

한반도 남동부에서의 Coda파 감쇠

김성균* · 김복희**

Attenuation of Coda Wave in the Southeastern Korea

Kim, Sung Kyun* and Kim, Bok Hee**

ABSTRACT: In order to know the characteristics of attenuation of coda wave in the Kyungsang Sedimentary Basin, quality factor for coda wave (coda Q) is estimated from the earthquake data recorded in the KIGAM local seismic network. The single scattering model for coda wave generation is adopted in estimating coda Q . In the present study, coda $Q(Q_c)$ is estimated in the range of $\alpha=1.5\sim 3.0$, where α denotes the normalized time to S-wave travel time and expressed in terms of frequency (f). The deduced function in the range of 1 to 25 Hz is $Q_c=36.8283 f^{1.15095}$ which represents the strong dependence of coda Q on frequency. It is found that the difference of Q_c between U-D, N-S, and E-W components is negligible. This fact supports the back-scattering theory that coda wave originates from scattered waves by randomly distributed heterogeneities in the crust. On the other hand, it is observed that the coda Q increases with increasing epicentral distance. This observation suggests that Q_c increases with depth.

서 언

지구는 완전한 탄성체가 아닌 비탄성적인 성질을 지니고 있으므로 지진파는 전파중에 진폭이 감쇠되어 간다. 이것은 전파에 따른 지진파선의 기하학적인 확장 외에 매질이 파동에너지를 흡수하는 성질을 가지고 있기 때문이다. 물질이 파동에너지를 흡수하여 열에너지로 바뀌는 성질을 내부마찰이라 하고, 특히 지구내부에서 내부마찰에 의하여 지진파의 진폭이 감소하는 현상을 감쇠(attenuation)라 한다.

일반적으로 감쇠는 매질의 종류와 상태, 지진파의 주파수에 따라 달라진다. 즉 지역과 지진파의 전파경로에 따라 달라짐을 의미한다. 이러한 지진파의 감쇠특성에 대한 연구는 지구내부의 구성물질에 대한 귀중한 정보를 제공하게 되며, 강진동의 전파에 따라 지진파 형이 어떻게 변화할 것인가를 예측하는 공학적인 연구

에 필수적이다. 이러한 필요에 부응하여, 미국 서부와 일본 등지의 강진 다발지역에서는 지진기록 분석에 의하여 지진파의 감쇠에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다. 그러나 강진 발생률이 상대적으로 낮은 한반도에서는 자료의 부족으로 연구가 충분히 진전되고 있지 않다.

어떤 지역의 지진재해는 지진원의 특성, 지진파를 전달하는 매질의 성질 및 지반의 조건에 따라 크게 달라진다. 매질의 성질 중 중요한 것은 지진파의 속도와 에너지 전달에 관련된 감쇠특성이다. 지진학에서의 감쇠특성은 지진파 중 P 및 S파, Coda파, Lg파, 표면파 등을 대상으로 하고 있으며, 지역별 비교연구를 비롯하여 지구심부의 비탄성적 성질에 대한 연구로까지 진전되고 있다. 최근 경상분지에서 Coda파를 이용한 Q 에 관한 몇 개의 연구가 보고 되었다 (전명순 등, 1995; Baag, 1997; Lee and Lee, 1998).

본 연구의 목적은 Coda파를 대상으로 경상분지내의 지진파 감쇠특성을 규명하는 것이며, Coda파를 이용한 Q 값을 주파수(frequency)와 경과시간(lapse time)의 함수로 가정하여 1차원적인 Q 값을 추정하였다.

Coda파를 이용한 Q 값 계산에는 한국자원연구소가

* 전남대학교 지구환경과학부 (Department of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea), E-mail: kimsk@chonnam.chonnam.ac.kr

** 광주지방기상청 (Kwangju Regional Meteorological Office of KMA, Kwangju 500-170, Korea)

1994년 이래 경상분지내에 설치, 운영중인 지역지진관측소 중 관측망의 중앙에 위치한 명계리 (MKL)의 자료를 이용하였다. 대상자료는 1995년 12월부터 1997년 10월까지 기록된 지진자료이며, 계산방법은 Sato (1977)의 단일산란모델을 근거로 하였다.

지진자료

본 연구에서는 한국자원연구소가 경상분지에 설치, 운영중인 지역지진관측망에서 경상분지 중앙에 위치하며, 양산단층과 가장 근접한 명계리 (MKL) 관측소 한 곳의 자료를 이용하여 Coda Q를 계산하였다. 여기서 한 관측소만의 자료를 이용하게 된 것은 지진파의 전파방향에 따른 Coda Q의 변화를 고찰하기 위해서이다. 그러나 한 관측소만의 자료를 대상으로 할 때, 분석가능한 지진기록의 수가 크게 감소하게 되는 피할 수 없다. Fig. 1에 명계리 관측소와 Coda Q를 결정하기 위하여 선택된 지진의 진앙지를 나타내었다. 지진기록 선택의 기준은 S/N비가 크고 육안으로 보아서도 Coda 파의 감쇠가 뚜렷한 경우로 한정하였다. 그 결과 선택된 지진기록의 수는 60개 (=지진수 20×3성분)에 달하며, 진앙거리의 분포는 5~58 km의 범위이다. 또한 진원의 깊이는 20 km 이하인 천발지진으로서 그 규모는 1.7~3.1 정도이다 (Table 1 참조). 사용한 지진기록은 1초당 자료수가 100개씩이나, 초기의 일부 자료는 50개씩으로 되어 있다. 따라서 본 연구에서 분해가

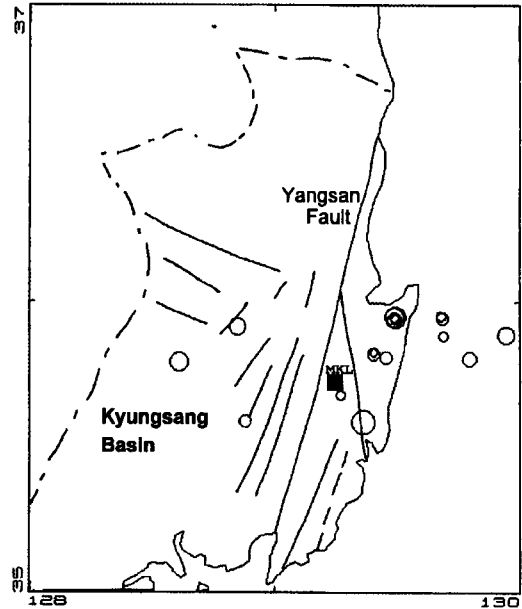


Fig. 1. Epicenters of selected events to estimate coda Q in the present study.

능한 Nyquist 진동수는 25 Hz로 한정된다.

지진파 전달 경로상의 평균적인 Q를 결정하기 위한 다수의 방법이 제안되어 있다 (Sato, 1977; Rogers et al., 1987). 이 방법들은 1개 관측소만의 자료로부터 Q를 계산하는 경우와 다수의 관측소 자료를 필요로 하는 경우로 나눌 수 있다. 즉 전자는 시간영역에서 Q를

Table 1. List of selected events to estimate coda Q in the Kyungsang Basin.

Event No.	Date	Origin time	Latitude	Longitude	Depth (km)	M
1	95/12/08	16:32:10.76	35-56.73	129-41.10	20.20	2.2
2	95/12/08	17:49:29.75	35-57.25	129-40.64	20.76	1.9
3	95/12/17	01:12:41.91	35-53.00	129-41.37	18.20	2.0
4	96/01/01	05:01:34.07	35-47.81	128-36.69	12.96	2.9
5	96/01/14	23:30:04.64	35-53.86	129-56.79	15.00	2.7
6	96/02/22	21:47:09.90	35-56.52	129-29.63	10.51	1.9
7	96/02/27	04:34:04.07	35-56.77	129-29.71	10.19	2.0
8	96/02/27	04:39:33.98	35-57.00	129-29.55	10.16	3.0
9	96/02/27	09:35:44.35	35-56.93	129-29.35	9.96	1.9
10	96/02/28	07:07:21.93	35-56.95	129-29.39	10.33	2.8
11	96/02/28	13:23:57.05	35-56.53	129-29.32	9.86	2.4
12	96/02/28	11:58:45.51	35-56.56	129-29.48	10.49	2.0
13	96/04/15	02:49:44.94	35-35.85	128-52.74	16.08	2.3
14	96/05/05	02:50:49.32	35-48.78	129-27.41	9.28	2.3
15	96/06/20	22:36:17.52	35-49.61	129-24.33	11.26	2.2
16	96/06/20	22:55:07.45	35-49.63	129-24.34	10.74	1.7
17	96/10/22	01:18:53.74	35-41.11	129-16.22	13.34	1.9
18	96/12/11	06:56:51.60	35-48.58	129-47.80	18.97	2.5
19	97/09/17	09:33:18.46	35-35.44	129-21.76	10.69	3.1
20	97/10/11	19:50:28.76	35-55.05	128-50.69	10.93	2.7

결정하는 경우이며, 후자는 공간영역 내에서 Q 를 결정하는 방법으로 볼 수 있다. 다수의 관측소 자료를 이용하는 경우는 거리에 따른 진폭의 감쇠를 고려하게 되므로, 진앙거리가 다양한 다수의 자료가 필요하며 관측소의 수가 많지 않을 때는 여러 지진을 이용하게 되므로 지진규모에 의해 진폭이 조정되어야 하는 등 여러 가지 제약이 있다. 따라서 본 연구에서는 한 관측소의 자료만을 사용하여 시간영역내에서 Q 를 결정하는 방법을 사용하였다.

Coda Q 계산방법

지진기록의 고주파를 적절히 설명하기 위해서는 많은 수의 변수가 필요하기 때문에 결정론적인 방법을 사용하여 단주기 지진파의 감쇠를 측정하기는 어렵다. 지진파의 주행거리가 길면 길수록, 불균질 매질의 변화가 크면 클수록 지진파는 서로 충돌할 확률이 커지므로 지진기록의 마지막 부분은 많은 불균질 매질을 거친 파동을 평균하게 된 어떤 종류의 결과로 간주할 수 있다 (Aki, 1969). 따라서 Aki는 고주파의 감쇠에 통계적 접근을 시도하여, 지진파의 꼬리부분에 해당되는 Coda파를 지구 내부에 불규칙적으로 분포하는 불균질 매질에 의해 후면에서 산란된 파 (back-scattered wave)로 설명하였다. 그 후 다수의 연구로 산란모델의 유효성이 입증되었다.

Coda파의 발생모델은 산란의 강도에 따라, 1차적인 산란만을 고려하는 Aki (1969)의 단일산란모델 (single scattering model)이 먼저 제안되었다. 그후 여러 번의 산란을 가정하는 Gao *et al.* (1983a,b) 등의 다중산란 모델 (multiple scattering model)과 Aki and Chouet (1975) 등이 제시한 강산란 또는 확산모델 (strong scattering diffusion models)로 확장, 발전되었다. 짧은 경과시간에서의 Coda파가 단일산란모델로 잘 설명된다면, 다중산란모델은 경과시간이 긴 경우에 매질의 불균일성에 의해 2차, 3차적으로 산란된 파로 Coda파의 나중부분에서는 중요하게 된다. 확산모델은 지진에너지 전달이 확산과정으로 간주되는 모델로 볼 수 있다.

본 연구에서 Coda파의 계산에는 Sato (1977)에 의하여 개량된 단일산란 모델을 채택하였다. 이 모델은 적용이 쉽고 단순하기 때문에 지각내의 국지적인 Q_c 추정에 널리 이용되고 있다 (Aki and Chouet, 1975, Sato, 1977). 이 모델의 경우 각주파수 ω 지진발생후 경과시간(lapse time) t 에서의 에너지밀도 $E(\omega, t)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다 (Kosuga, 1992).

$$E(\omega, t) = [W_0(\omega) g_\pi(\omega) / (2\pi\beta^2 t^2) \exp(-\omega t / Q_c)] \quad (1)$$

여기서 W_0 : S파 에너지 스펙트럼

g_π : 산란계수

β : S파 속도

Q_c : Coda파의 Q

본 연구에서는 짧은 지속시간에 대한 Coda파를 분석하므로 진앙지와 지진관측점의 위치가 일치하지 않는다는 가정아래 Coda파의 도착시간을 S파 도착 직후라고 간주하는 Sato (1977)의 모델을 채택하는 경우, 식 (1)은 다음과 같이 전환된다 (Kosuga, 1992).

$$E(\omega, t) = [W_0(\omega) g_\pi(\omega) / (2\pi\beta^2 t^2) \exp(-\omega t / Q_c)] \quad (2)$$

단 r : 진앙거리

또한 중심주파수 ω 에 대한 Coda파의 경과시간 t 에서의 진폭은

$$A(\omega, t) = C(\omega) \sqrt{K(\alpha)} r^{-1} \exp(-\omega t / 2Q_c) \quad (3)$$

이 된다. 여기서 $C(\omega)$ 는 S파의 여기강도(excitation strength), 매질의 산란강도 등을 포함하는 상수이다. 위 식은 다음과 같이 경과시간 t 에 대한 1차식으로 변형될 수 있다.

$$\ln[A(\omega, t) r \sqrt{K(\alpha)}] = \ln C(\omega) - (\omega / 2Q_c) t \quad (4)$$

$$K(\alpha) = (1/\alpha) \ln[(\alpha+1)/(\alpha-1)], \quad \alpha = t/t_s \quad (5)$$

여기서 t_s 는 S파의 주행시간을, α 는 S파 주행시간에 대한 경과시간의 비를 나타낸다.

결국 식 (4)로부터 Q_c 를 계산하게 되며, 그 계산과정은 다음과 같다.

- 먼저 FFT를 실행하여 지진기록을 주파수영역으로 변환시킨다.
- 여기에 중심주파수를 1.5, 3, 6, 12, 24 Hz로 하고 주파수 대역이 중심주파수의 2/3가 되는 대역 필터를 통과시킨다. 예를 들면 중심주파수 3 Hz의 경우는 통과대역이 1.5~4.5 Hz의 범위가 된다.
- 대역통과필터를 거친 주파수영역 자료를 다시 시간영역 자료로 변환시킨 후, 이 자료를 최대치에 대하여 정규화 한다. 다음으로 정규화된 시간 α 의 1/10에 해당하는 시간창에 대하여 평균한 후, 다시 이들의 최대치에 대해 정규화하게 된다. 여기서 정규화된 시간 α 는 어떤 관측소에 지진발생 후 S파가 도달하는데 걸린 시간 t_s 와 지진발생 후 경과시간 t 의 비, 즉 t/t_s 를 나타낸다.

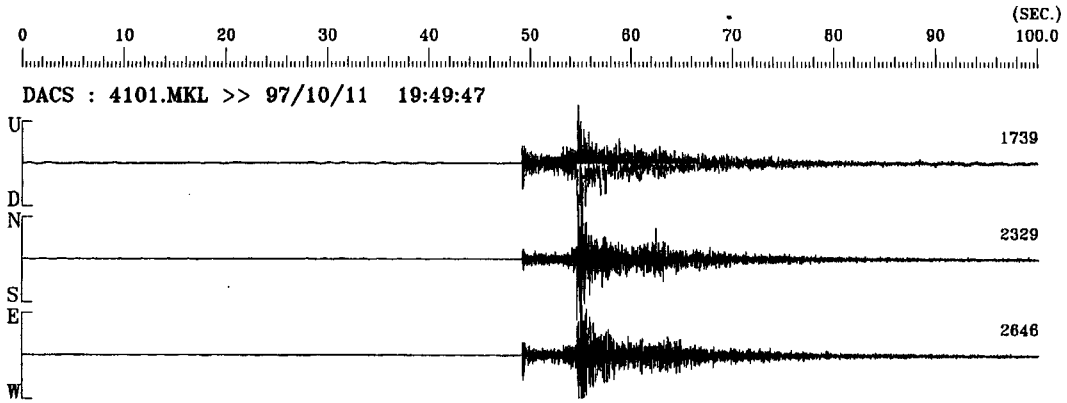


Fig. 2. Example of the representative seismogram to estimate coda Q_c .

- 마지막으로 식 (4)의 좌변의 값을 시간축에 대하여 나타내면 대체로 직선이 되며, 이 때 그 기울기로부터 Coda Q 즉 Q_c 를 계산할 수 있다.

Fig. 2는 Coda Q 계산에 사용한 대상지진의 하나로서, 1997년 10월 11일 발생한 규모 2.7의 지진을 나타낸 것이다. 그림은 위에서부터 각각 U-D, N-S, E-W 성분을 나타낸다. Fig. 3은 이 지진기록에 중심주파수를 1.5, 3, 6, 12, 24 Hz로 하는 대역통과필터를 통과 시킨 결과를 보여 주고 있다. 대역통과필터는 Gaussian함수와 유사한 Hamming Window (Oosaki, 1981)를 사용하였다. Fig. 4는 가로축을 정규화된 시간 $\alpha(t/t_c)$ 로 하고 세로축을 식 (4)의 좌변으로 하여, 중심주파수 24 Hz에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 정규화된 진폭은 α 가 1일 때 최대가 되며, 그 이후 직선적으로 감소함을 알 수 있다. 이 직선의 기울기로부터 Q_c 를 계산하게 된다.

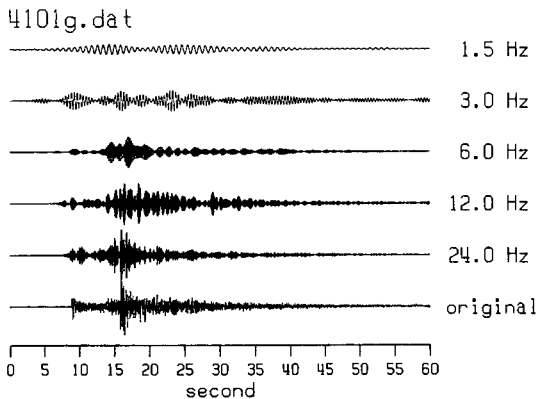


Fig. 3. Example of the bandpass-filtered seismograms for central frequencies of 1.5, 3, 6, 12, and 24 Hz.

Coda Q 계산결과 및 토론

Fig. 4에서 정규화된 시간 $\alpha=1.0$ 이후의 Coda파의 진폭감소는 α 를 어떤 범위까지 취하느냐에 따라 달라지므로, 그 결과 Q_c 에 변화가 나타나게 된다. 이와같이 정규화된 시간 α 의 증가에 따른 Q_c 의 의존성을 조사하기 위해 지진기록 중 1성분(U-D)에 대하여 정규화된 시간 α 의 시작시간을 1.5로 고정하고 $\alpha=2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 까지 4단계로 변화를 주어 Q_c 값을 조사하였다. 그 결과를 6, 12, 24 Hz에 대하여 평균치와 표준편차(수직선)를 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 $\alpha=3.0$ 까지는 지속적인 Q_c 값의 증가를 보이나 그 이후는 거의 일정한 값을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 $\alpha=1.5 \sim 3.0$ 의 범위에 대하여 α 를 구했다.

다음으로 지진기록 3-성분(U-D, N-S, E-W)별로 1.5, 3, 6, 12, 24 Hz에 대한 Q_c 값을 계산하여 Table

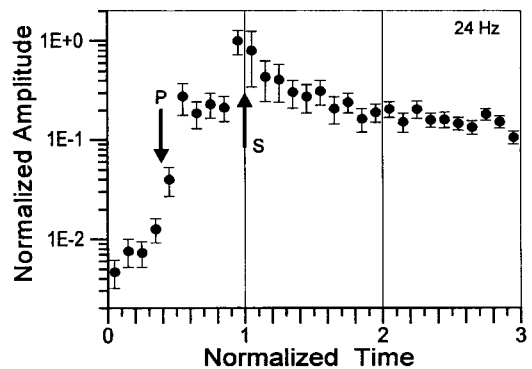


Fig. 4. Normalized signal amplitude as a function of normalized time. Vertical bar denotes standard deviation of signal amplitudes.

Table 2. Frequency dependent coda Q for U-D, N-S, and E-W component.

Component	1.5 Hz	3 Hz	6 Hz	12 Hz	24 Hz
U-D	65.38	98.44	384.75	693.10	1464.39
N-S	63.03	126.66	389.32	722.75	1144.58
E-W	48.60	111.28	295.87	681.69	1198.99

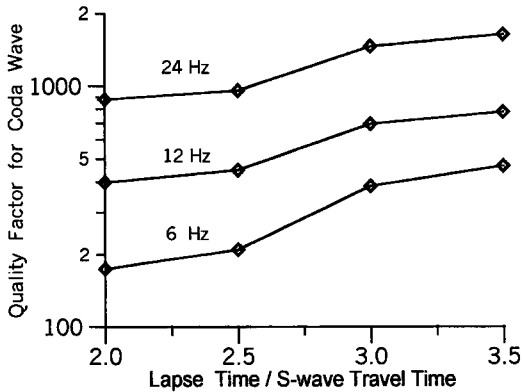


Fig. 5. Variation of coda Q with increasing lapse time to S-wave travel time.

2와 Fig. 6에 제시하였다. 그림에서 각 주파수에 대한 Q_c 값은 성분별로 큰 차이가 없으며, 얻어진 Q_c 값은 주파수의 증가에 함께 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 Q_c 는 주파수 f 에 대한 함수로 나타나며, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다 (Aki and Chouet, 1975).

$$Q_c = Q_0 f^n \quad (6)$$

여기서 Q_0 는 주파수가 1 Hz일 경우의 Q_c 값을 나타내며, 지수 n 은 지역적 특성을 나타내는 상수이며 매질의 불균질성의 정도를 나타내는 매개변수로 지구조직 특징과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다 (Kosuga, 1992). Fig. 6에서 모든 측정값을 만족하는 최적곡선을 식 (6)에 맞춰 구하면

$$Q_c = 36.8283 f^{1.15095} \quad (7)$$

이 된다. 여기서 주파수 f 의 지수 n 은 다른 지역의 연구결과 (예를 들면, Rogers *et al.*, 1987; Kanao and Ito, 1990; Dominguez *et al.*, 1997)에 비하여 상대적으로 큰 값을 보여 주며, 강한 주파수 의존성을 나타낸다.

Fig. 7에 본 연구에서 얻어진 주파수에 대한 Q_c 의 변화를 다른 연구결과와 비교, 도시하였다. 본 연구에서 얻어진 Q_c 값은 전명순 등 (1995)과 Baag (1997)이 발표한 경상분지에서의 Q_c 값과 거의 유사하다. 예를 들

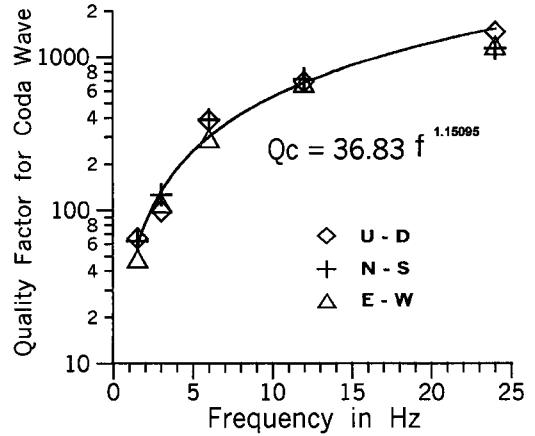


Fig. 6. Variation of coda Q in frequencies of 1.5, 3, 6, 12, and 24 Hz for U-D, N-S, and E-W components.

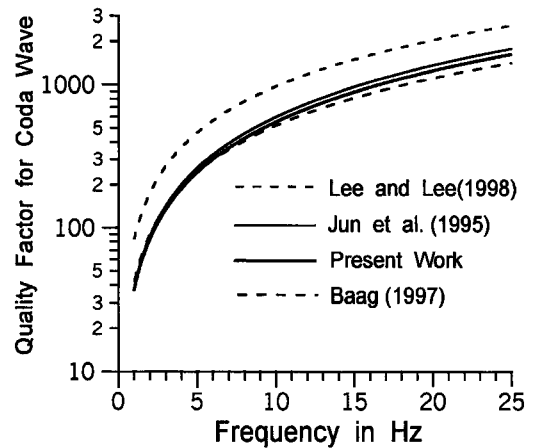


Fig. 7. Comparison of coda Q with other studies.

면, Baag (1997)과 전명순 (1995), 본 논문에서의 값을 1 Hz에서 비교하면, 38, 42, 37이 되며, 10 Hz에서는 각각 599, 523, 551이 된다. 그러나 Lee and Lee (1998)의 결과 (Group II)와는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 Lee and Lee (1998)가 사용한 계산방법과 계산대상인 시간창의 길이 등 계산과정에 발생하는 오차에 의한 것으로 생각된다.

한편 경상분지내의 지진파 감쇠특성을 조사하기 위한 다른 방법으로 양산단층을 경계로 단층선을 횡단하여 전파된 지진파 단층선과 평행하게 전파되어 온 지진에서의 Q_c 를 비교해 보았다(Fig. 1의 진앙지 분포 참조). 그러나 비교의 대상인 지진수가 너무 적고 그 차이가 근소하여 단정적인 결론을 얻기에는 불충분하였다.

Fig. 8은 진앙거리에 따른 Q_c 값의 변화를 주파수

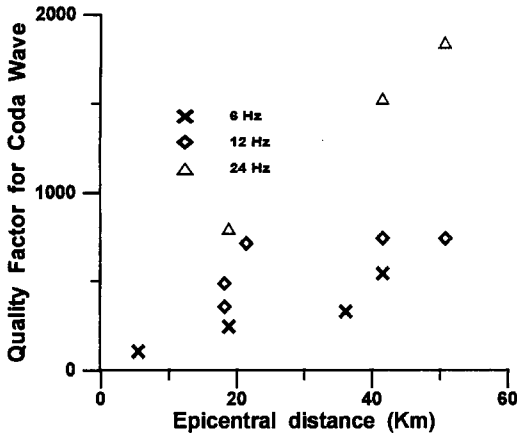


Fig. 8. Variation of coda Q with epicentral distance for central frequencies of 6, 12, and 24 Hz.

6, 12, 24 Hz에 대하여 비교한 것이다. 일반적으로 짧은 진앙거리에서는 비교적 낮은 Q_c 값, 먼 진앙거리에서는 높은 값을 나타내는 경향이 있음을 알 수 있다. 일반적으로 진앙거리가 멀어 질수록 지진파는 더욱 깊은 곳을 통과하게 되므로, 진앙거리의 증가에 따른 Q_c 값의 증가는 심부일수록 Q_c 값이 증가함을 시사한다.

결 론

경상분지에서의 Coda파 감쇠특성을 조사하기 위하여 한국자원연구소 지진관측망의 지진자료를 이용하여 Coda Q 를 계산하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Coda Q (Q_c)와 주파수 f 의 관계로서 $Q_c = 36.8283 f^{1.15095}$ 를 얻었으며, 이것은 Q_c 의 큰 주파수의존성을 지시한다.

2) 관측성분별로 Q_c 의 변화를 비교한 결과 관측성분과 관계없이 Q_c 에 거의 차이가 없음이 나타났다. 이 사실은 Coda파가 지각내에 불규칙적으로 분포하는 불균질 매질에 의하여 산란된 파라는 것을 지시한다.

3) 진앙거리에 따른 Q_c 값의 변화를 주파수 6, 12, 24 Hz에 대하여 비교한 결과, 짧은 진앙거리에서는 비교적 낮은 Q_c 값, 먼 진앙거리에서는 높은 값을 나타내는 경향이 있음이 나타났다. 이것은 심부일수록 Q_c 값이 증가하는 것으로 설명할 수 있다.

사 사

본 논문을 세심하게 검토하여 오류를 지적하여 주신 한국자원연구소의 전명순 박사과 세명대학교 자원환경공학과 김준경교수께 감사드린다. 이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것이다.

참고문헌

- 전명순, 지현철, 전정수, 신인철 (1995) 지진연구, 한국자원연구소, KR-94(C), 1-16.
- Aki, K. and Chouet, B. (1975) Origin of coda waves: Source, attenuation, and scattering effects, *J. Geophys. Res.*, 80, 3322-3342.
- Baag, C.E. (1997) Seismic wave attenuation in the Korean Peninsula, International Workshop & Seminar on Probabilistic Seismic Hazard Analysis, organized by KEPRI, KAERI, and EPRI.
- Dominguez, T., Rebollar C.J., and Fabriol H. (1997) Attenuation of coda waves at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 87, 1368-1374.
- Gao, L.S., Biswas, N.N., Lee L.C., and Aki, K. (1983a) Effects of multiple scattering on coda waves in three-dimensional medium, *Pure Appl. Geophys.*, 121, 3-15.
- Gao, L.S., Lee L.C., Biswas, N.N., and Aki, K. (1983b) Comparison of the effects between single and multiple scattering on coda waves for local earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 377-389.
- Kanao, M. and Ito, K. (1990) Attenuation property of coda waves in the Middle and Northern parts of Kinki district, *Seis. Soc. Japan*, 43, 311-320.
- Kosuga, M. (1992) Dependence of coda Q on frequency and lapse time in the western Nagano Region, Central Japan, *J. Phys. Earth*, 40, 421-445.
- Lee, W.S. and Lee, K.H. (1998) Q estimates using the coda waves in the Kyungsang Basin, *Proceeding of EESK Conference-Fall 1998*.
- Oosaki, Y. (1981) Introduction to spectral analysis of ground motion, Hiroshima Suppan, Tokyo (in Japanese).
- Rogers, A.M., Harmsen, S.C., Hermann, R.B., and Meremonte, M.E. (1987) A study of ground motion in the Southern Great Basin, Nevada-California, using several techniques for estimates of Q_s , $\log A_0$, and coda Q , *J. Geophys. Res.*, 92, 3527-3540.
- Sato, H. (1977) Energy propagation including scattering effects: Single isotropic scattering approximation, *J. Phys. Earth*, 25, 27-41.