

## Reversed Two Station Method (RSTM)에 의한 중부지방 $Q_{Lg}^{-1}$ 연구

정태웅

세종대학교 지구정보과학과

### 요 약

$Q_{Lg}^{-1}$ 를 구하는 방법 중에서 Chun *et al.* (1987)이 고안한 Reversed two station method (RSTM)는 진앙거리 90 km 이상의  $Lg$ 파에 대하여 시행되고 있다. 진앙거리 95 km 에서 381 km에 이르는 중부지역 지진자료에 대하여 RSTM에 의한  $Q_{Lg}^{-1}$ 를 구한 결과, 비슷한 진앙거리에 대한 동일한 방법으로 얻어진 남한 남동부지역의 값과 비슷한 높은 값이 도출되었다. 남한 남동부 및 중부지방의 높은  $Q_{Lg}^{-1}$ 는 실제와 다른 것으로, RSTM이 본 연구 진앙거리 구간에서는 감쇠율이 표면파 감쇠율 0.5 보다 크기 때문인 것으로 해석된다.

**주요어:** RSTM, 진앙거리,  $Lg$ ,  $Q_{Lg}^{-1}$ , 표면파 감쇠율

**Cheong Tae Woong, 2002, A study of  $Q_{Lg}^{-1}$  by the reversed two station method in the crust of central South Korea. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 5, n. 3, p. 211-218**

**ABSTRACT:** The reversed two station method (RSTM) devised by Chun *et al.* (1987) is widely used to obtain  $Q_{Lg}^{-1}$  for  $Lg$  wave data with hypocentral distance greater than 90 km. By applying RSTM to the  $Lg$  data of central South Korea with hypocentral distance between 95 and 381 km, we obtained high  $Q_{Lg}^{-1}$ . The value of  $Q_{Lg}^{-1}$  is very similar with that of southeastern S. Korea, which is derived from the same method for similar distances. The studied hypocentral range seems to distort  $Q_{Lg}^{-1}$  to high value because decay rate in this range is higher than 0.5, which is typical decay rate of surface wave.

**Key words:** RSTM, hypocentral distance,  $Lg$ ,  $Q_{Lg}^{-1}$ , decay rate of surface wave

(Cheong Tae Woong, Department of Earth Science, Sejong University, Seoul 143-747, Korea, email: chungtw@sejong.ac.kr)

### 1. 서 론

통상  $Lg$ 파는 지역적인 지진기록에서 매우 현저하여 지진학적인 측면에서 뿐만 아니라 구조물의 내진 설계를 고려함에 있어서도 매우 중요하다. 그러므로  $Lg$ 파의 감쇠계수  $Q_{Lg}^{-1}$ 에 대한 연구가 널리 행하여지고 있다(예; Sato · Fehler, 1998).  $Q_{Lg}^{-1}$ 를 구하는 방법 중에서 Chun *et al.*(1987)이 고안한 Reversed two station method(RSTM)는 진앙거리 90 km 이상 867 km 이하에서 나타난  $Lg$ 파의 자료로부터 신뢰성 높은  $Q_{Lg}^{-1}$ 값을 도출하는데 성공한 바 있다. De Miguel *et al.*(1992)는 진앙거리 80 km에서 250 km에 이르는 자료로부터 스페

인 지방의 높은  $Q_{Lg}^{-1}$ 를 보고하였다.

최근 Chung · Lee(2002a)는 남한 남동부지역에서 RSTM 방법에 의해 매우 높은  $Q_{Lg}^{-1}$ 값을 도출하였는데, 이는 같은 장소에서 Chung · Sato (2001)가 구한 낮은  $Q_{Lg}^{-1}$ 값과 모순된다. Chung · Lee(2002a)는 이 지역이 해양성지각으로 이루어진 동해에 인접한 대륙지각 가장자리의 접이지역이기 때문에 지각구조에 민감한  $Lg$ 파의 특성상 일어난 현상으로 해석하였다.

한편, 1999년부터 한국자원연구원(KIGAM)은 남한 남동부뿐만 아니라 중부지방 일대에도 지진관측망을 설치하였고, 최근 Chung · Lee(2002b)는 Coda 확장규격화법(Frankel *et al.*, 1990)에 의해

낮은  $Q_{Lg}^{-1}$  값을 보고하였다. 본 논문은 중부지방 일대의 KIGAM 지진관측망 자료를 이용하여 (Fig. 1) RSTM에 의한 중부지방 일대의  $Q_{Lg}^{-1}$  을 구하고자 한다.

## 2. 자료 및 방법

Chun *et al.*(1987)이 고안한 RSTM은 지진원

과 관측점이 한선상에 놓여있을 때(Fig. 2), 감쇠 상수  $\Upsilon$  및  $Q^{-1}$ 를 다음 식에 의해 도출하게 된다.

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

여기서  $F$  는  $Lg$  파의 스펙트럼 진폭이며,  $d_{i,j}$ 는

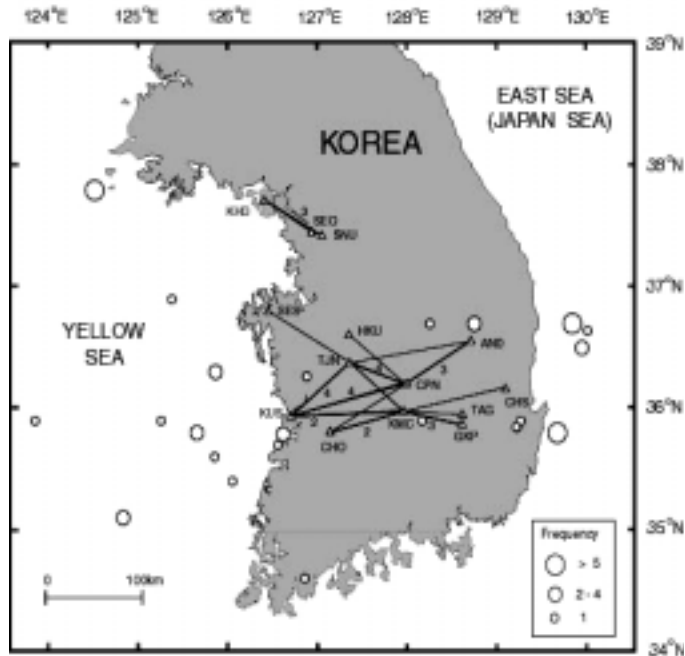


Fig. 1. Map of Korea showing seismic stations (triangles), epicenters (open circles) of 24 earthquakes used in this study. The lines connecting the station pairs are the path segments along which the  $Lg$  attenuation is measured.

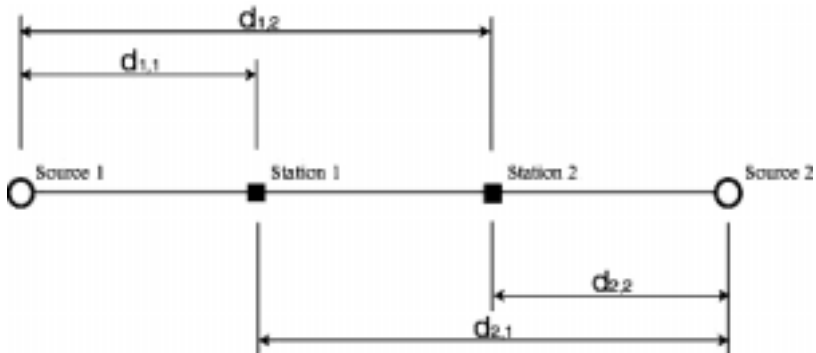


Fig. 2. Schematic figure showing the linear alignment of sources and stations for RSTM.

진원  $i$  에서 관측점  $j$  까지의 거리를 나타내는 한편,

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

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

$f$  는 주파수,  $U$  는 군속도를 의미한다.

본 연구에서는 1999년 4월부터 2001년 11월까지 발생한 24 지진(Table 1) 을 대상으로 하였는데, 그 중 5 지진을 제외한 진원시와 지진원 위치는 한반도 전역에 관측점이 산재한 기상청 자료를

이용하였고, 나머지 지진에 대해서는 KIGAM 자료를 이용하였다. 지진규모는 2.1에서 4.0에 이른다. 관측점에서의 진앙거리는 최소 95 km에서부터 최대 381 km이며 두관측점의 구간거리는 58에서 122 km 이다(Table 2).

모든 자료는 속도지진계의 단주기, 수직 성분에 근거하였다. 지진기록은 초당 100 표본간격이다. Lg 자료의 시간차는 각 기록에서 시작점을 면밀히 측정하고, 끝점은 군속도 2.6 km/sec 로 통일하였다. 이렇게 측정된 군속도는 3.40 에서 3.82 km/sec 이다(Table 2). 각 기록은 평균치와 경향을 제하고 시간차의 양단에 각각 전체 시간차의 5%에 대한 cosine taper 를 적용하였다. Pn 도

**Table 1.** Earthquakes. The frequency indicates how many times each event is used as combinations of RSTM.

Event No.	Date	Origin Time (Hr Min Sec)	Latitude (° N)	Longitude (° E)	Magnitude	Frequency
1	24 Apr. 1999	01 35 14	36.0	129.3	3.3	1
2	2 June 1999	18 12 23	35.9	129.3	4.0	1
*3	17 July 1999	15 22 2	36.3	126.9	2.9	1
*4	12 Sep. 1999	05 56 51	35.8	129.2	3.2	1
5	15 Mar. 2000	01 10 52	36.3	125.9	2.9	3
6	12 Apr. 2000	04 44 1	36.9	125.3	3.9	1
*7	13 Apr. 2000	10 40 57	36.6	130.1	2.8	1
8	29 Apr. 2000	08 53 27	35.8	125.7	3.8	5
9	19 May 2000	01 44 24	36.3	128.5	3.2	1
10	5 Aug. 2000	21 02 59	35.1	124.9	2.7	2
*11	13 Nov. 2000	19 19 57	36.0	123.7	3.0	1
12	2 Dec. 2000	16 53 40	34.6	126.9	3.1	1
13	9 Dec. 2000	18 51 00	36.5	130.0	3.7	3
14	29 Jan. 2001	11 44 7	35.7	126.6	3.0	1
15	17 Apr. 2001	02 42 50	35.4	126.1	2.5	1
16	21 Apr. 2001	02 30 46	35.9	125.3	2.1	1
17	5 May 2001	11 21 20	37.8	124.5	3.3	9
18	27 May 2001	20 24 2	35.8	129.7	2.5	9
19	9 June 2001	00 36 12	36.7	128.8	2.3	2
*20	29 June 2001	11 21 9	35.8	126.7	3.2	2
21	24 Aug. 2001	11 12 3	35.9	128.2	3.1	1
22	15 Sep. 2001	02 32 42	35.6	125.9	2.2	1
23	21 Nov. 2001	10 49 11	36.7	128.3	3.5	1
24	24 Nov. 2001	16 10 32	36.7	129.9	4.1	13

\*from KIGAM

**Table 2.** Station pairs.

Event	Station		Lg Velocity (km/sec)		Epicentral Distance (km)		Azimuth ( $^{\circ}$ )		Interstation Distance (km)
	Near	Far	Near	Far	Near	Far	Near	Far	
No.									
1	SNU	KHD	3.50	3.53	264	322	308	306	58
2	SNU	KHD	3.65	3.62	271	329	309	308	57
3	KMC	GKP	3.53	3.58	98	158	109	106	60
4	KMC	CHO	3.50	3.54	119	189	277	269	71
5	TJN	AND	3.50	3.52	132	253	86	83	122
5	TJN	CPN	3.50	3.54	132	188	86	93	57
5	CPN	AND	3.54	3.52	188	253	93	83	65
6	TJN	KMC	3.67	3.69	198	262	107	113	64
7	CHS	KMC	3.40	3.59	102	204	240	249	103
8	CHO	KMC	3.60	3.64	132	204	89	84	72
8	KUS	TJN	3.72	3.61	105	163	77	67	58
8	KMC	GKP	3.64	3.61	204	263	84	88	59
8	KUS	KMC	3.72	3.64	105	204	77	84	99
8	KUS	CPN	3.72	3.58	105	212	77	77	107
9	SNU	KHD	3.68	3.69	188	245	313	310	57
10	CPN	AND	3.73	3.61	306	381	66	65	74
10	CHO	CPN	3.64	3.73	220	306	69	66	87
11	KUS	CPN	3.78	3.80	265	370	87	85	105
12	CPN	AND	3.82	3.80	205	273	29	37	68
13	CPN	KUS	3.57	3.61	183	290	260	259	107
13	CPN	CHO	3.57	3.68	183	267	260	254	84
14	KMC	TAG	3.44	3.52	126	184	76	84	58
15	KUS	TJN	3.48	3.53	95	157	44	47	62
16	KUS	KMC	3.50	3.58	139	239	85	88	100
17	KHD	SNU	3.48	3.57	166	220	94	100	54
17	KHD	SEO	3.48	3.63	166	219	94	97	53
17	TJN	KMC	3.78	3.72	300	367	122	123	68
17	HKU	CPN	3.78	3.69	286	357	118	120	71
17	TJN	CPN	3.78	3.69	300	357	122	120	57
17	SES	TJN	3.82	3.78	206	300	123	122	93
18	GKP	KMC	3.44	3.61	99	160	276	277	61
18	KMC	TJN	3.61	3.57	160	220	277	287	60
18	TAG	KMC	3.47	3.61	98	160	275	277	62
18	CPN	HKU	3.52	3.56	161	229	287	293	68
18	CPN	TJN	3.52	3.57	161	220	287	287	59
19	TJN	KUS	3.49	3.48	134	192	254	247	59
20	KMC	CHS	3.51	3.53	123	229	81	79	105
20	KMC	GKP	3.51	3.57	123	182	81	87	59
21	TJN	SES	3.56	3.60	92	185	305	302	93
22	CHO	KMC	3.29	3.46	116	190	78	77	74
23	SEO	KHD	3.59	3.60	153	204	309	303	51
24	AND	TJN	3.36	3.55	108	230	262	261	122
24	CPN	TJN	3.52	3.55	179	230	253	261	51
24	AND	CPN	3.36	3.52	108	179	262	253	72
24	TJN	KUS	3.55	3.48	230	286	261	255	56
24	KMC	KUS	3.49	3.48	193	286	246	255	93
24	CPN	KUS	3.52	3.48	179	286	253	255	106
24	SNU	KHD	3.59	3.54	275	332	288	290	57

**Table 3.** Combinations. The number in parentheses indicates the frequency of each station closest to the source.

Combination No.	Stations	Events	Average Interstation Distance(km)
1-3	KMC(3)-GKP(1)	3-18, 8-18, 20-18	60
4-5	KMC(1)-CHO(2)	4-8, 4-22	72
6	KMC(1)-TAG(1)	14-18	60
7-8	KMC(1)-TJN(2)	18-6, 18-17	63
9	KMC(1)-CHS(1)	20-7	104
10-11	KMC(1)-KUS(2)	24-8, 24-16	96
12-14	CPN(3)-AND(1)	5-24, 10-24, 12-24	70
15-18	CPN(2)-KUS(2)	13-8, 13-11, 24-8, 24-11	106
19	CPN(1)-CHO(1)	13-10	85
20-23	CPN(2)-TJN(2)	18-5, 18-17, 24-5, 24-17	56
24	CPN(1)-HKU(1)	18-17	69
25	TJN(1)-AND(1)	5-24	122
26-29	TJN(2)-KUS(2)	19-8, 19-15, 24-8, 24-15	59
30	TJN(1)-SES(1)	21-17	93
31-34	KHD(1)-SNU(4)	17-1, 17-2, 17-9, 17-24	55
35	KHD(1)-SEO(1)	17-23	52

달시간 전의 시간창에 대하여 잡음 스펙트럼도 동일한 방법으로 도출하여 자료의 유효성을 검사하였다.

진원-관측점 선상에서 10도 이내에 해당되는 관측점간 단일방향 자료는 16 이며, 여기서 양방향의 5가지 행로에 대한 35 조합을 구축하여 해석하였다(Table 3).

### 3. $L_g$ 감쇠상수의 측정

지진기록 자료는 주파수 간격 0.234 Hz 로 단순이동 평균으로 평활화하여 35 관측자료의  $\Upsilon(f)$  를 0.6 에서 30 Hz 까지 도시하였다(Fig. 3). 그리고, 관측점간 거리에 비례한 가중치를 부여하여 전 관측치에 대한 평균  $\Upsilon$  치를 구하였다. 적용된 방법은 Chun *et al.*(1987) 과 동일하다.

Chun *et al.* 은  $\Upsilon$  를 0.6에서 10 Hz 구간에 대하여 최소자승법을 적용하여  $f$  에 따라 변화하는  $\Upsilon$  를 도출하였다. 10 Hz 이상에서는  $S_n$  으로 기인되는 잡음이 증폭되어 값이 급격히 변하는 것이 관찰되었고, 따라서 연구대상에서 제외되었

다. 본 연구에서도  $\Upsilon$  의 평균경향(Fig. 3)이 10 Hz 근방을 경계로 변화하는 것이 관찰되어,  $\Upsilon$  를 0.87 에서 10 Hz 구간에 대해서만 최소자승을 적용하였다. 본 연구에서는 0.6Hz 대신 0.87 Hz 를 최소치로 정하였는데, 이는 평균치  $\Upsilon$  가 음수값이 되는 것을 피하기 위함이다.

도출된  $L_g$  감쇠값은  $\Upsilon = (0.015 \pm 0.0002) f^{0.27 \pm 0.01}$  로, 남부지방의 값  $\Upsilon = (0.009 \pm 0.0005) f^{0.60 \pm 0.03}$  과 비슷한 높은 감쇠값이 나왔다. 일반적으로  $L_g$  균속도는 3.5 km/sec 에 가까워서(see e.g. Campillo, 1990),  $Q^{-1}$  를 구할때의 균속도  $U$  값을 3.5 km/sec로 하였으며, 얻어진 값은  $Q_{lg}^{-1} = (0.017 \pm 0.0002) f^{-0.73 \pm 0.01}$  이다(Fig. 4).

### 4. 토 의

본 결과와 한국남동부 지방의  $Q_{lg}^{-1}$  측정치를 세계 다른 지역 값과 비교하였다(Fig. 4). 세계 다른 지역은 지진학적으로 활성지역, 안정지역 및 두 지역의 점이지대의  $Q_{lg}^{-1}$  값으로 잘 구분, 대비되는 모습을 보이고 있다. Domínguez *et al.*(1997) 이

멕시코 태평양 섭입지대에서 측정된 값은 활성지역 값 중에서도 가장 높은  $Q_{Lg}^{-1}$  값을 보이고 있는 반면(M in Fig. 4), Shi *et al.*(1996)이 캐나다 순상지지역인 Adirondack 산맥에서 측정된 값은 안정지역의  $Q_{Lg}^{-1}$  값중에서 가장 낮은 값을 보여주

고 있다(A in Fig. 4). 또한, Frankel *et al.*(1990)은 지진학적으로 안정지역인 뉴욕지방과 지진활동이 왕성한 남캘리포니아 지역에서 큰 값의 차이를 3 Hz의  $Q_{Lg}^{-1}$  값에서 보고하였다(○ in Fig. 4). Aki(1980)는 이러한  $Q_{Lg}^{-1}$  값의 차이가 지각내의

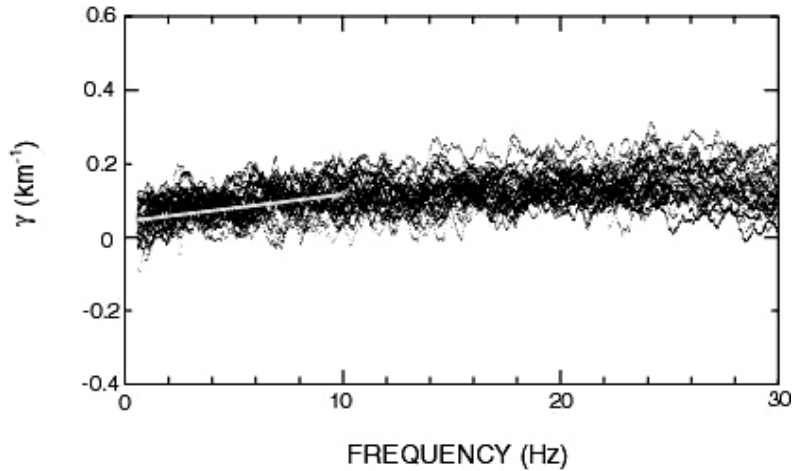


Fig. 3.  $\gamma(f)$  values for the 35 combinations (Table 3) from 48 individual interstation passages (Table 2) with least square fitting lines.

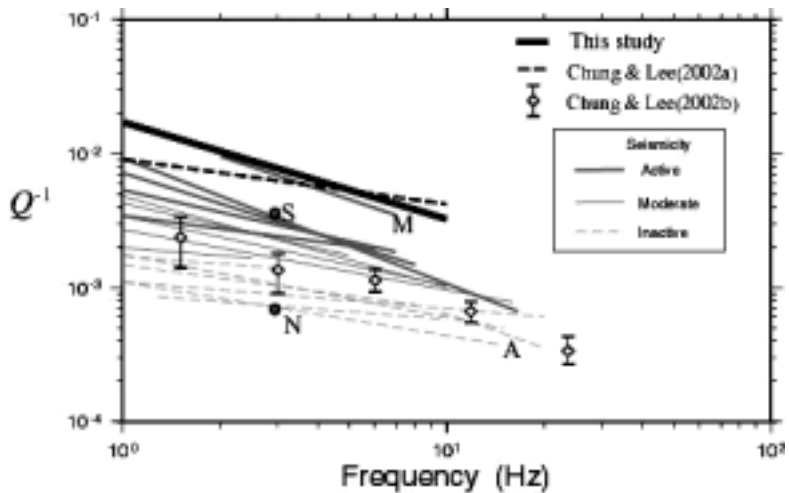


Fig. 4. Comparison of  $Q_{Lg}^{-1}$  with other studies. Open circles designated by S, N refer to  $Q_{Lg}^{-1}$  of 3 Hz in southern California, and New York State (Frankel *et al.*, 1990), respectively. Frequency dependent values are classified as regions of seismically active (thick solid lines), moderate (thin solid lines), and inactive (broken lines). The lines remarked by M, and A denote the value of subduction zone in Mexico (Domínguez *et al.*, 1997), and Adirondack mountains in United States (Shi *et al.*, 1996).

균열에 기인하는 것으로 설명하였다.

본 연구 및 남한 남동부의  $Q_{Lg}^{-1}$  값은 지진학적 활성지역 중에서도 높은  $Q_{Lg}^{-1}$  값에 해당되는데, 한반도 남동부에 대하여는 Chung · Sato (2001)가 매우 낮은 수준의  $Q_s^{-1}$  값을 도출한 바 있다. 남한 남동부 지역의 높은  $Q_{Lg}^{-1}$  값은 지진학적 활성에 의한 균열효과가 아니라, 전형적인 해양지각인 동해에 조사지역이 가까운 연고로 해양지각에서의  $Lg$  차단효과에 의한 것으로 판단한 바 있다(Chung and Lee, 2002a). 중부지역의 경우도 경로에 따라 소백산맥을 가로지르는 등 차단효과의 가능성을 완전히 배제할 수는 없으나, 진앙거리가 비슷한 두 연구 지역에서 비슷하게 높은  $Q_{Lg}^{-1}$  값이 나오는 것으로 보아 이를  $Lg$  차단효과로 보는 것은 부자연스럽다.

Ou · Herrmann(1990) 은 200 km 이하의 짧은 진앙거리에서는 거리에 따른 감쇠율이 표면파의 감쇠율 0.5 보다 큰 것을 보였으며 Atkinson · Mereu(1992) 도 130 km 이하에서의 큰 감쇠율을 확인하였다. 캐나다 순상지의 낮은  $Q_{Lg}^{-1}$  값 (Shi *et al.*, 1996)은 1300 km에 이르는 긴 진앙거리 자료에 연유하는 것으로 보인다. Chun *et al.*(1987)이 제안한 공식은 표면파 감쇠율 0.5를 적용하였으므로, 좀 더 먼 거리의 자료를 해석할 필요가 있다. 최근 Chung · Lee(2002b) 는 Coda 규격화법에 의해 매우 낮은  $Q_{Lg}^{-1}$  값을 보고하였다(◇ in Fig. 4). 그러나, 한반도에서 일어나는 지진을 RSTM에 해당되는 나란한 자료를 고를 경우, 긴 거리의 자료를 확보하는 것은 매우 어렵다. 향후 다른 해석법에 의한 긴 진앙거리에 대한  $Lg$  감쇠효과를 검증할 필요성이 있다.

## 5. 결론

$Q_{Lg}^{-1}$ 를 구하는 방법 중에서 Chun *et al.*(1985)이 고안한 RSTM은 진앙거리 90 km 이상의  $Lg$  파에 대하여 시행되고 있다. 남한 남동부지역에서 RSTM에 의해 얻어진 높은  $Q_{Lg}^{-1}$  값이 동해에 인접한 접이지역에 의한 차단효과로 해석된 바 있으나(Chung · Lee, 2002a), 본 연구에 의한 중부지역  $Q_{Lg}^{-1}$ 도 매우 높은 값이 도출되었으며, 또한

동지역에서 Chung · Lee(2002b)는 Coda 규격화법에 의해 낮은  $Q_{Lg}^{-1}$  값을 보고하였다. 이는 진앙거리가 짧은 경우, 거리에 따른 감쇠율이 표면파의 감쇠율 0.5 보다 크기 때문인 것으로 해석된다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호: 1999-2-311-005-3)의 지원에 의해 수행되었으며, 일부 한국과학기술부 자연재해방재기술사업 ‘지진원 및 지진파 전달특성 연구(과제번호 006109)’의 지원이 있었다.

## 참고문헌

- Aki, K., 1980, Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere, *Journal of Geophysical Research*, 85, 6496-6504.
- Campillo, M., 1990, Propagation and attenuation characteristics of the crustal phase  $Lg$ , *Pure and applied Geophysics*, 132, 1-9.
- Atkinson, G.M., and Mereu, R., 1992, The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada, *Bulletine of the Seismological Society of America*, 82, 2014-2031.
- 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, *Bulletine of the Seismological Society of America*, 77, 398-419.
- Chung, T.W., and Sato, H., 2001, Attenuation of high-frequency P- and S-waves in the crust of the southeastern Korea, *Bulletine of the Seismological Society of America*, 91, 1867-1874.
- Chung, T.W., and Lee, K., 2002a, Attenuation of High-Frequency  $Lg$  Waves around the Yangsan Fault area, the Southeast Korea, *Journal of the Korean Geophysical Society*, 5, 1-8.
- Chung, T.W., and Lee, K., 2002b, Attenuation of High-Frequency  $Lg$  Waves in the Crust of South Korea, *Bulletine of the Seismological Society of America*, in submitted.
- De Miguel, F., Ibáñez, J.M., Alguacil, G., Canas, J.A., Vidal, F., Morales, J., Pea, J.A., Posadas, A.M., and Luzn, F. 1992, 1-18 Hz  $Lg$  attenuation in the Granada Basin (southern Spain), *Geophysical Journal International*, 111, 270-280.
- Domínguez, T., Rebollar, C.J., and Castro, R.R., 1997,

- Regional variations of seismic attenuation of Lg waves in southern Mexico, *Journal of Geophysical Research*, 102, 27501-27509.
- 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.
- Ou, G. B., and Herrmann R.B., 1990, Statistical model for ground motion produced by earthquakes at local and regional distances, *Bulletine of the Seismological Society of America*, 80, 1397-1417
- Sato, H. and Fehler, M.C., 1998, *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*, Springer-Verlag New York, Inc., 308 pp.
- Shi, J., Kim, W.Y. and Richard, P.G., 1996, Variability of crustal attenuation in the northeastern United States from Lg waves, *J. Geophys. Res.* 101, 25231-25242.
- 

2002년 7월 19일 원고접수

2002년 9월 23일 원고채택