

한반도 남동부지역 코다 Q 의 비교 분석

정태웅^{1*} · 최수현²

¹세종대학교 에너지자원공학과

²순천향대학교 환경보건학과

Comparative Study on Coda Attenuation of the Southeastern Korean Peninsula

Tae Woong Chung^{1*} and Soo-Hyun Choi²

¹Department of Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University

²Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

요 약: 한반도 남동부지역 지진자료의 고유감쇠(Q_i^{-1})와 산란감쇠(Q_s^{-1})값을 바탕으로 다중산란모델에 의한 이론코다감쇠값(Q_{Cexp}^{-1})을 구하고 단일산란 모델의 관측 코다감쇠값(Q_C^{-1}) 및 고유 및 산란 감쇠상수 값(Q_i^{-1} , Q_s^{-1})과 비교하였다. 그 결과, Q_{Cexp}^{-1} 값은 Q_i^{-1} 값에 근접한 전형적인 모습이나, Q_C^{-1} 값이 고주파수 대역을 제외한 대부분의 구간에서 Q_{Cexp}^{-1} 값과 상이한 것으로 나타났다. 향후 이러한 연구는 깊이에 따라 변화하는 감쇠값을 고려하여 진행되어야 할 것이다.

주요어: 한반도 남동부, Q_i^{-1} , Q_s^{-1} , 다중산란모델, Q_{Cexp}^{-1} , Q_C^{-1}

Abstract: Based on intrinsic and scattering quality factor (Q_i^{-1} and Q_s^{-1}) obtained from the seismic data of the southeastern Korean Peninsula, the expected coda quality factor (Q_{Cexp}^{-1}) was theoretically calculated using multiple scattering model, and was compared with other quality factors such as Q_i^{-1} , Q_s^{-1} , and observed Q_C^{-1} obtained by single scattering model. While the Q_{Cexp}^{-1} values are typically comparable to the Q_i^{-1} values, the Q_C^{-1} values are different from the Q_{Cexp}^{-1} values except for the higher frequency. Future works require to consider depth-dependent attenuation.

Keywords: southeastern Korean Peninsula, Q_i^{-1} , Q_s^{-1} , multiple scattering model, Q_{Cexp}^{-1} , Q_C^{-1}

서 론

일본에서 발생한 토호쿠 쓰나미 지진 등 최근에 한반도 주변 국가에서 피해 지진이 늘어나 우리나라 지진피해 발생가능성에 대한 주의가 환기되고 있다. 지진은 진원에서 멀수록 기하학적 감쇠 (geometrical spreading) 및 전파매질에 의한 감쇠로 급격히 진동 에너지가 감쇠되는데, 전파매질에 의한 지진동의 감쇠는 각 관측점에서 지진파 진폭의 변화를 측정하여 감쇠상수 Q^{-1} 값으로 나타낸다. Q^{-1} 값은 건축물의 내진설계에 있어서 지반의 진동을 정량적으로 예측하기 위해 필수적인 정보로 한반도에서는 세계의 지진 안정지역에 해당하는 낮은 값이 보고되었으나(e.g. Chung and Sato, 2001; Chung & Lee, 2003), 한반도 남동부 지역에 대해서는 비교적 높은 값이 보고

되고 있다(e.g. Hong, 2010; Chung & Yoshimoto, 2011).

감쇠상수 Q^{-1} 는 고유감쇠 (Q_i^{-1}) 와 산란감쇠 (Q_s^{-1})가 합하여진 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} 가 부분용융에 민감하다는 사실에 착안하여 Chung *et al.* (2009)은 후지산의 마그마 활동을 조사한 바 있다.

산란이론에 근거한 한반도 지각의 감쇠구조 연구는 주로 코다 Q^{-1} (Q_C^{-1}) 측정을 통하여 이루어졌는데(e.g. 정 외, 2004; Yun *et al.*, 2007), 이는 S파가 진원에서 지각의 불균질한 지각 매질, 즉 산란체에 한번만 산란되어 관측점에 이르게 된다는 단일산란모델을 바탕으로 하였다(e.g. Aki, 1969; Aki and Chouet, 1975). 이러한 단순한 가정의 단일산란모델로는 이론적으로 Q_i^{-1} 와 Q_s^{-1} 를 분리해 낼 수가 없었는데, 1990년대 초에 이르러 두 감쇠값의 분리가 가능한 다중산란모델이 수치적인 방법(Hoshiya, 1991)과 해석적인 방법(Zeng *et al.*, 1991; Sato, 1993)으로 제시되었다. 다중산란모델은 Q_i^{-1} 값은 S파 직접파와 코다파의 진폭을 감쇠시키고, Q_s^{-1} 는 S파 직접파는 감쇠시키는 반면 코다파는 증폭시키게 된다는 점에 착안하여

2011년 6월 27일 접수; 2011년 7월 13일 수정; 2011년 7월 14일 채택
*Corresponding author

E-mail: chungtw@sejong.ac.kr

Address: Department of Energy & Mineral Resources Engineering,
Sejong University, Kunja-dong 98, Kwangjin-gu, Seoul
143-747, Korea

Q_i^{-1} 값과 Q_s^{-1} 값을 분리한다.

아울러 Hoshiba (1993)는 다중산란모델에서 구하여진 Q_i^{-1} 값과 Q_s^{-1} 값을 이용하여 이론적인 $Q_c^{-1}(Q_{Cexp}^{-1})$ 값을 구하여 단 일산란 모델과 비교하는 방법을 제시하였는데, 이 방법은 그 이후 세계 각 지역에 대하여 수행된 감쇠값 분리조사 연구에 빈번히 활용되었으며 분리된 감쇠값에 대한 신뢰성을 검증하는 유력한 수단이다(e.g. Chung *et al.*, 2009). Mayeda *et al.* (1992)은 Q_s^{-1} 가 Q_i^{-1} 보다 큰, 산란체가 많이 분포하는 하와이 화산 지역에서 Q_c^{-1} 값이 Q_s^{-1} 값에 가깝고 이론적인 Q_{Cexp}^{-1} 값과 관측된 Q_c^{-1} 값 차이가 큰 사실을 보고한 반면, Bianco (2002)는 Q_i^{-1} 가 Q_s^{-1} 보다 현저히 큰, 비교적 균질한 지각구조 지역에서 관측된 Q_c^{-1} 와 이론적인 Q_{Cexp}^{-1} 값이 모두 Q_i^{-1} 값에 근접한 결과를 얻었다. 정(2009)은 한반도의 감쇠상수에 대한 Q_i^{-1} , Q_s^{-1} 의 분리값(정과 윤, 2009)에 대하여 Q_i^{-1} 값에 근접한 전형적인 Q_{Cexp}^{-1} 값을 구하였는데, Q_c^{-1} 값(Yun *et al.*, 2007)은 이 24 Hz 고주파수 대역을 제외한 대부분의 구간에서 Q_i^{-1} 보다는 Q_i^{-1} 에 가깝고 Q_{Cexp}^{-1} 값과도 상이한 것으로 나타났다.

최근 정(2011)은 한반도 남동부 지역에 대하여 정과 윤 (2009)이 남한에 대하여 행한 동일한 방법으로 Q_i^{-1} 값과 Q_s^{-1} 값을 분리하여 이 지역의 Q^{-1} 값이 한반도 타지역에 비해 높은 값이 도출되어, 지진활동도와와의 상관성이 시사되었다. 이 연구에서는 정(2011)이 분리한 한반도 남동부지역의 Q_i^{-1} 값과 Q_s^{-1} 값을 바탕으로 Hoshiba (1993)의 방법으로 이론 Q_{Cexp}^{-1} 값을 구하고 Yun *et al.* (2007)이 구한 단일산란 모델의 Q_c^{-1} 값 및 Q_i^{-1} , Q_s^{-1} 값과의 비교를 행하도록 한다.

다중산란모델에 의한 이론 코드 Q

Hoshiba (1991)는 다중산란 모델에서 산란파(즉, 코드파)에 의한 거리 r , 시간 t 에서의 에너지 밀도 $E_s(r, t)$ 로 정의하고 에너지 보존법칙을 식 (1)과 같이 소개하였다.

$$W_0 = W_0 \exp(-\eta_s vt) + \int_0^t E_s(r, t) 4\pi r^2 dr \quad (1)$$

여기서 W_0 는 진원에서 방사되는 에너지이며, η_s 는 산란감쇠계수, v 는 주어진 매질에서의 지진파 전달 속도이다.

산란 및 고유감쇠상수와 산란 및 고유감쇠계수의 관계는 각각 $Q_s^{-1} = \eta_s v/w$, $Q_i^{-1} = \eta_i v/w$ 로 w 는 각속도이다. $\eta_s vt$ 는 평균 자유행로(mean free path)를 의미하며, 단일산란모델은 $\eta_s vt \ll 1$ 으로 산란이 매우 약한 것을 의미(Born approximation)하며, $\eta_s vt \gg 1$ 인 경우는 산란이 매우 강해서 분산모델(Diffusion model)로 정의되며, 지진파 에너지는 분산의 형태로 산란된다고 가정한다(e.g. Aki and Chouet, 1975). 다중산란모델은 이 분산모델과 단일산란모델의 중간 정도의 산란을 일으키는 것으로 가정되어 $\eta_s vt \leq 3$ 정도로 정의된다.

다중산란모델의 진원에서의 에너지밀도 함수는 $\eta_s vt$ 의 급수로 식 (2)와 같이 표현되고 있다(Gao *et al.*, 1983; Sato, 1988).

Table 1. The values of C_n (Hoshiba, 1991).

n	C_n		
2	1.22	±	0.025
3	0.71	±	0.043
4	0.26	±	0.013
5	7.3×10^{-2}	±	2.8×10^{-3}
6	1.5×10^{-2}	±	9.0×10^{-4}
7	2.8×10^{-3}	±	2.4×10^{-4}
8	4.3×10^{-4}	±	3.7×10^{-5}
9	5.5×10^{-5}	±	4.4×10^{-6}
10	6.2×10^{-6}	±	6.4×10^{-7}

$$E_s(0, t) = \frac{\eta_s W_0}{2\pi v^2 t} [1 + C_2(\eta_s vt) + C_3(\eta_s vt)^2 + C_4(\eta_s vt)^3 + \dots] \times \exp(-\eta_s vt) \quad (2)$$

여기서 C_n 은 n 차 산란계수이며, Hoshiba (1991)는 10차까지 소개하였다(Table 1). 관측점이 진원에 가까울 때 Q_c^{-1} 는 다음 식으로 표현할 수 있다(e.g. del Pezzo *et al.*, 1987).

$$Q_c^{-1} = -\frac{1}{w} \frac{d}{dt} \log[t^2 E_s(0, t)] \quad (3)$$

식 (3)에서 구해지는 Q_c^{-1} 를 앞서 언급한 바와 같이 이론적인 값(Q_{Cexp}^{-1})으로 정의하고 식 (2)를 식 (3)에 대입하면 다중산란 모델의 값

$$Q_{Cexp}^{-1} = \frac{1}{w} \left[\eta_s v - \frac{\eta_s v (C_2 + 2C_3 \eta_s vt + 3C_4 (\eta_s vt)^2 + \dots)}{1 + C_2 (\eta_s vt) + C_3 (\eta_s vt)^2 + C_4 (\eta_s vt)^3 + \dots} \right] \quad (4)$$

이 도출된다. 여기서 고유감쇠의 영향을 고려할 경우, 식 (4)에 고유감쇠항 Q_i^{-1} 을 추가하지만 하면 된다(Dainty, 1981). 즉, 다중산란모델 (4)식에서 $Q_s^{-1} = \eta_s v/w$ 를 적용하고, Q_i^{-1} 항을 더하여 Q_{Cexp}^{-1} 를 구하는 식 (5)가 완성된다(Hoshiba, 1993).

$$Q_{Cexp}^{-1} = Q_s^{-1} \left[1 - \frac{C_2 + 2C_3 \eta_s vt + 3C_4 (\eta_s vt)^2 + \dots}{1 + C_2 \eta_s vt + C_3 (\eta_s vt)^2 + \dots} \right] + Q_i^{-1} \quad (5)$$

Sato and Fehler (1998)는 에너지 전파 이론상 Q_{Cexp}^{-1} 가 매우 Q_i^{-1} 값에 가까울 것이라 하였다.

자료 분석 및 결과

정(2011)은 기상청(KMA)과 한국지질자원연구원(KIGAM)의 49 관측소에서 기록된 규모 1.4에서 4.8에 이르는 412 지진의 상하동 성분 759 자료를 이용하여 한반도 남동부지방의 Q_i^{-1} 값과 Q_s^{-1} 값(Table 2)을 분리 하였다. 한편, Yun *et al.* (2007)은 Q_c^{-1} 값을 단일산란 모델을 가정하여 지역에 따라 변화하는 모습을 도시하였다. 지역에 따라 변화하는 Q_c^{-1} 값은 한반도 남동부 지역 일부에서 대단히 높은 양상을 보였는데, 정

Table 2. Intrinsic and scattering attenuation coefficients (η_i and η_s), and quality factors obtained by Chung (2011) for the southeastern Korea.

Freq. Band (Hz)	η_i (km^{-1})		η_s (km^{-1})		Q_i^{-1} ($\times 10^{-3}$)		Q_s^{-1} ($\times 10^{-3}$)					
1 - 2	0.013	+	0.003	0.010	+	0.003	4.97	+	1.15	3.71	+	1.11
		-	0.004		-	0.003		-	1.53		-	1.11
2 - 4	0.010	+	0.002	0.004	+	0.001	1.91	+	0.38	0.74	+	0.19
		-	0.002		-	-		-	0.38		-	-
4 - 8	0.014	+	0.002	0.006	+	0.001	1.34	+	0.19	0.56	+	0.09
		-	0.002		-	0.001		-	0.19		-	0.09
8 - 16	0.021	+	0.002	0.011	+	0.002	1.00	+	0.10	0.51	+	0.09
		-	0.002		-	0.002		-	0.10		-	0.09
16 - 32	0.027	+	0.002	0.020	+	0.003	0.64	+	0.05	0.46	+	0.07
		-	0.002		-	0.004		-	0.05		-	0.09

Table 3. Observed Q_c^{-1} obtained by Yun *et al.* (2007), and theoretical Q_c^{-1} (Q_{Cexp}^{-1}) for the southeastern Korea.

Freq. Band (Hz)	Q_c^{-1} ($\times 10^{-3}$)	Q_{Cexp}^{-1} ($\times 10^{-3}$)
1 - 2	7.7	4.4
2 - 4	4.0	1.7
4 - 8	2.0	1.2
8 - 16	1.1	0.9
16 - 32	0.8	0.6

(2011)이 해석한 남동부의 광범위한 지역 평균적인 값은 한반도 전체의 값과는 그리 큰 차이를 보이지 않았다(Table 3 및 Fig. 1). Table 3에는 정(2011)이 분리한 Q_i^{-1} 값과 Q_s^{-1} 값(Table 2)을 바탕으로 Hoshiya (1993)의 방법으로 도출한 Q_{Cexp}^{-1} 값을 아울러 표기하였다. Table 3의 η_s (km^{-1})는 0.004에서 0.02 범위의 값이고, S파가 속도 = 3.5 km/s이므로 시간 t는 80 km 전파시간 약 23초일때 $\eta_s t$ 값이 0.3에서 1.6 정도로 다중산란 범위에 해당된다.

Fig. 1은 관측 및 이론 Q_{Cexp}^{-1} 값, 그리고 Q_i^{-1} 와 Q_s^{-1} 값을 한곳에 도시하여 남한지역 전체값(정과 윤, 2009; Yun *et al.*, 2007)과 비교한 그림이다. 한반도 남동부 지역은 남한 전체에 비하여 Q_i^{-1} 와 Q_s^{-1} 값이 커서 Q_{Cexp}^{-1} 값이 큰 반면, Q_c^{-1} 값은 고주파 부근을 제외하고 비슷한 양상이다. 남한 전체지역과 남동부 지역 공히 이론적인 Q_c^{-1} 값이 Q_i^{-1} 값에 근접한 전형적인 모습이나, 이론적인 Q_{Cexp}^{-1} 값과 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 남부 알래스카(Dutta *et al.*, 2004), 하와이 제도(Mayeda, 1992), 북동부 이탈리아 산악지역(Bianco, 2005) 등의 지역에서도 보고된 바 있다. 반면, 일본 열도(Hoshiya, 1993)와 이탈리아 남부아펜니노산맥 지역(Bianco *et al.*, 2002)은 Q_c^{-1} 값이 Q_i^{-1} 값에 가까울 뿐 아니라 Q_{Cexp}^{-1} 값과도 잘 일치하는 결과가 보고되었다. 한편, 남부이탈리아와 시칠리아섬 사이의 해협지역에서는 Q_c^{-1} 값이 Q_i^{-1} 값에 1~6 Hz 대역에서 근접하다가 12 Hz에서 Q_i^{-1} 와 Q_s^{-1} 값의 합(Q_i^{-1})에 가까워졌으며(Tuv *et al.*, 2006), 남부스페인 지역은 Q_c^{-1} 값이

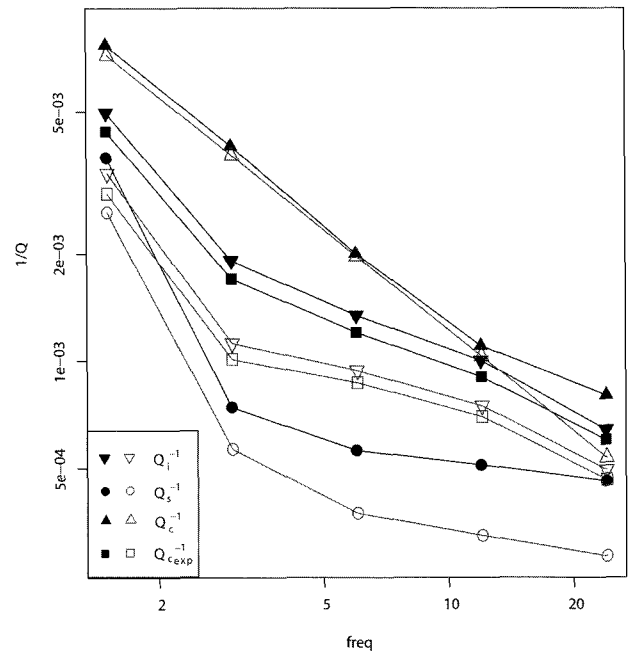


Fig. 1. Comparison of Q^{-1} results of this study-southeastern Korea (solid symbols) and the previous one - the South Korea (open symbols) by Chung and Yun (2009).

Q_i^{-1} 값에 근접하다 10 Hz를 넘어서면서 Q_i^{-1} 값에 가까워졌다 (Akinci *et al.*, 1995).

이러한 관측 결과들은 Q_i^{-1} 와 Q_s^{-1} 값이 실제로는 깊이에 따라 변하는 값임에도 불구하고 균일한 모델을 이용한 왜곡된 결과로 설명되어 왔다(예, Bianco, 2005). 깊이에 따라 Q^{-1} 값이 변한다는 것은 깊은 곳의 Q^{-1} 값이 낮다는 것을 의미한다. 코다파 외에 Lg파(Hong *et al.*, 2010), P파와 S파(Kim *et al.*, 2006) 등이 한반도 남동부 지역에서 타지역에 비해 높은 Q^{-1} 값이 관찰된 바 있다. 그런데, 긴 관측선에 의한 해석에서는 타 지역과 비슷한 낮은 Q^{-1} 값(예; Chung and Sato, 2001; Kim *et al.*, 2004; Chung *et al.*, 2007)이 도출되어, 깊이에 따른 Q^{-1} 값 변화가 적지 않음을 시사하였다.

따라서 향후 한반도에서의 연구는 깊이에 따라 변화하는 감

쇠값을 고려하여 진행되어야 할 것이다. Chung *et al.* (2010)은 정과 윤(2009)이 사용한 균일한 모델 대신, 깊이에 따라 속도가 변하는 층상구조에 대하여 수치계산 방법으로 접근한 모델(Yoshimoto, 2000)을 통해 Q^{-1} 값, 특히 Q_s^{-1} 값이 낮아지는 현상을 확인한 바 있다.

사 사

본 연구 수행 및 원고작성에 2011년도 기상지진기술개발사업(CATER 2006-5104)의 지원이 있었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 정태웅, 2009, 한반도 코다 Q의 비교분석, 지구물리와 물리탐사, **12**, 263-267.
- 정태웅, 2011, 한반도남동부지역의 해석적방법에 의한 다중산란 모델 연구, 지구물리와 물리탐사, 심사중.
- 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, 윤숙영, 2009, 다중지연시간차법(MLTW)의 한반도 지진자료 적용성 분석, 지구물리와 물리탐사, **12**, 199-207.
- Aki, K., 1969, Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, *Journal of Geophysical Research*, **74**, 615-631.
- Aki, K., and Chouet, B., 1975, Origin of coda waves; source, attenuation and scattering effects, *Journal of Geophysical Research*, **80**, 3322-3342.
- Akinci, A., Del Pezzo, E., and Ibanez, J. M., 1995, Separation of scattering and intrinsic attenuation in southern Spain and Western Anatolia (Turkey), *Geophysical Journal International*, **121**, 337-353.
- Bianco, F., Del Pezzo, E., Akinci, A., Di Luccio, F., Malagnini, L., and Anonymous, 2002, Depth dependent intrinsic and scattering attenuation in the lithospheric structure of the Friuli region, Italy, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, **83**, 990.
- Bianco, F., Del Pezzo, E., Malagnini, L., Di Luccio, F., and Akinci, A., 2005, Separation of depth-dependent intrinsic and scattering seismic attenuation in the northeastern sector of the Italian Peninsula, *Geophysical Journal International*, **161**, 130-142.
- Chung, T. W., and Lee, K., 2003, A study of high-frequency Q_{Lg}^{-1} in the crust of south Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, 1401-1406.
- 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., 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., and Yoshimoto, K., 2011, Velocity structure-based separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in southeastern Korea, *Tectonophysics*, in submitted.
- 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.
- Dainty, A. M., 1981, Scattering model to explain seismic Q observations in the lithosphere between 1 and 30 Hz, *Geophysical Research Letter*, **8**, 1126-1128.
- Dutta, U., Biswas, N. N., Adams, D. A., and Papageorgiou, A., 2004, Analysis of S-wave attenuation in South-Central Alaska, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 16-28.
- del Pezzo, E., Gresta, S. Patante, D., and Scarcella, G., 1987, Attenuation of short period seismic waves at Etna as compared to other volcanic areas, *Pure and Applied Geophysics*, **125**, 1039-1050.
- Gao, L. S., Biswas, N. N., Lee, L. C., and Aki, K., 1983, Effects of multiple scattering on coda waves in three dimensional medium. *Pure and Applied Geophysics*, **121**, 3-15.
- Hong, T.-K., 2010, L_g Attenuation in a region with both continental and oceanic environments, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 851-858.
- Hoshiaba, 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.
- Hoshiaba, 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**, 15809-15824.
- Hong, T. K., 2010, L_g Attenuation in a region with both continental and oceanic environments, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 851-858.
- 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.
- Kim, S. K., Yang, J. Y., and Oh, J., 2006, Q-values for P and S waves in the southern Korean Peninsula based on the coda-normalization method, *Geosciences Journal*, **10**, 465-477.
- Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshiaba, M., Aki, K., and Zeng, Y., 1992, A comparative study of scattering, intrinsic, and coda - 1 Q for Hawaii, Long Valley, and central California between 1.5 and 15.0 Hz, *Journal of Geophysical Research*, **97**, 6643-6659.
- Sato, H., 1988, Is the single scattering model invalid for the coda excitation at long lapse time?, *Pure and Applied Geophysics*, **128**, 43-47.
- 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.
- Tuvè, T., Bianco, F., Ibáñez, J., Patanè, D., Del Pezzo, E., and Bottari, A., 2006, Attenuation study in the straits of Messina area (southern Italy), *Tectonophysics*, **421**, 173-185.
- Yoshimoto, K., 2000, Monte Carlo simulation of seismogram envelopes in scattering media, *Journal of the Geophysical Research*, **105**, 6153-6161.
- Yun, S., Lee, W. S., Lee, K., and Noh, M. H., 2007, Spatial Distribution of Coda Q in South Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 1012-1018.
- 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.