

한반도 발생 지진의 지진원 상수
Source parameters of earthquakes occurred in the Korean Peninsula

김성균* · 김병철**
Kim, Sung Kyun · Kim, Bung Chul

Abstract

Source parameters for forty nine recent earthquakes occurred in and around Korean Peninsula are determined and the relations among them are studied. The corner frequency and seismic moment are estimated from three different methods. The spectral fitting of the source displacement spectrum with the ω -square source model of Brune(1970) and Snoke(1987)'s method are applied to all events and empirical Green's function method for two events are adopted. The source parameters determined in this study show different values depending on the adopted method and on the stations of which seismograms are recorded. It is interpreted that the disagreements principally originate from insufficient consideration of source radiation pattern and attenuation and amplification according to path direction. The corner frequencies and seismic moments are averaged to exclude the directional effects and other source parameters are estimated from the mean corner frequency and seismic moment. The static stress drops estimated in this study tend to be independent of seismic moment or magnitude for events above a certain size. For earthquakes with the size less than about 3.0×10^{21} dyne-cm (nearly same as $M_L=3.7$), the stress drop tends to decrease with the decreasing moment. This fact suggests a breakdown of scaling law of source parameters below the threshold magnitude. The moment magnitudes calculated from source parameters appear to be slightly larger than the Richter's local magnitudes in the range above $M_L=3.5$.

1. 서론

원지장(far field)에서의 지진원의 변위 스펙트럼에 대한 Brune(1970)의 모델이 제안된 이래, 이 스펙트럼을 규정하는 상수들 즉, 지진원 상수들사이의 관계 및 지진원 상수들과 지진규모와의 경험적인 관계가 여러 지역에서 다수의 지진을 대상으로 연구되어 왔다. 한편 지진원 상수들사이의 이론적인 관계는 단층면의 변위와 지구물질의 물성을 적절히 모델화함으로서 유도할 수 있으며, 이러한 이론적인 관계가 실제 지진에 대하여 얻은 경험적인 관계와 크게 다르지 않다는 것이 알려져 있다(Lay and Wallace, 1995). 예를 들면 Kanamori and Anderson(1975)은 표면파 규모 6이

* 전남대학교 지구환경과학부 교수, 정회원

** (주)희송지오택 사원

상의 지진에 대하여 지진모멘트와 단층면의 면적사이의 경험적인 관계를 조사하여, 양자의 상용대수사이에 뚜렷한 선형적인 관계가 있음을 밝혔다. 그들은 판경계면 지진의 응력강하량으로서 30bar, 판내부지진의 값으로서 100bar를 얻었다. 또한 응력강하량과 단층면의 길이, 지진으로 발산된 에너지사이에도 선형적인 관계가 있음을 나타내었다. 이러한 상수들 사이의 선형적인 관계는 비례법칙(scaling law or scaling rule)으로 불려 왔으며, 여러 지역에서 규모가 작은 지진에 대해서도 조사되었다.

그러나 그 뒤에 이어진 여러 연구(Rautian and Khalturin, 1978; Fletcher, 1980; Hasegawa, 1983; Harr et al., 1984)에서 어떤 한계이하의 지진모멘트에서는 이러한 비례법칙이 성립되지 않는다는 보고가 잇따랐으며, 그 한계는 대략 $10^{21} - 10^{22}$ dyne-cm로 알려 졌다. 이러한 보고에 대하여 다른 연구(Boatright, 1984; Mcguire, 1985; Hough, 1996)에서는 지진파의 감쇠와 관련하여 소규모 지진에 대한 모서리 주파수의 계산오차 때문일 것이라는 반론이 제기되었다. 한편 Shi et al.(1998)은 판내부 환경에 속하는 미국 북동부의 지진 49개에 대하여 지진원 상수를 여러 방법으로 결정하였다. 여기서 그들은 여진을 동반한 일부의 지진에 대해서는 지진파 감쇠에 대한 고려없이 모서리 주파수를 구할수 있는 경험적 Green함수법을 적용하였다. 그들은 지진모멘트 대략 2×10^{20} dyne-cm를 경계로 그 이하에서는 응력강하량이 지진모멘트와 함께 감소하며, 그 이상에서는 지진모멘트에 관계없이 응력강하량이 일정하다는 결과를 얻었다. 이와 같이 응력강하량이 특정 규모이하의 지진에서 일정하지 않다는 관측적 사실은 지진원에서의 파괴의 역학과 관련하여 중요한 의미를 갖는다(Shi et al., 1998).

한편 응력강하량은 모사를 통한 강진동 합성(Boore, 1983)에 있어서 중요한 변수이다. 특히 강진의 관측기회가 적은 한반도의 경우는 이론적으로 강진동을 합성하여 이용하는 방법을 우선적으로 고려할 수 있으며, 강진동의 합성을 위해서는 진원에서의 스펙트럼과 관련된 지진원상수에 관한 연구가 충분히 진전되어야 한다. 어떤 지역에서 예측되는 강진동을 결정론적 또는 확률론적으로 합성하고자 할 때는 입력변수의 수를 최소화할 필요가 있으며, 이 경우에 지진규모와 응력강하량, 진앙거리를 최소한의 입력변수로 고려할 수 있다. 이러한 관점에서 다수의 한반도 발생지진에 대하여 지진규모와 지진원상수와의 관계, 응력강하량에 관한 연구가 요청되고 있다(김성균, 2001).

이 연구는 한반도에 디지털 관측망이 운영되기 시작한 이후 1996년 9월 이래 발생한 규모 3이상의 지진 49개에 대한 지진원 상수들을 결정하여 그들사이의 관계를 밝히는 것이 목적이다.

2. 지진 자료

이 연구에서는 국내 디지털 지진관측망이 운영되어 본격적인 지진관측이 시작된 1996년 이래 2001년 8월까지 기상청과 한국지질자원연구원 관측망에 기록된 지진중 규모 3이상으로 신호대 잡음비(S/N)비가 높은 지진을 분석대상으로 선정하였다. 선정된 지진의 수는 49개이며, 지진기록의 수는 3성분 480개이다.

그림 1에는 진앙지의 공간적 분포를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 진앙지는 한반도 남부에 비교적 고르게 분포되어 있다. 진앙의 위치와 발생깊이는 우선적으로 한국지질자원연구원이

보고한 자료를 채용하였으며, 부분적으로 기상청에서만 관측된 지진도 일부 포함되어 있다. 기상청에서 관측된 지진은 진원깊이가 발표되어 있지 않으므로 진원깊이는 10km로 가정하였다. 진원 거리는 17km에서 446km 사이에 분포하며, 200km이내에 자료의 반 정도가, 300km 이내에 자료의 80퍼센트 정도가 포함되어 있다. 지진 규모는 3.0 ~ 3.5 사이가 대부분을 차지하고 있으며, 또한 진원깊이는 10km이내에 대부분이 집중되어 있다.

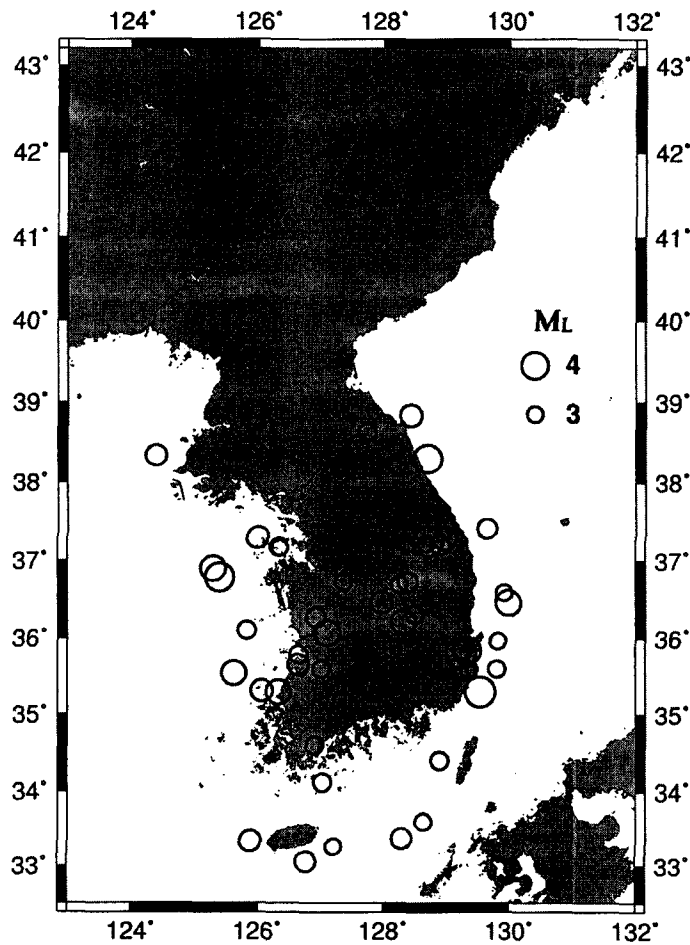


Fig 1. Spatial distribution of the earthquakes used in this study.

3. 지진원 상수 계산방법

본 연구에서는 3가지의 다른 방법으로 모서리 주파수와 지진모멘트를 구하여 이 값들의 평균으로부터 나머지 지진원 상수들을 결정하였다. 이 방법들에 대해서는 김성균(2001)에 상세히 기술되

어 있으므로, 여기서는 간단히 설명하기로 한다. 첫 번째의 방법은 Brune(1970)의 스펙트럼에 적합시키는 방법이다. 어떤 관측소에서 지진기록의 스펙트럼으로부터 진파과정중의 감쇠효과와 부지에서의 증폭효과 등을 완전히 제거하면 지진원에서 스펙트럼을 얻을 수 있으며, 이 스펙트럼으로부터 지진모멘트와 모서리 주파수를 시행착오의 반복해법으로 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 지진모멘트와 모서리 주파수를 구하게 되면 나머지 지진원 상수들은 그들 사이의 관계식으로부터 계산할 수 있다.

두 번째의 방법은 Snoke(1987)에 의하여 제안된 방법으로서, 지진원 스펙트럼의 적분으로 두 개의 매개변수를 계산하여, 이 매개변수를 이용하여 지진원 상수들을 결정하는 방법이며, 통상의 기하학적인 방법에 비하여 안정적인 값을 얻을 수 있다(Snoke, 1987). 세 번째의 방법은 여진을 본진의 Green함수로 가정하여 본진의 지진원 상수들을 구하는 방법이다. 이 방법은 경험적 Green함수법(Shi et al., 1996)이라 불리며 Hough et al.(1991)등에 의하여 이론적으로도 입증되어 있다.

4. 결과 및 토론

이 연구에서는 전항에서 설명한 여러 방법에 따라 대상 지진들의 지진원 상수들을 결정하였다. 기하학적 확장을 나타내는 함수 $G(r)$ 은 일반적으로 거리 r 에 대하여 $G(r) = 1/r^n$ 의 형태로 나타낼 수 있다. 보통 S파가 우세한 100km 이내에서는 n 값이 1정도이고, 표면파가 우세한 100km 이상에서는 n 값이 0.5정도인 것으로 알려져 있다(Herrmann and Kijko, 1983). 그러나 한반도 남부에서의 가속도 감쇠특성을 연구한 김수경 외(2001)에 의하면 n 값은 50km를 경계로 하여 1.0에서 0.5로 변하는 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 이 결과를 그대로 이용하였다.

지진원 스펙트럼으로부터 기하학적인 방법으로 모서리 주파수와 지진모멘트를 직접 구하는 간편법은 주관성이 개입되기 쉽고 신뢰도가 낮기 때문에 이 연구에서는 사용하지 않았다. 그러나 그 외의 방법으로 지진원 상수를 결정한다고 하더라도 사용한 방법이 달라질 때, 결정되는 지진원 상수들이 반드시 일치하지 않는다. 또한 어떤 관측소의 어떤 성분을 이용하느냐에 따라 그 값들이 달라진다. 모서리 주파수 및 지진모멘트는 사용한 방법과 자료에 따라 달라진다. 그러나 두 방법에 의한 평균값은 거의 비슷하다. 한편 경험적인 Green 함수법에 의하여 모서리 주파수를 결정하여 다른 방법으로 결정한 값들과도 비교하였다. 경험적 Green 함수법으로 추정된 모서리 주파수는 다른 두 방법에 의한 값보다 약간 큰 편이다. 이러한 결과는 미국 동부의 지진자료를 이용하여 지진원 상수를 구한 Shi et al.(1998)의 경우와 같다. 그러나 주목할만한 사실은 경험적 Green 함수법을 제외한 두가지의 다른 방법, 즉 Brune(1970)의 ω^2 모델의 적합과 Snoke(1987)의 방법으로 결정한 모서리 주파수와 지진모멘트의 평균값이 거의 비슷하다는 점이다.

이상에서 고찰한 바와 같이, 모서리 주파수와 지진모멘트는 사용한 방법에 따라 달라지며, 같은 방법으로 결정한 경우라도 관측소별 성분별로 그 값이 다르게 나타난다. 이와 같은 차이가 나타나는 이유는 진원에서의 에너지 발산효과(radiation pattern)에 대한 고려에서 일률적으로 평균적인 값을 사용하였으며, 지진파선의 방향에 따른 감쇠효과가 충분히 보정되지 않은 것을 들 수 있을 것이다. 또한 부지직하의 증폭효과에 대한 보정의 불충분과 잡음성분의 혼입을 추가의 이유로 생

각할 수 있다. 이러한 이유외에 실제로 지진원 상수를 구할 때, 어떤 주파수 범위를 대상으로 하느냐도 결정되는 값이 달라지는 원인으로 생각할 수 있다(김성균, 2001). 이러한 이유중 진원에서 에너지 발산의 방향별 차이와 지진파의 방향별 감쇠의 차이에 따른 효과는 각각의 지진기록으로부터 얻어진 값들을 평균함으로써 어느 정도 해소할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 여러 방법으로 여러 관측소의 성분별로 추정된 모서리 주파수와 지진모멘트를 평균하여, 그 평균값을 지진원 상수로 채용하였다.

본 연구에서 결정한 49개의 지진에 대한 지진원 상수에 1999년 4월 7일에 강원도 태백부근에서 발생한 지진에 대하여 김성균(2001)이 구한 지진원 상수를 추가하여, 총 50개 지진에 대한 지진원 상수들 사이의 관계를 고찰하였다.

서론에서 서술한 바와 같이, Kanamori and Anderson(1975)은 판경계면 지진의 평균적인 응력강하량은 30bar, 판내부지진의 경우는 100bar 정도라고 보고하였다. 그러나 후속의 여러 연구(Rautian and Khalturin, 1978; Fletcher, 1980; Hasegawa, 1983; Harr et al., 1984)에서 어떤 한계 이하의 지진모멘트에서는 응력강하량이 일정하지 않다는 보고가 있었다. 한편 Shi et al.(1998)은 판내부 환경에 속하는 미국 북동부의 지진 49개에 대하여 지진원 상수들을 여러 방법으로 결정하였다. 여진을 동반한 일부의 지진에 대해서는 지진파 감쇠에 대한 고려없이 모서리 주파수를 구할 수 있는 경험적 Green함수법을 적용하였다. 그들은 지진모멘트 대략 2×10^{20} dyne-cm를 경계로 그 이하에서는 응력강하가 지진모멘트와 함께 감소하며, 그 이상에서는 지진모멘트에 관계없이 응력강하량이 일정하다는 결과를 얻었다.

한반도와 그 주변에서 발생한 지진을 대상으로 지진원 상수를 결정한 여러 연구들(Jun, 1990; Kim and Kim, 1998; 조남대, 1998; 박동희, 1999)에서는 응력강하량이 10 - 100 bar 범위의 다양한 값이 보고되었다. 이와 같이 대상지진과 연구자에 따라 응력강하량에 차이가 나타난 결과는 실제로 응력강하량이 한반도에서 다양한 값을 갖는지 또는 계산방법에 의한 차이인지 알 수 없다. 이와 같은 응력강하량과 지진모멘트(또는 지진규모)와의 관계에 대한 의문을 해결하기 위하여, 본 연구에서 얻어진 결과를 이용하여 양자사이의 관계를 그림으로 나타내었다. 그림 2(a)에는 지진모멘트와 응력강하량의 관계를, 그림 2(b)에는 지진규모와 응력강하량의 관계를 도시하였다. 여기서 응력강하량은 15bar에서 119bar까지 다양하게 나타났다. 그러나 주목할만한 사실은 지진모멘트가 대략 3.0×10^{21} dyne-cm(지진규모 3.7에 대응)를 경계로 하여, 그 이상에서는 응력강하량이 평균 100bar 정도의 일정한 값을 보이며, 그 이하에서는 직선적으로 감소하는 경향을 보인다는 점이다. 이러한 결과는 일정크기 이하의 지진에서 지진원 상수사이의 비례법칙이 깨진다는 Shi et al.(1998)의 결과와 유사하다. 그러나 Shi et al.(1998)의 연구에서는 비례법칙이 성립되는 한계의 지진모멘트가 2×10^{20} dyne-cm임에 비하여, 본 연구에서의 한계는 그보다 약 10배가 큰 3×10^{21} dyne-cm라는 점에서 차이가 있다.

그림 3에 지진원 상수들 사이의 종합적인 관계, 즉 모서리 주파수 - 지진원 크기 - 지진모멘트 - 모멘트 규모 - 응력강하량 사이의 관계를 도시하였다. 그림에서 응력강하량이 10 - 100 bar 사이에 분포하며, 일정 규모 이상인 지진의 응력강하량이 100bar 부근에 집중됨을 잘 나타내고 있다. 또한 지진모멘트(또는 모멘트 규모)와 모서리 주파수(또는 지진원 크기)와의 선형적인 관계가

일정 규모 이상인 지진에 대하여 잘 성립되고 있음을 보여주고 있다.

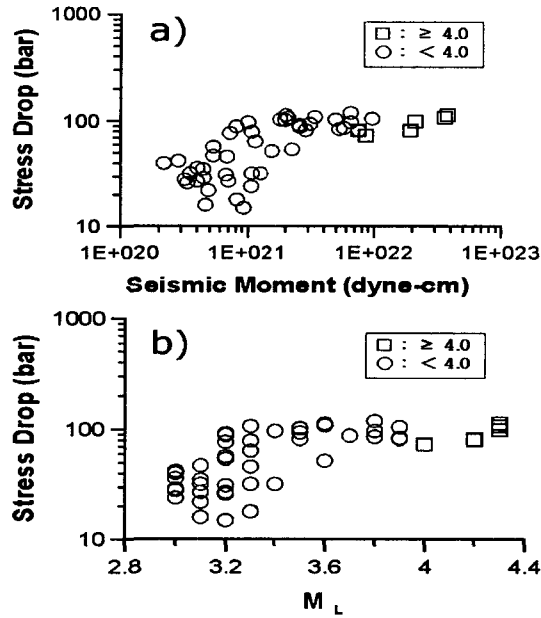


Fig 2. (a) The relationship between seismic moment and stress drop estimated in this study. (b) Plot of local magnitude versus stress drop estimated in this study.

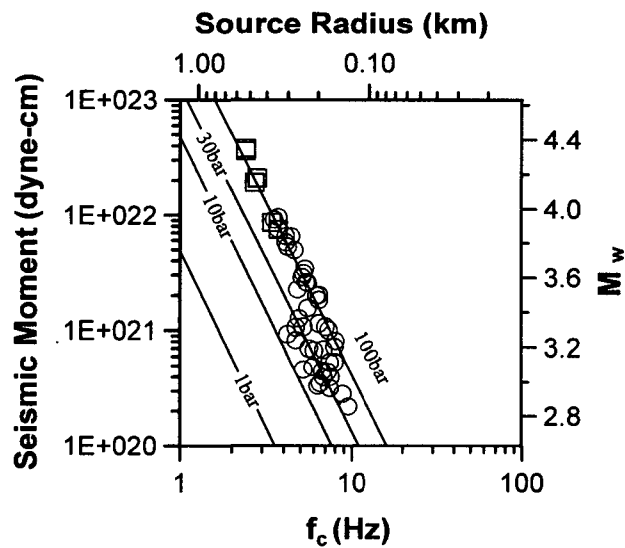


Fig 3. The synthetic relationship between source parameters estimated in this study. Constant stress drop lines come from a theoretical relation discussed in this study.

5. 결 론

지진의 피해를 최소화하기 위한 내진설계에는 다수의 강진자료가 필요하나, 한반도에서는 주변 중국이나 일본에 비해 강진의 빈도가 낮아 이론적으로 강진동을 합성하여 이용하는 방법을 우선적으로 고려할 수 있다. 이러한 강진동을 합성하기 위해서는 진원에서의 스펙트럼과 관련된 지진원 상수에 관한 연구가 충분히 이루어져야 한다. 본 연구에서는 최근 한반도에서 발생한 지진의 지진원 상수를 결정하여 지진원 상수 사이의 관계 및 지진원 상수와 국지 지진규모 사이의 관계를 규명하여 보았다. 이 계산에는 1996년 9월부터 2001년 8월 사이에 발생한 규모 3.0이상 지진 49개에 대하여 한국지질자원 연구소와 기상청 관측망에 기록된 지진 자료 3성분 480개를 이용하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 모서리 주파수 f_c 는 지진모멘트 M_0 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 국지 지진규모 M_L 과의 경험적인 관계로서 $\log_e(f_c) = -0.699 M_L + 0.4075$ 를 얻었다.
- 2) 용력강하량은 15bar에서 119bar로 다양하게 나타났지만, 규모 3.7($M_0 = 3.0 \times 10^{21}$ dyne-cm)이상에서는 100bar에 가깝게 나타났으며, 그 이하에서는 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었다.
- 3) 국지 지진규모 M_L 과 지진원의 크기 r 사이에는 직선적인 관계를 보였으며 수식으로 나타내면 $\log_e r = 0.709 M_L - 3.876$ 과 같다.
- 4) 국지 지진규모 M_L 과 모멘트 규모 M_w 사이의 관계를 살펴보면 규모 3.5 이상 지진에 대해서는 규모가 실제 지진보다 작게 평가됨을 보여주었다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초 연구 "한반도와 한반도 주변의 지진지체구조"(과제번호: 1999-2-133-002-5)의 지원에 의하여 수행되었다.

참고문헌

- 김성균, 2001, "1999년 4월 7일 발생한 태백지진의 지진원 상수", 지질학회지, 37, 445-454.
- 김수경, 지현철, 김성균, 2001, "한반도 남부에서의 주파수별 가속도 감쇠 특성", 2001년도 대한지질학회 추계공동학술발표회 초록집, 28.
- 박동희, 1999, "한반도 동남부의 지진과 감쇠, 지진원 요소 및 강진동 모사", 경북대학교 대학원 이학석사 학위논문.

- 조남대, 1998, "추계학적 모사법을 이용한 한반도 남부에서의 강진동 연구", 서울대학교 대학원 이
학석사 학위 논문.
- Boatwright, J., 1984, "Comments on "Energy radiation from a spherically symmetric
homogeneous source by J. W. Rudnicki", Bulletin of Seismological Society of America, 74,
1483-1486.
- Boore, D.M., 1983, "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on
seismological models of the radiated spectra", Bulletin of Seismological Society of
America 73, 6, 1865-1894.
- Brune, J.N., 1970, "Tectonic stresses and the spectra of seismic shear wave from earthquake",
Journal of Geophysical Research, 75, 4997-5009.
- Fletcher, J.B., 1980, "Spectra from high dynamic range digital recordings at Oroville,
California aftershock and their source parameters", Bulletin of Seismological Society of
America, 76, 43-64.
- Harr, L.C., Fletcher, J.B., and Mueller, C.S., 1984, "The 1982 Enola, Arkansas, swarm and
scaling of ground motion in the eastern United States", Bulletin of Seismological Society of
America, 74, 2463-2482.
- Hasegawa, H.S., 1983, "Lg spectra of local earthquakes recorded by the Eastern Canada
Telemetered Network and spectral scaling", Bulletin of Seismological Society of America, 73,
1041-1061.
- Herrmann, R. and Kijko, A., 1983, "Modeling some empirical vertical component Lg relations",
Bulletin of Seismological Society of America, 74, 1167-1188.
- Hough, S.E., Seeber, L., Lerner-Lam, A., Armbruster, J.G. and Guo, H., 1991, "Empirical
Green's function analysis of Loma Prieta aftershocks", Bulletin of Seismological Society of
America, 81, 1737-1753.
- Hough, S.E., 1996, Observational constraints on earthquake source scaling: "Understanding the
limits in resolution". Tectonophysics, 261, 83-95.
- Jun, M.S., 1990, "Source parameters of shallow intraplate earthquakes in and around the
Korean Peninsula and their tectonic implication", Doctor thesis of Uppsala University,
Uppsala, Sweden.
- Kanamori, H., and Anderson, D.L., 1975, "Theoretical basis of some empirical relations in
seismology", Bulletin of Seismological Society of America, 65, 1073-1095.
- Kim, S.K. and Kim, M.S., 1998, "Source parameters of the southern Yellow Sea Earthquake
occurred on July, 25, 1994", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2,
113-118.
- Lay, T. and Wallace, T.C., 1995, "Modern global seismology", Academic Press, New York,
521p.

- McGuire, R.K., 1985, 'Ground motion estimation, in Seismic hazard methodology for nuclear facilities in the Eastern United States", EPRI project: No. 6-1-6-20, 101-29.
- Rautian, T.G. and Khalturin, V.I., 1978, "The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum", Bulletin of Seismological Society of America, 68, 923-948.
- Shi, J., Kim, W.Y. and Richard, R.G., 1996, "Variability of crustal attenuation in the northeastern United States from *Lg* waves", Journal of Geophysical Research, 101, 25231-25242.
- Shi, J., Kim, W.Y. and Richards, P.G., 1998, "The corner frequencies and stress drops of intraplate earthquakes in the northeastern United States", Bulletin of Seismological Society of America, 88, 2, 531-542.
- Snoke, J.A., 1987, "Stable determination of (Brune) stress drops", Bulletin of Seismological Society of America, 77, 2, 530-534.