

RTSM (두관측점법)에 의한 한반도 주변지역 Lg Q값 연구

정태웅¹⁾, 노명현²⁾, Matsumoto Satochi³⁾

¹⁾ 세종대학교 ²⁾ 한국원자력안전기술원 ³⁾ 일본 큐슈대학

1. 서론

지진에 대한 사전대비책의 일환으로 한반도에서 건설되는 제반 구조물에 대하여 한반도의 지질조건을 고려한 내진설계를 고려할 필요가 있다. 내진설계에 있어서 지반의 진동을 정량적으로 예측하기 위해서는 지진동 감쇄상수(Q-1 값) 지식이 필수적인데, 이에 따라 세계 광범위한 지역에서 Q-1 값에 대한 조사가 이루어지고 있다 (예; Sato and Fehler, 1998). 이들 연구는 지진이 빈발하는 조구조적으로 활동지역이 안정지역에 비해 비교적 높은 Q-1 값을 보이고 있는데, 이러한 높은 Q-1 값은 활성단층이 움직임에 따라 생긴 지각의 균열에 연유하는 것으로 해석되고 있다 (Aki, 1980a; Blakeslee et al., 1989; Lees and Linley, 1994).

한반도에서의 Q-1 값 연구는 양산 단층지역 지진관측망의 지진자료에 대하여 김 외 (1999; 2000)가 예비적인 결과를 보고한 이래, 본 연구팀 (정, 2001; 정과 사토, 2000; 정 등, 2001; Chung and Sato, 2001a; 2001b) 이 120여개 지진 자료를 바탕으로 P파와 S파의 주파수 의존적인 값을 도출하였는데, 이들 결과는 P파와 S파 공히 세계의 지진 안정지역에 해당하는 낮은 값이다. 한편 중부 충청지역에 대한 Q-1 값도 남동부 지역과 비슷하게 낮은 P, S파 값이 도출된 바 있다 (Kim et al., 2004).

특히, 한반도 Lg파의 Q-1 값은 Coda규격화법 (Aki, 1980b)을 적용한 해석 (Chung and Lee, 2003)에서 $0.0019 f^{-0.51}$ 이라는 P, S 파의 경우와 비슷하게 세계적으로 낮은 범위의 값을 얻었다 (그림 1). 이 연구의 자료 부족 문제를 보완하기 위하여, Shih et al. (1994)이 고안한 source pair/receiver pair (SPRP) 법을 국외지진 등 1400여 자료의 시간영역에 적용 (Chung et al., 2005)한 결과, 1.5, 3, 6 Hz 에서 각각 0.0014, 0.0011, 0.0014 이라는 상수값을 얻었다 (그림 1). 이와같이 일부 주파수에서 정밀한 결과가 나왔으나, 최근의 연구동향은 좀 더 넓은 주파수 영역에 대한 Q-1 값이 요구되고 있다 (예; Fan and Lay, 2003). 본 연구에서는 Chun et al. (1987)이 고안하여 널리 쓰이고 있는 주파수 영역해석법인 두관측점법 (Reversed Two Station Method; RTSM)을 일본과 한국 지진관측망에 기록된 남한 지역의 지진자료에 적용하였다.

2. 연구방법

Chun et al. (1987)이 고안한 RTSM은 지진원과 관측점이 한직선상에 놓여있을 때 (그림 1), 감쇄상수 γ 및 Q-1를 다음 식에 의해 도출하게 된다.

$$\frac{F(d_{1,2})}{F(d_{1,1})} \frac{F(d_{2,1})}{F(d_{2,2})} = \left(\frac{d_{1,2}}{d_{1,1}} \frac{d_{2,1}}{d_{2,2}} \right)^{-0.5} e^{-2\gamma d} \quad (1)$$

여기서 F 는 Lg 파의 스펙트럼 진폭이며, d i, j 는 진원 i 에서 관측점 j 까지의 거리를

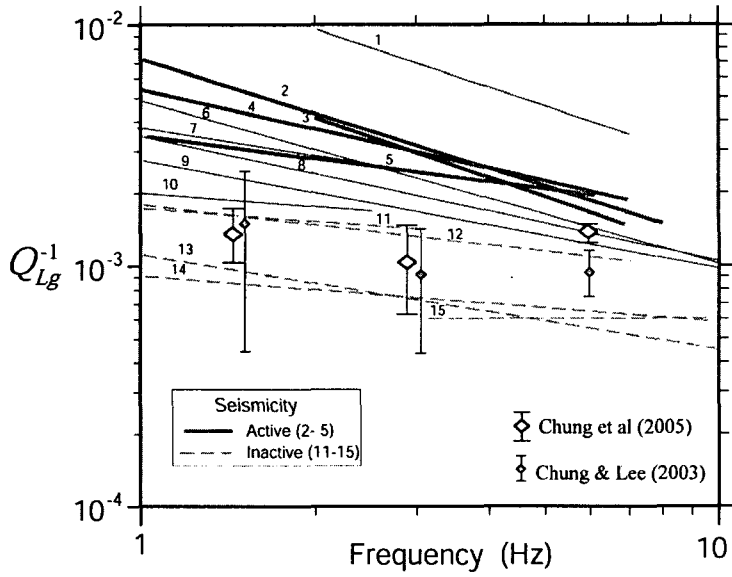


그림 1. 본 연구팀에 의한 Lg 파의 Q^{-1} 값과 타 연구결과 비교. 굵은 실선(2-5)은 지진활성 지역; 파선(11-15)은 비활성 지역값으로 분류: 1,스페인 그라나다분지; 2. 시에라 네바다; 3, 멕시코 섭입대; 4; 5, 캘리포니아 남부; 6, 미국 대평원; 7. 로키 산맥; 8. 프랑스 중부; 9. 티벳 고원; 10. 카자흐스탄 동부; 11, 노르웨이; 12. 애플레치아 산맥; 13. 캐나다 동부; 14. 미국 동북부 산맥; 15. 뉴욕주

나타내는 한편, Δ 와 γ 는 다음과 같다.

$$\Delta = d_{1,2} - d_{1,1} + d_{2,1} - d_{2,2} \tag{2}$$

$$\gamma = \frac{\pi f}{QU} \tag{3}$$

여기서 f 는 주파수, U 는 군속도를 의미한다.

표 1. 지진자료

Event	Date			Origin Time			Latitude (°N)	Longitude (°E)	Magnitude (mbar)	Frequency
	Year	Month	Day	Hr	Min	Sec				
1	1999	Apr	24	1	35	14	36.0	129.3	3.2	1
2	2000	Dec	9	18	51	0	36.5	130.0	3.5	3
3	2001	Jul	23	17	29	14	36.4	128.0	3.5	13
4	2001	Aug	24	11	12	3	35.9	128.2	3.5	26
5	2002	Mar	25	5	31	5	37.4	129.2	2.4	2
6	2002	Jul	9	4	1	51	35.9	129.6	3.8	79
7	2002	Jul	23	21	48	8	35.7	122.4	5.0	89
8	2002	Oct	23	10	30	54	34.9	128.4	2.8	23
9	2002	Dec	07	16	43	40	37.3	129.5	2.7	1
10	2003	Jan	10	07	56	5	35.8	129.2	2.7	2
11	2003	Mar	19	23	5	19	36.5	129.6	2.3	1
12	2003	Mar	30	20	10	57	37.8	123.7	5.0	89
13	2003	Aug	12	1	25	56	34.7	130.3	2.6	49

본 연구에서는 국내 16관측점, 일본 73 관측점을 이용하였다. 관측점은 모두 고유주기

1 Hz의 3성분 속도형 지진계이며, 일본측 지진기록은 한국측 자료와 같은 초당 100 표본간격이며, 이들 지진기록의 수직성분을 본 연구에 이용하였다.

지진원 자료는 규모 2.4 - 5 의 13 지진인데 (표 1), 남동부지방에서 일어난 지진은 지리적으로 일본 관측점에 가까워 3 미만의 작은 규모라도 본 연구에 쓸 수 있을 만큼 좋은 잡음대비 신호기록이 얻어졌다.

신호처리 과정으로 한일 관측점 공히 다음과 같이 행해졌다. 우선, 각 기록은 모서리 주파수 1 Hz인 회귀적 (recursive) zero-phase, high pass, 4차 Butterworth filter를 적용하였다. 이렇게 함으로써 군속도 3.0에서 3.5 km/sec 사이에서 더욱 명료한 Lg 파군을 관찰할 수 있다.

3. QLg-1 측정

앞서 행해진 RTSM이 양 끝에 두 지진 source, 가운데에 두 관측점이 놓이는 배치로 두 관측점간의 Lg 감쇄상수를 구하려는 시도였는데 (Chung and Lee, 2002b; 정, 2002), 본 연구에서는 관측점과 source의 위치를 바꾸어서 두 source 간의 감쇄상수를 구하고자 한다.

이와 같이 바꾸어도 RTSM은 마찬가지로 성립되는데 (Shih et al., 1994), 일본 등지의 관측점을 이용하여 비교적 긴 두 source 간 행로 A, B, C 및 D 를 얻을 수 있었다 (그림 2). 행로 A, B, C, 및 D의 길이는 각각 260, 148, 112, 154 km 에 이르며, 각 행로에 대한 RTSM 자료 조합 수는 83, 49, 14, 12 개로 자료수가 많은 A, B, C, D 순서로 신뢰도가 높은 값이 얻어질 것으로 기대된다.

각 자료를 주파수 간격 0.234 Hz 로 단순이동 평균으로 평활화한 후, A, B, C, D 각 행로의 0.6에서 10 Hz 사이의 $r(f)$ (식 (3) 참조) 를 stacking 한 각 자료에 지수 회귀선 $r = \alpha f^\beta$ 을 적용시키면, 각각 A 행로는 $r = (0.0078 \pm 0.0001) f^{0.22 \pm 0.01}$, B 행로는 $r = (0.0226 \pm 0.0002) f^{0.35 \pm 0.01}$, C 행로는 $r = (0.0034 \pm 0.0001) f^{0.52 \pm 0.03}$, D 행로는 $r = (0.0033 \pm 0.0001) f^{0.84 \pm 0.01}$ 이라는 결과가 도출된다. 이 결과로부터 QLg-1 값을 구하면, 각각 A 행로는 $QLg-1 = (0.0087 \pm 0.0001) f^{-0.78 \pm 0.01}$, B 행로는 $QLg-1 = (0.0252 \pm 0.0002) f^{-0.65 \pm 0.01}$, C 행로는 $QLg-1 = (0.0038 \pm 0.0002) f^{-0.48 \pm 0.03}$, D 행로는 $QLg-1 = (0.0037 \pm 0.0001) f^{-0.16 \pm 0.01}$ 이 된다. A, B, C, D 행로의 QLg-1 값을 SPRP법의 결과와 비교하였다 (그림3).

4. 토의

일본 관측점을 이용하여 긴 SP와 충분한 자료를 확보하였음에도 불구하고 RTSM은 SPRP법이나 Coda규격화법 등 한반도의 조구조 상황과 잘 맞는 결과를 도출하였던 방법 등에 비해 매우 높은 감쇄값 (그림 3)이 도출되어 이것은 한반도의 조구조 상황을 반영한 것이라고는 볼 수 없는 결과가 되었다.

RTSM을 창안한 Chun (Personal Communication)에 의하면 한반도 지역과 같은 지역적 범위에서 신뢰할 수 있는 Lg파의 감쇄계수를 구하기 위해서는 관측점과 Event Source 모두 비슷한 감쇄계수 지역에 놓여야 하며, 본 연구와 같이 관측점 혹은 Event 가 극단적으로 감쇄계수가 틀리는 일본 지역에 놓여 있을 경우 RTSM이 옳은 값을 산출하지 못할 가능성이 있다고 하였다. RTSM에 의한 소기의 목적을 달성하기 위해서는 일본지역의 관측점 혹은 Event Source를 활용할 것이 아니라, 중국 대륙지역의 자료를

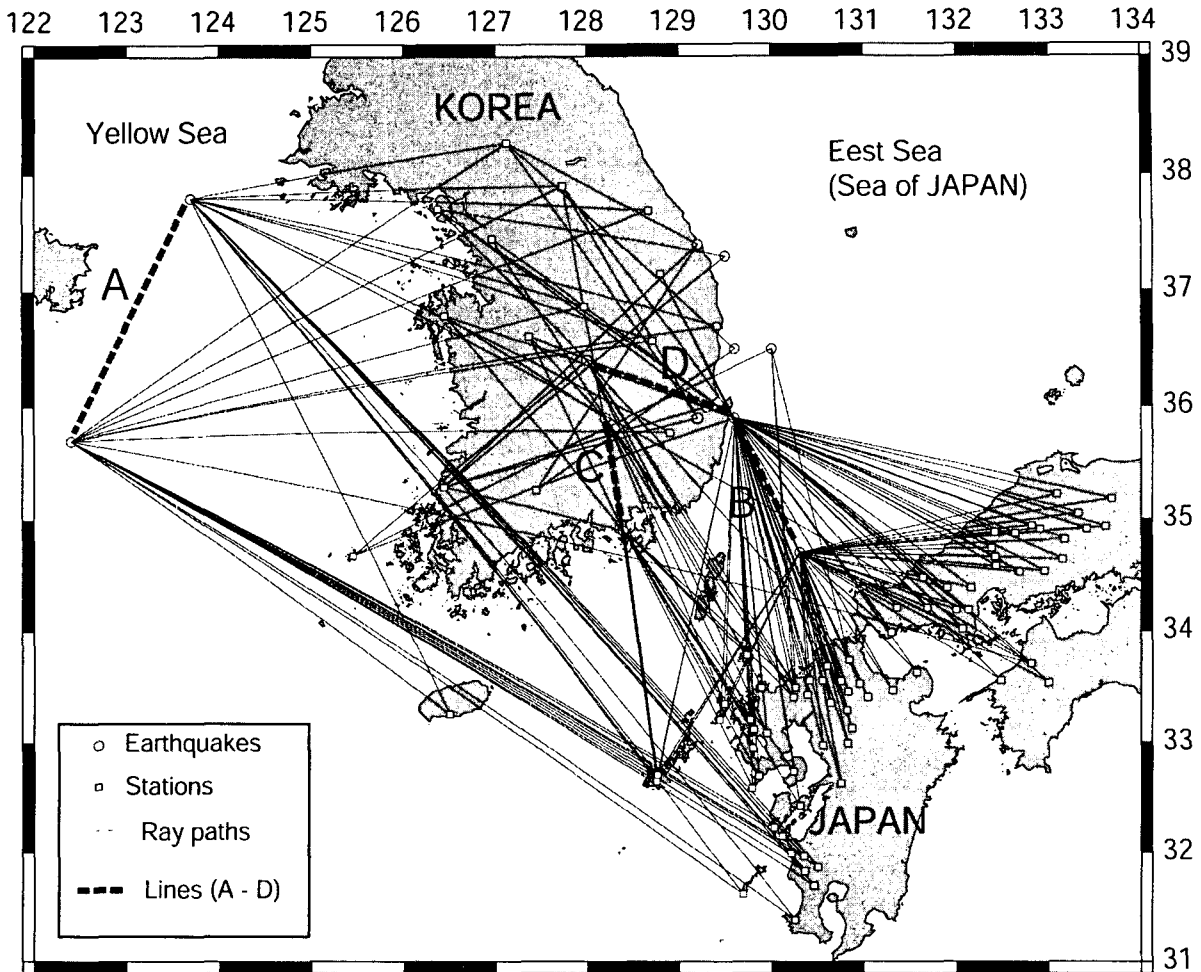


그림 2. RTSM 의 한국과 일본의 관측점 및 13지진 (표 1)의 조합 및 관측선 A, B, C, D.

활용해야 할 것이다.

5. 결론

폭 넓은 주파수 영역에서의 신뢰할만한 값을 얻기 위해 일본 구주지방을 중심으로 한 지진관측망에 포착된 남한 지역의 지진자료를 수집하여 RTSM을 시도한 바, SPRP법이나 Coda규격화법 등 한반도의 조구조 상황과 잘 맞는 결과를 도출하였던 방법 등에 비해 매우 높은 감쇠값 (그림 3)이 도출되어 이것은 한반도의 조구조 상황을 반영한 것이라고는 볼 수 없는 결과가 되었다.

한반도 지역과 같은 지역적 범위에서 신뢰할 수 있는 L_g 파의 감쇄계수를 구하기 위해서는 중국 대륙지역의 자료를 활용해야 할 것이다. 그러나, 중국 대부분 지역의 지진 관측기기는 한국의 것에 비해 열악하여 진폭자료를 이용한 연구가 거의 행해지지 못하고 있는 실정이다. 최근 중국 극동지역에 한국 자원연구원 (KIGAM)에서 최신장비를 동원한 관측망이 설치되어 자료가 축적되고 있는 바, 이 자료가 좀 더 넓은 주파수 범위의 신뢰할만한 L_g 파의 감쇄계수를 구하는데 기여할 것으로 기대된다.

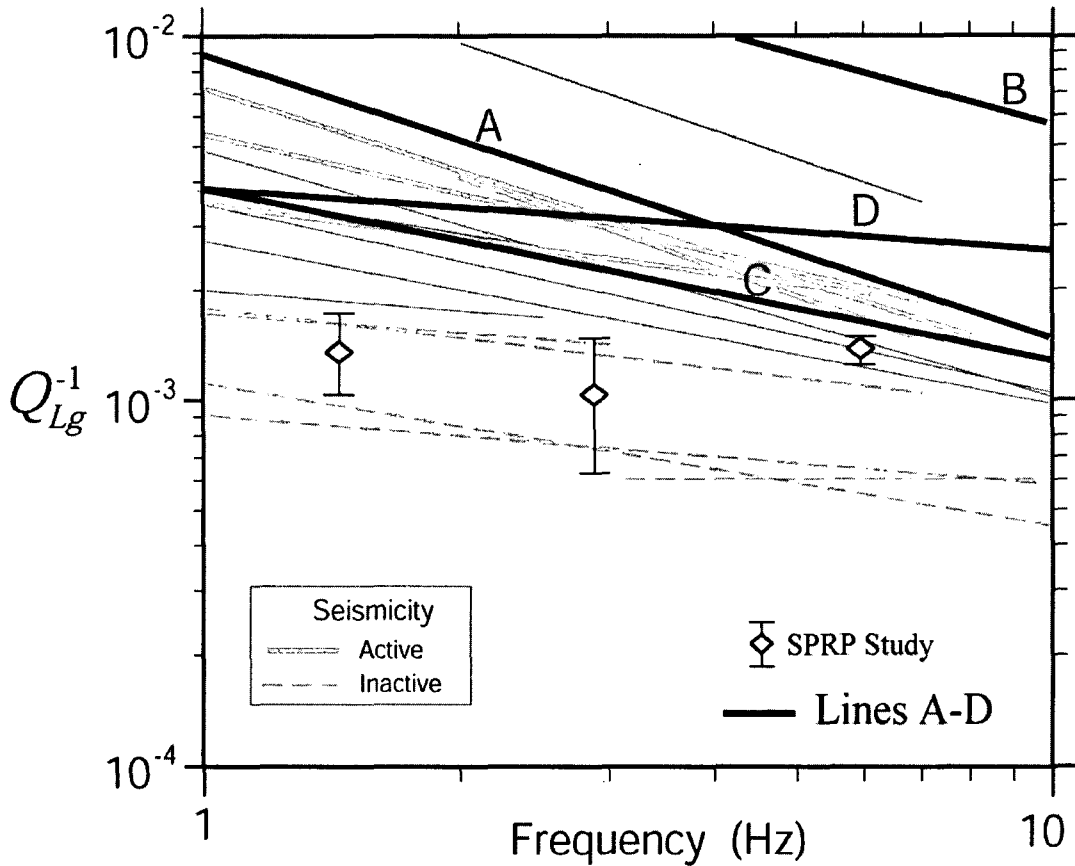


그림 3. 본연구 RTSM과 SPRP법으로부터 얻어진 Q_{Lg}^{-1} 값 결과와 타 연구 비교. 그림 1과 동일한 분류에 의해 지진활성 지역 (두꺼운 실선), 지진 비활성 지역 (파선)으로 분류. 지역은 그림 1과 동일.

참고문헌

- 김성균, 전명순, 김준경 (1999). 경상분지에서의 P파 감쇠, 대한지질학회지, 35, 223-228.
- 김성균, 박윤경, 전명순 (2000). 한반도 남동부의 Q구조, 지질학회지, 36, 529-544.
- 정태웅 (2001). 한반도 남동부 지각의 P파 및 S파의 감쇠구조의 비교연구, 한국지구과학회지, 22, 112-119.
- 정태웅 (2002). Reversed Two Station Method에 의한 중부지방 Q_{Lg}^{-1} 연구, 대한지구물리학회지, 5, 211-218.
- 정태웅, 경재복, 이덕기 (1999). 남한 중부지방의 상부지각 속도구조 연구, 한국지구과학회지, 20, 556-563.
- 정태웅, 사또 하루오 (2000). 덕정리 지진자료를 이용한 한반도 남동부지역의 고주파 P 및 S파 감쇠구조 연구, 대한지구물리학회지, 3, 193-200.
- 정태웅, 사또 하루오, 이기화 (2001). 한반도 남동부 지역 9 관측점 자료의 확장Coda규격화법에 의한 한반도남동부지역의 Q_P^{-1} 및 Q_S^{-1} 연구, 한국지구과학회지, 22, 500-511.

- Aki, K. (1980a). Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere, *J. Geophys. Res.*, 85, 6496-6504.
- Aki, K. (1980b). Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Phys. Earth Planet. Inter.* 21, 50-60.
- Blakeslee, S., Malin, P., and M. Alvarez (1989). Fault-zone attenuation of high-frequency seismic waves, *Geophysical Research Letter*, 16, 1321-1324.
- Chun, K.-Y., West, G.F., R.J. Kokoski, and C. Samson (1987). A novel technique for measuring Lg attenuation Results from eastern Canada between 1 to 10 Hz, *Bull. Seism. Soc. Am.* 77, 398-419.
- Chung, T.W., and H. Sato (2001a). Attenuation of high-frequency P- and S-waves in the crust of the southeastern Korea, *Bull. Seism. Soc. Am.* 91, 1867-1874.
- Chung, T.W., and H. Sato (2001b). A preliminary study on the attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of the Yangsan fault area, southeastern South Korea, *Sci. Rep. Thoku Univ., Ser. 5*, 36, 291-294.
- Chung, T.W., and K. Lee (2002). Attenuation of high-frequency Lg waves around the Yangsan Fault area, the southeast Korea, *J. Korean Geophys. Soc.* 5, 1-8.
- Chung, T.W., and K. Lee (2003). A study of high-frequency QLg-1 in the crust of south Korea, *Bull. Seism. Soc. Am.* 93, 1401-1406.
- Fan, G.W., and T. Lay (2003). Strong Lg wave attenuation in the northern and eastern Tibetan Plateau measured by a two-station/two-event stacking method, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1530, doi:10.1029/2002GL016211.
- Kim, K.D., T.W. Chung and J.B. Kyung (2004). Attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of Choongchung provinces, central south Korea, *Bull. Seism. Soc. Am.* 94, 1070-1078.
- Lees, J.M. and Lindley, G.T. (1994). Three-dimensional attenuation tomography at Loma Prieta: Inversion of t^* for Q., *Journal of Geophysical Research*, 99, 6843-6863.
- Sato, H. and M. C. Fehler (1998). *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*, Springer-Verlag New York, Inc. 308 pp.
- Shih, X.R., K. Y. Chun, and T. Zhu (1994). Attenuation of 1-6 s Lg waves in Eurasia, *J. Geophys. Res.* 99, 23859-23874.