

# 추계학적 강지진동 모사를 위한 Q의 주파수 의존 특성에 대한 연구

## Study on frequency dependency of Q for Stochastic Strong Ground Motion Simulation

연관희\*  
Yun, Kwan-Hee

박동희\*  
Park, Dong-Hee

장천중\*  
Chang, Chun-Jung

### ABSTRACT

For stochastic strong ground motion simulation, frequency-dependent Q model ( $=Q_0f^\eta$ ) were evaluated for major geographical blocks according to the epicentral distance ranges by using a lateral Q tomography technique. The inversed Q results were used to qualitatively identify seismic albedos of each Q blocks and were compared with the previous Q studies. In addition, a functional Q model calibrated to the low frequency spectra of local earthquakes were suggested especially for use in analysing large and distant regional earthquake events.

### 1. 서론

우리나라는 중·저 지진활동성 지역으로 강진 관측자료가 전무하여 공학적으로 중요한 강진에 대한 지진동감쇠식을 도출하기 위해서는 미소지진으로부터 지진특성을 도출하고 self-similarity 원리에 기초한 source scaling의 관계식을 이용하여 강진의 특성을 유추해야 한다. 이를 위해 가장 많이 사용되고 있는 방법은 추계학적 지진모델(stochastic point-source model, [1]) 방법으로서 비교적 적은 수의 모델파라미터로 지진관측기록을 잘 모사하는 것으로 알려져 있어 국내에 매우 적합한 방법이다. 이러한 추계학적 모델파라미터 중 지각구조 감쇠( $=Q_0f^\eta$ )와 관련된  $Q_0$ 에 대한 기존 역산 결과에 따르면  $Q_0$ 의 값이 지역별로 많은 차이를 갖고 있으며  $Q_0$ 의 공간적 분포와 지체구조, 지진발생 위치와의 상관관계를 나타내었다([2, 3]). 또한 지체구조에 따라 높은 현상학적인 이방성을 갖는 감쇠특성이 확인되었다. 그러나 이러한 역산에서는 Q의 주파수 의존성( $\eta$ )을 전체지역에 대해 동일한 값을 가정하고 계산하여 기존에 계산된 특정 지역의 Q 연구결과와 비교하기 곤란하였다. 현재까지 국내의 Q 연구는 대부분 경상분지를 대상으로 수행되었으며([4-10]), 역산 방법에 따라서 서로 상이한 결과를 제시해 강지진동 모사를 위한 Q 모델 선택에 있어 어려움이 있다.

일반적으로 지각구조 감쇠는 기하학적 감쇠와 비탄성 감쇠가 있으며 비탄성 감쇠에는 intrinsic 감쇠와 scattering 감쇠가 있다. 이들 중 scattering 감쇠는 Q의 주파수 의존도( $\eta$ )와 밀접한 관계가 있으며  $\eta$ 는 불균질성 정도와 비례관계가 있다. Intrinsic 감쇠는 주파수와 무관한 감쇠로서 지역의

\* 한국전력공사 전력연구원, 정회원

지열량과 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 이전 연구를 통해 밝혀진 감쇠의 특성을 물리적으로 해석하고 비교하기 위해서는 intrinsic와 scattering 감쇠를 구분할 필요가 있다. Intrinsic 감쇠와 비탄성 감쇠의 상대적인 비(seismic albedo)를 평가할 수 있는 여러 가지 정량적인 방법이 있으나([11-13]) 본 연구에서는 주요 지체구조의  $Q_0$ ,  $\eta$ 에 대한 상대적인 비교를 통한 정성적인 평가에 국한시키고자 한다.

또한  $Q$ 는 깊이에 따라 증가하는 것으로 알려져 있으므로  $Q$ 에 대한 종합적인 이해를 위해서는 이러한 특성에 대해서도 살펴보아야 한다. 본 연구에서는 깊이에 따라 변하는  $Q$ 를 정량적으로 평가하기 보다는, 근거리(<100km) 지진은 천부지각, 원거리(>100km) 지진은 심부지각의  $Q$ 에 각각 많은 영향을 받을 것으로 가정하여 동일 지진에 대해 진앙거리별로 다른  $Q$ 를 가정하여 역산을 시도하였다. 특히 추계학적 모델 평가시 대상이 되는  $S$ 파 주요 에너지에는 여러 종류의 파( $S$  직접파,  $S_n$ , Love 파, Rayleigh 파)가 혼재해 있으므로 거리별로 지진관측자료에 보정된 서로 다른  $Q$ 를 계산함으로써 강진진동 모사의 정확도를 향상시킬 수 있다.

추계학적 지진동 모델 평가를 위한  $Q$ 의 특성 중 추가적으로 고려해야 할 사항은 저주파(<0.1Hz)에서의  $Q$  값이다. 일반적으로 저주파에서의  $Q$  값은 0.3Hz를 기준으로 이 이하에서 다시 증가하는 경향을 나타낸다([14]). 이러한 특성은  $Q_0 f^\eta$ 의 함수형태로는 표현할 수 없고 다른 함수형태를 가정하여 파라미터를 계산해야 하며 이러한 저주파에서의  $Q$  값은 원거리 지진 및 대규모 지진의 지진원 스펙트럼을 평가하는데 영향을 끼칠 것으로 판단된다. 국내 지진관측자료 중  $Q$ 의 저주파 추정에 활용할 수 있는 자료의 양은 비록 적으나, 본 연구에서는 관측자료에 최대한 보정된 저주파  $Q$ 를 추정하기 위해 역산을 시도하였다.

## 2. 본론

### 2.1 이론 및 역산 방법

추계학적 지진모델은 단일 코너 주파수 및 일정한 응력강하(stress drop)의  $\Omega^2$  지진원 모델을 이용한다. RVT(Random Vibration Theory) 방법은 파워스펙트럼으로부터 시간영역의 최대값을 추정하는 방법으로 가속도의 최대지반가속도와 RMS (root-mean-square), 응답스펙트럼 값을 관련지을 수 있다. 가속도 푸리에스펙트럼의 형태  $a(f)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$a(f) = C \frac{f^\beta}{1 + (\frac{f}{f_0})^2} M_0 G(R) P(f) A(f) e^{-\frac{\pi f R}{\beta_0 Q(f)}} \quad (1)$$

여기서

$$C = \left( \frac{1}{\rho_0 \beta_0^3} \right) \cdot (2) \cdot (0.55) \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \pi, \quad f = \text{주파수}$$

$$M_0 = \text{지진모멘트(seismic moment)}, \quad R = \text{진원거리}$$

$$\beta_0 = \text{지진원에서의 S파 속도}, \quad \rho_0 = \text{지진원에서의 밀도}$$

$$Q(f) = Q_0 f^\eta (\text{quality factor}), \quad A(f) = \text{지각증폭}$$

$$P(f) = \text{고주파 제거 필터}, \quad f_0 = \text{지진원 코너 주파수}$$

$C$ 는 상수로서 지진원 밀도( $\rho_0$ )와  $S$ 파 속도 그리고 자유면 효과(2배수), 구면으로 방사하는

지진에너지의 평균값(0.55) 그리고 2개의 수평방향으로의 에너지 분리( $1/\sqrt{2}$ )와 관련된 항목을 포함한다. 지진원 규모는 지진모멘트와 고주파 응력 파라미터 즉 응력강하( $\Delta\sigma$ )의 두 개의 독립적인 파라미터에 의해서 결정된다. 또한 식 (1)에서  $G(R)$ 은 기하학적 감쇠로서  $Q(f)$  결정에 큰 영향을 주며 이에 대한 여러 형태가 제안되어 있으나 본 연구에서는 편의를 위해 식 (2)와 같은 기하학적 감쇠만을 고려하였다. 전이거리(cross-over distance)로 알려진 식 (2)의  $R_0$ 는 일반적으로 모호면 깊이의 2배 정도로 알려져 있다.

$$G(R) = R^{-1} \text{ for } R \leq R_0, (\sqrt{R_0 R})^{-1} \text{ for } R \geq R_0 \quad (2)$$

식 (1)의 모델 파라미터는 지진관측자료를 이용하여 추정될 수 있으며 기존 역산 연구 ([2,3])에서는  $Q_0$ 의 현상학적인 이방성과 지역적인 변화를 고찰한 바 있다. 본 연구에서는  $Q(f)$ 의 종합적인 규명을 위해 기존 지진관측자료에 최근까지의 지진자료를 추가하였고, 기존 역산시 지역적으로 동일하게 가정하였던  $\eta$ 를 지역적으로 변화할 수 있도록 역산방법을 수정하였다. 사용된 지진자료는 규모 2.8이상의 222개 지진에 대한 4,523개의 지진관측기록이다. 또한 심도에 따른  $Q$ 의 변화를 정성적으로 살펴보기 위해 진앙거리에 따라 서로 다른  $Q$ 를 가정하여 역산을 수행하였다.

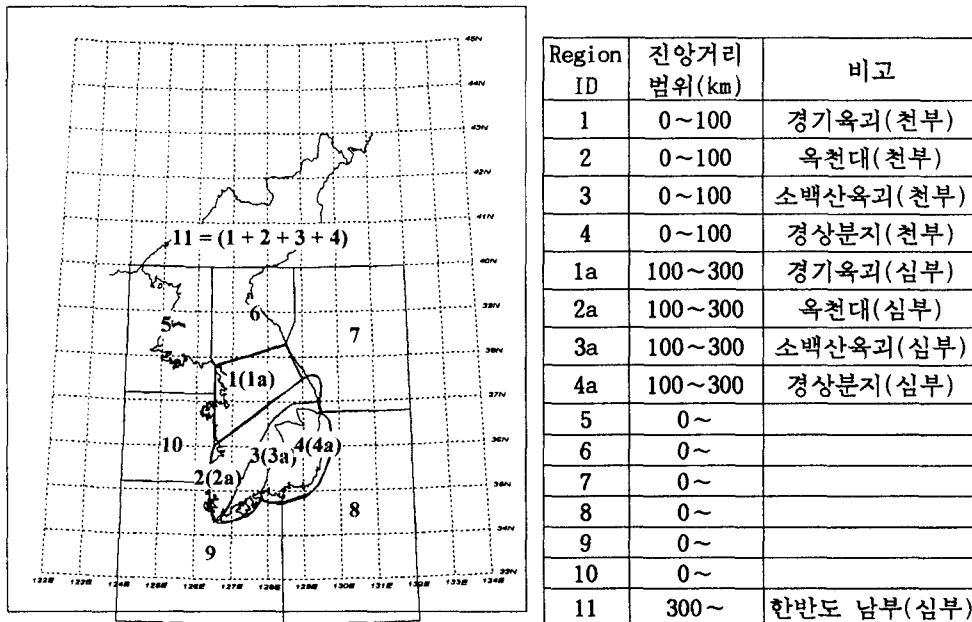


그림 1. 주요 지체구조구 및 진앙거리에 따른  $Q_0$ 와  $\eta$  역산을 위한 한반도 남부의 블럭 설정

그림 1은 이러한 역산을 위해 설정된 블록을 도시한 그림이다. 그림 1에서 한반도 남부의 주요 지체구조구는 4개(경기육괴, 육천대, 소백산육괴, 경상분지)로 분리되었으며, 이들 지체구조구에 대해 심도에 따른  $Q$  값을 정성적으로 고려하기 위해 그림 1의 표와 같이 동일 지진에 대한 파선이 진앙거리별로 서로 다른 블록을 통과하는 것으로 가정하였다. 그림 1의 표에서 임의로 진앙거리를 임의로 100km, 300km로 나누었으나 이러한 진앙거리 범위와 파선통과 심도와와의 관계는

정량적으로 알려진 바 없다. 그림 1에서 해안지역에 대한 블록 설정을 위해 내륙 지역만을 대상으로 한  $Q_0$  토모그래피에서 확인할 수 있는  $Q$ 의 변화지점을 임의로 해안까지 확장하였다([3]).

이상에서 설정된 블록에 대해  $Q$  역산을 수행하기 위해 식 (1)의 지수항을 식 (3)과 같이 대체시켰다. 식 (3)에서  $N$ 은 진앙지에서 관측소까지의 파선이 통과하는 총블럭의 수이며  $R_i$ 는 파선중  $i$ 번째 블록을 통과하는 길이로서, 파선이 깊이는 고려하지 않았다.

$$\frac{\pi f R}{\beta_0 Q(f)} = \frac{\pi f R}{\beta_0 Q_0 f^\eta} = \frac{\pi f}{\beta_0} \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{Q_0 f^\eta} \quad (3)$$

또한 기준방위각( $\theta_R$ )에 대해 정의되는  $Q$ 의 현상학적인 이방성인  $\epsilon$ 는 그림 2와 같은 모델을 구성하여 계산되었다. 이 모델에서 임의 방향의 파선은 두개의 수직한 방향의  $Q$ 로 분해될 수 있다는 가정을 하였으며 각 방향의 가중치는 식 (4)와 같은 삼각함수의 제곱으로 취급되었다. 각에 대한 가중치로 부여될 수 있는 여러 종류의 함수 중 특별히 식 (4)와 같은 형태를 취한 이유는 이러한 함수가 공간영역에서 특이점을 갖지 않는 연속함수로서 표현될 수 있기 때문이다.

$$\frac{R_\theta}{Q_\theta} = \frac{R_\parallel}{Q_\parallel} + \frac{R_\perp}{Q_\perp} = \frac{R \cdot \cos^2 \theta}{Q_\parallel} + \frac{R \cdot \sin^2 \theta}{\epsilon Q_\perp} \quad (4)$$

식 (4)에서  $R_\theta$ 는 특정블럭을 기준방위각( $\theta_R$ )과  $\theta$ 를 이루면서 통과하는 길이이다(그림 2).  $R_\parallel$ ,  $R_\perp$ 는  $R_\theta$ 의 기준방위각을 한 축으로 하는 두개의 수직한 방향으로의 투영길이(projection)를 의미하며 식 (4)에 의하면  $R_\theta$ 는  $R_\parallel$ 와  $R_\perp$ 의 조합으로 표현된다.  $Q_\parallel$ 와  $Q_\perp$ 는 두개의 서로 수직한 방향으로의  $Q$  값을 의미하며 이방성  $\epsilon$ 는 이들의 비( $Q_\perp / Q_\parallel$ )로서 정의된다.

역산은 각 지진의 모멘트( $M_0$ ), 모서리주파수( $f_0$ ), 블록별  $Q_{0i}$ ,  $\eta$ , 각 관측소별 고주파감쇠( $\kappa_0$ )에 대해 수행되었으며, 수정된 Levenberg-Marquardt 방법([2])을 이용하였다. 내륙지역의 주요 지진지체구조구에 대해서는 진앙거리별 이방성( $\epsilon$ )에 대해서도 역산을 시도 하였으며 이때 최대 혹은 최소 이방성을 갖는 방위각으로 간주되는 식 (4)의 기준방위각은 이전 연구([3])를 통해 계산된  $0^\circ$ (경기육괴),  $50^\circ$ (육천대),  $70^\circ$ (소백산육괴),  $60^\circ$ (경상분지)로 설정하였다. 식 (1)의  $\beta_0$ 와  $\rho_0$ 는 각각  $3.4\text{km/sec}$ ,  $2.74\text{g/cm}^3$ 를 사용하였다. 또한 식 (3)의 블록별 파선통과 길이( $R_i$ )는 미리 계산하여 고정시켰다 (표 1).

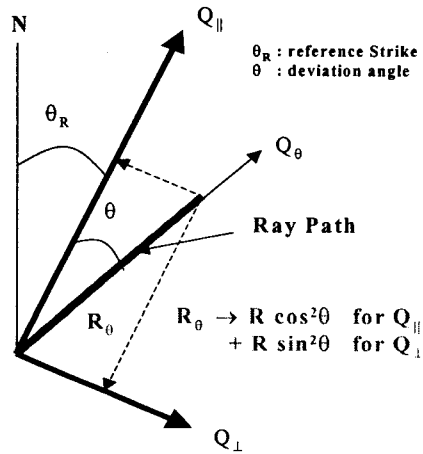


그림 2. Decomposition of ray path into two mutually orthogonal directions with different  $Q$  values

표 1. 블록별 파선 통과 길이

ID	1	2	3	4
통과길이(km)	9349.273	15466.83	9956.363	22429.02
ID	1a	2a	3a	4a
통과길이(km)	72859.37	98879.99	69644.19	117824.9
ID	5	6	7	8
통과길이(km)	62894.58	35759.23	25517.78	43424.68
ID	9	10	11	
통과길이(km)	37000.11	93103.23	167224.6	

이밖에 해안 지역에서 발생한 지진의 지진원 특성 평가의 정확도 향상을 위해 기존 역산시 전 지역에 대해 일정하게 가정하였던  $R_0$  값을, 중력이상자료를 이용해 얻어진 모호면까지의 깊이 ( $R_{\text{moho}}$ , [15])를 식 (5)와 같이 보정해 진앙지별로 다른  $R_0'$ 를 사용하였고  $R_0$ 에 대한 역산을 시도 하였다.

$$R_0'(\text{km}) = R_0(\text{km}) + (R_{\text{moho}}(\text{km}) - 33.0) \times 1.5 \quad (5)$$

## 2.2 역산 결과 및 토의

그림 1에 설정된 블록에 대해 수행된 Q 역산 결과는 표 2에 나타나 있다. 역산의 결과로서 지진원 및 부지특성에 대한 파라미터도 계산이 되나 본 논문에서는 계산된 Q 결과에 대한 논의만으로 국한시키고자 한다. 표 2에서 계산된 이방성의 결과를 보면 육천대의 경우 이방성은 대체로 천부지각부에만 나타나며, 소백산육괴의 경우 이방성이 천부와 심부까지도 높은 이방성 정도를 나타낸다. 특이한 사항은 경상분지의 경우 천부지각부에서는 이방성이 나타나지 않고 심부지각부에서만(진앙거리>100km) 이방성이 나타나고 있음이 확인된다. 향후 경상분지에서 나타나는 이방성에 대해 보다 심도 있는 연구가

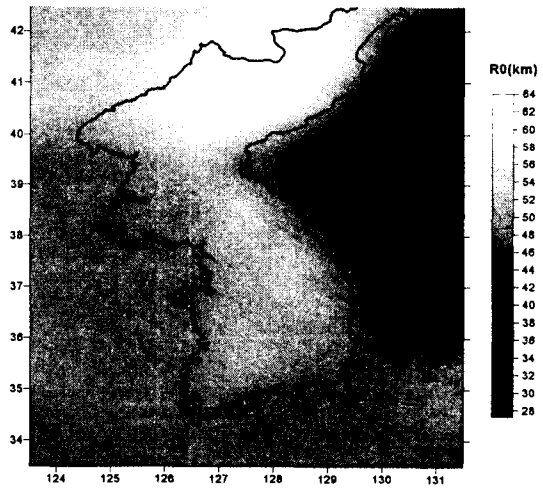


그림 3.  $R_0$  역산 결과에 의한  $R_0'$ (식 (5))

필요하다고 판단된다. 그림 3은  $R_0$ 에 대한 역산 결과로 얻어진  $R_0'$ (식 (5))의 공간적인 분포이다.

그림 4에서는 표 1에서 계산된  $Q_0$ 와  $\eta$ 를 그래프로 표현하였고  $Q_0$ 와  $\eta$ 를 서로 반비례 관계로 보고 이에 대해 선형회귀시켰다(그림 4 실선). 이러한 선형회귀선은 한반도 남부 전체에 대한  $Q_0$ 와  $\eta$ 의 관계식으로 간주될 수 있다. 이러한 특정 지역에 대한  $Q_0$ - $\eta$  반비례 관계는 국외 문헌([13])에서 보고된 바 있다. 지체구조 간의 Q 비교에 있어 이 회귀선 이하에 있는 지역은  $Q_0$ 에 대한  $\eta$ 가 국내 평균관계식에 비해 상대적으로 낮으므로 대체적으로 다른 지체구조구에 비해 intrinsic 감쇠 영향이 크다고 할 수 있으며, 회귀선 이상에 있는 지체구조구는 반대로 scattering에 의한 감쇠 영향이 크다고 할 수 있다. 그림 4에 기초한 주요 결론은 다음과 같다.

- 가. 육천대와 소백산육괴 천부지각부(2, 3)는 scattering에 의한 감쇠 기여도가 상대적으로 크다.
- 나. 심부지각(진앙거리가 큰)에 대한 Q는 천부지각에 비해  $Q_0$ 는 증가하며  $\eta$ 는 감소한다.

다. 최저  $Q_0$ 값을 갖는 한반도 남동부(해안 포함) 지역은 상대적으로 낮은  $\eta$ 값을 갖는다. 이는 이 지역의 높은 지열량으로 인해 intrinsic 감쇠가 상대적으로 크게 기여 때문으로 판단된다.

표 2. 블록별 Q 모델 계산 결과

ID	$Q_1$	$\theta_R$ (degree)	$\epsilon$	$\eta$
1	204.38	0	1.08	0.67
2	177.08	50	0.75	0.79
3	275.78	70	0.45	0.76
4	165.82	60	0.98	0.72
5	322.98	-	-	0.53
6	353.61	-	-	0.66
7	249.54	-	-	0.67
8	173.76	-	-	0.65
9	464.15	-	-	0.45
10	263.30	-	-	0.69
1a	353.15	0	1.01	0.55
2a	342.61	50	0.91	0.57
3a	538.13	70	0.67	0.50
4a	235.47	60	1.26	0.61
11	406.91	-	-	0.47

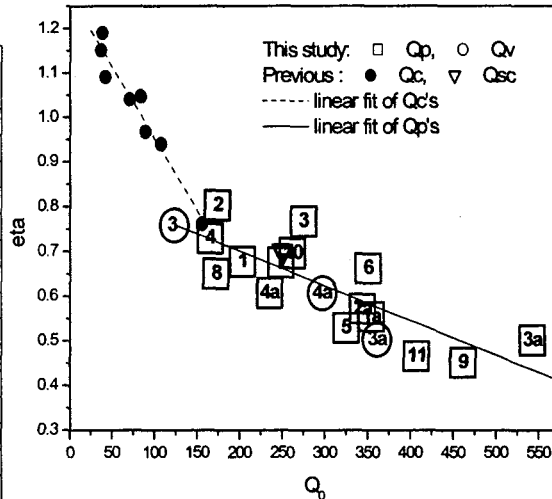


그림 4. 그림 1 블록에 대한  $Q_0$ ,  $\eta$ 의 역산결과

또한 그림 4에는 기존에 평가된 Q의 연구결과( $Q_c$ ,  $Q_{sc}$ )가 함께 도시되어 있다.  $Q_c$ 는 경상분지 단주기 지진관측망에 구축된 S coda 파를 이용해 얻어진 연구결과([4-9])로서 이러한 값들에 회귀선(그림 4 점선)을 연장해 보면 이러한 연장선 상에 경상분지 및 남동해안의 감쇠(4, 4a, 8) 값이 매우 근접함을 알 수 있다. 특히 해안을 통과하는 파선에 대한 S coda를 이용한  $Q_c$ 결과는 경상분지 상부지각부의 결과(4)와 거의 일치하였다.  $Q_0$ 와  $\eta$ 가 지역별로 특정한 반비례 관계식을 따른다고 간주하면, 본 연구에서 계산된 지역별 Q 결과는 타당하다고 판단된다. 본 연구의 결과가 S coda Q보다  $Q_0$ 가 크고,  $\eta$ 가 상대적으로 작은 것은 coda 파를 이용한 경우는 scattering 감쇠를 강하게 반영했기 때문이며 본 연구에서는 intrinsic와 scattering 감쇠 효과가 동시에 영향을 주는 S 직접파를 이용했기 때문으로 사료된다. 또한 그림 4에는 최근에 경상분지 단주기 지진관측망 자료중 진앙거리 100km 이하의 자료를 이용해 발표된 S 직접파에 대한 연구결과([10],  $Q_{sc}$ ,  $\nabla$ )가 도시되어 있는데 이 값은 경상분지의  $Q_0$ ,  $\eta$  회귀식에서 많이 벗어나고 있음을 알 수 있다. 이는 S 직접파 추정에 사용된 지진자료의 진앙지 대다수 위치가 한반도 남부 중앙에 위치하여 파선이 소백산육괴와 경상분지를 통과하여 순수한 경상분지의 특성이라고 판단되기는 어렵고 소백산육괴의 감쇠특성을 부분적으로 반영했기 때문이다. 이러한 사실은 그림 4에서 알 수 있듯이  $Q_{sc}$ 의 결과가 다소 소백산 육괴 결과(그림 4 3)로 치우치는 현상으로 판단할 수 있다.

또한 지진관측자료에 보정된 저주파 Q모델을 제시하기 위해 Sato의 Q 모델(식(6))에 대한 파라미터 역산을 시도하였다. 역산시 국내에서는 0.5Hz이하의 자료가 많지 않으므로 저주파 감쇠형태에 영향을 주는 식 (6)의  $f_q$ 와  $\alpha_2$ 는 원래 주어진 값인 0.3, 2.0을 사용하였고 역산은  $Q_0$ 와  $\alpha_1$ 에 대해서만 수행되었다.

$$Q(f) = Q_0 \cdot \left(1 + \left(\frac{f}{f_q}\right)^{\alpha_1}\right) \cdot \left(\frac{f}{f_q}\right)^{-\alpha_2} \quad (6)$$

역산결과 오차는 Sato의 Q 모델을 사용하지 않은 경우의 결과에 비해 0.7% 감소하였으며,  $Q_0=181.0$ ,  $\alpha=2.54$ 로 계산되었다. 그림 5는 기존에 한반도 남부 전역에 대해 계산된 Q 모델과 저주파에 대해 보정된 새로운 Q 모델을 비교한 그림으로서 Sato의 Q모델 사용에 의해 1Hz 이상의 고주파 영역은 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그림 6 (a), (b)는 Sato의 Q 모델을 이용한 역산에 따른 주파수별 오차분포 및 기존 오차분포와의 비교 결과이다. 비교결과 새로운 Q모델을 사용할 경우 예상대로 저주파 구간에서 오차가 약간 저감됨을 확인할 수 있다.

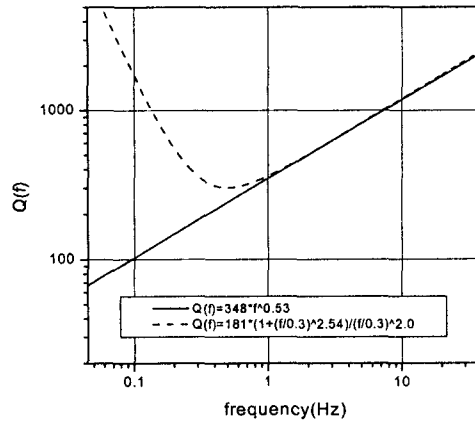
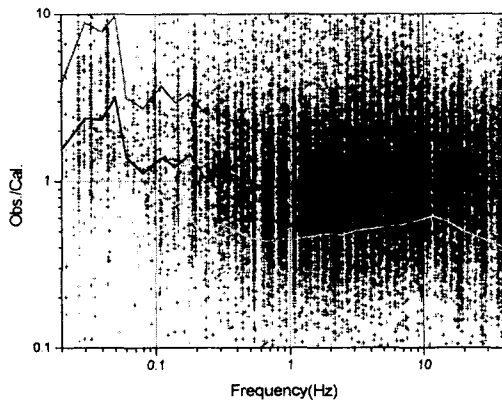
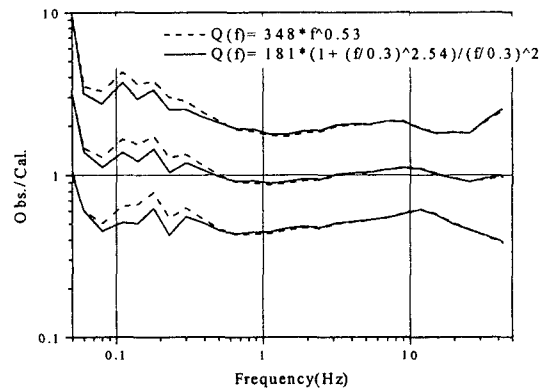


그림 5. Sato Q 역산 모델과 기존 Q 모델 비교



(a) Sato Q 모델 사용에 따른 오차분포



(b) Sato Q 모델 사용에 따른 오차분포의 변화

그림 6. Sato Q 모델 사용에 따른 주파수별 오차 분석

### 3. 결론

본 연구에서는 주요 지체구조구 및 지체구조구별 진앙거리에 따른 Q 역산을 수행하고, Q의 주파수 의존성에 대한 지역별 차이를 평가하고, 이러한 차이를 지체구조구의 불균질성 및 지열량 특성으로 설명하였다. 진앙거리 100km 이상에 대해 계산된 심부지각부의 Q값은 진앙거리 100km 미만에 대해 계산된 천부지각부의 Q에 비해 대체로 크며 Q의 주파수 의존도가 줄어드는 것을 확인하였다. 소백산육괴의 이방성은 심부지각부에 대해서도 나타났으며 경상분지의 경우에는 천부지각부의 미약한 이방성이 심부지각에서 다소 크게 나타났다. 또한 기존 Q 연구 결과와의 비교연구를 통해 본 연구결과의 타당성을 살펴볼 수 있었으며, 서로 상이한 연구결과의 원인을 정성적으로나마 규명할 수 있었다. 이러한 비교를 통해 특정지역(부지)를 대상으로 하는 강지진동 모사에 필요한 Q모델 평가시 평가방법 뿐만 아니라, 부지 특성을 대표할 수 있는 지진자료의 선택도 매우 중요함을 알 수 있었다. 이밖에 지진관측자료의 저주파 스펙트럼에 보정된 Q 모델을 제시하였으며, 이러한 모델을 이용하면 원거리에서 발생한 강진의 지진원 특성을 보다 정확히 평가할 수 있을 것

로 판단된다.

현재 한반도 남부 전역에 대한 Q 토모그래피 및 경상분지에 대한 상세 Q 토모그래피 연구가 수행 중에 있으며 향후 계속 축적되는 지진관측자료를 이용하면 지역 및 진앙거리별로 보정된 Q 구조를 규명할 수 있을 것으로 기대되며, 이러한 결과는 원전부지 고유의 추계학적 강지진동 모사 및 부지고유 응답스펙트럼 개발에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 2002년도 원자력연구개발 중장기계획사업 "원전 내진설계를 위한 기반 구축 연구"과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] Boore, D.M (1983), "Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra", BSSA, 73, 1865-1894.
- [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] 연관희, 박동희, 장천중 (2002), "강지진동 모사를 위한 한반도 남부의 지각감쇠 특성에 대한 연구", 한국지진공학회 추계학술대회 Vol. 6. No. 1, 20-27.
- [4] 전명순, 지현철, 전정수, 신인철 (1995), 지진연구, 한국자원연구소, KR-94(C) 1-16.
- [5] 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
- [6] 박창엽, 이지민 (1999), 서울대학교 석사학위 논문.
- [7] 이원상, 이기화 (1999), Coda파를 이용한 경상분지에서의 Q값 추정, 한국지진공학회 논문집, 3권 1호, 67-74
- [8] 김성균, 김복희 (1999), 한반도 남동부에서의 Coda파 감쇠, 자원환경지질, 32권, 379-384.
- [9] 김성균, 박윤경, 전명순 (2002), 한반도 남동부의 Q구조, 지질학회지, 36권 4호 529-544.
- [10] Tae-Woong Chung and Haruo Sato (2001), "Attenuation of High-Frequency P and S Waves in the Crust of Southeastern South Korea", Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 6, pp. 1867-1874.
- [11] Haruo Sato, Michael C. Fehler (1998), "Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth", Springer/AIP Press.
- [12] IK Bum Kang and George A. McMechan (1994), "Separation of intrinsic and scattering Q based on frequency-dependent amplitude ratios of transmitted waves", Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. B12, p 23,875-23,885, December 10.
- [13] X.R. Shih, K.-Y. Chun, and T.Zhu (1994), "Attenuation of 1-6s Lg Waves in Eurasia", Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. B12, pp. 23, 859-23,874, December 10.
- [14] David M. Boore (2003), "Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method", Pure Appl. Geophys. 160, 635-676.
- [15] 최광선, 공영세, 이화경 (1993), "중력자료 해석에 의한 한반도 일원의 지각구조", Jour. Korean Earth Science Society, Vol. 14, No. 2, p. 225-230.