

비매개변수법에 의한 주파수별 스펙트럼감쇠 평가 Nonparametric Ground-Motion Evaluation of Shear-Wave Fourier Spectra

연관희*
Yun, Kwan-Hee

박동희*
Park, Dong-Hee

장천중*
Chang, Chun-Jung

ABSTRACT

The nonparametric method was employed to obtain detailed broadband attenuation characteristics of horizontal Fourier spectra without generally assigned constraint that derived path terms be zeros at a reference distance. Instead, path terms for a reference distance were obtained based on the physical phenomenon that the seismic phase is stable over the hypocentral distance range from 200km to 400km so that the Q-values evaluated at several distances inside that region should be the same. The inverted path terms show three distinct linear regions roughly divided by hypocentral distances at 65km and 115km. Also complex behavior at the near distance range below 100km was revealed which can not be properly fitted by combination of single Q_0f^{α} model and any geometrical spreading models.

1. 서론

1990년대 중반부터 디지털 지진관측이 가능해진 이후 국내에서 수행된 지진감쇠 연구는 매개변수법을 이용한 평가이었다([1,2]). 매개변수법(parametric method)에서는 지진동감쇠를 몇 개의 매개변수를 갖는 물리적인 의미를 갖는 특정한 함수형태를 가정한 후 매개변수를 지진관측자료에 적합시킴으로써 추정(역산)하는 방법이다. 함수형태로는 비탄성감쇠에 대한 Q모델(e.g. Q_0f^{α})과 주파수와 무관한 기하학적감쇠 모델의 조합이 가정된다. 이 방법은 활용가능한 지진관측자료가 많지 않을 경우 유용하게 사용될 수 있는 방법이지만, 사용된 대상지역에서 가정된 함수의 타당성이 검증되지 않는 취약점을 갖고 있다.

반면 비매개변수법(nonparametric method)을 이용한 지진동감쇠 연구에서는 감쇠모델에 대한 어떠한 가정도 하지 않고 지진관측자료에만 근거하여 지진원과 부지특성이 제거된 지진동감쇠를 평가하는 방법이다. 따라서 광범위한 진앙거리에서 계측된 양질의 다량의 자료가 필요하나 계산 결과가 지진동감쇠의 실질적인 현상을 나타낸다는 점에 큰 의미가 있다고 할수 있다. 또한 이렇게 계산된 지진동감쇠 결과는 매개변수법으로는 확인할 수 없는 추가적인 정보를 제공함과 동시에 매개변수법에 의한 지진동감쇠를 검증할 수 있는 좋은 도구이다. 특히 비탄성감쇠모델에서 일반적으로 사용되고 있는 Q_0f^{α} 모델이 어떤 진원거리 및 주파수 범위에서 타당한 지를 평가하는 데 사용할 수 있다. 비매개변수방법은 기존에 제한적으로 시도되기는 하였으나([3]) 사용된 자료의 수가 너무 적어 신뢰성 있는 결론을 도출하지 못하였다. 그러나 이 이후 현재까지 전력연구원을 비롯한 국내 여러 기관에서 운영하는 고성능 지진관측망으로부터 다량의 지진관측자료가 축적되어 있어 본 연구에서는 이러한 자료를 기초로 하여 비매개변수법에 의해 주파수별 지진동감쇠현상을 분석하였다. 또한 본 연구에 활용된 자료를 이용하여 추계학적 지진동모사에 필요한 매개변수 역산([2])을 수행하여 결과에 대한 상호 비교를 통해 감쇠에 대한 새로운 현상들을 발견할 수 있다.

* 한국전력공사 전력연구원, 정회원

2. 본론

2.1 이론 및 역산 방법

일반적으로 관측된 지진기록의 푸리에 스펙트럼에 대한 상용로그 Y 는 다음과 같이 지진여기($E(f)$), 지진파감쇠($D(R, f)$), 부지특성($Site(f)$) 스펙트럼 각각의 상용로그의 합으로 표시된다([4]).

$$Y = \log(\text{Amp}) = E(f) + \text{Site}(f) + D(R, f) \quad (1)$$

여기서 f 는 주파수(Hz), R 은 진원거리(km)를 의미한다. 비매개변수법은 식 (1)의 단순한 가정으로부터 지진여기항과 부지특성항이 분리된 감쇠특성을 도출하는 방법이다. 또한 식 (1)의 $D(R, f)$ 을 다음과 같이 중심주파수(f_c)에 대해 일정한 거리구간에서 부분적으로 선형인 함수로 표현할 수 있다.

$$D(R, f_c) = \sum_{k=0}^n L_k(R) D_k(f_c) \quad (2)$$

식 (2)에서 $L_k(R)$ 은 선형보간함수이며 $D_k(f_c)$ 는 node 거리 R_k 에서의 감쇠항 값으로 node 위치에서 $D(R, f_c)$ 은 연속이어야 한다. 사용된 node의 개수인 식 (2)의 n 은 자료의 수에 따라 적절히 선정되어야 한다. 이상에서 감쇠항에 대해 주파수, 거리 공간에서의 어떠한 함수 형태도 가정되지 않는다. 본 연구에서 R_k (km)는 10.0, 12.6, 15.86, 19.97, 25.15, 31.67, 39.88, 50.22, 63.25, 79.65, 100.3, 126.3, 159.05, 200.3, 252.2, 317.6, 400의 17개 값이 사용되었다. 주파수는 1~40Hz 구간사이에서 0.5Hz의 폭을 갖고 f_c (Hz)를 중심으로 하는 25개의 밴드로 분리되었고 비교적 많은 고주파수밴드를 사용하였다(표 1).

식 (1)의 $E(f)$ 를 다시 지진원 i 와 관계 있는 $E'(f_c)_i$ 와 모든 지진에 동일하게 적용되는 $F(f_c)$ 로 분해한다면 식(1),(2)로부터 식 (3)과 같은 행렬식이 구성되며 중심주파수 f_c 에 대해 최소자승역산을 통해 $E_i (=E'_i + F)$, $Site_j$, D_k 을 계산할 수 있다. $F(f_c)$ 는 행렬의 안정적인 계산을 위해 본 연구에서 도입된 임의의 변수이다.

$$Y(f_c)_{ij} = [E'(f_c)_i + F(f_c)] + Site(f_c)_j + \sum_{k=0}^n L_k(R) D_k(f_c) \quad (i, j = \text{지진원, 관측소 index}) \quad (3)$$

표 1 감쇠항($D(R, f_c)$) 계산을 위해 사용된 중심주파수 및 이에 대한 주파수 구간

fc(Hz)	frequency range(Hz)	fc(Hz)	frequency range(Hz)	fc(Hz)	frequency range(Hz)
1.24	0.99-1.49	9.14	8.89-9.39	21.98	21.73-22.23
1.73	1.49-1.98	10.13	9.88-10.38	23.95	23.71-24.20
2.23	1.98-2.48	11.12	10.87-11.36	25.93	25.68-26.18
3.22	2.97-3.46	12.10	11.86-12.35	27.90	27.66-28.15
4.20	3.96-4.45	14.08	13.83-14.33	29.88	29.63-30.13
5.19	4.94-5.44	16.05	15.81-16.30	32.84	32.59-33.09
6.18	5.93-6.43	18.03	17.78-18.28	35.80	35.56-36.05
7.17	6.92-7.41	20.00	19.76-20.25	38.77	38.52-39.01
8.15	7.91-8.40				

식 (3)의 행렬역산시 감쇠항에 부여되는 일반적인 제한조건은 다음과 같다.

- 특정 기준 진원거리에서의 $D(R, f_c)$ 값은 0이다.
- 특정 주파수에서 모든 부지특성항의 합은 0이다.
- 진원거리에 따른 D_k 의 평활화 정도

본 연구에서는 제한 조건 c를 적용하기 위한 평활화 정도는 최소로 하여 거리에 따른 지진동감쇠의 형태를 상세히 평가하고자 하였으며, 제한조건 a 대신 기하학적감쇠와 파상(phase)이 안정적인 원거리에서는 Q 값이 거리에 관계없이 비교적 안정적이어야 하는 점을 착안하여 기준(진원)거리에 대한 지진동감쇠 수준인 $D_{ref}(R, f_c)$ 을 대략적으로 추정하였다. 제한조건 a를 사용하지 않은 다른 이유는 국내에서 기록

된 지진카다로그의 진원위치가 정확히 알려져 있지 않아 강제적으로 기준거리에서 $D(R,fc)$ 을 0으로 제한하면 지진동 감쇠의 형태를 왜곡할 수 있기 때문이다. 기준거리에 대한 제한조건 없이 계산된 감쇠항 $D(R,fc)$ 은 비탄성감쇠와 기하학적감쇠항으로 구분할 수 있으며 기준거리로 정규화된 감쇠항 $D_{ref}(R,fc)$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$D_{ref}(R_i, fc) = D(R_i, fc) - C' = -(\pi \cdot fc \cdot R_i) / (\beta \cdot Q_i(fc)) \cdot \log(e) + G_{ref}(R_i) - (C + L(R_i, fc)) \quad (4)$$

위 식에서 β 는 S파의 속도이며, C' 는 식 (3)의 행렬역산시 기준거리를 가정하지 않았으므로 역산으로 도출된 $D(R,fc)$ 을 기준거리로 정규화시키기 위해 사용되는 보정항으로 본 연구에서는 이동상수항 C 와 주파수, 거리에 따라 변하는 $L(R,fc)$ 로 분해하였다. $L(R,fc)$ 는 감쇠항의 형태, 역산방법, 지진자료의 거리-규모별 분포 등에 의한 $D(R,fc)$ 의 영향을 보정하기 위한 항으로, 본 연구에서는 C 의 적용만으로 $D_{ref}(R,fc)$ 이 기준거리로 정규화 되지 않을 경우 제한적으로 사용하였다. 식 (4)의 $G_{ref}(R_i)$ 는 R_i 까지의 기하학적 감쇠항으로 합리적으로 미리 추정될 수 있고, $L(R,fc)$ 를 무시할 경우 C 는 식 (5)의 F 를 최소화시키는 값으로 반복적인 계산을 통해 결정되며 동시에 표준편차가 최소화된 $Q_i(fc)$ 도 계산된다. 식 (5)를 최소화시키는 의미는 파상이 안정적인 특정 진원거리(R_i) 이상에서 거리별로 계산된 여러 Q_i 값의 변화가 최소가 되는 C 를 찾기 위해서이다.

$$F(C; G_{ref}(R_i))_{L(R_i,fc)=0} = \sum_j [\text{Standard Deviation} (\ln Q_i(fc_j), i=1,n) \text{ where } R_i > R_f] \quad (5)$$

식 (4)의 $D_{ref}(R, fc)$ 는 주파수에 무관한 $G_{ref}(R)$ 에 대해 상대적인 값을 갖지만 $Q(fc)$ 는 $G_{ref}(R)$ 와 무관하게 계산된다. 또한 식 (4)에서는 $Q(f)$ 모델에 대한 어떠한 가정도 포함되지 않기 때문에, 식 (5)을 통한 $Q(fc_j)$ 계산 결과를 통해 특정 진원거리 및 주파수 범위에 적합한 $Q(f)$ 모델을 평가할 수 있다.

또한 주파수영역에서 $r^{-0.5}$ 의 기하학적 감쇠가 성립되는 원거리구간에서 식 (4)의 $G_{ref}(R)$ 을 분해하면 식 (6)과 같이 정리되는데 이에 따르면 Q 는 식 (6)의 우변항의 진원거리에 따른 기울기의 정보만으로 계산될 수 있고 이 때 계산된 Q 는 spatial Q 이며 이 결과는 식 (5)을 통해 계산된 Q (이하 Q 로 표기)와 동일하여야 함으로 상호 비교검증에 사용될 수 있다.

$$- [D(R,fc) - 0.5 \cdot \log(1/R)] \cdot \beta / [\pi \cdot fc \cdot \log(e)] = 1/Q(fc) \cdot R + \text{Const.} \quad (6)$$

2.2 자료 및 역산결과

본 연구에 사용된 자료는 주로 1996년 이후부터 2003/07/09 까지 국내 인근지역에서 발생한 241개의 지진 및 124개의 지진관측소에 대한 5,642개의 수평성분 가속도 푸리에스펙트럼이다. 푸리에스펙트럼 계산을 위한 지진 기록은 기상청, 지질자원연구원, 전력연구원, 원자력안전기술원, KSRS, IRIS, 일본기상청, 일본 F-net으로부터 얻어졌다. 수평 푸리에스펙트럼은 총시간이력 중 S파의 주요 에너지 성분을 포함하는 시간구간을 양끝 5% cosine tapering을 통하여 얻어진 EW와 NS 푸리에스펙트럼의 벡터합으로부터 계산하고, S/N비가 최소 3~4배 이상되는 주파수 구간을 시각적으로 선별하였다. 시간 window의 길이는 대략 150km 이하에서는 최소 5초부터 선형적으로 증가하며((2)) 원거리에서는 균속도 3.6km/sec, 2.6km/sec에 상응하는 시간구간으로 설정되었다. 일반적으로 국내 지진관측소에는 강지진동 센서와 지진센서가 동시에 설치되어 있는데, 동시에 기록되었을 경우에는 고주파 구간은 강지진동 센서, 저주파 구간은 지진센서의 자료를 위주로 사용하였으며, 단주기 지진계의 계측자료는 1Hz 이하의 저주파 스펙트럼에 대한 S/N비가 충분한 경우 계기보정하였으며, 계측기록의 양호 여부를 판별하기 위해 여러 방법으로 세심한 검토가 이루어졌다([5]). 또한 비매개변수법 적용을 위해서는 진원거리를 계산하여야 하는데 기상청, 지질자원연구원, ISC에서 발표한 지진정보를 이용하였으며 진원깊이가 알려져 있지 않을 경우에는 10km로 가정하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 식 (3)의 행렬역산시 중심주파수(fc)에 대한 주파수구간내의 스펙트럼 자료가

이용되는데 역산결과가 중심주파수에 대한 대표성을 갖도록 하기 위해 구간내 주파수에 따른 차등 가중치를 부여되었다. 가중치 형태는 선형주파수 공간에서 fc에서는 1, 구간양끝 주파수에서는 0.5의 가중치를 갖는 포물선 함수를 이용하였다.

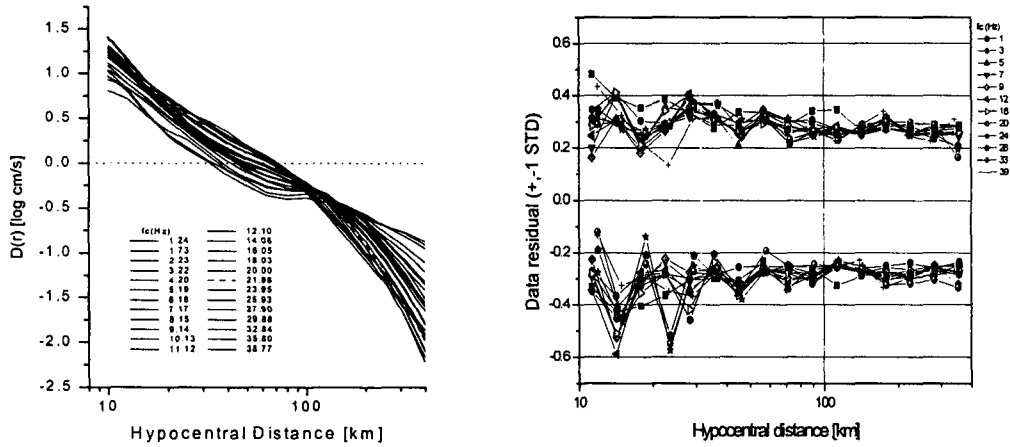


그림 1 가중치 최소자승법으로 얻어진 주파수 별 푸리에스펙트럼 감쇠항 (식(4)의 $D(R, fc)$)

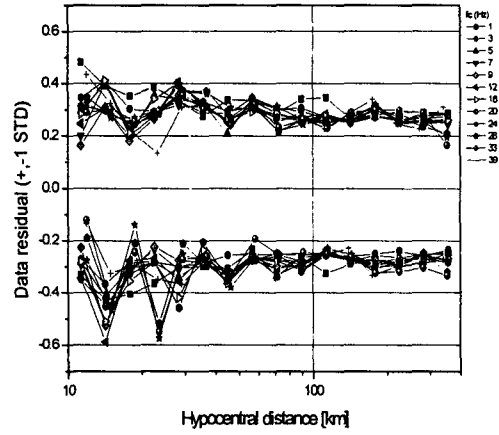


그림 2 대표적인 주파수에 대한 감쇠항 역산결과와 사용된 푸리에 스펙트럼의 진원거리에 따른 오차

이러한 가중치 최소자승법 역산을 통해 얻어진 $D(r)$ 은 그림 1과 같으며 대표적인 중심주파수에 대한 거리별 표준편차 및 잔차분포 분포는 그림 2, 3과 같다. 그림 2에서와 같이 평활화 되지 않은 푸리에스펙트럼이 그대로 사용됐음에도 대략 상용로그 표준편차가 0.3(=자연로그 편차 0.7)으로 평가되었으며 근거리에서는 자료의 양이 많지 않음으로 상용로그 표준편차 0.4의 다소 큰 편차를 나타내었다. 그림 1에서 확인되는 감쇠현상은 10Hz 이하의 저주파에서 평탄한 구간이 존재하는 전형적인 trilinear 기학적감쇠 형태와, 약 100km에서 바뀌는 주파수별 감쇠수준의 역전현상이다.

$D(r)$ 추정시 기준거리에 대한 어떠한 제한도 가하지 않았으므로 그림 1에 도출된 $D(r)$ 의 수준은 형상 이외에는 아무런 물리적인 의미를 갖지 못한다. 이러한 $D(r)$ 이 물리적인 값을 갖기 위해서는 식 (4)처럼 기준거리에 대한 $D_{ref}(r)$ 이 계산되어야 하며 이러한 $D_{ref}(r)$ 을 계산하기 위해서 식 (5)을 최소화하는 C 를 각 주파수별로 반복적으로 계산하였다. 본 연구에서는 기준 진원거리로서 15.86km를 설정하였다. 식 (5)를 최소화시키기 위해서 필요한 $G_{ref}(R)$ 계산은 현재 진행중인 multi-Q 블록을 이용한 지진동 연구에서 잠정적으로 도출된 기학적 감쇠결과(식 (7) G_1)와 기존 연구결과(식 (7) G_2 , [1,2])를 이용하였다. 기준거리까지의 비탄성감쇠계산을 위한 근거리 Q 는 식 (8)을 사용하였으며 근거리에서는 Q 모델 선택에 따른 영향은 크지 않다. 식 (7) G_1 의 65km, 115km는 그림 1에서 확인된 평탄한 구간을 나타내기 위해 대략적으로 이용된 값이다.

$$G_1(r) = r^{-1.1} (0km < r \leq 65km), r^{-0.025} (65km < r \leq 115km), r^{-0.5} (115km < r) \quad (7)$$

$$G_2(r) = r^{-1.0} (0km < r \leq 50km), r^{-0.5} (50km < r)$$

$$Q(f) = 250f^{0.6} \quad (8)$$

그림 (4)에는 각 주파수별로 거리에 따른 Q 의 자연로그 표준편차를 최소로 하는 C (shifting factor)가 나타나 있으며 약 5Hz 이상에서의 이동상수는 오차 0.05이내의 일정한 값 0.73을 나타내고 있다. C 평가시 식 (7)의 G_1 , G_2 에 따른 차이는 나타나지 않았다. 이동상수 C 만을 이용해 계산된 $D(R, fc)$ 항이 실제로 기준거리에서 충분히 정규화 되었는지를 판단하기 위해 그림 6과 같이

1/r 기하학적 감쇠가 보정되고 $D(R,fc)$ 에 $C=0.73$ 이 보정된 감쇠항의 근거리 형태에 대해 검토하였다. 검토 결과 6Hz이상의 고주파에서는 감쇠항은 충분히 정규화된 것으로 판단되나 저주파에서는 정규화되지 않는 추세를 나타내고 있어 그림 7과 같은 추가적인 감쇠항보정($L(R,fc)$)을 하였다. 이 항은 근거리 감쇠항을 주로 보정하기 위해서 기준거리에서의 감쇠항 값으로부터 진원거리 400km에서 0이 되며 거리에 따라 단조 감소하는 함수로 가정하였다.

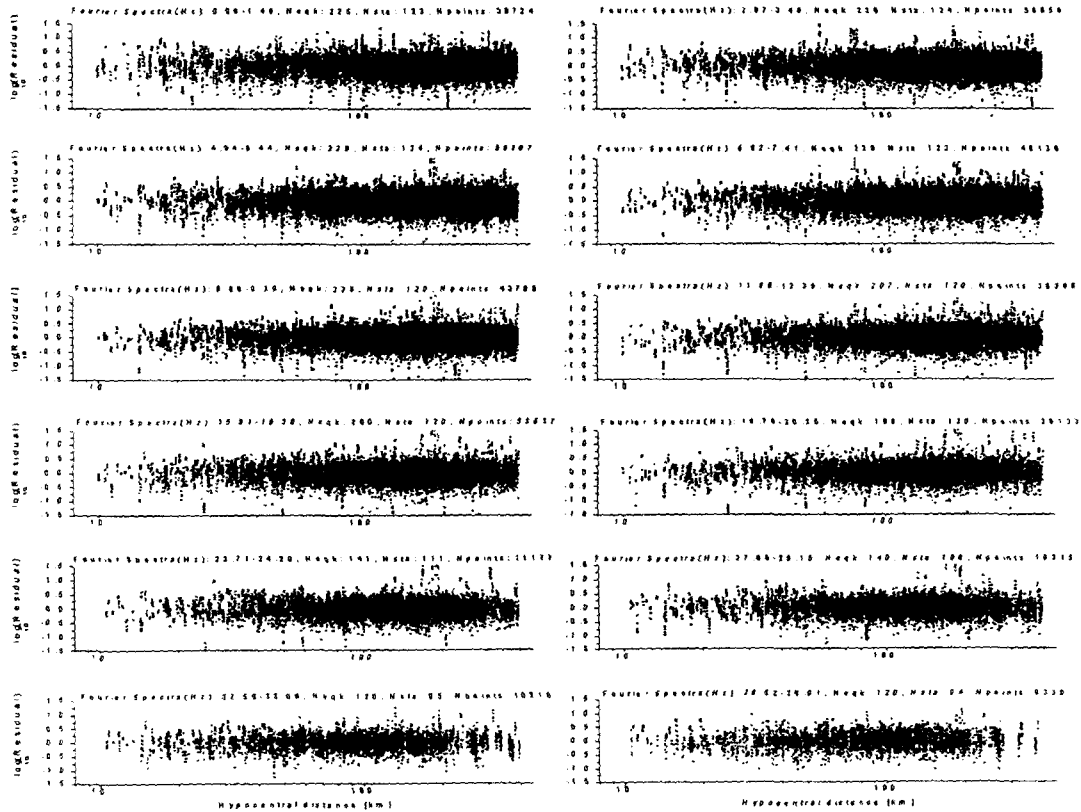


그림 3 감쇠항 역산결과에 따른 대표적인 주파수에 대한 거리별 잔차의 분포

이상에서의 보정항 $C' (= C + L(R,fc))$ 이 적용된 $D_{ref}(R,fc)$ 은 기준거리 15.86km에 대한 지진동의 주파수별 상대적인 감쇠로서 의미를 갖는다. C 계산을 위한 식 (5)의 F를 최소화하여 얻어진 주파수, 거리별 Q는 그림 5에 나타내었으며, 5Hz이상에서 $Q_0 f^n$ 의 함수에 잘 적합하고 적합결과는 $215f^{0.7}$ 를 나타내었다. Q의 주파수영역에서의 어떠한 형태의 함수에 대한 가정 없이 단지 거리에 따른 Q만을 최소화한 결과가 그림 5와 같이 $Q_0 f^n$ 의 함수에 잘 적합된다는 사실은 이 모델이 실제 자연현상이며 일반적으로 사용되고 있는 $Q_0 f^n$ 모델 사용은 200km 이상의 진원거리이상 및 5Hz 이상의 주파수 영역에서 타당함이 입증되었다. 한편 그림 5에서 5Hz이하의 진원거리별 Q값은 표준편차가 크며 이때 계산된 C도 매우 다른 것을 알 수 있다(그림 4). 그러나 Q의 변화가 무작위성을 갖지 않고 거리증가에 따라 Q값 역시 증가하는 예측되는 현상이 나타나며 이러한 사실은 200km 이상에서 단일 $Q_0 f^n$ 모델로는 5Hz이하의 지진동감쇠를 적절히 표현할 수 없음을 암시하고, 물리적으로는 두개 이상의 파상이 거리별로 서로 다른 비율로 혼재되기 때문으로 판단된다.

이상에서 계산된 결과를 검증하기 위해 주로 Lg파로 구성될 것으로 판단되는 진원거리 200~400km에 대해 식 (6)의 기울기로부터 spatial Q를 평가하였다(그림 8). 그림 8(a)의 기울기 계산시 0.98이상의 선형계수가 구해졌으며, 그림 8(b)에서 $Q_0 f^n$ 의 모델로 최대 적합될 수 있는 주파수

구간은 5Hz에서 30Hz 사이로 평가되었다. Spatial Q와 식 (5)를 통한 Q 결과를 그림 5와 같이 비교한 결과 서로 매우 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며 따라서 200km 이상의 파상이 안정적이라는 본 연구의 가정과 이러한 가정을 통해 도출된 Q값은 타당하다고 판단된다.

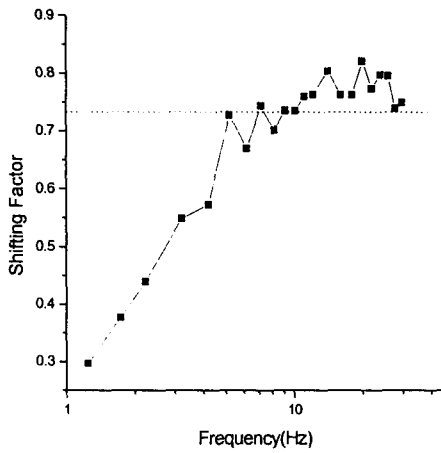


그림 4 식 (4)의 $D_{ref}(R, fc)$ 평가시 계산된 주파수별 이동상수(C) 계산 결과. 점선은 5Hz이상의 Q를 최소화하는 이동상수값

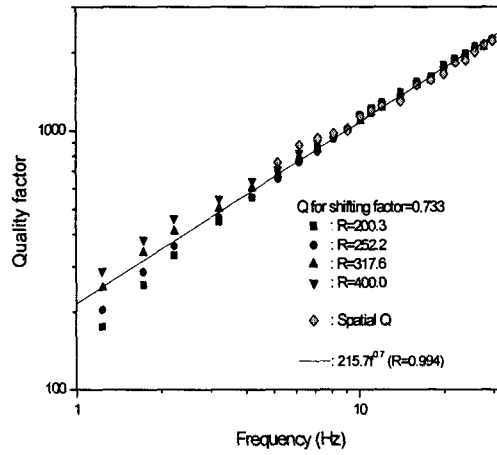


그림 5 200km 이상 진원거리에서 거리별 Q의 표준편차를 최소화해 얻어진 Q 및 식 (6) 기울기를 통해 얻어진 spatial Q 비교

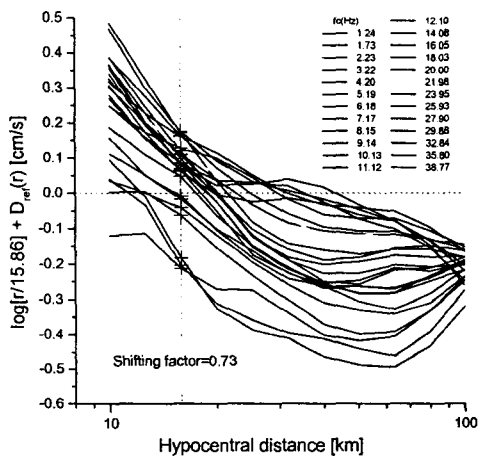


그림 6 주파수별로 동일한 이동상수(0.73)가 적용된 경우의 기준거리에서의 감쇠항 ($D_{ref}(R, fc)$) 오차

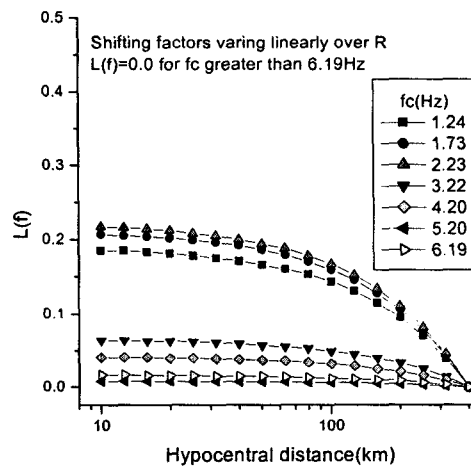


그림 7 기준거리에서의 감쇠항 오차제거를 위해 적용된 진원거리에 따라 선형감소하는 주파수별 감쇠보정항

또한 그림 8(b)에서 spatial Q 평가시 5Hz이하에서 $Q_0 f^n$ 모델에 대한 적합도가 낮았는데, 이는 이 주파수영역에서 진원거리에 따라 Q가 증가하기 때문으로 판단된다(그림 5). 그러나 $L(R, fc)$ 에 대해 추가보정이 된 $D(R, fc)$ 을 이용한 식 (6)의 기울기로부터 5Hz 이하의 saptail Q를 다시 계산하면 그림 8(b)처럼 $Q_0 f^n$ 모델로 근접함을 알 수 있으며 이는 $L(R, fc)$ 보정이 타당함을 의미한다. 30Hz 이상에서 spatial Q 역시 $Q_0 f^n$ 모델에서 많이 어긋나며 이러한 주파수영역에서는 또 다른 파상이 우세하기 때문으로 판단된다.

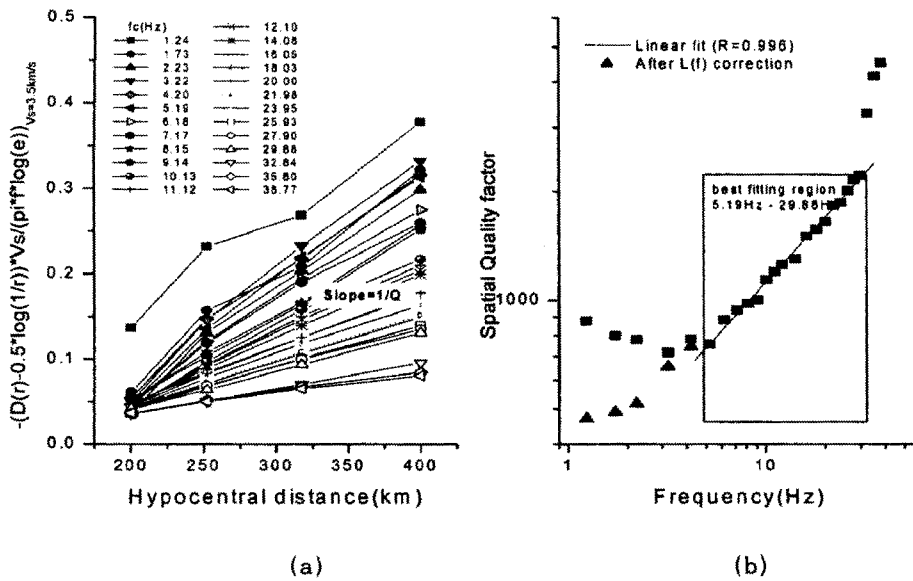


그림 8 식 (6)을 통해 200km 이상의 주파수별 Q를 계산하기 위한 주파수별 기술기 변화(a)와 이로부터 얻어진 spatial Q (그림 b ■). 그림 b에서 ▲는 C 이외에 L(R, f)의 추가보정이 이루어진 후의 기울기로부터 얻어진 Q.

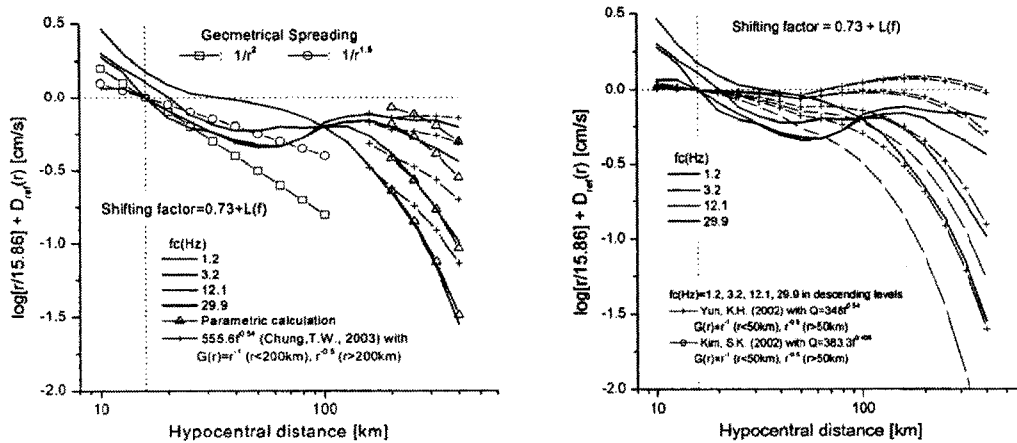


그림 9. (a) 근거리에서의 기하학적감쇠 평가와 원거리에서의 최근 연구결과(16)와의 비교 (b) 기존 연구([1,2])로 얻어진 단일 Q모델을 이용한 감쇠와의 비교

본 연구에서 최종적으로 얻어진 감쇠항에 대해 $1/r$ 감쇠가 보정된 결과가 대표적인 주파수에 대해 그림 9에 나타나 있다. 그림 9에서 근거리의 기하학적감쇠는 $1/r$ 보다 빠른 것으로 나타나 있으며 그림 5에서 추정된 Q모델을 이용한 감쇠결과는 5Hz이상의 고주파에서 비매개변수법 결과 잘 적합됨을 알 수 있으며, 최근의 Lg Q 연구결과(16)를 이용한 감쇠결과와도 대략적으로 합됨을 알 수 있다. 그러나 기존의 단일 Q 모델([1,2])과의 비교(그림 9(b))에서는 단일 Q모델을 사용할 경우 100km이하의 근거리 감쇠항을 적절히 나타내지 못하고 있으며 저주파에서 비매개변수법 통한 감쇠보다 다소 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 비매개변수법을 국내 지진자료의 주요 S파 구간에 대한 수평성분 푸리에스펙트럼에 적용하고, 스펙트럼의 거리에 따른 감쇠특성을 광범위한 주파수 영역(1~40Hz)별로 도출하였으며 주요 결론은 다음과 같다.

- 가. 비매개변수법 적용시 기준거리에 강제로 정규화하는 제한조건 대신 200km 이상의 진원거리에서는 파상이 안정적이어서 이 구간 내에서는 거리별로 동일한 Q 값이 계산되어야 하는 물리적인 제한조건을 이용하였으며 기준거리 15.86km에 대략적으로 정규화된 감쇠항을 도출함
- 나. 비매개변수법으로 추정된 감쇠항에서 대략 진원거리 65~120km 사이에서 거리에 따른 감쇠가 두드러지지 않는 평탄한 구간이 확인되었으며, 따라서 국내 강지진동 모사시 bilinear 기학학적 감쇠모델보다는 trilinear 기학학적 감쇠모델 사용이 권장됨
- 다. 근거리(진원거리 < 100km)에서의 지진파감쇠 양상은 매우 복잡하며 감쇠정도는 고주파보다 저주파 스펙트럼이 크며, 이로 인해 단일 Q 모델을 이용할 경우에는 근거리에서의 감쇠형태를 적절히 나타낼 수 없는 것으로 판단됨
- 라. 비매개변수법으로 도출된 지진동감쇠는 진원거리 200km 이상에서는 주파수 범위 5~30Hz에서 $215f^{0.7}$ 모델에 부합되나 5Hz 미만 주파수에서는 진원거리 증가에 따라 Q가 다소 증가하였으며 30Hz 이상에서는 Q_0f^n 모델에 부합되지 않는 매우 큰 Q값이 나타남
- 마. 지진원 특성 평가시 근거리 광대역 자료를 이용할 경우 지진동감쇠 보정시 각별한 주의가 요망되며, 안정적인 지진원 특성 평가를 위해서는 100km 이상에서 기록된 지진자료의 사용이 권장됨

이상의 결과에서 단일 Q모델은 광범위한 진원거리에서 사용될 수 없음이 확인되었으므로 지진동모사시 광범위한 거리에서 이용될 수 있는 단순한 형태의 감쇠함수 도출 및 이에 대한 매개변수 추정 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다. 아울러 본 연구에서는 식 (4)의 $L(R,fc)$ 를 이용한 근거리 감쇠항 보정을 최소화 하였으나 보다 상세한 감쇠항 도출을 위해서는 이 항에 대한 심도있는 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 사용된 스펙트럼 자료는 동시에 추계학적 지진동 매개변수 역산에 활용될 수 있어, 매개변수 역산 결과인 응력강하량, Q, κ 를 이용하여 도출된 지진원, 감쇠, 부지특성 결과와 상호 비교·검증될 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 2003년도 원자력연구개발 중장기계획사업 “원전부지 최대지진력 평가연구” 과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김성균, 김수경, 지현철 (2002), 한반도 남부에서의 주파수별 가속도 최대진폭의 감쇠, 지질학회지 38권 2호 237-250.
- [2] 연관희, Walter Silva, 박동희, 장천중 (2002), "수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의 추계학적 지진 요소 평가", 한국지진공학회 춘계학술대회 Vol. 6. No. 1, 20-27.
- [3] 박동희, 연관희, 장천중, 이종립 (2001), "한반도 동남부의 S파 감쇠", 한국지진공학회 춘계학술대회 Vol. 5. No. 1, 51-57.
- [4] Jeon, Y.S. (2000), High frequency earthquake ground motion scaling in Utah, Master's Thesis, St. Louis University.
- [5] 연관희, 박동희, 김성주, 최원학, 장천중 (2001), "지진관측자료의 효과적인 활용에 관한 고찰", 한국지진공학회 추계학술대회 Vol. 5. No. 2, 36-43.
- [6] Tae-Woong Chung and Kiehwa Lee (2003), "A Study of High-Frequency Q_{Lg}^{-1} in the Crust of South Korea", Bulletin of the Seismological Society of America, 93, 3, pp. 1401-1406.