

## 남한 남서부지역 지각의 P, S파 감쇠 분석

황영희  
경제복  
이윤중

한국교원대학교 지구과학교육과  
한국교원대학교 지구과학교육과  
한국교원대학교 지구과학교육과

### 1. 서 론

지구는 완전한 탄성체가 아니라 비탄성적인 성질을 지니고 있어 지진파가 진행하는 동안 매질이 파동에너지를 흡수하여 진폭이 감소된다. 일반적으로 지각의 감쇠 값은 지진활동과 밀접한 연관성을 나타내는 Quality factor(Q)의 역수  $Q^{-1}$ 로 묘사된다.  $Q^{-1}$ 는 건축물의 내진설계에 대한 지반의 강진동을 예측하는데 매우 중요하다. 최근 일본 후쿠오카 북서쪽 약 45km 해역 지진발생으로 부산을 비롯하여 대부분의 도시들이 지진을 느끼면서 한반도 주변의 지진에 대해 관심이 모아지고 있다. 우리는 남한 남서부 지역에 대한 한국자원연구원(KIGAM) 관측망 중 구례(GRE)에서 기록된 지진자료(1997년 1월부터 2004년 8월)를 바탕으로 확장 Coda 규격화법을 적용하여  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 을 동시에 계산하였다. 또한, 한국지질자원연구원(KIGAM) 관측망 중 무안(MUN) 관측점에서 기록된 지진자료(1997년 1월부터 2004년 8월)와 기상청(KMA) 관측망 중 MOP(목포), WAN(완도) 관측점에서 기록된 지진자료(2001년 1월부터 2004년 8월)를 함께 분석하였다. Figure 1은 남한 서남부 지역에 발생한 지진(1997.1 - 2004.8)의 진앙분포와 관측소를 나타낸다.

### 2. 분석방법 및 자료

확장 Coda규격화법은 대략 S파의 주행 시간의 2배보다 큰 경과시간에 Coda파 스펙트럼 진폭이 S파의 진원 스펙트럼 진폭에 비례한다는 경험적 관측에 바탕을 두고 다음 관계식에 기초한다.

$$C(f, t_C) \propto S_S(f) \propto S_P(f) \quad (1)$$

여기서 f는 Hz 단위의 주파수,  $t_C$ 는 진원 발생시로부터 일정경과 시간을 의미하며 C,  $S_S$  및  $S_P$ 는 각각 Coda 진폭 스펙트럼, S파 진원스펙트럼 및 P파 진원 스펙트럼을 나타낸다. 식(1)의 비례관계에서 S파 직접파를 Coda파로 나누어 줌으로써 관측소 효과와 진원항을 제거할 수 있다(Aki, 1969). 이는 Coda 스펙트럼 진폭이 진원거리에 독립적이라는 것을 내포한다. 앞서 언급한 비례관계를 바탕으로  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 을 다음 식(Yoshimoto et al., 1993)을 이용해 서로 다른 진원거리를 가지는 지진으로부터 지진기록에서 구할 수 있다.

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

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

여기서  $A_P(f,r)$ 와  $A_S(f,r)$ 는 각각 P파 직접파와 S파 직접파의 최대진폭이며  $r$ 은 진원거리,  $V_P$ 와  $V_S$ 는 P파의 속력과 S파의 속력,  $C(f,t_C)$ 는 Coda파 스펙트럼 진폭이다. Coda파 스펙트럼 진폭은 60초를 중심으로 5초 시간창에 대한 진폭의 제곱근 평균값에서 도출하였고, P파와 S파 직접파 또한 5초의 시간창을 선택하여 최대진폭을 구하였다.

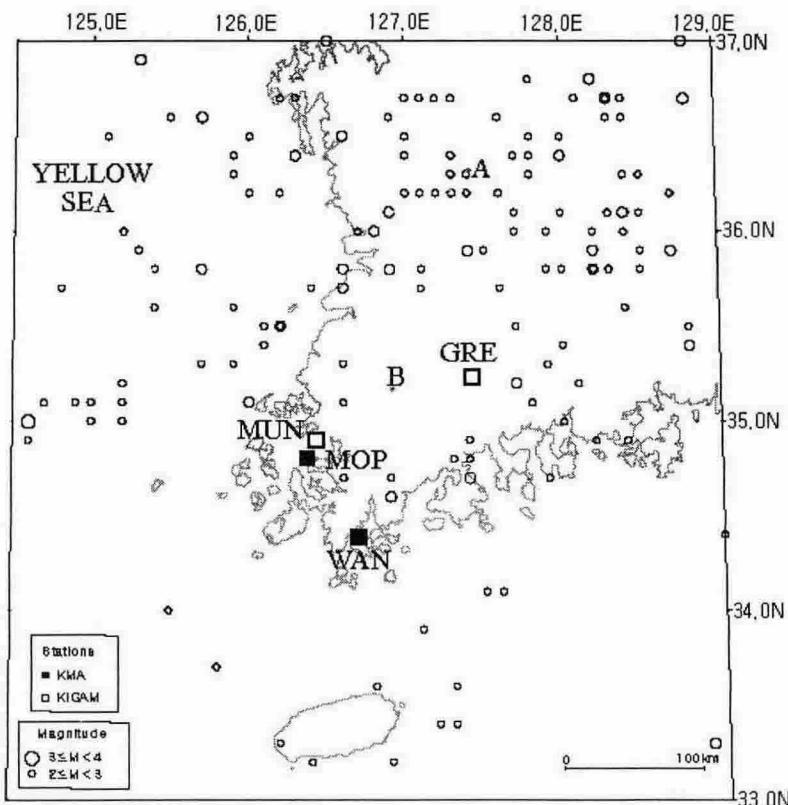


Figure 1. Map of S. Korea showing seismic stations and epicenters of 74 earthquakes used in this study. Open squares and solid squares represent the KMA and KIGAM Networks, respectively. Other locations are as follows : A-Taejeon, B-Kwangju.

많은 지진에 대해 진원거리 대 식(2)와 (3)의 좌변값에 최소자승법을 적용함으로써 한 도표 상에서 선형회귀선으로부터  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 를 구할 수 있다. P파 분석을 위해서 상하성분 지진기록을 이용하였으며, S파 분석을 위하여 남북 성분 지진기록을 이용하였다. 이는 남북과 동서 성분 사이의 충분한 진폭 차이가 관측되지 않았기 때문이다.

Coda파 경과시간과 동일한 5초의 P파 시간창을 확보하기 위해 진원거리 40km 이상의 자료를 분석대상으로 하였으며, 200km 부근의 진원거리에서 Coda 지속시간과 지진규모 사이의 관계가 진원거리에 따라 달라진다는 관측(Tsumura, 1976)으로부터 진원거리를 160km 이내로 제한하였다. 사용된 S파 자료들 중 직접파(Sg)보다 큰 자료들은 Sg와 SmS, Lg와의 구분이 어려워 제외하였다. 또한, 신호파워대 잡음파워비가 2배 미만인 자료들은 분석에서 제외하였다.

우리는 1997년부터 2004년 8월까지 KIGAM 관측망 중 구례(GRE)와 무안(MUN) 관측소에서 기록된 지진자료와 KMA 관측망 중 목포(MOP), 완도(WAN) 관측소의 2001년부터 2004년 8월까지 기록된 지진자료를 분석 대상으로 하였다. 또한 각 관측소는 모두 고유주파수 1Hz의 3성분 (U-D, N-S, E-W) 속도 지진계이며 출력신호는 100 sample/sec에서 16bit의 해상도로 계수화되었

다. 모든 지진자료의 진원은 HYPO71을 이용해 결정하였으며, 지진의 규모는 2.0 - 3.9의 범위에 속하였다.

### 3. $Q_P^{-1}$ 및 $Q_S^{-1}$ 계산

각 속도 지진기록에서 저주파 변동성분을 제한 다음, 전체 시간의 10%에 해당하는 시작 및 끝 부분에 cosine 감소함을 곱한다(Hino, 1986). 그런 후 각 지진자료에 1~2, 2~4, 4~8, 8~16 및 16~32Hz의 대역필터를 적용한다.

필터된 P파 상하성분 및 S파 남북성분 자료에서 최대 진폭  $A_P(f,r)$ ,  $A_S(f,r)$ 를 측정함과 동시에 각각의 성분에서 Coda 규격화를 위한 Coda 스펙트럼 진폭을 구하여 식(2)와 (3)에 대입한다. 이때  $V_P=6\text{km/s}$ ,  $V_S=3.5\text{km/s}$ 로 가정하였다.  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 의 값은 각 관측소의 자료에 대한 선형회귀선의 기울기로부터 얻어진다(Figure 2,3,4,5). 구례지역과 무안-목포-완도지역의  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 의 값은 Table1에 나타낸다. 이 값을 주파수의 지수형태로 나타내면 구례지역의 값은  $Q_P^{-1}$ 이  $0.026f^{-1.14}$ ,  $Q_S^{-1}$ 가  $0.033 f^{-1.15}$ 이며, 무안-목포-완도 지역은  $Q_P^{-1}$ 가  $0.026 f^{-1.47}$ ,  $Q_S^{-1}$ 가  $0.001 f^{-0.49}$ 이다.

Table 1. 구례지역과 무안-목포-완도지역의  $Q_P^{-1}$ ,  $Q_S^{-1}$  값

주파수(Hz) 지역		2~4		4~8		8~16		16~32	
	$Q_P^{-1}$	0.00537	$\pm 0.0073$	0.00348	$\pm 0.00284$	0.00194	$\pm 0.00144$	0.00055	$\pm 0.00066$
구례	$Q_S^{-1}$	0.02145	$\pm 0.0071$	0.00286	$\pm 0.00260$	0.00163	$\pm 0.00101$	0.00106	$\pm 0.00044$
무안-목포-완도	$Q_P^{-1}$	0.00599	$\pm 0.0048$	0.00147	$\pm 0.00164$	0.00088	$\pm 0.00087$	0.00022	$\pm 0.00038$
	$Q_S^{-1}$	0.00053	$\pm 0.0028$	0.00089	$\pm 0.00088$	0.00049	$\pm 0.00036$	0.00017	$\pm 0.00016$

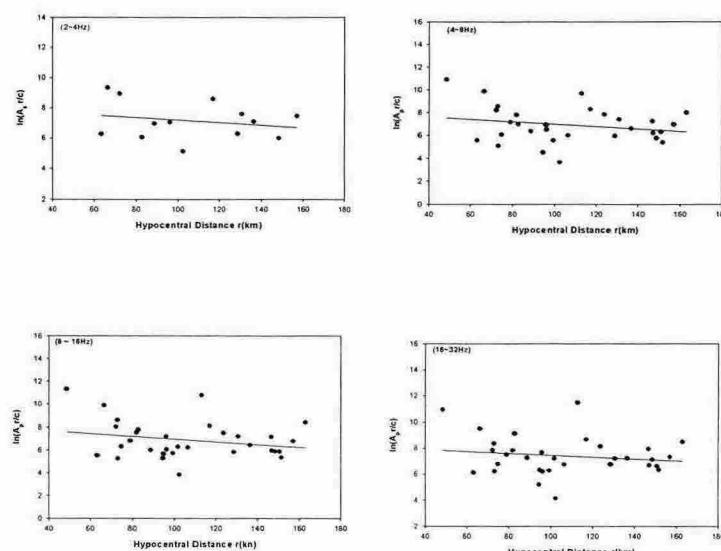


Figure 2. Plot of the extended coda-normalized amplitude of P wave against hypocentral distance for each frequency band. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate in the GRE station.

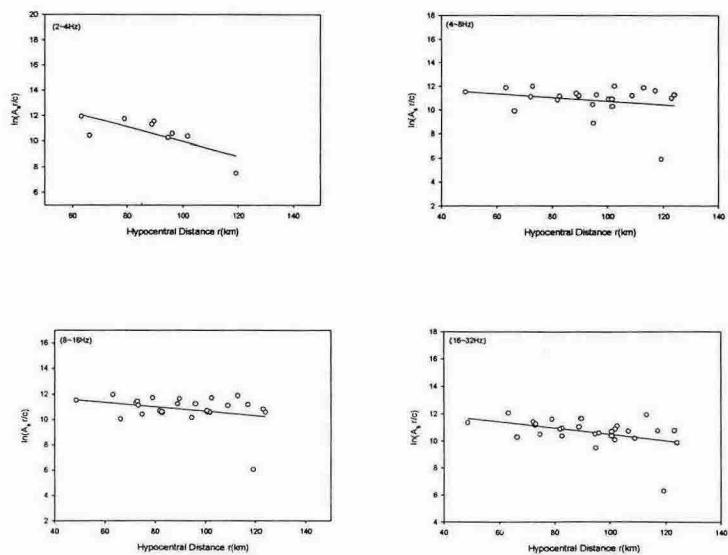


Figure 3. Plot of the extended coda-normalized amplitude of S wave against hypocentral distance for each frequency band. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate in the GRE station.

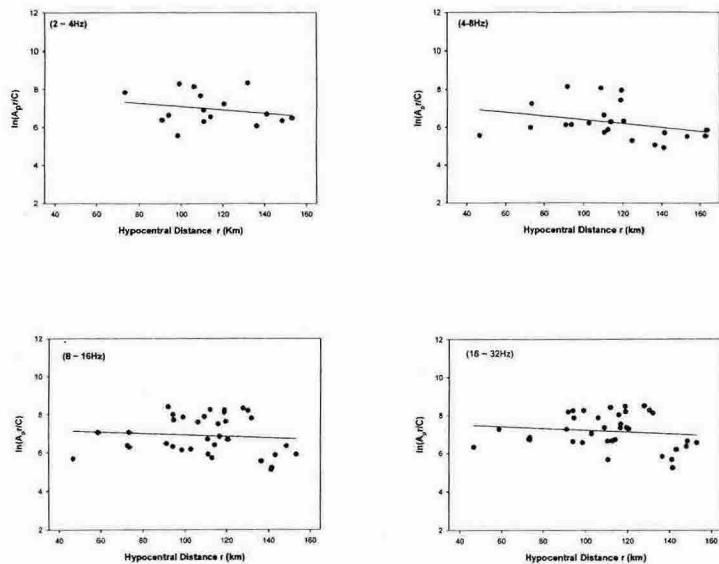


Figure 4. Plot of the extended coda-normalized amplitude of P wave against hypocentral distance for each frequency band. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate in the MUN-MOP-WAN stations.

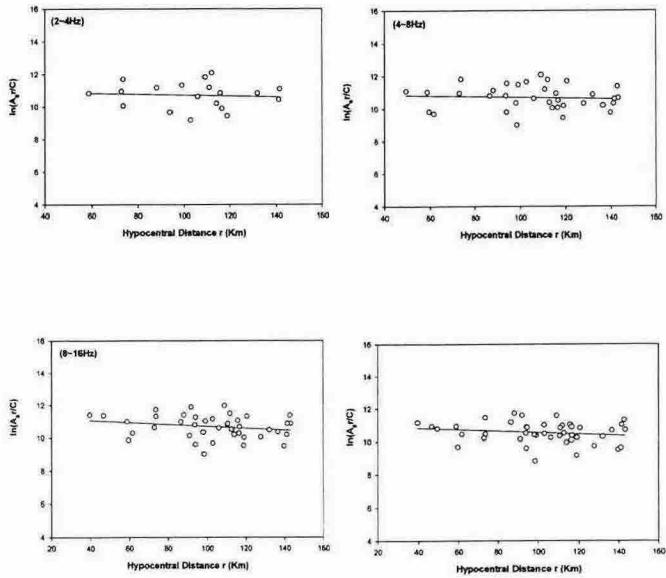


Figure 5. Plots of the extended coda-normalized amplitude of S waves against hypocentral distance for each frequency band. The solid line indicates the best-fit line from the least-squares estimate in the MUN-MOP-WAN stations.

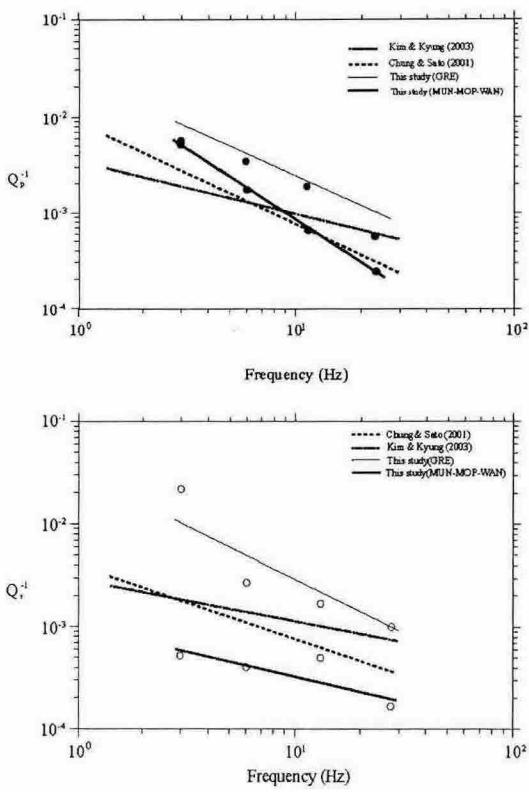


Figure 6. Comparisons of  $Q_P^{-1}$  and  $Q_S^{-1}$  values measured in this study with the values of other studies.

#### 4. 결론 및 논의

남한 남서부 지역의  $Q^{-1}$  값을 측정하기 위해 기상청(KMA) 관측망 중 2개 관측소와 한국지질자원연구원(KIGAM) 관측망 중 2개 관측소에서 관측된 미소 지진자료에 대하여 확장 Coda규격화법을 적용하여 구한  $Q_P^{-1}$  값과  $Q_S^{-1}$  값이 두 지역 모두 주파수가 3.0Hz에서 24Hz로 늘어남에 따라 줄어드는 주파수 의존적인 특성을 나타낸다. 이들 값을 주파수의 지수 형태로 나타내면 구례지역의 값은  $Q_P^{-1}$ 이  $0.025 f^{-1.14}$ ,  $Q_S^{-1}$ 가  $0.033 f^{-1.15}$ 이며, 목포-무안-완도 지역은  $Q_P^{-1}$ 가  $0.026 f^{-1.47}$ ,  $Q_S^{-1}$ 가  $0.001 f^{-0.49}$ 이다.

일본 Kanto(Yoshimoto et al., 1993)와 남부 Kurils 같은 지진학적으로 활발한 지역은 높은  $Q_P^{-1}$  값을 가지고, 반면 Baltic 순상지(Kvamme & Havskov, 1989)같은 지진학적으로 안정한 지역은 낮은  $Q_P^{-1}$  값을 보인다. Fig.6에 나타난 결과와 남한 남동부지역 (Chung & Sato, 2001) 및 남한 중부지역(Kim & Kyung, 2003)의 결과는 대체로 지표 측정의 가장 낮은 부분에 놓이는 Baltic 순상지 값과 유사하다.  $Q_S^{-1}$  또한 지진학적으로 안정한 지역이 활동적인 지역보다 낮은 값을 가진다.  $Q_S^{-1}$ 은  $Q_P^{-1}$ 에 비해 많은 연구가 이루어졌으며,  $Q_S^{-1}$ 에서도  $Q_P^{-1}$ 과 비슷한 차이가 동일한 지역에서 관측되었다.

남한 남서부지역 중 무안-목포-완도 지역은  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$  값이 타 지역에 비해 낮은 값을 나타내며 구례지역은  $Q_P^{-1}$ 과  $Q_S^{-1}$ 가 타 지역에 비해 상대적으로 높은 값을 나타낸다. 이 높은 값을 상대적으로 구례지역이 다른 타 지역에 비해 지각의 불균질성이 다소 높을 가능성을 반영하는 것이 아닌가 사료된다. 그러나 전 세계적으로 볼 때 비교적 안정한 값의 범위에 속한다고 볼 수 있다.

#### 참고문헌

- 김규동, 경재복, 2003, 충청 동부지역 지각의 P, S파 감쇠분석, 한국지구과학회, 24, 684-690.
- Aki, K., 1969, Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves, J. Geophys. Res., 74, 615-631.
- 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.
- Hino, M. 1986. Spectral analysis, Asakura-Shoten, Tokyo, 300pp (in Japanese).
- Kvamme, L. B. and J. Havskov, 1989, Q in southern Norway, Bull. Seim. Soc. Am., 79, 1575-1588.
- Tsumura, K., 1976, Determination of earthquake magnitude from total duration of oscillation, Bulletine of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 45, 7-18.
- 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.