

수도권과 경상 분지 동부 지역 지각의 Q 값 비교 분석

박윤정 · 경재복* · 도지영

한국교육대학교 지구과학교육과, 363-791 충북 청원군 강내면 다라리 산7번지

Comparative Analysis of the Q Value between the Crust of the Seoul Metropolitan Area and the Eastern Kyeongsang Basin

Park Yoon-Jung, Jai-Bok Kyung*, and Ji-Young Do

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

Abstract: For the Seoul metropolitan area and the eastern Kyeongsang Basin, we simultaneously calculated Q_p^{-1} and Q_s^{-1} by applying the extended coda-normalization method for 98 seismograms of local Earthquakes. As frequency increases from 1.5 Hz to 24 Hz, the result decreased from $(4.0 \pm 9.2) \times 10^{-3}$ to $(4.1 \pm 4.2) \times 10^{-4}$ for Q_p^{-1} and $(5.5 \pm 5.6) \times 10^{-3}$ to $(3.4 \pm 1.3) \times 10^{-4}$ for Q_s^{-1} in Seoul Metropolitan Area. The result of eastern Kyeongsang basin also decreased from $(5.4 \pm 8.8) \times 10^{-3}$ to $(3.7 \pm 3.4) \times 10^{-4}$ for Q_p^{-1} and $(5.7 \pm 4.2) \times 10^{-3}$ to $(3.5 \pm 1.6) \times 10^{-4}$ for Q_s^{-1} . If we fit a frequency-dependent power law to the data, the best fits of Q_p^{-1} and Q_s^{-1} are $0.005f^{-0.89}$ and $0.004f^{-0.88}$ in Seoul metropolitan Area, respectively. The value of Q_p^{-1} and Q_s^{-1} in the eastern Kyeongsang basin are $0.007f^{-1.02}$ and $0.006f^{-0.99}$, respectively. The Q_s^{-1} value of the eastern Kyeongsang basin is almost similar to Seoul metropolitan area. But the Q_p^{-1} value of the eastern Kyeongsang basin is a little higher than that of Seoul metropolitan area. This may be that the crustal characteristics of the eastern Kyeongsang basin is seismologically more heterogeneous. However, these Q_p^{-1} values in Korea belong to the range of seismically stable regions all over the world.

Keywords: seismic attenuation, Q_p^{-1} and Q_s^{-1} , eastern Kyeongsang Basin, Seoul metropolitan area

요약: 수도권과 경상 분지 동부일대의 98개 지진자료에 확장 Coda 규격화법을 적용하여 Q_p^{-1} 과 Q_s^{-1} 을 구하였다. 중심 주파수 1.5 Hz에서 24 Hz로 증가할수록 수도권 일대의 Q_p^{-1} 은 $(4.0 \pm 9.2) \times 10^{-3}$ 에서 $(4.1 \pm 4.2) \times 10^{-4}$ 로, Q_s^{-1} 은 $(5.5 \pm 5.6) \times 10^{-3}$ 에서 $(3.4 \pm 1.3) \times 10^{-4}$ 로 감소한다. 경상분지 동부일대의 Q_p^{-1} 은 $(5.4 \pm 8.8) \times 10^{-3}$ 에서 $(3.7 \pm 3.4) \times 10^{-4}$ 로, Q_s^{-1} 은 $(5.7 \pm 4.2) \times 10^{-3}$ 에서 $(3.5 \pm 1.6) \times 10^{-4}$ 로 감소한다. 수도권 일대의 결과를 주파수의 지수형태로 나타내면 Q_p^{-1} 과 Q_s^{-1} 는 $0.005f^{-0.89}$ 와 $0.004f^{-0.88}$ 이며, 경상분지 동부 일대에서는 $0.007f^{-1.02}$ 와 $0.006f^{-0.99}$ 로 각각 나타낼 수 있다. 이는 Q_s^{-1} 는 두 지역이 거의 유사하나, Q_p^{-1} 값이 경상 분지 동부 일대가 수도권 일대에 비해 상대적으로 약간 높음을 알 수 있다. 이는 아마도 경상분지 동부 지역의 지각이 지진학적으로 불균질성이 다소 더 크다고 추정된다. 그러나, 세계의 여러 다른 지역의 값과 비교해 보면 수도권 일대와 경상 분지 동부 일대 지각은 모두 순상지의 범주에 해당하는 값을 나타낸다.

주요어: 지진파 감쇄, Q_p^{-1} 와 Q_s^{-1} , 경상분지 동부, 수도권

서론

한반도는 지체구조적으로 Sino-Korean 지괴에 속 하지만, 지질학적으로 구조 및 특성이 다른 여러 개

의 지체구조구로 구분된다. 지진파 감쇄특성 연구의 대상 지역은 선캄브리아 이언층의 기저를 형성하고 편마암 복합체로 구성되며, 오늘날 인구가 밀집한 경기육괴 서부의 수도권 일대와, 대보조산운동 이후부터 백악기에 걸쳐 화산암류를 수반한 두꺼운 육성 퇴적층이 광범위하게 발달하고 있으며, 현재는 대규모 산업단지가 분포한 경상 분지 동부 지역이다.

*Corresponding author: jbyung@knue.ac.kr
Tel: 82-43-230-3742
Fax: 82-43-232-7176

경상 분지 동부일대는 양산단층대의 울산단층대가 발달하고, 이들 단층대를 따라 제4기 활성단층이 부분적으로 나타나며, 역사시대를 통해 다수의 피해 지진이 발생한 지역이다. 이에 비해 수도권 일대는 활성단층의 분포가 아직 알려져 있지 않으며, 과거 역사시대에도 큰 피해 지진의 기록이 더물다. 이와 같이 지진학적으로 활발한 지진활동을 보인 경상 분지 동부 지역과 상대적으로 지진이나 단층의 활동이 적은 수도권 일대의 지진기록을 바탕으로 지역별 감쇠 상수 Q^{-1} 값을 구하여 정량화된 수치로 두 지역의 지각에 대한 특성을 비교 평가하고자 한다.

암권의 이질적인 특성을 지시하는 Coda 감쇠상수 Q^{-1} 에 대한 연구는 전 세계적으로 지진활동이 활발한 지역과 안정지역에 대하여 많은 연구들이 진행되어 왔다(Frankel et al., 1990; Campillo and Plantet, 1991; Ordaz and Singh, 1992; Yoshimoto et al., 1993; Kinoshita, 1994; Hatzidimitriou, 1995; Sato and Fehler, 1998; Paul et al., 2003; Pentukhin et al., 2003). 우리나라에서도 경상분지 일대, 중부지방, 혹은 남한 전 지역을 대상으로 P파, S파, Coda파, 그리고 L_g 파의 Q에 대하여 여러 연구가 이루어져 왔다(김성균 외, 1999; 김성균 외, 2000, Chung and Sato, 2001; 정태웅, 2001; 김규동과 경재복, 2003; 도지영과 경재복, 2006, Kim et al., 2006). 그러나, 연구 목적이나 분석 방법 및 이용한 자료의 차이에 따라 얻어진 결과가 다양하다.

남한의 수도권 일대는 양질의 관측 자료가 부족하여 지금까지는 이 일대에 관한 감쇠상수 연구가 매우 적었다. 따라서 본 연구에서는 부족한 자료를 근거리의 관측소 자료와 통합 대체하고 확장 Coda 규격화법(Frankel et al., 1990)을 이용하여 수도권 일대의 감쇠 상수 Q^{-1} 값을 구하였다. 이와 더불어 현재까지 가장 활발하게 연구가 진행되고 있는 경상 분지 동부

지역에 대하여도 동일한 방법으로 결과 값을 구하여 두 지역의 지진파 감쇠 특성을 비교 분석하였다.

지진 자료

본 연구에 사용한 지진 자료는 한국지질자원연구원과 기상청의 고유주파수 1 Hz의 3성분(상하동 U-D, 남북동 N-S, 동서동 E-W) 단주기 속도 지진계의 기록이며, 출력신호는 100 sample/sec이다(Table 1).

지진파 속도구조 모델로는 김상조와 김소구(1983)의 이층 지각 구조를 바탕으로 하였다. 이 속도 구조 모델은 15 km와 35 km의 깊이에서 경계 지어지는 2층 지각구조로 상부층 지각은 P파의 속도가 5.98 km/s, S파의 속도는 3.40 km/s이며 하부 지각층의 P파와 S파의 속도는 6.38 km/s과 3.79 km/s이다. 맨틀의 P와 S파의 속도는 7.95 km/s와 4.58 km/s로 본 연구에서는 상부와 하부 지각의 평균값을 이용하였다.

본 연구에서는 2000년 8월부터 2006년 5월의 수도권 일대와 경상 분지 동부 지역의 최근에 발생한 총 98개의 양질의 지진기록을 선택하여 분석하였다(Appendix I, II). 규모는 2.0 이상으로 비교적 위상이 뚜렷하여 육안으로도 구분이 용이하고, S/N비가 2배 이상의 높은 단주기 지진계 자료를 선택하였다. 우리나라의 경우 지진 활동도가 낮아 특정 지역에 한정할 경우 발생한 지진의 발생빈도가 낮고 규모가 작은 지진 자료로서 양질의 자료를 확보하기에 어려움이 있어 Fig. 1과 같이 수도권 일대는 한국 지질 자원 연구원의 관측망인 강화(KHD)와 기상청 관측망인 문산(MUS), 이천(ICN), 수원(SWO)에 기록된 양질의 event 자료 44개(Appendix I)를 종합하였고, 경상 분지 동부 일대는 한국지질자원 연구원 관측망인 덕정리(DKJ), 방방골(BBK), 청도(CGD)에 기록된 54개의 event 자료(Appendix II)를 이용하였다.

Table 1. Description of KMA and KIGAM seismic networks

Region	Station Code	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Foundation (yy-mm-dd)	Natural freq.	Sensor	Sample/sec	Source
Seoul Metropolitan Area	KHD	37.7009	126.3792	1999-04-01	1Hz	JC-V100	100	KIGAM
	MUS	37.8881	126.7594	2002-10-19	1Hz	SS-1	100	
	ICN	37.2907	127.4167	2003-11-28	1Hz	SS-1	100	KMA
	SWO	37.2669	126.9969	2002-11-06	1Hz	SS-1	100	
Eastern Kyeongsang Basin	DKJ	35.9443	129.1115	1994-12-14	1Hz	JC-V100	100	KIGAM
	BBK	35.5762	129.4373	1995-02-14	1Hz	JC-V100	100	
	CGD	35.6037	128.8450	1996-08-14	1Hz	JC-V100	100	

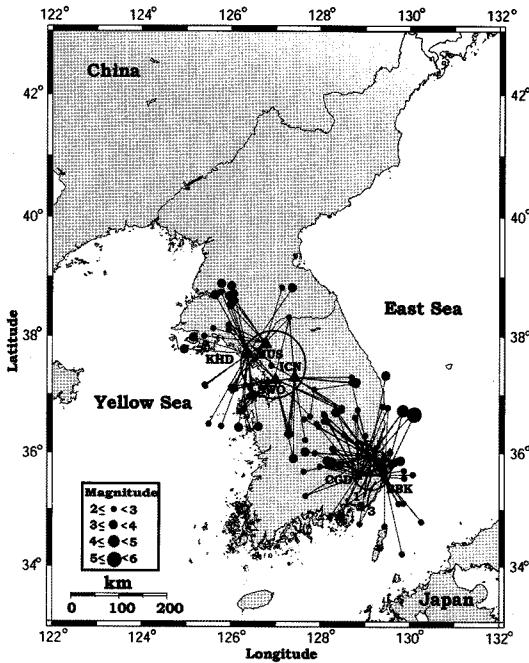


Fig. 1. Seismic stations (▲) and epicenters of earthquakes used in this study.

분석 방법

확장 Coda 규격화 방법

Aki(1969)는 국지적 지진에 나타나는 고주파수 지진기록의 끝 부분은 전파 거리가 길어짐에 따라 진폭이 감소하며 진원 거리에 독립적으로 모든 관측소에서 유사한 진폭과 관측소간에 유사한 스펙트럼으로 나타남을 경험적 관측을 통해 발견하여 지진기록의 끝 부분인 Coda파에 대해 관심을 갖기 시작하였다. 다양한 불균질 매질의 경로를 거친 평균화된 파동 에너지의 결과로 간주되는 Coda파에 대한 진폭의 감소를 나타내는 Q^{-1} 은 암권의 이질적 특성을 알려주며 지진활동이 활발한 지역에서는 안정된 지역보다 상대적으로 높은 값을 나타낸다. 이것은 Coda 진폭이 빨리 감소하는 의미로 해석할 수 있다.

Aki(1980)는 Coda파가 불균질한 지구내부에서 산란된 S파로 구성되어 있다는 생각을 바탕으로 Coda 정규화 방법을 고안하였다. 그리고 S파 주행시간의 2 배보다 더 큰 경과시간 t_c 에서 Coda파의 스펙트럼 진폭 $A_c(f, t_c)$ 는 진원거리와 무관하기 때문에 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$A_c(f, t_c) = S_s(f)P(f, t_c)G(f)I(f) \quad (1)$$

여기서 f 는 Hz단위의 주파수, $S_s(f)$ 는 S파의 진원 스펙트럼 진폭, $G(f)$ 는 부지 증폭 요소, $P(f, t_c)$ 는 Coda파 여기 요소, $I(f)$ 는 계기 응답을 나타낸다. 한편, S파의 스펙트럼 진폭 $A_s(f, R)$ 은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$A_s(f, R) = R_{\infty} S_s(f)^{-\gamma} \exp\left(-\frac{\pi f}{Q_s(f) V_s}\right) G(f; \Psi) I(f) \quad (2)$$

여기서 $Q_s(f)$ 는 S파에 대한 Q 를 나타내며 V_s 는 S파의 평균 속도, Ψ 는 S파의 입사각, R_{∞} 는 진원방사, γ 는 기하학적 확장계수를 의미한다.

Coda파 진폭 스펙트럼 진폭 A_c 는 진원에서의 S파 스펙트럼 진폭 $A_s(f, R)$ 에 비례하므로 식 (2)를 식 (1)로 나누고 양변에 자연 대수를 취하면 다음과 같다.

$$\ln\left(\frac{A_s(f, R)R^\gamma}{A_c(f, t_c)}\right) = -\frac{\pi f}{Q_s(f) V_s} R + \text{const}(f) \quad (3)$$

Yoshimoto et al.(1993)는 작은 규모의 지진에 대해 P파 대 S파의 진원 스펙트럼비가 일정하다는 가정으

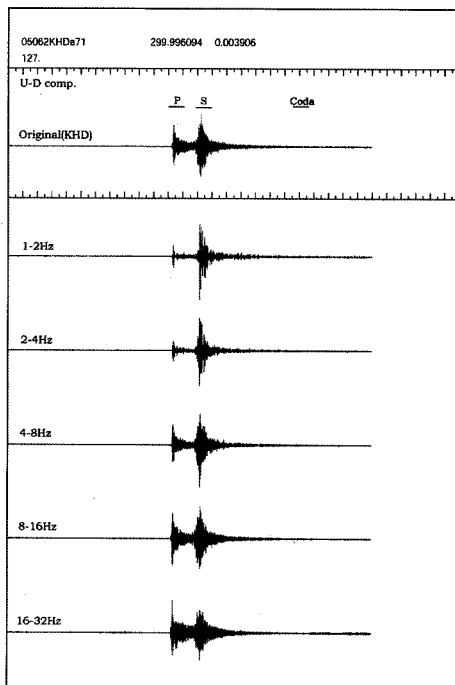


Fig. 2. Example of time windows of direct P and S, Coda wave for original (top) and band-pass filtered seismograms recorded at seismic station (KHD).

로부터 위 식을 다음 식으로 발전시켜 P파에도 적용 가능한 확장 Coda 규격화법으로 발전시켰다. 여기서, $A_P(f, R)$ 는 P파의 스펙트럼 진폭, $Q_P(f)$ 는 P파에 대한 Q 값이다.

$$\ln\left(\frac{A_P(f, R)R'}{A_C(f, t_C)}\right) = -\frac{\pi f}{Q_P(f)V_P}R + \text{const}(f) \quad (4)$$

자료 처리 과정

본 연구에서 사용한 지진 자료는 3성분의 초당 100 샘플의 수치화된 속도 자료이다. 이 기록에서 P 파의 경우는 상하동(U-D)과 남북동(N-S) 성분 중 위상이 뚜렷하여 육안으로도 구분이 용이하며 S/N비가 2배 이상의 높은 것을 선택하였다. 규모는 2.0 이상의 단주기 지진계 자료만을 이용하였다.

각 지진기록에서 저주파 변동성분을 제거한 후 전체 시간의 10%에 해당하는 시작 및 끝 시간 부분에 cosine 감쇠항을 곱한다(Hino, 1986). 그런 다음 중심 주파수를 1.5, 3, 6, 12, 24 Hz로 중심주파수 f_0 에 대하여 $2/3f_0$ 의 대역폭을 갖는 Butterworth 대역통과필터를 통과시켜 진원거리에 대한 주파수별 감쇠를 규명할 속도자료를 추출한다(Fig. 2).

각 필터 된 P파 상하동(U-D) 및 S파 남북동(N-S) 성분 자료에서 각각의 최대 진폭 $A_P(f, R)$ 와 $A_S(f, R)$ 를 측정함과 동시에 각 성분에서 Coda 규격화를 위한 Coda의 스펙트럼 진폭 $A_C(f, t_C)$ 를 구한다. Coda파의 경과 시간인 t_C 는 60초를 중심으로 전후 5초의 시간 창이며 Coda 스펙트럼 진폭은 이 시간창에 대한 진폭에 대해 제공근의 평균값으로부터 구하였다. 이 결과 값을 식 (3)과 (4)에 대입하고 각 지진파의 속도는

$V_P=6 \text{ km/s}$, $V_S=3.5 \text{ km/s}$ 로 가정하여 1차 선형회귀직선의 기울기를 구하면 그 값이 Q_P^{-1} 및 Q_S^{-1} 이다. 만일 진폭이 60초를 전후하여 기록이 나타나지 않는 경우에는 다수의 양호한 지진자료에서 Coda감쇠 master curve를 이용하여 초기경과시간에서의 Coda파로부터 추정하며, master curve는 다수의 지진자료에 대해 Coda 진폭 감소율의 평균을 구함으로써 얻었다.

고주파나 비교적 먼 거리의 지진파는 파선이 방사상(radiation)으로 퍼져 나가 동일한 시각에 동일한 구면상에 파면이 존재한다는 가정으로 γ 는 보통 1.0으로 가정한다(Pentukhin et al., 2003). 그러나 γ 는 지진파의 속도구조와 진앙거리에 따라 달라지며 (Atkinson and Mereu, 1992), S파나 L_g 파 또는 표면파가 섞여 있는 경우에는 1.0 보다 그 값이 줄어든다 (Pentukhin et al., 2003). 일반적으로 직달파나 P_g 및 S_g 가 도달하는 100 km 이내에서는 γ 를 1.0, 주로 표면파나 L_g 파가 우세하게 도달하는 100 Km 이상의 거리에서는 0.5를 사용하는 것으로 알려져 있다(Chun et al., 1987). 이와 같은 여러 선행 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서의 기하학적 확장계수 γ 를 1.0의 고정된 값으로 부여하고 확장 Coda 규격화법을 이용하였다.

수도권 일대의 관측소는 비교적 최근에 설치되어 누적된 자료가 많지 않으므로 단일 관측소 방법은 적당하지 않다고 생각된다. 이러한 이유로 수도권 일대의 100 km 이내에 분포하고 있는 서로 다른 4개 관측소(KHD, MUS, ICN, SWO)의 자료를 통합하여 부족한 양질의 자료를 보충하였다. 자료의 통합에 대한 이론적 근거는 지진파형의 감쇠 유사성을 입증하

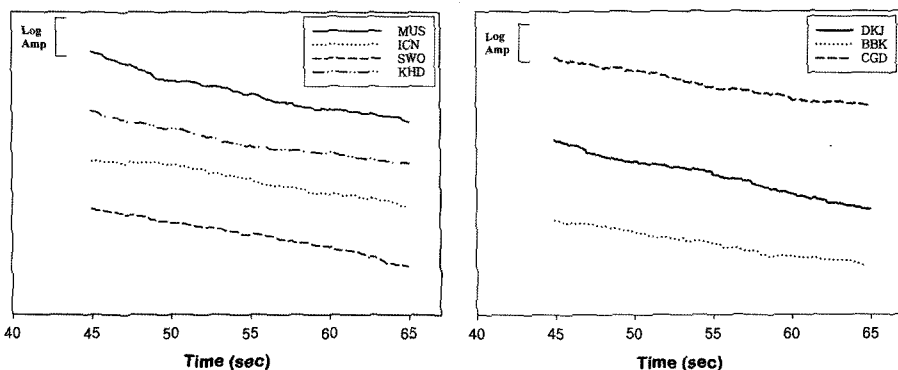


Fig. 3. The similarity of coda decay in each region. The coda envelopes are band-passed filtered at f between 16 Hz and 32 Hz. Each envelope is originated from the records of KHD, MUS, ICN, SWO, DKJ, BBK, and CGD whose epicentral distances are 111.7, 112.3, 51.3, 55.4, 79.6, 96.1, 97.2 km, respectively.

는 것이며 이를 위해 본 연구에 이용된 관측소의 파형자료 중 무작위로 선택하여 각 주파수별로 45~65 초 사이 Coda 감쇠의 유사성을 조사하였다(Fig. 3). 16~32 Hz의 범위에서 필터링 된 관측소의 Coda envelopes 감쇠경향은 상당히 유사하다고 판단된다. 경상분지 일대에서 BBK 관측소의 감쇠 경향이 타 관측소에 비해 약간 벗어나지만 별 차이를 나타내지는 않는다. Fig. 3에서 세로축의 값은 로그의 값으로 각 관측소의 Coda 감쇠 정도에 대한 경향성을 비교하기 위함이므로 그 수치는 생략하였다.

경상 분지 동부 일대는 수도권에 비해 다수의 관측소가 보다 일찍 설치되어 자료의 수는 비교적 풍부하나 수도권과 동일한 방법으로 비교하기 위하여 100 km 이내에 분포한 3개의 관측소의 자료를 통합하여 사용하였다. 수도권의 자료 처리 과정과 마찬가지로 자료의 통합을 위해 지진파형의 감쇠 유사성을 입증하였다(Fig. 3).

분석 결과

수도권 일대

Fig. 4는 각 주파수 대역에 대해 진원거리에 따른 확장 규격화된 P파와 S파의 최대진폭과 최소제곱법을 이용하여 구한 선형회귀선(best-fit line)을 나타낸다. 수도권 지역에서 각 주파수별로 이용된 S파의 자료의 수는 P파에 비해 적다. 즉, P파의 경우 중심 주파수가 1.5 Hz에서 24 Hz로 늘어나는 순서대로 나열하면 36개, 39개, 39개, 40개, 40개를 사용한 반면 S파는 12개, 32개, 33개, 38개, 38개를 이용하였다(Table 2). 주파수별로 선형회귀선 주위의 분포도를 살펴보면 S파 자료가 P파에 비해 상대적으로 밀집하여 있음을 알 수 있고 동일한 종류의 지진파내에서

는 높은 주파수의 자료가 낮은 주파수의 자료에 비해 회귀선을 중심으로 적은 흠어짐(분산)을 갖는 좋은 상관관계를 보여준다. 이는 P파와 S파의 진원방사 형태의 차이 때문인 것으로 생각된다(Yoshimoto et al., 1998). 그래프의 기울기에 해당되는 선형회귀선의 기울기가 지역별 Q_p^{-1} 와 Q_s^{-1} 이다.

일반적으로 Q^{-1} 값은 지진학적으로 안정한 지역에서는 감쇠가 적어 그 값이 낮고 불안정한 지역에서는 높은 값을 나타낸다. Table 3에 나타낸 결과와 같이 수도권 일대에서 측정된 값은 중심주파수가 1.5 Hz에서 24 Hz로 높아짐에 따라 선형회귀선의 기울기인 Q_p^{-1} 값은 $(4.0 \pm 9.2) \times 10^{-3}$ 에서 $(4.1 \pm 4.2) \times 10^{-4}$ 로, Q_s^{-1} 값은 $(5.5 \pm 5.6) \times 10^{-3}$ 에서 $(3.4 \pm 1.3) \times 10^{-4}$ 로 감소함을 알 수 있다. 또한 오차의 값도 주파수가 높아질수록 작아짐을 알 수 있다. 이외에도 감쇠상수를 주파수 f 의 지수형태로 나타내면 Q_p^{-1} 은 $0.005f^{-0.89}$ 이고 Q_s^{-1} 은 $0.004f^{-0.88}$ 의 결과를 보인다.

경상 분지 동부 일대

경상 분지 일대 지진 자료는 1994년 12월부터 한 국지질 자원 연구원의 홈페이지에 제공되고 있다. 수도권 일대와 동일한 관측시기를 적용하기 위하여 2000년 8월 이후의 자료를 사용하였다. Fig. 5는 각 주파수 대역에 대해 진원거리 대 확장 규격화된 최대진폭을 나타내었으며, 수도권 일대와 마찬가지로 최소제곱법을 이용하여 선형회귀선을 구하였다. 선형 회귀선을 중심으로 분산도를 살펴보면 수도권 일대와 마찬가지로 P파 자료가 S파 보다 다소 큰 분산의 모습을 나타낸다. 또한 동일한 파에 대해서는 주파수가 높아질수록 선형회귀선에 밀집함을 알 수 있다.

경상 분지 동부지역 관측에 사용된 P파의 자료 수는 중심 주파수가 1.5 Hz에서 24 Hz로 늘어나는 순서대로 38개, 54개, 55개, 55개, 55개를 이용하여 수도권 일대 자료수 보다 많으며, S파의 자료수도 모든 주파수에 대해 63개의 자료를 사용하여 수도권의 자료수보다 많다(Table 2). 결과 값은 중심 주파수가 1.5 Hz에서 24 Hz로 증가함에 따라 Q_p^{-1} 값은 $(5.4 \pm 8.8) \times 10^{-3}$ 에서 $(3.7 \pm 3.4) \times 10^{-4}$ 로, Q_s^{-1} 값은 $(5.7 \pm 4.2) \times 10^{-3}$ 에서 $(3.5 \pm 1.6) \times 10^{-4}$ 로 감소하며 나타난다. 오차의 값은 수도권과 마찬가지로 주파수가 증가할수록 그 값은 줄어든다. 또한 주파수의 지수형태로 나타내면 Q_p^{-1} 은 $0.007f^{-1.02}$ 이고 Q_s^{-1} 은 $0.006f^{-0.99}$ 이다.

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

Freq. (Hz)	Seoul Metropolitan Area		Eastern Kyeongsang Basin	
	P Wave	S Wave	P Wave	S Wave
1-2	36	12	38	63
2-4	39	32	54	63
4-8	39	33	55	63
8-16	40	38	55	63
16-32	40	38	55	63
Total	194	153	257	315

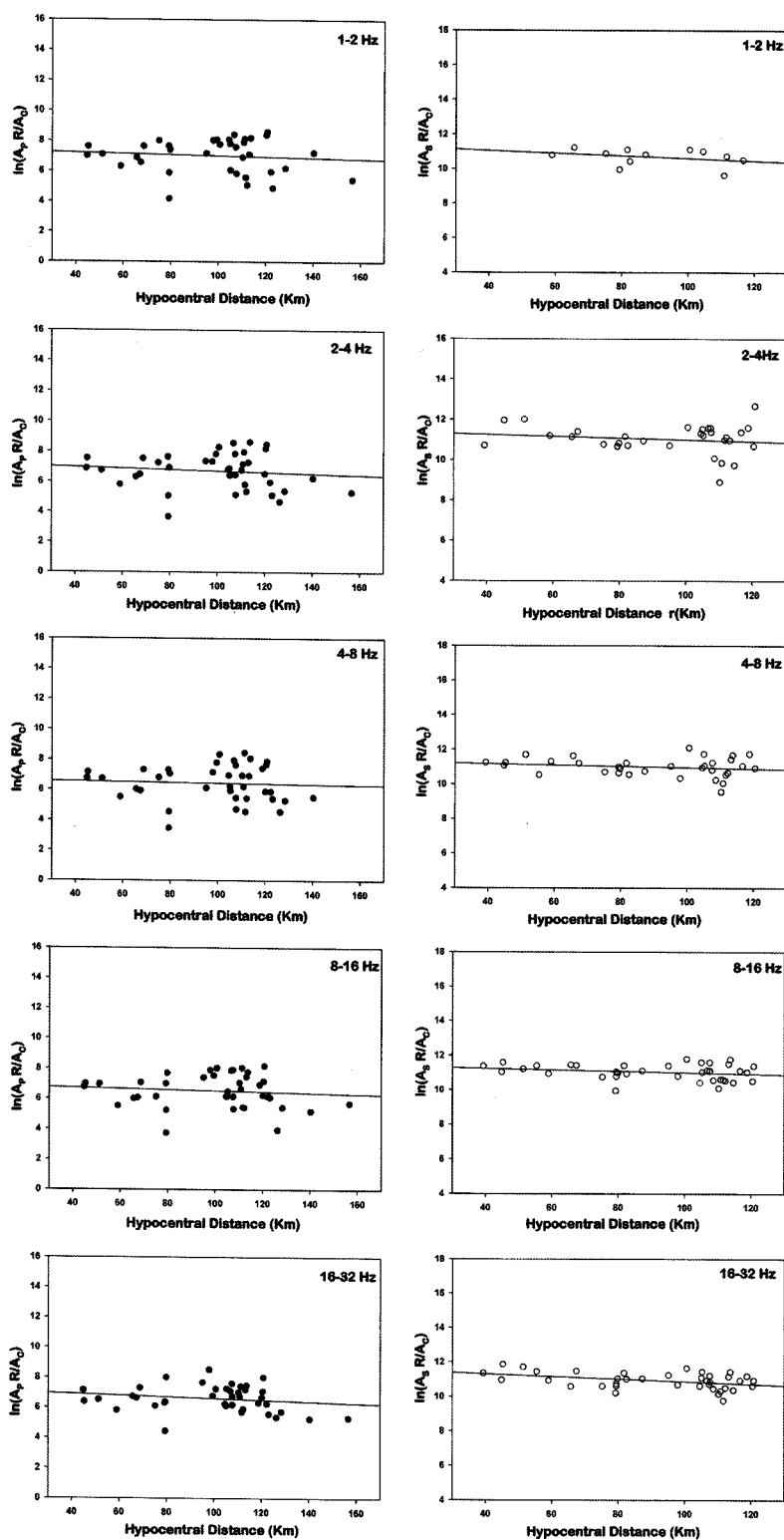


Fig. 4. Coda-normalized *P* and *S* wave amplitudes are plotted with each frequency band against hypocentral distance for KHD, SWO, ICN, and MUS. The solid line indicates the best-fit line from the least-square estimates.

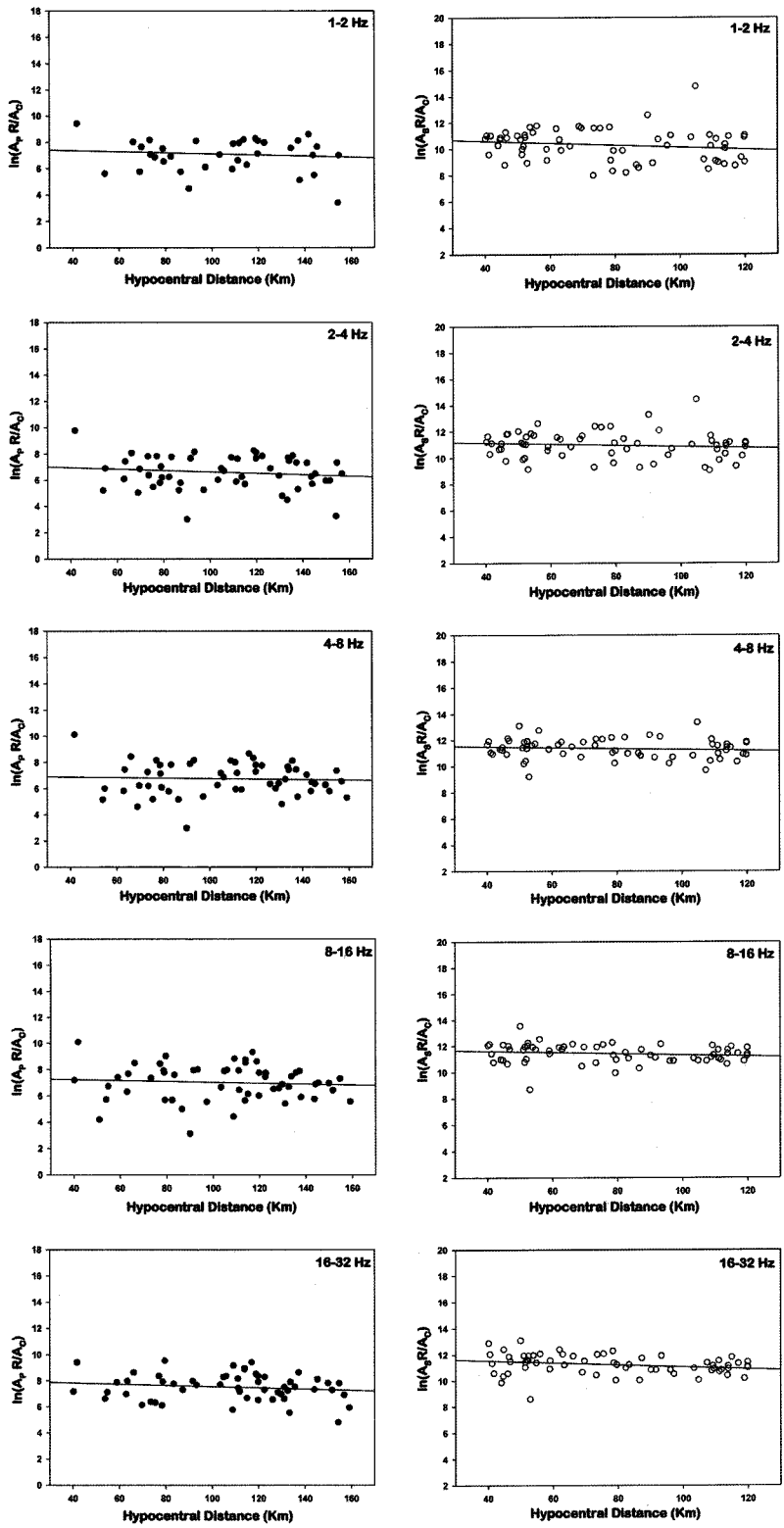


Fig. 5. Coda-normalized *P* and *S* waves amplitudes are plotted with each frequency band against hypocentral distance for DKJ, BBK, and CGD. The solid line indicates the best-fit line from the least-square estimates.

Table 3. Q_P^{-1} and Q_S^{-1} values with standard deviations

Frequency (Hz)	Seoul Metropolitan Area		Eastern Kyeongsang Basin	
	Q_P^{-1}	Q_S^{-1}	Q_P^{-1}	Q_S^{-1}
1~2	0.00408 ± 0.0092	0.00550 ± 0.0056	0.00540 ± 0.0088	0.00578 ± 0.0042
2~4	0.00279 ± 0.0047	0.00157 ± 0.0020	0.00352 ± 0.0035	0.00169 ± 0.0018
4~8	0.00063 ± 0.0025	0.00066 ± 0.0007	0.00061 ± 0.0017	0.00068 ± 0.0006
8~16	0.00054 ± 0.0010	0.00037 ± 0.0002	0.00054 ± 0.0009	0.00044 ± 0.0003
16~32	0.00041 ± 0.0004	0.00034 ± 0.0001	0.00037 ± 0.0003	0.00035 ± 0.0001

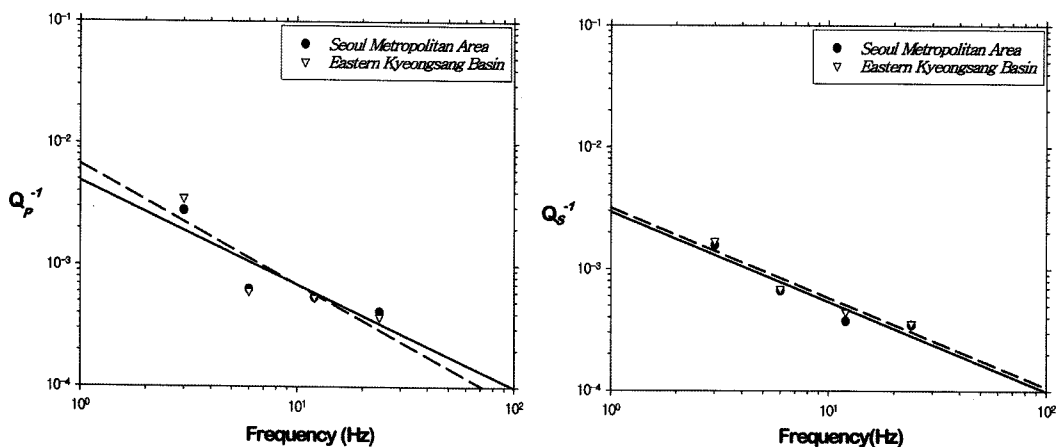


Fig. 6. Comparisons of Q_P^{-1} and Q_S^{-1} values measured in this study. Solid and broken lines refer to the best-fit regression lines by the least squares in Seoul Metropolitan area and Eastern Kyeongsang Basin, respectively.

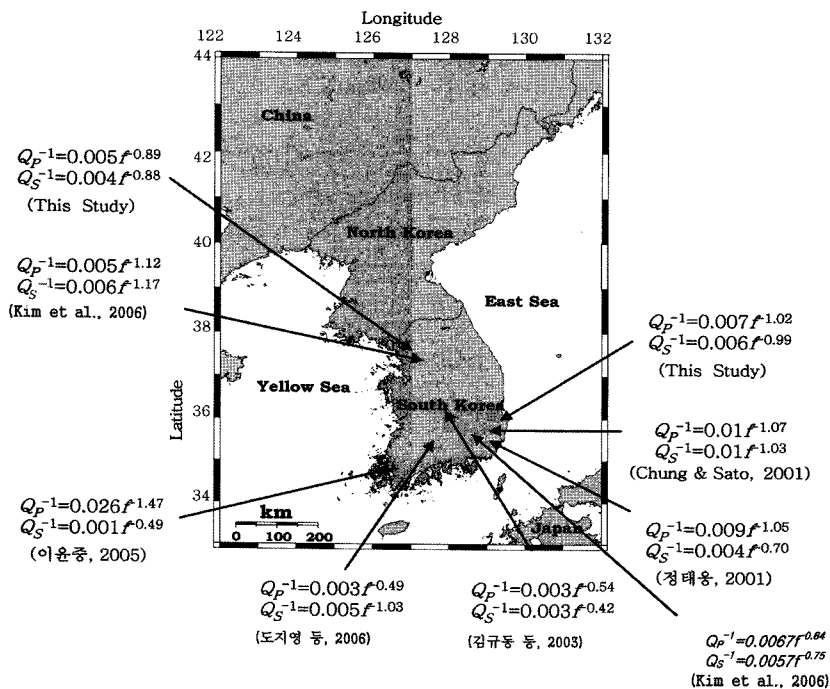


Fig. 7. The result of Q_P^{-1} and Q_S^{-1} in several regions of Korea.

논 의

지금까지 연구 결과에 의하면, 일반적으로 지진학적으로 안정한 지역에서는 감쇠가 적어 Q^{-1} 값은 낮고 매질의 불균질의 정도를 나타내는 주파수의 지수 값은 높은 반면, 판구조적으로 활동적이며 지진학적으로 불안정한 지역에서는 Q^{-1} 값은 높고 주파수의 지수 값은 낮은 값을 나타낸다. 경상 분지 동부와 수도권과 일대에 대한 Q^{-1} 값의 결과를 비교해 보면, 전체적으로 매우 낮은 값으로 불균질 정도가 낮은 안정된 지역으로 볼 수 있다. 그 중에서도 Q_p^{-1} 값은 경상 분지 동부 지역의 값이 수도권 일대의 그것에 비해 약간 높아 지각의 불균질성이 다소 높다고 추정되며 Q_s^{-1} 값은 경상분지 동부지역과 수도권일대의 값이 매우 유사하게 나타난다(Fig. 6). 이것은 이 일대 주변에 중생대 후기 이후의 지각변동과 양산 단층, 모량 단층, 동래 단층 및 울산 단층 등 대규모 단층의 발달로 인한 지각의 파쇄 및 불균질성이 수도권에 비해 다소 높아진 결과의 반영이 아닌가 판단된다.

Fig. 7은 우리나라 각 지역에 대하여 Q^{-1} 값에 대한 선행 연구와 본 연구가 얻은 지수 형태의 결과를 나타낸 것이다. Table 4는 세계 여러 나라 중 지구구조적으로 불안정 지역인 일본 간토 지역과 안정 지역인 발틱 순상지에 대한 자료와 함께 비교하였다. Fig. 8은 Table 4에 나타난 결과 값을 각각 P파와 S파의 주파수에 대한 Q^{-1} 값을 나타낸 것이다. Chung and Sato(2001)와 Kim et al.(2006)은 남한 남동부 지각의 Q^{-1} 값이 세계적으로 안정한 발틱 순상지(Kvamme and Havskov, 1989)와 매우 유사한 값을 보인다고 하였다. 일반적으로 먼 진앙거리를 갖는 자료는 지각 뿐만 아니라 상부맨틀의 Q^{-1} 값을 반영하는데, Yoshimoto 외(1993)는 300 km 이내의 진앙거리 자료에 의한 일본의 간토 지역의 Q^{-1} 값을 구하고 그 값은 안정 지역인 발틱 순상지에 비해 매우

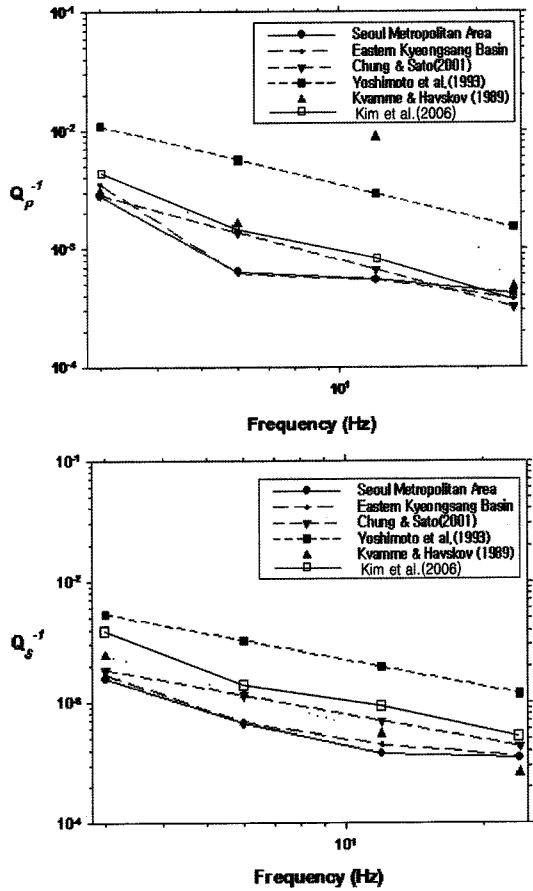


Fig. 8. Comparisons of Q_p^{-1} and Q_s^{-1} values in this study with the values of other studies.

높게 나타났음을 지적하였다.

경상 분지 동부 일대에 대하여 타 연구자의 결과와 비교하면 Q_p^{-1} 와 Q_s^{-1} 이 거의 동일한 지역에 대해 구한 Chung and Sato(2001)와 Kim et al.(2006)의 결과보다 약간 작아지는 경향을 보인다. 그러나 지수 함수 형태로 나타낸 결과 값은 매우 유사한 값임을 확인할 수 있다(Table 4). 수도권 일대는 경상 분지 일대보다 약간 더 낮은 값을 나타낸다. 세계 다른 지

Table 4. Q_p^{-1} and Q_s^{-1} values measured in this study with the values of other regions in the world

Regions	Q_p^{-1}	Q_s^{-1}	Source
Baltic Shield	$0.008f^{0.89}$	$0.008f^{1.08}$	Kvamme and Havskov (1989)
Kanto, Japan	$0.031f^{0.06}$	$0.012f^{0.73}$	Yoshimoto et al. (1993)
Southeastern Korea	$0.009f^{-1.05}$	$0.004f^{-0.70}$	Chung and Sato (2001)
Southeastern Korea	$0.0067f^{0.84}$	$0.0057f^{0.75}$	Kim et al. (2006)
Seoul Metropolitan Area	$0.005f^{0.89}$	$0.004f^{0.88}$	This study (2007)
Eastern Kyeongsang Basin	$0.007f^{1.02}$	$0.006f^{0.99}$	This study (2007)

역 즉, 일본과 발틱 순상지의 결과 값과 비교해 보면 오차의 범위를 고려할 때 두 지역 모두가 순상지와 같은 안정 지역의 범주에 해당하는 값을 나타낸다. 그러나 매질의 불균질 정도를 나타내는 주파수의 지수 값에 대해서는 경향성을 밝히기 어렵다. 이는 양질의 자료수가 부족하고 자료를 해석하는데 있어 다소 차이가 있기 때문인 것으로 생각된다.

결론

한국 지질 자원 연구원과 기상청에서 제공하고 있는 2000년 8월부터 2006년 5월까지의 지진기록을 바탕으로 확장 Coda 규격화법을 이용하여 수도권과 경상 분지 일대에 대한 P파와 S파의 Q^{-1} 을 계산하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 수도권 일대와 경상 분지 동부 일대에서 측정된 Q_P^{-1} 과 Q_S^{-1} 값 모두 중심주파수가 1.5 Hz에서 24 Hz로 늘어남에 따라 감쇠상수는 줄어드는 주파수 의존적인 특성을 보인다. 또한 주파수가 높아질수록 오차의 값도 작아진다.

2. Q^{-1} 값의 경우 수도권에서는 $Q_P^{-1} = 0.005f^{-0.89}$, $Q_S^{-1} = 0.004f^{-0.88}$, 경상분지 동부 지역에서는 $Q_P^{-1} = 0.007f^{-1.02}$, $Q_S^{-1} = 0.006f^{-0.99}$ 로 Q_P^{-1} 값은 경상 분지 동부 지역의 값이 수도권 일대의 그것에 비해 약간 높다. 그러나, Q_S^{-1} 값은 경상분지 동부지역과 수도권 일대의 값이 매우 유사하게 나타난다. 매질의 불균질 정도를 나타내는 주파수의 지수 값은 경상 분지 동부 지역의 값이 약간 작다.

3. 이를 종합하면 경상 분지 동부지역과 수도권 일대 지각은 지진학적으로 그 특성이 유사하나 경상분지 일대가 좀 더 불균질성이 높다고 할 수 있다. 이는 경상 분지 일대에서 중생대 후기 이후 활발했던 지각변동과 NNE방향의 양산단층과 동래 단층, NNW 방향의 울산 단층 등 대규모 단층의 발달로 인한 지각의 균열 및 파쇄 등의 지각 진화 결과로 생각된다. 그러나, 세계 여러 지역의 결과 값과 비교해 보면 두 지역의 값은 모두 순상지와 같은 안정 지역의 범주에 해당하는 값을 나타낸다.

참고문헌

김규동, 경제복, 2003, 충청 동부지역 지각의 P, S파 감쇠 분석. 한국지구과학회지, 24, 684-690.

김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구. 광산지질학회지, 16, 51-61.
 김성균, 전명순, 김준경, 1999, 경상 분지에서의 P파 감쇠. 지질학회지, 35, 223-228.
 김성균, 박윤경, 전명순, 2000, 한반도 남동부의 Q 구조. 지질학회지, 36, 529-544.
 도지영, 이윤중, 경제복, 2006, 남한 김천·목포 일대 지각의 Q값 분석. 한국지구과학회지, 27, 475-485.
 정태웅, 2001, 한국남동부 지각의 P, S파 감쇠구조 비교연구. 한국지구과학회지, 22, 112-119.
 Aki, K., 1969, Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves. Journal of Geophysical Research, 74, 615-631.
 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.
 Atkinson, G.M. and Mereu, R.F., 1992, The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada. Bulletin of the Seismological Society of America, 82, 2014-2031.
 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 L_g 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.
 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 of the Seismological Society of America, 85, 1381-1387.
 Hino, M., 1986, Spectral analysis. Asakura-Shoten, Tokyo, 300 p (in Japanese).
 Kim, S.K., Yang, J.Y., and Oh, J.Y., 2006, Q-values for P and S waves in the southern Korean Peninsula based on the coda-normalization method. Geoscience Journal, 10 (4), 369-512.
 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

- Norwa. *Bulletin Seismological Society of America*, 79, 1575-1588.
- 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.
- Paul, A., Gupta. S.C., and Charu C., 2003, Coda Q estimates for Kumaun Himalaya. *The Indian Academy of Sciences (Earth Planet. science)*, 4, 569-576.
- Pentukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S., and Kagawa T., 2003, Estimation of Q-values in the seismogenic and aseismic layers in the Kinki region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 1498-1515.
- Sato, H. and Fehler, M.C., 1998, *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*. Springer-Verlag New York, Inc., USA, 308 p.
- 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.

2007년 8월 2일 접수
2007년 9월 1일 수정원고 접수
2007년 9월 27일 채택

Appendix I. List of earthquakes used for Q values in Seoul Metropolitan Area

NO.	Origin time		Epicenter		Magnitude	Depth (km)	Source
	Y-M-D	H/M/S	Latitude (°)	Longitude (°)			
1	2000-08-21	10/43/31	38.89	125.78	3.6	10	KIGAM
2	2002-03-07	14/30/44	36.45	126.61	3.2	0.26	KIGAM
3	2002-05-30	09/18/08	36.46	125.78	2.7	1.18	KIGAM
4	2002-06-07	13/24/04	38.70	125.64	3.2	0.31	KIGAM
5	2002-07-17	21/50/08	37.98	125.16	3.4	0.84	KIGAM
6	2002-08-26	20/24/39	37.13	126.08	2.3	0.48	KIGAM
7	2002-12-12	21/41/59	37.11	126.43	2.9	0.63	KIGAM
8	2003-04-16	17/54/59	36.44	126.17	3.5	0.68	KIGAM
9	2003-10-05	05/03/53	36.30	127.30	2.1	1.1	KMA
10	2003-10-13	18/12/04	37.00	126.50	3.6	5.41	KMA
11	2003-10-13	18/14/10	36.97	126.45	3.0	1.95	KIGAM
12	2004-02-06	07/30/32	38.60	126.10	2.4	5	KMA
13	2004-06-11	16/25/40	37.30	128.70	2.1	8.1	KMA
14	2004-07-13	12/08/14	38.55	126.01	3.0	0.5	KIGAM
15	2004-07-13	21/08/51	38.50	126.00	2.1	2	KMA
16	2004-07-14	20/37/55	36.40	127.30	2.1	11.5	KMA
17	2004-08-06	05/32/52	35.90	127.40	3.3	0.3	KMA
18	2004-08-13	22/42/04	37.60	126.50	2.7	8.0	KMA
19	2004-09-15	07/47/33	37.50	126.90	2.5	5.0	KMA
20	2004-10-11	19/19/31	38.00	125.40	2.2	16.6	KMA
21	2004-11-05	01/25/46	37.08	126.04	2.6	8.2	KIGAM
22	2005-03-12	11/56/48	38.82	127.14	2.4	7.1	KMA
23	2005-03-31	10/31/10	36.50	125.50	2.5	1.4	KIGAM
24	2005-04-09	10/12/29	37.15	125.42	2.7	7.1	KIGAM
25	2005-04-09	19/13/59	37.17	125.41	2.4	-	KMA
26	2005-05-15	07/22/32	38.13	125.60	2.6	16.1	KMA
27	2005-06-10	12/49/54	36.73	128.48	2.4	10.5	KMA
28	2005-06-10	21/14/36	36.78	128.48	2.5	12.5	KMA
29	2005-06-20	06/30/19	38.74	125.77	2.7	0.0	KIGAM
30	2005-08-25	19/33/47	36.71	126.22	2.3	2.2	KIGAM
31	2005-09-07	17/11/10	37.09	127.86	2.1	11.5	KMA
32	2005-10-10	08/51/08	37.78	124.95	3.6	4.5	KIGAM
33	2005-11-15	09/10/49	37.20	128.79	3.0	1.8	KMA
34	2005-12-07	18/02/11	36.63	127.77	2.2	3.5	KMA
35	2006-01-19	12/35/34	37.21	128.80	3.2	3.1	KMA
36	2006-01-19	22/53/30	37.20	128.77	2.0	0.0	KMA
37	2006-01-21	11/29/49	36.33	127.26	2.1	4.4	KMA
38	2006-02-14	03/32/02	38.72	126.05	3.2	4.4	KIGAM
39	2006-03-11	04/52/22	37.13	126.00	2.1	13.6	KMA
40	2006-03-15	04/36/57	38.11	125.95	2.8	12.3	KIGAM
41	2006-03-19	14/03/46	36.33	127.34	2.0	13.7	KMA
42	2006-03-22	22/42/00	38.82	127.37	3.2	-	KIGAM
43	2006-03-23	07/42/55	38.32	127.30	2.5	12.9	KMA
44	2006-04-03	18/14/04	38.85	126.01	3.5	7.7	KIGAM

Appendix II. List of earthquakes used for Q values in the eastern Kyeongsang Basin

NO.	Origin time		Epicenter		Magnitude	Depth (km)	Source
	Y-M-D	H/M/S	Latitude (°)	Longitude (°)			
1	2001-01-13	07/47/12	35.69	129.87	2.3	23.84	KIGAM
2	2001-02-10	16/23/28	35.85	129.26	2.4	6.12	KIGAM
3	2001-02-14	01/02/08	36.04	128.29	2.6	9.69	KIGAM
4	2001-03-11	14/05/38	35.73	129.41	2.1	12.13	KIGAM
5	2001-03-12	12/02/27	36.80	129.40	2.4	0.19	KIGAM
6	2001-04-16	22/50/33	35.83	129.61	2.6	13.66	KIGAM
7	2001-05-27	20/24/03	35.81	129.64	2.7	5.18	KIGAM
8	2001-06-09	00/36/12	36.74	128.84	2.4	8.	KIGAM
9	2001-06-24	08/19/44	35.82	129.67	2.8	12.86	KIGAM
10	2001-07-22	01/59/10	36.50	127.92	2.5	8.09	KIGAM
11	2001-07-27	10/04/39	36.45	127.97	2.4	1.6	KIGAM
12	2001-08-06	23/46/44	36.70	128.39	2.4	6.67	KIGAM
13	2001-08-24	11/12/03	35.86	128.15	3.2	1.74	KIGAM
14	2001-10-01	03/35/52	36.01	127.66	3.0	6.8	KIGAM
15	2001-11-21	10/49/11	36.70	128.34	3.6	0.52	KIGAM
16	2001-11-24	16/10/32	36.73	129.85	4.1	7.07	KIGAM
17	2002-01-13	00/50/43	36.31	128.53	2.1	0.08	KIGAM
18	2002-02-01	07/10/00	36.30	129.01	2.1	9.69	KIGAM
19	2002-02-02	00/32/19	35.62	130.07	2.1	5	KIGAM
20	2002-02-06	12/23/37	36.61	128.78	2.3	0.07	KIGAM
21	2002-02-07	09/31/16	36.04	129.22	2.4	20.07	KIGAM
22	2002-02-15	11/26/32	36.53	128.16	2.3	7.69	KIGAM
23	2002-02-28	22/26/49	36.64	128.08	2.2	0.46	KIGAM
24	2002-03-02	10/47/14	36.65	128.10	2.4	2.29	KIGAM
25	2002-04-06	22/33/17	34.71	129.44	2.0	2.65	KIGAM
26	2002-05-02	07/18/22	35.56	129.88	2.0	9.39	KIGAM
27	2002-05-13	18/38/14	34.75	128.88	2.3	2.5	KIGAM
28	2002-05-23	22/11/21	35.12	129.86	2.1	0.25	KIGAM
29	2002-05-25	23/44/22	35.11	129.75	2.1	2.44	KIGAM
30	2002-06-27	15/29/12	36.00	129.57	2.1	0.48	KIGAM
31	2002-07-02	01/49/07	35.76	127.99	2.5	1.5	KIGAM
32	2002-07-08	13/34/02	36.54	128.08	2.3	5.48	KIGAM
33	2002-07-09	04/01/49	35.86	129.79	3.7	11.54	KIGAM
34	2002-07-12	08/17/38	35.86	129.72	2.5	12.93	KIGAM
35	2002-08-06	21/37/57	35.67	127.63	2.5	0.74	KIGAM
36	2002-09-06	14/53/26	34.22	129.83	2.8	0.56	KIGAM
37	2002-09-15	16/40/01	35.86	129.70	2.7	11.43	KIGAM
38	2002-09-16	07/36/07	36.07	128.27	2.4	10.9	KIGAM
39	2002-10-16	19/48/59	36.58	127.64	2.8	9.74	KIGAM
40	2002-10-20	04/22/07	35.25	127.67	2.8	9.65	KIGAM
41	2002-10-23	10/30/53	34.89	128.46	3.2	8.51	KIGAM
42	2002-10-28	21/56/33	37.21	128.69	2.7	4.2	KIGAM
43	2002-12-07	16/43/40	37.33	129.46	3.0	5	KIGAM
44	2002-12-16	18/21/39	36.67	130.04	2.5	12.32	KIGAM
45	2003-02-04	16/34/47	35.72	129.40	2.1	12.79	KIGAM
46	2003-02-09	22/28/45	35.99	127.88	2.7	10.53	KIGAM
47	2003-03-01	23/33/28	35.78	129.37	3.2	10.37	KIGAM
48	2003-07-09	15/20/10	34.87	128.22	2.9	9.46	KIGAM
49	2003-08-07	11/04/19	36.78	129.51	2.8	3.03	KIGAM
50	2003-08-12	01/25/55	34.79	130.26	2.9	17.61	KIGAM
51	2003-09-24	03/26/55	35.79	128.44	3.0	9.41	KIGAM
52	2004-04-26	13/29/25	35.82	128.24	4.0	8.1	KIGAM
53	2004-04-30	23/43/57	35.77	129.37	3.0	5.9	KIGAM
54	2004-05-29	19/14/24	36.66	130.10	5.1	3.7	KIGAM