

확장 Coda 규격화 방법에 의한 한국남동부 지각의 Q_P^{-1} , Q_S^{-1} 연구

정태웅^{1,*} · 佐藤春夫² · 이기화³

¹세종대학교 지구과학과, 143-747 서울시 광진구 군자동 98

²토호쿠대학 지구물리학과 980-77 일본 센다이시

³서울대학교 지구시스템과학부, 151-742 서울시 관악구 신림동 산 56-1

A Study of Q_P^{-1} and Q_S^{-1} Based on Data of 9 Stations in the Crust of the Southeastern Korea Using Extended Coda Normalization Method

Tae-Woong Chung^{1,*} · Haruo Sato² · Kiehwa Lee³

¹Department of Earth Science, Sejong University, Seoul, 143-747, Korea

²Department of Geophysics, Tohoku University, Sendai 980-77, Japan

³School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

Abstract: For the southeastern Korea around the Yangsan fault, we measured Q_P^{-1} and Q_S^{-1} simultaneously by using the extended coda-normalization method for seismograms registered at 9 stations deployed by KIGAM. We analyzed 707 seismograms of local earthquakes that occurred between December 1994 and February 2000. From seismograms, bandpass filtered traces were made by applying Butterworth filter with frequency-bands of 1~2, 2~4, 4~8, 8~16 and 16~32 Hz. Estimated Q_P^{-1} and Q_S^{-1} values decrease from $(7\pm 2)\times 10^{-3}$ and $(5\pm 4)\times 10^{-4}$ at 1.5 Hz to $(5\pm 4)\times 10^{-3}$ and $(5\pm 2)\times 10^{-4}$ at 24 Hz, respectively. By fitting a power-law frequency dependent to estimated values over the whole stations, we obtained $0.009 (\pm 0.003)f^{-1.05(\pm 0.14)}$ for Q_P^{-1} and $0.004 (\pm 0.001)f^{-0.70(\pm 0.14)}$ for Q_S^{-1} , where f is frequency in Hz.

Key words: southeastern Korea, extended coda-normalization method, Q_P^{-1} , Q_S^{-1}

요약: 양산단층이 지나는 한국 남동지방 지각의 Q_P^{-1} 및 Q_S^{-1} 를 한국자원연구소가 설치한 9점의 지진관측소 자료를 바탕으로 확장 Coda 규격화법을 이용하여 구하였다. 1994년 12월부터 2000년 2월에 일어난 근지진에서 707개 지진기록에 대하여 1~2, 2~4, 4~8, 8~16 및 16~32Hz의 대역필터를 적용하여 분석한 결과, 각 관측점의 Q_P^{-1} 는 $(7\pm 2)\times 10^{-3}$ 에서 $(5\pm 4)\times 10^{-3}$ 으로, Q_S^{-1} 는 $(5\pm 4)\times 10^{-4}$ 에서 $(5\pm 2)\times 10^{-4}$ 로 주파수가 1.5Hz에서 24Hz로 늘어남에 따라 줄어드는 주파수 의존성이 보인다. 이들 값의 지수 회귀선은 Q_P^{-1} 가 $0.009(\pm 0.003)f^{-1.05(\pm 0.14)}$, Q_S^{-1} 가 $0.004(\pm 0.001)f^{-0.70(\pm 0.14)}$ 이다.

주요어: 한국 남동부, 확장 coda 규격화법, Q_P^{-1} , Q_S^{-1}

서론

지진파가 전달되면서 진폭이 감쇠되는 정도를 나타내는 감쇠상수 Q^{-1} 는 지구내부 물질의 물리적 성질을 나타내는 중요한 척도이다. 특히, 구조물의 내진설계에 있어서 지반의 강진동을 정량적으로 예측하기 위해 Q^{-1} 의 지식은 필수적이다. 특히 세계에서는 지진 빈발지역이면서 인구가 많은 산업 도시지역에서 집중적인 Q^{-1} 의 조사가 이루어지고 있으며(예; Sato and

Fehler, 1998), 미국의 진앙거리 100km까지의 지진을 이용한 감쇠구조연구에서는 지진활동이 활발한 서부 지역이 동부지역에 비해 감쇠상수가 크다는 것이 밝혀진 바 있다(Frankel *et al.*, 1990). 그러나 미국 서부지역의 2.5km 깊이 우물에서의 120km 진앙거리에 대한 지진해석에서는 매우 낮은 감쇠상수가 보고되고 있다(Abercrombie, 1995).

한반도에서는 원자력발전소를 포함한 산업지대를 지나고 있는 양산단층(Fig. 1)의 지진활동이 주목되고 있다. 이 단층부근에서 서기 779년에는 100여명의 사상자를 낸 지진이 발생한 바 있으며(이기화, 1998),

*E-mail: chungtw@sejong.ac.kr

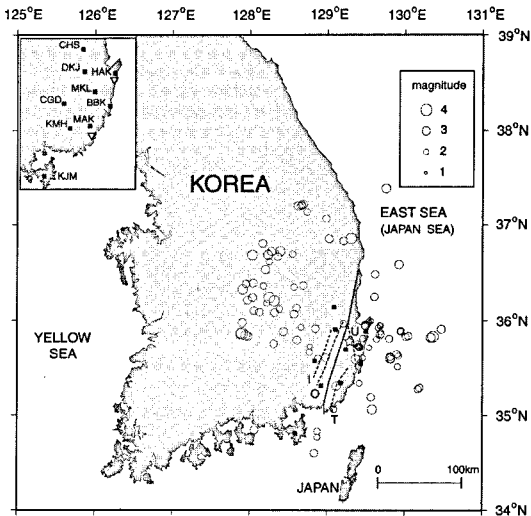


Fig. 1. Map of Korea showing seismic stations (solid squares), epicenters (open circles) of 121 earthquakes used in this study, and the Yangsan fault systems. Solid line represents the main fault while dashed lines are subfaults: symbols I, O, U, and T show the Miryang fault, the Moryang fault, the Ulsan fault, and the Tongre fault, respectively. An asterisk represents the epicenter of the earthquake of June 26, 1997 (M 4.3). The inset in the upper left shows atomic power plants (reverse triangles) and the seismic stations of KIGAM with the abbreviation names.

최근 1997년 6월 26일에는 한반도에서는 비교적 큰 규모 4.3의 경주지진이 발생하였다.

양산단층은 주단층이 북북동-남남서로 약 200km 길이며, 밀양, 모량, 울산 그리고 동래단층 등의 부속단층이 단층계를 이루고 있다(Fig. 1). 이들 단층은 백악기 퇴적층과 이후 제 3기에 이르는 기간에 관입한 화성암 지역에 분포한다(Chang, 1987). 이들 단층을 중심으로 제 3기초에 우수향 주향이동이 일어났으며(Sillitoe, 1977; Otsuki and Ehiro, 1978), 현재도 단층운동의 가능성이 제기되고 있다(Lee *et al.*, 1984; Lee and Jin, 1991; 최위찬 외, 1998).

이 단층지역에서 1994년부터 한국자원연구소에 의해 덕정리(DKJ), 명계리(MKL), 청송(CHS), 방방골(BBK), 학계리(HAK), 김해(KMH), 매곡리(MAK), 거제면(KJM), 청도(CGD)의 9개소 지진관측망이 운영되고 있으며(Fig. 1), 이 자료를 이용하여 주로 Coda Q^1 조사가 이루어져 왔다(전명순 외, 1995; 박창엽, 1997; Lee and Lee, 1998; 김성균·김복희, 1999). 최근들어 동일한 관측망에 기록된 10 지진자

료로부터 두관측점법(Chun *et al.*, 1987)에 의한 P파 Q^1 값(이하 Q_p^1) 가 김성균 외(1999)에 의해, 31 지진자료의 Coda파 감쇠로부터 S파 Q^1 값(이하 Q_s^1) 을 추정된 연구가 김성균 외(2000)에 의해 보고되어 있다. 최근 정태웅·사포(2000)는 한 관측점의 100여 지진자료를 확장 Coda 규격화법(Yoshimoto *et al.*, 1993)에 의해 분석하였다. 동일한 규격화법을 바탕으로, 본 연구에서는 9점의 지진관측점에 기록된 1994년부터 2000년의 기간 동안 발생한 120여 지진자료를 이용하여 Q_p^1 및 Q_s^1 을 구하였다. 본 연구 결과값에 대한 다른 연구자 및 다른 지역에 대한 비교연구는 정태웅(2001)에 이미 제시되어 있으며, 여기서는 자료의 해석과정을 자세히 소개하기로 한다.

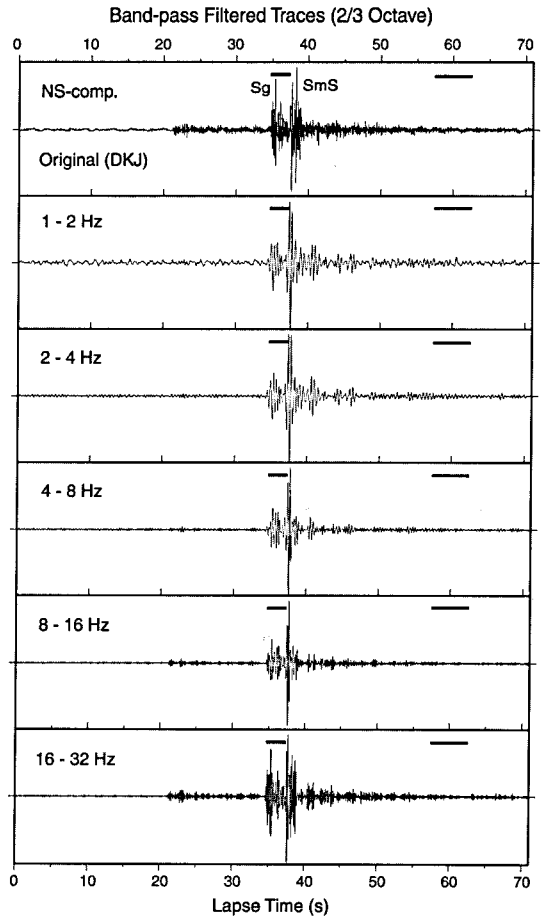


Fig. 2. Example of time windows of direct S-waves and coda for original (top) and bandpass-filtered seismograms recorded at station DKJ. The time window of a direct S-waves (left solid line) is narrower than that of coda (right solid line) to exclude the high amplitude phase of SmS.

확장 Coda 규격화법

본 연구에서 이용된 확장 Coda 규격화법은 Coda 진폭 스펙트럼 C , S파 진원 스펙트럼 S_s , P파 진원

스펙트럼 S_p 사이의 다음 관계에 바탕을 두었다.

$$C(f, t_c) \propto S_s(f) \propto S_p(f) \quad (1)$$

여기서 f 는 주파수, t_c 는 진원 발생시부터 일정경과

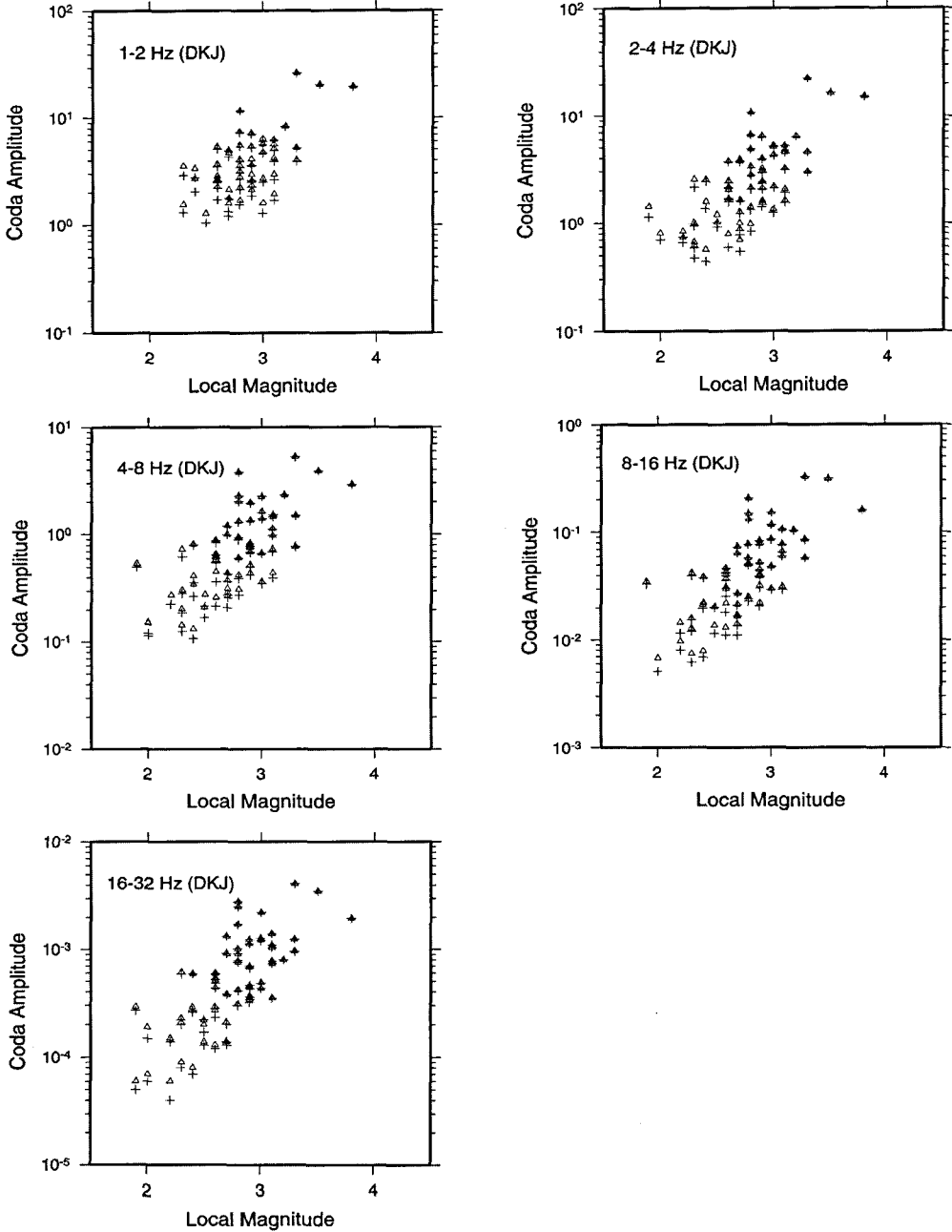


Fig. 3. Example of coda spectral amplitude variation by the noise subtraction at station DKJ. Triangles and crosses refer to before and after the noise power subtraction, respectively.

시간을 의미한다. 경과시간은 S파 주시시간의 1.5배에서 2배 시간을 골랐다. 식(1)의 첫 비례관계는 $C(f, t_c)$ 가 진원거리와는 독립적이어서 S파 직접파를 Coda 파로 나누어주므로써 두 파에 공통적으로 존재하는 진원 및 수신함수를 제거할 수 있다(Aki, 1980). 두 번째 비례관계는 작은 규모의 지진에서 P파 대 S파 지진원 스펙트럼비는 일정하다는 가정에서 비롯된다. 지진파의 방사형태의 차이는 다수의 지진자료를 씌으로써 제거된다.

식(1)의 비례관계를 바탕으로 서로 다른 지진의 P, S 직접파는 거리에 따라 다음 식으로 한 도표상에 나타낼 수 있게 된다.

$$\ln \left[\frac{A_p(f, r)}{C(f, t_c)} \right] = -\frac{\pi f}{Q_p(f)V_p} r + \text{const}(f) \quad (2)$$

$$\ln \left[\frac{A_s(f, r)}{C(f, t_c)} \right] = -\frac{\pi f}{Q_s(f)V_s} r + \text{const}(f) \quad (3)$$

여기서 $A_p(f, r)$ 와 $A_s(f, r)$ 는 각각 진앙거리 r (km), 주파수 f (Hz)에서의 상하동 성분의 P 직접파의 최대진폭 및 남북성분의 S 직접파의 최대진폭을 나타낸다.

Coda 스펙트럼 진폭은 $t_c = 60$ 초를 중심으로 5초의 시간창에 대한 진폭의 평균값에서 도출하였다. P파 및 S파 직접파 역시 5초의 시간창에서 최대진폭을 구하였는데, 어떤 S파자료의 경우 직접파(Sg) 보다 큰 후속파인 모호반사파(SmS)를 제외하기 위해 시간창을 좁혔다(Fig. 2). 또한 120km 보다 먼 진앙거리의 일부 자료는 Sg가 후속파인 SmS 혹은 Lg와의 구분이 용이하지가 않아 본 분석에서 제외하였다.

자료 중에서 신호 대비 잡음이 2배 미만이면 분석에서 제외하였으며, 그 밖의 자료에 대해서는 P파 초동도달 전 5초의 시간창에서 잡음 파워스펙트럼을 구하여 P 및 S 직접파, Coda 스펙트럼에서 제하였다. 잡음을 제거한 결과, 작은쪽 규모 지진의 Coda 스펙트럼 진폭이 작아져서 규모와 Coda 스펙트럼 사이의 선형성이 증가되었다(Fig. 3). 이 선형성은 Coda 관찰에서 제기된 바 있으며(Tsumura, 1967a, b, Tsujiura, 1978), 이 분석에서 잡음제거가 유효하다는 것을 알 수 있다.

Coda 규격화법은 진원주위에 지진파 에너지가 골고루 일정하게 분포한다는 가정에 근거를 두고 있다. 이러한 가정의 한계에 대하여 다중산란모델 이론(e.g. Gao *et al.*, 1983)을 통하여 연구가 이루어져 왔

으나, 여러 가지 현상 및 실험 결과를 통하여 Coda 규격화법의 유용성이 확증되고 있다(e.g. Aki, 1980; Sato and Fehler, 1998).

자 료

양산단층 일대에서 자원연구소(KIGAM)가 운영하는 관측망은 DKJ, MKL, CHS, BBK, HAK, KMH, KJM, MAK, CGD의 9점이며, 모두 3성분 지진계이다(지현철 외, 1996). 본 연구에서는 1994년 12월에서 2000년 2월 사이 근지진지의 707개 지진기록을 분석하였다. 392개 지진기록은 KIGAM에서 진원과 규모를 정한 109 지진에서 나왔으며, 45개 지진기록은 본 연구에서 김상조·김소구(1983)의 이층지각 구조를 바탕으로 진원결정프로그램 HYPO71(Lee and Lahr, 1972)으로 진원을 구한 12개 지진으로부터 도출하였다. 나머지 270개 지진기록은 비교적 먼 지진의 한 관측점 혹은 두 관측점 자료에서 구하였는데, 이들 기록은 진원을 알 수가 없으며 진앙거리는 초기미동 지속시간(S-P시간)에서 추정하였다. 모든 지진의 규모는 1.8에서 3.9 사이의 값이다.

Coda파 시간창과 동일한 5초의 P파 시간창을 확보하기 위해 40km 이상의 진앙거리 자료를 분석대상으로 하였다. 또한 200km 부근의 진원거리에서 Coda 지속시간, 규모 및 진원거리 사이의 관계가 달라진다는 관측사실(Tsumura, 1967b)로부터 진앙거리 160km 이내로 분석대상을 제한하였다.

Q_p^{-1} 및 Q_s^{-1} 측정

각 지진기록에서 저주파 변동성분을 제한다음, 전체 시간의 10%에 해당하는 시작 및 끝시간 부분에 cosine 감쇠항을 곱한다(Hino, 1986). 그 후 자료에 1~2, 2~4, 4~8, 8~16 및 16~32Hz의 대역필터를 적용한다. 자원연구소 자료는 대부분 초당 100점 간격으로 자료가 기록되어 있으나, 일부 초당 50점 간격의 자료가 존재한다. 초당 50점 간격의 자료는 25Hz 이상의 필터에서 Aliasing이 일어나므로 이들에 대해서는 16~32Hz 대신, 16~24Hz의 필터를 적용하였다. 필터된 P파 상하동 및 S파 남북성분 자료에서 최대진폭 $A_p(f, r)$, $A_s(f, r)$ 를 측정함과 동시에 각각의 성분에서 Coda 규격화를 위한 Coda 스펙트럼 진폭을 구하여 식(2), (3)에 대입한다. 이때 $V_p = 6$ km/s,

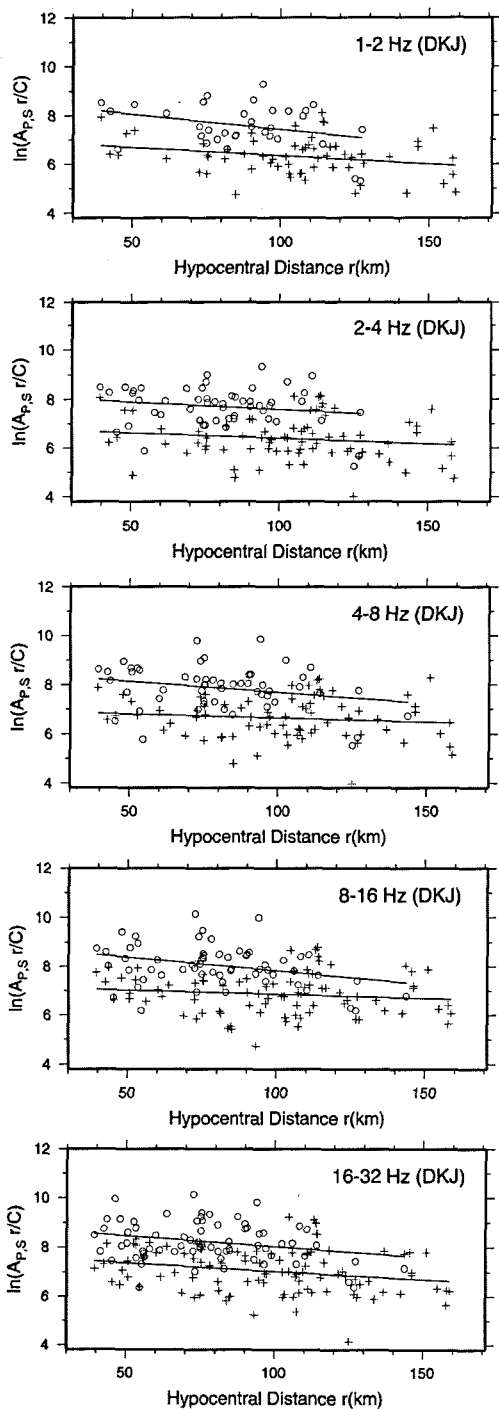


Fig. 4. The extended coda-normalized amplitude of P (crosses) and S (circles) waves recorded in DKJ. The best-fit lines from the least-squares estimate are expressed two solid lines: the upper and lower line is for S and P-wave amplitude, respectively.

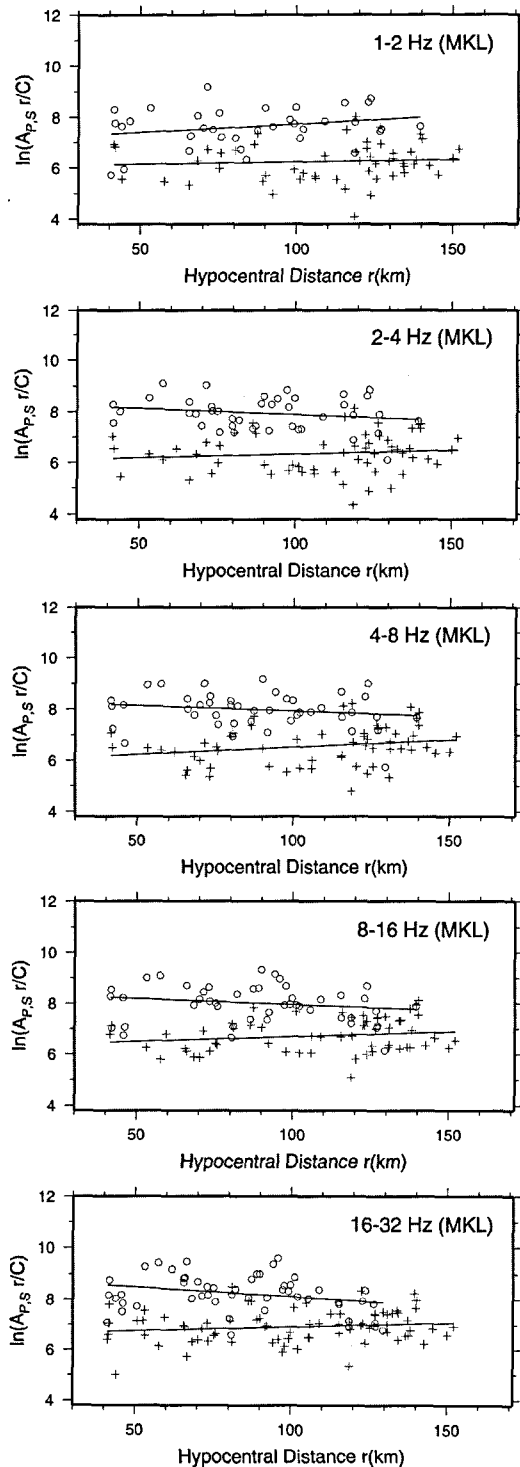


Fig. 5. The extended coda-normalized amplitude of P and S waves recorded in MKL. Parameters and symbols are the same as in Fig. 4.

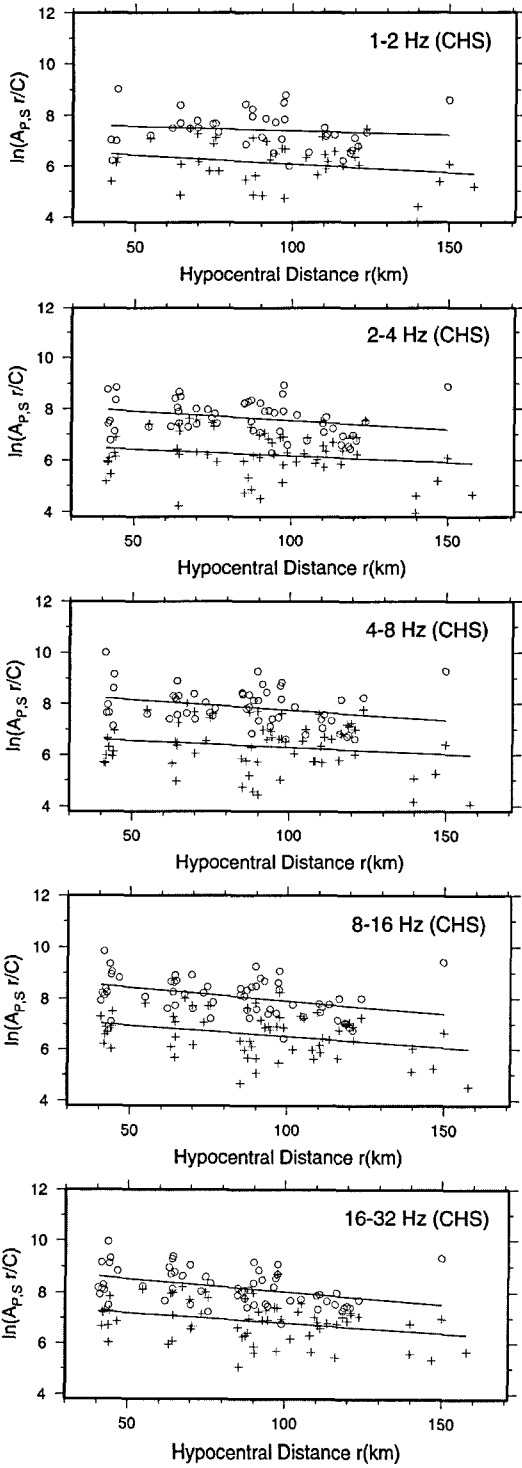


Fig. 6. The extended coda-normalized amplitude of P and S waves recorded in CHS. Parameters and symbols are the same as in Fig. 4.

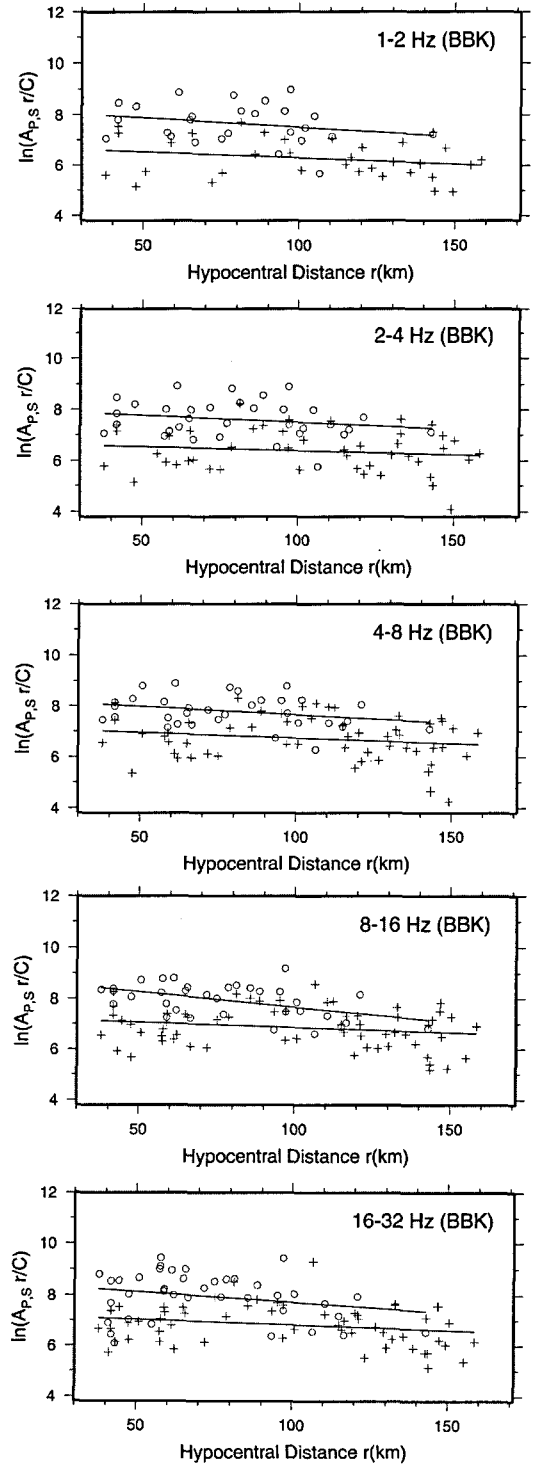


Fig. 7. The extended coda-normalized amplitude of P and S waves recorded in BBK. Parameters and symbols are the same as in Fig. 4.

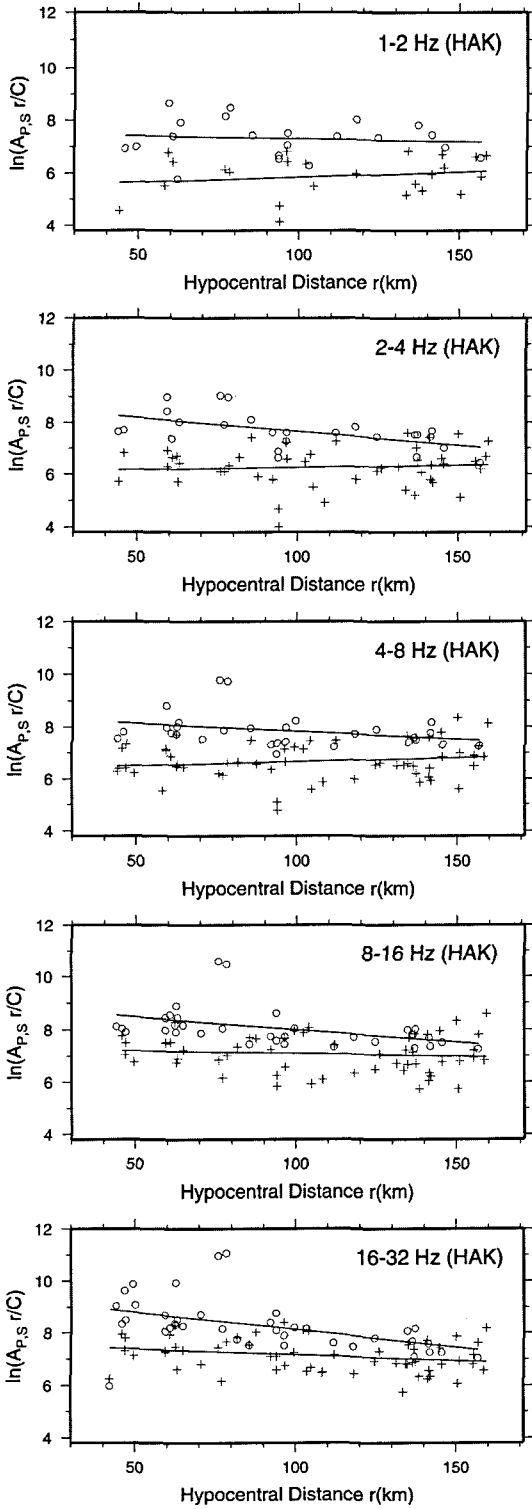


Fig. 8. The extended coda-normalized amplitude of P and S waves recorded in HAK. Parameters and symbols are the same as in Fig. 4.

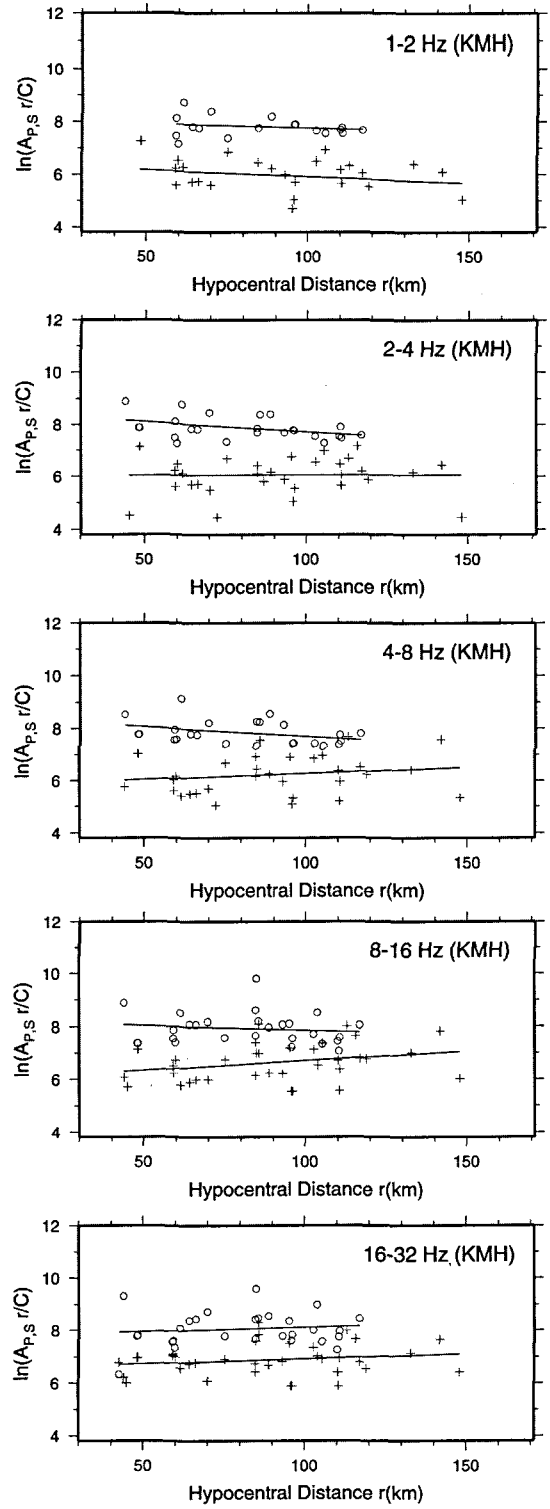


Fig. 9. The extended coda-normalized amplitude of P and S waves recorded in KMH. Parameters and symbols are the same as in Fig. 4.

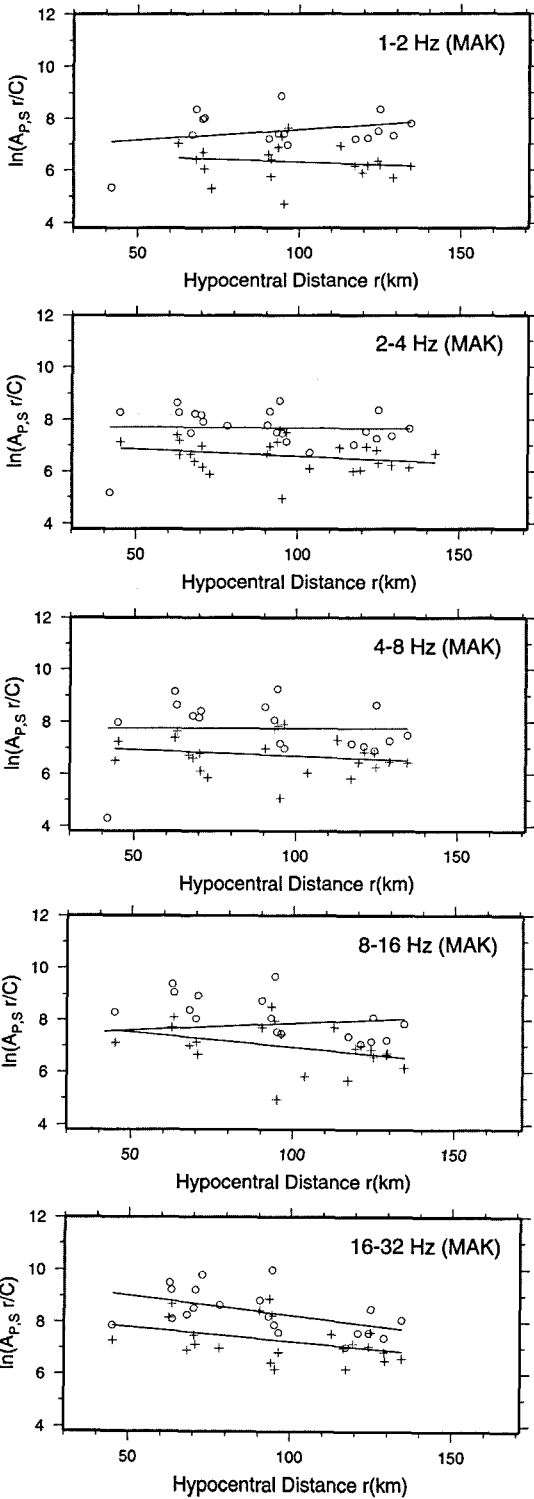


Fig. 10. The extended coda-normalized amplitude of P and S waves recorded in MAK. Parameters and symbols are the same as in Fig. 4.

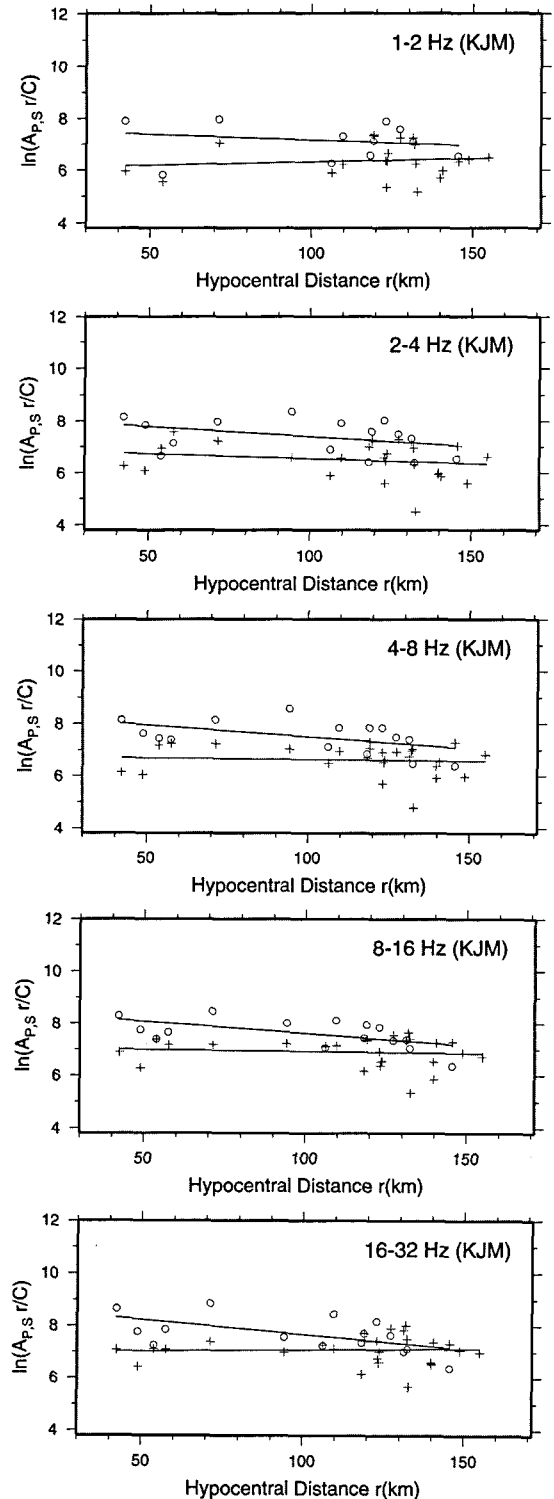


Fig. 11. The extended coda-normalized amplitude of P and S waves recorded in KJM. Parameters and symbols are the same as in Fig. 4.

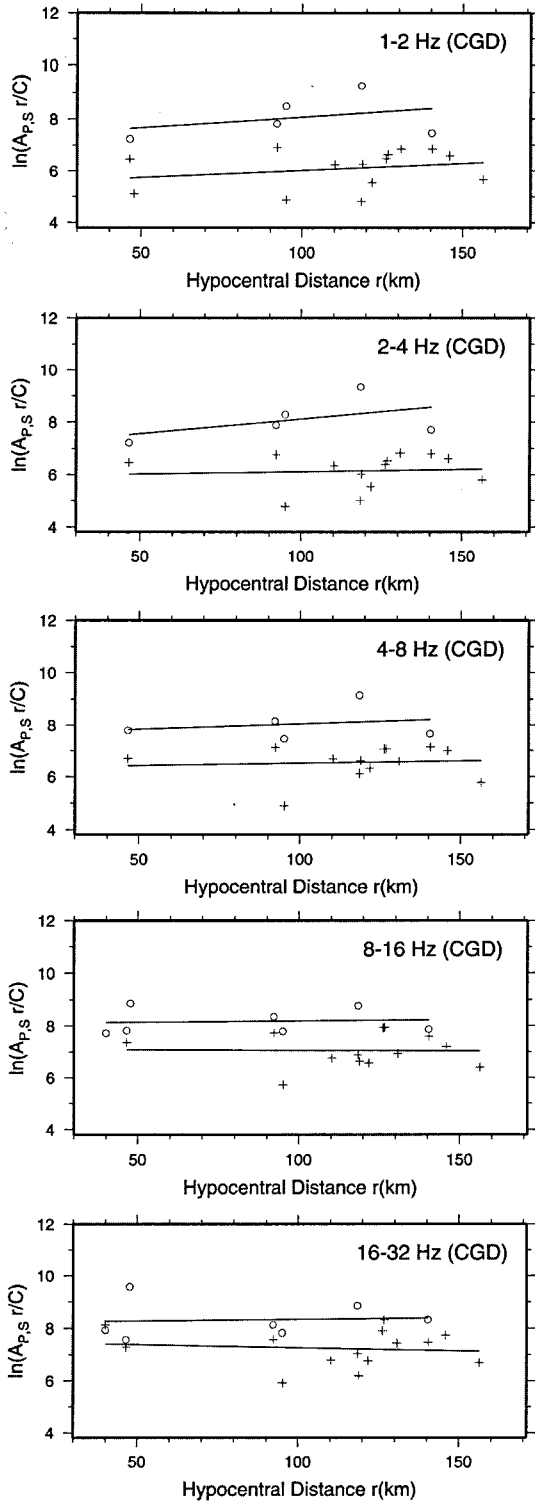


Fig. 12. The extended coda-normalized amplitude of P and S waves recorded in CGD. Parameters and symbols are the same as in Fig. 4.

$V_s = 3.5\text{km/s}$ 로 가정하였는데, 회귀직선의 기울기를 구하면 이값이 Q_p^{-1} 및 Q_s^{-1} 가 되는 것이다(Fig. 4).

자료는 필터 주파수가 높을수록 많아지는데, 관측 자료가 가장 많은 DKJ를 예를 들면, 1~2, 2~4, 4~8, 8~16, 16~32Hz에서의 P파 자료수는 각각 61, 80, 81, 92, 110이며, S파 자료수는 37, 61, 60, 66, 80이다. 주파수 1~2Hz에서 자료가 적은 것은 해안가 파도에 의한 신호대비 잡음비의 악화 때문인 것으로 판단된다. 높은 주파수의 자료가 낮은 주파수 자료에 비해 좋은 상관관계를 보여준다. 가장 높은 주파수대인 16~32Hz의 P파 자료수는 MKL, CHS, BBK, HAK, KMH, MAK, KJM, CGD에서 각각 83, 65, 59, 58, 37, 32, 27, 14개이며 S파 자료수는 각각 54, 53, 39, 39, 29, 30, 16, 7개이다. 자료수가 적은 관측점 KMH, MAK, KJM, CGD에서는 회귀선 기울기가 양의 값이 되어 Q^{-1} 의 값을 구할 수가 없는데, 이는 이들 관측점 자료가 부족한 연유로 판단된다. 그러나, 자료가 두 번째로 많은 MKL의 P파에서도 회귀선 기울기가 양의 값이 되는데, 이는 진앙거리 110~150km의 북서방향 지진에서 전파되어 오는 큰 진폭 때문이다.

Fig. 13에서 각 관측점의 Q_p^{-1} 는 $(7 \pm 2) \times 10^{-3}$ 에서 $(5 \pm 4) \times 10^{-3}$ 으로, Q_s^{-1} 는 $(5 \pm 4) \times 10^{-4}$ 에서 $(5 \pm 2) \times 10^{-4}$ 로 주파수가 1.5Hz에서 24Hz로 늘어남에 따라 줄어드는 강한 주파수 의존성을 보여준다. 또한 주파수가 높을수록 수직막대의 길이로 도시된 Q^{-1} 값의 표준편차 값이 작아지고 있음이 관찰된다. 이들 값의 지수 회귀선은 Q_p^{-1} 가 $0.009(\pm 0.003)f^{1.05(\pm 0.14)}$, Q_s^{-1} 가 $0.004(\pm 0.001)f^{0.70(\pm 0.14)}$ 이다.

그림의 기호는 자료의 양에 따라 내림차순으로 배열하였으며, 비교적 자료가 많은 관측점은 흑색기호로 표시되어 있는데, 이들은 대체로 지수회귀선 근방에 분포한다. Q_p^{-1} 의 경우, 동일지역에서 김성균 외(1999)는 두 관측점 연장선상 지진의 스펙트럼비로부터 Q^{-1} 값을 도출하는 두관측점법(Chun et al., 1987)에 의한 해석을 행한 바, 본 연구결과의 지수회귀선보다 낮은 값을 보이고 있으나 오차의 범위내에서 일치하는 값이다(Fig. 13). 김성균 외(2000)는 Q_s^{-1} 에 대하여는 깊이에 따라 변하는 Coda 감쇠로부터 S파를 추정하는 방법(Kosuga, 1992)에 의해 18km 보다 얕은 상부지각 값과 그보다 깊은 하부지각 값을 도출하였는데, 하부지각 값이 본 연구결과의 지수회귀선에 오차의 범위내에서 일치하는 값을 보이고 있다.

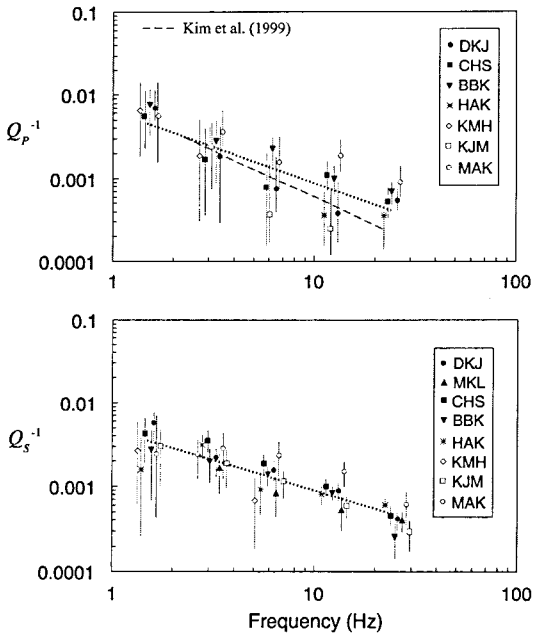


Fig. 13. Q_p^{-1} (upper) and Q_s^{-1} (lower) derived from this study. The error bar indicates the standard deviation. The stations in the symbol remark located right side of the plots are arranged in descending order of the number of data in the station. The dashed solid lines refer to the fitted values by the least squares. The studies by Kim *et al.* (1999, 2000) is denoted by ash-colored dashed lines; the upper and lower line in the lower diagram indicate the value of upper and lower crust, respectively (Kim *et al.*, 2000).

토 의

Yoshimoto *et al.*(1998)은 수치실험을 통하여 지진 진원구 주위 임의의 100만점에서 진폭 측정결과, S 파보다 P파 분산이 더 크다는 것을 보였다. 이와같은 사실로 미루어, MKL 관측점의 P파 자료가 S파 자료에 비해 분산이 큰 것은 P파와 S파의 진원 방사형태의 차이에 일부 기인한 것으로 판단된다(Fig. 5). 이와같은 방사형태의 차이를 보정하기 위해서는 200점 이상의 자료가 필요한 것으로 제안되고 있다(Yoshimoto *et al.*, 1998). 관측점 DKJ, CHS, BBK는 방사형태 차이의 영향이 크지 않은 듯 하다(Figs. 4, 6, 7).

P파 자료의 분산을 일으키는 또 하나의 요인은 지진규모의 차이이다. 식(1)은 규모차이가 커지면 모서리 주파수(Corner frequency)의 변화와 함께 진원 스펙트럼울의 변화가 일어난다. 그러나, 본 연구자료의 규모범위보다 큰 2.1에서 5.5의 규모사이에서 Q_p^{-1} 의

변화는 없는 것으로 보고되고 있어(Yoshimoto *et al.*, 1993), 본 연구에서 규모 차이에 의한 분산은 무시해도 된다.

Abercrombie(1995)의 미국 서부지역 우물관측을 비롯하여 북카리브지역(Frankel, 1982), 프랑스 피레네지역(Modiano and Hatzfeld, 1982) 등지에서 주파수와는 무관한 감쇠상수가 보고되고 있으나, 일반적으로 1Hz 이상의 주파수에서는 주파수가 높아짐에 따라 감쇠상수값이 낮아지는 주파수 의존성이 보고되고 있으며, 본 지역도 이러한 주파수 의존성을 보이고 있다. 주파수 의존성을 보이는 세계각지의 감쇠상수를 비교하면 절대값은 큰 차이를 보이는데 반해 주파수의 지수는 비교적 비슷한 값을 보이고 있다(정태웅, 2001).

Sato and Fehler(1998)는 지진이 빈발하는 조구조 활동지역이 조구조 안정지역에 비해 지표면에서 측정된 Q^{-1} 값이 비교적 높다는 것을 보여주고 있다. 이러한 높은 Q^{-1} 값은 활성단층이 움직임에 따라 생긴 지각의 균열에 연유하는 것으로 해석되고 있다(Aki, 1980; Blakeslee *et al.*, 1989; Lees and Lindley, 1994). 본연구의 지수회귀선은 김성균 외(1999)의 연구와 함께 세계적으로도 매우 낮은 Q^{-1} 값을 보여준다(정태웅, 2001). 본연구에서는 양산단층의 활동성과 연관된 지각의 균열을 시사하는 높은 Q^{-1} 값(예; Lees and Lindley, 1994)을 찾지 못하였다.

결 론

지진발생이 우려되고 있는 한국 남동부 양산단층지역의 지진과 감쇠연구는 강진동의 정량적 연구를 위해서도 매우 필요하다. 이 지역 관측망의 미소지진자료에 대하여 확장 Coda 규격화법을 적용하여 Q_p^{-1} 및 Q_s^{-1} 값을 동시에 구하였다. Q_p^{-1} 는 $(7 \pm 2) \times 10^{-3}$ 에서 $(5 \pm 4) \times 10^{-3}$ 으로, Q_s^{-1} 는 $(5 \pm 4) \times 10^{-4}$ 에서 $(5 \pm 2) \times 10^{-4}$ 로 주파수가 1.5Hz에서 24Hz로 늘어남에 따라 줄어드는 주파수 의존성을 보이며, 이들의 지수회귀선값은 Q_p^{-1} 가 $0.009f^{1.05}$, Q_s^{-1} 가 $0.004f^{0.70}$ 이다.

사 사

본 연구는 한국과학기술부 자연재해방재기술사업 '지진원 및 지진과 전달특성 연구(과제번호 006109)'에 의해 수행되었으며, 일부 한국과학재단 특정기초

연구(과제번호: 1999-2-311-005-3)의 지원이 있었다.

참고문헌

- 김상조 · 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질학회지, 16, 51-61.
- 김성균 · 김복희, 1999, 경상분지에서의 Coda파의 감쇠특성, Proceeding of EESK Conference-Spring 1999, 35-40.
- 김성균 · 전명순 · 김준경, 1999, 경상분지에서의 P파 감쇠. 지질학회지, 35, 223-228.
- 김성균 · 박윤경 · 전명순, 2000, 한반도 남동부의 Q 구조. 지질학회지, 36, 529-544.
- 박창업, 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), 1-16.
- 정태웅, 2001, 한국남동부 지각의 P, S파 감쇠구조 비교연구. 한국지구과학회, 22, 112-119.
- 정태웅 · 사또, 2000, 덕정리 지진자료를 이용한 한국남동부 지역 지각의 P, S파 감쇠구조 연구. 지구물리, 3, 193-200.
- 지현철 · 전정수 · 신인철, 1996, 경상분지에서의 지진연구 (III). 한국자원연구소 보고서, KR-96(C)-4, 127 p.
- 최위찬 · 이동영 · 이봉주 · 류충렬 · 최범영 · 최성자 · 조등룡 · 김주용 · 이창범 · 기원서 · 양동윤 · 김인준 · 김유숙 · 유장한 · 채병곤 · 김원영 · 강필중 · 유일현 · 이희권, 1998, 활성단층 조사평가 연구-한반도 동남부 지역. 한국자원 연구소 보고서, KR-98(C)-22, 301 p.
- Abercrombie, R.E., 1995, Earthquake source scaling relationship from -1 to 5 M_L using seismograms recorded at 2.5-km depth. Journal of Geophysical Research, 100, 24015-24036.
- Aki, K., 1980, Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 21, 50-60.
- Blakeslee, S., Malin, P., and Alvarez, M., 1989, Fault-zone attenuation of high-frequency seismic waves. Geophysical Research Letter, 16, 1321-1324.
- Chang, K.H., 1987, Cretaceous strata. In: Lee, D.S. (ed.), Geology of Korea, Kyohak-Sa Publishing Company, Seoul, 175-193.
- 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.
- Frankel, A., 1982, The effects of attenuation and site response on the spectra of microearthquakes in the north-eastern Caribbean, Bulletin of the Seismological Society of America, 72, 1379-1402.
- 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.
- 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.
- Hino, M., 1986, Spectral Analysis. Asakura-Shoten, Tokyo, 300 p (in Japanese).
- 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.
- Lee, K., Jeong, B.I., Kim, Y.H., and Yang, S.J. 1984, A geophysical study of the Yangsan fault area. Journal of Geological Society of Korea, 20, 222-240.
- Lee, K. and Jin, Y.G., 1991, Segmentation of the Yangsan fault system: Geophysical studies on major faults in the Kyeongsang basin. Journal of Geological Society of Korea, 27, 434-449.
- Lee, W.H.K. and Lahr, J.C., 1972, HYPO71: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes. U. S. Geological Survey Open-File Report, 75-311.
- Lee, W.S. and Lee, K., 1998, Q estimates using the coda waves in the Kyungang Basin. Proceedings of EESK Conference - Fall 1998.
- Lees, J.M. and Lindley, G.T., 1994, Three-dimensional attenuation tomography at Loma Prieta: Inversion of t^* for Q. Journal of Geophysical Research, 99, 6843-6863.
- Modiano, T. and Hatzfeld, D., 1982, Experimental study of the spectral content for shallow earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, 72, 1739-1758.
- Otsuki, K. and Ehiro, M., 1978, Major strike-slip faults and their bearing on spreading in the Japan Sea. Journal of Physics of the Earth (supplement), 26, 537-555.
- Sato, H. and Fehler, M.C., 1998, Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth, Springer-Verlag New York, Inc., 308 p.
- Sillitoe, R.H., 1977, Metallogeny of an Andean type continental margin in South Korea, implications for opening of the Japan Sea. In: M. Talwani and W.C. Pitman III (eds.), Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back Arc Basins, Maurice Ewing Series volume 1, AGU, Washington, D.C., 303-310.
- Tsujiura, M., 1978, Spectral analysis of the coda waves from local earthquakes, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 53, 1-48.
- Tsumura, K., 1967a, Determination of earthquake magnitude from duration of oscillation, Zisin, 20, 30-40 (in Japanese).
- Tsumura, K., 1967b, Determination of earthquake magni-

tude from total duration of oscillation. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 45, 7-18.

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.

Yoshimoto, K., Sato, H., Ito, Y., Ito, H., Ohminato, T., and Ohtake M. 1998, Frequency-dependent attenuation of high-frequency P and S waves in the upper crust in western Nagano, Japan. Pure Applied Geophysics, 153, 489-502.

2001년 3월 27일 원고 접수

2001년 11월 17일 수정원고 접수

2001년 12월 1일 원고 채택