

# 한반도 및 주변지역 지진 모서리 주파수의 거리 종속성

## Distance Dependency of Corner Frequencies for Earthquakes in and around the Korean Peninsula

신진수<sup>1)</sup> · 강태섭<sup>2)</sup>

Shin, Jin Soo · Kang, Tae-Seob

**국문 요약** >> 2006년과 2007년에 한반도 및 주변지역에서 발생한 85개 지진( $1.6 \leq M_L \leq 4.9$ )의 지진원 상수에 대하여 반복 스펙트럼 역산법을 적용하여 분석하였다. 지진자료는 한반도 남부지역의 광대역관측소 3성분 기록으로부터 추출한 487개의 S-파군으로 구성되어 있다. 지진파 스펙트럼 분석을 통하여 각 지진에 대한 모멘트규모를 결정하고, 이를 진원거리에 따른 모서리 주파수의 변화에 대비하였다. 모서리 주파수는 진원거리가 증가함에 따라서 감소하는 경향이 있고, 이러한 경향은 모멘트규모가 커질수록 줄어든다. 변위 스펙트럼에서 측정된 모서리 주파수를 겹보기 모서리 주파수로 정의하였다. 이러한 겹보기 모서리 주파수의 거리 종속성은 세계적으로 동부 캐나다 순상지와 발트 순상지에서 보고된 바 있으나, 아직까지 그 원인은 명확하지 않다.

**주요어** 스펙트럼 분석, 모멘트규모, 모서리 주파수, 거리 종속성

**ABSTRACT** >> The source parameters of 85 events ( $1.6 \leq M_L \leq 4.9$ ) that occurred in and around the Korean Peninsula during 2006 and 2007 were analyzed by an iterative spectral fitting procedure. The data set consists of 487 S-wave trains on three-component seismograms recorded at broadband seismograph stations in the southern part of the Korean Peninsula. Moment magnitudes for each event were determined using spectral analyses of the seismograms, and the results were compared with the variation in corner frequencies with hypocentral distance. Corner frequencies have a tendency to decrease with increases in hypocentral distance, and the decrease is smaller the larger the moment magnitude. We define the measured corner frequency on a displacement spectrum as the apparent corner frequency. Although it was reported that the distance dependency of the corner frequency was found in some regions, such as the eastern Canadian Shield and the Baltic Shield, the origin of the phenomenon is not certain yet.

**Key words** spectral analysis, moment magnitude, corner frequency, distance dependency

### 1. 서론

지진활동도가 약한 판내부 지진환경 지역에서는 강지진의 재래주기가 상대적으로 길며 지진기록을 확보하기 위해서도 많은 노력과 시간이 소요된다. 이러한 지역에서 지진 재해도를 예측하기 위해서는 일정한 수준 이상의 피해를 야기할 수 있는 강지진의 특성을 예측하는 것이 무엇보다 중요한 과제이다. 대규모 지진의 기록이 없는 지역에서 강지진 특성은 해당 지역에서 발생하는 소규모 지진 기록으로

부터 파악한 지진원 및 지진파의 전달 특성을 외삽하여 간접적으로 유추하는 방법이 활용될 수 있다.<sup>(1)</sup>

지진동의 특성은 지진 규모와 진원 거리에 따른 시간 또는 주파수 영역에서의 변화로 표현될 수 있다. 지진기록은 지진원으로부터 지진파가 전파하는 매질 내에서의 반사와 굴절과 같은 변화, 전파 거리 및 매질의 비탄성 특성에 따른 효과와 특정한 주파수 대역을 갖는 지진계 응답특성이 반영되는 일련의 필터링 과정에 대한 시간영역의 결과물이다. 이러한 과정은 간단한 수학적 원리를 통하여 주파수 영역에서 각각의 효과를 곱으로 표현할 수 있다. 지진기록을 표현하기 위하여 도입된 이들 세 가지 효과들 중에서, 지진파의 전파 효과는 매질의 특성에 좌우되므로 주어진 매질의 기하학적인 구조와 물리적인 성질에 따라서 1차원 및 다차원의 해를 구하는 것이 가능하다. 지진파의 전파는 보다 세부적

<sup>1)</sup> 정희원·한국지질자원연구원, 선임연구원  
(대표저자: jinsoo@kigam.re.kr)

<sup>2)</sup> 정희원·한국지질자원연구원, 선임연구원

본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 9. 5 / 수정일 : 2008. 9. 16 / 게재확정일 : 2008. 9. 16)

으로 광역적인 지진파 전달효과와 관측소 하부에서 비탄성 거동, 낮은 전단파 전파 속도 및 공진 등에 의한 부지효과로 세분화될 수 있다. 지진계를 통한 응답 또한 인위적으로 설정되어 있으므로 입력파형에 대한 출력파형의 형태를 미리 예상할 수 있다. 이와 같이 매질을 통한 전파와 지진계의 응답은 결정론적인 특성을 갖는 반면, 지진원의 특성은 미리 예상하기가 어렵기 때문에 강지진동 모사에 있어서 가장 중요하게 다루어야 할 항목이다.

강지진동 모사를 위한 지진원 설정은 일반적으로 Brune<sup>(2)</sup>에 의하여 제시된 지진원 스펙트럼 모델을 구성하는 과정으로부터 시작한다. 지진원 스펙트럼 모델은 모서리 주파수, 지진모멘트, 단층의 면적과 파괴시 예상되는 응력강하량 등과 같은 지진원 상수들로 구성된다. Kanamori와 Anderson<sup>(3)</sup>은 큰 규모의 지진에 대한 지진원 상수들 사이의 관계를 조사하여, 지진모멘트와 단층면적 및 응력강하량 사이에 일정한 관계가 있음을 제시하였다. 즉 지진모멘트는 단층면적과 비례하며, 특정한 지역에서의 응력강하량은 지진모멘트의 크기에 관계없이 일정한 것으로 알려졌다. 그러나 이러한 결과는 규모 6 이상의 큰 지진에 대한 결과이기 때문에, 과연 그 보다 작은 지진에서도 이러한 비례관계가 성립될 수 있는지가 또 다른 문제로 대두되어 현재까지도 세계 다양한 지역에서 조사가 진행되고 있다. 또한 응력강하량의 상수 여부에 대한 고찰뿐만 아니라, 지역별로 이들 값이 어떻게 변화하는 지에 대한 연구 또한 중요한 대상이다. 주어진 응력강하량에 대하여 지진에너지의 크기에 직접적인 상관이 있는 단층의 면적요소는 지진원 스펙트럼에서 모서리 주파수의 변화로 나타난다. 즉, 균질한 매질을 가정할 때, 단층 운동으로 인한 매질의 관성작용의 범위는 단층면적이 거동하는 범위에 비례한다. 따라서 단층면적이 클수록 긴 주기의 변위성분이 많이 포함되어, 지진원 변위 스펙트럼의 주파수 범위에서 저주파 성분을 많이 포함하게 된다.

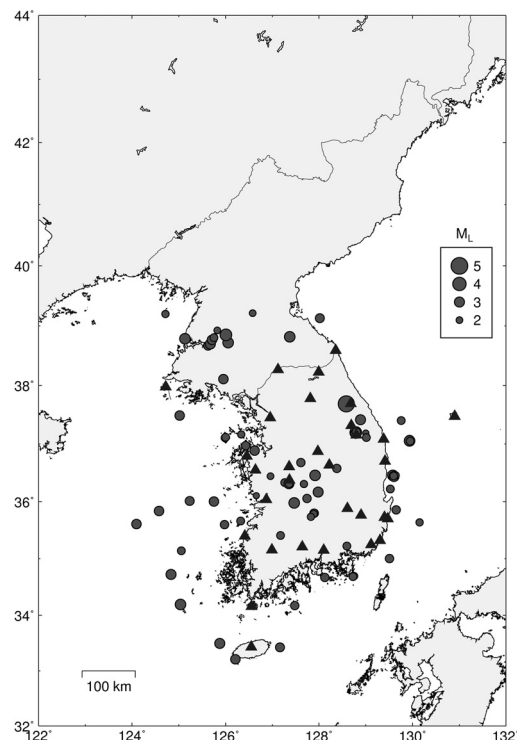
이러한 특성들이 작은 지진에 대해서도 확장될 수 있는지에 대한 연구는 Brune<sup>(2)</sup>의 진원 모델로 예측되는 전단파의 변위 스펙트럼과 원거리 영역에서 지각내 다중 반사에 의하여 발달되는 Lg파의 스펙트럼 비교를 통하여 진행되었다.<sup>(4-6)</sup> 한반도 및 주변지역에서 발생한 지진에 대한 지진원 상수 분석 연구는 지금까지 다양하게 진행되어 왔으나<sup>(7-11)</sup>, 동일한 지진에 대하여 결정된 지진원 상수 값, 특히 응력강하량이 연구자들 사이에 다양하게 제시되어 있어서 그 원인에 대한 별도의 검토가 필요한 실정이다. 이 연구의 목적은 한반도 남부지역에서 발생한 소규모 지진들에 대하여 지진원 상수의 유사성과 이들 사이에 존재할 수 있는 경험적인 관계를 도출하고, 이 지역에서의 지진원 특성에 대한 상관관

계를 검토하는 것이다. 또한 지진원 스펙트럼 분석을 통하여 모멘트규모를 결정하여 한반도에서 일관된 지진규모 목록을 작성하기 위한 시도가 이 연구에 대한 별도의 지향점이다.

## 2. 자료와 방법

국내 지진관측망 분포를 중심으로 2006년과 2007년에 발생한 85개의 지진에 대하여 기상청과 한국지질자원연구원에서 운영하는 광대역 지진관측소에서 기록된 자료를 사용하였다(그림 1). 지진규모( $M_L$ )의 범위는 한국지질자원연구원에서 발표하는 지진목록<sup>(12)</sup>을 기준으로 1.6에서 4.9에 이른다. 지진원 상수를 계산하기 위하여 사용된 지진의 진앙과 깊이는 별도의 재결정을 수행하지 않고 발표목록에서 제시된 값을 사용하였다.

각각의 지진과 관측소 사이의 파선을 가정하였을 때 모두 487개의 기록이 분석에 사용되었다. 스펙트럼 분석을 수행하기 전에 지진기록의 경사, 기준선 및 계기 보정을 실시하였다. 지진기록의 세 성분에 대하여 S-파 도달시간을 수동으로 결정하고 이 시간으로부터 163.84초까지의 구간을 설정하여 양 끝단에 5%의 코사인 감쇠필터를 적용하였다. 각각의 성분을 푸리에 변환 후, 주파수 영역에서 적분을 실시하고 세 성분의 벡터 합성을 통하여<sup>(13)</sup> 최종적인 전단파 변



〈그림 1〉 Epicenter location (circles) and broadband seismograph stations (triangle)

위 스펙트럼을 생성하였다.

지진기록의 변위 스펙트럼으로부터 응력강하량과 모서리 주파수 및 저주파 스펙트럼 수준의 계산을 위하여, Andrews<sup>(14)</sup>와 Snook<sup>(15)</sup>의 방법이 사용될 수 있다. 이후 조남대와 박창업<sup>(1)</sup>은 이러한 방법을 개선한 반복계산법을 고안하였으며, 이 방법으로 이전 방법에 비하여 모서리 주파수 및 저주파 스펙트럼 수준과 응력강하량을 더욱 안정적으로 계산할 수 있게 되었다. 이 연구에서는 조남대와 박창업<sup>(1)</sup>의 반복계산법을 사용하였다. 그림 2는 두 개의 지진에 대한 세 성분 기록과 변위 스펙트럼 분석을 통하여 도출된 관측 스펙트럼에 부합하는 이론적인  $\omega^2$  스펙트럼을 제시하고 있다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 모멘트 규모

국지적인 영역에서 운영되는 지진관측망의 기록으로부터 지진의 크기를 정량화하기 위하여 일반적으로 지역규모( $M_L$ )를 사용한다. 지역규모는 시간영역의 지진기록으로부터 진폭을 측정하고, 이를 진앙거리 및 관측영역에 적절한 상수값을 이용하여 보정함으로써 계산된다. 이러한 지역규모식은 관측시기에 따라 사용된 지진계의 차이 및 각 관측기관 별로 고유하게 경험적으로 유도된 보정상수값 등의 차이 때문에, 지진목록이 작성된 시기 또는 지진관측망이 운영되는 지역에 따라 동일한 지진에 대하여 서로 약간의 차

이가 발생하는 경우가 빈번하다. 또한 지역규모식은 지진의 규모에 상관없이 지진기록 상의 최대진폭에 대한 의존도가 매우 크기 때문에, 단층 지진원으로부터 방출되는 지진파의 주파수 특성이 제대로 반영되지 못하는 단점이 있다.

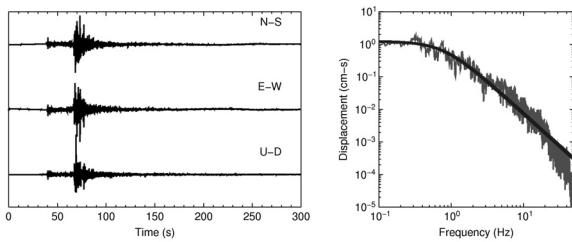
단층 지진원은 그 크기에 따라 주파수별 진폭값이 일정하게 유지되는 주파수 상한값이 달라진다. 주파수 상한값을 초과하는 크기의 지진에 대하여 지역규모는 그 크기를 적절히 반영하지 못하게 되며, 이러한 현상을 규모 포화(Magnitude Saturation)라고 한다. 규모의 포화는 시간영역 지진기록의 진폭을 측정함으로써 계산되는 지역규모( $M_L$ ), 실체파규모( $m_b$ ) 및 표면파규모( $M_s$ )에서 예견될 수 있는 일반적인 현상이다. 따라서 이러한 규모 포화에 대한 결함을 제거하고, 관측지점에 고유한 보정값에 의존하는 대신 단층 지진원 자체의 특성을 반영하여 지진의 크기를 정량화하는 것이 바람직하다.

지진의 크기를 정량화하기 위하여, 단층 면적과 변위 및 응력강하의 함수로 표현되는 단층 지진원으로부터 에너지의 방출량을 고려할 수 있으며, 이를 정량화하기 위한 물리량으로서 지진모멘트( $M_0$ )가 사용된다. 지진모멘트를 규모에 연관시킨 것이 모멘트규모( $M_w$ )이므로, 이 규모는 명확하게 지진원의 물리적 특성과 연관된다. 진원함수에 대하여 Brune<sup>(2),(16)</sup>은 지진모멘트와 모서리 주파수로 표현되는 이론적인  $\omega^2$  스펙트럼을 제시하였다. 이에 따르면, 모서리 주파수는 다음과 같이 지진의 응력강하량과 지진모멘트에 대한 상관관계를 갖는다.

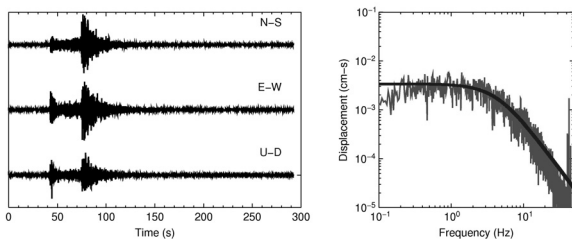
$$f_c = 4.9 \times 10^6 (\Delta\sigma/M_0)^{1/3} \quad (1)$$

여기서  $\beta$ 는 진원지의 전단파 속도이며, 응력강하량( $\Delta\sigma$ )과 모서리 주파수( $f_c$ )는 앞에서 서술한 방법으로 관측 스펙트럼을 이용하여 직접 계산할 수 있다. 각 지진에 대한 지진원 상수를 결정하기 위하여 사용되는 수식은 그 동안의 다양한 선행 연구들에 소개된 바 있기 때문에 여기서 반복하지 않으며, 이에 필요한 기본적인 상수로 이 연구에서는 지진파 에너지 발산효과를 표현하기 위하여  $\sqrt{2/5}$ 를 사용하였으며, 진원지의 전단파 속도와 밀도는 각각  $3.5\text{km/s}$ 와  $2.7\text{g/cm}^3$ 로 가정하였다. 또한 감쇠효과를 보정하기 위하여, 한반도 남부지역에서 발생한 지진에 대한 연구 결과<sup>(17)</sup>인  $Q(f) = 229.2f^{0.73}$ 을 사용하였다.

관측스펙트럼의 응력강하량 및 모서리 주파수 계산을 통하여 지진모멘트가 결정되면 이는 다음과 같은 지진모멘트와 모멘트규모 사이의 관계식<sup>(17)</sup> 식 (2) 이용하여 최종적인 모멘트규모로 환산할 수 있다.



(a) 20 January 2007,  $M_L = 4.9$ , recorded at Naporí (NPR) at a distance of 239 km.



(b) 4 October 2007,  $M_L = 3.0$ , recorded at Hongseong (HSB) at a distance of 266 km. Amplitudes are normalized to the maximum of each station.

〈그림 2〉 Three-component seismograms and corresponding displacement amplitude spectra.

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (2)$$

각 지진에 대한 지진모멘트는 해당 지진에 대하여 사용된 모든 관측소 기록으로부터 도출되는 지진모멘트를 평균하

여 얻을 수 있다. 이 연구에서 결정된 지진모멘트의 결과를 표 1에 제시하였다. 모멘트규모 결정 결과 중에서 몇 개의 지진을 대상으로 여타 연구의 결과와 비교할 수 있다. 대표적으로 2007년 1월 20일 발생한 오대산지진의 지진원 요소

〈표 1〉 Earthquake data set (continued)

Date-Time	Epicenter		$f_0$	$M_0$	$M_w$	$M_L$	$N_{obs}$
	Latitude	Longitude					
2006/01/19-12:35	37.1988	128.7817	3.52	0.43540E+15	3.74	3.5	3
2006/01/19-22:53	37.1840	128.7662	6.83	0.33157E+13	2.32	1.6	4
2006/01/21-11:29	36.3337	127.2646	7.22	0.82461E+13	2.54	2.3	6
2006/02/14-03:31	38.7226	126.0540	3.17	0.58958E+14	3.16	3.2	4
2006/02/28-00:11	35.8004	127.8938	6.26	0.16056E+14	2.75	2.6	9
2006/02/28-18:52	36.3093	127.6779	7.03	0.56232E+13	2.45	2.2	6
2006/03/10-05:57	33.4261	127.1656	5.61	0.25188E+14	2.90	2.7	3
2006/03/11-04:52	37.1060	125.9854	6.17	0.13257E+14	2.70	2.4	5
2006/03/15-04:36	38.1061	125.9502	4.71	0.27768E+14	2.92	2.8	4
2006/03/19-13:59	36.3131	127.3517	4.55	0.45264E+14	3.05	3.1	9
2006/03/19-14:03	36.3108	127.3574	7.71	0.43334E+13	2.36	2.2	4
2006/03/23-07:42	38.8201	127.3728	3.58	0.41632E+14	3.04	3.2	4
2006/03/26-07:54	35.6637	126.3212	5.80	0.81111E+13	2.55	2.4	8
2006/04/02-00:04	35.4102	127.1747	6.41	0.66832E+13	2.50	2.3	7
2006/04/03-18:14	38.8514	126.0079	3.02	0.10857E+15	3.33	3.5	6
2006/04/13-01:09	34.7239	124.8338	3.82	0.34329E+14	2.98	3.0	4
2006/04/19-09:35	37.0541	129.9193	5.01	0.10255E+14	2.59	2.2	3
2006/04/19-09:49	37.0685	129.9337	3.20	0.60922E+14	3.09	2.8	2
2006/04/19-10:57	37.0634	129.9308	4.99	0.16949E+14	2.75	2.4	3
2006/04/19-16:01	37.0583	129.9234	4.52	0.27526E+14	2.86	2.3	3
2006/04/19-16:18	37.0483	129.9175	5.17	0.66171E+13	2.48	2.0	2
2006/04/28-23:54	37.0542	129.9318	4.38	0.37124E+14	2.88	2.5	3
2006/04/30-09:50	37.0468	129.9450	5.67	0.20532E+14	2.84	2.4	3
2006/05/08-06:59	36.2249	129.5254	5.81	0.10467E+14	2.62	2.3	6
2006/06/01-11:58	34.6693	128.1230	5.46	0.14110E+14	2.72	2.6	5
2006/07/18-14:49	36.1052	126.6580	6.94	0.42465E+13	2.35	1.9	6
2006/07/24-02:44	37.1620	126.3345	6.17	0.47821E+13	2.43	2.2	6
2006/07/25-23:29	35.8028	127.8888	5.86	0.23636E+14	2.86	2.6	8
2006/07/26-02:50	35.7865	127.8852	6.31	0.66426E+13	2.49	2.2	8
2006/08/01-12:57	35.7406	127.8250	6.35	0.81594E+13	2.57	2.2	5
2006/08/07-14:18	35.6142	124.0930	3.18	0.42650E+14	3.04	2.8	6
2006/08/09-08:16	35.8388	124.5748	4.23	0.16412E+14	2.77	2.8	6
2006/08/26-07:44	37.1845	128.7673	6.00	0.14446E+14	2.73	2.6	7
2006/09/20-00:03	35.8608	129.6505	5.53	0.21099E+14	2.82	2.6	7
2006/09/29-23:07	34.1941	125.0315	2.74	0.86435E+14	3.24	3.2	5
2006/10/04-05:29	36.6827	127.6096	6.74	0.89829E+13	2.59	2.5	9
2006/10/16-14:12	37.4888	125.0137	5.03	0.19206E+14	2.79	2.8	7
2006/10/22-14:09	37.1160	126.0028	5.80	0.98953E+13	2.63	2.4	5
2006/10/25-18:14	33.4951	125.8776	4.23	0.29178E+14	2.93	3.0	5
2006/11/11-01:16	35.9813	127.4657	6.02	0.19325E+14	2.82	3.2	12
2006/11/12-08:19	38.7861	125.1275	3.42	0.42647E+14	3.05	3.2	6
2006/11/26-03:05	34.1725	127.4785	5.26	0.70554E+13	2.57	2.5	3
2006/12/04-00:51	36.4604	127.9117	5.55	0.28280E+14	2.92	3.2	13
2006/12/10-01:39	33.2190	126.2097	3.82	0.28661E+14	2.91	2.9	6
2007/01/06-05:47	39.1308	128.0129	5.70	0.13814E+14	2.71	2.7	3
2007/01/19-09:06	37.6595	128.5787	7.25	0.17573E+13	2.16	2.3	4
2007/01/20-20:56	37.6889	128.5841	0.96	0.11997E+17	4.67	4.9	14
2007/01/24-16:31	38.6695	125.6225	4.80	0.47242E+13	2.47	2.7	2
2007/02/06-00:35	35.0040	129.5033	5.87	0.16801E+14	2.72	2.5	2
2007/03/10-18:18	37.1854	128.7960	6.24	0.74565E+13	2.54	1.9	9
2007/03/15-05:30	36.1687	127.9818	4.22	0.42398E+14	3.04	3.0	10

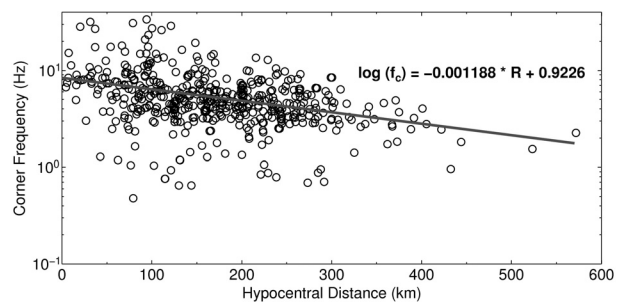
〈표 1〉 Earthquake data set

Date-Time	Epicenter		$f_0$	$M_0$	$M_w$	$M_L$	$N_{obs}$
	Latitude	Longitude					
2007/03/28-02:47	38.6974	125.6710	5.06	0.21377E+14	2.97	3.0	2
2007/04/25-08:36	36.9733	126.4304	5.98	0.75553E+13	2.53	2.5	8
2007/05/26-19:59	36.0161	125.2303	5.96	0.14760E+14	2.73	2.7	2
2007/05/27-06:17	35.1424	125.0507	5.47	0.29731E+13	2.28	2.4	1
2007/05/28-00:51	35.2254	128.5946	7.18	0.66248E+13	2.47	2.4	3
2007/06/26-00:01	35.6398	130.1491	5.00	0.11231E+14	2.65	2.2	4
2007/07/08-19:28	37.4014	129.7569	5.01	0.67909E+13	2.49	2.4	11
2007/07/19-21:01	37.1091	129.0118	5.40	0.10642E+14	2.67	2.3	7
2007/07/22-13:49	36.8846	126.6228	5.75	0.20802E+14	2.83	2.9	13
2007/07/27-01:37	39.2157	126.5803	5.39	0.28612E+13	2.29	2.1	2
2007/08/07-18:39	37.2062	128.7966	5.93	0.84232E+13	2.57	2.6	11
2007/08/12-04:52	36.0680	127.7424	6.61	0.36728E+13	2.32	2.5	9
2007/08/18-15:09	36.0668	125.7490	4.94	0.11052E+14	2.64	2.8	10
2007/08/26-19:54	36.4429	126.9602	6.50	0.39765E+13	2.36	2.1	10
2007/08/30-15:41	38.7844	125.7093	5.02	0.66776E+13	2.52	2.2	1
2007/08/30-16:12	38.7689	125.7099	3.46	0.61504E+14	3.10	2.8	5
2007/09/09-02:47	38.8074	125.7483	4.50	0.59538E+13	2.58	2.3	3
2007/09/12-06:50	36.4615	129.5904	4.92	0.28622E+14	2.93	2.7	10
2007/09/12-06:57	36.4578	129.5730	5.59	0.58501E+13	2.45	2.2	4
2007/09/12-13:18	34.6841	128.7241	4.66	0.44176E+14	3.10	2.2	3
2007/09/12-13:21	34.6986	128.7297	5.98	0.16576E+14	2.78	2.2	2
2007/09/12-15:27	34.6958	128.7313	4.04	0.68994E+14	3.13	2.3	3
2007/09/12-16:13	34.6878	128.7271	3.39	0.69531E+14	3.18	2.4	4
2007/09/17-01:16	36.4570	129.5794	3.24	0.58242E+14	3.14	3.2	8
2007/09/24-00:24	36.4460	129.5980	5.81	0.15692E+14	2.79	2.6	7
2007/10/01-01:02	36.4474	129.5893	5.53	0.70337E+13	2.57	2.4	7
2007/10/04-23:56	36.4403	129.6033	3.34	0.51474E+14	3.13	3.0	7
2007/10/06-09:08	35.6004	125.9783	5.84	0.75862E+13	2.55	2.6	6
2007/10/08-22:36	38.9271	125.8187	4.07	0.23557E+14	2.72	2.1	2
2007/10/13-04:13	36.4573	129.6344	5.67	0.71109E+13	2.51	2.2	3
2007/10/16-14:59	37.4158	128.8866	3.74	0.38078E+14	3.02	3.1	7
2007/10/17-20:06	36.4487	129.5955	5.28	0.97139E+13	2.62	2.4	6
2007/10/18-20:57	39.2492	124.6659	3.87	0.67080E+13	2.52	2.2	1
2007/10/29-02:32	36.5819	128.3800	6.43	0.13255E+14	2.69	2.6	11

에 대한 다양한 연구가 있었다.<sup>(10),(11)</sup> Jo and Baag<sup>(10)</sup>과 김성균, 김병철<sup>(11)</sup>은 이 지진에 대한 모멘트규모를 각각 4.5와 4.9로 제시하였으며, 이 연구로부터의 결과인 4.67과 차이를 보여준다. 이러한 결과는 각 연구자들마다 사용하는 지진원 상수를 구하기 위하여 사용하는 방법의 차이 및 계산에 사용된 다양한 매개변수의 차이 등에 기인한 것으로 추정된다.

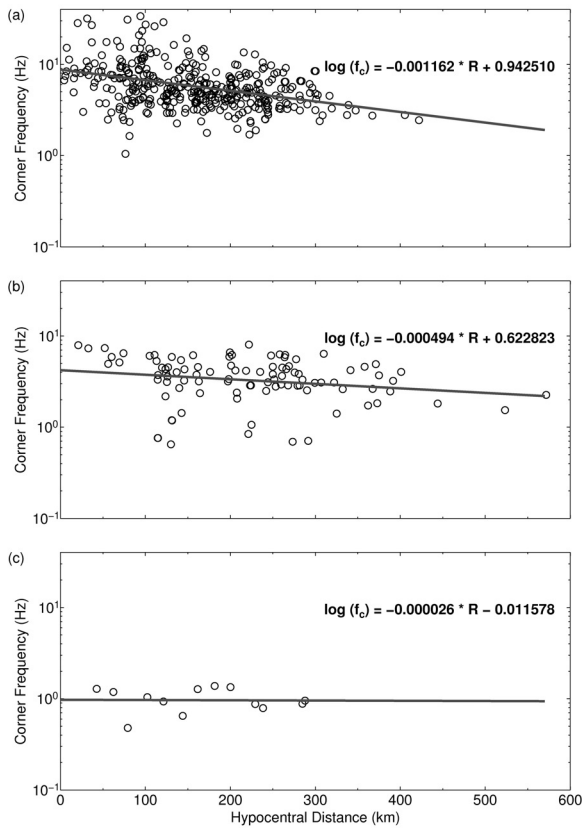
### 3.2 모서리 주파수와 저주파 스펙트럼 수준의 경향

사용된 모든 지진에 대한 각 관측소에서의 변위 스펙트럼을 분석하여 결정된 모서리 주파수( $f_0$ )를 진원거리에 따라 배열하고 그 경향을 분석하였다(그림 3). 그 결과 관측된 모서리 주파수( $f_0$ )는 진원거리가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 경향성이 방출되는 지진에너지와 연관되는지 조사하기 위하여 표 1에 제시된 지진의 모멘트



〈그림 3〉 Observed corner frequency versus hypocentral distance.

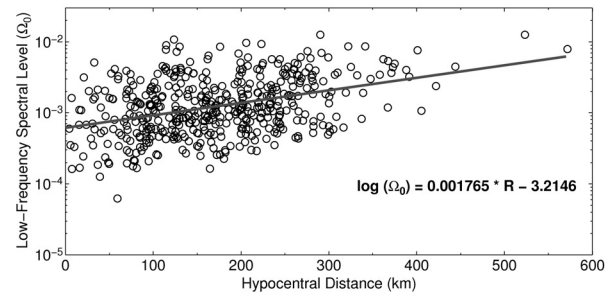
규모에 따라서 규모 3이하, 3과 4 사이 및 4 이상의 세 군으로 분류하여 다시 진원거리에 따른 경향성을 분석하였다. 각 군에 대한 진원거리와 모서리 주파수( $f_0$ ) 사이의 관계를 회귀분석하여 관측결과와 함께 그림 4에 제시하였다. 모멘트규모에 따른 분류에서도 마찬가지로 거리 증가에 따른 모서리 주파수( $f_0$ )의 감소가 관찰된다. 특히 이러한 모서리 주



〈그림 4〉 Observed corner frequency versus hypocentral distance for 3 groups of events along moment magnitude listed in Table 1. (a)  $M_w < 3.0$ . (b)  $3.0 \leq M_w < 4.0$ . (c)  $M_w \geq 4.0$ .

파수( $f_c$ )의 거리 증가에 따른 감소 경향은 모멘트규모가 클수록 작게 나타난다. 이러한 모서리 주파수( $f_c$ )와 거리의 상관성은 동부 캐나다<sup>5)</sup>와 발트 순상지<sup>6)</sup> 등에서도 보고된 바가 있다. 이들 두 지역의 공통점은 지체구조학적으로 안정한 지역을 형성하는 선캠브리아기의 결정질 화성암과 변성암이 넓게 분포하고 있다는 점이다. 만일 이러한 공통점이 한반도에서도 적용될 수 있고 모서리 주파수( $f_c$ )의 거리 종속성의 특징적인 양상이라면, 지체구조적으로 다양한 성격의 지역을 별도로 분류하여 그 특징을 분석할 가치가 있을 것으로 판단된다.

이러한 모서리 주파수의 거리 종속성 때문에, 이 연구에서는 변위 스펙트럼으로 관측된 결과를 ‘겉보기 모서리 주파수( $f_c$ ; apparent corner-frequency)’로 정의한다. 변위 스펙트럼으로부터 파악하고자 하는 대상은 진원거리가 0이 되는 단층지진원 자체의 지진원 상수이기 때문에, 그림 3의 회귀식에 의하여 겉보기 모서리 주파수( $f_c$ )를 진원거리 0에서의 값으로 정규화한다.<sup>6)</sup> 각 지진에 대하여 정규화된 모서리 주파수를 관측점 수(Nobs)에 대하여 평균하고, 이 평균 모서리 주파수( $f_c$ )를 진원스펙트럼의 모서리 주파수에 대한 대표값으로 가정한다(표 1). 따라서 표 1에 제시된 모서리



〈그림 5〉 Low-frequency spectral level versus hypocentral distance.

주파수( $f_0$ )는 통상적으로 제시되는 각 관측소에서의 겉보기 모서리 주파수( $f_c$ )와는 다른 측면에서 이해하여야 한다. 또한 모서리 주파수( $f_c$ )와 함께 저주파 스펙트럼 수준 역시 진원거리에 따른 종속성을 보여주고 있다(그림 5). 하지만 이러한 진원거리 종속성에 대한 원인은 아직까지 명확하지 않다.

#### 4. 결론 및 제언

2006년과 2007년에 한반도 및 주변지역에서 발생한 소규모 지진에 대하여 광대역지진관측망을 이용한 지진원 상수를 추정하였다. 전단파 변위 스펙트럼으로부터 관측된 모서리 주파수는 진원거리가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 보여준다. 특히 이러한 모서리 주파수의 거리 증가에 따른 감소 경향은 모멘트규모가 클수록 작게 나타난다. 모서리 주파수의 거리 종속성에 대한 원인은 아직 명확하지 않다. 하지만 국외의 사례로부터 지체구조적으로 안정한 지역에서 유사한 경향이 보고되었음을 상기할 때, 거리의 상관성은 지질학적인 특성과 연관성이 있음을 유추할 수 있다. 국내에서는 경상분지와 경기육괴 및 영남육괴의 지체구조별로 이러한 경향성에 대한 검토를 시도할 수 있을 것이다.

모멘트규모의 이론적인 하한값은 없지만, 충분한 정도의 신호대 잡음비가 확보되어야 한다. 따라서 지진의 크기가 작고 진원거리가 멀수록 그 신뢰도는 감소한다. 또한 아주 작은 지진에 대한 모서리 주파수는 기록계의 Nyquist 주파수보다 클 수 있으므로, 역산과정에서 이에 대한 별도의 점검이 필요할 것이다. 또한 적절한 모서리 주파수를 구하기 위해서는 감쇠보정에 대한 정확성이 확보되어야 한다. 2006년 및 2007년 지진목록에 대한 모멘트규모 계산과정에서 몇몇 관측소의 경우, 고주파수에서 스펙트럼의 감쇠는 이론적인 진원스펙트럼을 통하여 예측된 결과보다 더 가파르게 감소되는 경향이 있었다. 이는 지표감쇠효과에 대한 적절한 보정이 이루어지지 않았음을 의미한다. 따라서 향후 정확한 모멘트규모 결정을 위해서는 관측소별 감쇠효과에 대한 상

세한 분석이 먼저 선행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-5106)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. 조남대, 박창엽, “추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강지진동 연구” 한국지진공학회논문집, 제5권, 2001, pp. 17-26.
2. Brune, J. N., “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes,” *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 1970, pp. 4997-5009.
3. Kanamori, H. and Anderson, D. L., “Theoretical basis of some empirical relations in seismology,” *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 65, 1975, pp. 1073-1095.
4. Street, R. L., Herrmann, R. B., and Nuttli, O. W., “Spectral characteristics of the Lg wave generated by central United States earthquakes,” *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, Vol. 41, 1975, pp. 51-63.
5. Hasegawa, H. S., “Lg spectra of local earthquakes recorded by the eastern Canada telemetered network and spectral scaling,” *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 73, 1983, pp. 1041-1061.
6. Kim, W. Y., Wahlstrom, R., and Uski, M., “Regional spectral scaling relations of source parameters for earthquakes in the Baltic Shield”, *Tectonophysics*, Vol. 166, 1989, pp. 151-161.
7. Jun, M. S., “Source parameters of shallow intraplate earthquakes in and around the Korean Peninsula and their tectonic implication,” *Doctoral thesis of Uppsala University, Uppsala, Sweden*, 1990.
8. Kang, T. S. and Baag, C. E., “The 29 May 2004, Mw=5.1, offshore Uljin earthquake, Korea,” *Geosciences Journal*, Vol. 8, 2004, pp. 115-123.
9. 최호선, 노명현, 최강룡, “한반도 남부 지역의 지역규모와 모멘트규모의 관계,” 지구물리학회지, 제7권, 2004, pp. 185-192.
10. Jo, N. D. and Baag, C. E., “The 20 January 2007, Mw 4.5, Odaesan, Korea, earthquake,” *Geosciences Journal*, Vol. 11, 2007, pp. 51-58.
11. 김성균, 김병철, “한반도 지진의 지진원 상수,” 한국지구과학회지, 제29권, 2008, pp. 117-127.
12. 지진연구센터, 지진자료실, 한국지질자원연구원, <http://quake.kigam.re.kr>
13. 노명현, 최강룡, 김태경, “3성분 지진기록 합성에 의한 푸리에 진폭스펙트럼 분석,” 지구물리학회지, 제6권, 2003, pp. 25-29.
14. Andrews, D. J., “Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size,” *5th Maurice Ewing Symp. Earthquake Source Mechanics, American Geophysical union*, 1981, pp. 259-267.
15. Snoke, A., “Stable determination of (Brune) stress drops,” *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 77, 1987, pp. 530-538.
16. Brune, J. N., “Correction,” *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, 1971, pp. 5002.
17. Kanamori, H., “The energy release in great earthquakes,” *J. Geophys. Res.*, Vol. 82, 1977, pp. 1981-1987.
18. 김성균, “한반도 남부에서의 지진파 감쇠: 분석방법과 사용한 자료에 따른 변화 비교”, 지질학회지, 제43권, 2007, pp. 207-218.