

## 한반도 코다 $Q$ 의 비교 분석

정태웅\*

세종대학교 지구환경과학과

### Comparative Study on Coda Attenuation of the Korean Peninsula

Tae Woong Chung\*

Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University

**요약:** 한반도 지진자료의 총 감쇠상수( $Q_i^{-1}$ )를 고유감쇠( $Q_i^{-1}$ )와 산란감쇠( $Q_s^{-1}$ )값으로 분리된 결과를 바탕으로 다중산란 모델에 의한 이론코다감쇠( $Q_{Cexp}^{-1}$ )값을 구하고 단일산란 모델의 관측코다감쇠( $Q_C^{-1}$ )값 및 나머지 감쇠상수 값( $Q_i^{-1}$ ,  $Q_s^{-1}$ )과 비교하였다. 그 결과,  $Q_{Cexp}^{-1}$  값은  $Q_i^{-1}$  값에 근접한 모습이나,  $Q_C^{-1}$  값이 24 Hz 고주파수 대역을 제외한 대부분의 구간에서  $Q_i^{-1}$ 보다는  $Q_i^{-1}$ 에 가깝고  $Q_{Cexp}^{-1}$  값과도 상이한 것으로 나타났다. 이러한 결과는  $Q_i^{-1}$ 와  $Q_s^{-1}$  값이 실제로는 깊이에 따라 변하는 값임에도 불구하고 균일한 모델을 이용한 왜곡된 결과이다.

**주요어:** 한반도,  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_s^{-1}$ , 다중산란모델,  $Q_{Cexp}^{-1}$ , 단일산란 모델,  $Q_C^{-1}$

**Abstract:** Recently intrinsic and scattering quality factor ( $Q_i^{-1}$  and  $Q_s^{-1}$ ) was successfully separated from total quality factor ( $Q_i^{-1}$ ) on the seismic data of the Korean Peninsula. From this result, we theoretically calculated the expected coda quality factor ( $Q_{Cexp}^{-1}$ ) based on multiple scattering model, and compared with other quality factors such as  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_s^{-1}$ , and observed coda quality factor ( $Q_C^{-1}$ ) obtained by single scattering model. While the  $Q_{Cexp}^{-1}$  values are comparable to the  $Q_i^{-1}$  values, the  $Q_C^{-1}$  values are close to the values of  $Q_i^{-1}$  rather than  $Q_i^{-1}$  and  $Q_{Cexp}^{-1}$  except for the 24 Hz frequency. This results suggest that the assumption of uniform scatterer in the Korean Peninsula is unrealistic.

**Key words:** Korean Peninsula,  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_i^{-1}$ ,  $Q_s^{-1}$ , multiple scattering model,  $Q_{Cexp}^{-1}$ , single scattering model,  $Q_C^{-1}$

## 서론

21세기 들어 최대의 지진피해를 기록한 쓰촨 지진이 이웃 중국에서 발생한 이래 한반도에서도 지진피해 발생가능성에 대한 주의가 환기되고 있다. 진원 가까이에서 큰 피해를 일으키는 지진은 진원에서 멀수록 기하학적 감쇠(geometrical spreading) 및 전파매질에 의한 감쇠로 급격히 진동 에너지가 감쇠되어 피해가 경감되는데, 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 보고되었다(예; Chung and Sato, 2001; Chung *et al.*, 2007).

감쇠상수  $Q^{-1}$ 는 고유감쇠 ( $Q_i^{-1}$ )와 산란감쇠 ( $Q_s^{-1}$ )가 합하여

진 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.  $Q_i^{-1}$ 는 부분용융에 민감한 것으로 실험에 의해 보고되었으며(e.g. Stocker and Gordon, 1975; Kampfmann and Berckhemer, 1985), 이를 바탕으로 화산 지역의 마그마를 탐색하기 위해 고유감쇠값을 조사하는 연구가 행하여진 바 있다(e.g. Chung *et al.*, 2009).

산란이론에 근거한 한반도 지각의 감쇠구조 연구는 주로 코다  $Q^{-1}$ ( $Q_C^{-1}$ ) 측정을 통하여 이루어졌는데(e.g. 정태웅 외, 2004; Yun *et al.*, 2007), 이는  $S$ 파가 진원에서 지각의 불균질한 지각매질, 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(Hoshiba, 1991)과 해석적인 방법(Zeng *et al.*, 1991; Sato, 1993)으로 제시되었다. 다중산란모델은  $Q_i^{-1}$  값은  $S$ 파 직접파와 코다파의 진폭을 감쇠시키고,  $Q_s^{-1}$ 는  $S$ 파 직접파는 감쇠시키는 반면 코다파는 증폭시키게 된다는 점에 착안하여

2009년 8월 13일 접수; 2008년 8월 24일 채택

\*Corresponding author

E-mail: chungtw@sejong.ac.kr

Address: Department of Earth & Environmental Sciences,  
Sejong University, Kunja-dong98 Kwangjin-ku,  
Seoul, 143-747, Korea

**Table 1.** Intrinsic and scattering attenuation coefficients ( $\eta_i$  and  $\eta_s$ ), and quality factors obtained by Chung and Yun (2009).

Freq. Band (Hz)	$\eta_i$ (km <sup>-1</sup> )	$\eta_s$ (km <sup>-1</sup> )	$Q_i^{-1}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$Q_s^{-1}$ ( $\times 10^{-3}$ )
1 - 2	0.009 + 0.008 - 0.007	0.007 + 0.007 - 0.003	3.34 + 2.97 - 2.60	2.60 + 2.60 - 1.11
2 - 4	0.006 + 0.005 - 0.004	0.003 + 0.002 - 0.001	1.11 + 0.92 - 0.74	0.56 + 0.37 - 0.19
4 - 8	0.010 + 0.006 - 0.006	0.004 + 0.003 - 0.001	0.93 + 0.56 - 0.56	0.37 + 0.28 - 0.09
8 - 16	0.016 + 0.007 - 0.008	0.007 + 0.006 - 0.003	0.74 + 0.32 - 0.37	0.32 + 0.28 - 0.14
16 - 32	0.021 + 0.008 - 0.009	0.012 + 0.009 - 0.005	0.49 + 0.19 - 0.21	0.28 + 0.21 - 0.12

$Q_i^{-1}$  값과  $Q_s^{-1}$  값을 분리한다. 아울러 Hoshiba (1993)는 다중산란모델에서 구하여진  $Q_i^{-1}$  값과  $Q_s^{-1}$  값을 이용하여 이론적인  $Q_C^{-1}$  값을 구하여 단일산란 모델과 비교하는 방법을 제시하였는데, 이 방법은 그 이후 세계 각 지역에 대하여 수행된 감쇠값 분리조사 연구에 빈번히 활용되었으며, 분리된 감쇠값에 대한 신뢰성을 검증하는 유효한 수단이다(e.g. Chung *et al.*, 2009).

최근 한반도 자료에 대하여 정태웅, 윤숙영(2009)은 감쇠상수에 대한  $Q_i^{-1}$  값과  $Q_s^{-1}$  값의 분리를 성공적으로 수행하였다(Table 1). 그러나, 이 값을 바탕으로 한 이론적인  $Q_C^{-1}$  값이 구해지지 않아, 단일산란 모델에 의한  $Q_C^{-1}$  값과의 비교가 행해지지 않았다. 이론적인  $Q_{Cexp}^{-1}$  값을 구하여 단일 산란모델을 가정하여 추정된  $Q_C^{-1}$ , 분리된  $Q_i^{-1}$  및  $Q_s^{-1}$  값들과 비교를 행하는 것은 분리된 값의 신뢰도를 판단하는데 매우 중요하다. 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. 이 연구에서는 정태웅·윤숙영(2009)이 분리한  $Q_i^{-1}$  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 코다Q

Hoshiba (1991)는 다중산란 모델에서 산란파(즉, 코다파)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,  $\eta_s$ 는 산란감쇠계수,  $v$ 는 주어진 매질에서의 지진파 전달 속도이다. 식 (1)의 첫 번째 항은 직접파가 산란에 의해 감쇠되는 것을 의미하며  $W_d$ 로 정의한다. 두 번째 항은 산란파의 체적적분으로  $W_s$ 로 정의하기로 한다.

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.

$E_{sn}(r, t)$ 을  $n$ 차 산란파로 정의하여 식 (2)를 도입한다.

$$E_s(r, t) = E_{s1}(r, t) + E_{s2}(r, t) + E_{s3}(r, t) + \dots \quad (2)$$

그러면  $n$ 차 산란파의 총에너지는  $W_{sn} = \int_0^t E_{sn}(r, t) 4\pi r^2 dr$ 으로 정의된다.

식 (2)를 적분하면  $W_s = W_{s1}(t) + W_{s2}(t) + W_{s3}(t) + \dots$ 로  $W_s$ 는 코다파의 총에너지가 됨은 식 (1)의 두 번째 항에서 정의한 바와 같다. 이 식의 각  $W_{sn}$ 을  $\eta_s t$ 의 급수항과 지수항의 곱으로 나타내면

$$W_{sn}(t) = W_0 A_n (\eta_s vt)^n \exp(-\eta_s vt) \quad (3)$$

으로 나타내고  $A_n$ 을 구하도록 한다. Sato (1977)는  $n=1$ 에서  $A_1=1$ 임을 계산하였다. 식 (1)을 간단히 나타낸 에너지 보존법칙

$$W_0 = W_d(t) + W_s(t) \quad (4)$$

에 식 (3)을 대입하고 식 (1)의  $W_d = W_0 \exp(-\eta_s t)$ 임을 상기하면

$$W_0 = W_0 [1 + \eta_s vt + A_2 (\eta_s vt)^2 + A_3 (\eta_s vt)^3 + \dots] \times \exp(\eta_s vt) \quad (5)$$

인데, 식 (5)가 성립하려면  $A_n = 1/n!$  임이 자명하다. 한편 진원에서의 에너지밀도 고차항  $E_{sn}(0, t)$ 를  $\eta_s vt$ 의 급수로 식 (6)과 같이 표현되고 있다(Gao *et al.*, 1983; Sato, 1988).

$$E_{sn}(0, t) = C_n \frac{\eta_s W_0}{2\pi v^2 t^2} (\eta_s vt)^{n-1} \exp(\eta_s vt) \quad (6)$$

여기서  $C_n$ 은  $n$ 차 산란계수이며, Hoshiba (1991)는 10차까지 Table 2와 같이 계산하였다. 다중산란모델의 진원에서의 에너지밀도 함수는 식 (2)와 식 (6)으로 표현되고 있으며, 단일산란모델은  $\eta_s vt \ll 1$ 에서 (7-1)과 같이 정리되며,

$$E_s(0, t) = \frac{\eta_s W_0}{2\pi v^2 t^2} \exp(-\eta_s vt) \quad (7-1)$$

**Table 2.** 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 <sup>-2</sup> ± 2.8×10 <sup>-3</sup>
6	1.5×10 <sup>-2</sup> ± 9.0×10 <sup>-4</sup>
7	2.8×10 <sup>-3</sup> ± 2.4×10 <sup>-4</sup>
8	4.3×10 <sup>-4</sup> ± 3.7×10 <sup>-5</sup>
9	5.5×10 <sup>-5</sup> ± 4.4×10 <sup>-6</sup>
10	6.2×10 <sup>-6</sup> ± 6.4×10 <sup>-7</sup>

다중산란모델은  $\eta_s vt \leq 3$ 에서 (7-2)와 같이 정리된다.

$$E_s(0,t) = \frac{\eta_s W_0}{2\pi v^2 t} [1 + C_2(\eta_s vt) + C_3(\eta_s vt)^2 + C_4(\eta_s vt)^3 + \dots] \times \exp(-\eta_s vt) \quad (7-2)$$

관측점이 진원에 가까울 때  $Q_c^{-1}$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다(e.g. Del Pezzo *et al.*, 1987).

$$Q_c^{-1} = -\frac{1}{w} \frac{d}{dt} \log[t^2 E_s(0,t)] \quad (8)$$

식 (8)에서 구해지는  $Q_c^{-1}$ 를 앞서 언급한 바와 같이 이론적인 값( $Q_{Cexp}^{-1}$ )으로 정의하고 식 (7-1)을 식 (8)에 대입하면 단일산란모델의 값

$$Q_{Cexp}^{-1} = \frac{\eta_s v}{w} \quad (9-1)$$

가 도출되고, 식 (7-2)를 식 (8)에 대입하면 다중산란모델의 값

$$Q_{Cexp}^{-1} = \frac{1}{w} \left[ \eta_s v - \frac{\eta_s v (C_2 + 2C_3 \eta_s vt + 3C_4 (\eta_s vt)^2 + \dots)}{1 + C_2 (\eta_s vt) + C_3 (\eta_s vt)^2 + C_4 (\eta_s vt)^3 + \dots} \right] \quad (9-2)$$

이 도출된다.

식 (1)에서 (9-2)까지 고유감쇠의 영향을 고려하지 않고 전개하였는데, 고유감쇠를 고려할 경우, (9-1), (9-2)에 고유감쇠항  $Q_i^{-1}$ 을 추가하기만 하면 된다(Hoshiba, 1991). 즉, 다중산란모델 (9-2)식에서  $Q_s^{-1} = \eta_s v/w$ 을 적용하고,  $Q_i^{-1}$ 항을 더하여  $Q_{Cexp}^{-1}$ 를 구하는 식 (10)이 완성된다(Hoshiba, 1993).

$$Q_{Cexp}^{-1} = Q_s^{-1} \left[ 1 - \frac{C_2 + 2C_3 \eta_s vt + 3C_4 (\eta_s vt)^2 + \dots}{1 + C_2 \eta_s vt + C_3 (\eta_s vt)^2 + \dots} \right] + Q_i^{-1} \quad (10)$$

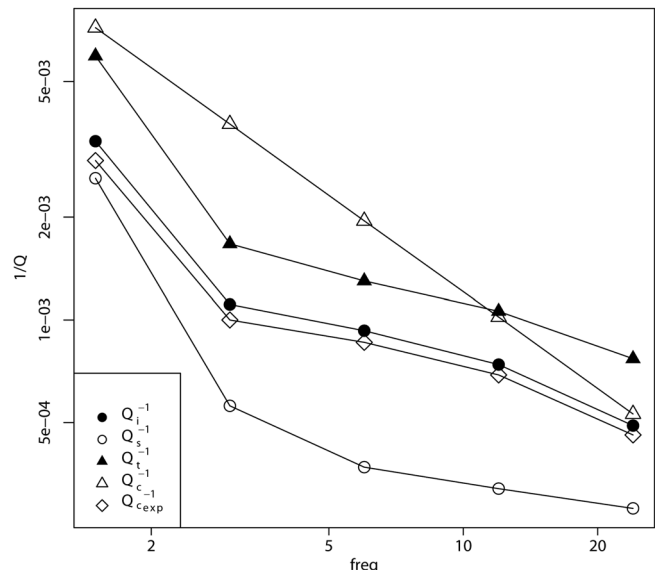
그런데, Hoshiba (1991)는 산란체의 분포가 균일한 정도에서 벗어날수록  $Q_{Cexp}^{-1}$ 와  $Q_c^{-1}$ 값의 차이는 피할 수 없다고 하였다.

### 자료 분석 및 결과

정태웅, 윤숙영(2009)은 기상청(KMA)과 한국지질자원연구

**Table 3.** Observed QC-1 obtained by Yun *et al.* (2007), and theoretical QC-1 ( $Q_{Cexp}^{-1}$ ).

Freq. Band (Hz)	$Q_c^{-1}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$Q_{Cexp}^{-1}$ ( $\times 10^{-3}$ )
1 - 2	7.19 + 0.36 - 0.33	2.93
2 - 4	3.75 + 0.24 - 0.22	1.00
4 - 8	1.95 + 0.16 - 0.14	0.86
8 - 16	1.02 + 0.10 - 0.09	0.69
16 - 32	0.53 + 0.06 - 0.05	0.46



**Fig. 1.** Comparison of  $Q^{-1}$  described in Table 1, and 3.

원(KIGAM)의 관측소에서 기록된 규모 1.4에서 5.2에 이르는 329 지진자료를 이용하여  $Q_i^{-1}$ 값과  $Q_s^{-1}$ 값(Table 1)을 분리 하였다. 한편 동일한 자료를 이용하여 Yun *et al.* (2007)은 단일산란 모델을 가정한  $Q_c^{-1}$ 값을 추정하였다(Table 3). Table 3에는 정태웅, 윤숙영(2009)이 분리한  $Q_i^{-1}$ 값과  $Q_s^{-1}$ 값(Table 1)을 바탕으로 Hoshiba (1993)의 방법으로 이론  $Q_c^{-1}$ 값을 Yun *et al.* (2007)이 추정한 단일산란 모델의  $Q_c^{-1}$ 값과 함께 아울러 표기하였다.

Fig. 1은 관측 및 이론  $Q_{Cexp}^{-1}$  값, 그리고  $Q_i^{-1}$ 와  $Q_s^{-1}$  값을 한곳에 도시한 그림이다. 이론적인  $Q_{Cexp}^{-1}$ 값이  $Q_i^{-1}$ 값에 근접한 모습이나,  $Q_c^{-1}$ 값이 24 Hz의 고주파수를 제외한 대부분의 주파수 구간에서  $Q_i^{-1}$ 보다는  $Q_s^{-1}$ 에 가깝고 이론적인 값과도 상이한 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(Hoshiba, 1993)와 이탈리아 남부아펜니노산맥 지역

(Bianco *et al.*, 2002)은  $Q_c^{-1}$ 값이  $Q_i^{-1}$ 값에 가깝고 이론적인 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  $Q_i^{-1}$ 값에 가까워졌으며(Tuv *et al.*, 2006), 남부스페인 지역은  $Q_c^{-1}$ 값이  $Q_i^{-1}$ 값에 근접하다 10 Hz를 넘어서면서  $Q_i^{-1}$ 값에 가까워졌다(Akinci *et al.*, 1995). 일반적으로 이러한 결과는  $Q_i^{-1}$ 와  $Q_s^{-1}$ 값이 실제로는 깊이에 따라 변하는 값임에도 불구하고 균일한 모델을 이용한 왜곡된 결과로 설명되어 왔다(예, Bianco, 2005). 현재 정태웅·윤숙영(2009)의 균일한 모델 대신, 깊이에 따라 속도가 변하는 층상구조에 대하여 수치계산 방법으로 접근한 모델(Yoshimoto, 2000)에서  $Q^{-1}$ 값, 특히  $Q_s^{-1}$ 값이 낮아지는 현상이 확인되고 있다(Chung *et al.*, 2009).

## 결 론

이론적인  $Q_{Cexp}^{-1}$  값을 구하여 단일 산란모델을 가정하여 추정된  $Q_c^{-1}$ , 분리된  $Q_i^{-1}$  및  $Q_s^{-1}$  값들과 비교를 행하는 것은 분리된 값의 신뢰도를 판단하는데 매우 중요하다. 본 연구 결과,  $Q_{Cexp}^{-1}$  값은  $Q_i^{-1}$ 값에 근접한 모습이나,  $Q_c^{-1}$ 값이 24 Hz 고주파수 대역을 제외한 대부분의 구간에서  $Q_i^{-1}$ 보다는  $Q_s^{-1}$ 에 가깝고  $Q_{Cexp}^{-1}$  값과도 상이한 것으로 나타났다. 이러한 결과는  $Q_i^{-1}$ 와  $Q_s^{-1}$ 값이 실제로는 깊이에 따라 변하는 값임에도 불구하고 균일한 모델을 이용한 왜곡된 결과로 보인다.

## 사 사

본 연구 수행 및 원고작성에 2009년도 기상지진기술개발사업(CATER 2006-5104)의 지원이 있었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- 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, 다중지연시간장법(MLTW)의 한반도 지진자료 적용성 분석, *지구물리와 폴리탐사*, **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., Lees, J. M., Yoshimoto, K., Fujita, E., 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., Yoshimoto, K., and Yun, S., 2009, The Separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in South Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, in submitted.
- 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.
- Hoshiya, 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.
- Hoshiya, 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.
- 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.
- Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshiya, 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.
- Pujades, L. G., Ugalde, A., Canas, J. A., Navarro, J. M., Badal, F. J., and Corchete, V., 1997, Intrinsic and scattering attenuation from observed seismic codas in the Almeria Basin (southeastern Iberian peninsula), *Geophysical Journal Inter-*

- national*, **129**, 281-291.
- Sato, H., 1977, Energy propagation including scattering effects. Single isotropic scattering approximation, *Journal of the Physics of the Earth*, **25**, 27-41.
- 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.
- Stocker, R. L., and Gordon, R. B., 1975, Velocity and internal friction in partial melts, *Journal of Geophysical Research*, **80**, 4828-4836.
- 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.