chung *et al.*, 2010). 또한 그 열개가 간단하여 진원함수를 쉽게 고려할 수 있어서 본 연구에서는 DSMC법으로 이론곡선을 구하여 MLTW해석을 행하고자 한다.

Fig. 3. The averaged observations (black lines) in Fig. 2 are fitted by theoretical values (grey lines) computed by the the DSMC method (Chung, 2009). Best-fit model parameters are provided at the upper left-hand corner of each plot.

DSMC 법

Hoshiba *et al.* (1991)은 해석적으로 구해진 다중산란 모델을 몬테카를로(Monte Carlo) 방식의 산란으로 수치적으로 구하였다. 이 방식은 모델 공간에서의 산란값을 1차원 값이에 따라 바꿀 수 있어서 해석적인 방법보다 현실적이다. 그러나, 일반적으로 압권의 지진파 속도는 깊이에 따라 증가하며, 직접파 및 산란파의 경로는 위쪽으로 휘게 되며 지진파 에너지가 자유표면 상층부에 모이게 되는 경향이 있다. 이 효과를 정량적으로 측정하기 위해 실제적인 속도구조에서 3차원적인 파선추적을 행할 필요가 있다. Yoshimoto (2000)는 파선추적에 유한차분법을 이용한 Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)법을 개발하였는데, 이는 층구조내에서 속도가 다양하게 변화하는 좀더 현실적인 3차원 구조에서도 사용가능하며 에너지 입자의 충돌확률에 따라 입자의 움직임을 결정하여 에너지 입자의 전파를 모사하는 방법이다.

그 과정을 요약하면 하나의 에너지 입자의 운동 방향(사출각과 방위각)을 다음과 같이 정의한다.

$$\theta = \arccos(1 - U_1), \quad (1)$$

$$\psi = 2\pi U_2,$$

여기서 U_1, U_2 는 0과 1사이의 난수(random variables)이며, 식 (1)은 일정확률분포 (uniform probability distribution)를 확인시켜 주고 있다. (1)식의 에너지입자의 위치는 유한차분법에 의해 계산되는데, 미세한 시간 Δt , 깊이 z 에서의 속도 $v(z)$, 전파거리 $v(z) \Delta t$ 일때 이 경로상에서 산란이 일어날 확률은

$$1 - \exp[-v(z)\Delta t/l] \cong v(z)\Delta t/l \quad (2)$$

이 되며, 여기서 $l \equiv \eta_s^{-1}$ 는 산란체의 평균자유행로이다. 이 식에서 확률 값인 우변은 $v(z)\Delta t \ll \eta_s^{-1}$ 이 성립될 때 $\eta_s v(z)\Delta t$ 로 대체할 수 있다. 이 입자의 전파거리 $v(z)\Delta t$ 에서 산란이 발생할 조건은 다음 식에 의해 결정된다.

$$\eta_s v(z)\Delta t > U_3 \quad (3)$$

여기서 U_3 은 0과 1사이의 난수이다. 산란의 방향은 식 (1)에 의해 결정되어 그 값이 다음 단계의 계산에서 사용된다.

시간 Δt 에서 입자의 운동 과정의 사출각을 θ 로 정의하면 파선이론에 의한 입자의 궤적은 다음 식으로 나타낼 수 있다 (Cerveny and Ravindra, 1971).

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{\sin \theta}{v(z)} \frac{dv(z)}{dz} \quad (4)$$

여기서 s 는 파선궤적의 좌표거리이다. 이 식의 좌변은 Δt 동안의 θ 의 증분이다. θ 의 초기값은 진원에서의 사출각 θ_0 값이다. 에너지 입자의 위치는 (1) ~ (4)식의 과정을 반복하며 결정, 전파되어 간다. 산란은 Δt 의 시간에 1회만 허용되므로 산란횟수의 한계치는 iteration의 반복횟수이다. $\eta_s v(z)\Delta t \ll 1$ 의 조건하에서 Δt 가 작을수록 산란체에서의 입자궤적이 실제에 근사될 수 있다.

수신점은 ΔV 로 하여 입자가 ΔV 에 이르면 에너지군에 추가되고, $n(t)$ 를 시간 t 에서 ΔV 에 포함된 입자수라고 하면, 몬테카를로식에 의해 수많은 N 개의 입자를 발생시킨다. 시간 t 에서 수신점에서의 에너지 밀도는 $n(t)/(N\Delta V)$ 가 된다.

진원함수

MLTW법은 진원의 방사형태에 크게 의존하여, 제 1 시간창의 분산이 매우 큰 사실은 Fehler *et al.* (1992)에 의해 처음으로 지적 되었으며, 이후의 여러 연구에서도 확인된 바 있다 (e.g. Chung *et al.*, 2010). 이러한 오차는 Coda규격화법에서도 마찬가지로 큰 문제여서 방사형태를 보상하기 위해 방위각에 따라 편차없이 분포하는 많은 자료가 필요하게 된다. 만일 진원함수를 고려한 진원자료를 이용할 경우, 이러한 오차를 줄이게 되어 적은 자료 및 방위각 분포에 상관없는 자료연구를 추진할 수 있게 된다. 본 연구에서는 진원함수를 고려한 DSMC법을 처음으로 고안하여 실제 자료 연구에 응용하고자 한다.

단층의 주향, 경사, 면선각을 각각 ϕ_s, δ, λ 로 정의하고 Ray

Table 1. 8 Micro earthquakes with similar fault plane solutions (St: strike; Dp: dip angle; Rk: rake; Az: Trend of axis; Pl: plunge; N: number of seismogram data). Solutions were derived from Park *et al.* (2007), and Kyung *et al.* (2011).

Y 20-	Date		Time			Location		M		Plane1			Plane2			P-axis		T-axis		N
	M	D	H	M	S	Lat	Lon	D		St	Dp	Rk	St	Dp	Rk	Az	PI	Az	PI	
01	11	21	10	49	11	36.7	128.3	14	3.5	313	54	59	179	46	126	64	5	164	65	5
03	3	10	3	28	3	36.1	128.3	11	3.1	301	65	48	186	48	145	60	10	162	51	3
03	3	30	20	10	57	37.8	123.8	15	5	300	60	67	160	39	124	49	12	165	67	1
04	5	30	21	45	54	37.0	129.3	15	2.2	310	65	54	188	44	141	63	12	171	55	4
06	3	19	13	59	47	36.3	127.4	10	2.9	295	81	34	199	56	170	63	17	162	30	15
07	3	15	5	30	12	36.2	128.0	10	2.9	277	81	34	182	56	170	45	17	145	30	11
07	5	3	12	24	7	36.1	127.9	10	2.2	308	84	35	214	56	173	76	19	177	28	11
09	5	2	7	58	28	36.6	128.7	13	4.0	307	73	41	203	51	158	70	14	172	41	12

의 사출각(take-off angle)과 방위각을 각각 i_s , ϕ 로 표현하면 SV, SH파의 radiation pattern은 식 (5), (6)과 같이 표현된다 (Aki and Richard, 1980).

$$SV = \sin\lambda \cos 2\delta \cos i_s \sin(\phi - \phi_s) - \cos\lambda \cos \delta \cos 2i_s \cos(\phi - \phi_s) \\ + \frac{1}{2} \cos\lambda \sin \delta \sin 2i_s \sin 2(\phi - \phi_s) \\ - \frac{1}{2} \sin\lambda \sin 2\delta \sin 2i_s (1 + \sin^2(\phi - \phi_s)), \quad (5)$$

$$SH = \cos\lambda \cos \delta \cos i_s \sin(\phi - \phi_s) + \cos\lambda \sin \delta \sin i_s \cos 2(\phi - \phi_s) \\ + \sin\lambda \cos 2\delta \sin 2i_s \cos(\phi - \phi_s) \\ - \frac{1}{2} \sin\lambda \sin 2\delta \sin 2i_s \sin 2(\phi - \phi_s), \quad (5)$$

식 (5), (6)을 Yoshimoto (2000)의 프로그램에 이식하면 바로 진원함수를 고려한 수치적 DSMC법이 되는 것이다.

자 료

원래 진앙거리 약 120 km에 백여 관측 자료(Fig. 2)가 필요한 MLTW 해석이므로 단층면해가 구해진 남한 미소지진 중에서 비슷한 단층면해를 나타내는 지진을 찾아서 복합단층면해의 개념(이기화, 정태웅, 1999)으로 하나의 지진으로 취급하여 해석하기로 하였다. 주향은 295 ± 18 , 경사는 69 ± 15 , 면진각은 51 ± 16 의 범위에 해당되는 단층면해를 진원구조가 같은 것으로 판단, Table 1에 제시된 바와 같이 여덟 개의 지진을

구하였다. 이 여덟 개 지진은 기상청과 한국지질자원연구원에서 운영하는 지진계에 기록된 것을 이용하였다.

이들 관측점에서 Table 1의 여덟 개 지진을 기록한 자료를 찾아내어 한반도에서 진원-관측점 경로 자료를 구하였다(Fig. 4). 이 여덟 개 지진이 27개 관측점에서 기록되어 모두 62 경로가 확보되었다.

Fig. 4. The 62 paths connecting 8 earthquakes (solid dots, Table 1) and 27 stations (triangles). The maps are plotted by GEOMAP package (Chung and Lees, 2008; Lees, 2008a) based on R software (R Development Core Team, 2006).

Fig. 5. MLTW Analysis (+; 1st window, Δ; 2nd window, ○; 3rd window). Observations (grey) are fitted with our modeling values (black with solid lines) for 5 frequency bands.

결 과

위 자료를 다중지연시간창법에 의해 도기한 결과가 Fig. 5이다. 기존 방법(Fig. 2)에 비해 분산이 비교적 적으나, 적은 자료로 인하여 세 에너지 곡선이 크게 불규칙하게 보인다. 이러한 불규칙한 곡선으로는 Fig. 3과 같은 완곡한 이론적인 곡선과 맞출 수 없다. 즉, 진원함수를 고려한 MLTW법은 같은 단층면해를 이용해야 한다는 제약으로 최소자승을 이용할 수 있는 자료 수가 제한되어 기존의 다량의 자료를 이용한 역산 방법이 불가능하다는 것이 확인되었다. 또한 단층면해 자체의 오차로 여겨지는 큰 분산 때문에 완곡한 이론곡선을 맞추는 것이 사실상 어려운 결과가 나왔다. 이를 해결하기 위해서는 좀 더 자료를 확보하든지 아니면 이론곡선에 대한 새로운 제약조건을 구하여야 할 것이다. 후자의 해결책을 위해 관측자료에서 이론치를 도출하는 과정을 면밀히 검토하여 역산에 대한 제약조건을 찾는 연구가 필요하다고 본다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 기상기술개발관리단의 “기상기술개발사업(CATER 2012-8010)”에 의한 것이며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 백진주, 경재복, 최호선, 2011, 최근 5년간 한반도 중서부 지역에서 발생한 지진의 진원특성 분석, *한국지구과학회지*, **32**, 161-169.
- 이기화, 정태웅, 1999, 1996년 양산단층 일대의 미소지진을 이용한 복합단층면해, *지구물리*, **2**, 235-240.
- 정태웅, 사토 하루오, 이기화, 2001, 한반도 남동부 지역 9 관측점 자료의 확장Coda규격화법에 의한 한반도남동부지역의 Q_p^{-1} 및 Q_s^{-1} 연구, *한국지구과학회지*, **22**, 500-511.
- 정태웅, 윤숙영, 2009, 다중지연시간창법(MLTW)의 한반도 지진자료 적용성 분석, *지구물리와 물리탐사*, **12**, 199-207.
- 정태웅, 이원상, 유승훈, 유현재, 조광현, 이상현, 윤숙영, 정순원, 이준희, 김선주, 2004, 한반도 지각의 감쇠구조 (Q-Structure) 연구, *한국원자력안전기술원 보고서*, KINS/HR-641, pp. 198.
- 정태웅, Lees, J. M., 2008, R 패키지를 이용한 토모그래피 지도 제작, *물리탐사*, **11**, 373-378.
- 정태웅, Lees, J. M., 윤숙영, 2008, R 을 이용한 지진자료처리, *물리탐사*, **11**, 378-384.
- Aki, K., 1969, Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, *Journal of Geophysical Research*, **74**, 615-631.
- Aki, K., 1980, Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Physics of the Earth Planetary Interior*, **21**, 50-60.
- Aki, K., and Chouet, B., 1975, Origin of coda waves; source, attenuation and scattering effects, *Journal of Geophysical Research*, **80**, 3322-3342.
- Aki, K., and Richards, P. G., 1980, *Quatitative Seismology*, W.H. Freeman and Cmpany, San Francisco,
- Cerveny, V., and Ravindra, R., 1971, *Theory of Seismic Head Waves*, Univ. of Toronto Press, Toronto, Ontario.
- Chung, T. W., and Sato, H., 2001, Attenuation of high-frequency *P*- and *S*-waves in the crust of the southeastern Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 1867-1874.
- Chung, T. W., Lees, J. M., Yoshimoto, K., Fujita, E., and Ukawa, M., 2009, Intrinsic and scattering attenuation of the Mt. Fuji region, Japan, *Geophysical Journal International*, **177**, 1366-1382.
- Chung, T. W., Noh, M. H., Kim, J. K., Park, Y. K., Yoo, H. J., and Lees, J. M., 2007, A Study of the Regional Variation of Low-Frequency Q_{Lg}^{-1} around the Korean Peninsula, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 512-520.
- Chung, T. W., Yoshimoto, K., and Yun, S., 2010, The Separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in South Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 3183-3193.
- Fehler, M., Hoshiba, M., Sato, H., and Obara, K., 1992, Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of *S*-wave energy versus hypocentral distance, *Geophysical Journal International*, **108**, 787-800.
- Hoshiba, M., 1991, Simulation of multiple-scattered coda wave excitation based on the energy conservation law, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **67**, 123-136.
- Hoshiba, M., 1993, Separation of scattering attenuation and intrinsic absorption in Japan using the multiple lapse time window analysis of full seismogram envelope, *Journal of Geophysical Research*, **98**, 15,809-15,824.
- Hoshiba, M., Sato, H., and Fehler, M., 1991, Numerical basis of the separation of scattering and intrinsic absorption from full seismogram envelope: a Monte-Carlo simulation of multiple isotropic scattering, *Paper of the Meteorolical Geophysics*, **42**, 65-91.
- Kampfmann, W., and Berckhemer, H., 1985, High temperature experiments on the elastic and anelastic behavior of magmatic rocks, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **40**, 223-247.
- Kim, K. D., Chung, T. W., and Kyung, J. B., 2004, Attenuation of high-frequency *P* and *S* waves in the crust of Choongchung provinces, central south Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 1070-1078.
- Lees, J. M., 2008a, GEOMap: topographic and geographic mapping, <http://www.r-project.org>
- Lees, J. M., 2008b, RSEIS: time series seismic analysis tools, <http://www.r-project.org>
- Park, J.-C., Kim, W., Chung, T.W. Baag, C.-E., and Ree, J.-H., 2007, Focal mechanism of recent earthquakes in the Southern Korean Peninsula, *Geophysical Journal International*, **169**, 1103-1114.
- R Development Core Team, 2006, R: A language and

- environment for statistical computing, edited by R.F.F.S. Computing, Vienna, Austria.
- Sato, H., 1993, Energy transportation in one- and two-dimensional scattering media; analytic solutions of the multiple isotropic scattering model, *Geophysical Journal International*, **112**, 141-146.
- Sato, H., and Fehler, M. C., 1998, *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*, Springer-Verlag New York, Inc. 308 pp.
- Stocker, R. L., and Gordon, R. B., 1975, Velocity and internal friction in partial melts, *Journal of Geophysical Research*, **80**, 4828-4836.
- Yoshimoto, K., 2000, Monte Carlo simulation of seismogram envelopes in scattering media, *Journal of the Geophysical Research*, **105**, 6153-6161.
- Zeng, Y., Su, F., and Aki, K., 1991, Scattering wave energy propagation in a random isotropic scattering medium; 1, Theory, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 607-619.