

남한 중부지역 지각의 P, S파 감쇠 분석

김규동¹, 정태웅², 경재복¹

(¹한국교원대학교 지구과학교육과, ²세종대학교 지구정보과학과)

1. 서 론

고주파수에서 지진파 감쇠는 지구내부 물질의 물리적 상태에 따라 크게 좌우된다. 일반적으로 지각의 감쇠값은 지진활동과 밀접한 연관성을 나타내는 Quality factor(Q)의 역수 Q-1로 묘사된다. 특별히 Q-1에 대한 정보는 건축물의 내진설계에 대한 지반의 강진동을 예측하는데 매우 중요하다. 남한 중부지역은 인구가 밀집된 지역이고, 최근 행정수도의 이전이 예정되어 관심이 고조되고 있다. 남한 중부지역에서 QP-1과 QS-1의 값은 양질의 지진관측소의 부족으로 인해 아직까지 잘 알려지지 않았다. 우리는 1996년 이후 한국교원대학교(KNUE) 지진관측망을 설치하여 이 지역의 지진활동을 감시해오고 있다. KNUE 관측망 중 4개 관측소에 의해 기록된 지진자료를 바탕으로 처음으로 QP-1과 QS-1을 확장Coda규격화법(The extended coda normalization method)을 이용해 분석하였다. 또한, 1999년부터 운영되어온 한국지질자원연구원(KIGAM) 관측망 중 2개의 관측소 자료를 함께 분석하였다. Fig. 1은 관측소와 진앙의 위치를 보여준다.

2. 분석방법 및 자료

Coda규격화법은 대략 S파 주시시간의 2배보다 큰 경과시간에서 Coda 스펙트럼 진폭이 S파의 진원 스펙트럼 진폭에 비례한다는 경험적 관측에 바탕을 둔다. 이것은 Coda 스펙트럼 진폭이 진원거리에 독립적이라는 것을 내포한다. 즉, 일반적으로 직접파와 Coda에 공통적으로 존재하는 진원향과 수신함수가 Coda규격화법(Aki, 1980)에 의해 제거될 수 있다는 것이다. 전술한 Coda 규격화법으로부터 QP-1과 QS-1은 아래 식을 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, tC 는 기원시로부터 고정된 시간, r 은 진원거리, VP 는 P파 속력, VS 는 S파 속력, $AP(f,r)$ 과 $AS(f,r)$ 은 각각 P와 S 직접파의 최대진폭, $C(f,tC)$ 는 Coda 스펙트럼 진폭이다. 많은 지진에 대해 진원거리 대 식(1)과 (2)의 좌변값에 최소자승법을 적용함으로써 한 도표 상에서 선형회귀선으로부터 QP-1과 QS-1을 구할 수 있다. P파 분석을 위해서 U-D성분 지진기록을 이용하였다. 그리고 S파 분석을 위해서 N-S성분 지진기록을 이용하였다. 이는 N-S와 E-W 성분 사이의 충분한 진폭 차이가 관측되지 않았기 때문이다. Coda 스펙트럼 진폭은 60초를 중심으로 5초의 시간창에 대한 진폭의 제곱근 평균값에서 구하였다. 또한 P 및 S 직접파도 5초의 길이를 가지는 시간창에서 최대진폭을 구하였다. P파의 경우 Coda파와 동일한 5초의 시간창을 확보하기 위해 40km 이상의 진원거리 자료를 분석대상으로 하였으며, Coda 지속시간과 지진규모 사이의 관계가 200km 부근에 진원거리에 따라 달라진다는 연구(Tsumura, 1967b)가 있어 진원거리 160km 이내로 분석대상을 제외하였다. S파의 경우 일부 자료는 직접파(S_g)보다 큰 진폭을 보이는 SmS 를 제외시키기 위해 시간창을 좁혔고, 진원거리 120km 이상의 자료는 S_g , SmS , Lg 를 구별하기 힘들어 제외시켰다. 또한 신호파워스펙트럼이 잡음파워스펙트럼의 2배보다 작은 자료도 분석대상에서 제외하였다. 우리는 1996년부터 2001년 11월까지 KNUE 관측망 중 거포리(KPO), 논산(NNS), 교원대(KYU), 및 서부리(SBO)에서 기록된 110개 지진자료와 KIGAM 관측망 중 KNUE 관측망과 지리적으로 인접한 대전(TJN)과 김천(KMC)에서 기록된 94개 지진자료를 분석대상으로 하였다. 각 관측소는 고유주파수 1Hz의 3성분 속도 지진계가 설치되어 있다. 출력신호는 100samples/sec에서 16bit의 해상도로 계수화되었다. 지각모델은 2층 지각구조 즉, 15km와 35km의 깊이에서 경계지어지고, 각각 5.98km/s, 6.38km/s의 P파 속력을 가지는 모델을 사용하였으며, 모든 지진자료의 진원은 HYPO71을 이용해 결정되었다. 모든 지진의 규모는 1.7에서 4.2 사이의 범위로 추정된다.

3. QP-1 및 QS-1 계산

각 속도지진기록에서 저주파 변동성분을 제한 다음, 전체 시간의 10%에 해당하는 시작 및 끝 부분에 cosine 감쇠항을 곱한다(Hino, 1986). 그런 후 각 지진자료에 1-2, 2-4, 4-8, 8-16 및 16-32 Hz의 대역필터를 적용한다. 필터된 P파 상하성분 및 S파 남북성분 자료에서 최대진폭 $AP(f,r)$, $AS(f,r)$ 를 측정함과 동시에 각각의 성분에서 Coda 규격화를 위한 Coda 스펙트럼 진폭을 구하여 식(1)과 (2)에 대입한다. 이 때 $VP = 6\text{km/s}$, $VS = 3.5\text{km/s}$ 로 가정하였다. QP-1과 QS-1의 값은 각 관측소의 자료에 대한 선형회귀선의 기울기로부터

얻어진다(Fig 2, 3). 측정된 QP-1은 $(3.6\pm 4.2)\times 10^{-3}$ 에서 $(6.3\pm 0.1)\times 10^{-4}$ 으로, QS-1은 $(2.2\pm 4.4)\times 10^{-3}$ 에서 $(6.5\pm 0.1)\times 10^{-4}$ 으로 주파수가 1.5Hz에서 24Hz로 늘어남에 따라 줄어드는 주파수 의존적 특성을 보인다. 이들 값을 주파수의 지수형태로 나타내면 QP-1이 0.003f-0.54, QS-1이 0.003f-0.42이다.

4. 결론 및 논의

한국교원대학교(KNU)에서 운영중인 지진관측망 중 4개 관측소와 KIGAM 관측망 중 2개 관측소의 합친 자료를 바탕으로 처음으로 확장Coda규격화법을 적용해 QP-1과 QS-1을 구하였다. 측정된 결과는 QP-1이 $(3.6\pm 4.2)\times 10^{-3}$ 에서 $(6.3\pm 0.1)\times 10^{-4}$ 으로, QS-1은 $(2.2\pm 4.4)\times 10^{-3}$ 에서 $(6.5\pm 0.1)\times 10^{-4}$ 으로 주파수가 1.5Hz에서 24Hz로 늘어남에 따라 줄어드는 주파수 의존적 특성을 보인다. 이들 값을 주파수의 지수형태로 나타내면 QP-1이 0.003f-0.54, QS-1이 0.003f-0.42이다.

Fig. 4에서 일본 Kanto(Yoshimoto et al., 1993)와 남부 Kurils 같은 지진학적으로 활발한 지역은 높은 QP-1 값을 가지고, 반면 Baltic 순상지(Kvamme & Havskov, 1989) 같은 지진학적으로 안정한 지역은 낮은 QP-1 값을 보인다. 우리의 결과와 남한 남동부지역의 결과(Chung & Sato, 2001)는 대체로 지표 측정의 가장 낮은 부분에 놓이는 Baltic 순상지 값과 유사하다. QS-1 또한 지진학적으로 안정한 지역이 활동적인 지역보다 낮은 값을 가진다. QS-1은 QP-1에 비해 많은 연구가 이루어졌으며, QS-1에서도 QP-1과 비슷한 차이가 동일한 지역에서 관측되었다. 남한 중부지역은 QP-1과 QS-1 값이 타 지역에 비해 낮은 값을 나타내며, 남한 남동부 지각에 비해 약간 낮은 주파수 의존을 보인다. 이는 고주파수에서 높은 Q-1 때문이다. 이 높은 값은 상대적으로 남한 중부지역이 남한 남동부지역에 비해 지진활동이 활발함을 반영하는 것일 것이다. 그렇지만 우리의 결과가 몇몇 관측소의 자료를 합쳐서 나온 것이기 때문에 두 지역에서 Q-1의 차이를 판단하기 위해서는 이 지역에서 보다 많은 관측이 요구된다.

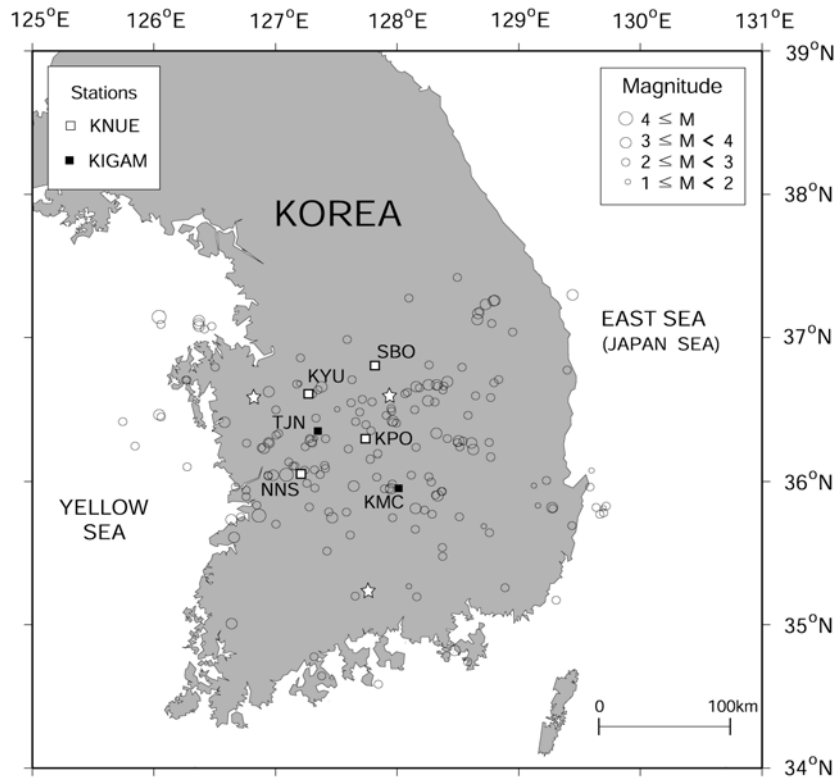


Figure 1. Map of S. Korea showing seismic stations and epicenters of 204 earthquakes used in this study. Open squares and solid squares represent the KNUE Network and the KIGAM Network, respectively. Star marks represent the earthquakes of magnitude (M) over 5.0 that occurred in S. Korea after 1905.

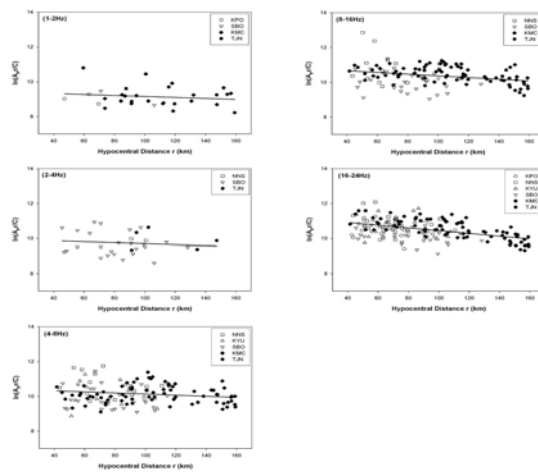


Figure 2. Plots of the extended coda-normalized amplitude of P waves against hypocentral distance for each frequency band. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate.

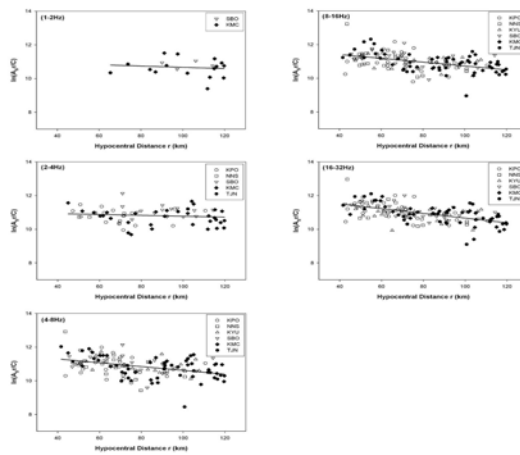


Figure 3. Plots of the extended coda-normalized amplitude of S waves against hypocentral distance for each frequency band. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate.

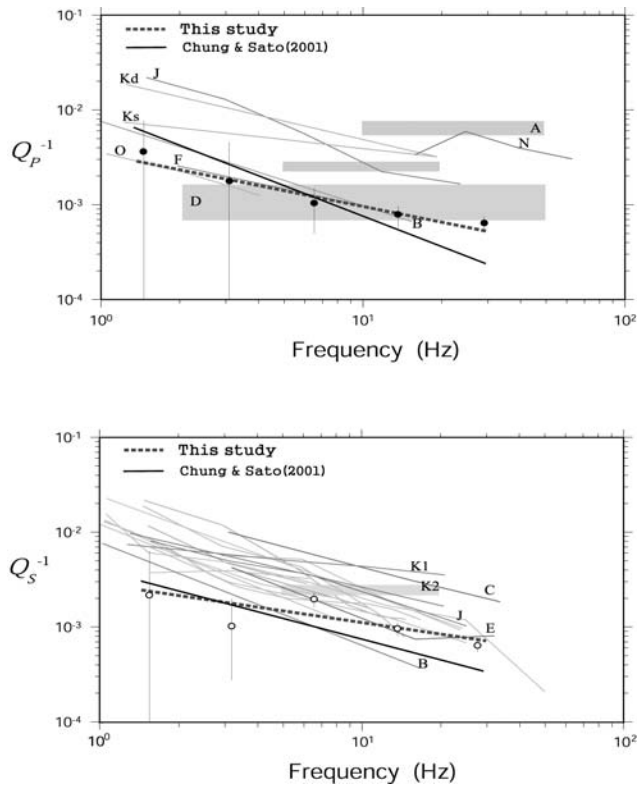


Figure 4. Comparisons of Q_P^{-1} (upper) and Q_S^{-1} (lower) values measured in this study with the values of other regions in the world. The error bars indicate the standard deviation. Bold broken lines refer to the best-fit regression lines by the least squares, and bold lines represent result by Chung & Sato (2001) in the Yangsan fault of southeastern S. Korea. A gray area designated by A and D, and thick lines by O, J, F, N, B, C, and E refer to the following studies: A, Arette, France (Modiano and Hatzfeld, 1982); D, drill hole in southern California (Abercrombie, 1995); O, shield region in North America (Taylor et al., 1986); J, Kanto in Japan (Yoshimoto et al., 1993), F, France (Campillo & Plantet, 1991); N, Nagano in Japan (Yoshimoto et al., 1998); B, Baltic shield (Kvamme & Havskov, 1989); C, southern California; and E, New York State (Frankel et al., 1990), respectively. The line denoted by Ks, Kd, K1, and K2 refer to measurements in southern Kurils for the focal depth ranges of 5–55 km, 55–85 km, 5–25 km, and 25–55 km, respectively (Fedotov & Boldyrev, 1969). Gray areas or lines show the reported measurements in the world (modified from Sato and Fehler, 1998).

참고문헌

- Abercrombie, R. E. (1995). Earthquake source scaling relationship from -1 to 5 ML using seismograms recorded at 2.5-km depth, *J. Geophys. Res.* 100, 24015–24036.
- Aki, K. (1980). Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Phys. Earth Planet. Inter.* 21, 50–60.
- Campillo, M., and J. L. Plantet (1991). Frequency dependence and spatial distribution of seismic attenuation in France: experimental results and possible interpretations, *Phys. Earth Planet. Inter.* 67, 48–64.
- Chung, T. W., and H. Sato (2001). Attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of southeastern South Korea, *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 1867–1874.
- Chung, T. W., and K. Lee (2003). A study of high-frequency QLg-1 in the crust of South Korea, *Bull. Seism. Soc. Am.*, in press.
- Fedotov, S. A., and S. A. Boldyrev (1969). Frequency dependence of the body-wave absorption in the crust and the upper mantle of the Kuril Island chain, *Izv. Acad. Sci. USSR* 9, 17–33.
- Frankel, A (1982). The effects of attenuation and site response on the spectra of microearthquakes in the northeastern Caribbean, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1379–1402.
- Hino, M. (1986). Spectral analysis, Asakura-Shoten, Tokyo, 300pp (in Japanese).
- Kim, S. J., and S. G. Kim (1983). A study on the crustal structure of south Korea by using seismic waves, *J. Korean Inst. Mining Geol.* 16, 51–61 (in Korean).
- Kinoshita, S. (1994). Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of the southern Kanto area, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1387–1396.
- Kvamme, L. B., and J. Havskov (1989). Q in southern Norway, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 1575–1588.
- Modiano, T., and D. Hatzfeld (1982). Experimental study of the spectral content for shallow earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.* 72, 1739–1758.
- Taylor, S. R., B. P. Bonner, and G. Zandt (1986). Attenuation and scattering of broadband P and S waves across North America, *J. Geophys. Res.* 91, 7309–7325.
- Yoshimoto, K., H. Sato, and M. Ohtake (1993). Frequency-dependent attenuation of P

and S waves in the Kanto area, Japan, based on the coda-normalization method, *Geophys. J. Int.* 114, 165–174.

Yoshimoto, K., H. Sato, Y. Iio, H. Ito, T. Ohminato, and M. Ohtake (1998). Frequency-dependent attenuation of high-frequency P and S waves in the upper crust in western Nagano, Japan, *Pure Appl. Geophys.* 153, 489–502.