

남한 김천 · 목포 일대 지각의 Q 값 분석

도지영 · 이윤중 · 경재복*

한국교육대학교 지구과학교육과, 363-791 충북 청원군 강내면 다락리 산7번지

Analysis of Q Values on the Crust of the Kimcheon and Mokpo Regions, South Korea

Ji-Young Do, Yoon-Joong Lee and Jai Bok Kyung*

Department of Earth Science Education, Korea National University of Education,
Chung-Buk 363-791 Korea

Abstract: The physical properties of the central and southwestern crust of South Korea were estimated by comparing values of Q_p^{-1} and Q_s^{-1} in the Kimcheon and Mokpo areas. In order to get Q_p^{-1} and Q_s^{-1} values, seismic data were collected from two stations of the KIGAM network (KMC and MUN) and four stations of the KMA network (CPN, KUC, MOP, and WAN). An extended coda-normalization method was applied to these data. Estimates of Q_p^{-1} and Q_s^{-1} show variations depending on frequency. As frequencies vary from 3 Hz to 24 Hz, the estimates decrease from $(1.4 \pm 3.9) \times 10^{-3}$ to $(2.3 \pm 3.5) \times 10^{-4}$ for Q_p^{-1} and $(1.8 \pm 1.3) \times 10^{-3}$ to $(1.9 \pm 1.5) \times 10^{-4}$ for Q_s^{-1} in central South Korea, and $(5.9 \pm 4.8) \times 10^{-3}$ to $(2.2 \pm 3.8) \times 10^{-4}$ for Q_p^{-1} and $(0.5 \pm 2.8) \times 10^{-3}$ to $(1.8 \pm 1.6) \times 10^{-4}$ for Q_s^{-1} in southwestern South Korea. According that a frequency-dependent power law is applied to the data, the best fits of Q_p^{-1} and Q_s^{-1} are $0.003f^{-0.49}$ and $0.005f^{-1.03}$ in central South Korea, and $0.026f^{-1.47}$ and $0.001f^{-0.49}$ in southwestern South Korea, respectively. These values almost correspond to those of seismically stable regions although Q_p^{-1} values of southwestern South Korea are a little high due to lack of data used.

Keywords: Kimcheon, Mokpo, Q_p^{-1} , Q_s^{-1}

요약: 본 연구에서는 김천과 목포 대의 Q_p^{-1} 과 Q_s^{-1} 을 비교함으로써 남한 중·서부 일대 지각의 물리적 성질을 알아보았다. Q_p^{-1} 과 Q_s^{-1} 은 한국지질자원연구원에서 운영중인 2개 관측소인 KMC(김천), MUN(무안) 지진 자료와 기상청에서 운영하는 4개 관측소인 CPN(추풍령), KUC(거창), MOP(목포), WAN(완도) 지진 기록을 바탕으로 확장 코다 규격화법을 이용하여 구하였다. 남한 중부의 Q_p^{-1} 은 $(1.4 \pm 3.9) \times 10^{-3}$ 에서 $(2.3 \pm 3.5) \times 10^{-4}$, Q_s^{-1} 은 $(1.8 \pm 1.3) \times 10^{-3}$ 에서 $(1.9 \pm 1.5) \times 10^{-4}$ 이고, 남한 남서부의 Q_p^{-1} 값은 $(5.9 \pm 4.8) \times 10^{-3}$ 에서 $(2.2 \pm 3.8) \times 10^{-4}$, Q_s^{-1} 값은 $(0.5 \pm 2.8) \times 10^{-3}$ 에서 $(1.8 \pm 1.6) \times 10^{-4}$ 으로 모두 주파수가 3.0 Hz에서 24 Hz로 늘어남에 따라 그 값이 감소하는 주파수 의존적 특성을 보인다. 이들 값을 주파수의 지수 형태로 나타내면 중부는 Q_p^{-1} 이 $0.003f^{-0.49}$, Q_s^{-1} 이 $0.005f^{-1.03}$, 남서부는 Q_p^{-1} 이 $0.026f^{-1.47}$, Q_s^{-1} 이 $0.001f^{-0.49}$ 로 이 값들은 지진학적으로 안정한 지역의 값과 거의 유사하다. 그러나 남서부의 Q_p^{-1} 값이 다소 높은데, 이는 자료수의 부족 때문이라고 추정된다.

주요어: 김천, 목포, Q_p^{-1} , Q_s^{-1}

서론

지진파의 감쇠 특성에 대한 연구는 지구 내부의 구성물질에 대한 귀중한 정보를 제공하게 되며, 강진

동의 전파에 따라 진폭이 어떻게 변화할 것인가를 예측하는 공학적인 연구에 필수적이다. 지진학에서의 감쇠 특성은 지진파 중 P파 및 S파, Coda파, Lg파, 표면파 등을 대상으로 하고 있으며, 지역별 비교연구를 비롯하여 지구 심부의 비탄성적 성질에 대한 연구로까지 진전되고 있다(김성근, 1999a).

지구는 완전한 탄성체가 아닌 비탄성적인 성질을

*Corresponding author: jbkjung@knue.ac.kr

Tel: 82-43-230-3742

fax: 82-43-232-7176

지니고 있어 탄성파의 일종인 지진파는 탄성에너지 (E)의 일부(ΔE)가 열로 변환되면서 감쇠한다. 이러한 파동의 감쇠 정도를 Q (Quality Factor)를 써서 다음과 같이 나타낸다.

$$Q^{-1} = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta E}{E} \quad (1)$$

여기서 Q 는 특정의 주파수를 가진 파동이 공간상에서 감쇠하는 정도를 나타내는 경우와 특정의 파수에 대한 파동의 시간적인 감쇠로 나누어 생각 할 수 있다(Aki and Richard, 1980).

감쇠 상수 Q^{-1} 는 매질의 종류와 상태, 지진파의 주파수에 의해 달라진다. 즉, 지역과 지진파의 전파경로에 따라 달라짐을 의미한다. 이러한 지진파의 감쇠 특성에 대한 연구는 지구내부의 구성물질에 대한 귀중한 정보를 제공하게 되며, 강진동의 전파에 따라 지진파형이 어떻게 변화할 것인가를 예측하는 공학적 연구에 필수적이다. 이러한 필요에 부응하여 세계적으로 Q^{-1} 의 조사가 광범위하게 이루어졌으며, 특히 지진 빈발지역이면서 인구가 많은 산업 도시 지역에

서 집중적으로 조사가 이루어지고 있다. 그 예로 뉴욕주와 남부 아프리카(Frankel et al., 1990), 멕시코 시티(Ordaz and Singh, 1992), 일본 Kanto (Yoshimoto et al., 1993; Kinoshita, 1994), 북부 그리스(Hatzidimitriou, 1995) 등이 있다. 이들 연구에 의하면 지진학적으로 활발한 지역이 비활동적인 지역보다 높은 Q^{-1} 값을 보이고 있다(Sato and Fehler, 1998).

우리나라에서는 주요 산업 지대인 한국 남동부 지역에서 다수의 연구(전명순 외, 1995; 박창업, 1997; 김성균 외, 1999b, 김성균 외, 2000; 정태웅과 Sato, 2000; Chung and Sato, 2001)가 있었으며, 그 외 충청 동부 지역(김규동 외, 2003)에서의 연구가 보고되고 있다. 이들 연구에서 대체로 Q_P^{-1} 과 Q_S^{-1} 값이 지진학적으로 안정한 지역과 유사한 매우 낮은 값을 보였으나, 연구자에 따라 얻어진 결과가 다소 차이가 나타나는 것은 사용된 자료의 구성과 분석방법의 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

남한 중부, 남서부에서 Q_P^{-1} 과 Q_S^{-1} 의 값은 양질의 지진관측소의 부족으로 인해 아직까지 보고 되지 않았다. 본 연구에서는 남한 중부와 남서부의 한국지질

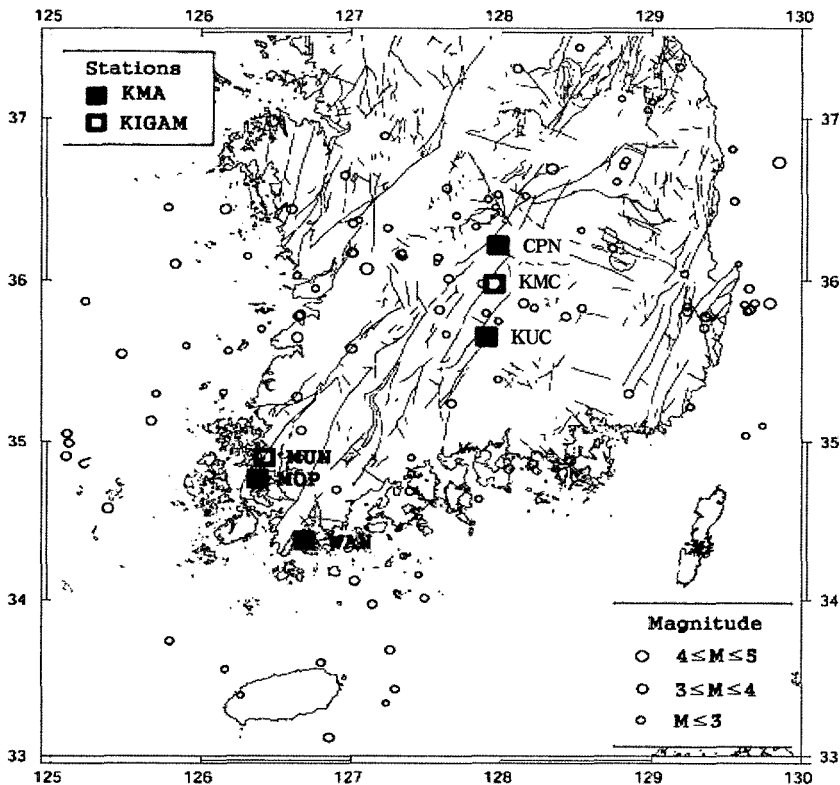


Fig. 1. Map of South Korea showing seismic stations and epicenters of earthquakes used in this study.

자원연구소 관측망 중 김천(KMC), 무안(MUN) 관측소에 의해 기록된 지진 자료와 기상청에서 운영되어온 관측망 중 추풍령(CPN), 거창(KUC), 목포(MOP), 완도(WAN) 관측소의 지진자료를 이용하였다. 대상 자료는 중부의 경우 2001년 1월부터 2004년 7월까지 기록된 지진 자료이며, 남서부는 1997년에서 2004년 8월 사이 무안(MUN) 관측소의 지진 자료와 2001년에서 2004년 8월 사이 목포(MOP)와 완도(WAN) 관측소에서 관측된 지진자료이다. 확장 Coda 규격화법을 이용하여 Q_p^{-1} 과 Q_s^{-1} 을 분석하였다. Fig. 1은 관측소 위치와 본 연구에 사용된 지진기록의 진앙을 보여준다. 한반도에서 지진은 연평균 20여회 정도 발생하며 대부분 규모 4 이하의 미소지진이다. 따라서 확장 Coda 규격화법이 단일 관측소 방법이지만 부족한 자료를 보충하기 위해서 남한 중부, 남서부 각각 3개 관측소의 자료를 합쳐서 분석하였다.

분석 방법 및 자료

Q의 정의

1969년 Keiiti Aki는 지진기록의 끝 부분에서의 연속적인 파열을 Coda파라 불렀다. 그는 지진기록의 끝부분은 전파거리가 길어짐에 따라 진폭이 줄어든다는 것을 관측하였다. 다시 말해 그는 Coda파가 진원 거리에 독립적으로 모든 관측소에서 유사한 진폭을 가진다는 것과 관측소간에 유사한 스펙트럼을 가짐을 관측했다. 즉, Coda파가 지구내부에 불규칙적으로 분포하는 불균질 매질에 의해 후방 산란된 S파라고 제안하였다(Aki, 1969).

Raoufian et al.(1978)는 실험 분석에서 coda 감소 방법이 잡음에 아주 민감하며, coda Q 값이 시간 창 의 길이에 의존함을 밝혔다. 이에 coda 창 의 시작은 진원시로부터 S파 주행시간의 2배보다 큰 경과시간에서 측정된다. Coda 진폭 감소는 진원 효과(e.g. Philips and Aki, 1986), 거리, 적어도 진원거리 100 km 이내에서의 방위각(Mayeda et al., 1992)에 독립적이고 주파수 대역에 의존적이다. 그러므로 Q는 지각의 국지적, 지역적 특성을 특징짓는데 사용될 수 있는 지구 물리학적 매개변수이다.

이러한 Coda파 감쇠정도, Q_c^{-1} 값이 크다는 것은 전파 중에 매질이 파동에너지를 많이 흡수하여 지진파의 진폭이 크게 감소한다는 의미이며, 이는 매질이 균열, 파쇄 등에 의해 불균질한 지역임을 시사한다.

확장 Coda 규격화법

본 연구에 이용된 확장 Coda 규격화법은 Coda 진폭 스펙트럼(C)이 S파 진원 스펙트럼(S_s)에 비례한다는 경험적 관측에 바탕을 둔다. 이것은 Coda 스펙트럼 진폭이 진원거리에 독립적이라는 것을 내포한다. 즉, 일반적으로 직접파와 Coda파에서 관측소 효과와 진원 항은 Coda 규격화법(Aki, 1980)에 의해 제거될 수 있다. 이 방법은 작은 규모의 지진에 대해 P파(S_p)와 S파의 진원 스펙트럼비가 일정하다는 가정에 의해 P파까지 확장된다(Yoshimoto et al., 1993). 이에 확장 Coda 규격화법은 다음 관계식에 기초한다.

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

여기서 f 는 주파수, t_c 는 진원 발생시로부터 일정 경과 시간을 의미한다.

진술한 Coda 규격화법으로부터 Q_p^{-1} 과 Q_s^{-1} 은 아

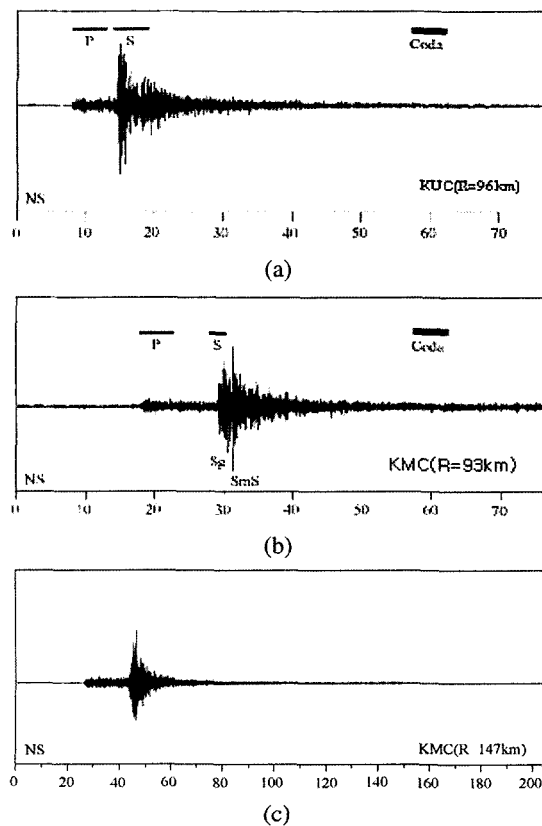


Fig. 2. (a) An example of time windows of P and S waves and Coda for raw seismogram. (b) S wave time window was narrowed. (c) An example of indistinguishable waveform for S_g , S_{mS} and L_g .

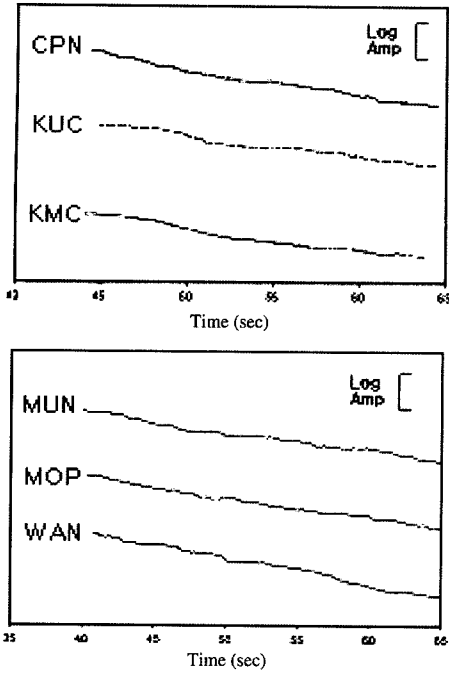


Fig. 3. The similarity of coda decay of three stations. The coda envelopes are band-passed filtered at f between 16 and 32 Hz. Each envelope is originated from different earthquakes whose hypocentral distance from the station of CPN, KUC, KMC, MUN, MOP, and WAN are 61, 96, 131, 91, 94 and 72 km, respectively,

래 식(Yoshimoto et al., 1993)을 이용함으로써 서로 다른 진원거리를 가지는 지진기록에서 구할 수 있다.

$$\ln\left(\frac{A_P(f, r)r}{C(f, t_c)}\right) = -\frac{\pi f}{Q_P(f)V_P} + \text{const}(f) \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{A_S(f, r)r}{C(f, t_c)}\right) = -\frac{\pi f}{Q_S(f)V_S} + \text{const}(f) \quad (3)$$

여기서 $A_P(f, r)$ 와 $A_S(f, r)$ 는 각각 진원거리 r (km), 주파수 f (Hz)에서의 U-D성분의 P 직접파의 최대진폭 및 N-S성분의 S 직접파의 최대진폭을 나타낸다.

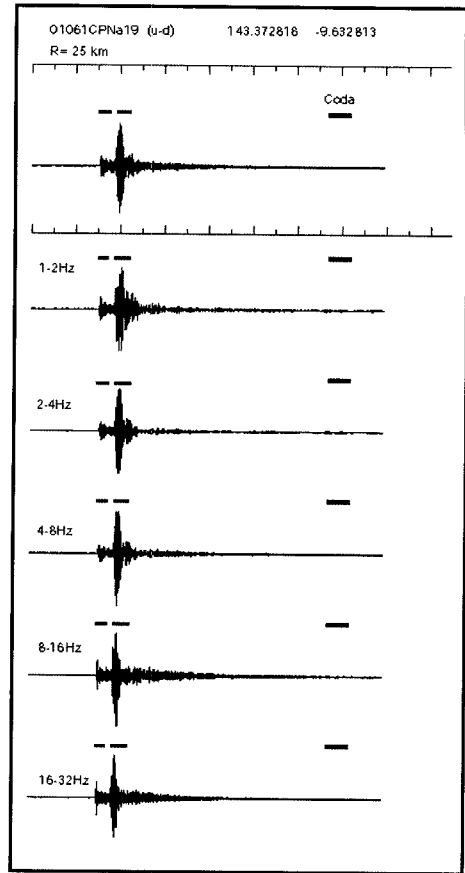


Fig. 4. Example of time windows of direct P waves and coda for original (top) and band-pass filtered seismograms recorded at seismic station (CPN).

Coda 스펙트럼 진폭($C(f, t_c)$)은 $t_c=60$ 초를 중심으로 5초의 시간 창에 대한 진폭의 제곱근 평균 값에서 도출하였다. P파 및 S파 직접파 역시 5초의 시간 창 내에서 최대진폭을 구하였다. Coda파의 경과시간과 P파 시간 창의 폭은 진원거리 40~160 km 사이로 제한하였다(Yoshimoto et al., 1993). S파 시간 창은 큰 모호반사파(SmS)를 제외시키기 위해 좁혔고, 진

Table 1. Description of KMA and KIGAM seismic observation network

	Station name		Latitude (N)	Longitude (E)	Natural freq.	Sample/sec	Seismometer
Central south Korea	KMA	CPN	36.217°	127.991°	1Hz	100	SS-1
		KUC	35.667°	127.908°	1Hz	100	SS-1
	KIGAM	KMC	35.984°	127.945°	1Hz	100	JC-V100
Southwestern south Korea	KMA	MOP	34.808°	126.376°	1Hz	100	SS-1
		WAN	34.389°	126.702°	1Hz	100	SS-1
	KIGAM	MUN	34.907°	126.429°	1Hz	100	JC-V100

Table 2. The number of data used for the estimation of Q_p^{-1} and Q_s^{-1} in this study

Frequency (Hz)	Central South Korea		Southwestern South Korea	
	P Wave	S Wave	P Wave	S Wave
1-2	18	11		
2-4	22	26	22	22
4-8	31	38	44	38
8-16	40	42	43	44
16-32	40	42	45	47

원거리 120 km 이상의 자료는 Sg, SmS, Lg를 구별하기 힘들어 제외시켰다. 또한 신호 파워 스펙트럼이 잡은 파워 스펙트럼의 2배보다 작은 경우 분석에서 제외시켰다(Fig. 2).

Coda규격화법은 초기에는 단일관측소 자료를 이용하였고, 이후 Frankel et al.(1990)에 의해 여러 개 관측소로 확장되었다. 일정 경과시간 이후 지진에너지가 공간적으로 균일하게 분포한다는 Coda과 개념에 바탕을 두고, Coda과 감쇠가 서로 다른 관측소들 사이에서 유사하다면 서로 다른 관측소의 자료는 식(2)와 식(3)를 이용해 하나의 도표에서 합쳐질 수 있다. 이전의 연구(e.g. Frankel et al., 1990; 경제복과 김규동, 2003)는 진원거리가 300 km까지 떨어져 있는 관측소를 합침으로서 적은 수의 자료에 대해 이루어졌다.

본 연구에서 각 관측소의 파형자료로부터 주파수별로 40-60초 사이 Coda 감쇠의 유사성을 조사하였다. Fig. 3은 16-32 Hz의 범위에서 필터링 된 남한 중·서부 각 관측소의 Coda envelopes이다. 세로축의 값은 로그 값으로 여기서는 각 관측소의 Coda 감쇠 정도를 비교하기 위함이므로, 그 수치는 큰 의미가 없어 생략하였다.

각 관측소는 약 100 km 범위 이내에 분포하며, Fig. 3에서 각 관측소가 유사한 Coda과 감쇠 모양을 보여주고 있으므로 본 연구에서는 중·서부 각각 세 관측소의 자료를 합침으로서 부족한 자료를 보충하였다.

자료

본 연구에서 남한 중부는 김천-거창일대의 2001년 1월에서 2004년 7월 사이의 지진기록을 분석대상으로 하여, 김천-거창일대에 설치된 지진 관측망 중 한 국지질자원연구원에서 운영중인 1개의 관측소(김천 KMC)에 기록된 75개 지진자료와 기상청에서 운영되어온 관측망 중 2개의 관측소(추풍령 CPN, 거창 KUC)의 지진기록 66개로 각각 나누어 분석하였다. 남한 남서부는 기상청에서 운영하는 관측망 중 MOP(목포), WAN(완도)의 2001년에서 2004년 8월 사이 지진자료와 한국지질자원연구원이 운영하는 관측망 중 MUN(무안)의 1997년에서 2004년 8월 사이에 발생한 근지 지진 중 58개 지진자료를 바탕으로 분석하였다.

각 관측소에는 고유주파수 1 Hz의 3성분(U-D, N-S, E-W) 속도 지진계가 설치되어 있다. 출력 신호는 100 samples/sec에서 16 bit의 해상도로 계수화 되어졌다. 각 관측계의 특성과 관측소의 위치를 Table 1에 나타내었다.

모든 지진 자료의 진원은 2층 지각구조 즉, 15 km 와 35 km의 깊이에서 경계 지어지고, 각각 5.98 km/s, 6.38 km/s의 P파 속력을 가지는 모델(김상조와 김소구, 1983)을 바탕으로 HYPO71을 이용해 결정하였다. 대상 지진자료의 국지 규모는 1.8에서 4.1 사이이다.

Q_p^{-1} 와 Q_s^{-1} 측정

각 지진기록에서 저주파 변동성분을 제한 다음, 전체 시간의 10%에 해당하는 시작 및 끝 시간 부분에 cosine 감쇠항을 곱한다(Hino, 1986). 그 후 자료에 1-2, 2-4, 4-8, 8-16, 16-32 Hz의 대역통과 필터를 적용한다(Fig. 4). Coda 진폭이 60초를 전후하여 기록이 잘려 나타나지 않는 경우는 다수의 양호한 지진 자료에서 Coda 감쇠 master curve를 이용하여 초기 경과시간에서의 Coda과로부터 추정하였으며, master

Table 3. Q_p^{-1} and Q_s^{-1} values with standard deviations

Frequency (Hz)	Central South Korea		Southwestern South Korea	
	Q_p^{-1}	Q_s^{-1}	Q_p^{-1}	Q_s^{-1}
2-4	0.00142±0.0039	0.00184±0.0013	0.00599±0.0048	0.00053±0.0028
4-8	0.00137±0.0017	0.00105±0.0005	0.00147±0.00164	0.00039±0.00088
8-16	0.00076±0.0007	0.00035±0.0003	0.00088±0.00087	0.00049±0.00036
16-32	0.00023±0.0003	0.00019±0.0001	0.00022±0.00038	0.00017±0.00016

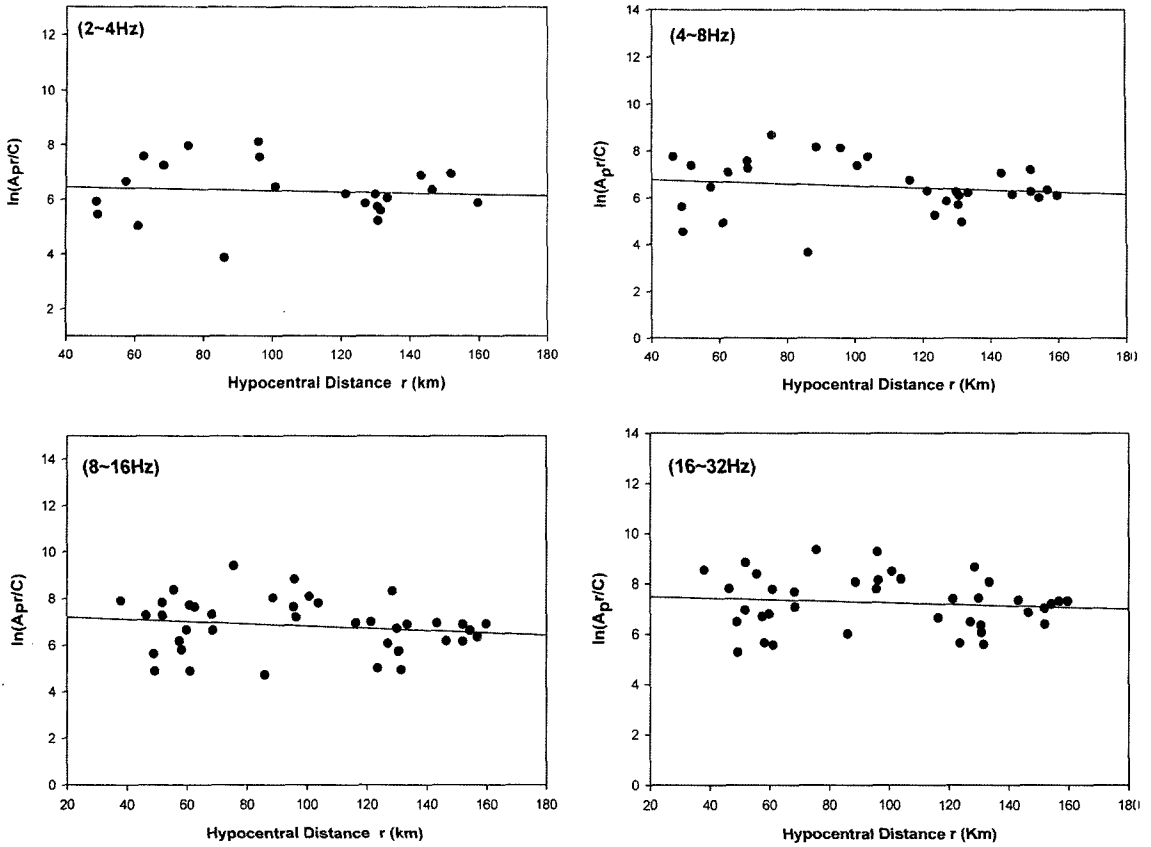


Fig. 5. Coda-normalized P waves amplitudes for each frequency band are plotted against hypocentral distance for CPN, KMC, and KUC stations. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate.

curve는 다수의 지진 자료에 대해 Coda 진폭 감소율의 평균을 구함으로써 얻었다. 각 필터 된 P파 상하동 및 S파 남북성분 자료에서 최대진폭 $A_p(f, r)$ 와 $A_s(f, r)$ 를 측정함과 동시에 각각의 성분에서 Coda 규격화를 위한 Coda 스펙트럼 진폭을 구하여 식 (2), (3)에 대입한다. 이때 $V_p = 6.0$ km/s, $V_s = 3.5$ km/s로 가정하였으며 각 관측소의 자료들을 합쳐 단일도표상의 회귀직선의 기울기를 구하면 이 값이 Q_p^{-1} 와 Q_s^{-1} 가 되는 것이다(Table 3).

Coda 규격화 분석에서 자료를 합치는 것은 회귀선 주위에서 3개 관측소 값이 일정한 산란을 보이는 것에 기초한다(Fig. 5~8).

높은 주파수의 자료가 낮은 주파수 자료에 비해 좋은 상관관계를 보여준다. 분석과정에서 1-2 Hz 범위의 자료수가 적어 제외하였다(Table 2).

2-4, 4-8, 8-16, 16-32 Hz에서 진원 거리에 따른 P

파, S파의 최대 진폭들은 일정한 선형회귀선에 수렴하여 분포하며(Fig. 5~8), 이때의 회귀선의 각 기울기로부터 주파수별 Q_p^{-1} 와 Q_s^{-1} 가 얻어진다. 계산결과는 Table 3과 같다.

주파수가 3.0 Hz에서 24 Hz로 늘어남에 따라 중부에서 측정된 Q_p^{-1} 값은 $(1.4 \pm 3.9) \times 10^{-3}$ 에서 $(2.3 \pm 3.5) \times 10^{-4}$, Q_s^{-1} 값은 $(1.8 \pm 1.3) \times 10^{-3}$ 에서 $(1.9 \pm 1.5) \times 10^{-4}$ 으로, 남서부에서 측정된 Q_p^{-1} 값은 $(5.9 \pm 4.8) \times 10^{-3}$ 에서 $(2.2 \pm 3.8) \times 10^{-4}$, Q_s^{-1} 값은 $(0.5 \pm 2.8) \times 10^{-3}$ 에서 $(1.8 \pm 1.6) \times 10^{-4}$ 으로 줄어드는 주파수 의존적 특성을 보인다. 이 값을 주파수의 지수형태로 나타내면 중부는 $Q_p^{-1} = 0.003f^{-0.49}$, $Q_s^{-1} = 0.005f^{-1.03}$, 남서부는 Q_p^{-1} 가 $0.026f^{-1.47}$, Q_s^{-1} 가 $0.001f^{-0.49}$ 이다. 또한 표준편차 값이 Q_p^{-1} 보다 Q_s^{-1} 가 작은 것이 관찰된다. 주파수의 지수는 P파의 경우 중부가 남서부보다, S파의 경우 남서부가 중부보다 조금 크게 나타났다.

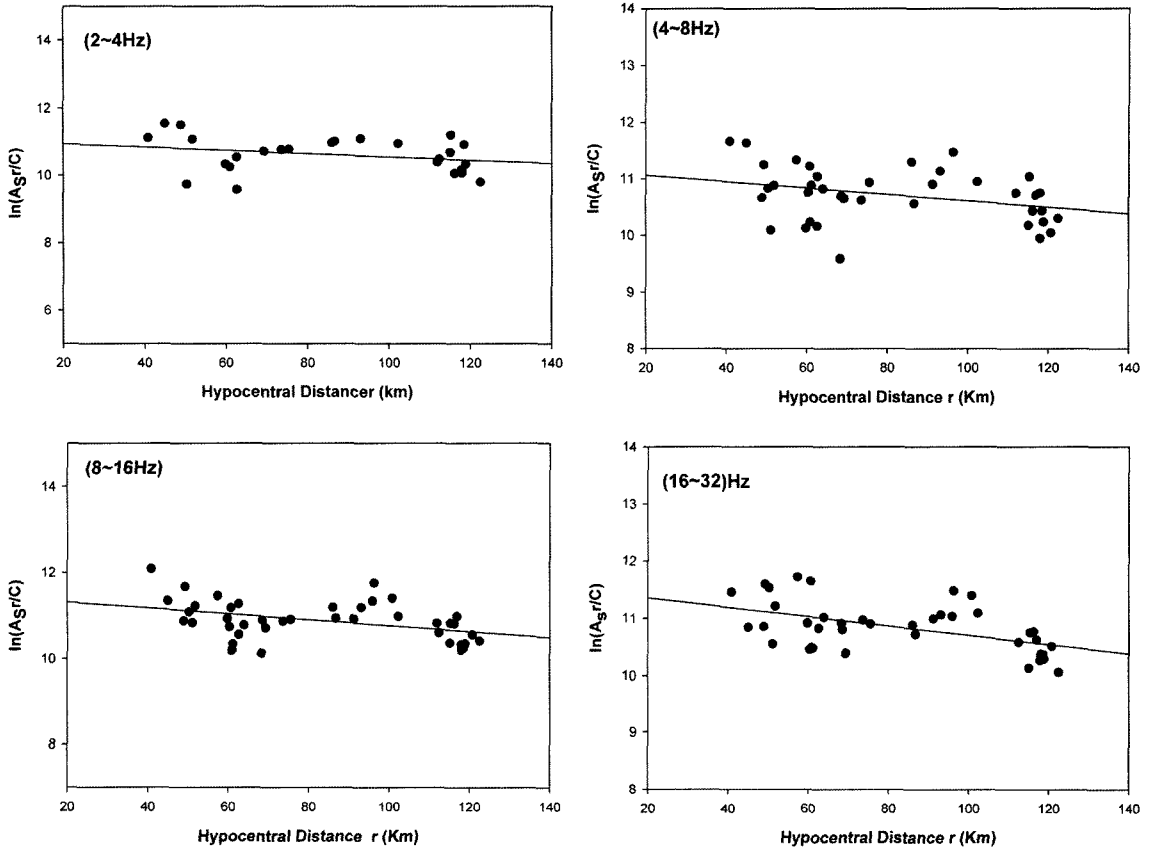


Fig. 6. Coda-normalized S waves amplitudes for each frequency band are plotted against hypocentral distance for CPN, KMC, and KUC stations. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate.

논 의

일반적으로 Q^{-1} 값은 지진학적으로 안정한 지역에서는 낮게 나타나고, 지진학적으로 불안정한 지역은 높게 나타난다. 높은 Q^{-1} 값은 타 지역에 비해 활성 단층의 분포 등 지하 균열, 파쇄 정도가 큰데 기인하는 것으로 해석되고 있다.

Fig. 9에는 세계 여러 지역에서 측정된 Q_p^{-1} 및 Q_s^{-1} 가 함께 도시되었다(Sato and Fehler, 1998). 긴 진앙거리 자료의 경우는 지각 뿐만 아니라 상부 맨틀의 Q^{-1} 값을 반영한다. 300 km 이내의 진앙거리 자료에 의한 조사에서는 지진 다발지역인 일본 간토(Yoshimoto et al., 1993) 및 러시아 쿠릴제도 남부(Fedorov and Boldyrev, 1969)의 Q_p^{-1} 값이 안정지역인 발틱 순상지와 비해 높다. 일반적으로 지구의 얇은 부분이 깊은 곳보다 Q^{-1} 값이 높아서, 프랑스 피레네지역(Modiano and Hatzfeld, 1982), 일본 나가노

(Yoshimoto et al., 1998)에서 진앙거리 40 km 이내의 지진에서 도출된 값은 높은 Q_p^{-1} 값을 보인다. 50°의 원지진에 의한 북아메리카 대륙 로키산맥지역은 발틱 순상지와 거의 비슷한 Q_p^{-1} 값이다(Taylor et al., 1986). 원지진에 의한 북아메리카 순상지의 Q_p^{-1} 값은 조사된 것 중 가장 낮은 값을 보인다.

국내에서는 주로 경상분지인 남한 남동부 지역, 중부지역, 남한 전체 등을 대상으로 여러 연구가 이루어져왔다(전명순 외, 1995; 박창업, 1997; 김성균 외, 1999b; 김성균 외, 2000; Chung and Sato, 2001; Chung and Lee, 2003; Kim et al., 2004; 양재열, 2005).

Chung and Sato(2001)는 남한 남동부 지각을 대상으로 구한 Q_p^{-1} 값이 세계적으로 발틱 순상지와 매우 유사한 낮은 값을 보임을 밝혔다. Kim et al.(2004)에 의하면 남한 중부 지역의 값도 지진학적으로 안정한 지역의 값과 유사한 결과를 얻었다.

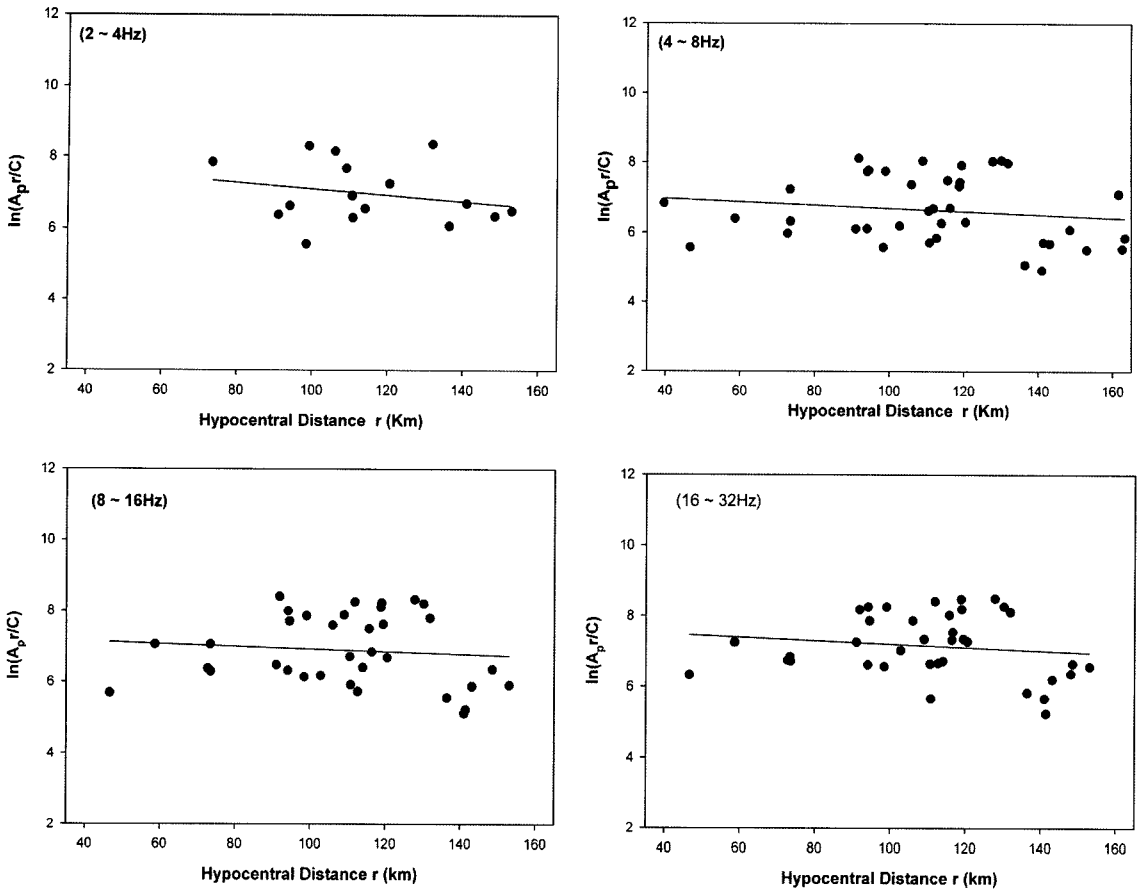


Fig. 7. Coda-normalized P waves amplitudes for each frequency band are plotted against hypocentral distance for MUN, MOP, and WAN stations. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate.

본 연구에서 구한 남한 중부의 Q_p^{-1} 값은 $0.003f^{-0.49}$ 로 남한 남동부(Chung and Sato, 2001) 보다 낮고 남한 중부지역(Kim et al., 2004)에 대해 구한 이전의 값과 매우 유사하다. 남한 남서부 지역의 Q_p^{-1} 값은 $0.026f^{-1.47}$ 로 오히려 남동부(Chung and Sato, 2001)보다도 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 이 지역의 관측 자료가 충분하지 못한 원인도 있어, 추후 자료 보강이 이루어지면 그 원인을 좀더 분명하게 밝힐 수 있으리라 본다(Fig. 9, Table 4).

Q_s^{-1} 의 값은 Fig. 9와 Table 5에서 보면 지진학적으로 활동적인 미국 캘리포니아 지역과 비활동적인 뉴욕지역은 확연한 Q_s^{-1} 값의 차이를 보여준다(Frankel et al., 1990). 이러한 차이는 쿠릴제도 남부 및 일본 간토지방의 지진다발지역과 안정지역인 발틱 순상지 사이에서도 관찰된다. 쿠릴제도 남부의 깊이 22~55 km 구간의 Q_s^{-1} 값은 간토지방 값과 매우 유사하다.

발틱 순상지의 값은 이들 조사지역 중 가장 낮은 값을 보이며, 남한 남동부의 값은 이 지역과 유사함을 나타낸다(Chung and Sato, 2001).

본 연구에서 구한 남한 중부의 Q_s^{-1} 값은 $0.005f^{-1.03}$ 으로 Chung and Sato(2001)의 남한 남동부보다 저주파수에서 다소 높긴 하나 전체적으로 낮은 값을 나타낸다. 남한 남서부의 Q_s^{-1} 값도 $0.001f^{-0.49}$ 으로 Chung and Sato(2001)의 남한 남동부 보다 훨씬 낮은 값을 보이며, 세계 여러 지역의 값 보다 뚜렷하게 낮은 값을 보인다.

결론

지진이 빈발하는 지역이 조구조 안정 지역에 비해 높은 Q^{-1} 값을 보이는 것은 타 지역에 비해 활성 단층의 분포 등 지하 균열, 파쇄 정도가 큰데 기인하는

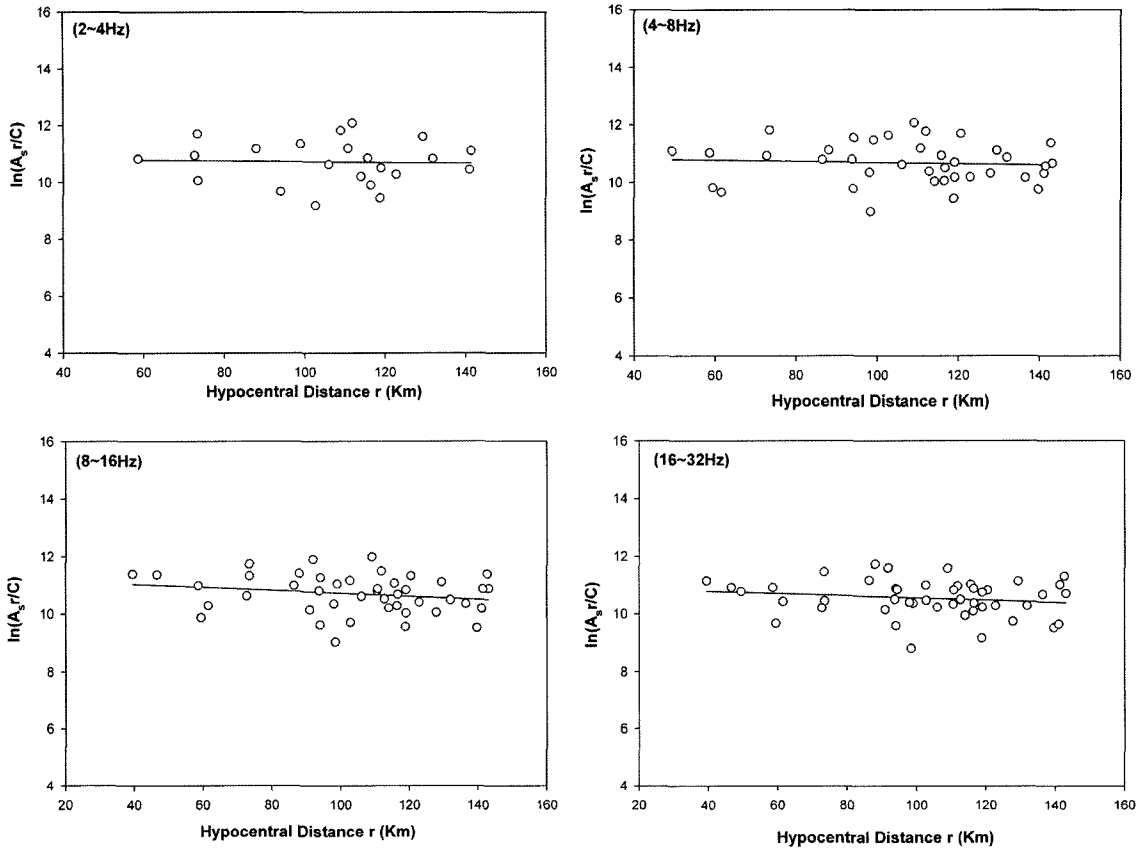


Fig. 8. Coda-normalized S waves amplitudes for each frequency band are plotted against hypocentral distance for MUN, MOP, and WAN stations. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate.

것으로 해석되고 있다.

남한 남동부에 비해 그동안 연구가 부족했던 남한 중부, 남서부지역 관측망에 기록된 150여 미소지진 자료에 대하여 확장 Coda 규격화법을 적용하여 구하였다. 그 결과, 지수 회귀선 값이 남한 중부에서는 Q_p^{-1}

가 $0.003f^{-0.49}$, Q_s^{-1} 가 $0.005f^{-1.03}$ 로 나타났고, 남서부는 Q_p^{-1} 가 $0.026f^{-1.47}$, Q_s^{-1} 가 $0.001f^{-0.49}$ 로 나타났다. 회귀 선식에서 남한 남서부의 Q_p^{-1} 가 저주파수 대역에서 다소 높으나 이는 자료의 부족으로 지각의 물리적 특성을 판단하기는 어려움이 있을 듯하다.

Table 4. Q_p^{-1} values shown in Fig. 9

No.	Regions	Hypocentral Distance (km)	Values
1	Kanto, Japan (Yoshimoto et al., 1993)	60-160-	$0.031f^{-0.95}$ (1.5 Hz < f < 24 Hz)
2	Depth 55-85km Kurils (Fedotov and Boldyrev, 1969)	90-250	$0.0217f^{-0.64}$ (1.25 Hz < f < 20 Hz)
3	Depth <55km Kurils (Fedotov and Boldyrev, 1969)	90-250	$0.0086f^{-0.29}$ (1.25 Hz < f < 20 Hz)
4	Baltic Shield (Kvamme and Havskov, 1989)	15-300	$0.008f^{-0.89}$ (1.25 Hz < f < 20 Hz)
5	U.S Shield (Taylor et al., 1986)	<50°	0.001 – 0.007 (0.05 Hz < f < 5 Hz)
6	Arette, France (Modiano and Hatzfeld, 1982)	<40	0.031 – 0.008 (10 Hz < f < 50 Hz)
7	Nagano, Japan (Yoshimoto et al., 1998)	<0.2	$0.052f^{-0.66}$ (25 Hz < f < 102 Hz)
-	Southeastern Korea (Chung and Sato, 2001)	40-160	$0.009f^{-1.05}$ (1.5 Hz < f < 24 Hz)
-	This study (central South Korea)	40-160	$0.003f^{-0.49}$ (1.5 Hz < f < 30 Hz)
-	This study (southwestern South Korea)	40-160	$0.026f^{-1.47}$ (1.5 Hz < f < 30 Hz)

Table 5. Q_s^{-1} values shown in Fig. 9

No.	Regions	Hypocentral Distance (km)	Values
1	Pacific coast of Kanto (Takemura et al., 1991)	43-243	0.0014 – 0.017 (1 Hz < f < 10 Hz)
2	Baltic Shield (Kvamme and Havskov, 1989)	15-300	0.008f ^{-1.08} (1.25 Hz < f < 15 Hz)
3	Southern California (Frankel et al., 1990)	15-90	0.002 – 0.009 (3 Hz < f < 30 Hz)
4	Depth <25km, Kurils, (Fedotov and Boldyrew, 1969)	90-250	0.0082f ^{-0.26} (1.25 Hz < f < 20 Hz)
5	Kanto (Yoshimoto et al., 1993)	60-160	0.012f ^{-0.73} (1.5 Hz < f < 24 Hz)
6	New York State (Frankel et al., 1990)	15-90	0.0043 – 0.0008 (3 Hz < f < 30 Hz)
-	Southeastern Korea (Chung and Sato, 2001)	40-120	0.004f ^{-0.70} (1.5 Hz < f < 24 Hz)
-	This study (central South Korea)	40-120	0.005f ^{-1.03} (1.5 Hz < f < 30 Hz)
-	This study (southwestern South Korea)	40-120	0.001f ^{-0.49} (1.5 Hz < f < 30 Hz)

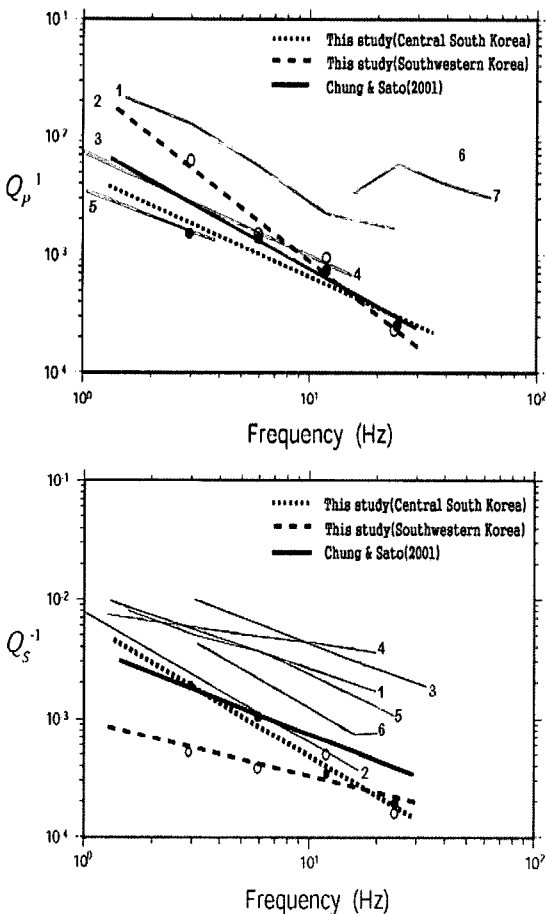


Fig. 9. Comparison of Q_p^{-1} (upper) and Q_s^{-1} (lower) values measured in this study with the values of other regions in the world. The numbers in gray areas and lines refer to those listed in Tables 4 and 5 (modified from Sato and Fehler, 1998).

본 연구에서 구한 Q_p^{-1} 과 Q_s^{-1} 값은 지진학적으로 안정한 대륙 지역의 값과 유사하며, 남한 남동부보다

도 그리고 한반도 남부 전체에 대한 기존 연구 결과보다 다소 낮은 편임을 알 수 있다. 그러나 남한 남동부와 중서부지역 간의 Q^{-1} 의 차이를 보다 정량적으로 평가하기 위해서는 보다 많은 관측 자료가 요구된다.

참고 문헌

김규동, 경제복, 2003, 충청동부지역 지각의 P, S 파 감쇠 분석. 한국지구과학회, 24, 684-690.
 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질학회지, 16, 51-61.
 김성균, 김복희, 1999a, 한반도 남동부에서의 Coda파 감쇠. 자원환경지질, 32, 379-384.
 김성균, 전명순, 김준경, 1999b, 경상분지에서의 P파 감쇠. 지질학회지, 35, 223-228.
 김성균, 박윤경, 전명순, 2000, 한반도 남동부의 Q구조. 지질학회지, 36, 529-544.
 박창업, 1997, 한반도 지진과 에너지감쇠 연구. 한국원자력 발전소 보고서, KAERI-96-08, 43 p.
 양재열, 2005, Coda 정규화법에 의한 한반도 남부에서의 P 파 및 S파의 Q 값, 전남대 석사학위 논문, 69 p.
 전명순, 지현철, 전정수, 신인철, 1995, 지진연구. 한국자원 연구소, KR-94(C), 1-16.
 정태웅, Sato, H., 2000, 덕정리 지진자료를 이용한 한국 남동부지역 지각의 P, S파 감쇠 구조연구. 지구물리, 3, 193-200.
 Aki, K., 1969, Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. Journal Geophysical Research, 74, 615-631.
 Aki, K. 1980. Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25Hz. Physics Earth and Planetary Interiors, 21, 50-60.
 Aki, K. and Richard, P.G., 1980, Quantitative seismology: theory and methods. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 932 p.
 Chung, T.W. and Sato, H., 2001, Attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of southeastern

- South Korea. Bulletin 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 Seismological Society of America, in press.
- Fedotov, S. A. and Boldyrev, S.A., 1969, Frequency dependence of the body-wave absorption in the crust and the upper mantle of the Kuril Island chain. Izvestiya of the Academy of Science of the USSR, 9, 17-33.
- 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 Geophysical Research, 95, 17441-17457.
- Hatzidimitriou, P.M., 1995, S wave attenuation in the crust in northern Greece. Bulletin Seismological Society of America, 85, 1381-1387.
- Hino, M., 1986, Spectral analysis. Asakura-Shoten, Tokyo, 300 p (in Japanese).
- 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 Seismological Society of America, 94(3), 1070-1078.
- Kinoshita, S., 1994, Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of the southern Kanto area, Japan. Bulletin Seismological Society of America, 85, 1387-1396.
- Kvamme, L.B. and Havskov, J., 1989, Q in southern Norway, Bulletin Seismological Society of America, 79, 1575-1588.
- Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshiya, M., Aki, K., and Zeng, Y., 1992, A comparative study of scattering, intrinsic and coda Q^{-1} for Hawaii, Long Valley and Central California between 1.5 and 15.0Hz. Journal of Geophysical Research, 97, 6643-6659.
- Modiano, T. and Hatzfeld, D., 1982, Experimental study of the spectral content for shallow earthquakes. Bulletin Seismological Society of America, 72, 1739-1758.
- 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 Seismological Society of America, 82, 24-43.
- Phillips, W.S. and Aki, K., 1986, Site amplification of coda waves from local earthquakes in central California. Bulletin Seismological Society of America, 76, 627-648.
- Rautian, T.G., Khalturin, V.I., Martynov, V.G., and Molnar, P., 1978, Preliminary analysis of the spectral content of P and S waves from local earthquakes in the Garm, Tadzhikistan region. Bulletin Seismological Society of America, 68, 949-971.
- Sato, H. and Fehler, M.C., 1998, Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. Springer-Verlag New York, Inc., 308 p.
- Takemura, M., Kato, K., Ikeura, T., and Shima, E., 1991, Site amplification of S-waves from strong motion records in special relation to surface geology, Journal Phys. Earth 39, 537-552.
- Taylor, S.R., Bonner, B.P., and Zandt, G., 1986, Attenuation and scattering of broadband P and S waves across North America. Journal 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.
- Yoshimoto, K., Sato, H., Iio, 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 and Applied Geophysics, 153, 489-502.

2006년 5월 29일 접수
 2006년 7월 18일 수정원고 접수
 2006년 7월 28일 채택