

# 경상분지에서의 수직변위값에 대한 최대 스펙트럼 진폭의 감쇠 Attenuation of Peak Spectral Amplitude for the Vertical Displacement in the Kyungsang Basin

김성균\*                      이정모\*\*                      김준경\*\*\*  
Kim, Sung Kyun              Lee, Jung Mo                  Kim, Jun Kyoung

---

## ABSTRACT

The attenuations of peak vertical displacements are studied using a conventional least square regression technique for microearthquakes occurred in the Kyungsang Basin, southeastern Korea. The regression model applied to bandpass-filtered ground motion data includes parameters to account for geometric spreading, anelastic attenuation depending on frequency, source size, and station site effects. Thirty nine displacement traces obtained by integrating velocity records for six shallow local microearthquakes are used to determine attenuation characteristics in the Basin. The regression result of the peak amplitude data leads to  $Q(f) = 59.9 f^{0.955}$  for  $1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 25 \text{ Hz}$ . It appears that the anelastic attenuation in the Kyungsang Basin is greater than that in the Western North America Area.

---

## 1. 서 론

국내에서 지진관측이 시작된 것은 1905년부터이나, 수치화된 기록이 얻어지기 시작된 것은 극히 최근의 일이다. 한국자원연구소는 1995년부터 한반도 남동부의 경상분지 일원에서 미소지진 관측을 위한 디지털 고정관측망을 운영하기 시작하였다(그림 1 참조). 물론 기상청에 의한 전국적인 관측망이 운영되어 왔으나, 아날로그 기록방식에서 디지털방식으로 바뀐 것은 1998년부터이다. 따라서 과거의 지진자료를 써서 가능한 연구는 지진활동 또는 지진의 통계적 연구등 극히 제한된 분야에 그칠 수밖에 없었다. 다만 한반도의 지진이 원거리의 장주기 기록으로 외국의 관측소에서

---

\* 전남대학교 교수, 정회원  
\* 경북대학교 교수, 정회원  
\* 세명대학교 교수, 정회원

관측된 일부 자료를 이용한 연구가 없는 것은 아니다. 경상분지에 디지털 관측망이 최초로 운영되게 된 동기는 이 지역에 원자력발전소 및 대규모 산업단지가 집중되어 있고, 또한 그 활성 여부가 의심되는 큰 규모의 단층이 집중되어 있기 때문이다.

어떤 지역의 지진재해는 지진원의 특성, 지진파를 전달하는 매질의 감쇠특성 및 지반의 구조와 같은 요인에 크게 좌우된다. 이러한 요인들 중 특히 중요한 것은 감쇠특성이다. 일반적으로 감쇠는 물질의 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 진폭이 어떻게 변화할 것인가를 예측하는 공학적인 연구에 필수적이다. 최근 경상분지에서 P파와 Coda의 감쇠에 관한 몇 가지 연구<sup>(1),(2),(3),(4),(5)</sup>가 보고되었다. 그러나 이 지역의 감쇠특성을 규명하기에는 아직도 충분치 않다. 본 연구에서는 이 지역에서 발생한 몇 개의 지진을 선정하여, 특정의 주파수를 중심주파수로 하는 대역필터를 통과시킨 최대 수직변위의 감쇠특성을 중회귀 기법<sup>(6)</sup>을 이용하여 분석한다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구를 위하여 선정된 지진자료를 표 1과 그림 1에 나타내었다. 사용한 지진기록의 1 초당 자료 수는 100개씩이며, 경상분지에서 발생한 근거리 지진중 S/N비가 비교적 높은 지진기록들이다. 지진의 수는 6개로서 그 규모는 2.3 - 3.1의 범위에 있는 미소지진이며, 발생깊이는 15km 이내의 천발지진이다. 실제로 사용된 지진기록의 수는 총 39개이며, 진앙거리는 140km 이내의 근거리 지진이다.

일반적으로 진원에서의 최대 진폭  $A_0$ 의 진앙거리  $r$ (km)에 따라 감쇠된 진폭  $A$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$A = A_0 r^{-n} e^{-\gamma r} \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 기하학적 확장계수(geometric spreading coefficient)를,  $\gamma$ 는 비탄성 감쇠계수를 나타낸다. Rogers et al.<sup>(6)</sup>은 여러 지진기록으로부터 수직변위값의 거리에 따른 감쇠를 조사하기 위하여 식 (1)을 다음과 같이 변환하였다.

$$\log_{10} A_{ij} = -n \log_{10} R_{ij} - K_{\gamma} f_{ij}^{(1-p)} R_{ij} + SRC_j + STA_i + err_{ij} \quad (2)$$

여기서 첨자  $i$ 는 지진을  $j$ 는 관측소를 나타낸다. 또한  $A_{ij}$ 는 특정의 주파수를 중앙주파수로 하여 대역필터를 통과시켜 얻은 변위기록의 최대진폭값,  $R_{ij}$ 는 진앙거리,  $f_{ij}$ 는 주파수,  $p$ 는 상수,  $K_\gamma$ 는 감쇠상수  $\gamma_0$ 와  $\gamma_0 = K_\gamma \ln 10$ 의 관계를 갖는다. 그리고  $SRC_j$ 와  $STA_j$ 는 각각  $i$ 번째 지진에 대한 지진원에서 최대진폭과  $j$ 번째 관측소에서의 부지효과를 보정하는 상수를 나타내며,  $err_{ij}$ 는 명확히 설명하기 곤란한 여러 요인의 오차를 의미한다. 한편 부지효과를 보정하는 상수들은  $\sum STA_i = 0$ 이 성립된다고 가정한다. 식 (2)는 지진규모와 관측소에서의 부지와 관련된 효과 등을 사전에 제거하지 않고서도 감쇠계수를 구할 수 있는 장점이 있다.

한편 감쇠계수  $\gamma$ 와  $Q$ 는

$$\gamma(f) = \frac{\pi f}{UQ} \quad (3)$$

의 관계가 있으며,  $Q$ 가 주파수의 함수인  $Q = Q_0 f^p$ 를 가정하면,

$$\begin{aligned} \gamma(f) &= \gamma_0 f^r \\ \gamma_0 &= \frac{\pi}{UQ_0}, \quad r = 1 - p \end{aligned} \quad (4)$$

이 성립되며, 여기서  $U$ 는 파의 속도이다. 이 식들을 이용하여 기하학적 확장을 나타내는 계수  $n$ 과 비탄성적인 성질을 나타내는 상수  $\gamma$ ,  $Q$ 를 구하는 본 연구에서의 과정은 다음과 같다.

- 먼저 관측된 속도 지진기록을 적분하여 변위기록으로 바꾼다.
- 변위기록에 대하여 중앙 주파수를 1.5, 3, 6, 12, 24Hz로 하는 대역통과 필터를 통과시킨다. 그림 2에 본 연구에서 사용한 지진기록을 한 예로 하여, 속도기록, 변위기록, 대역통과필터를 거친 파형을 제시한다.
- 다음으로 위에서 얻어진 각각의 지진파형으로부터 얻은 진앙거리와 최대 진폭값을 식 (2)에 대입하여 증회귀식을 만든다.
- 식 (2)에 포함된 주파수  $f$ 의 지수  $p$ 를 여러 값으로 가정하여, 나머지 미지수들을 결정한다. 모든 미지수가 의미가 있고 최대진폭의 RMS오차가 가장 작은 것을 해로 취한다.

### 3. 결과 및 토론

전항에서 설명한 방법과 과정에 따라 먼저 기하학적 확장계수를 포함한 모든 변수들을 식 (2)로부터 계산할 수 있다. 식 (2)로부터 여러 지진파감쇠와 관련된 미지수들을 구하는데 있어서 다른

연구들<sup>(6),(7),(8)</sup>에서는 여러 가지 제한조건을 부여하였다. 즉 Rogers et al.<sup>(6)</sup>은 기하학적 확장계수  $n$ 을 1.0, 0.9, 5/6(Lg파에 대하여 널리 쓰이는 값)로 가정하여 나머지 상수들을 구했다. 또한 Brockman and Bollinger<sup>(7)</sup>는 식 (2)의  $n$ 외에 지수  $p$ 를 고정하여 나머지 미지수를 결정하였다. 북미 캘리포니아 지역의  $M_L$  규모를 평가하기 위한 연구<sup>(8)</sup>에서는  $n=1$ 을 사용하고 있다.

본 연구에서는 식 (2)의 미지수에 특별한 제한을 주지 않고, 먼저 주파수의 지수  $p$ 를 여러 값으로 변화시키며 시행착오의 방법으로 나머지 모든 미지수들을 결정하였다. 그 결과 기하학적 확장상수, 감쇠계수 및  $Q$ 를 다음과 같은 주파수의 함수로서 얻을 수 있었다. 여기서 얻어진 기하학적 확장상수  $n$ 은 0.277정도로서, 다른 연구와 비교하여 지나치게 작은 값이다. Nuttli<sup>(9)</sup>는 이 상수가 실체파의 경우에 1.5, Rg파의 경우에 5/6 (=0.833)정도가 적절하다고 하였으며, Atkinson and Mereu<sup>(10)</sup>는 100 km이내의 근거리에서는 1.0을, 100 km 이상에서는 1.5를 제시하였다. 그러나 근거리의 경우는 진원메커니즘과 지질구조의 영향에 따라  $n$ 값은 크게 변화한다<sup>(6)</sup>. 따라서 본 연구에서 얻어진  $n$ 값이 100km 이내의 근거리에서 지질구조가 복잡한 지역에서 얻어진 점을 고려한다면, 받아들일 수 있는 값이다. 이와 같이 작은 값은 적어도 경상분지내에서는 실체파의 에너지가 대부분 상부지각내에 집중되어 전파되고 있음을 시사한다.

식 (2)에 대한 중회귀 분석결과 얻어진 관측소에서의 부지효과를 나타내는 상수  $STA_j$ 는 아주 작아 거의 0에 가깝다. 또한 감쇠계수와  $Q$ 에 대해서 얻어진 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= 59.9 f^{0.955} \\ \gamma &= 0.0150 f^{0.045} \end{aligned} \quad (5)$$

본 연구에서 사용한 지진자료는 140km 이내의 근거리 지진에 대한 변위파형이기 때문에, 여러 주파수를 중앙주파수로 하여 대역필터를 통과한 변위기록중 최대진폭은 대부분 Sg 또는 SmS에서 나타난다. 따라서 여기서 얻어진  $Q$ 와  $\gamma$ 는 S파에 대한 값으로 해석할 수 있다. 주목할만한 사실은 다른 연구<sup>(1),(2),(3),(4),(5)</sup>에서 나타난 바와 같이,  $Q$ 가 주파수에 크게 의존한다는 점이다.

한편 본 연구에서 얻어진 결과를 북미 서부지역에서 얻어진 결과<sup>(8)</sup>와 비교하였다. 그림 3은 지진원의 크기, 관측소의 부지효과, 기하학적 확장의 효과를 제거한 순수한 비탄성적인 감쇠성분만을 거리에 따라 나타낸 것이다. 본 연구에서 얻어진 경상분지에서의 감쇠가 북미 캘리포니아 지역에 비하여 지나치게 큰 것을 알 수 있으며, 또한 주파수에 별로 민감하지 않음을 알 수 있다.

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업의 일환으로 수행된 것이다.

## 참고문헌

1. 전명순, 지현철, 전정수, 신인철, "지진연구", 한국자원연구소, KR-94(C)1-16, 1995.
2. Baag, C.E., "Seismic wave attenuation in the Korean Peninsula, International Workshop & Seminar on Probabilistic Seismic Hazard Analysis, organized by KEPRI, KAERI, and EPRI", 1997.
3. Lee, W.S. and Lee, K., "Q estimates using Coda waves in the Kyeongsang Basin", Earthquake Engineering Soc. Korea, 3(1), 67-74, 1999.
4. 김성균, 김복희, "한국 남동부에서의 Coda파 감쇠", 자원환경지질, 1999(인쇄중).
5. 김성균, 전명순, 김준경, "경상분지에서의 P파 감쇠", 대한지질학회지, 1999(인쇄중).
6. Rogers, A.M., S.C. Harmsen, R.B. Herrmann, and M.E. Meremonte, "A study of ground motion attenuation in the southern Great Basin, Nevada-California, using several techniques for estimates of Qs, log Ao, and Coda Q", J. Geophys. Res., 92(B5), 3527-3540, 1987.
7. Brockman, S.R. and G.A. Bollinger, "Q estimates along the Wasatch Front in Utah derived from Sg and Lg wave amplitude", Bull. Seis. Soc. Am., 82(1), 135-147, 1992.
8. Bakun, W.H. and W.B. Joyner, "The  $M_L$  scale in central California", 74(5), 1827-1843, 1984.
9. Nuttli, O.W., "Seismic wave attenuation and magnitude relations for eastern North America", J. Geophys. Res., 78, 876-885, 1973.
10. Atkinson, G.M. and R.F. Mereu, "The shape of ground motion attenuation curves in south-eastern Canada", Bull. Seis. Soc., 82(5), 2014-2031, 1992.

Table 1. Earthquakes used in this study.

Yr-Mo-Dy	Hr:Min:Sec	Latitude	Longitude	Depth(km)	$M_L$	Recorded Stations
98- 09-12	23:08:09.01	35-55.04	129-16.01	14.53	2.6	DKJ, MKL, CHS, BBK, CGD, KMH, KJM
98- 04-24	04:39:55.79	35-40.00	128-46.23	14.60	2.4	CGD, KMH, DKJ, BBK, CHS, KJM
98- 04-10	19:00:36.64	35-03.55	129-05.00	13.69	2.3	KMH, BBK, CGD, MKL, HAK
97- 10-11	19:50:28.76	35-55.05	128-50.69	10.93	2.7	DKJ, CGD, MKL, HAK, KMH, BBK, MAK, KJM
97- 09-17	09:33:18.46	35-35.44	129-21.76	10.69	3.1	MKL, MAK, KJM, DKJ, HAK, KMH, CHS
97- 06-16	22:51:13.96	35-36.35	128-58.64	1.42	2.9	MKL, KMH, DKJ, MAK, HAK, CHS

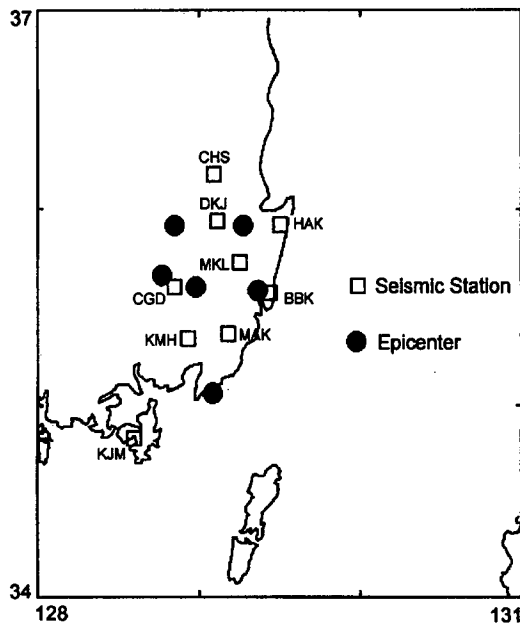


Fig. 1 Seismic stations and epicenters used in this study.

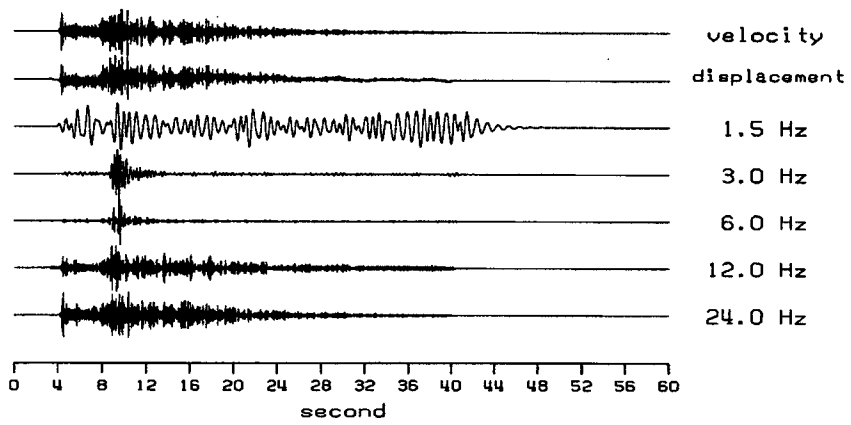


Fig. 2 An example observed velocity record, and its displacement trace obtained by integration and bandpass-filtered displacement traces.

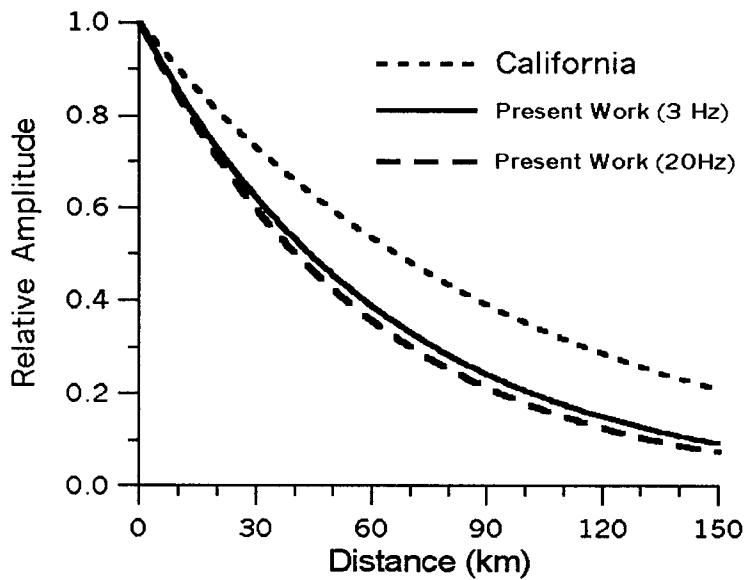


Fig. 3 Anelastic attenuation of relative amplitudes for epicentral distance.