Jour. Korean Earth Science Society, v. 32, no. 1, p. 152–157, February 2011
doi : 10.5467/JKESS.2011.32.1.152

[단 보]

한반도 지역의 저주파 *Lg*파 감쇠상수

정태웅[1,*] · 정경훈[2]

[1]세종대학교 에너지자원공학과, 143-747, 서울특별시 광진구 군자동 98
[2]휘문고등학교, 135-847, 서울특별시 강남구 대치동 952-1

Low Frequency *Lg* Attenuation Coefficient around the Korean Peninsula

Tae Woong Chung[1,*] and Kyung-Hoon Chung[2]

[1]Department of Energy & Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea
[2]Whimoon High School, Seoul 135-847, Korea

Abstract: *Lg* amplitude decrease Q^{-1} becomes very important when harzadous earthquakes occurred in neighbor nations such as Japan and China because the *Lg* phase is the largest seismic phase in Korea. The values of *Lg* Q^{-1} are correlated with seismic activities from the RTSM for IRIS data with long pair distance of stations and events. The Japanese paths crossing the East Sea (Sea of Japan) show high Q^{-1} values related with seismicity and oceanic crust. The paths of Shanghai having the moderate seismicity show the second highest values followed by the Japanese region, while the paths between Manchuria and the Korean Peninsula exhibit low values associated with the low seismicity of the regions.

Keywords: *Lg*, Q^{-1}, seismicity, Korean Peninsula

요 약: 일본, 중국 등 인접 지진다발 국가에서 큰 지진동이 전파되어 오는 경우, *Lg*파가 최대 진폭을 갖게 되어 *Lg*파의 감쇠상수(Q^{-1})는 매우 중요한 의미를 갖게 된다. 지진연구협의회(IRIS)의 자료를 바탕으로 관측점간 경로거리가 긴 자료에 대하여 두관측점법을 이용하여 *Lg*파의 감쇠상수 값을 도출한 결과, 지진활동도에 상응하는 감쇠값을 얻었다. 일본지역을 잇는, 해양지각을 통과하는 경로는 높은 감쇠값을 보여서 지진활동도 및 지각의 감쇠특성을 잘 나타내고 있으며, 또한 큰 지진이 많았던 중국 상해지역을 잇는 경로도 일본지역 다음으로 높은 감쇠값을 보인다. 반면, 한반도 및 만주지역을 잇는 경로는 지진활동상황과 상응하는 매우 낮은 값을 보였다.

주요어: *Lg*, 감쇠상수, 지진활동도, 한반도

서 론

지진은 발생되는 진원 가까이에서는 엄청난 진동으로 큰 피해를 일으키지만, 진원에서 멀리 떨어질수록 에너지가 급격히 감쇠되어 피해정도가 줄어들게 된다. 이와같은 지진동의 거리에 따른 감쇠는 각 관측점에서 지진파 진폭의 변화를 측정하여 감쇠상수 Q^{-1} 값으로 나타내는데, Q^{-1} 값은 내진설계에 있어서 지반의 진동을 정량적으로 예측하기 위해 필수적인 정보이다. 또한 Q^{-1} 값은 지진 관측 자료만 있으면 비교적 간단한 방법으로 구할 수 있어서 세계 광범위한 지역에서 많은 조사가 이루어지고 있다(Sato and Fehler, 1998). 이들 조사에서 지진이 빈발하는 조구조적으로 활동지역이 안정지역에 비해 비교적 높은 Q^{-1} 값을 보이고 있는데, 이는 활성단층이 움직임에 따라 생긴 지각의 균열에 연유하는 것으로 해석되고 있다(Aki, 1980; Blakeslee et al., 1989; Lees and Linley, 1994). 한반도에 있어서도 최근 활발한 조사가 행해진 바, P파와 S파의 Q^{-1} 값은 세계의 지진 안정지역에 해당하는 낮은 값이 보고되었다(Chung and Sato, 2001; Kim et al., 2004).

한편 한반도는 전형적인 대륙지각으로 지진파의 지각 다중반사파인 *Lg*파가 진앙 일정거리 이상에서 발달하는 현상이 나타난다. 특히 일본, 중국 등 인접 지진다발 국가에서 큰 지진동이 전파되어 오는 경우, 경우에 따라 *Lg*파가 최대 진폭을 갖게 되어 *Lg*파의

*Corresponding author: chungtw@sejong.ac.kr
Tel: +82-2-3408-3235
Fax: +82-2-3408-4344

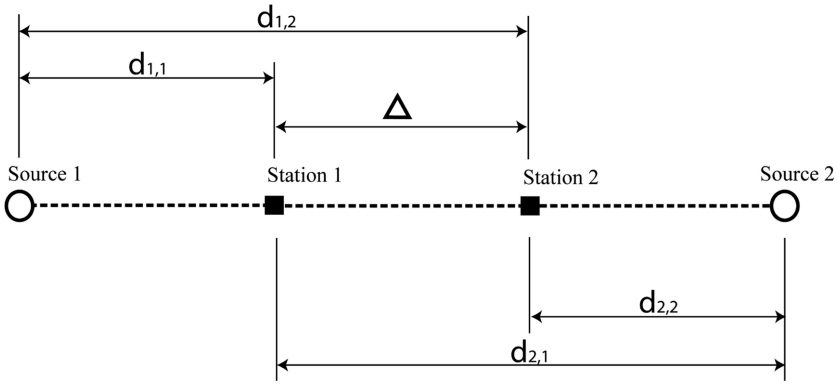

Fig. 1. Schematic diagram illustrating the RTSM array for two sources and stations.

Q^{-1} 값은 내진 설계상 매우 중요한 의미를 갖게 된다. P, S파와 마찬가지로 *Lg*파의 Q^{-1} 값은 지진의 활동도와 밀접한 연관성을 반영하는데, 최근 한반도의 *Lg*파 Q^{-1} 값(Chung and Lee, 2003; Chung et al., 2005; 2007) 역시 세계 다른 지역에 비해 비교적 낮은 값이 도출되었다. 그런데, 현재까지의 한반도의 감쇠상수 연구는 모두 1 Hz 이상의 값에 국한된 바, 본 연구에서는 1 Hz 이하 저주파 *Lg*파 감쇠상수의 두관측점법(Reversed two station method; RTSM)에 의한 연구결과를 보고하고자 한다.

두관측점법(RTSM)

Chun et al.(1987)이 고안하여 널리 쓰이게 된 RTSM은 동일 직선상에 놓인 2 지진과 2 관측점 자료를 이용하여 관측 부지 효과 및 지진원 효과를 제거하여 전달 매질의 감쇠계수를 측정하는 방법이다. Fig. 1과 같이 지진원과 관측점이 한직선상에 놓여있을 때, 감쇠상수 γ 및 Q^{-1}를 다음 식에 의해 도출하게 된다.

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

여기서 *F*는 *Lg*파의 스펙트럼 진폭이며, $d_{i,j}$는 진원 *i*에서 관측점 *j*까지의 거리를 나타내는 한편, Δ와 γ는 다음과 같다.

$$\Delta = d_{1,2} - d_{1,1} + d_{2,1} - d_{2,2} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\pi f}{QU} \quad (3)$$

여기서 *f*는 주파수, *U*는 군속도를 의미한다.

자료 및 분석

*RTSM*에 의해 한반도를 통과하는 지진파가 관측될 수 있는 지진 관측망을 다음과 같이 선정하였다(Table 1). 즉 미국의 지진연구협의회(Incorporated Research Institutions for Seismology; IRIS)에서 운영하는 중국 동쪽의 4 관측점, 일본의 2 관측점, 우리나라에서는 한 지점이다.

지진자료는 미국 지질조사서(U.S. Geological Survey; USGS) 카탈로그(http://neic.usgs.gov)에서 진앙위치 및 규모 등의 범위를 지정하여 대상자료를 선정했다. 본 연구의 대부분의 관측점에서는 약 500 km 이상의 진앙거리인 경우 규모 5 이상의 지진이어야 주위 잡음을 극복하고 자료로서 활용할 수 있음이 관찰되었다. 이러한 규모의 지진은 주로 판경계에서 발생하는데, 본 연구의 관측점에 주로 포착되는 지진은 유라시아-태평양판 혹은 유라시아-필리핀판 경계가 되는 캄차카-일본-오키나와-대만에 이어지는 환태평양 조산대 지역으로 한반도의 동쪽 지역 지진이다(Fig. 2).

Table 1. Location of stations

Station name	Nationality	Latitude (°N)	Longitude (°E)
INC	Korea	37.48	126.63
MAJ	Japan	36.54	138.21
ERM	Japan	42.02	143.16
HIA	China	49.27	119.74
MDJ	China	44.62	129.59
BJT	China	40.02	116.17
SSE	China	31.10	121.19

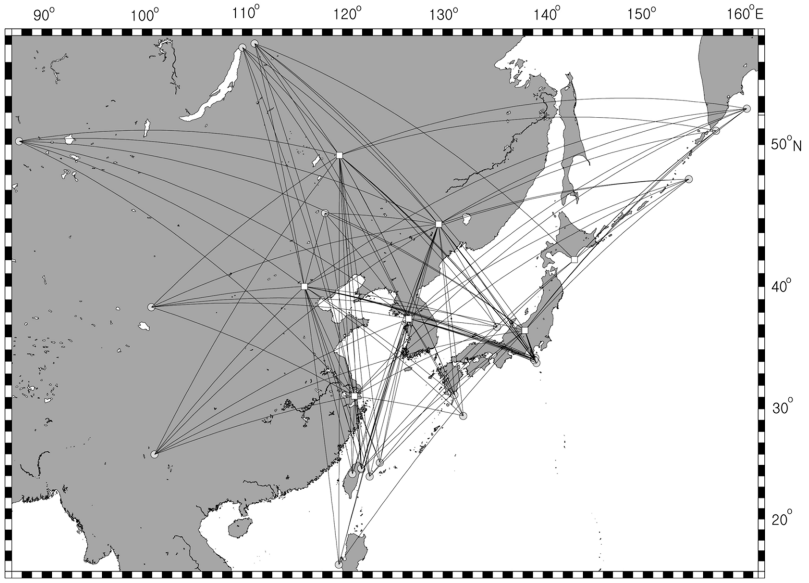

Fig. 2. The studied seismic paths connecting stations (squares) and events (circles).

Table 2. Earthquake data

Event No.	Origin Date (Day Month Year)			Origin Time (Hour Min Sec)			Lat (°N)	Lon (°E)	Depth (km)	Mag (mbar)
1	21	Dec	1999	11	0	48.9	55.83	110.0	10	5.5
2	29	Nov	1999	4	10	40.9	40.46	122.9	10	5.3
3	29	Jan	1999	5	44	23.9	44.66	115.7	10	5.0
4	7	May	1999	1	3	22.6	24.71	121.9	10	5.0
5	6	Jun	2000	21	16	42.4	36.83	135.5	10	5.9
6	15	Jun	2000	11	10	46.2	29.37	132.1	10	6.1
7	18	May	2000	15	18	58.0	24.19	121.0	19	5.2
8	25	Jun	2000	6	34	42.9	31.18	131.2	10	6.0
9	1	Jul	2000	7	1	55.6	34.22	139.1	10	6.8
10	30	Jul	2000	12	25	45.6	33.9	139.4	10	7.1
11	18	Aug	2000	1	52	20.9	34.13	139.2	10	5.7
12	15	Jun	2000	11	10	46.2	29.37	132.1	10	6.1
13	15	Jul	2000	1	30	30.5	34.32	139.3	10	6.1
14	3	Aug	2000	13	18	9.0	34.17	139.1	10	5.5
15	2	Jul	2000	20	3	34.8	34.08	139.2	10	5.7
16	18	Dec	2001	4	2	58.3	23.95	122.7	14	7.3
17	15	May	2002	3	46	5.76	24.64	121.9	10	6.2
18	24	Oct	2002	4	35	13.1	25.22	123.8	10	5.4
19	18	Dec	2002	11	9	18.9	52.88	159.7	53	5.2
20	24	Dec	2002	12	48	45.8	47.72	154.6	33	5.7
21	6	Jan	2003	23	43	50.8	15.65	119.7	10	6.0
22	15	Mar	2003	18	41	28.7	52.25	160.4	30	6.1
23	28	Apr	2003	12	57	57.4	12.61	144.0	25	5.4
24	29	May	2003	5	59	7.66	50.88	157.3	49	5.5
25	16	Sep	2003	11	24	52.2	56.06	111.3	10	5.7
26	1	Oct	2003	1	3	25.2	50.21	87.72	10	7.1
27	16	Oct	2003	12	28	9.07	25.95	101.3	33	5.6
28	25	Oct	2003	12	41	35.3	38.4	101.0	10	5.8
29	24	Mar	2004	1	53	49.4	45.38	118.3	18	5.6

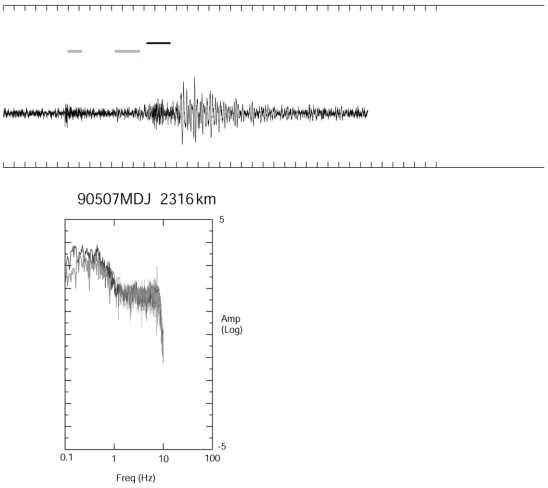

Fig. 3. MDJ station observations for events occurred at 7 May 1999 (No. 4 im Table 2). (Upper) Black line denotes *Lg* observation with velocities between 3.5 and 2.9 km/s. Gray lines denote arrivals of P and S waves, respectively. Time tics denote 50 s. (Lower) Spectrum observations of *Lg* (black) and noise (gray). Noise is sampled before the P-wave arrivals with the same length of *Lg* time window.

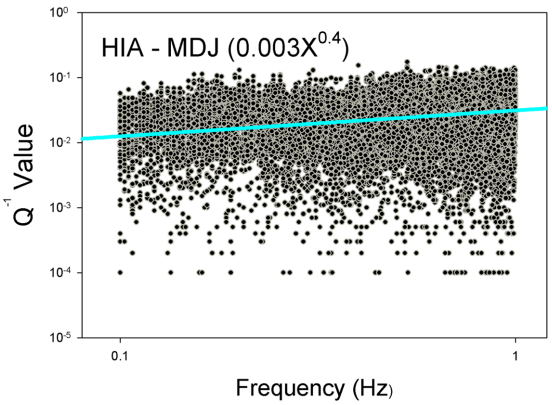

Fig. 4. Based on Q^{-1} values of HIA-MDJ path, grey line was obtained by the least-square fitting as $Q^{-1}=\alpha f^{\beta}$.

반면, 유라시아판의 내부가 되는 동경 100도에서 130도 사이 중국내륙 지역은 IRIS 관측점에 골고루 기록되는 규모 5 이상의 지진은 매우 드문 상황이다. RTSM은 양 끝 지진이 편중되지 않고 골고루 선정되어야 하므로 환태평양 지진에서는 큰 규모의 몇 지진만 선정하고 한반도의 서쪽이 되는 판 내부 지진은 규모 5 이상의 거의 모든 지진을 자료로 선정하였다(Table 2).

Fig. 3, 4는 Table 2의 지진의 MDJ(진원거리 2,316 km) 관측점 기록 예이다. 위쪽 그림은 시간축에 대한 기록으로 회색표시 띠는 이론 모델에 의한 P파, S파 발현 구간으로, 대체로 관측값과 맞아 떨어진다. 검은 띠는 *Lg*파 발현구간인 3.5-2.9 km/s 의 전달파 속도구간으로 최대진폭의 후속 표면파에 비하여 짧은 주기의 파가 잘 관찰되고 있다.

Fig. 3의 아랫 그림은 위 표면파 검은 띠의 구간과 이에 상응하는 시간축의 P파 도달이전 잡음대 기록 구간의 스펙트럼 값 비교 그림이다. Fig. 3의 MDJ 자료는 연구대상 주파수 영역인 0.1-1 Hz에서 대체로 검은색의 *Lg*파 신호가 잡음에 비하여 큰 값을 보이고 있어서 자료로서 유효함을 나타내고 있다. 이와 같이 스펙트럼값 판정을 통하여 자료로서 채택된 관측점 기록 수는 총 156 자료이다.

156 자료를 바탕으로 RTSM의 2 지진, 2 관측점 값의 짝을 구하였다. 4 지점이 직선상에서 30도 이내에 분포하는 것을 모두 찾아낸 결과 409 짝이 구하여졌다. Table 3은 구하여진 관측점짝과 그 거리 및 개수이다. 관측점짝은 숫자가 많아질수록 결과값의 신뢰도가 높아지는데, 약 20 이상의 관측점짝 수에서 안정된 값이 도출되었다. 위 관측점짝을 지도상에 그린 결과가 Fig. 4이다. 각 관측점짝별로 RTSM의 식 (1)을 Q^{-1}에 대하여 전개, $Q^{-1}=\alpha f^{\beta}$의 형태에 최소자승식으로 맞추어 와를 구한다. 관측점 경로 자료 수가 가장 많은 HIA-MDJ에 대한 최소자승식 도출 과정(Fig. 4)을 예시하였다.

연구 결과 및 고찰

관측점짝에 대하여 $Q^{-1}=\alpha f^{\beta}$ 형태의 값을 구하였다 (Table 3).

Fig. 5는 감쇠값이 큰 경로를 진한 색으로 나타내고 자료수가 20개 미만인 것으로 향후 자료 보완시 변화 가능성이 잇는 경로를 점선으로 표시한 결과이다. 이 결과는 지역의 특성을 잘 반영한 결과로 보인다. 즉, 일본지역을 잇는 경로인 MAJ-MDJ, ERM-MDJ, MAJ-HIA는 비교적 높은 감쇠값을 보여서 지진활동도와 감쇠값의 상관성을 잘 나타내고 있다. 또한 지진 활동도는 일본지역에 비해 낮으나, 큰 지진이 많았던 상해지역을 잇는 경로 SSE-BJT, SSE-INC, SSE-HIA, SSE-MDJ 도 일본지역 다음으로 높은 감쇠값을 보인다. 반면, 한반도 및 만주지역을 잇

Table 3. Values of $Q_{Lg}^{-1}(=\alpha f^{\beta})$ for station pairs

Station Pairs	Numbers	α	β	Distance (km)
MDJ-MAJ	32	0.0064	0.08	1154
MDJ-ERM	9	0.0058	0.34	1137
HIA-MAJ	12	0.0053	0.13	2072
SSE-BJT	37	0.0053	0.30	1087
SSE-INC	24	0.0045	0.18	867
HIA-SSE	15	0.0042	0.28	2024
HIA-INC	36	0.0037	0.30	1428
MDJ-SSE	20	0.0035	0.23	1670
HIA-MDJ	85	0.0031	0.40	917
MDJ-INC	38	0.0030	0.19	828
HIA-BJT	27	0.0028	0.33	1070
BJT-INC	44	0.0021	-0.03	949
MDJ-BJT	17	0.0020	0.25	1217
MAJ-INC	13	0.0017	-0.05	1035

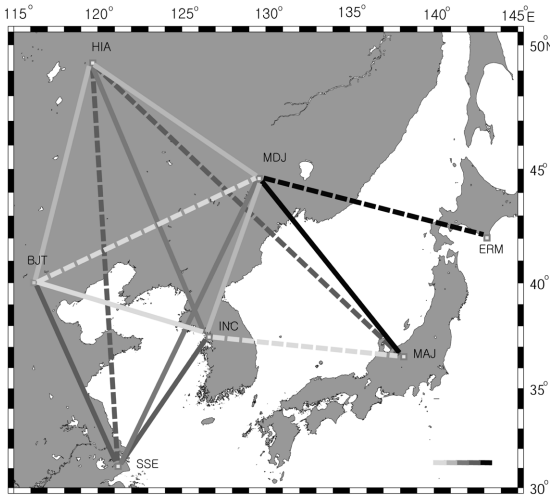

Fig. 5. The iterstation paths representing Q_{Lg}^{-1} values (darker ones for high values).

는 경로인 HIA-MDJ, MDJ-INC, HIA-BJT, BJT-INC, MDJ-BJT는 낮은 지진활동상황과 상관되게 매우 낮은 값을 보였다. 단, 가장 낮은 값을 보인 MAJ-INC는 MAJ가 일본지역임을 감안할 때 자료의 수가 적은 관계로 불안정하게 낮은 값이 나온 가능성이 있다. 그러나, 경로상 MAJ-MDJ, ERM-MDJ, MAJ-HIA 등의 높은 감쇠값을 보인 경로가 수심 2000 m 이상의 해양지각 지역을 지나는 데 반해, INC-MAJ는 그 보다 얕은 육지지각을 지나고 있어서 육지지각의 특성을 반영하는 결과일 가능성을 배제할 수 없다.

결 론

IRIS의 자료를 바탕으로 관측점간 경로거리가 긴 자료에 대하여 RTSM을 이용하여 *Lg*파의 Q^{-1} 값을 도출한 결과, 지진활동도에 상응하는 감쇠값을 얻었다. 일본지역을 잇는, 해양지각을 통과하는 경로는 높은 감쇠값을 보여서 지진활동도 및 지각의 감쇠특성을 잘 나타내고 있으며, 또한 큰 지진이 많았던 상해지역을 잇는 경로도 일본지역 다음으로 높은 감쇠값을 보인다. 반면, 한반도 및 만주지역을 잇는 경로는 지진활동상황과 상관되게 매우 낮은 값을 보였다.

사 사

본 연구 및 원고의 작성에 2010년도 기상지진기술개발사업(CATER 2006-5104)의 지원이 있었음을 밝힙니다.

참고문헌

Aki, K., 1980, Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere. Journal of Geophysical Research, 85, 6496-6504.

Blakeslee, S., Malin, P., and Alvarez, M., 1989, Fault-zone attenuation of high-frequency seismic waves. Geophysical Research Letter, 16, 1321-1324.

Chun, K.-Y., West, G.F., Kokoski, R.J., and Samson, C., 1987, A novel technique for measuring *Lg* attenuation Results from eastern Canada between 1 to 10 Hz. Bulletin of the Seismological Society of America, 77, 398-419.

Chung, T.W. and Lee, K., 2003, A study of high-frequency Q_{Lg}^{-1} in the crust of south Korea. Bulletin of the Seismological Society of America, 93, 1401-1406.

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, 2190-2197.

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., Park, Y.K., Kang, I.B., and Lee, K., 2005, Crustal Q_{Lg}^{-1} in South Korea using the Source Pair/Receiver Pair method. Bulletin of the Seismological Society of America, 95, 512-520.

Kim, K.D., Chung, T.W., and Kyung, J.B., 2004, Attenuation of high-frequency P and S waves in the crust of Choongchung provinces, central south Korea. Bulletin of the Seismological Society of America, 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 Fehler, M.C., 1998, Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth. Springer-Verlag New York Inc, NY, USA, 308 p.

2011년 1월 17일 접수
2011년 1월 27일 수정원고 접수
2011년 1월 29일 채택