

한반도 남동부지역의 해석적방법에 의한 다중산란모델 연구

정태웅*

세종대학교 에너지자원공학과

A Study of Multiple Scattering Model by Analytic Method for Southeastern Korea

Tae Woong Chung*

Department of Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University

요 약: 균일한 모델에 대하여 해석적인 방법을 적용하여 한반도 남동부의 감쇠상수 고유치를 분리하였다. 해석적인 방법에 의한 이론치와 759 지진자료에 의한 관측치를 다중지연시간창법으로 비교하여 분리를 행하였다. 이전의 연구에서 한반도의 전체 Q_i^{-1} 과 Q_s^{-1} 값은 매우 낮은 값이 도출되어 지진 안정지대의 값을 반영하는 것으로 풀이된 반면, 한반도 남동부는 비교적 높은 Q^{-1} 값이어서 이는 한반도 타지역에 비해 높은 지진활동도와 연관된 것으로 보인다.

주요어: 한반도 남동부, 균일한 모델, Q_i^{-1} , Q_s^{-1} , 해석적 방법, 지진 활동도

Abstract: By applying analytic method to the uniform model, the intrinsic and scattering quality factor (Q_i^{-1} and Q_s^{-1}) was separated for the southeastern part of Korean Peninsula. The Multiple Lapse Time Window Analysis method was used to fit theoretical values with observations obtained 759 earthquake data. While previous study for the Korean Peninsula showed very low Q_i^{-1} and Q_s^{-1} reflecting inactive seismicity, southeastern Korea exhibited relatively high Q_i^{-1} and Q_s^{-1} values interpreted as higher seismicity than the other region in the peninsula.

Keywords: southeastern Korea, uniform model, Q_i^{-1} , Q_s^{-1} , analytic method, seismicity

서 론

지진의 진파매질에 의한 지진동 감쇠 Q^{-1} 값은 내진설계에 있어서 필수적인 정보로 한반도에서는 세계의 지진 안정지역에 해당하는 낮은 값이 보고된 바 있다(예; Chung and Sato, 2001; Chung *et al.*, 2007). 감쇠상수 Q^{-1} 는 고유감쇠(Q_i^{-1})와 산란감쇠(Q_s^{-1})가 합하여진 값으로 Q_i^{-1} 가 얼마나 지진파의 탄성에너지가 열이나 다른 형태의 에너지로 전환되었는지를 나타내는 척도라면, Q_s^{-1} 는 지진파의 반사와 굴절, 위상의 변화를 볼 수 있는 척도이다. Q_i^{-1} 값과 Q_s^{-1} 값의 분리는 다중산란 모델의 특징에 착안한 Multiple Lapse Time Window method (MLTW법), 즉 다중지연시간창 해석법에 의해 다중산란모델의 이론값과 관측되어지는 코다파 포락선값을 비교하는 방법으로 행하여지는데, 다중산란모델의 이론값은 수치적인 방법(Hoshiya, 1991)과 해석적인 방법(Zeng *et al.*, 1991; Sato, 1993)으로 구하여지고 있다(e.g. Bianco, 2005).

남한지역 전역에 대해서 정태웅·윤숙영(2009)은 해석적인 방법으로, Chung *et al.* (2010)은 수치적인 방법으로 다중산란 모델 이론값을 구하여 MLTW법에 의해 분리된 감쇠상수를 구하였다. MLTW법은 다량의 자료를 최소자승적으로 구하는 관계로 앞서 행해진 남한지역 연구는 지역적 차이를 고려하지 못하였는데, 지역적 차이의 존재 여부를 검증하지 못하였다. 한반도 지역의 속도구조는 엄연히 지역적 차이가 존재하므로 (Chang and Baag, 2005; Yoo *et al.*, 2007), 지역적인 연구는 전체 한반도와 다른 결과가 도출될 가능성이 있다.

한반도 남동지역에 대해서는 Lee *et al.* (2009)이 수치적인 방법으로 구한 결과, 남한 전역과 비슷한 결과값을 보고하였다. 그런데, 한반도 연구에서 행하여진 수치적인 방법은 Yoshimoto (2000)에 의해 개발된 Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) 법으로 깊이에 따른 속도변화를 고려한 지각모델을 사용한 것이다. 지금까지 세계 각처 및 한반도에서 행하여진 해석적인 방법은 균일한 속도모델에 대한 것인데, 균일모델과 속도변화 모델을 바로 비교하는 것은 매우 주의를 요하며 특히 Q_s^{-1} 값을 비교하는 것은 불가하다(Hoshiya, 개인교신). 더욱이 본 연구는 Lee *et al.* (2009)의 60 km 진앙거리를 80 km로 늘리고 자료수집기간과 영역을 더 늘려서 10배 가량의 자료를 확보하였다.

2011년 6월 15일 접수; 2011년 7월 21일 수정; 2011년 8월 5일 채택
*Corresponding author

E-mail: chungtw@sejong.ac.kr

Address: Department of Energy & Mineral Resources Engineering,
Sejong University, Seoul 143-747, Korea

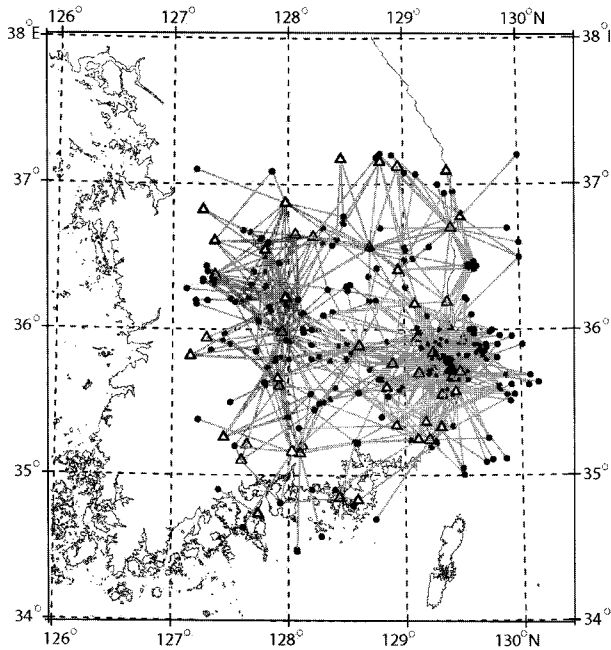


Fig. 1. Map of South Korea showing paths connecting 412 earthquakes (solid circles) and 49 stations (triangles) used in this study.

본 연구에서는 한반도 남동부 지역의 지진자료에 균일한 모델에 대한 해석적인 방법으로 다중산란모델을 구하여 MLTW 법에 의한 감쇠상수 분리를 행하고자 한다.

Multiple Lapse Time Window (MLTW) 법과 자료

Q_i^{-1} 값과 Q_s^{-1} 값의 분리는 Q_i^{-1} 값이 직접파 중에서 S파와 코다파의 진폭을 감쇠시키고, Q_s^{-1} 는 S파 직접파는 감쇠시키는 반면 코다파는 증폭시키게 된다는 다중산란 모델의 특징에 착안하여 행하는데, 가장 많이 쓰이고 있는 방법이 MLTW법이다. MLTW법은 다중산란모델의 이론값과 관측되어지는 코다파 포락선값을 비교하는 방법으로 Hoshiya *et al.* (1991)과 Fehler *et al.* (1992)에 의해 개발되었다.

본 연구에 쓰인 관측 포락선값은 기상청(KMA)과 한국지질자원연구원(KIGAM)의 관측소에서 1999년에서 2009년의 11년 동안 기록된 규모 1.4에서 4.8에 이르는 412개 지진의 상하동 성분 자료를 이용하였는데, 진앙거리는 80 km, 49개소의 관측점으로 한반도 남동부지방의 759개 지진자료이다(Fig. 1). 이들 지진자료의 진원 깊이는 KMA에 의해 10 km가 가정되어 있다.

그 첫 단계는 S파 지진파 자료를 그 도달시간부터 15초 길이의 3개의 시간창 부분으로 나누는 것이다(Fig. 2). 첫 시간창은 S파 직접파의 주에너지 전달부분으로 대부분 지진이 이 시간 범위에 직접파 에너지가 포함되고, 두 번째 및 세 번째 시간창은 직접파 에너지가 포함되지 않는 산란 에너지만을 포함하는 영역이다. 세 개의 시간창의 지진파 에너지는 각각 1~2,

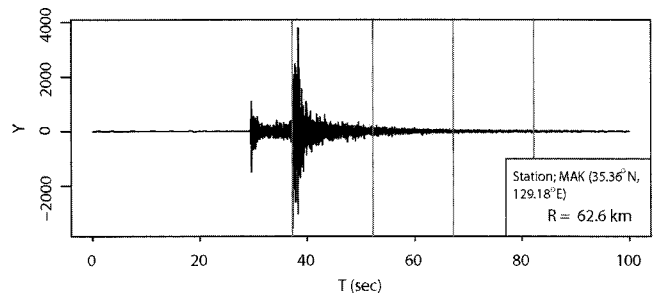


Fig. 2. Typical seismograms of southeastern Korea. For the MLTW analysis, the seismogram is divided into three consecutive time windows with 15 s lengths following the S-wave onset. R denotes hypocentral distance.

2~4, 4~8, 8~16, 16~32 Hz의 대역필터를 통과시킨 후 각각 제곱한 후 더하여 산정된다. 또, 각각 다른 진원과 관측점 자료를 보정하기 위하여 코다규격화법(Aki, 1980)을 적용해야 하는데(e.g. Hoshiya, 1993), 코다규격화를 위한 코다스펙트럼은 S파 주시시간의 약 2배 정도의 시간부근의 5초간의 시간창에 대한 코다파를 제공하여 얻는다(e.g. Chung and Sato, 2001).

마지막으로 각 자료의 지진파 전파에 따른 기하학적 보정은 진원거리 r 의 함수 $4\pi r^2$ 을 곱하여서 보정한다. 이와같이 보정된 관측값은 4 km 간격으로 평균되어 세 시간창을 대표하는 세 곡선으로 나타내진다(Fig. 3). 즉, 맨 위 쪽의 곡선이 첫 번째 시간창 값이고 두 번째가 그 다음 시간창, 맨 아래 곡선이 세 번째 시간창으로 시간이 지날수록 에너지가 줄어드는 상황을 재현하고 있다. 이 관측치에 대하여 해석적 방법의 이론곡선을 최소자승법으로 맞추어 이 때의 고유감쇠 $\eta_i (= \frac{2\pi f Q_i^{-1}}{v})$ 값과 산란감쇠 $\eta_s (= \frac{2\pi f Q_s^{-1}}{v})$ 값을 구한다.

해석적 다중산란모델

Zeng (1991)은 등방성의 다중산란체가 균일하게 분포한 매질의 이론적 산란모델식을 제시하였다. 이 식을 이용하여 Sato and Fehler (1998)는 원점에 위치한 지진 방사체 에너지 $W\delta(t)$ 에 의해 다음과 같은 에너지 밀도함수 E 의 식을 제시하였다.

$$E(\vec{r}, t) = WG(\vec{r}, t) + v\eta_s \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\vec{r}-\vec{r}', t-t')E(\vec{r}', t')dt' dr' \quad (1)$$

여기서 그린함수 G 는

$$G(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi v r^2} H(t)\delta(t-|r|/v)\exp[-(v\eta_s + \eta_i)t] \quad (2)$$

와 같다.

(1), (2)식에서 쓰인 정의는 다음과 같다.

H 는 헤비사이드 계단함수이고,

\vec{r} 과 t 는 관측점의 위치 (x, y, z)와 시간이며

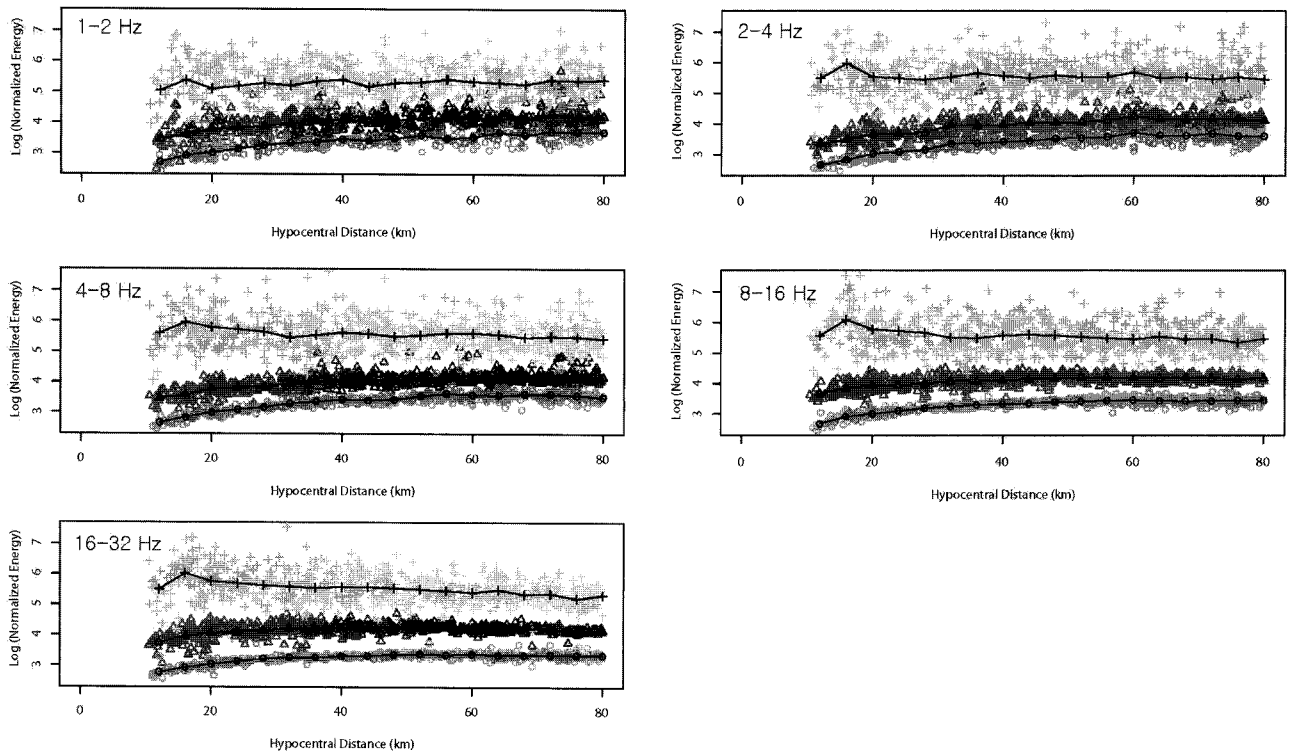


Fig. 3. Normalized energy corrected for geometrical spreading versus hypocentral distance for five frequency bands. The crosses, triangles, and circles represent measurements for the first (0~5 s), second (15~30 s) and third time windows (30~45 s). Averaged (4 km width) values for each of the scatter plots are shown the same corresponding symbols in black.

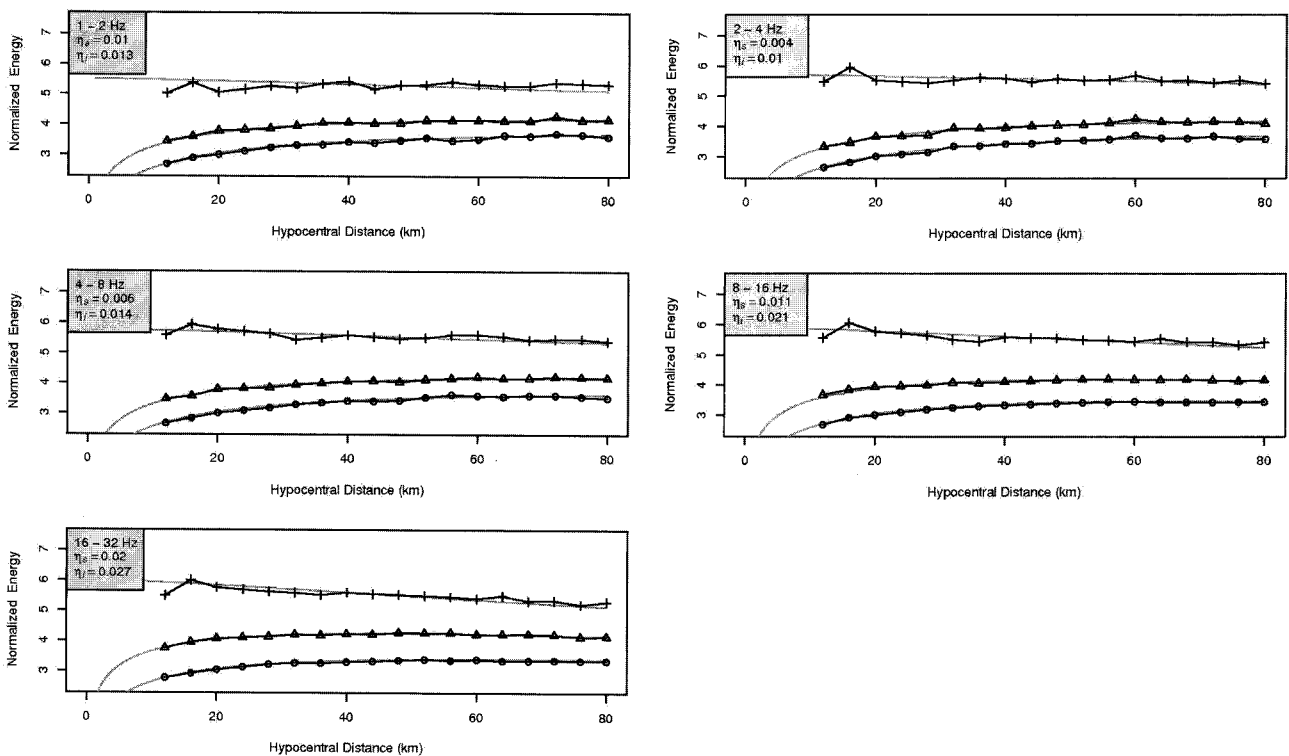


Fig. 4. The averaged observations (black lines) in Fig. 3 are fitted by theoretical values (grey lines) computed by the analytical method using the uniform velocity model with 3.5 km/s. Best-fit model parameters are provided at the upper left-hand corner of each plot.

\vec{r} 과 t 는 산란체의 위치 (x, y, z)와 시간이다.

v , η_s , η_i 는 각각 S 파 속도, 산란감쇠계수, 고유감쇠계수이다. 여기서 다음과 같은 규격인자를 도입하는데, $\bar{\quad}$ 는 무차원임을 나타낸다.

$$\bar{t} = v\eta_s t, \bar{\vec{r}} = \eta_s \vec{r}, \eta_i = \frac{\eta_i}{v\eta_s}, \bar{G} = \frac{G}{\eta_s^3}, \bar{E} = \frac{E}{\eta_s^3} \quad (3)$$

그러면 식 (1)과 (2)는 다음과 같이 변형된다.

Table 1. The misfit values of the analytically calculated model.

f (Hz)	$(M_{sum} = 5.22)$		
	η_i	η_s	M_f
1 ~ 2	0.013	0.010	2.10
2 ~ 4	0.010	0.004	0.89
4 ~ 8	0.014	0.006	0.72
8 ~ 16	0.021	0.011	0.76
16 ~ 32	0.027	0.020	0.75

Table 2. Range of model parameters and attenuation values for analytically calculated model.

Freq. Band (Hz)	η_i (km ⁻¹)	η_s (km ⁻¹)	L_e^{-1} (km ⁻¹)	B_0	Q_i^{-1} ($\times 10^3$)	Q_s^{-1} ($\times 10^3$)	Q_t^{-1} ($\times 10^3$)
1 ~ 2	0.013 + 0.003	0.010 + 0.003	0.023 + 0.006	0.43 + 0.05	4.97 + 1.15	3.71 + 1.11	8.54 + 2.23
	- 0.004	- 0.003	0.007	- 0.06	- 1.53	- 1.11	- 2.60
2 ~ 4	0.010 + 0.002	0.004 + 0.001	0.014 + 0.003	0.29 + 0.02	1.91 + 0.38	0.74 + 0.19	2.60 + 0.56
	- 0.002	- -	-	-	- 0.38	- -	- -
4 ~ 8	0.014 + 0.002	0.006 + 0.001	0.020 + 0.003	0.30 + 0.01	1.34 + 0.19	0.56 + 0.09	1.86 + 0.28
	- 0.002	- 0.001	- -	- -	- 0.19	- 0.09	- 0.28
8 ~ 16	0.021 + 0.002	0.011 + 0.002	0.032 + 0.004	0.34 + 0.01	1.00 + 0.10	0.51 + 0.09	1.49 + 0.19
	- 0.002	- 0.002	0.004	0.01	- 0.10	- 0.09	- 0.19
16 ~ 32	0.027 + 0.002	0.020 + 0.003	0.047 + 0.005	0.43 + 0.01	0.64 + 0.05	0.46 + 0.07	1.09 + 0.12
	- 0.002	- 0.004	- 0.006	- 0.02	- 0.05	- 0.09	- 0.14

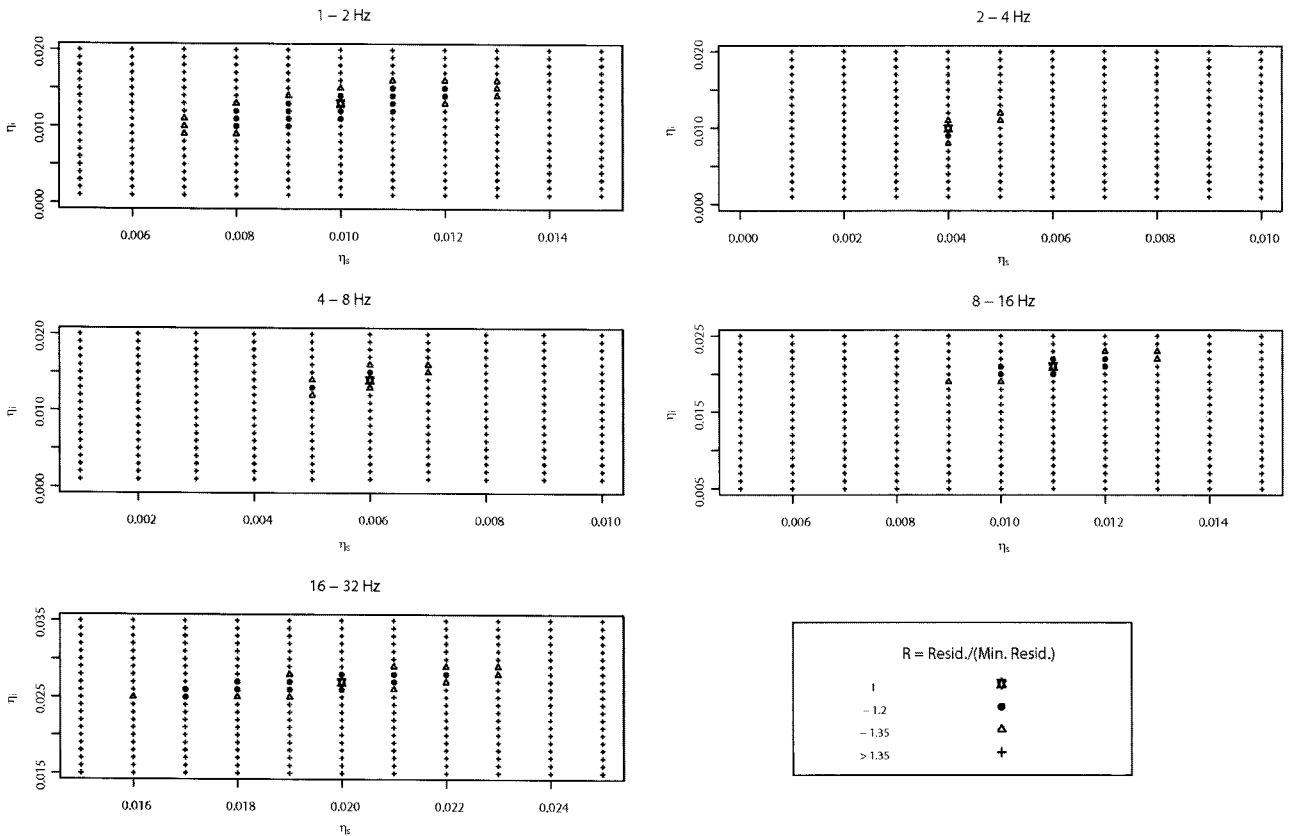


Fig. 5. Residual map normalized to the minimum (star) for the preferred model C1m2. Normalized values < 1.5, expressed by star, solid circle and triangle, were determined by the F distribution with approximately 120 degrees of freedom at the 95% level of confidence.

$$\bar{E}(\vec{r}, \bar{t}) = \bar{G}(\vec{r}, \bar{t}) + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\vec{r} - \vec{r}', \bar{t} - \bar{t}') E(\vec{r}', \bar{t}') d\bar{t}' d\vec{r}' \quad (4)$$

와

$$\bar{E}(\vec{r}, \bar{t}) = \bar{G}(\vec{r}, \bar{t}) + \frac{1}{4\pi|\vec{r}|^2} K\left(\frac{\bar{t}}{|\vec{r}|}\right) H(\bar{t} - |\vec{r}|) e^{-(1+\bar{\eta})\bar{t}} + \quad (7)$$

$$G(\vec{r}, \bar{t}) = \frac{1}{4\pi|\vec{r}|^2} H(\bar{t}) \delta(\bar{t} - |\vec{r}|) \exp[-(1+\bar{\eta})\bar{t}] \quad (5)$$

이다. (5)식은 공간적 후리에변환으로 시간적 라플라스변환에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\hat{G}(k, s) = \int_{-\infty}^{\infty} d\vec{r} e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}} \int_0^{\infty} d\bar{t} e^{-s\bar{t}} \bar{G}(\vec{r}, \bar{t}) = \frac{1}{k} \tan^{-1} \frac{k}{s+1+\bar{\eta}_i} \quad (6)$$

동일한 변환을 식 (4)에 적용하면

$$\bar{E}(\vec{r}, \bar{t}) = \bar{G}(\vec{r}, \bar{t}) + \frac{1}{4\pi|\vec{r}|^2} K\left(\frac{\bar{t}}{|\vec{r}|}\right) H(\bar{t} - |\vec{r}|) e^{-(1+\bar{\eta})\bar{t}} + \quad (7)$$

$$\frac{1}{|\vec{r}|} \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega d\vec{k} e^{-i\omega\bar{t} - i\vec{k}\cdot\vec{r}} \left[\frac{ik}{2\pi} \frac{\hat{G}(-k, -i\omega)^3}{1 - \hat{G}(-k, -i\omega)} \right]$$

여기서

$$K(\nu) = \frac{1}{\nu} \ln \frac{\nu+1}{\nu-1} \quad \nu > 1 \text{ 이다.}$$

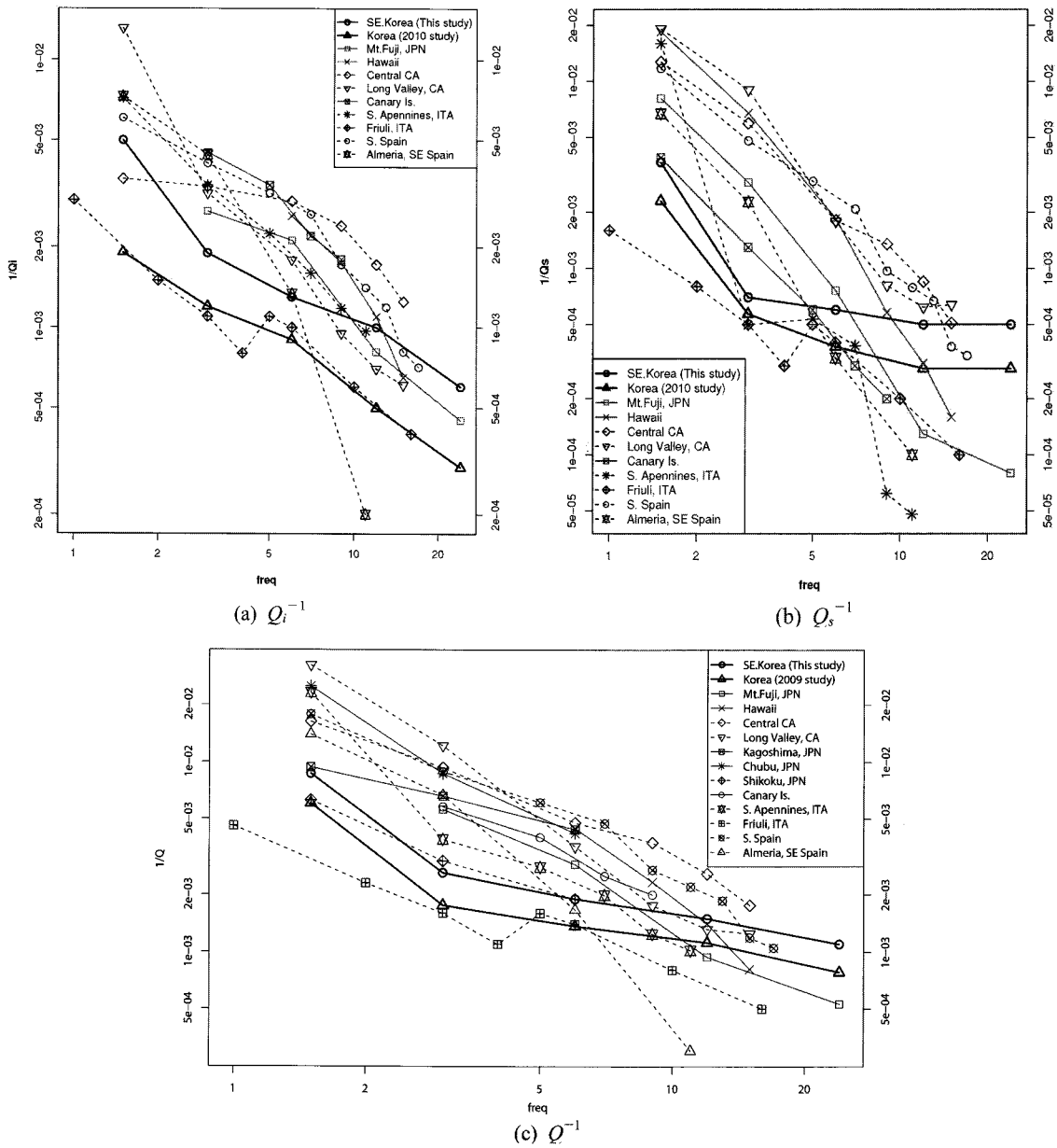


Fig. 6. Comparison of Q^{-1} for our results and worldwide regions. Grey lines represent the values of volcanic regions - Mt. Fuji (Chung *et al.*, 2009), Hawaii, Central California, Long Valley (Mayeda *et al.*, 1992), Canary Island (Canas *et al.*, 1998). Dashed lines are following regions - South Apennines (Bianco *et al.*, 2002), Furiuri, Italia (Bianco *et al.*, 2005), Southern Spain (Akinci *et al.*, 1995), Almeria, Southeastern Spain (Pujades *et al.*, 1997). (a) Q_i^{-1} , (b) Q_s^{-1} , and (c) Q^{-1} .

식 (7)은 수치적으로 계산되는데, 첫 제항부터 둘째, 셋째 항은 각각 직접파, 단일 산란, 다중산란항에 해당된다.

해 석

본 연구에서는 전형적인 지각 S파 속도 3.5 km/s에 대하여 다중산란모델 계산은 고유감쇠값 $\eta_i(=(2\pi f/v)Q_i^{-1})$ 과 산란감쇠값 $\eta_s(=(2\pi f/v)Q_s^{-1})$ 을 각각 0.001부터 0.040 까지 400개의 값, 즉 1600개의 (η_i, η_s) 조합에 대하여 이론 계산치를 구하였다. 각 주파수(f)마다 관측된 3개의 곡선(Fig. 3)에 대한 MLTW해석의 최소자승 잔차를 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$M_f(\eta_i, \eta_s) = \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^3 (EO_j(r_k) - EM_j(r_k))^2 \quad (8)$$

여기서 k, j 는 관측값 수 및 세 곡선 수이며, $EO_j(r_k)$ 와 $EM_j(r_k)$ 는 각각 진앙거리 r_k 에서의 관측 에너지값(곡선값)과 계산된 이론 에너지값(곡선값)이다. 5 구간의 주파수 M_f 합계를

$$M_S(\eta_i, \eta_s) = \sum_{f=1}^5 M_f(\eta_i, \eta_s) \quad (9)$$

로 나타낸다. 각 주파수별 최소자승 잔차값 (8)식의 합 M_S 값이 최소가 되는 MLTW 해석을 각 주파수(1~2, 2~4, 4~8, 8~16, 16~32 Hz)에 대하여 실시하여(Table 1), 그 결과가 Fig. 3 및 Table 2인데, Table 2의 오차범위는 Fig. 5를 통하여 구하였다. 오차는 자유도 ~ 120의 95% 신뢰수준의 F분포에서 η_i, η_s 가 1.35가 되는 범위를 도시하였다(Mayeda et al., 1992). 두 방법 다 η_s 는 오차의 범위까지 동일하나, η_i 의 경우 해석적인 방법의 값이 크고, 오차의 범위도 크다(Table 2).

고유감쇠항 η_i 과 산란감쇠항 η_s 는 일반적으로 전체 감쇠항에 대한 산란감쇠량의 무차원적인 비 $B_0 = \eta_i / (\eta_i + \eta_s)$ 와 초기 S파 에너지가 1/e 만큼 감쇠하는데 걸리는 거리의 역수 $L_e^{-1} = (\eta_i + \eta_s)$ 로 나타내진다. B_0 는 0과 1 사이의 값으로 Wu (1985)에 의해 지진학적 알베도(albedo)로 소개되었는데, 산란도가 강하고 고유감쇠가 작을수록 값이 높고 균질할수록 값이 낮다.

세계 여타 지역 7~80 km 진앙거리의 Q^{-1} 값 연구 비교(Fig. 6a-c)에서 2010년의 한반도 연구값(Chung et al., 2010)이 매우 낮았던 것을 감안할 때, 이번 한반도 남동부 값은 매우 높은 Q^{-1} 값임을 알 수 있다. 2010년 연구가 진앙거리 120 km로 깊은 지각의 낮은 Q^{-1} 값 영향도 일부 있겠으나, 높은 값이 도출된 바 있는 후지산 Q^{-1} 값(Chung et al., 2009)도 동일한 진앙거리 임을 감안하면 대체로 낮은 지진활동도를 반영하는 것으로 설명되었다(Chung et al., 2010). 이는 세계의 지진활동도와 Q^{-1} 값의 상관성(Fig. 6a-c)이 한반도에서도 적용됨을 의미하며, 따라서, 한반도 남동부의 높은 Q^{-1} 값은 한반도 타지역에 비해 높은 지진활동도와 연관된 것으로 보인다. 실제로 한반도 최대

의 피해 역사지진은 경주지역에서 발생한 바 있으며(예; 이기화, 1998), 1995~2004년의 계기지진 관측에서도 남동부지방에 비교적 활발한 지진활동이 관측되고(예; 정태웅 외, 2004) 있는 사실과도 부합된다.

결 론

MLTW법에서 이론곡선은 해석적인 방법으로 구하여 관측값과 최소제곱오차를 이루는 고유 및 산란감쇠를 구하였다. 2010년 연구(Chung et al., 2010)에서 한반도의 전체 Q_i^{-1} 과 Q_s^{-1} 값은 매우 낮은 값이 도출되어 지진 안정지대의 값을 반영하는 것으로 풀이된 반면, 한반도 남동부는 비교적 높은 Q^{-1} 값이어서 한반도 타지역에 비해 높은 지진활동도를 반영하는 것으로 해석된다.

사 사

본 연구 수행 및 원고작성에 2009년도 기상지진기술개발사업(CATER 2006-5104)의 지원이 있었음을 밝힙니다.

참고문헌

이기화, 1998, 한반도의 역사지진자료, 지구물리, 1, 3-22.
 정태웅, 윤숙영, 2009, 다중지연시간차법(MLTW)의 한반도 지진자료 적용성 분석, 지구물리와 물리탐사, 12, 199-207.
 정태웅, 이원상, 유승훈, 유현재, 조광현, 이상현, 윤숙영, 정순원, 이준희, 김선주, 2004, 한반도 지각의 감쇠구조 (Q-Structure) 연구, 한국원자력안전기술원 보고서, KINS/HR-641, pp. 198.
 Aki, K., 1980, Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Physics of the Earth Planetary Interior*, 21, 50-60.
 Akinci, A., Del Pezzo, E., and Ibanez, J., 1995, Separation of scattering and intrinsic attenuation in southern Spain and Western Anatolia (Turkey). *Geophysical Journal International*, 121, 337-353.
 Bianco, F., Del Pezzo, E., Castellano, M., Ibanez, J., and Di Luccio, F., 2002, Separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in the Southern Apennine zone, Italy. *Geophysical Journal International*, 150, 10-22.
 Bianco, F., Del Pezzo, E., Malagnini, L., Di Luccio, F., and Akinci, A., 2005, Separation of depth-dependent intrinsic and scattering seismic attenuation in the northeastern sector of the Italian Peninsula, *Geophysical Journal International*, 161, 130-142.
 Canas, J. A., Ugalde, A., Pujades, L. G., Carracedo, J. C., Soler, V., and Blanco, M. J., 1998, Intrinsic and scattering seismic wave attenuation in the Canary Islands. *Journal of Geophysical Research*, 103, 15037-15050.
 Chang, S. -J., Baag, C. -E., 2005, Crustal structure in Southern Korea from joint analysis of teleseismic receiver functions and surface-wave dispersion, *Bulletin of the Seismological*

- Society of America*, **95**, 1516-1534.
- Chung, T. W., Noh, M. H., Kim, J. K., Park, Y. K., Yoo, H. J., and Lees, J. M., 2007, A Study of the Regional Variation of Low-Frequency Q_{lg}^{-1} around the Korean Peninsula, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 512-520.
- Chung, T. W., Lees, J. M., Yoshimoto, K., Fujita, E., and Ukawa, M., 2009, Intrinsic and scattering attenuation of the Mt. Fuji region, Japan, *Geophysical Journal International*, **177**, 1366-1382.
- Chung, T. W., and Sato, H., 2001, Attenuation of high-frequency *P*- and *S*-waves in the crust of the southeastern Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 1867-1874.
- Chung, T. W., Yoshimoto, K., and Yun S., 2010. The separation of intrinsic and scattering seismic attenuation in South Korea, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 3183-3193.
- Fehler, M. C., Hoshiaba, M., Sato, H., and Obara, K., 1992, Separation of scattering and intrinsic attenuation for the Kanto-Tokai region, Japan, using measurements of *S*-wave energy versus hypocentral distance, *Geophysical Journal International*, **108**, 787-800.
- Hoshiaba, M., 1991. Simulation of multiple-scattered coda wave excitation based on the energy conservation law, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **67**, 123-136.
- Hoshiaba, M., 1993, Separation of scattering attenuation and intrinsic absorption in Japan using the multiple lapse time window analysis of full seismogram envelope, *Journal of Geophysical Research*, **98**, 15809-15824.
- Hoshiaba, M., Sato, H., and Fehler, M., 1991. Numerical basis of the separation of scattering and intrinsic absorption from full seismogram envelope: a Monte-Carlo simulation of multiple isotropic scattering, *Papers in Meteorology and Geophysics*, **42**, 65-91.
- Lee, W. S., Yun, S., and Do, J. -Y., 2010, Scattering and intrinsic attenuation of short period *S*-waves in the Gyeongsang Basin, South Korea, revealed from *S*-wave seismogram envelopes based on the radiative transfer theory, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 833-840.
- Mayeda, K., Koyanagi, S., Hoshiaba, M., Aki, K., and Zeng, Y., 1992, A comparative study of scattering, intrinsic, and coda - 1 *Q* for Hawaii, Long Valley, and central California between 1.5 and 15.0 Hz, *Journal of Geophysical Research*, **97**, 6643-6659.
- Pujades, L. G., Ugalde, A., Canas, J. A., Navarro, J. M., Badal, F. J., and Corchete, V., 1997. Intrinsic and scattering attenuation from observed seismic codas in the Almeria Basin (southeastern Iberian peninsula). *Geophysical Journal International*, **129**, 281-291.
- Sato, H., 1993. Energy transportation in one- and two-dimensional scattering media; analytic solutions of the multiple isotropic scattering model, *Geophysical Journal International*, **112**, 141-146.
- Sato, H., and Fehler, M. C., 1998, *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*, Springer-Verlag New York, Inc. 308 pp.
- Wu, J., Jiao, W., Ming, Y., and Su, W., 2006. Attenuation of coda waves at the Changbaishan Tianchi volcanic area in Northeast China, *Pure and Applied Geophysics*, **163**, 1351-1368.
- Yoo, H. J., Herrmann, R. B., Cho, K. H., and Lee, K., 2007. Imaging the three-dimensional crust of the Korean Peninsula by joint inversion of surface-wave dispersion and teleseismic receiver functions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 1002-1011.
- Yoshimoto, K., 2000, Monte Carlo simulation of seismogram envelopes in scattering media, *Journal of the Geophysical Research*, **105**, 6153-6161.
- Zeng, Y., Su, F., and Aki, K., 1991, Scattering wave energy propagation in a random isotropic scattering medium; 1, Theory, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 607-619.