

한반도 동남부의 S파 감쇠

Attenuation of S wave of the Southeastern Part of the Korean Peninsula

박동희* 연관희** 장천중** 이종립****
Park, Dong-Hee Yun, Kwan-Hee Chang, Chun-Joong Lee, Jong-Rim

ABSTRACT

In order to estimate attenuation characteristics, nonparametric model is used. Evaluation of this model requires suites of average spectral amplitude data as a function of distance without adopting any assumed parametric forms. Values of Quality factor, Q were estimated for individual frequencies by matrix inversion of S wave amplitude spectra for 21 records of 8 small and intermediate earthquakes ($2.7 < M < 4.3$) digitally recorded on accelerometer and velocimeter. Since the inverted Q values are the result of combined effect of geometrical spreading and anelastic attenuation, we corrected them for assumed geometrical spreading proportional corresponding to $1/r$ and $(1/r)^{1/2}$. The best models for $1/Q$ values were found to be $0.000453 + 0.001851/f$ and $0.000451 + 0.009261/f$, respectively. This results can be compared to the conventional functional form of $Q = af^b$ and be used to estimate source spectra and site response.

1. 서론

수진지역의 지진동 크기는 지진원 시간함수(source time function), 수진지역까지의 전달함수(transmission function), 수진지역 응답함수(receiver function)에 의하여 결정된다. 이중 전달함수는 지진파의 속도구조(velocity structure), 기하학적 확산(geometric spreading)과, 비탄성적 감쇠(anelastic attenuation)로 특성지어지며 경험적인 지진동의 특성을 연구하기 위한 기본적인 요소이다.

본 연구에서는 한반도 동남부 지역에서 발생한 약진 또는 중진의 자료를 이용하여 nonparametric

* 한국전력공사 전력연구원 인턴연구원

** 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

**** 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정회원

방법을 적용시켜 S파의 감쇠특성에 대해 알아보았다. 감쇠를 산정하기 위한 nonparametric 방법은 감쇠를 나타내는 수치적인 모델을 가정하지 않고 스펙트럼의 진폭을 진원거리의 함수로 고려하여 역산을 통한 감쇠곡선으로부터 Q값을 결정하게 된다. 이 연구는 향후 부지효과와 각 관측소의 진원스펙트럼을 작성하는데 기본자료로 이용될 수 있다.

2. 지진자료

국내의 주요 지진관측망은 한국전력 전력연구원, 한국지질자원연구원, 한국 원자력안전 기술원, 기상청 및 몇 개의 대학에서 공동으로 운영하고 있다. 본 연구에서는 1997년부터 2000년까지 한반도 동남부에서 발생한 지진 가운데 비교적 규모가 큰 2.7 이상의 지진 총 8개의 지진기록 21개를 선정하였다. 이용된 자료는 전력연구원에서 운영중인 가속도기록계의 자료와 일부는 한국지질자원연구원에서 운영하는 단주기 수진계에 기록된 것으로 25 Hz 저주파통과 9차 Butterworth 필터로 반 알리아싱필터를 적용한 기록이다. 본 연구에서는 가속도자료의 분석을 통하여 감쇠효과를 구하는데 가속도자료의 획득에 한계에 있어서 속도자료를 미분함으로써 가속도로 변환하여 사용할 수 밖에 없었다. 속도센서의 자료를 가속도 자료로 미분할 경우 고주파수 대역에 본래의 속도자료 뿐 아니라 잡음까지도 증폭하게 되어 얻고자 하는 가속도 자료를 손상시키게 된다. 그러나 신호 대 잡음비가 높은 기록자료를 분석에 이용하였고, 각각의 센서에 대한 sensitivity를 보정해 주었으므로 미분에 의하여 생기는 위와 같은 오차는 최소화 된 것으로 가정한다.

선정된 자료는 그림 1과 같이 수평성분에 대해 S파를 윈도우(window)하였으며 baseline correction과 cosine 테이퍼링(tapering) 5%를 실시한 후 푸리에 변환을 하였다. 진앙지 및 규모는 한국지질자원연구원의 지진목록과 기상청 홈페이지를 참조하였으며 표 1은 분석에 이용한 지진과 기록된 관측소이다.

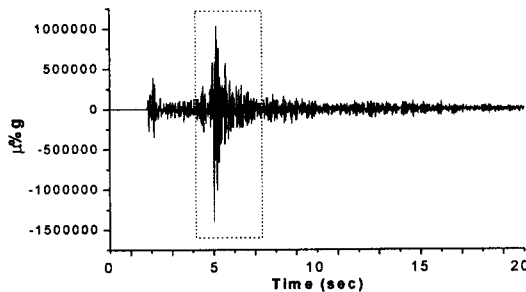


그림 1. 분석에 이용된 지진파형 예와 S파 windowing

3. 분석방법

3.1. 감쇠함수(attenuation function)

Castro(1990)에 의하면 특정 주파수에 대하여 스펙트럼의 진폭을 거리의 함수로 나타내면 다음과 같다.

표 1. 자료분석에 이용된 지진목록과 관측소

Event NO.	Date Y M D	Origine time	Lat.	Log	M_L	Depth (km)	Station
1	1998 01 18	01:16:10	35.2972	129.5402	4.3	27.73	BBK, DKJ, HAK, MKL
2	1998 07 07	17:37:12	35.5765	129.4920	3.0	16.30	CHS, CGD, HAK
3	1999 04 24	01:35:13	35.5095	129.1555	3.3	5.06	WSC, CHS,
4	1999 06 02	18:12:22	35.5034	129.1608	3.6	4.71	WSA, UJA
5	1999 09 12	05:56:51	35.5094	129.1492	3.2	5.90	BBK, KMH
6	2000 05 09	06:55:36	35.1455	128.0896	2.7	11.27	BBK, CHS, DKJ, KMC
7	2000 05 19	01:44:23	36.1845	128.3017	3.2	11.19	CHS, TJN, WSA
8	2000 12 09	18:51:00	36.5000	127.4000	3.7		HAK,

$$D_i(f, r) = M_i A(f, r) \quad (1)$$

여기서 $A(f, r)$ 은 감쇠함수(attenuation function), M_i 는 i 번째 지진에 규모에 의존하는 스칼라(scalar)양이며 $D_i(f, r)$ 은 주파수 f 와 진원거리 r 에 기록된 지진자료의 진폭이다. 감쇠함수는 기하학적 확산(geometrical spreading)과 비가역적 변환에 의한 감쇠 $Q(f)$ 의 중첩된 효과에 의한 것으로 가정하고, 지진의 크기와는 무관한 함수이다.

Nonparametric 방법에서는 $A(f, r)$ 을 특정한 진원거리에 의존하는 함수로 고려하기보다는 진원거리가 0일 때 감쇠가 1인 거리에 대한 평활화(smoothing)된 함수로 생각한다. Anderson(1991)에 의해서도 이와 유사한 방법이 이용되었는데, 진폭은 거리가 변환에 따라 서서히 변하는 값이며 지각에서 비탄성적인 특성은 거리의 증가에 따라 진폭을 감소시키고 지진동은 지반조건(site condition)이나 파형분산(wave propagation)효과에 의존함을 기본으로 하고 있다. 식(1)의 양변에 \log 값을 취하면

$$D_{ij} = m_i + a_j, \quad (2)$$

이 되고, 이는 행렬형태로 표현이 가능하며 그 모양은 다음과 같다.

$$\Gamma x = b \quad (3)$$

여기서, b 는 d_{ij} 즉 진원거리별 진폭을 나타내는 $q \times 1$ 행렬이고, Γ 는 $p \times q$ Jacobian 행렬이며, x 는 모델파라미터 m_i, a_j 를 포함하는 $p \times 1$ 행렬이며 그림 2와 같다. 그림 2의 w_1 은 거리가 0일 때 a_1 이 0, w_2 는 $A(f, r)$ 가 거리에 따른 스펙트럼의 진폭이 선형적으로 감소하는 함수로 제약하기 위해 주어지는 가중치이다. 위 행렬식(3)을 최소자승 역산법(least square inversion method)을 이용하여 $A(f, r)$ 를 구하였으며 15개의 주파수별로 구한 $A(f, r)$ 를 그림 3(a)에 나타내었다. 각 주파수별 감쇠함수는 진원거리가 증가함에 따라 유사한 모양을 가지는데, 이는 앞서 언급한바와 같이 진원거리에 따른 감쇠함수의 진폭을 선형화 시키기 위해 동일한 가중치 값을 준데서 기인하는 효과이다. 감쇠함수 $A(f, r)$ 은 기하학적 확산과 비탄성적 감쇠 Q 에 기인하는 감쇠

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 & \cdot & \cdot \\
 0 & 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & 0 & \cdot & \cdot \\
 0 & 0 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 1 & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 w_1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 -w_2/2 & w_2 & -w_2/2 & 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 0 & -w_2/2 & w_2 & -w_2/2 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 a_1 \\
 a_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 a_j \\
 m_1 \\
 m_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 m_i
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 d_1 \\
 d_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 d_n \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}$$

그림 2. 감쇠함수를 구하기 위한 행렬

과이다. 기하학적 확산에 의한 스펙트럼의 감쇠는 주파수에는 무관하나 진원거리에 따라 다르다. S파가 표면파보다 우세하게 나타나는 거리에서는 표면파가 대부분의 에너지를 전달하게 된다. 이 전이거리는 지역에 따라 다르며 한반도에서도 아직 적절한 모델이 설정되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 기하학적 감쇠를 고려하기 위하여 $1/r$, $1/\sqrt{r}$ 모델을 가정하였으며, 대부분이 지진자료가 진원거리 30km 이상을 가짐을 고려하며 $G(r) = 28/r$ $G(r) = \sqrt{28/r}$ 로 정규화 시켰다. 더불어 $A(f, r)$ 도 진원거리 28km의 값으로 정규화 시켰으며 그림 3(b)에 나타내었다. 그림에서 보여지는바와 같이 $A(f, r)$ 는 기하학적 확산과 $Q(f)$ 의 증첩된 효과이므로 기하학적 확산 보다 빨리 감소하게 된다. 또 1Hz에서 6Hz미만에서는 $A(f, r)$ 의 기울기가 28/r보다 약간 큰 값을 가지는데, 이는 Q값이 크거나, 기하학적 확산이 적음을 지시한다.

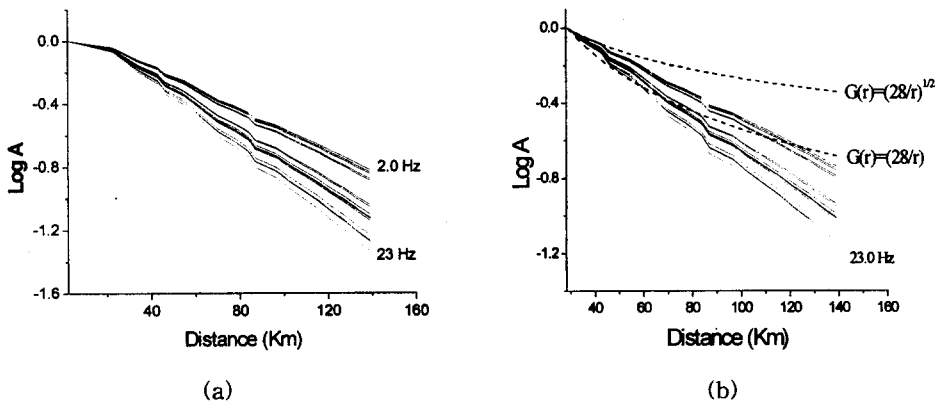


그림 3. (a) 식(1)을 이용하여 얻어진 감쇠함수 곡선 (b)진원거리 28km에 대해 정규화한 (a)의 감쇠함수(실선)와 기하학적 확산(점선)

3.2. Q값 산정

앞서 언급한 바와 같이 감쇠함수 $A(f, r)$ 는 기하학적 확산과 비탄성적 감쇠가 결합된 형태이다. $A(f, r)$ 을 구하기 위해 nonparametric 모델을 사용하면 Q값을 기하학적 확산에 대한 몇 가지 가정으로부터 간단하게 산정할 수 있다. Q값을 구하기 위한 $A(f, r)$ 는 다음과 같다.

$$\text{Log } A(f, r) = \text{Log } G(r) - \pi r f \text{Log } e / \beta Q \quad (4)$$

여기서 $G(r)$ 은 기하학적 확산을 나타내고 β 는 S파의 속도를 나타내며 3.5km/sec으로 하였다. 만약 $G(r)$ 이 주어진다면 감쇠함수 $A(f, r)$ 을 이 효과에 대하여 보정할 수 있고 $\text{Log } A(f, r) - \text{Log } G(r)$ 의 기울기는 결국 f/Q 에 비례하게 된다. 본 연구에서는 거리 28km로 정규화시킨 $A(f, r)$ 을 $G(r)$ 에 대해 보정하였으며 최소좌승법을 이용하여 기울기를 구하였다. 그림 4에 기하학적 확산을 보정한 감쇠함수를 나타내었으며, 그 기울기는 실선으로 표시하였다. 그림 5는 주파수에 따른 $1/Q$ 값을 도시한 것으로, 주파수에 따른 기울기 즉 $1/Q = a + b/f$ 의 형태로 Q값을 산정할 수 있다. 그림 5에서 보여지는 바와 같이 주파수가 2.0 Hz미만에서는 $1/Q$ 이 값이 0보다 작은 값을 가짐을 알 수 있는데, 이는 이 주파수 대역에서 기하학적 감쇠가 심하지 않음을 반영하고 있다.

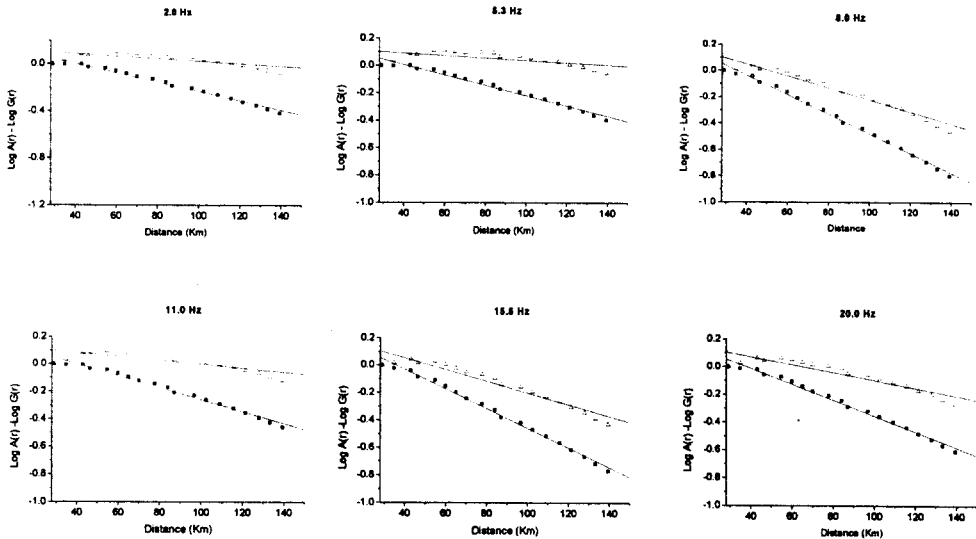


그림 4. 기하학적 확산을 보정한 감쇠함수 (Δ : $G(r) = 28/r$, \blacksquare : $G(r) = \sqrt{28/r}$).

선형회귀직선은 $1/Q$ 에 비례(실선)

있다. Q값을 산정하는데는 $1/Q$ 의 값이 양수인 경우만 ($f > 2\text{Hz}$)을 대상으로 하였다. 구하여진 $1/Q$ 값은 $G(r)$ 을 $28/r$ 에 대하여 보정한 경우 $0.000453 + 0.001851/f$ 이며, $\sqrt{28/r}$ 에 대하여 보정한 경우는 $0.000451 + 0.009261/f$ 이다. 진원거리의 정규화에 따른 Q값의 오차정도를 알아보기 위하여 기하학적 확산과 감쇠함수를 거리 20km에 대하여 정규화하여 위와 같은 방법으로 Q값을 산정해

보았다. 그 결과 $20/r$ 인 경우 $0.000473+0.001001/f$, $\sqrt{20/r}$ 에 대해 $0.000474+0.0089/f$ 이다. 기하학적 확산을 $1/\sqrt{r}$ 모델로 적용시킨 결과 두 결과가 거의 유사한 안정적인 해를 보이는 반면 $1/r$ 모델로 적용시킨 경우에는 두 결과에 약간의 차이를 보인다. 이는 그림 3(b) 에서 보여지는 바와 같이 $1/r$ 의 기하학적 확산 모델에서는 저주파수($f < 6\text{Hz}$)에서 $A(f, r)$ 의 기울기가 $1/r$ 보다 약간 큰 값을 가지게 되며 결과적으로 $1/Q$ 의 값이 음수의 값을 가짐에 따라 기인하는 현상으로 사료된다.

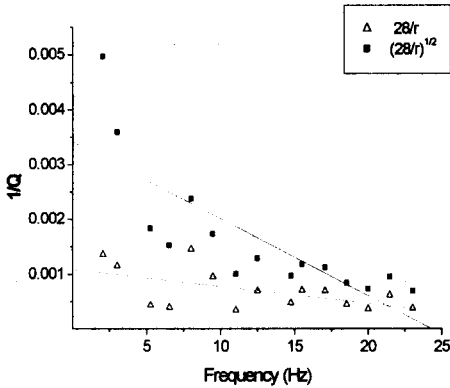


그림 5. $1/Q$ 산정. Δ : $G(r)=1/28$
 \blacksquare : $G(r)=\sqrt{1/28}$, $1/Q=c+d/f$ (직선)

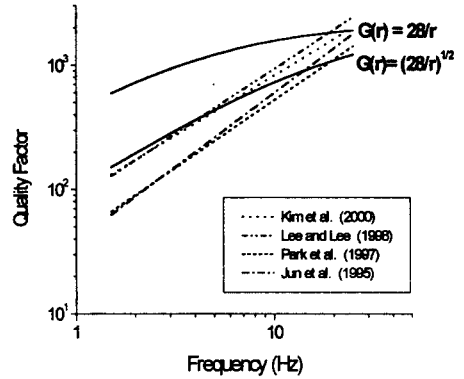


그림 6. 기존연구결과와 Q값 비교

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 nonparametric 방법을 이용하여 S파의 감쇠특성을 알아보았다. 행렬 역변환을 통하여 얻어진 nonparametric curve로부터 구한 감쇠함수에 기하학적 확산을 보정하여 얻은 Q값은 일차함수 형태로 나타나게 된다. 기하학적 확산을 $28/r$, $\sqrt{28/r}$ 로 가정한 경우 $1/Q=0.000453+0.001851/f$, $1/Q=0.000451+0.009261/f$ 이다.

본 연구결과에서 구해진 Q값과 다른 연구자들에 의해 기존에 연구된 coda Q값(전명순 외, 1995; Bagg, 1997; Lee W.S. and Lee, K.H(1998); 김성균 외(2000)을 비교하여 그림 6에 도시하였다. 그 결과 기하학적 확산을 $1/\sqrt{r}$ 로 가정한 경우의 Q값은 기존의 연구와 유사한 결과를 보였으나 $1/r$ 로 가정한 경우는 저주파수에서 20Hz까지 비교적 높은 값을 보임을 알 수 있었다.

본 연구결과는 감쇠효과를 보정하여 지진원요소와 부지효과 연구의 기본자료로 이용될 수 있다.

사사

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일부로 수행되었으며 이에 감사드린다.

참고문헌

1. 지헌철, 류창하, 신인철(1997), "경상분지 지진연구(IV)," 한국자원연구소.
2. 지헌철, 이희일, 전정수, 신인철, 김동균, 박정호, 김근영(1998), "지진공학연구," 한국자원연구소.
3. 지헌철 외 11인(2000), "지진연구망 구축 및 운영," 한국자원연구소.
4. Castro, R.R., Anderson, J.G., Singh, S.K.(1990), "Site response, attenuation and source spectra of S waves Along The Guerrero, Mexco, Subduction Zone," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.80, pp.1481-1503.
5. Anderson, J.G. (1991), "A preliminary description model for the distance dependence of he spectral decay parameter in southern California," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.81, pp. 2186-2193.
6. 전명순, 지헌철, 전정수, 신인철(1995), "지진연구," 한국자원연구소.
7. Baag, C.E.(1997), "Seismic wave attenuation in the Korean Penunsula," International Workshop & Seminar on Probabilistic Seismic Hazard Analysis, organized by KEPRI, KAERI, EPRI.
8. Lee W.S and Lee, K.H.(1998), "Q estimates using the coda waves in the Kyungsang Basin Proceeding of EESK Conference-Fall.
9. 김성균, 박윤경, 전명순(2000), "한반도남동부 Q구조," 지질학회지, 제 36권 4호, pp.529-544.