

## 경상분지에서의 Coda파의 감쇠특성

### Characteristics of Coda Wave Attenuation in the Kyungsang Basin

김성균\*

김복희\*\*

Kim, Sung Kyun

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 or coda  $Q$  is estimated from the earthquake data recorded in the KIGAM microearthquake network. The single scattering model for coda wave generation is adopted in estimating coda  $Q$ . Coda  $Q$  appears to be largely dependent on the normalized time( $\alpha$ ) which is the ratio of elapsed time to S-wave travel time. In the present study, coda  $Q(Q_c)$  is estimated in the range of  $\alpha = 1.5 \sim 3.0$  and expressed in terms of frequency( $f$ ). The deduced function in the range of 1 to 25 Hz is  $Q_c = 36.8283 f^{1.15095}$  to represent 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 longer epicentral distance. This observation suggests that  $Q_c$  increases with depth.

---

#### 1. 서 론

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

---

\* 전남대학교 교수, 정회원

\*\* 전남대학교 석사과정 (광주지방기상청 직원), 학생회원

(attenuation)라 한다. 일반적으로 감쇠는 물질의 종류와 상태, 지진파의 주파수에 따라 달라진다. 즉 지역에 따라 지진파의 전파경로에 따라 달라짐을 의미한다. 이러한 지진파의 감쇠특성에 대한 연구는 지구내부의 구성물질에 대한 귀중한 정보를 제공하게 되며, 강진동의 전파에 따라 진폭이 어떻게 변화할 것인가를 예측하는 공학적인 연구에 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. 최근 경상분지에서 coda파를 이용한 Q에 관한 몇 개의 연구<sup>(1),(2),(3)</sup>가 보고되었다.

본 연구의 목적은 coda파를 대상으로 경상분지내의 지진파 감쇠특성을 규명하는 것이다. 이 연구에서는 주로 Coda파를 주파수와 경과시간(lapse time)의 함수로 가정하여 1차원적인 Q값을 결정하게 된다. 자료로서는 한국자원연구소가 경상분지를 중심으로 운영중인 미소지진 관측망의 지진 기록들중 명계리(MKL)의 자료를 사용하였다. 이와 같은 연구결과의 지속적인 축적으로 한반도의 지진파 감쇠모델이 결정될 것이며, 이러한 모델은 지진재해도 예측과 내진설계에 크게 기여할 것으로 사료된다.

## 2. 계산방법

파동의 감쇠정도를 나타내는 측정치로서는 파동이 전파되는 매질내의 비탄성적인 내부마찰에 대한 무차원의 측정치를 의미하는 Q(Quality Factor)와 평면파 진폭의 지수함수적 감쇠계수를 의미하는  $\alpha$ 가 널리 사용되고 있으며, 이들은 다음과 같은 관계를 갖는다<sup>(4)</sup>.

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

*where f: frequency, v: velocity*

위의 Q와  $\alpha$ 는 특정의 주파수를 가진 파동이 공간상에서 감쇠하는 정도를 나타내는 경우와 특정의 파수에 대한 파동의 시간적인 감쇠로 나누어 생각할 수 있다<sup>(5)</sup>. 지진학에서의 감쇠특성은 지진파중 P 및 S파, Coda파, Lg파, 표면파등을 대상으로 하고 있으며, 지역별 비교연구를 비롯하여 지구심부의 비탄성적 성질에 대한 연구로 까지 진전되고 있다.

Coda파의 발생원인에 대해서는 다양한 모델이 제시되어 있으며, 이들 모델들은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 가장 널리 사용되는 모델은 단일산란모델(single scattering models)로서 매질의 불균일성에 의하여 1차적으로 산란된 파로서 Coda파를 설명한다<sup>(6),(7)</sup>. 다른 모델로서는 Gao et al.<sup>(8),(9)</sup>등의 다중산란모델(multiple scattering models)과 Aki and Chouet<sup>(6)</sup>등이 제시한 강산란 또는 확산모델(strong scattering or diffusion models)이 있다.

단일산란모델을 채택할 경우, 어떤 각주파수  $\omega$ , 지진발생후 경과시간(lapse time)  $t$ 에서의 에너지 밀도  $E(\omega, t)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서  $W_0$ 는 S파 에너지 스펙트럼,  $g_x$ 는 산란계수,  $\beta$ 는 S파 속도,  $Q_c$ 는 Coda파의  $Q$ 를 나타낸다. Coda파의 도착 시간을 S파 도착 직후라고 상정하는 Sato(1977)의 모델을 채용하면, 위 식은 다음과 같이 변형된다<sup>(10)</sup>.

$$\ln[A(\omega, t) r / \sqrt{K(\alpha)}] = \ln C(\omega) - (\omega / 2Q_c)t \quad (3)$$

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

위에서  $A(\omega, t)$ 는 중앙주파수  $\omega$ 를 중심으로 대역필터를 통과한 Coda파의 경과시간에 대한 진폭이며,  $C(\omega)$ 는 S파의 여기강도(excitation strength), 매질의 산란강도등을 포함하는 상수이다. 또한  $t_s$ 는 S파의 주행시간을  $\alpha$ 는 S파 주행시간에 대한 경과시간을 의미한다. 본 연구에서는 기본적으로 Sato<sup>(7)</sup>의 모델을 채택하여 식 (3)으로부터 Coda파에 대한  $Q_c$ 를 계산한다. 계산과정을 요약하면 아래와 같다.

먼저 지진기록을 주파수영역으로 변환시켜, 여기에 중앙주파수를 1.5, 3, 6, 12, 24 Hz로 하고 주파수대역이 중앙주파수의 2/3가되는 대역필터를 통과시킨다. 대역통과필터는 Gaussian function과 유사한 Hamming window<sup>(11)</sup>를 사용하였다. 대역통과필터를 거친 주파수영역의 자료를 다시 시간영역자료로 변환시킨후, 이 자료를 적당한 시간에 대하여 평균하여 최대치에 대하여 정규화하게 된다. 결국 식 (3)의 좌변의 값을 시간축에 대하여 나타내면 대체로 직선이 되며, 이때 그 기울기로부터  $Q_c$ 를 계산할 수 있다.

### 3. 결과 및 토론

본 연구에서 coda  $Q$  계산에 사용한 자료는 한국자원연구소가 경상남북도에서 운영중인 미소지진관측망의 자료이다. 각 관측소에는 단주기 3성분의 지진계가 설치되어 있으며, 1 초당 자료수는 현재는 100개씩이나 초기의 일부 자료는 50개씩으로 되어 있다. 본 연구에서 coda  $Q$ 계산에 실제로 사용한 자료는 관측망의 중앙에 위치한 명계리관측소(MKL)에 기록된 자료중 S/N비가 비교적 높은 지진기록들이다.

일반적으로 식 (3)으로부터 계산되는  $Q_c$ 는  $\alpha$ 에 따라 달라진다. 즉  $\alpha$ 가 커질수록 증가하는 경향을 보여준다. 그림 1에 분석대상이 되는  $\alpha$ 의 변화에 따른  $Q_c$ 의 변화를 보여 주고 있다. 그

림에서  $Q_c$ 는  $\alpha$ 가 증가하여 3.0이 될 때까지 증가하나, 3.0~3.5의 범위에서는 일정한 값을 갖는다. 따라서 본 연구에서는  $\alpha = 1.5 \sim 3.0$ 의 범위내에서  $Q_c$ 를 계산하였다.

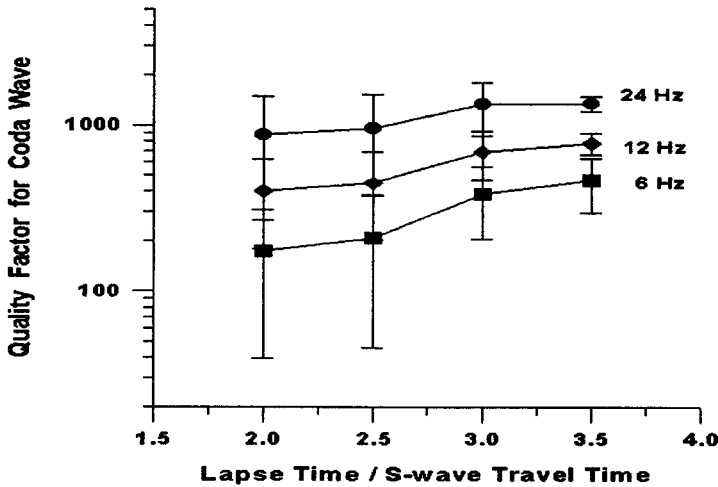


Fig.1 Variation of coda Q with lapse time/S-wave travel time.

한편 관측성분별로  $Q_c$ 의 변화를 알기 위하여 U-D, N-S, E-W성분에 대하여 coda Q를 구하여 비교하였다. 그 결과 관측성분별의 차이는 거의 무시될 정도라는 사실을 알게 되었다. 이것은 coda파가 매질내에 불규칙적으로 분포하는 불균질 물질에 의하여 후면산란(back-scattering)된 S파에 대응된다는 산란모델을 지지하는 것으로 해석할 수 있다.

결과적으로 본 연구에서 주파수  $f$ 에 대하여 얻어진 coda Q ( $Q_c$ )는 1~25 Hz범위내에서  $Q_c = 36.8283 f^{1.15095}$ 이며,  $Q_c$ 가 주파수에 크게 의존하고 있음을 나타낸다. 그림 2에 본 연구에서의 결과를 기존의 다른 연구와 비교하였다. 그림에서 본 연구에서의 결과는 Baag<sup>(2)</sup>의 연구와 거의 비슷한 결과를 보여 주며, 전명순 등<sup>(1)</sup>의 연구와도 큰 차가 없음을 알 수 있다. 그러나 Lee and Lee<sup>(3)</sup>의 연구와는 약간의 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 coda Q 계산방법의 차이, 대상자료의 차이등에 기인하는 것으로 사료된다.

그림 3은 coda Q가 진앙거리에 따라 어떻게 변화하는가를 6, 12, 24 Hz에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 모든 주파수에 대하여 진앙거리가 증가함에 따라 coda Q가 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 진앙거리가 멀어질수록 지진파는 더욱 깊은 곳을 통과하게 되므로, 진앙거리의 증가에 따른 coda Q의 증가는 심부일수록 Q값이 증가함을 시사한다.

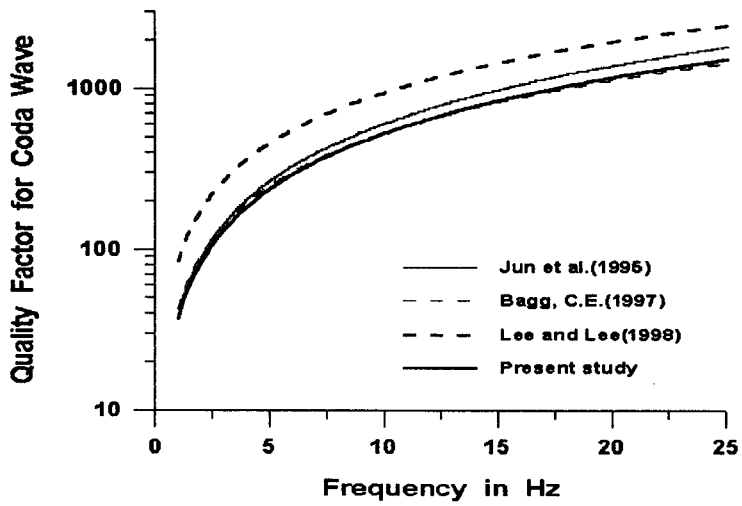


Fig. 2 Coda Q as a function of frequency in various studies.

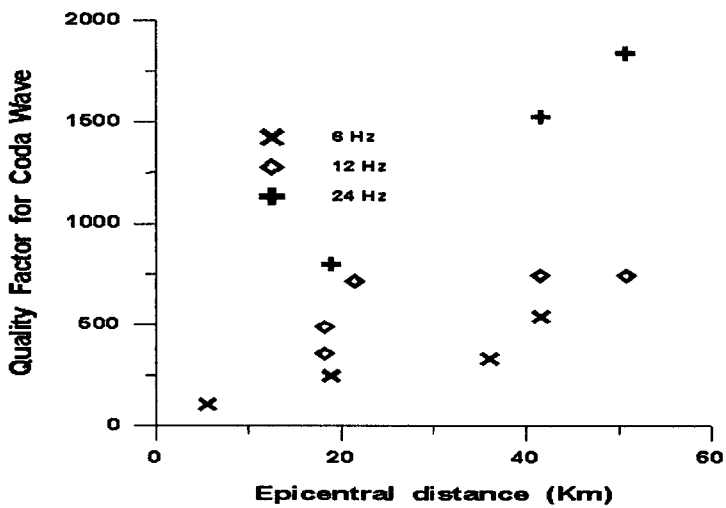


Fig. 3 Coda Q with epicentral distance for central frequencies of 6, 12, and 24 Hz.

## 참고문헌

1. 전명순, 지헌철, 전정수, 신인철 (1995) 지진연구, 한국자원연구소, KR-94(C)1-16.
2. 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.
3. Lee, W.S. and Lee, K. (1989) Q estimates using Coda waves in the Kyeongsang Basin, Proceedings of EESK Conference-Fall 1998, 2,(2), 383-390.
4. Toksös, M.N. and Johnson, D.H. (1981) Seismic wave attenuation, Geophysics reprint series, No. 2, Society of Exploration Geophysics, Oklahoma.
5. Aki, K. and Richard, P.G. (1980) Quantitative Seismology, Theory and Methods, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
6. Aki, K. and Chouet, B. (1975) Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects, J. Geophys. Res., 80, 3322-3342.
7. Sato, H. (1977) Energy propagation including scattering effects: single isotropic scattering approximation, J. Phys. Earth, 25, 27-41.
8. Gao, L.S., Biswas, N.N., Lee L.C., and Aki, K. (1983) Effects of multiple scattering on coda waves in three-dimensional medium, Pure Appl. Geophys., 121, 3-15.
9. Gao, L.S., Lee L.C., Biswas, N.N., and Aki, K. (1983) Comparison of the effects between single and multiple scattering on coda waves for local earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 73, 377-389.
10. 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.
11. Oosaki, Y. (1981) Introduction to spectral analysis of ground motion, Hiroshima Suppan, Tokyo.