

## 충청 동부지역 지각의 P, S파 감쇠 분석

김규동\* · 경재복

한국교원대학교 지구과학교육과, 363-791 충청북도 청원군 강내면 다락리 산7번지

### Attenuation of High-Frequency P and S Waves in the Crust of Eastern Part of Choongchung Provinces

Kyu-Dong Kim and Jai-Bok Kyung

Department of Earth Science Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, S. Korea

**Abstract:** Recently Choongchung provinces in the central part of South Korea have received increasing attention because of the newly planned administrative capital construction. In this area, a seismic network of Korea National University of Education has been installed since September 1996, and analyzed  $Q_P^{-1}$  and  $Q_S^{-1}$  by the extended Coda normalization method based on 60 events recorded by 2 stations of the network. To compensate for insufficient data, we combined the data from 33 events observed at 1 of the stations of the network of Korea Institute of Geology, Mining & Materials. Estimated  $Q_P^{-1}$  and  $Q_S^{-1}$  showed frequency dependence that decrease from  $(1.9 \pm 3.0) \times 10^{-3}$  and  $(2.4 \pm 1.4) \times 10^{-3}$  at 3.0 Hz to  $(5.4 \pm 1.5) \times 10^{-4}$  and  $(6.3 \pm 1.1) \times 10^{-4}$  at 24 Hz, respectively. Using a power law dependent on frequency, the best fit of  $Q_P^{-1}$  and  $Q_S^{-1}$  are  $0.003f^{-0.62}$  and  $0.006f^{-0.71}$ , respectively. These values correspond to those of seismically stable regions, and are slightly less dependent on frequency than those of the southeastern part of Korea, due to high  $Q^{-1}$  values in high frequencies. Further observations are required in the central part of S. Korea to evaluate the difference of  $Q^{-1}$  between central and southeastern parts of S. Korea.

**Keywords:** eastern Choongchung provinces, extended Coda-normalization method,  $Q_P^{-1}$ ,  $Q_S^{-1}$

**요약:** 최근 새로운 행정수도의 이전이 예상된 남한 중부 충청지방에 대한 관심이 고조되고 있다. 우리는 이 지역에서 1996년 9월 이후 한국교원대학교 지진관측망을 설치하여 운영 중이며, 이 관측망 중 2개 관측소에서 기록된 60개의 지진자료를 바탕으로 확장 Coda 규격화법을 이용하여  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 을 동시에 측정하였다. 부족한 자료를 보충하기 위해서 한국지질자원연구원 관측망 중 한국교원대학교 관측망과 지리적으로 인접한 1개의 관측소에서 기록된 33개의 지진자료도 함께 분석하였다. 측정된  $Q_P^{-1}$ 은  $(1.9 \pm 3.0) \times 10^{-3}$ 에서  $(5.4 \pm 1.5) \times 10^{-4}$ 으로,  $Q_S^{-1}$ 은  $(2.4 \pm 1.4) \times 10^{-3}$ 에서  $(6.3 \pm 1.1) \times 10^{-4}$ 으로 주파수가 3.0 Hz에서 24 Hz로 늘어남에 따라 줄어드는 주파수 의존적 특성을 보인다. 이 값을 주파수의 지수 형태로 나타내면  $Q_P^{-1} = 0.003f^{-0.62}$ ,  $Q_S^{-1} = 0.006f^{-0.71}$ 이다. 이 값들은 지진학적으로 안정한 전 세계의 다른 지역의 값과 유사하며 남한 남동부 지역값에 비해서는 다소 약한 주파수 의존을 나타낸다. 이는 고주파수에서 높은  $Q^{-1}$ 값 때문이다. 남한 남동부와 충청 동부지역 간의  $Q^{-1}$ 의 차이를 평가하기 위해서는 보다 많은 관측이 요구된다.

**주요어:** 충청 동부지역, 확장Coda규격화법,  $Q_P^{-1}$ ,  $Q_S^{-1}$

## 서론

고주파수에서 지진파 감쇠는 지하 매질의 물리적 상태에 따라 크게 좌우된다. 일반적으로 지각에서의

지진파 감쇠 정도는 지진활동과 밀접한 연관성을 나타내는 Quality factor(Q)의 역수  $Q^{-1}$ 로 묘사된다. 특별히  $Q^{-1}$ 에 대한 정보는 건축물의 내진설계에 대한 지반의 강진동을 예측하는데 매우 중요하다. 그래서 세계 여러 곳, 특별히 인구가 밀접한 지역에서 감쇠에 대한 연구가 이루어져왔다. 예를 들어, S파의  $Q^{-1}$ 에 대한 연구는 일본 Kanto(Kinoshita, 1994), 뉴욕주와 남부 아프리카(Frankel et al., 1990), 멕시코의 맥

\*Corresponding author: rex92@chol.com  
Tel: 82-43-230-3794  
Fax: 82-43-232-7176

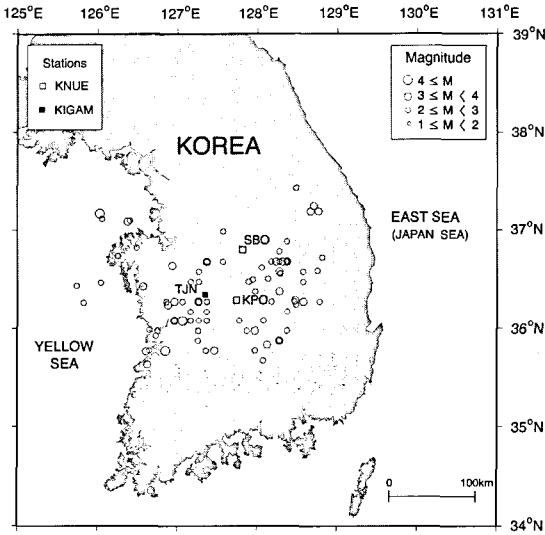


Fig. 1. Map of South Korea showing seismic stations and epicenters of 93 earthquakes used in this study. Open squares and solid squares represent the KNUE Network and the KIGAM Network, respectively.

시코 시티 (Ordaz and Singn, 1992), 북부 Greece (Hatzidimitriou, 1995) 등이 있다. P파와 S파에 대해  $Q^{-1}$ 을 동시에 측정 한 연구는 일본 Kanto (Yoshimoto et al., 1993), 프랑스 (Campillo and Plantet, 1991) 등이 있다. 이런 연구결과에 의하면 지진학적으로 활발한 지역이 비활동적인 지역보다 높은 값을 보였다. 한국에서는 주요 산업지대인 한국 남동부 지역에서 몇몇 연구(e.g. 전명순 외, 1995; 박창업, 1997; Lee and Lee, 1998; 김성균 외, 1999, 2000; Chung and Sato, 2001)가 있었다. 이 연구들은  $Q_p^{-1}$ 과  $Q_s^{-1}$ 이 지진학적으로 안정한 지역(예: 대륙의 순상지)과 유사한 매우 낮은 값을 보였다.

남한 중부 충청지방은 인구 밀집 지역이 여러 곳 있으며, 최근 행정수도의 이전이 예정되어 관심이 고조되고 있다. 이 지역에서는 1978년 규모(M) 5.0의 홍성지진과 속리산지진이 발생하였으며, 역사적으로 Modified Mercalli intensity(MMI) 9 이상으로 추정된 3개의 지진이 발생하였다(Lee, 1998).

남한 중부에서  $Q_p^{-1}$ 과  $Q_s^{-1}$ 의 값은 양질의 지진관측소의 부족으로 인해 아직까지 잘 알려지지 않았다. 우리는 1996년 이후 한국고원대학교 지진관측망을 설치하여 충청지방의 지진활동을 감시해오고 있다 (Kyung et al., 2000). 본 연구에서는 충청 동부지역

에 대해 교원대 관측망 중 2개 관측소에 의해 기록된 지진자료와 1999년부터 운영되어온 자원연구소 관측망 중 1개의 관측소 지진자료를 바탕으로 처음으로  $Q_p^{-1}$ 과  $Q_s^{-1}$ 을 확장Coda규격화법(Yoshimoto et al., 1993)을 이용하여 분석하였다. Figure 1은 관측소 위치와 진앙을 보여준다. 한반도에서 지진은 연평균 20회 정도 발생하며 대부분 규모 4 이하의 미소지진이다. 따라서 확장Coda규격화법이 단일관측소 방법이긴 하지만 부족한 자료를 보충하기 위해서 3개 관측소의 자료를 합쳐서 분석하였다.

### 분석방법 및 자료

확장Coda규격화법은 대략 S파 주행시간의 2배보다 큰 경과시간에서 Coda파 스펙트럼 진폭이 S파의 진원 스펙트럼 진폭에 비해한다는 경험적 관측에 바탕을 둔다. 이것은 Coda 스펙트럼 진폭이 진원거리에 독립적이라는 것을 내포한다. 즉, 일반적으로 직접파와 Coda파에서 관측소 효과와 진원향은 Coda규격화법(Aki, 1980)에 의해 제거될 수 있다. 이 방법은 작은 규모의 지진에 대해 P파와 S파의 진원스펙트럼비가 일정하다는 가정에 의해 P파까지 확장된다 (Yoshimoto et al., 1993).

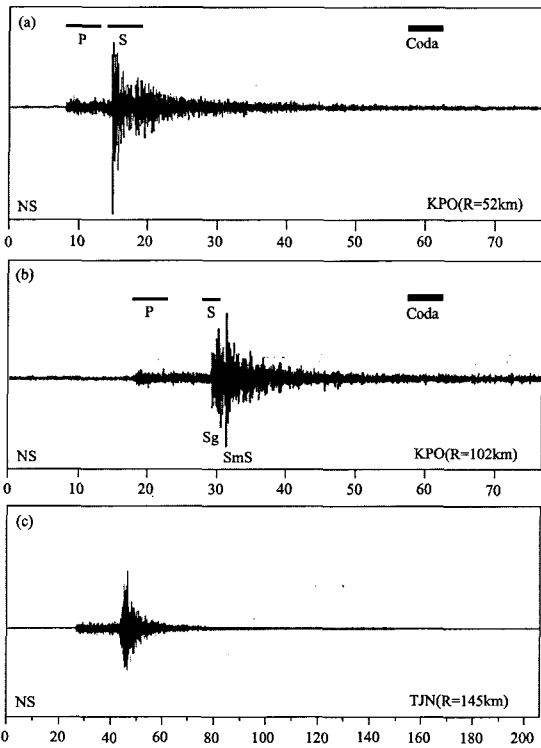
전술한 Coda규격화법으로부터  $Q_p^{-1}$ 과  $Q_s^{-1}$ 은 아래 식(Yoshimoto et al., 1993)을 이용함으로써 서로 다른 진원거리를 가지는 지진기록에서 구할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{A_p(f, r)r}{C(f, t_c)}\right) = -\frac{\pi f}{Q_p(f)V_p}r + \text{const}(f) \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{A_s(f, r)r}{C(f, t_c)}\right) = -\frac{\pi f}{Q_s(f)V_s}r + \text{const}(f) \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 주파수,  $t_c$ 는 진원기원시로부터 일정경과 시간,  $r$ 은 진원거리,  $V_p$ 는 P파 속도,  $V_s$ 는 S파 속도,  $A_p(f, r)$ 과  $A_s(f, r)$ 은 각각 직달 P파와 S파의 최대진폭,  $C(f, t_c)$ 는 Coda파 스펙트럼 진폭이다. 많은 지진에 대해 진원거리 대 식(1)과 (2)의 좌변값에 최소자승법을 적용함으로써 단일 도표상에서 선형회귀선으로부터  $Q_p^{-1}$ 과  $Q_s^{-1}$ 을 구할 수 있다.

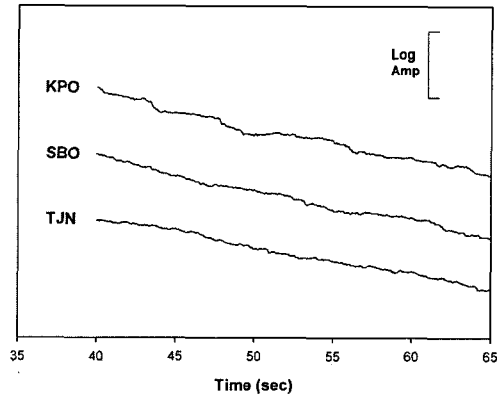
P파 분석을 위해서 U-D성분 지진기록을 이용하였고 S파 분석을 위해서 N-S성분 지진기록을 이용하였다. 이는 N-S와 E-W 성분 사이의 충분한 진폭 차이가 관측되지 않았기 때문이다. Coda 스펙트럼 진폭은  $t_c = 60$ 초를 중심으로 5초의 시간창에 대한 제공근



**Fig. 2.** (a) An example of time windows of *P* and *S* waves and coda for raw seismogram. (b) To exclude larger later phase reflected from Moho (*SmS*), we made narrow *S* wave time window. (c) An example of indistinguishable waveform for *Sg*, *SmS* and *Lg*.

평균(*rms*) 진폭으로부터 구하였다(Fig. 2a). 또한 직접파의 최대진폭을 구하기 위해서도 5초 폭의 시간창을 선택하였다. Coda파의 경과시간과 *P*파 시간창의 폭은 진원거리 40~160 km 사이로 제한하였다(Yoshimoto *et al.*, 1993). *S*파 시간창은 큰 모호반사파(*SmS*)를 제외시키기위해 좁혔고(Fig. 2b), 진원거리 120 km 이상의 자료는 *Sg*, *SmS*, *Lg*를 구별하기 힘들어 제외시켰다(Fig. 2c). 또한 신호 파워 스펙트럼이 잡음 파워 스펙트럼의 2배보다 작은 경우 분석에서 제외하였다.

Coda규격화법은 초기에는 단일 관측소 자료를 이용하였고, 이후 Frankel 등(1990)에 의해 여러 개 관측소로 확장되었다. 일정 경과시간 이후 지진에너지가 공간적으로 균일하게 분포한다는 Coda파 개념에 바탕을 두고, Coda파 감소가 서로 다른 관측소들 사이에서 유사하다면 서로 다른 관측소의 자료는 식(1)과 (2)를 이용해 하나의 도표에서 합쳐질 수 있다.



**Fig. 3.** The similarity of coda decay of three stations. The coda envelopes are band-passed filtered at *f* between 4 and 8 Hz, and smoothed so that each point represents the arithmetic average of the envelope over 1 sec. Each envelope are from different earthquakes whose hypocentral distance from the stations of KPO, SBO, and TJN are 62, 71, and 52 km, respectively.

이전의 연구(e.g. Frankel *et al.*, 1990; Chung and Lee, 2003)는 300 km까지 떨어져 있는 관측소를 합침으로서 적은 수의 자료에 대해 이루어졌다. 본 연구에서의 관측소는 약 100 km 범위 이내에 분포하며 유사한 Coda파 감소 모양을 보여준다(Fig. 3).

우리는 1996년부터 2001년 11월까지 KNUE 관측망 중 2개의 관측소(거포리(KPO), 서부리(SBO))에 의해 기록된 60개 지진자료와 KIGAM 관측망 중 1개의 관측소(대전(TJN))에 의해 기록된 33개 지진자료를 분석대상으로 하였다. 각 관측소는 고유주파수 1 Hz의 3성분 속도 지진계가 설치되어 있다. 출력신호는 100 samples/sec에서 16 bit의 해상도로 계수화되어졌다. 모든 지진자료의 진원은 2층 지각구조 즉, 15 km와 35 km의 깊이에서 경계지어지고, 각각 5.98 km/s, 6.38 km/s의 *P*파 속력을 가지는 모델(김상조 · 김소구, 1983)을 바탕으로 *HYPO71*을 이용해 결정하였다. 지진자료의 국지규모는 2.0과 4.1 사이이다.

**$Q_p^{-1}$ 과  $Q_s^{-1}$ 의 측정**

각각의 지진기록에서 저주파 변동성분을 제한 다음, 전체 시간의 10%에 해당하는 시작 및 끝 부분에 cosine 감쇠항을 곱한다(Hino, 1986). 그 후 자료에 1-2, 2-4, 4-8, 8-16 및 16-32 Hz의 대역통과필터를 적용한다. 필터된 *P*파 상하동 및 *S*파 남북성분 자료에서 최대진폭  $A_p(f,r)$ ,  $A_s(f,r)$ 를 측정함과 동시에 각

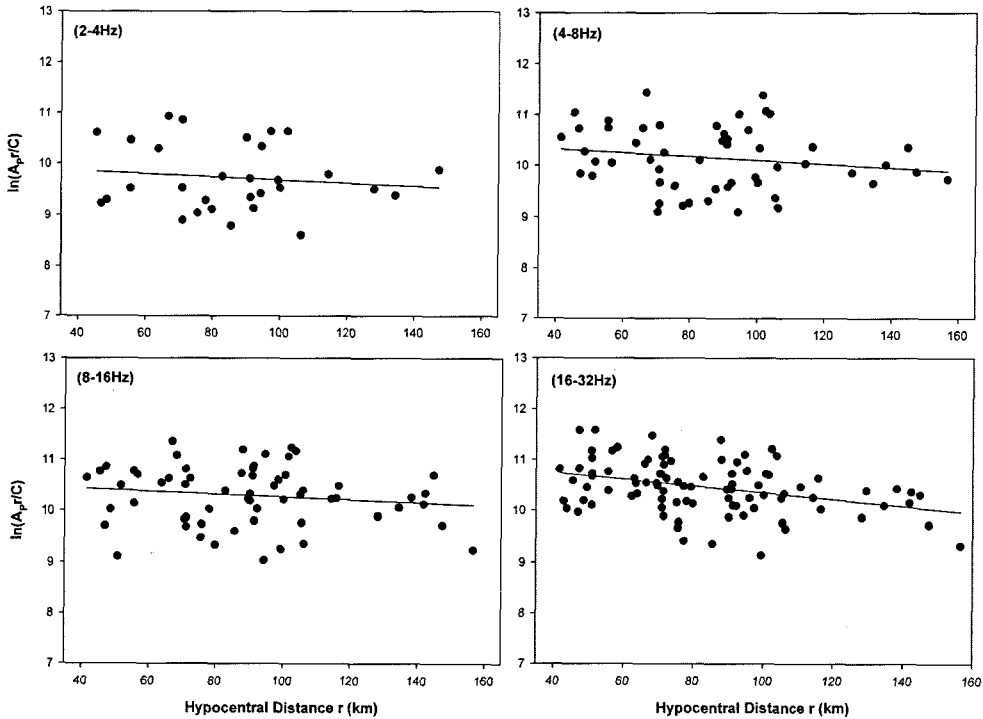


Fig. 4. Plots of the extended coda-normalized amplitude of P waves against hypocentral distance for each frequency band. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate.

각의 성분에서 Coda규격화를 위한 Coda 스펙트럼 진폭을 구하여 식(1)과 (2)에 대입한다. 이 때  $V_P = 6$  km/s,  $V_S = 3.5$  km/s로 가정하였다. 일부 자료에서 60초를 전후하여 지진기록이 잘려져 나타나지 않는 경우가 있는데 이 경우 다수의 양호한 지진자료에서 Coda 진폭의 평균 감쇠율로부터 도출된 master curve로부터 Coda와 스펙트럼 진폭을 구하였다.  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 의 값은 합친 각 관측소 자료에 대한 선형회귀선의 기울기로부터 얻어진다.

Coda규격화분석에서 자료를 합치는 것은 회귀선 주위에서 3개 관측소 값이 일정한 산란을 보이는 것에 의해서도 지지된다(Fig. 4, 5). 계산결과는 Table 1과 같다. 분석과정에서 1-2 Hz 범위는 자료수가 적어 제외하였다.

주파수가 3.0 Hz에서 24 Hz로 늘어남에 따라 계산된  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 은 각각  $(1.9 \pm 3.0) \times 10^{-3}$ 과  $(2.4 \pm 1.4) \times 10^{-3}$ 에서  $(5.4 \pm 1.5) \times 10^{-4}$ 과  $(6.3 \pm 1.1) \times 10^{-4}$ 으로 줄어드는 주파수 의존적 특성을 보인다. 이 값을 주파수의 지수형태로 나타내면  $Q_P^{-1} = 0.003f^{-0.62}$ ,  $Q_S^{-1} = 0.006f^{-0.71}$ 이다.

## 논 의

일반적으로  $Q^{-1}$  값은 지진학적으로 안정한 지역에서는 낮게 나타나고, 지진학적으로 불안정한 지역은 높게 나타난다. Figure 6에서 보여지는 바와 같이 본 연구에서 구한  $Q_P^{-1}$ 의 경우 지진학적으로 안정한 지역인 발틱(Baltic) 순상지(Kvamme and Havskov, 1989)에 비해 약간 낮은 값을 보이지만 오차를 고려한다면 유사한 값이라고 할 수 있다. 또한 북아메리카 순상지(Taylor et al., 1986)와 비교해서도 저주파수에서 매우 유사한 값을 보인다. 국내에서는 주로 경상분지인 남한 남동부 지역을 중심으로 연구가 이루어져왔다. 이 중 김성균 외 (1999)는 두관측점법(Chun et al., 1987)을 이용하여  $Q_P^{-1}$ 을 구하였는데, 본 연구와 비교해 저주파수에서 높은 값을 보이고, 고주파수에서는 다소 낮은 값을 보인다. 따라서 직선의 기울기로 나타나는 주파수 의존적인 특징은 본 연구의 결과가 약하게 나타난다. 그리고 Chung and Sato(2001)는 본 연구와 같은 방법을 이용하여 남한 남동부 지각을 대상으로 상당히 낮은  $Q_P^{-1}$ 을 보고했

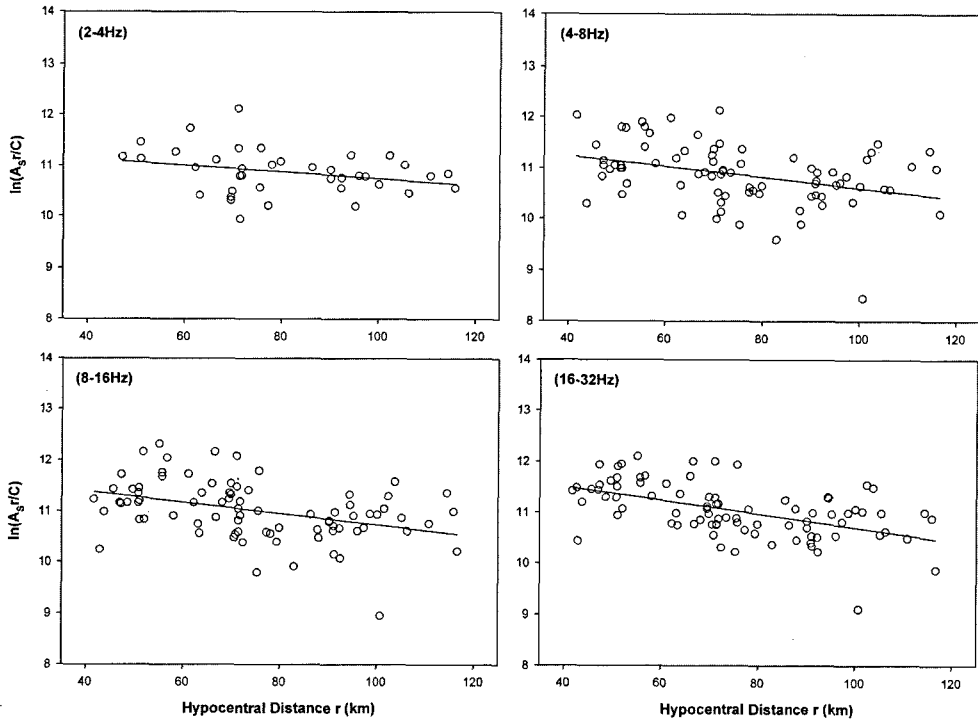


Fig. 5. Plots of the extended coda-normalized amplitude of *S* waves against hypocentral distance for each frequency band. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate.

Table 1.  $Q_p^{-1}$  and  $Q_s^{-1}$  values with standard deviations

Frequency (Hz)	$Q_p^{-1}$		$Q_s^{-1}$	
1~2				
2~4	0.00192	$\pm 0.00308$	0.00243	$\pm 0.00143$
4~8	0.00120	$\pm 0.00095$	0.00198	$\pm 0.00061$
8~16	0.00045	$\pm 0.00042$	0.00103	$\pm 0.00027$
16~32	0.00054	$\pm 0.00015$	0.00063	$\pm 0.00011$

는데, 이 결과 또한 본 연구의 결과와 유사하다.

$Q_s^{-1}$ 의 경우도 마찬가지로 발틱 순상지에 비해 약간 높은 값을 보이지만 유사한 값이라고 볼 수 있다. 김성균 외(2000)는 깊이에 따라 변하는 Coda파 감쇠로부터  $Q_s^{-1}$ 을 추정하는 방법(Kosuga, 1992)을 이용하여 18 km보다 얇은 상부지각과 그보다 깊은 하부지각을 대상으로 값을 도출하였는데, 본 연구의 결과는 상부지각과 하부지각 값의 중간쯤에 해당하는 값으로 오차를 고려한다면 유사한 값을 보인다. 또한 Chung and Sato(2001)가 같은 방법으로 구한 값과 비교해 약간 높은 값을 보이며, 전체적으로 주파수의 의존적인 특징은 유사하게 나타난다.

결론적으로 본 연구에서 구한  $Q_p^{-1}$ 과  $Q_s^{-1}$  값은 상당히 낮은 값으로 안정한 대륙값과 유사함을 알 수 있다.

## 결론

우리는 교원대학교에서 운영중인 지진관측망으로 충청지역의 지진활동을 모니터링하고 있다. KNUE 관측망 중 2개 관측소와 KIGAM 관측망 중 1개 관측소의 자료를 통합하여 처음으로 확장Coda규격화법을 이용하여  $Q_p^{-1}$ 과  $Q_s^{-1}$ 을 구하였다. 구한 결과는  $Q_p^{-1}$ 이  $(3.6 \pm 4.2) \times 10^{-3}$ 에서  $(6.3 \pm 0.1) \times 10^{-4}$ 으로,  $Q_s^{-1}$ 은  $(2.2 \pm 4.4) \times 10^{-3}$ 에서  $(6.5 \pm 0.1) \times 10^{-4}$ 으로 주파수가 1.5 Hz에서 24 Hz로 늘어남에 따라 줄어드는 주파수의존적 특성을 보인다. 이 값을 주파수의 지수형태로 나타내면  $Q_p^{-1} = 0.003f^{-0.62}$ ,  $Q_s^{-1} = 0.006f^{-0.71}$ 이다. 이 값들은 지진학적으로 안정한 지역과 유사하며 고주파수에서 높은  $Q^{-1}$  값 때문에 남한 남동부 값보다 다

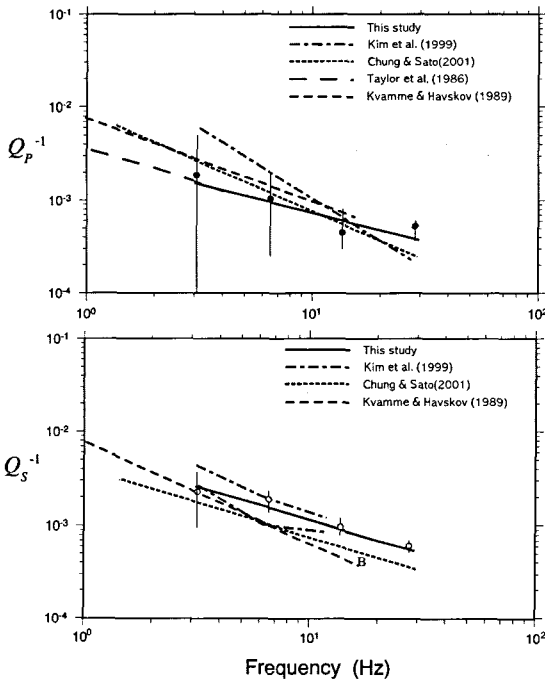


Fig. 6. Comparisons of  $Q_P^{-1}$  (upper) and  $Q_S^{-1}$  (lower) values measured in this study with the values of other studies. The error bars indicate the standard deviation.

소 약한 주파수 의존을 보인다. 남한 남동부와 충청 동부지역 사이의  $Q^{-1}$  값의 차이를 평가하기 위해 충청 동부지역에서 보다 많은 관측이 요구된다.

### 참고 문헌

경제복, 정태웅, 이덕기, 이재구, 이은아, 2000, 남한 중부 지역의 미소지진관측에 의한 지 진활동 분석. 지구물리, 3, 201-212  
 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조연구. 광산지질학회지, 16, 51-61.  
 김성균, 김복희, 1999, 한반도 남동부에서의 Coda파 감쇠. 자원환경지질, 32, 379-384  
 김성균, 전명순, 김준경, 1999, 경상분지에서의 P파 감쇠. 지질학회지, 35, 223-228.  
 김성균, 박윤경, 전명순, 2000, 한반도 남동부의 Q구조. 지질학회지, 36, 529-544.  
 박창엽, 1997, 한반도 지진파 에너지감쇠 연구. 한국원자력 연구소 보고서, KAERI- 96-08, 1-43.  
 이기화, 1998, 한반도의 역사지진자료. 지구물리, 1, 3-22.  
 전명순, 지현철, 전정수, 1995, 지진연구. 한국자원연구소 보고서, KR-94(C), 1-16p.  
 정태웅, 2001, 한국남동부 지각의 P, S파 감쇠구조 비교연

구. 한국지구과학회, 22, 112-119.  
 정태웅, 사또, 2000, 덕정리 지진자료를 이용한 한국 남동부지역 지각의 P, S파 감쇠구조 연구. 지구물리, 3, 193-200.  
 Aki, K., 1980, Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25Hz. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 21, 50-60.  
 Campillo, M. and Plantet, J.L., 1991, Frequency dependence and spatial distribution of seismic attenuation in France: experimental results and possible interpretations. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 67, 48-64.  
 Chun, K.Y., West, G.F., Kokoski, R.J., and Samson, C., 1987, A novel technique for measuring Lg attenuation - Results from eastern Canada between 1 to 10 Hz. Bulletin of the Seismological Society of America, 77, 398-419.  
 Chung, T.W. and Sato, H., 2001, Attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of southeastern South Korea. Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 1867-1874.  
 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, in press.  
 Frankel, A., McGarr, A., Bicknell, J., Mori, J., Seeber, L., and Cranswick, E., 1990, Attenuation of high-frequency shear waves in the crust: measurements from New York State, south Africa and southern California. Journal of Geophysical Research, 95, 17441-17457.  
 Hatzidimitriou, P.M., 1995, S wave attenuation in the crust in northern Greece. Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 1381-1387.  
 Hino, M., 1986, Spectral analysis. Asakura-Shoten, Tokyo, 300 p (in Japanese).  
 Kinoshita, S., 1994, Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of the southern Kanto area, Japan. Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 1387-1396.  
 Kosuga, M., 1992, Dependence of coda Q on frequency and lapse time in the western Nagano Region, Central Japan. Journal of Physics of the Earth, 40, 421-445.  
 Kvamme, L.B. and Havskov, J., 1989, Q in southern Norway. Bulletin of the Seismological Society of America, 79, 1575-1588.  
 Lee, W.S. and Lee, K.H., 1998, Q estimates using the coda waves in the Kyungsang Basin. Proceeding of EESK Conference-Fall.  
 Ordaz, M. and Singh, S.K., 1992, Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City. Bulletin of the Seismological Society of America, 82, 24-43.  
 Taylor, S.R., Bonner, B.P., and Zandt, G., 1986, Attenua-

tion and scattering of broadband P and S waves across North America. *Journal of Geophysical Research*, 91, 7309-7325.

Yoshimoto, K., Sato, H., and Ohtake, M. 1993, Frequency-

dependent attenuation of P and S waves in the Kanto area, Japan, based on the coda-normalization method. *Geophysical Journal International*, 114, 165-174.

---

2003년 10월 6일 원고 접수  
2003년 10월 30일 수정원고 접수  
2003년 11월 15일 원고 채택