

# 한국 남동부 지각의 P파와 S파 감쇠구조 비교연구

정 태 웅\*

세종대학교 지구정보학과, 143-747 서울시 광진구 군자동 97

## Comparative Study on the Attenuation of P and S Waves in the Crust of the Southeastern Korea

Tae-Woong Chung\*

Department of Geoinformatics, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

**Abstract:** The Yangsan fault in the southeastern Korea has been receiving increasing attention in its seismic activity. In this fault region, by using the extended coda-normalization method for 707 seismograms of local earthquakes, were obtained  $0.009t^{-1.05}$  and  $0.004t^{-0.70}$  for fitting values of  $Q_P^{-1}$  and  $Q_S^{-1}$ , respectively. These results indicate that  $Q_P^{-1}$  and  $Q_S^{-1}$  in the southeastern Korea is the lowest level in the world although the exponent values agree well with those in the other areas. The low  $Q^{-1}$  is not related to the movement of the Yangsan fault but to the tectonically inactive status like a shield area.

**Key words:** Yangsan fault, extended coda-normalization method,  $Q_P^{-1}$ ,  $Q_S^{-1}$ , shield

**요약:** 지진발생 가능성이 높은 것으로 알려져 있는 한국 남동부 양산단층 지역에 대하여 707 미소지진자료기록에 대하여 Coda 확장규격화법을 적용할 경우, 회귀선값이  $Q_P^{-1}$ 는  $0.009t^{-1.05}$ ,  $Q_S^{-1}$ 는  $0.004t^{-0.70}$ 로 나타난다. 이를 세계 여러지역에서의 조사연구와 대조하여 본 결과, 회귀선식의 지수값은 세계 여러 다른지역과 매우 유사한 반면,  $Q_P^{-1}$  및  $Q_S^{-1}$  값은 가장 낮은 수준이다. 활성단층과 연관된 지각의 균열을 시사하는 높은  $Q^{-1}$  값은 한국 남동부에서는 찾아지지 않았으며, 도출된 값은 오히려 순상지와 같이 지진학적으로 안정한 지역과 대응된다.

**주요어:** 양산단층, Coda 확장규격화,  $Q_P^{-1}$ ,  $Q_S^{-1}$ , 순상지

### 서론

지진파는 탄성파의 일종인데, 지구내부가 완전한 탄성체가 아니기 때문에 지진파의 전파와 더불어 탄성에너지(E)의 일부( $\Delta E$ )가 열로 변환되면서 감쇠한다. 이 감쇠정도를 감쇠상수  $Q^{-1}$ 를 써서 다음과 같이 나타낸다.

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

$Q^{-1}$ 는 온도, 압력 및 지진파의 주파수 등에 의존하고 지구내부 물질에서 물과 같은 불순물의 양에도 변화를 보여, 구조물의 내진설계에 있어서 지반의 강진동을 정량적으로 예측하기 위해 필수적인 상수이다. 따

라서 세계적으로  $Q^{-1}$ 의 조사가 광범위하게 이루어졌으며, 특히 지진 빈발지역이면서 인구가 많은 산업도시지역에서 집중적으로 조사가 이루어지고 있다(예, Frankel *et al.*, 1990; Ordaz and Singh, 1992; Kinoshita, 1994; Nava *et al.*, 1999). 이들 연구는 지진이 빈발하는 조구조적으로 활동지역이 안정지역에 비해 비교적 높은  $Q^{-1}$  값을 보이고 있다(Sato and Fehler, 1998). 이러한 높은  $Q^{-1}$  값은 활성단층이 움직임에 따라 생긴 지각의 균열에 연유하는 것으로 해석되고 있다(Aki, 1980; Blakeslee *et al.*, 1989; Lees and Linley, 1994).

남한에서는 최근 반도남동쪽의 원자력발전소를 포함한 산업지대를 지나고 있는 양산단층 지역에 대하여  $Q^{-1}$  값이 관심이 모아지고 있다. 양산단층 부근에서 서기 779년에는 100여명의 사상자를 낸 지진이 발생한 바 있으며(이기화, 1998), 1997년 6월 26일

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

최근에는 한반도에서 비교적 큰 규모인 4.3의 경주지진이 발생하였다. 양산단층은 주단층이 북북동-남남서로 200km 길이이며, 밀양, 모량, 울산 그리고 동래 단층 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), 제 4기의 단층운동의 증거들도 부분적으로 제시되어 왔다(최위찬 외, 1998; 경재복·이기화, 1999).

김성균 외(1999; 2000)는 이 단층지역에서 한국자원연구소에 의해 운영되고 있는 지진관측망(Fig. 1)의 10개 지진자료를 바탕으로 P파  $Q^{-1}$  값(이하  $Q_p^{-1}$ )을, 31개 지진자료로 S파  $Q^{-1}$  값(이하  $Q_s^{-1}$ )을 구하였다. 최근 정태웅·Sato(2001)는 120여 지진자료의 707개 지진기록에 대하여 Coda 확장규격화법(Yoshimoto *et al.*, 1993)을 이용하여  $Q_p^{-1}$  및  $Q_s^{-1}$  값을 보고하였는데, 본 연구는 이 연구결과를 바탕으로 세계 다른 지역과 한국남동부의 지각특성을 비교하고자 한다.

### Coda 확장규격화법

Coda 확장규격화법은 Coda 진폭 스펙트럼  $C$ , S파 진원 스펙트럼  $S_s$ , P파 진원 스펙트럼  $S_p$  사이의 다음 관계식에 근거를 둔다.

$$C(f, t_c) \propto S_s(f) \propto S_p(f) \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 주파수,  $t_c$ 는 진원 발생시로부터 일정경과 시간을 의미한다. (1) 식의 첫 비례관계는  $C(f, t_c)$ 가 진원거리와는 독립적이어서 S파 직접파를 Coda파로 나누어주므로써 두파에 공통적으로 존재하는 진원 및 수신햄수를 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.

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

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

$$\ln \left[ \frac{A_s(f, r)r}{C(f, t_c)} \right] = -\frac{\pi f}{Q_s(f)V_s} r + \text{const}(f) \quad (4)$$

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

자료는 양산단층 일대에서 한국자원연구소(KIGAM)가 운영하는 3성분 지진계 관측망; 덕정리(DKJ), 명계리(MKL), 청송(CHS), 방방골(BBK), 학계리(HAK), 김해(KMH), 거제면(KJM), 매곡리(MAK), 청도(CGD)의 9점에서 1994년 12월에서 2000년 2월 사이 근지 지진의 707개의 지진기록이 분석되었다(Fig. 1). 지진 자료에는 1~2, 2~4, 4~8, 8~16 및 16~32Hz의 Butterworth 필터가 적용되어, 각 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  $V_p=6\text{km/s}$ ,  $V_s=3.5\text{km/s}$ 로 가정하여 화귀직선의 기울기를 구하면 이 값이  $Q_p^{-1}$  및  $Q_s^{-1}$ 가 되는 것이다. 본 자료처리에 대한 중간분석과정은 정태웅 외(2001)에 기록하였다.

Fig. 2에서 각 관측점의  $Q_p^{-1}$ 는  $(7 \pm 2) \times 10^{-3} \sim (5 \pm 4) \times$

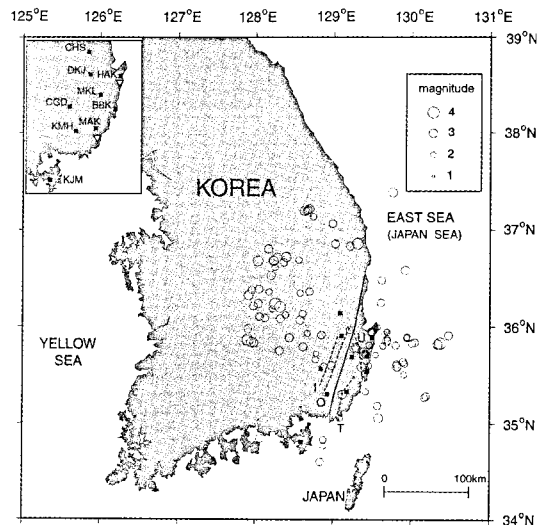
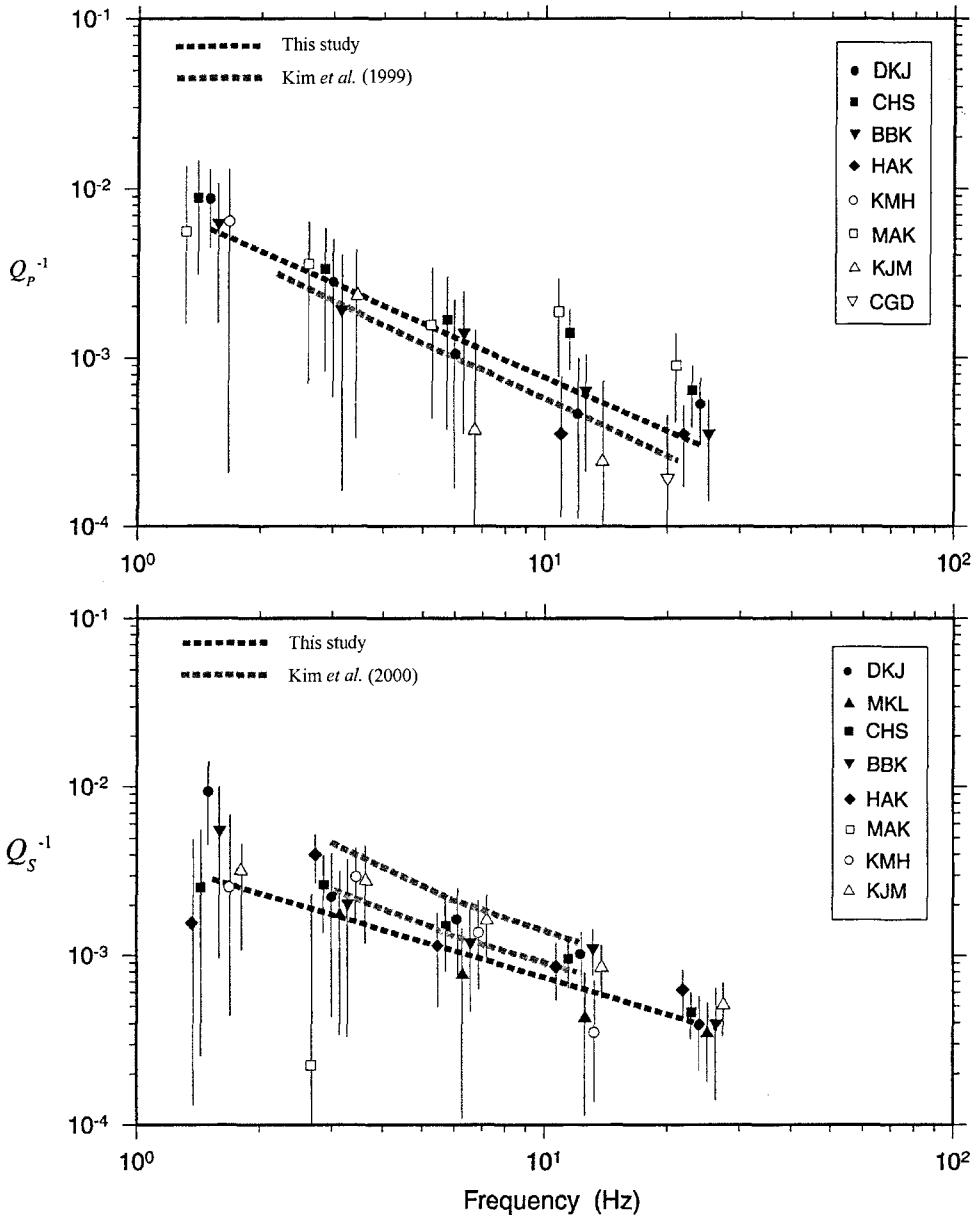


Fig. 1. Map of Korea showing seismic stations (solid squares), epicenters (open circles) of 121 earthquakes, and the Yangsan fault systems. Solid line represents the main fault while dashed lines are subfaults: symbols I, O, U, and T show the Milyang fault, the Moryang fault, the Ulsan fault, and the Tongrae 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.



**Fig. 2.**  $Q_p^{-1}$  (upper) and  $Q_s^{-1}$  (lower) values with the error bar indicating 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).

$10^{-3}$ 으로,  $Q_s^{-1}$ 는  $(5\pm 4)\times 10^{-4}\sim(5\pm 2)\times 10^{-4}$ 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. 또한 편차값은 주로 자료의 많고 적음에 따라 결정되며, 신호대비 잡음의 영향으

로 인한 것이 아님이 확인되는 데, 예를 들어 비교적 큰 편차를 보이는  $Q_p^{-1}$ 의 KMH 관측점 값의 5초 시간차에서 평균으로 구한 Coda 값 및 P파 신호값은 잡음에 비해 10배 이상 큰값을 보이고 있다(Fig. 3). 각 관측점 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. Fig. 2의

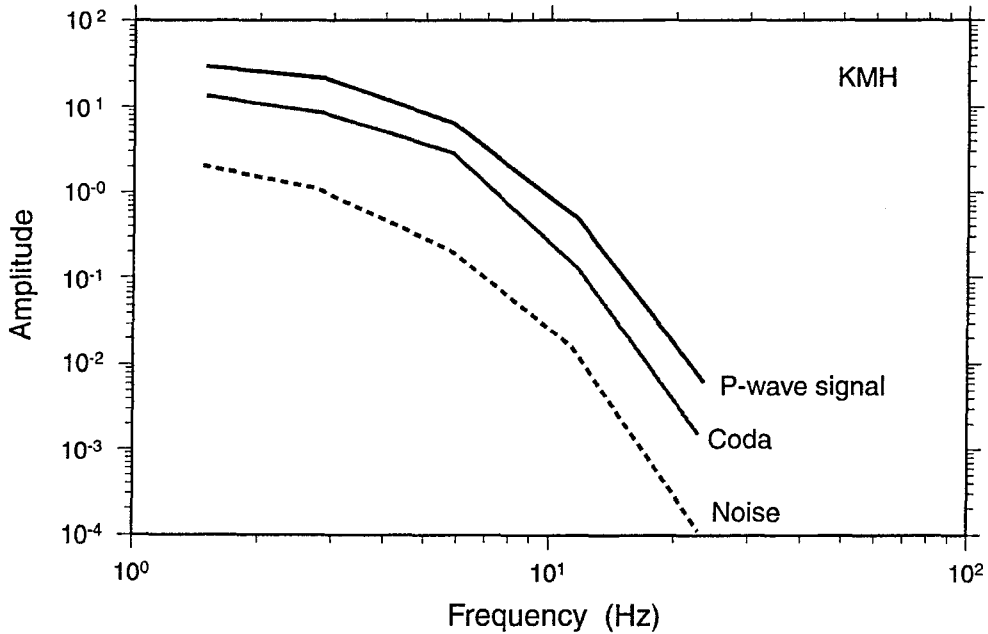


Fig. 3. The averaged amplitude spectra of P-wave signal, coda, and noise for 5 s time windows in the seismogram of KMH.

기호는 자료의 양에 따라 내림차순으로 배열하였으며, 비교적 자료가 많은 관측점은 흑색기호로 표시되어 있는데, 이들은 대체로 지수회귀선 근방에 분포한다. 그런데,  $Q_s^{-1}$ 의 1.5Hz에서는 흑색 관측점 값이 회귀선에서 벗어나 있는 경향인데, 이 들 1.5Hz 값을 제외하고 회귀선을 구하여도 거의 회귀선값은 변하지 않는다.

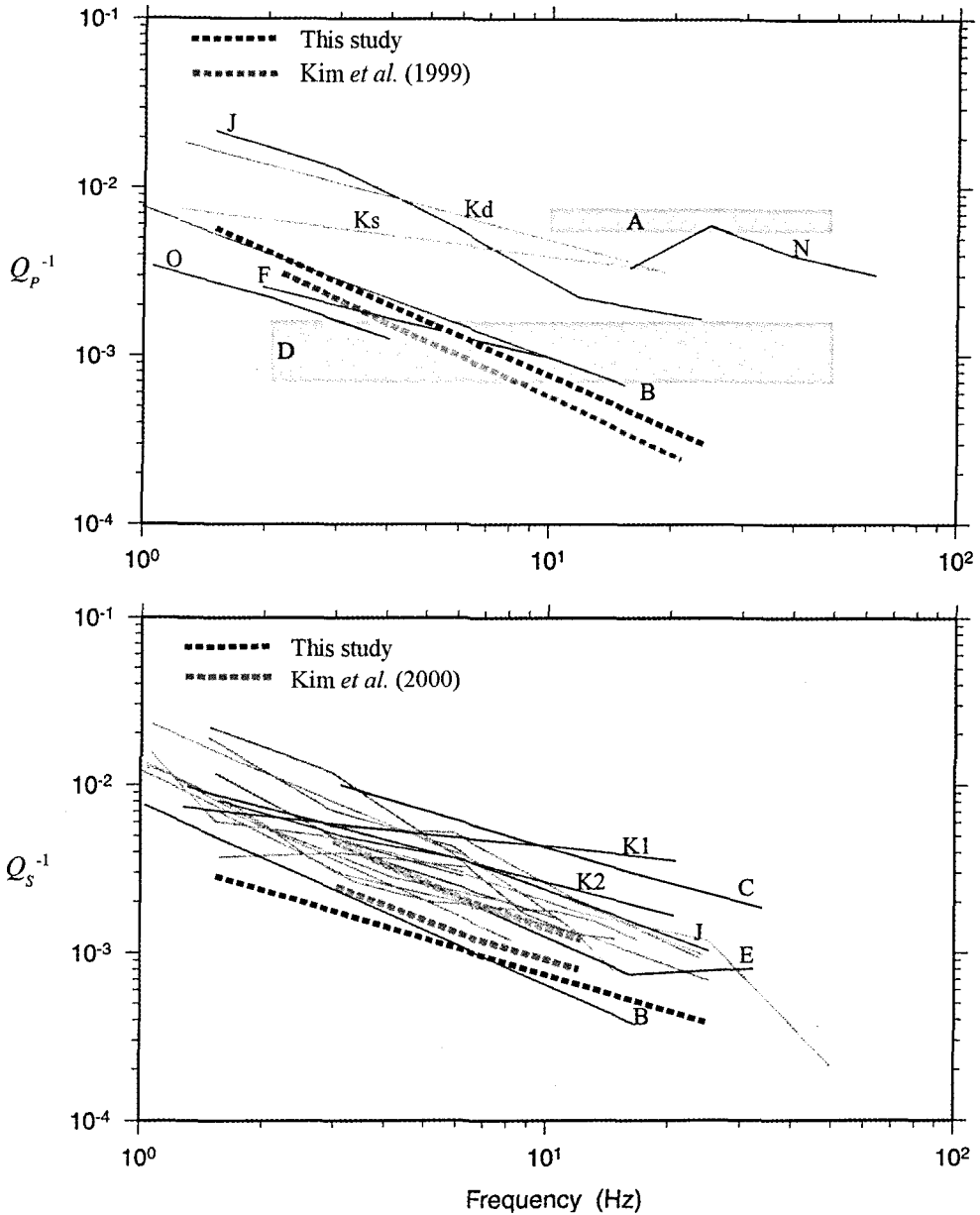
$Q_p^{-1}$ 에 대하여 김성균 외(1999)는 두 관측점 연장선상에 놓인 지진의 스펙트럼비로부터 값을 도출하는 두관측점법(Chun *et al.*, 1987)에 의한 해석을 행한 바, 그 결과와 본 연구의 지수회귀선은 오차의 범위 내에서 일치하는 값을 보이고 있다.  $Q_s^{-1}$ 는 김성균 외(2000)에 의해 상하 지각층의 Coda파의 감쇠로부터 추정하는 방법(Kosuga, 1992)으로 구하였는데, 18km 보다 깊은 하부 지각 값은 본 연구 지수회귀선과 오차의 범위내에서 일치한다.

### 세계 여러 지역의 $Q_p^{-1}$ 및 $Q_s^{-1}$

Fig. 4에는 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 반영하고 있다. 300km 이내의 진앙거리 자료에 의한 조사에서는 지진다발지역인 일본 간토

(Yoshimoto *et al.*, 1993) 및 러시아 쿠릴제도 남부(Fedotov and Boldyrev, 1969)의  $Q_p^{-1}$  값이 안정지역인 발틱 순상지에 비해 높다. 반면에 미국 캘리포니아의 지진다발 지역에서의 3km 깊이 우물측정에서는 매우 낮은  $Q^{-1}$  값이 보고되고 있다(Abercrombie, 1995). 그러나, 쿠릴제도 남부의 경우에는 55km 보다 깊은 부분의 맨틀이 지각보다  $Q_p^{-1}$  값이 높다. 일반적으로 지구의 얇은 부분이 깊은 곳보다  $Q^{-1}$  값이 높아서, 프랑스 피레네지역(Modiano and Hatzfeld, 1969), 일본 나가노(Yoshimoto *et al.*, 1998)에서 진앙거리 40km 이내의 지진에서 도출된 값은 높은  $Q_p^{-1}$  값을 보인다. 반면에 프랑스의 200에서 1000km의 진앙거리 Pg 자료에서 구한  $Q_p^{-1}$  값은 매우 낮으며(Campillo and Plantet, 1991), 50도의 원지진에 의한 북아메리카 대륙 로키산맥지역은 발틱순상지와 거의 비슷한  $Q_p^{-1}$  값이다(Taylor *et al.*, 1986). 원지진에 의한 북아메리카순상지의  $Q_p^{-1}$  값은 조사된 것 중 가장 낮은 값을 보인다. 본 연구의 지수회귀선은 김성균 외(1999)의 연구와 함께 세계적으로도 매우 낮은  $Q_p^{-1}$  값을 보여준다.

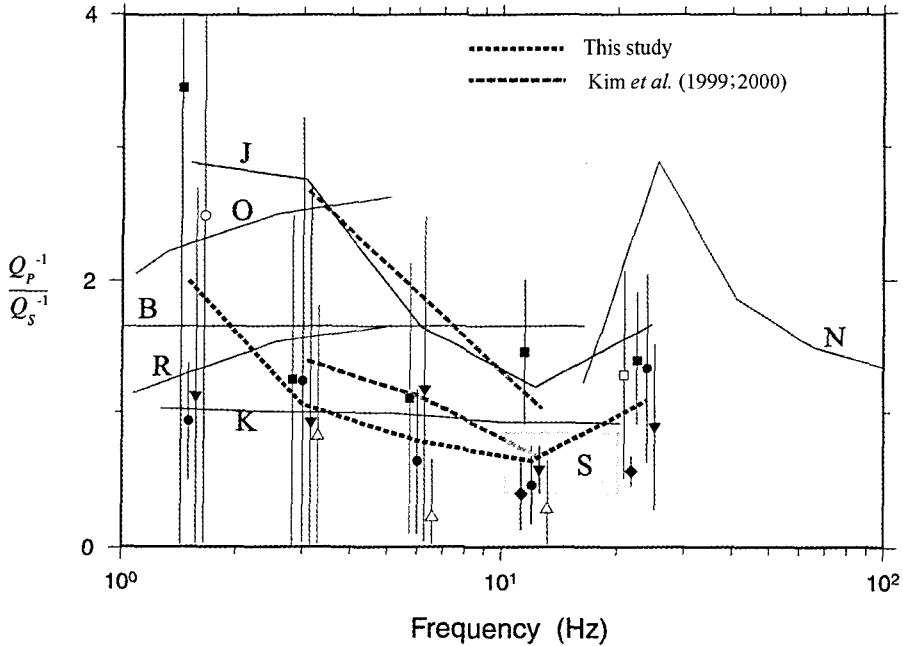
$Q_s^{-1}$ 의 조사는  $Q_p^{-1}$ 에 비하여 매우 많은 연구가 행하여져서 여기서는 본 연구 대상깊이와 비슷한 지각을 대상으로 한 진앙거리 90에서 300km 사이의 자료에서 구한 지각표면 측정값 만을 비교하였다. 지진



**Fig. 4.** The comparison of our results in Fig. 2 with the past studies for other regions expressed by shaded colors (after Sato and Fehler, 1998). A gray area designated by A and D, and thick lines by J, F, O, N, B, C, and E refer to studies in Arette in France (Modiano and Hatzfeld, 1982), drill holes in California (Abercrombie, 1995), shield regions in North America (Taylor *et al.*, 1986), Kanto in Japan (Yoshimoto *et al.*, 1993), France (Campillo and Plantet, 1991), Nagano in Japan (Yoshimoto *et al.*, 1998), Baltic shield (Kvamme and Havskov, 1989), southern California, and New York State (Frankel *et al.*, 1990), respectively. The lines denoted by Ks, Kd, K1, and K2 refer to measurements on southern Kurils for depth ranges of 5 ~ 55 km, 55 ~ 85 km, 5 ~ 25 km, and 25 ~ 55 km, respectively (Fedotov and Boldyrev, 1969).

학적으로 활동적인 미국 캘리포니아지역과 비활동적인 뉴욕지역은 확연한  $Q_s^{-1}$  값의 차이를 보여준다 (Frankel *et al.*, 1990). 이러한 차이는 쿠릴제도 남부

및 일본 간토지방의 지진다발지역과 안정지역인 발틱 순상지사이에서도 관찰된다. 쿠릴제도 남부의 깊이 22~55km 구간의  $Q_s^{-1}$  값은 간토지방값과 매우 유사



**Fig. 5.** The  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$  ratios of each station with the comparison of the past studies expressed by gray colored area or lines (after Sato and Fehler, 1998). The dashed solid line refers to the average of the values of stations. The studies by Kim *et al.* (1999; 2000) is denoted by ash-colored dashed lines; the upper line indicates the value of lower crust and lower one indicates that of upper crust. A gray area designated by S and thick lines by J, O, R, B, K and N refer to studies in San Andreas fault (Bakun *et al.*, 1976), Kanto in Japan (Yoshimoto *et al.*, 1993), shield regions in North America; Basin and Range Province (Taylor *et al.*, 1986), Baltic shield (Kvamme and Havskov, 1989), southern Kurils (Fedotov and Boldyrev, 1969), and Nagano in Japan (Yoshimoto *et al.*, 1998). DKJ, ●; CHS, ■; BBK, ▼; HAK, ◆; KMH, ○; MAK, □; KJM, △.

하다. 발틱순상지의 값은 이들 조사지역 중 가장 낮은 값을 보이는 데, 본 연구의  $Q_s^{-1}$  값은 이 발틱순상지값과 부합된다. 그러나,  $Q^{-1}$  값 직선의 기울기로 나타나는  $Q_p^{-1}$  및  $Q_s^{-1}$  값의 주파수 의존성은 지진활동성여부를 막론하고 세계 다른 지역과 본 연구 지역 사이에서 매우 유사한 모습을 보인다. 본 연구 자료 일부를 이용하여 앞서 행해진 Coda  $Q^{-1}$  조사결과(전명순 외, 1995; 박창엽, 1997; Lee and Lee, 1998)도 지진비활동지역인 북아메리카대륙 동부 및 중부 지역과 비슷하게 나오고 있다(Toro *et al.*, 1997).

Fig. 5는 본 연구결과의  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$  비의 각 지역에 대한 비교결과인데, 대체로 세계 각 지역값 범위에서 벗어나는 값은 존재하지 않는다. 흑색 점선으로 나타난 본 연구의 모든 관측점에 대한 회귀선은 아래쪽 회색 점선으로 나타난 김성근 외(1999; 2000)의 18km 보다 얇은 상부 지각  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$ 에 대응된다. 거리에 따른 겉보기 감쇠가 비슷한 지역이 많은데, 이와 같은 지역에서  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$  비는 1 보다 큰  $V_p/V_s$  비 값에 대

응되어 나타난다(Yoshimoto *et al.*, 1993; 1998).

한편, 본 연구 결과에서는  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$  비가 1보다 작은 관측점이 많이 존재한다. 실내실험에서 건조한 시료의  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$ 는 1보다 큰 반면, 수분이 포화된 시료의  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$  비는 1보다 훨씬 작다는 사실로부터(Toksöz *et al.*, 1979; Winker and Nur, 1982; Vassiliou *et al.*, 1989), 야외측정에서 1보다 작은  $Q_p^{-1}/Q_s^{-1}$  값을 수분의 영향으로 추정하는 해석이 있으나(Carpenter and Sanford, 1985; Patanè *et al.*, 1994), 아직 확증된 단계는 아니다.

### 토 론

양산단층의 활동성과 연관된 지각의 균열을 시사하는 높은  $Q^{-1}$  값(예, Lees and Lidley, 1994)은 본 연구에서는 찾지 못하였다. 뿐만 아니라, 본 지역은 지진안정 지역중에서도 매우 낮은  $Q^{-1}$  값을 보이고 있다. 지진파 감쇠가 열에 매우 민감하다는 사실(예, Jackson

and Anderson, 1970)과 순상지에서의 열유량이 대륙의 평균값  $65\text{mW/m}^2$  보다 매우 낮은 약  $40\text{mW/m}^2$ 라는 관찰(Pollack and Chapman, 1977; Pollack *et al.*, 1993)로부터 이 지역의 낮은  $Q^{-1}$  값이 낮은 열유량으로 설명될지도 모른다. 그러나, 양산단층지역의 열유량은  $80\text{mW/m}^2$  이상에 이른다(Han and Chapman, 1985). 이러한 높은 열유량은 제3기에 동해가 격렬한 화성활동을 수반한 배호확장(예, Hirata *et al.*, 1989)에 의해 형성된 연유이다. 반면에 이 지역보다 높은  $Q_p^{-1}$  및  $Q_s^{-1}$  값(Fig. 4)을 보이는 간토 지방의 열유량은  $40\text{mW/m}^2$ 에도 못 미친다. 열유량과 지진활동성의 불일치는 세계 다른지역에서도 많이 관찰되고 있으며(예, Sclater *et al.*, 1980), 따라서 한국 남동부의 낮은  $Q^{-1}$  값은 열유량으로는 설명할 수 없다.

## 결 론

지진이 빈발하는 지역이 조구조 안정지역에 비해 높은  $Q^{-1}$  값을 보이고 있는데, 이러한 높은  $Q^{-1}$  값은 활성단층이 움직임에 따라 생긴 지각의 균열에 연유하는 것으로 해석된다. 지진발생 가능성이 높은 한국 남동부 양산단층 지역 관측망의 120여 미소지진자료에 대하여 확장 Coda 규격화법을 적용한 결과, 지수 회귀선값이  $Q_p^{-1}$ 가 0.009,  $Q_s^{-1}$ 가 0.004로 나타났다. 회귀선식의 지수값은 세계 다른 지역과 매우 유사한 반면,  $Q_p^{-1}$  및  $Q_s^{-1}$  값은 세계에서 가장 낮은 수준이다. 양산단층의 활동성과 연관된 지각의 균열을 시사하는 높은  $Q^{-1}$  값은 본 연구에서는 관찰되지 않았다.

## 사 사

본 연구는 한국과학기술부 자연재해방재기술사업 '지진원 및 지진파 전달특성 연구(과제번호 006109)'에 의해 수행되었으며, 일부 한국과학재단 특정기초 연구(과제번호: 1999-2-311-005-3)의 지원이 있었다.

## 참고문헌

경제복 · 이기화, 1999, 양산단층대 남부 상천리 일대의 트랜지츠사에 의한 단층특성 규명. 한국지구과학회지, 20(1), 101-110.  
 김성균 · 전명순 · 김준경, 1999, 경상분지에서의 P파 감쇠. 지질학회지, 35(3), 223-228.  
 김성균 · 박윤경 · 전명순, 2000, 한반도 남동부의 Q구조. 지

질학회지, 36(4), 529-544.  
 박창업, 1997, 한반도 지진파 에너지감쇠 연구. 한국원자력 연구소 보고서, KAERI-96-08, 1-43.  
 이기화, 1998, 한반도의 역사지진자료. 지구물리, 1(1), 3-22.  
 전명순 · 지현철 · 전정수, 1995, 지진연구, 한국자원연구소 보고서, KR-94(C), 1-16.  
 정태웅 · Sato, H. · 이기화, 2001, 확장 Coda 규격화법에 의한 한반도남동부지역의 P, S파 감쇠구조연구. 한국지구과학회지, 투고중.  
 최위찬 · 이동영 · 이봉주 · 류충렬 · 최병영 · 최성자 · 조등룡 · 김주용 · 이창범 · 기원서 · 양동윤 · 김인준 · 김유숙 · 유장한 · 채병곤 · 김원영 · 강필중 · 유일현 · 이희린, 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 ML 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 Planetary Interiors, 21, 50-60.  
 Bakun, W.H. and Lindh, A.G., 1977, Local magnitudes, seismic moments, and coda durations for earthquakes near Oroville, California. Bulletin of the Seismological Society of America, 67, 615-629.  
 Blakeslee, S., Malin, P., and Alvarez, M., 1989, Fault-zone attenuation of high-frequency seismic waves. Geophysical Research Letter, 16, 1321-1324.  
 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 Planetary Interiors, 67, 48-64.  
 Carpenter, P.J. and Sanford, A.R., 1985, Apparent Q for upper crustal rocks of the central Rio Grande Rift. Journal of Geophysical Research, 90, 8661-8674.  
 Chang, K.H., 1987, Cretaceous strata. In D.S. Lee (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.  
 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 Science, U.S.S.R. (English translation: Physics of the Solid Earth) 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 of Geophysical Research*, 95, 17441-17457.
- Han, W. and Chapman, D.S., 1985, On the regional heat flow around Korea and reduced heat flow. *Journal of the Geological Society of Korea*, 21, 79-89.
- Hirata, N., Tokuyama, H., and Chung, T.W., 1989, An anomalously thick layering of the crust of the Yamato Basin, southeastern Japan Sea: the final stage of back-arc spreading. *Tectonophysics*, 165, 303-314.
- Jackson, D.D. and Anderson, D.L., 1970, Physical mechanism of seismic wave attenuation. *Review of Geophysics and Space Physics*, 8, 1-63.
- 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*, 84, 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., 1998, Q estimates using the coda waves in the Kyungsang Basin. *Proceedings of EESK Conference - Fall, 1998*, 383-390.
- 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.
- Nava, F.A., García-Arthur, R., Castro, R.R., Suárez, C., Márquez, B., Núñez-Cornú, F., Saavedra, G., and Toscano, R., 1999, S wave attenuation in the coastal region of Jalisco-Colima, México. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 115, 247-257.
- Ordaz, M. and Singh, 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.
- 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.
- Patanè, D., Ferrucci, F., and Gresta, S., 1994, Spectral features of microearthquakes in volcanic areas: attenuation in the crust and amplitude response of the site at Mt. Etna, Italy. *Bulletine of the Seismological Society of America*, 84, 1842-1860.
- Pollack, H.N. and Chapman, D.S., 1977, On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness. *Tectonophysics*, 38, 279-296.
- Pollack, H.N., Hurter, S.J., and Johnson, J.R., 1993, Heat flow from the earth's interior: analysis of the global data set. *Review of Geophysics and Space Physics*, 31, 267-280.
- Sato, H. and Fehler, M.C., 1998, Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. Springer-Verlag New York, Inc., 308 p.
- Sclater, J.G., Jaupart, C., and Galson, D., 1980, The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth. *Review of Geophysics and Space Physics*, 18, 269-311.
- 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.
- Taylor, S.R., Bonner, B.P., and Zandt, G., 1986, Attenuation and scattering of broadband P and S waves across North America. *Journal of Geophysical Research*, 91, 7309-7325.
- Toksöz, M.N., Johnston, D.H., and Timur, A., 1979, Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements. *Geophysics*, 44, 681-690.
- Toro, G.R., Abrahamson, N.A., and Schneider, J.F., 1997, Model of strong ground motions from earthquakes in central and eastern North America: best estimates and uncertainties. *Seismological Research Letter*, 68, 41-57.
- Vassiliou, M., Carlos, A., Salvado, A., and Tittmann, B.R., 1989, Seismic attenuation. In Carmichael, R.S. (ed.) *Physocal properties of rocks and minerals*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 548-581.
- Winker, K. and Nur, A., 1982, Seismic attenuation: effect of pore fluids and frictional sliding. *Geophysics*, 47, 1-15.
- 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 2월 28일 원고 접수

2001년 4월 6일 수정원고 접수

2001년 4월 7일 원고 채택