

## 한반도 $L_g$ 파 감쇠상수 도출을 위한 한일 지진자료의 RTSM 적용에 대한 연구

정태웅\*

세종대학교 지구환경과학과

### The study of Reversed Two Station Method on Korea-Japan Seismic Data to Obtain $L_g$ Attenuation of Korean Peninsula

Tae Woong Chung\*

Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University

**요 약:** 일본, 중국 등 인접 지진다발 국가에서 큰 지진동이 전파되어 오는 경우,  $L_g$ 파가 최대 진폭을 갖게 되어  $L_g$ 파의 감쇠상수( $Q^{-1}$ )는 매우 중요한 의미를 갖게 된다. RTSM에서 보다 신뢰성있는  $Q^{-1}$  값은 긴 관측점간 혹은 진원간 거리에서 얻어지므로 남한 지역의 지진의 국내관측망 및 일본 큐슈지방을 중심으로 한 일본 지진관측망 자료를 이용하였다. 그러나, 본 해석결과는 현재의 구조조 상황과 달리 한반도의  $Q^{-1}$  값이 매우 높게 산출되었다. 이는 감쇠상수가 큰 일본 지역의 부지영향인 것으로 추정된다.

**주요어:**  $L_g$ ,  $Q^{-1}$ , 한반도, 일본

**Abstract:**  $L_g$  amplitude decrease  $Q^{-1}$  is very important because the  $L_g$  phase is the largest seismic phase in Korea if hazardous earthquakes occurred at neighbor nations such as Japan and China. Since reliable  $Q^{-1}$  from two station method can be obtained by long pair distance of stations or events, we used seismic stations both Korea and Japans recording Korean events. The obtained  $Q^{-1}$  values, however, were anomalously high; these misguided values, inconsistent with tectonic activity of Korean Peninsula, seems to be related with high  $Q^{-1}$  values of Japan region.

**Keywords:**  $L_g$ ,  $Q^{-1}$ , Korean Peninsula, Japan

## 서 론

근래 지구촌 곳곳에서 지진으로 인한 피해가 점증하는 가운데, 한반도 역시 최근 지진발생 회수가 증가하는 추세를 보이고 있어 지진재해에 대한 국민적 경각심이 고조되고 있다. 특히 2004년 5월 29일 경북 울진 앞바다에서 발생한 규모 5.2 (기상청 발표)의 지진은 지난 1980년 1월 8일 북한에서 발생한 규모 5.3 지진 이후 가장 큰 규모의 지진으로 기록된 바 있다. 또한 2005년 3월 20일 일본 큐슈 앞바다에 발생한 규모 7.0의 지진(후쿠오카 지진)은 진앙지에 가까운 경상도 일대는 물론 멀리 수도권 지역에서도 강한 진동이 감지되는 등, 국외에서 발생한 지진이 한반도에 피해를 끼칠 수도 있다는 점을 환기시킨 지진이었고, 매스컴에서는 앞 다투어 한국의 건물에 대한 내진설계 점검의 필요성을 역설한 바 있다.

2008년 9월 22일 접수; 2008년 11월 6일 채택

\*Corresponding author

E-mail: chungtw@sejong.ac.kr

Address: Department of Earth & Environmental Sciences,  
Sejong University

Kunja-dong 98 Kwangjin-ku SEOUL 143-747

지진은 발생하는 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, 이  $Q^{-1}$  값이 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 있는데, 한반도에 있어서도 본 연구팀이 중심이 되어 활발한 조사를 행한 바, P파와 S파의  $Q^{-1}$  값은 세계의 지진 안정지역에 해당하는 낮은 값이 보고되었다(정, 2001; 정과 사토, 2000; 정 등, 2001; Chung and Sato, 2001a; 2001b; Kim *et al.*, 2004; Chung *et al.*, 2006).

한편 한반도는 전형적인 대륙지각으로 지진파의 지각 다중 반사파인  $L_g$ 파가 진앙 일정거리 이상에서 발달하는 현상이 나타난다. 특히 후쿠오카 지진의 경우와 같이 일본, 중국 등 인접 지진다발 국가에서 큰 지진동이 전파되어 오는 경우, 경우에 따라  $L_g$ 파가 최대 진폭을 갖게 되어  $L_g$ 파의  $Q^{-1}$  값은 내진 설계상 매우 중요한 의미를 갖게 된다. 또한 P, S파와 마찬가지로

가지로  $L_g$ 파의  $Q^{-1}$  값은 지각의 활동도와 밀접한 연관성을 반영하는데, 본 연구팀의 조사로 한반도의  $L_g$ 파  $Q^{-1}$  값 (Chung and Lee, 2003; Chung *et al.*, 2005) 역시 세계 다른 지역에 비해 비교적 낮은 값이 도출되었다(Fig. 1). 그런데, 통상  $L_g$ 파의  $Q^{-1}$  값 연구는 관측망 거리 수 천 km 규모에서 행해지고 있는데 반하여, 한반도에서 행하여졌던 연구결과는 관측망 거리 수 백 km 이내의 좁은 한반도 지진 관측망 자료에서 도출된 것이다.

$L_g$ 파의 경우 전파거리가 길수록 정확한 감쇠값이 도출되기 때문에 한반도 관측망 자료뿐 아니라 일본 등 해외지역의 관측망 자료도 활용할 필요가 있다. 특히 일본 큐슈대학이 운영하는 큐슈지역 관측망 자료에는 한반도 지진의  $L_g$ 파 자료가 선명히 기록되어 있는 것이 확인된 바 있다(Matsumoto, 개인 교신). 본 연구에서는 국내에 운영되는 관측망과 일본 큐슈대학에서 운영하는 관측망에 기록된 한반도 지진을 수집하고 지진 파형자료 분석을 통하여 한반도  $L_g$ 파의  $Q^{-1}$  값을 구하고자 한다.

### $L_g$ 파 감쇠

#### 감쇠상수

지진파는 탄성파의 일종인데, 지구내부가 완전한 탄성체가 아니기 때문에 지진파의 전파와 더불어 탄성에너지( $E$ )의 일부 ( $\Delta E$ )가 열로 변환되면서 감쇠한다. 이 감쇠정도를 감쇠상수  $Q^{-1}$ 를 써서 다음과 같이 나타낸다.

$$Q^{-1} = \frac{\Delta E}{2\pi E} \quad (1)$$

$Q^{-1}$ 는 온도, 압력 및 지진파의 주파수 등에 의존하고 지구내부 물질에서 물과 같은 불순물의 양에도 변화를 보여, 구조물의 내진설계에 있어서 지반의 강진동을 정량적으로 예측하기 위해 필수적인 상수이다. 따라서 세계적으로  $Q^{-1}$ 의 조사가 광범위하게 이루어졌으며, 특히 지진 빈발지역이면서 인구가 많은 산업 도시지역에서 집중적으로 조사가 이루어지고 있다(예; Frankel *et al.*, 1990; Ordaz and Singh, 1992; Kinoshita, 1994; Nava *et al.*, 1999). 이들 연구는 지진이 빈발하는 조구조적으로 활동지역이 안정지역에 비해 비교적 높은  $Q^{-1}$  값을 보이고 있다 (Sato and Fehler, 1998). 이러한 높은  $Q^{-1}$  값은 활성단층이 움직임에 따라 생긴 지각의 균열에 연유하는 것으로 해석되고 있다 (Aki, 1980; Blakeslee *et al.*, 1989; Lees and Lindley, 1994).

#### $L_g$ 파 감쇠

$L_g$ 파는 대륙지각의 일정거리 이상의 진앙거리에서 매우 현저하게 발달되는 특징을 나타낸다. Sato and Fehler (1998)는  $L_g$ 의 감쇠상수( $Q_{L_g}^{-1}$ )가 지질학적인 구조 및 조구조적인 활동

과 밀접한 관련을 지니는 경향이 있음을 세계 도처의 측정결과와의 비교를 통하여 제시하였다. 특히 1 Hz 근방에서  $Q_{L_g}^{-1}$ 는 조구조적인 지진활동과 매우 밀접한 연관이 있음이 밝혀졌는데, 지진활동이 활발한 지역이 그렇지 않은 지역에 비해 높은 값을 보였다(Aki, 1980a; Jin and Aki, 1988).

한반도를 가로질러 조밀한 일본 지진 관측망에 기록된 아시아대륙의 지진파에서  $L_g$ 는 매우 뚜렷한 모습을 보이나(예; Furumura and Kennett, 2001), 진작 한반도의  $Q_{L_g}^{-1}$ 는 남한 지진 관측점 미비로 최근에 이르도록 알려지지 않고 있었다. 1999년 이래 최근 들어, 디지털 지진계가 남한 전역에 걸쳐 전개되었고, 선명한  $L_g$  파형이 기록되고 있으며 이 자료를 이용하여 RTSM (Reversed two-station method)에 의해 남부지방(Chung and Lee, 2002) 및 중부지방(정, 2002)의 감쇠상수를 구하는 시도가 있었다. Chun *et al.* (1987) 이 고안하여 세계적으로 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. 1). 이 방법을 쓴 결과, 1 Hz에서  $Q_{L_g}^{-1}$ 가 0.01 보다 높은 경향이 나타났는데, 이는 이 지역의 지진활동을 고려할 때 지나치게 높은 값이다. RTSM은 관측점간 거리가 멀수록 정확한 감쇠상수를 구할 수 있는데, 남한지역 관측점만으로 충분한 두 관측점 거리(SP)를 확보하는 것이 매우 어려운 상황이어서 이러한 자료부족 때문에 결론은 유보되었다.

한편, Chung and Lee (2003)는 Coda 규격화법(Aki, 1980b)을 이용하여  $Q_{L_g}^{-1}(f) = 0.0018 f^{-0.54}$ 라는 남한 지역의 값을 도출하였다. 그러나, 이 연구에서는 부족한 자료를 보충하기 위하여 여러 관측점의 값을 합하여 감쇠상수를 구해 낸 것이다. 본래 Coda 규격화법은 단일관측점에 대하여 많은 자료가 모아졌을 때 구하는 방법으로, Coda 감쇠가 비슷한 모양을 보일 때 서로 다른 관측점 자료를 합산하여 단일관측점 자료인 양 구할 수 있는 것으로 보고 되고 있다(Frankel *et al.*, 1990). 따라서, 서로 다른 관측점의 Coda 감쇠 모양이 비슷한지 여부를 판단하는 주관성을 완전히 배제하기 어려우며 그러한 의미에서 Chung and Lee의 연구는 부족한 자료의 제한성을 완전히 불식하기는 힘든 상황이다.

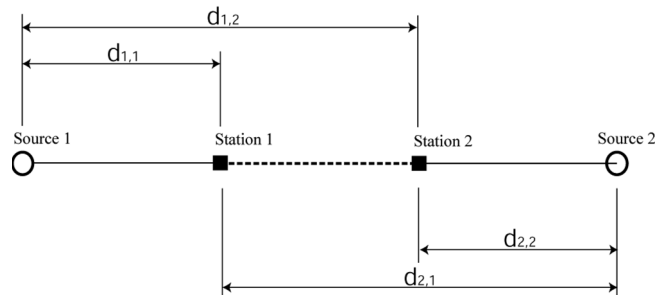


Fig. 1. Schematic figure showing the linear alignment of source and stations for Reversed Two Station Method (RTSM).

최근 Chung *et al.* (2005)은  $Lg$  신호의 진원의 기하계수와 관측점의 증폭효과는 방위각에 영향을 받지 않는다고 가정하여 RTSM의 2 지진 및 2 관측점의 일직선상 배열 조건을 완화한 방법(Shih *et al.*, 1994)을 이용하여 많은 자료와 50 km 이상의 긴 SP를 확보하고, 거기에다가 국내의 관측점 및 지진 자료만이 아닌 IRIS의 국외 관측점과 국외지진을 결합하여 신뢰할만한 낮은  $Lg$  감쇠상수 값을 도출하는데 성공하였다. 그러나 이러한 결과가 단순히 긴 SP 확보만 되면 도출될 수 있는지 논란의 여지가 있다.

본 연구는 Chung *et al.* (2005)에 앞서 행한 Chung and Lee (2002) 및 정(2002)의 자료 부족과 짧은 SP를 극복하기 위하여 일본 류슈지방을 중심으로 한 지진관측망에 포착된 남한 지역의 지진자료를 수집하여 RTSM을 적용하였다. 한일 양국 관측망에 기록된 지진은 소수이지만, 최근 조밀해진 국내 관측망과 세계적으로 최고 고밀도로 평가되고 있는 일본 지역 지진 관측망 자료를 결합함으로써 충분한 SP와 자료를 얻게 되었다.

**RTSM**

Chun *et al.* (1987)이 고안한 RTSM은 지진원과 관측점이 한 직선상에 놓여있을 때(Fig. 1), 감쇠상수  $\gamma$  및  $Q^{-1}$ 를 다음 식에 의해 도출하게 된다.

$$\frac{F(d_{1,2})F(d_{2,1})}{F(d_{1,1})F(d_{2,2})} = \left(\frac{d_{1,2}d_{2,1}}{d_{1,1}d_{2,2}}\right)^{-0.5} e^{-2\gamma\Delta} \tag{5}$$

여기서  $F$ 는  $Lg$ 파의 스펙트럼 진폭이며,  $d_{ij}$ 는 진원  $i$ 에서 관측점  $j$ 까지의 거리를 나타내는 한편,  $\Delta$ 와  $\gamma$ 는 다음과 같다.

$$\Delta = d_{1,2} - d_{1,1} + d_{2,1} - d_{2,2} \tag{6}$$

**Table 1.** Korean seismic stations.

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)
CHN	38.27	127.12
CHC	37.90	127.73
KHD	37.70	126.38
DGY	37.69	128.67
SNU	37.45	126.96
SND	37.15	128.80
CHJ	36.87	127.97
SES	36.79	126.45
ULJ	36.70	129.41
HKU	36.61	127.36
AND	36.57	128.71
DAG	35.77	128.90
YGB	35.29	126.44
GRE	35.26	127.44
HUK	34.68	125.45
SGP	33.26	126.50

**Table 2.** Japanese seismic stations.

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)
NIT	35.22	133.09
YBR	35.18	133.68
SGO	35.05	133.32
NKR	34.94	132.82
HKB	34.93	133.62
TTA	34.91	133.41
KTW	34.91	132.91
IWA	34.88	132.42
HSM	34.87	132.64
JNS	34.82	133.17
GEI	34.74	132.38
KSA	34.7	132.96
TOY	34.66	132.42
JOU	34.64	133.15
HRS	34.58	132.43
DWA	34.54	132.95
SHK	34.53	132.68
MTM	34.48	131.64
SKI	34.39	132.16
MIC	34.39	131.9
TKJ	34.21	131.69
MTO	34.21	131.36
IKN	34.19	132.13
MKW	34.19	132
SYT	34.02	132.07
UBE	33.99	131.3
JII	33.79	129.73
ktk	33.74	130.84
TBE	33.71	132.81
WKM	33.69	130.6
JKI	33.63	131.57
JNA	33.56	132.48
UMI	33.56	130.55
fkt	33.56	130.41
KAH	33.55	130.75
YND	33.54	133
SGW	33.53	130.95
sbr	33.5	130.26
CZE	33.5	129.89
nkt	33.47	131.31
KIW	33.46	130.83
YMG	33.45	131.45
JIT	33.43	130.39
YGN	33.41	131.04
FJI	33.41	130.24
TAR	33.36	130.64
hir	33.35	129.49
UKH	33.29	130.82
SBN	33.21	129.77
HRD	33.21	129.44
tai	33.13	130.87
SBS	33.12	129.81
JUR	33.09	129.95
KKC	32.99	130.83

$$\gamma = \frac{\pi f}{QU} \quad (7)$$

여기서  $f$ 는 주파수,  $U$ 는 군속도를 의미한다.

본 연구에서는 Chung *et al.* (2005)이 적용한 방법과 같이 관측점과 지진이 반드시 한 직선상에 놓이지 않은 경우도 모두 포함하여 해석하였다.

### 자료 및 분석

본 연구에서 쓰여진 관측점은 국내는 16관측점 (Table 1)이며, 일본은 73점의 관측점 (Table 2)을 이용하였다. 관측점은 모두 고유주기 1 Hz의 3성분 속도형 지진계이며, 지진기록은

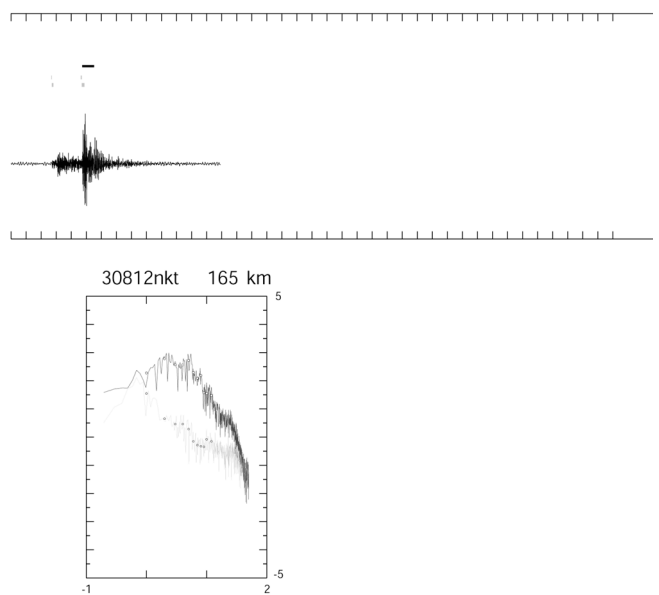
**Table 2.** Continued

Stations	Latitude (°N)	Longitude (°E)
TMN	32.98	130.56
KK1	32.95	129.8
KKI	32.95	129.8
YME	32.74	130.24
fuk	32.71	128.76
NGS	32.7	129.86
JFU	32.65	128.75
TYN	32.63	130.75
nmo	32.59	129.79
smt	32.43	130.31
usb	32.23	130.03
NSM	32.15	130.12
AKN	31.99	130.21
sib	31.97	130.35
KDI	31.87	130.5
SEN	31.83	130.36
KOR	31.7	130.46
kos	31.62	129.69
chy	31.38	130.26

한국측 자료와 같은 초당 100 표본간격이며, 이들 지진기록의 수직성분을 본 연구에 이용하였다.

지진원 자료는 규모 2.4 - 5의 13 지진인데 (Table 3), 남동부 지방에서 일어난 지진은 지리적으로 일본 관측점에 가까워 3 미만의 작은 규모라도 본 연구에 쓸 수 있을 만큼 좋은 잡음 대비 신호기록이 얻어졌다 (Fig. 2).

신호처리 과정은 한일 관측점 공히 다음과 같이 행해졌다. 우선, 각 기록은 모서리 주파수 1 Hz인 회귀적(recursive) zero-phase, high pass, 4차 Butterworth filter를 적용한 후, 각 기록창에서 평균치와 경향을 제거한다. 각 기록창의 양쪽에 10%



**Fig. 2.** The observations of the Japanese seismic station, 'nkt' for the event with  $M$  2.6. The vertical velocity seismogram (top) with  $L_g$  velocity window (black bar) from 3.0 to 3.5 km/s. This  $L_g$  signals are expressed as black line in the spectrum diagram (down). The noise prior to  $P$  arrivals are grey line derived from the same window length of  $L_g$ . '30812' denote to origin date, 2003/08/12. '165 km' denote to epicentral distance.

**Table 3.** Earthquake data (Frequency denotes to combination numbers of RTSM).

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

씩의 코사인형의 감쇠항(일명 Cosine Taper)을 적용시키는데, 이는 이어서 행하는 Fast Fourier Transform (FFT)를 적용시킨 결과 스펙트럼 양변이 음의 값의 큰 변동을 일으키는 것을 방지함이 목적이다(Bringham, 1974; Cooley and Tukey, 1965).

진앙거리 > 290 km의 Lg는 10 Hz 이상에서 잡음과 구분하기 힘들어진다는 보고가 있으나(Xie *et al.*, 1990), 본 연구자료에서는 일률적으로 그러한 경향은 보이지 않고, 어떤 관측점에서는 진앙거리 299 km에서 30 Hz 이상의 값에서도 신호/잡음비가 좋은 상태이다(Fig. 3). 앞서 행해진 RTSM이 양 끝에 두 지진, 가운데에 두 관측점이 놓이는 배치로 두 관측점 간의 Lg 감쇠상수를 구하려는 시도였는데(Chung and Lee, 2002; 정, 2002), 본 연구에서는 관측점 사이의 감쇠상수를 구하는 것을 바꾸어서 두 source 간의 감쇠상수를 구하고자 한다(Fig. 4).

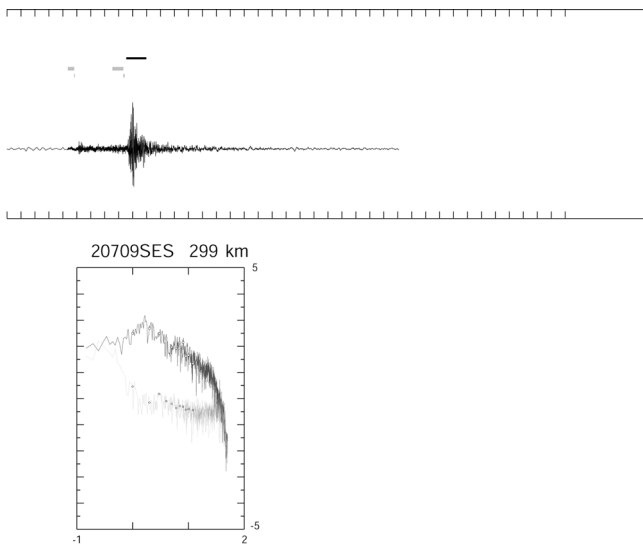


Fig. 3. The observations of the Korean seismic station, 'SES' for the event with  $M$  3.8. The parameters are the same with Fig. 2.

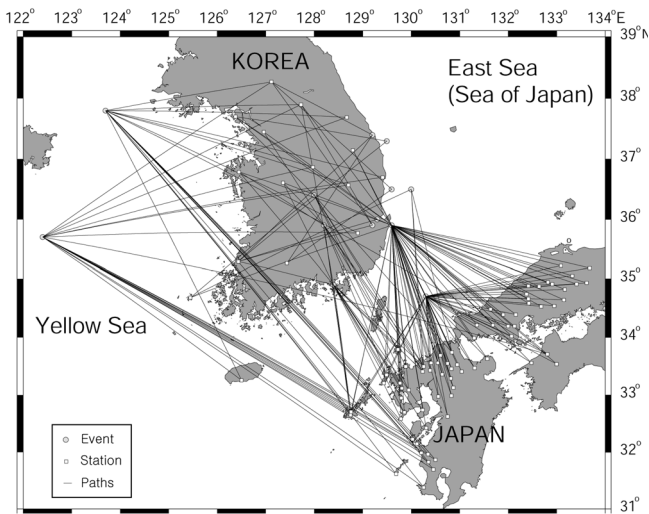


Fig. 4. Map showing RTSM combinations connecting stations in Korea (Table 1) and Japan (Table 2) with 13 events (Table 3).

이와 같이 바꾸어도 RTSM은 마찬가지로 성립되는데 (Shih *et al.*, 1994), 일본 등지의 관측점을 이용하여 비교적 긴 두 지진 간 행로 A, B, C 및 D를 얻을 수 있었다(Fig. 5). 행로 A, B, C, 및 D의 길이는 각각 260, 148, 112, 154 km에 이르며, 각 행로에 대한 RTSM의 자료 조합 수는 83, 49, 14, 12개로 자료수가 많은 A, B, C, D 순서로 신뢰도가 높은 값이 얻어질 것으로 기대된다.

각 자료를 주파수 간격 0.234 Hz로 단순이동 평균으로 평활화한 후, A, B, C, D 각 행로의 0.6에서 10 Hz 사이의  $\gamma(f)$  (식 (7) 참조)를 중합한 결과를 도시하였다(Figs. 6~9). 이러한 중합에 의한 도시방법은 Fan and Lay (2003)과 동일한데, 역시 자료수가 많은 A 행로값이 좁은 범위에 값이 수렴하는 것으로 나타났으며, B~D는 다소 값의 범위가 넓은 양상을 보

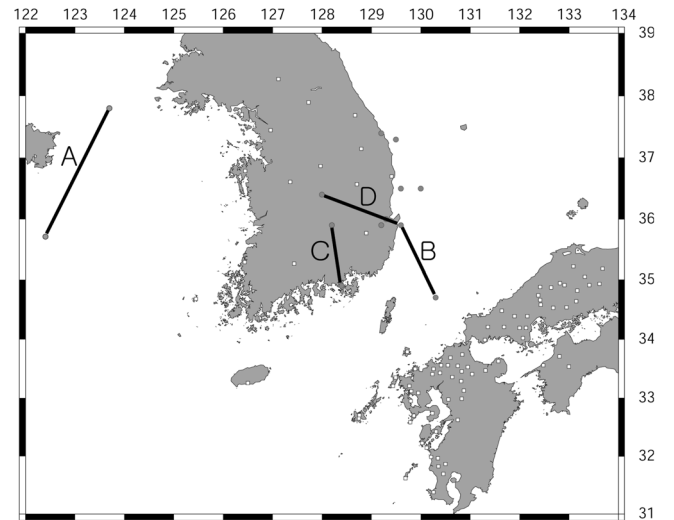


Fig. 5. Map showing the lines A, B, C, and D connecting event pairs along which the Lg attenuations were measured.

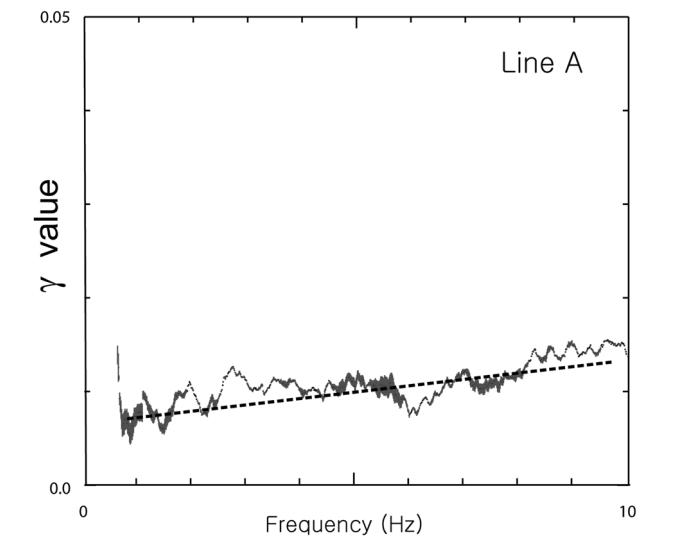


Fig. 6. Lg attenuation value of  $\times$  (broken line) obtained from the stacked values for Line A.

이고 있다. 각 그래프에 지수 회귀선  $\gamma = \alpha f^\beta$ 을 적용시키면, 각각 A 행로는  $\gamma = (0.0078 \pm 0.0001)f^{0.22 \pm 0.01}$ , B 행로는  $\gamma = (0.0226 \pm 0.0002)f^{0.35 \pm 0.01}$ , C 행로는  $\gamma = (0.0034 \pm 0.0001)f^{0.52 \pm 0.03}$ , D 행로는  $\gamma = (0.0033 \pm 0.0001)f^{0.84 \pm 0.01}$ 이라는 결과가 도출된다. 이 결과에 식 (7)을 이용하여  $Q_{Lg}^{-1}$  값을 구하면, 각각 A 행로는  $Q_{Lg}^{-1} = (0.0087 \pm 0.0001)f^{-0.78 \pm 0.01}$ , B 행로는  $Q_{Lg}^{-1} = (0.0252 \pm 0.0002)f^{-0.65 \pm 0.01}$ , C 행로는  $Q_{Lg}^{-1} = (0.0038 \pm 0.0002)f^{-0.48 \pm 0.03}$ , D 행로는  $Q_{Lg}^{-1} = (0.0037 \pm 0.0001)f^{-0.16 \pm 0.01}$ 이 된다. A, B, C, D 행로의  $Q_{Lg}^{-1}$  값을

Chung *et al.* (2005)의 결과와 비교하였다(Fig. 10).

### 토의 및 결론

일본 관측점을 이용하여 긴 SP임에도 불구하고 본 연구결과는 앞서 행하여진 한반도의 조구조 상황과 잘 맞는 결과를 도출하였던 연구(e.g. Chung *et al.*, 2006) 등에 비해 매우 높은 감쇠값이 도출되어 이것은 한반도의 조구조 상황을 반영한 것이라고는 볼 수 없는 결과가 되었다. 이러한 결과에 대한 요인으로 생각할 수 있는 한 가지는 두 관측점법이 일직선 배열이 아닌 경우 진원구의 영향을 받아 값이 왜곡될 수 있다는 점

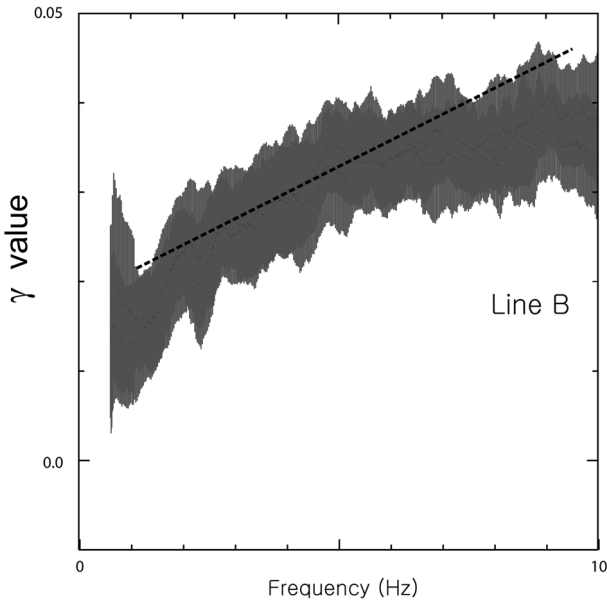


Fig. 7.  $L_g$  attenuation value of  $\times$  (broken line) from the stacked values for Line B.

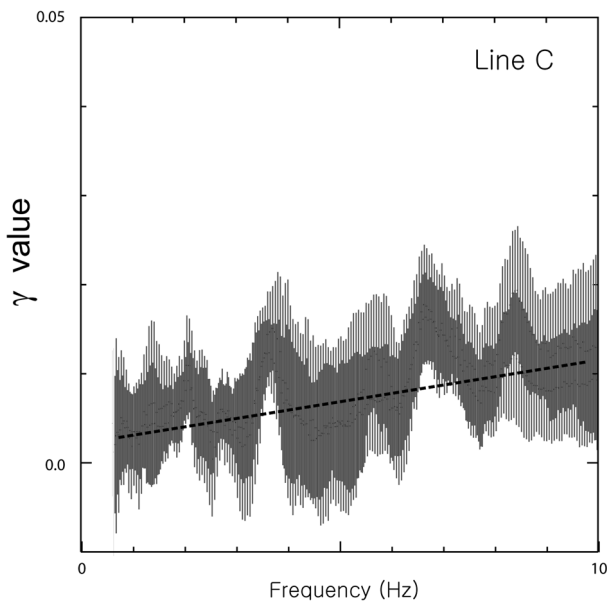


Fig. 8.  $L_g$  attenuation value of  $\times$  (broken line) from the stacked values for Line C.

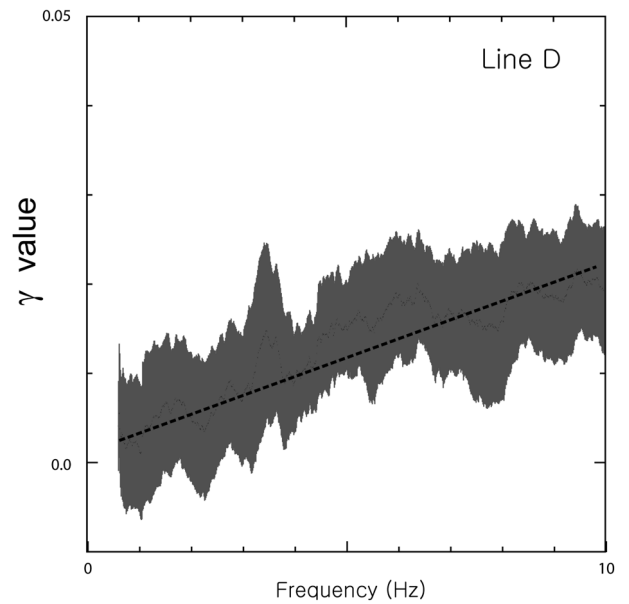


Fig. 9.  $L_g$  attenuation value of  $\times$  (broken line) from the stacked values for Line D.

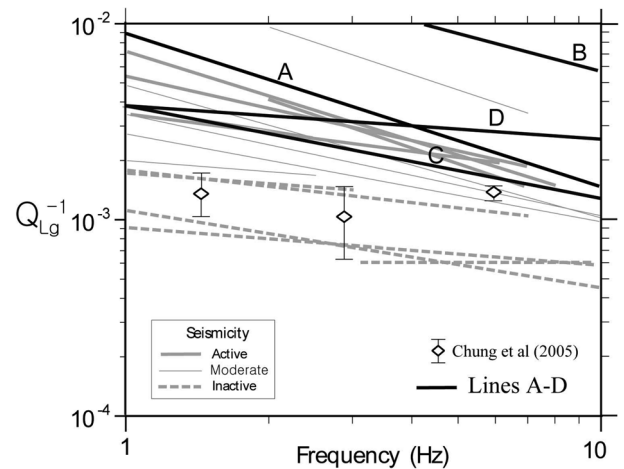


Fig. 10. Comparisons of  $Q_{Lg}^{-1}$  for the results (Line A, B, C, and D), the previous study by Chung *et al.* (2005), and the other region. The values are classified as regions of seismically active (thick solid lines), moderate (thin solid lines), and inactive (broken lines).

이나, 이는 본 연구만큼 자료가 많이 확보된 경우는 상쇄될 수 있는 것으로 판단된다(Chung *et al.*, 2005).

일직선상 배열의 RTSM (Chun *et al.*, 1987)을 창안하고 Shih *et al.* (1994)의 연구를 지도한 Chun (Personal Communication)에 의하면 한반도 지역과 같은 지역적 범위에서 신뢰할 수 있는  $L_g$ 와의 감쇠계수를 구하기 위해서는 관측점과 지진 모두 비슷한 감쇠계수 지역에 놓여야 하는데, 본 연구의 경우 관측점 혹은 지진이 감쇠상수가 매우 클 것으로 여겨지는 일본지역에 놓여 있어서 이의 영향을 받을 가능성이 있다고 하였다. RTSM에 의한 제대로 된 결과를 도출하기 위해서는 지진활성지대인 일본지역의 관측점 혹은 지진을 활용할 것이 아니라, 한반도와 같이 지진활동이 매우 적은 북중국의 지진 안정지역을 포함한 대륙지역의 자료를 활용해야 할 것이다. 본 연구결과에 입각하여 최근 본연구팀은 IRIS의 북중국 관측점 자료와 대륙지진 자료를 위주로 하여 한반도와 중국대륙 및 동해지역의 토모그래픽한  $L_g$ 와 감쇠상수를 도출한 바 있는데 (Chung *et al.*, 2007), 값의 범위는 Chung *et al.* (2005)와 거의 일치하고 있다(Fig. 10).

## 사 사

본 연구 및 원고의 작성에 2008년도 기상지진기술개발사업 (CATER 2006-5104)의 지원이 있었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

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, 사토 하루오, 2000, 덕정리 지진자료를 이용한 한반도 남동부지역의 고주파 P 및 S파 감쇠구조 연구, *대한지구물리학회지*, **3**, 193-200.

정태웅, 사토 하루오, 이기화, 2001, 한반도 남동부 지역 9 관측점 자료의 확장Coda규격화법에 의한 한반도 남동부지역의  $Q_p^{-1}$  및  $Q_s^{-1}$  연구, *한국지구과학회지*, **22**, 500-511.

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

Aki, K., 1980b, Attenuation of shear waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Physics of the Earth and Planetary Interior*, **21**, 50-60.

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

Brigham, E. O., 1974, *The Fast Fourier Transform*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

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

Chung, T. W., and Sato H., 2001a, 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., and Sato H., 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, *Science Report of Thoku University, Series 5*, **36**, 291-294.

Chung, T. W., and Lee, K., 2002, Attenuation of high-frequency  $L_g$  waves around the Yangsan Fault area, the southeast Korea, *Journal of Korean Geophysical Society*, **5**, 1-8.

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., 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.

Chung, T. W., Noh, M. H., and Matsumoto, S., 2006, The attenuation structure of the South Korea: a review, *Journal of Korean Geophysical Society*, **9**, 199-207.

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.

Cooley, J. W., and Tukey, J. W., 1965, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Mathematics of Computation*, **19**(90), 297-301.

Frankel, A., McGarr, A., Bicknell, J. Mori, J., Seeber, L., and Cranswick, E., 1990, Attenuation of high-frequency shear waves in the crust: measurements from New York State, South Africa and southern California, *Journal of Geophysical Research*, **95**, 17441-17457.

Furumura, T., and Kennett, B. L. N., 2001, Variation in regional phase propagation in the area around Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 667-682.

Jin, A., and Aki, K., 1988, Spatial and temporal correlation between coda Q and seismicity in China, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**, 741-769.

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.

Kinoshita, S., 1994, Frequency-dependent attenuation of shear waves in the crust of the southern Kanto area, Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 1387-1396.

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.

Nava, F. A., Garcia-Arthur, R., Castro, R. R., Suárez, C., Márquez, B., Núñez-Cornú, F., Saavedra, G., and Toscano, R., 1999, S wave attenuation in the coastal region of Jalisco-Colima, México, *Physics of the Earth Planetary Interiors*, **115**, 247-257.

Ordaz, M., and Singh, K., 1992, Source spectra and spectral

- attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **82**, 24-43.
- Sato, H., and Fehler, M. C., 1998, *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*, Springer-Verlag New York, Inc. 308 pp.
- Shih, X. R., Chun, K. Y., and Zhu, T., 1994, Attenuation of 1-6 s Lg waves in Eurasia, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 23859-23874.
- Xie, J., Wu, Z., Liu, R., Schaff, D., Liu, Y., and Liang, J., 2006, Tomographic regionalization of crustal Lg Q in eastern Eurasia, *Geophysical Research Letter*, **33**, L03315, doi:10.1029/2005GL024410.