

지진 에너지의 시변동성과 Gutenberg-Richter 법칙 상수와의 관계

Temporal Variation of Earthquake Energy and Its Relation with Parameters of the Gutenberg-Richter Law

장석환* · 오경두** · 오지환*** · 조준원****

Jang, Sukhwan*, Oh, Kyongdoo**, Oh, Jihwan***, and Jo, Junwon****

Abstract

In this study the temporal variation of the earthquake energy and its relation with parameters of the Gutenberg-Richter law was examined using the 1,450 earthquake data occurred on the Korean peninsula from August 30, 1978 through November 27, 2016. Using a 200-event window, which slides by 50 events a sequence of 26 consecutive samples were analyzed and the earthquake energy showed significant variation with strong positive skewness. Meanwhile, parameters a- and b-values of the G-R law showed normal range of values without significant skewness consistent with previous studies. The sequence of the earthquake energy revealed a stationary metastability with alternating active and inactive periods, which closely matched with the pattern of the LEL earthquake energy model proposed in this study.

Key words : Earthquake Energy, Periodicity, LEL Model, Seismic Hazard, Earthquake Prediction

요 지

본 연구에서는 1978년 8월 30일부터 2016년 11월 27일까지 한반도에서 발생한 1,450개의 지진 자료를 이용하여 지진에너지의 시간적 변화와 Gutenberg-Richter 법칙의 매개변수와의 관계를 조사하였다. 200개의 지진과 새로운 지진 50개를 추가 적용하여 26개의 샘플 별 지진 규모의 분포를 분석하였으며, 분석 결과 지진 에너지는 규모 4.0 이상의 상대적으로 큰 지진의 발생에 있어서 강한 우측 편기(positive skewness)의 변화를 보였다. 한편, G-R 법칙의 상수인 a-와 b-값은 이전 연구 대비 편기됨이 없이 정상 범위의 값을 나타냈다. 결과적으로 볼 때 지진 에너지의 패턴은 본 연구에서 제안된 LEL 모형의 패턴과 거의 일치하였고, 활성 및 비활성 기간이 교차로 나타나며 준 안정적인 상태를 유지하였다.

핵심용어 : 지진 에너지, 주기성, LEL 모형, 지진 재해, 지진 예측

1. 서 론

1.1 연구배경

우리나라는 오랫동안 지진 안전지대로 여겨지면서 지진

에 대한 관심이 낮았던 것이 사실이다. 그러나 2016년 9월 12일 국내 지진 계측 사상 최대인 규모 5.8 지진이 경주일대에서 발생하면서 지진에 대한 관심이 고조되고 있다. 그 결과 경주지진의 원인에 대해서 다각적인 연구와 분석이 이루어

*정회원, 대진대학교 건설시스템공학과 교수(E-mail: drjang@daejin.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Daejin University

**교신저자, 정회원, 육군사관학교 토목환경학과 교수(Tel: +82-2-2197-2857, Fax: +82-2-2197-2857, E-mail: okd0629@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil and Environment Engineering, Korea Military Academy

***대진대학교 토목환경공학과 박사과정

Ph.D Candidate, Department of Civil and Environment Engineering, Daejin University

****대진대학교 토목공학과 석사과정

Master Course, Department of Civil Engineering, Daejin University

지고 있다(Kim, Y. et al., 2016; Kim K.-H. et al., 2016).

경주지진은 지각 판의 정상적인 운동에 의한 지각 변형 가운데, 동일본 대지진의 영향이 일부 기여했을 것으로 보이거나 요인별로 어느 정도 기여했는지에 대해서는 아직 명확한 규명이 이루어지지 않고 있다.

이를 규명하기 위해서는 앞으로 많은 연구가 필요할 것으로 보이며 본 연구에서는 이러한 노력의 일환으로 그동안 계속된 국내 지진자료를 이용하여 우리나라의 지진이 어떠한 원인과 형태로 발생하고 있는지에 대한 과학적인 단서를 찾고자 하였다.

이를 위하여 국내외의 지진 관련 연구 동향을 면밀하게 검토하였고 이를 바탕으로 우리나라의 지진 발생 메커니즘을 설명하기 위한 모형을 제안하였으며 이를 국내 지진 자료를 이용하여 검증하고자 하였다.

1.2 국내외 연구 동향

1954년 Gutenberg와 Richter가 지진의 규모와 발생횟수 간의 상관관계를 나타내는 Eq. (1)을 발표한 이래로 이 식은 Gutenberg-Richter 규모-빈도 관계식(이하 G-R 관계식으로 줄여서 부른다) 또는 Gutenberg-Richter 법칙으로 널리 알려지게 되었다.

$$\text{Log}_{10}(N(M)) = a - bM \quad (1)$$

여기서, $N(M)$ 은 규모가 M 보다 크거나 같은 지진의 연간 기대발생횟수(mean annual number of earthquakes)이고, a 와 b 는 해당 지역에서 발생하는 지진의 특성에 따라 정해지는 상수이다.

Gutenberg et al.(1954)은 상수 a 와 b 의 값을 분석한 대상 지역별로 제시하여 지역별로 그 값이 달라지는 것을 보였으며 또한 천발성 지진과 심발성 지진으로 구분하여 제시하기도 하였다. 이후 G-R 관계식은 지진의 규모와 재현기간을 예측하는 대표적인 방법으로 널리 알려지게 되었으며 특히 상수 b 에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.

Scholtz(1968)는 암석시료에 대한 파괴실험을 통하여 암석시료가 파괴되기 전에 상수 b 값이 감소하는 것은 암석 내부의 응력 증가 때문이며, 지진이 발생하기 전에 상수 b 값이 감소하는 것도 지각이 받고 있는 응력이 증가하였기 때문이라고 주장하였다.

Smith(1981)는 1955년부터 1979년까지 계속된 뉴질랜드의 지진 자료에 대하여 샘플당 지진수 50개와 새로운 지진 추가수 10개(a 50-event window sliding by 10 events)를 채택한 윈도우기법(windowing technique)을 적용하여 지진의 규모와 상수 b 와의 관계를 검토하였다.

그는 큰 b 값을 갖는 시기에는 평균적으로 작은 규모의 지진이 발생한다고 주장하였다. 그리고 지진 활동이 미약한 즉, 큰 b 값을 갖는 시기가 지나고 나서 대규모 지진이

발생하는데 이러한 현상은 대규모 지진이 발생하기 전에 지각에 응력을 축적하는 지진 휴면기(seismic gap)를 갖는다는 Mogi의 갭 가설(Gap hypothesis)과 일맥상통한다고 주장하였다.

그는 상수 b 값이 큰 값을 갖는 시기가 지나고 나서 큰 지진이 발생한다고 주장하였는데 그의 연구 자료를 보면 상수 b 값이 감소한 상태에서 큰 지진이 발생한다고 해석할 수도 있으며 이는 다른 연구자들이 발견한 사실(Scholtz, 1968; Mogi, 1985)과 일치하는 것으로 볼 수 있다.

Mogi(1985)는 암석시료에 대해 응력을 일정하게 유지시킨 상태에서 파괴 실험을 수행하여 응력이 증가하지 않더라도 암석이 파괴되기 전에 상수 b 값이 감소하는 경향을 확인하였다. 그는 어떤 메커니즘에 의해 상수 b 값이 감소하는지는 명확하지 않지만 대규모 지진이 발생하기 전에 상수 b 값이 감소하는 경향이 있다는 것은 일반적으로 인정되는 사실이며 이러한 사실은 지진을 예측하는 단서를 제공할 것이라고 주장하였다.

그는 단층에 가해지는 응력(stress)과 단층의 미끌어짐(slip) 사이의 관계를 묘사한 모형을 소개하였다. 시간이 경과하면서 지각 응력의 변화에 따라 지진의 활성기(active period)와 비활성기(calm period)가 교대로 반복되는 모형이다.

저자는 모형들에 대해 별도의 명칭을 부여하지 않았으나 여기에서는 응력 상한 모형(Upper stress limit model, USL)과 응력 하한 모형(Lower stress limit model, LSL)으로 구분하기로 한다.

응력 상한 모형 USL은 지각의 응력이 임계점을 지나 최대 응력이 발생하는 시점까지 걸리는 시간인 활성기는 일정하다고 가정하는 모형이다. 그대신 활성기에 지진으로 해소되는 응력은 매 주기마다 달라질 수 있다. 따라서 활성기에 이어 응력이 다시 임계점까지 증가하는 비활성기도 매 주기마다 달라질 수 있다고 가정한다. 이 모형은 일본 Nankai Trough와 서일본 지역의 지진활동을 묘사하는데 적합한 것으로 알려져 있다.

반면에 응력 하한 모형 LSL은 응력이 해소된 후 다시 임계점까지 증가하는 데 소요되는 시간인 비활성기는 일정하다고 가정한다. 그 대신에 응력이 임계점을 지나 최대응력이 발생하는 시점까지 걸리는 시간인 활성기는 매 주기마다 달라질 수 있다고 가정한다.

두 가지 모형 모두 외부에서 가해지는 응력은 시간에 따라 일정하게 증가한다고 가정하는데 이것은 지각 판(tectonic plate)의 운동으로 인해 발생하는 시간당 변형률(strain rate)이 일정한 판 내부의 지진(intra-plate earthquake)에 대해 합리적인 가정으로 볼 수 있다.

그런데 USL과 LSL 모형 모두 최대 응력이 발생한 시점에서 응력해소가 일시에 발생하는 형태 즉 수직적인 응력강화를 가정하고 있는데 이는 실제 지진 발생양상과 다를 수 있다. 이것은 하나의 대규모 지진에 의해 일시에 응력이

해소되는 과정을 가정한 것으로 실제로는 크고 작은 지진이 발생하면서 점차적으로 응력이 해소될 가능성이 높기 때문이다.

그리고 USL 모형의 또 다른 문제점은 균질한 암석시료와 달리 매우 복잡하고 이질적인 균열 상태와 파괴강도 등을 가진 지각 구성물질에 대해서 최대응력이 동일할 것이라고 가정하는 것은 무리라는 점이다.

반면에 지각이 파열된 후 단층에 남는 응력은 지각 구성물질의 강도가 아닌 단층면 간 미끌어짐(slip)과 연관되어 있어서 어느 정도 일정할 수 있는데 이러한 점에서 LSL 모형이 실제 지진현상과 더 부합하는 모형이라고 볼 수 있다.

요약하면 최대응력의 비균질성과 최소응력의 균질성이라는 점에서 USL 보다는 LSL이 실제 지진에 의한 에너지 소진과정을 더 정확하게 나타내는 것으로 볼 수 있다.

Bak et al.(1988)은 모래사태모형(sand avalanche model)을 통하여 외부로부터 지속적으로 공급되는 에너지를 소진시키는 대규모의 동적 시스템은 스스로 정상적인 임계상태(a stationary critical state)로 수렴하는 자기조직적 임계성(self-organized criticality, SOC)을 갖는다는 사실을 발견하였으며 SOC의 대표적인 사례가 지진이라고 주장하였다.

Bak et al.(1989)은 지각 판의 이동과 충돌에 의해 판 내부로 응력이 지속적으로 전달됨에 따라 지각의 응력이 점차 증가하면서 국지적으로 응력의 집중이 발생하고 이에 따라 작은 균열이나 단층들이 붕괴되기 시작하면서 작은 규모의 지진이 발생한다고 설명하였다.

그리고 응력이 더욱 증가하면 점차 연쇄반응(chain reaction)에 의해 더욱 큰 규모의 지진들이 발생하게 되고 궁극적으로는 통계적으로 정상적인 상태(a statistically stationary state)에 도달하여 외부로부터 가해지는 응력과 지진 붕괴를 통하여 해소되는 응력이 균형을 이루게 된다고 주장하였다.

또한 Chen et al.(1991)은 오늘날의 지각은 오랜 시간동안 이루어진 판 운동(tectonic movement)을 통하여 SOC 상태에서 활동하고 있다고 주장하였다.

저자들이 직접 주기성(periodicity)을 언급하지는 않았으나 그들의 모래사태모형에 대한 설명은 지각에 발생하는 응력의 주기성을 암시하고 있다. 즉, SOC 상태에 있는 지각 시스템은 응력이 최고수준에 도달하면 지각 구조의 특성과 축적된 에너지의 상태에 따라 소규모부터 발생 가능한 최대 규모의 지진까지 다양한 지진이 발생하게 되는데 이 과정에서 축적되었던 응력이 열 에너지 등으로 소진되면서 지각의 응력수준은 낮아지게 된다고 주장하였다.

이후 외부에서 지속적으로 공급되는 응력에 의해 지각은 다시 점진적으로 응력이 증가하게 되며 궁극적으로 최대 응력상태에서 지각의 응력이 다시 낮아지는 과정을 반복하게 된다고 주장하였다. 종합해보면 SOC 상태에서 지각은 응력의 증가와 감소를 반복하는 주기성을 갖게 될 것임을 추정할 수 있다.

Liritzis et al.(1993)은 1898년부터 1985년까지 전 세계에서 발생한 규모 7.0 이상의 지진을 대상으로 지진 에너지의 방출이 주기성을 갖는지 검토하였다. 저자들은 지진 에너지의 방출이 시변동성을 나타내며 2.3-4, 5.5-6.5, 8-9, 14-20, 31-34년의 주기가 우세하다고 분석하였다.

Main(1996)은 SOC에 도달한 시스템은 안정된 균형 상태(stable equilibrium)로 수렴하는 것이 아니라 하나의 준안정 상태(metastability)에서 다른 준안정상태로 동적으로 끊임 없이 변화해가는 과정을 보이며 단기적인 동적 변동성은 장기적인 준안정상태를 유지하는데 반드시 필요한 과정이라고 주장하였다.

그는 또한 임계안정상태에서 정상성(a stationary state of marginal stability)을 보이는 지각활동은 판 운동을 통해서 지속적으로 유입되는 에너지와 지진으로 인하여 단속적으로 방출되는 에너지가 비교적 일정한 상태를 유지하기 때문에 지각의 응력은 평균적인 의미에서 일정하다고 주장하였다. 그는 이러한 사실로부터 과거의 지진활동에 대한 자료를 이용하여 미래에 발생할 지진재해의 위험을 제한적이지만 예측할 수 있다고 주장하였다.

Sammonds et al.(1992)은 암석시료에 대해 시간당 일정한 변형률을 가하면서 파괴음향(Acoustic Emission, AE)을 측정하여 암석의 붕괴 과정과 이에 따른 상수 b 값의 변화를 분석하였다. 이들이 수행한 암석파괴실험은 판 운동에 의한 변형을 지속적으로 받는 지각에서 일어나고 있는 지진활동의 축소 모형이라고 할 수 있다.

암석에 가해지는 응력이 최대 응력(peak stress)의 약 50%를 넘어서기 시작하면서 암석 균열에 의한 붕괴음을 나타내는 AE가 발생하기 시작하며 응력이 더욱 증가하면서 균열이 지수함수적으로 증가하는 과정을 거쳐 최대치에 이른 후 다시 지수함수적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

암석에 작용하는 응력이 변화함에 따라 b 값이 변화하는 과정을 볼 수 있는데 응력곡선이 위로 볼록한 형태인 반면 b 값을 나타내는 그래프는 그와 반대로 아래로 볼록한 형태를 보이고 있어 반비례 관계임을 알 수 있다. 그리고 최대 응력 부근에서 파괴면(fault)이 형성되면서 암석이 붕괴되어 응력이 해소되는 과정을 확인할 수 있다.

상수 b 값은 초기에 압축응력이 선형적으로 증가하는 탄성 변형구간에서는 약 1.5 부근에서 변동하지만 파괴강도에 근접하면 0.5 정도로 급격하게 감소해가며 암석이 파괴된 후 파괴면(fault)을 따라 미끌어지는 슬립(slip) 과정에서는 약 1.7 정도의 값을 나타내고 있다.

이들의 연구에서 알 수 있듯이 암석에 단층을 형성하는 파괴가 일어나더라도 작용하는 응력 중에 일부만 해소되며 다시 시간이 경과하면 화학적, 물리적 작용에 의해 단층이 회복되고(fault healing), 단층 내부의 응력이 다시 증가하면서 동일한 응력 해소 과정을 반복하게 된다.

Main(1996)은 판 경계에서 지각에 가해지는 일정한 변형

과 더불어 단층에 축적된 응력의 일부만 지진 에너지로 해소 되는 것은 SOC 시스템의 중요한 성질이라고 주장하였다.

Schorlemmer et al.(2005)은 전 세계에서 계측된 지진자료의 분석을 통하여 지진 발생시 단층의 종류별로 응력이 달라지며 상수 b 값이 단층의 응력과 연관이 있음을 확인하였다. 저자들에 의하면 지진 발생시 응력은 역단층(thrust fault)에서 가장 높았고 주향이동단층(strike-slip fault)은 중간 정도였고, 정단층(normal fault)에서 가장 낮았으며 상수 b 값은 역단층에서 가장 낮고 정단층에서 가장 높게 나타나 응력에 반비례하는 관계를 보였다.

저자들은 단층 유형별 응력과 상수 b 값과의 관계를 일반화시켜서 임의의 단층에서 지진이 임박해질수록 단층의 응력이 증가할 것이며 이에 따라 상수 b 값이 감소해갈 것이라고 주장하였다. 그들은 상수 b 값은 지진 재해를 연구하는데 중요한 매개변수로서 지각의 응력 상태를 판단하는 ‘응력계(stress meter)’로 해석할 수 있을 것으로 보았다.

Corral(2007)은 개별적인 지진에 대한 발생을 예측하는 것은 어렵지만 여러 지진들에 대한 통계물리학적 접근은 타당하다고 주장하였다. 그리고 어떤 지역의 연간 지진 발생 횟수와 같은 지진활동의 특성은 시간에 대해 불변하는 정상성(stationary seismicity)을 보인다고 주장하였다.

그러나 저자가 검토한 캘리포니아주 남부지역처럼 지진이 빈발하는 곳은 연간 지진 발생횟수가 정상성을 보일 수 있겠지만 우리나라처럼 지진 발생횟수가 상대적으로 작은 지역은 연별로 차이가 클 수 있다고 판단된다.

그리고 지진활동이 나타내는 SOC의 특성이 지각의 응력 즉 지진 에너지의 정상성과 관련이 있기 때문에 지진 발생 횟수 보다는 지진이 방출하는 에너지의 양이 오히려 정상성을 보일 가능성이 크다고 판단된다.

국내에서는 Lee et al.(1980)이 1926년부터 1943년까지의 한반도에서 계측된 지진 자료 91개를 분석하여 G-R 관계식의 상수 $b = 0.80$ 을 구하였다. 저자들은 상수 b 값이 해당 지역의 지각운동(tectonics)과 연관성이 있을 것으로 추정되는 매개변수로서 그 범위는 대략 0.7에서 1.0 사이에 있음을 밝히고, 지진자료의 축적에 따라 우리나라의 상수 b 값이 다소 달라지겠지만 큰 변화는 없을 것으로 전망하였다.

Noh et al.(2000)은 1978년부터 2000년까지 계측된 기상청의 지진 기록을 이용하여 G-R 관계식의 상수 $a = 5.66$, $b = 1.11$ 을 구하였다. 저자들은 기존에 기상청에서 분석한 상수 b 값에 비해 저자들의 값이 ‘매우 큰 값’이기는 하지만 한반도가 속한 안정화된 대륙에 대한 외국의 연구 사례에서 나타난 1.01과 부합하는 수치라고 주장하였다.

Kyoung et al.(2000)은 1997년 이후 3년 동안 한국국원대 지진관측망을 통해 계측된 규모 4.2 이내의 미소지진 71개를 이용하여 G-R 관계식의 상수 $a = 4.52$, $b = 1.14$ 를 구하였다. Kyoung et al.(2000)은 저자들이 구한 상수 b 값이 Lee

et al.(1980)이 한반도 계기지진 자료를 분석하여 구한 0.80에 비해 ‘약간 높은 값’임을 지적하면서 저자들이 사용한 자료의 관측 기간이 짧은데 그 원인이 있을 것으로 추정하였다.

Park et al.(2002)은 1978년부터 2001년까지 기상청에서 관측한 규모 2.3 이상의 지진 456개에 대하여 G-R 관계식의 상수 $a = 3.49$, $b = 0.87$ 을 구하였다. 그리고 이렇게 구해진 G-R 관계식을 이용하여 규모 3.0에서 5.0까지 지진 규모별 재현기간을 산정하였다.

이상에서 지진에너지와 G-R 관계식의 상수들에 대한 국내의 연구 동향을 살펴본 결과 국외에서는 지각의 응력변화에 대한 메커니즘 규명과 지진 예측을 위한 매개변수로서의 상수 b 값에 대한 연구를 주로 진척시켜온 반면 국내에서는 상수 b 값의 산정과 재현빈도별 지진의 규모를 판단하는 정도에 머물러 있는 것으로 나타났다.

그리고 국외에서 지진에너지의 주기성에 대한 연구와 지각의 응력이 시간에 따라 변화하는 과정에 대한 모형연구가 있었지만 지진에너지의 시변동성에 대한 모형의 제시와 이에 대해 계측 지진자료를 이용하여 검증한 사례는 없는 것으로 보인다.

2. 연구 목적 및 이용 자료

본 연구에서는 우리나라의 본격적인 지진 계기관측이 시작된 1978년 8월 30일부터 2016년 11월 27일까지 기상청(2016)에서 관측한 규모 2.0 이상의 지진자료 1,450개를 이용하여 지진 에너지의 시간적 변동성과 G-R 관계식 상수들과의 관계를 검토하였다.

본 연구에서는 경주 지진 발생 이후 지진 에너지의 변화도 검토에 포함시키기 위하여 경주 지진 이후에 발생한 여진(aftershocks)도 분석 대상에 포함시켰다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 1,450개 지진 자료의 규모별 빈도수를 나타낸 히스토그램과 박스플롯이며 Table 1은 지진 자료의 통계적 특성을 정리한 것이다.

히스토그램과 박스플롯에 나타난 바와 같이 본 연구에서 활용한 우리나라의 지진 자료는 우측방향으로 강한 양의 편기(positive skewness)를 보여주고 있다. 이것은 작은 규모의 지진이 빈발하지만 가끔 ‘이상치(outlier)’라고 부르는 상대적으로 강한 지진이 드물게 발생하는 전형적인 지진 발생 양상 때문이다.

박스플롯에서 속이 빈 작은 원으로 표시한 이상치(outlier)는 여기에서는 중앙값(median)으로부터 1분위(1st Qu.)와 3분위(3rd Qu.)간 간격의 2배를 넘어서는 값으로 정의하고 있으며 규모 4.0을 초과하는 지진이 이상치에 해당하는 것을 알 수 있다.

또한 기상청에서 규모 2.0 이상의 지진만을 기록하기 때문에 지진 규모의 최소치(Min.)가 영이 아니라 2.0부터 시작하고 있으며 최대치(Max.)는 경주 지진의 5.8이다.

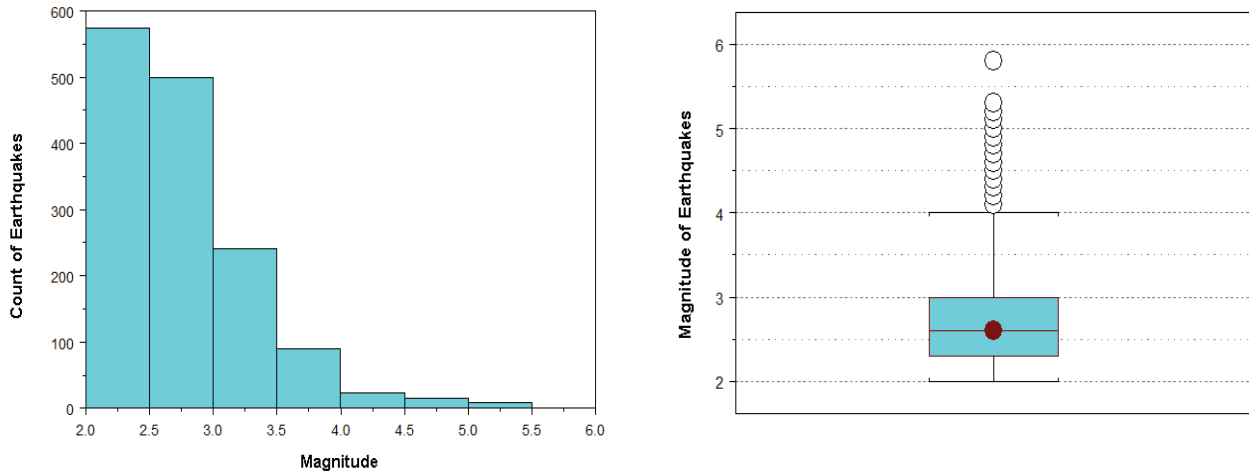


Fig. 1. Histogram and Boxplot of Earthquake Magnitude Data (1978.8-2016.11)

Table 1. Summary Statistics of Earthquake Magnitude Data (1978.8-2016.11)

Total N	Min.	1st Qu.	Mean	Median	3rd Qu.
1,450	2.0	2.3	2.7	2.6	3.0
	Max.	Std. Dev.	SE of Mean	Skewness	Kurtosis
	5.8	0.56	0.015	1.44	3.09

3. 지진 에너지와 G-R 상수 a 와 b 분석

3.1 지각 시스템의 LEL 모형 제안

앞에서 살펴본 Mogi(1985)의 지각 응력변화 모형들은 개념적으로는 지각의 응력 변화와 지진과의 관계를 설명하는데 어려움이 없지만 실제 지각의 응력 변화를 측정하기가 매우 어렵기 때문에 실무에 적용하기 어려운 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 지각의 응력 대신에 지진 에너지를 지각 시스템의 SOC를 규정하는 매개변수로 채택하고 시스템 에너지의 정상성에 대한 SOC 이론을 바탕으로 Fig. 2와 같이 지진 에너지 하한 모형(Lower energy limit model, LEL)을 제안하였다.

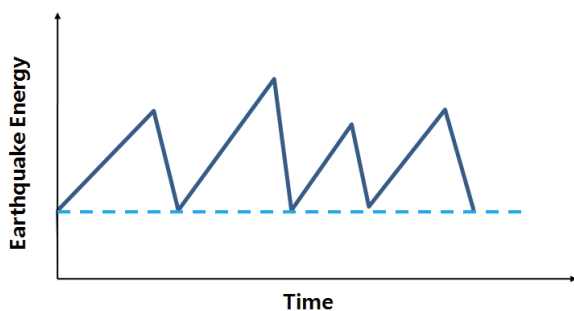


Fig. 2. Lower Energy Limit Model for the Temporal Variation of Earthquake Energy in a Region

LEL 모형은 지진의 발생으로 단층이 붕괴되거나 균열이 발생하여 응력이 해소될 때 단층에 남는 최소 응력은 단층의 미끄럼에 의해 좌우될 것이며 그 값은 단층의 재질이나 강도에 큰 영향을 받지 않고 거의 일정할 것으로 가정하고 있다.

따라서 지진 에너지의 시계열은 Fig. 2와 같이 상한은 어느 정도 변화하지만 하한은 거의 일정한 상태에서 증감을 반복하는 순환적인 패턴을 보일 것으로 가정하고 있다.

그리고 지각 판으로부터 전달되는 응력이 증가함에 따라 SOC 상태의 지각이 주기적으로 에너지를 방출하여 평균적으로 볼 때 정상상태를 유지하겠지만 지각 구성 물질의 복잡성과 이질성 등을 고려할 때 각 주기별로는 지속기간과 에너지 방출량이 달라질 수 있다고 보았다.

3.2 지진 자료의 분석

지진 시계열자료의 에너지와 G-R 관계식의 상수 a , b 값의 변동성을 검토하기 위한 샘플링 방법으로 Smith(1981)가 상수 b 값 변화를 검토하기 위하여 채택한 윈도우기법을 적용하였다. 이 방법은 샘플당 일정한 숫자의 지진을 대상으로 분석하되 시계열상 다음번 샘플은 미 포함된 인접한 지진자료를 일부 추가하여 구성하는 방식이다.

본 논문에는 포함시키지 않았으나 Smith(1981)가 제시한 샘플당 지진수 50개와 새로운 지진 추가수 10개(a 50-event

window sliding by 10 events)는 샘플간 지진 에너지와 상수 b 값의 분산이 과도하여 본 연구의 분석목적에 적절치 않은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 Schorlemmer et al.(2005)이 상수 b 값 계산을 위한 샘플당 지진자료의 적정 숫자로 제안한 200개를 적용하였으며 샘플당 새로운 지진 추가수는 샘플간 지진 에너지와 상수 b 값의 분산 등을 고려한 시행착오법에 의해 50개를 채택하였다.

Fig. 3은 200개의 지진과 새로운 지진 추가수 50개(a 200-event window sliding by 50 events)를 적용하여 구한 26개 샘플별 지진 규모의 분포를 나타낸 박스플롯이다.

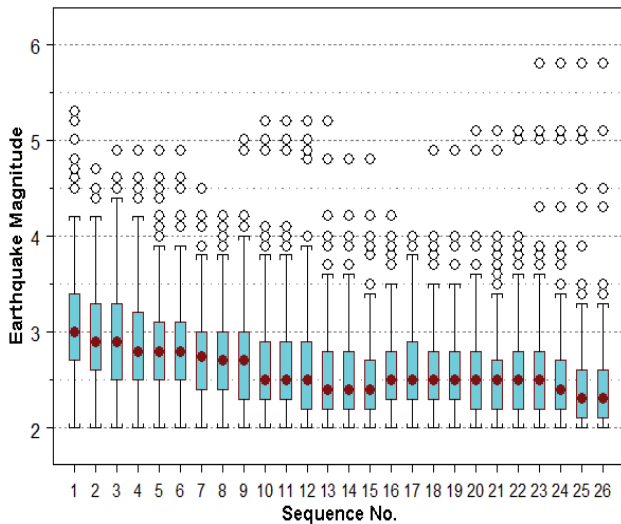


Fig. 3. Boxplot of Earthquake Magnitude for 26 Consecutive Samples Using a 200-event Window Sliding by 50 Events (1978.8-2016.11)

본 연구에서는 샘플들을 지진 발생 순서에 따라 1번부터 26번까지 시퀀스 번호(Sequence No.)를 부여하여 샘플 간 전후 관계를 파악할 수 있도록 하였다.

Fig. 3에서 시퀀스 번호 1번부터 9번까지 적색 작은 원으로 표시한 지진규모의 중앙값(median)은 그 이후 10번부터 26번 사이의 값 보다 크며 초반에 비해 후반으로 갈수록 점차 감소해가는 것을 알 수 있는데 이는 지진계측체계의 변화와 관계있는 것으로 추정된다.

시퀀스 번호 9번과 10번 구간은 기존의 아날로그 지진계를 광대역 디지털 지진계로 교체한 시기이다. 기상청(2016)에 의하면 아날로그 지진계를 사용하던 1978년부터 1998년 사이에 연평균 지진 발생은 19.2회인 반면 디지털 지진계를 사용한 1999년 이후에는 59.6회로 3배 이상 증가하였다. 이것은 지진관측소 숫자가 점차 증가하였을 뿐만 아니라 기존 아날로그 방식의 지진계가 민감한 디지털 지진계로 교체되면서 작은 규모의 지진 계측이 증가하였기 때문으로 추정된다.

한편 시퀀스 번호 16번부터 23번까지는 지진규모의 중앙값(median)이 그 전에 비해 전반적으로 증가한 경향을 보이고 있다. 시퀀스 번호 16번은 2011년 3월 11일 발생한 동일본 대지진이 포함된 구간으로 대지진의 영향일 가능성이 있으나 본 연구에서 그 증거를 확인할 수는 없었다.

마지막으로 시퀀스 번호 23번부터 26번까지는 지진규모의 중앙값(median)이 그 전에 비해 감소하는 경향을 보이고 있다. 시퀀스 번호 23번은 국내 지진 계측사상 최대인 규모 5.8의 경주지진이 발생한 2016년 9월 12일이 포함된 구간이다. 경주지진 발생 이후 작은 규모의 여진이 다수 발생하면서 지진규모의 중앙값이 감소해간 것으로 분석된다.

Table 2는 시퀀스 번호 1번부터 26번까지 각 샘플별 지진 에너지의 합계와 G-R 관계식의 상수 a , b , 결정계수 R^2 , 통계적인 유의성을 나타내는 F 값과 p 값을 분석하여 정리한 것이다. 지진 에너지의 단위는 기가줄(Giga Joules)이다.

표에서 23번에서 26번까지는 규모 5.8의 경주지진을 포함한 경우와 미포함한 경우로 구분하여 표시하였다. 이는 다음에 분석할 지진 에너지의 정상성과 주기성 측면에서 판단할 때 이상치에 해당하기 때문이다. 즉, 일정하게 지속되는 판 운동에 의한 지각의 SOC 상태와 다른 외적인 요인에 의한 지진일 가능성을 배제할 수 없기 때문이다.

Fig. 4는 시퀀스 번호 1번부터 26번까지 지진 에너지와 G-R 관계식의 상수 a , b 에 대한 박스플롯이며 Table 3은 이에 대한 주요 통계치들을 정리한 것이다. 지진 에너지에 대한 박스플롯에서 이상치는 6,309(GJ)를 초과하는 값이다.

Fig. 4 (c)에서 0.5 이하의 b 값은 이상치이거나 이상치에 가까운 것으로 나타났으며 기존 문헌에서도 b 값의 범위는 대체로 0.5 이상 1.5 이내로 알려져 있어 0.5 이하의 값은 이상치로 판단하여 이후의 분석에서 제외하였다.

200개의 지진으로 구성된 각 샘플별 에너지는 최소 173(GJ)에서 최대 15,818(GJ)에 이르기까지 변화가 큰 것으로 나타났으며 이것은 규모 4.0 이상의 상대적으로 큰 지진 발생과 관련이 큰 것으로 분석되었다. 이러한 영향으로 인하여 지진 에너지는 우측 편기(positive skewness) 경향이 매우 강하며 첨도(kurtosis)도 높은 것으로 분석되었다.

1978년부터 2016년까지 약 38년간 우리나라에서 계측된 연평균 지진의 수는 약 38개이고 연평균 지진 에너지는 약 730(GJ)로 연평균 전세계 지진 에너지 10^9 (GJ)의 약 140만분의 1 정도인 것으로 분석되었다.

G-R 관계식의 상수 a 값은 1.83에서 3.77 사이의 값을 보였으며 거의 편기됨이 없이 분포하는 것으로 분석되었다.

G-R 관계식의 상수 b 값은 0.43에서 0.92 사이의 값으로 기존 문헌에 제시된 값들과 비슷한 범위를 보였으며 다소 우측으로 편기하여 분포하는 것으로 분석되었다.

Table 2. Variation of Earthquake Energy and Parameters a- and b-values of the G-R Relation for 26 Samples Using a 200-event Window Sliding by 50 Events from August 1978 to November 2016

No.	Duration	Σ Energy (GJ)	Gutenberg-Richter Relation				
			a-value	b-value	R^2	F(1,5)	p
1	78.08-90.10	6,309	3.20	0.43	0.65	9.47	2.75E-2
2	81.05-93.06	1,176	1.83	0.47	0.68	8.32	4.47E-2
3	84.04-95.08	1,641	2.28	0.61	0.86	29.59	2.84E-3
4	86.07-96.12	1,739	2.30	0.60	0.85	29.17	2.93E-3
5	91.01-98.10	1,794	2.46	0.60	0.89	39.90	1.46E-3
6	93.07-00.05	1,543	2.59	0.64	0.89	41.06	1.37E-3
7	95.08-01.08	544	3.01	0.76	0.87	25.78	7.09E-3
8	97.01-02.10	424	2.55	0.59	0.88	21.68	1.86E-2
9	98.10-04.01	1,678	2.62	0.61	0.94	66.41	1.23E-3
10	00.05-05.04	3,220	2.53	0.58	0.90	34.73	4.14E-3
11	01.09-06.04	3,250	2.56	0.57	0.94	60.99	1.45E-3
12	02.10-07.07	3,531	2.79	0.68	0.86	30.82	2.60E-3
13	04.01-08.09	2,179	3.12	0.79	0.96	132.50	8.67E-5
14	05.04-09.06	606	3.40	0.86	0.98	216.90	6.06E-4
15	06.04-10.06	567	3.49	0.91	0.98	166.90	5.67E-4
16	07.07-11.07	211	3.39	0.85	0.94	48.81	6.02E-3
17	08.09-12.06	173	3.59	0.92	0.93	37.45	8.77E-3
18	09.06-13.05	1,271	2.93	0.71	0.81	17.20	1.43E-2
19	10.07-13.09	1,314	2.95	0.66	0.89	32.22	4.75E-3
20	11.07-14.08	2,404	2.88	0.65	0.76	12.67	2.35E-2
21	12.06-15.09	2,404	2.84	0.64	0.76	12.60	2.37E-2
22	13.05-16.07	2,088	3.01	0.66	0.82	18.39	1.27E-2
23	13.09-16.09	3,229 (15,818)*	2.72 (2.54)*	0.60 (0.54)*	0.81 (0.75)*	21.58	5.60E-3
24	14.09-16.09	2,093 (14,682)*	2.95 (2.77)*	0.62 (0.56)*	0.84 (0.78)*	26.86	3.51E-3
25	15.09-16.09	2,197 (14,786)*	3.19 (3.03)*	0.64 (0.58)*	0.78 (0.71)*	21.44	3.57E-3
26	16.07-16.11	1,386 (13,976)*	3.77 (3.61)*	0.67 (0.62)*	0.85 (0.77)*	33.76	1.14E-3
-	Average	1,884 (3,820)*	2.88 (2.86)*	0.67 (0.66)*	0.86 (0.85)*	-	-

Note: An asterik(*) means the M5.8 Kyoungjoo event is included in the analysis

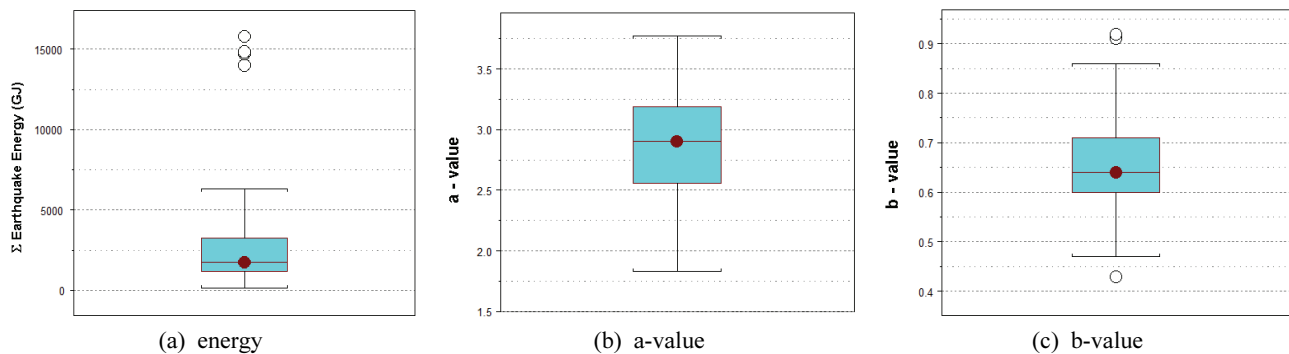


Fig. 4. Boxplots of 26 Consecutive Samples Using a 200-event Window Sliding by 50 Events from August 1978 to November 2016

Table 3. Summary Statistics of the Earthquake Energy and Parameters a- and b-values of the G-R Relation for 26 Samples Using a 200-event Window Sliding by 50 Events from August 1978 to November 2016

Statistics	Σ Energy (GJ)	a-value	b-value
Min.	173	1.83	0.43
1st Qu.	1,199	2.56	0.60
Mean	3,820	2.88	0.67
Median	1,766	2.90	0.64
3rd Qu.	3,242	3.17	0.70
Max.	15,818	3.77	0.92
Sum	99,328	74.95	17.32
Std. Dev.	4,956	0.44	0.12
SE Mean	972	0.087	0.023
Skewness	1.79	-0.095	0.57
Kurtosis	1.73	0.073	0.33

3.3 지진 에너지의 주기적 변동성 분석

Table 2의 시퀀스별 지진 에너지를 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이때 규모 5.8의 경주지진을 포함하고 있는 시퀀스 23에서 26까지의 자료는 규모 5.8의 경주지진을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우로 구분하여 두 가지로 표시하였다.

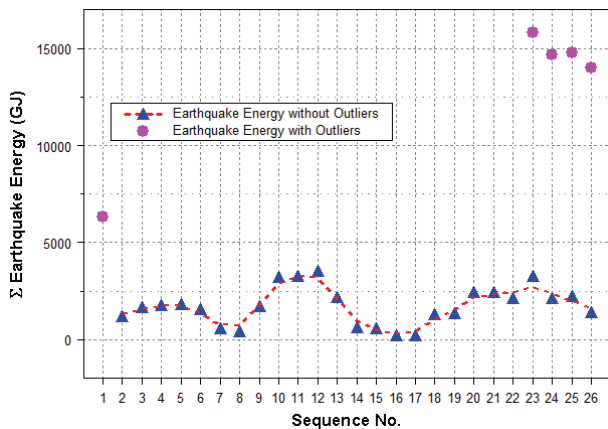


Fig. 5. Variation of the Earthquake Energy for 26 Consecutive Samples Using a 200-event Window Sliding by 50 Events (1978.8-2016.11)

Fig. 5에 나타난 바와 같이 이상치를 제거한 시퀀스별 지진 에너지(청색 삼각형과 점선으로 연결된 곡선)는 활동기(active period)와 비활동기(inactive period)가 교차하여 이어지는 준안정(metastable) 상태를 보이고 있으며 본 연구에서 제시한 LEL 모형에 가까운 것으로 나타났다.

또한 지진 에너지 그래프에서 주기성(periodicity)을 확인할 수 있는데 시퀀스 2번에서 8번까지 첫 번째 주기가 나타나고 있고 8번에서 16번까지 두 번째 주기를 확인할 수 있다.

세 번째 주기도 같은 양상을 보인다면 16번부터 24번까지

주기를 형성할 것으로 예측되나 23번 시퀀스에서 M5.8의 경주지진이 발생하면서 주기에 변화가 발생한 것으로 보인다. Fig. 5를 자세히 살펴보면 시퀀스 20과 21에서 최대 지진 에너지 수준을 보인 후 22에서 감소추세로 돌아선 것을 확인할 수 있다. 그러나 23번 시퀀스에서 경주지진에 따른 여진(aftershocks)의 영향으로 지진 에너지가 일시적으로 다시 상승했다가 여진이 줄어들면서 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

자기상관함수(autocorrelation function)와 파워스펙트럼 분석에서는 이상치로 판단되는 시퀀스 1을 제외시켰으며, 시퀀스 23에서 26에서는 이상치에 해당하는 경주 지진을 제외하여 분석하였다. 이상치를 제거한 시퀀스별 지진 에너지 25개 자료에 대해 자기상관함수와 파워스펙트럼을 구하면 Fig. 6과 같다.

자기상관함수가 시차(lag)의 증가에 따라 지수함수적으로 감소(exponential damping)해가는 경향을 확인할 수 있는데 이것은 정상성을 보이는 시계열자료(stationary process)의 중요한 특징의 하나이다(Payne, 1982).

파워스펙트럼 분석을 살펴보면 가장 우세한 주파수는 $f=0.125$ 이다. 이는 주기 8 시퀀스에 해당하며 Fig. 7에서 검토한 주기성과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구 결과가 시사하는 바는 우리나라의 평상시 지진활동은 지각 판에서 발생하는 일정한 변형률로 인하여 SOC 상태에서 준안정상태를 유지하고 있으며 그 결과로 나타나는 주기적인 지진활동의 변동추세는 LEL 모형과 비슷하다는 것이다.

이와 같은 준안정상태와는 달리 이상치로 분류된 시퀀스 1과 시퀀스 23에서 26의 지진들은 다른 지진들과 발생 원인이 다를 것으로 추정된다. 지속적으로 일정하게 발생하는 지각 판의 변형률이 준안정상태의 지진을 발생시키는 것으로 판단되며 그 에너지는 200개 지진당 평균 1,706(GJ)이다.

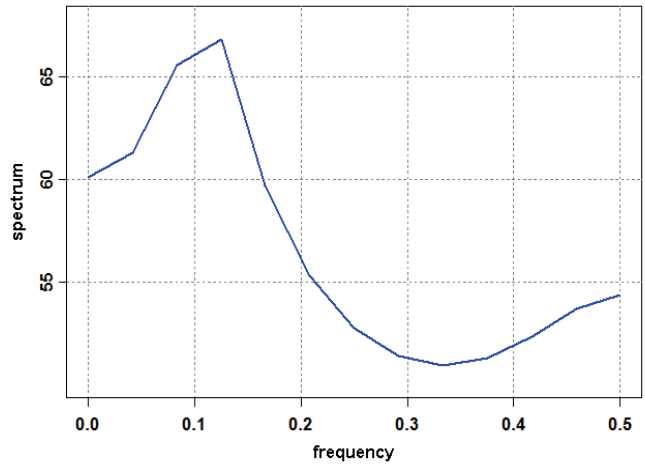
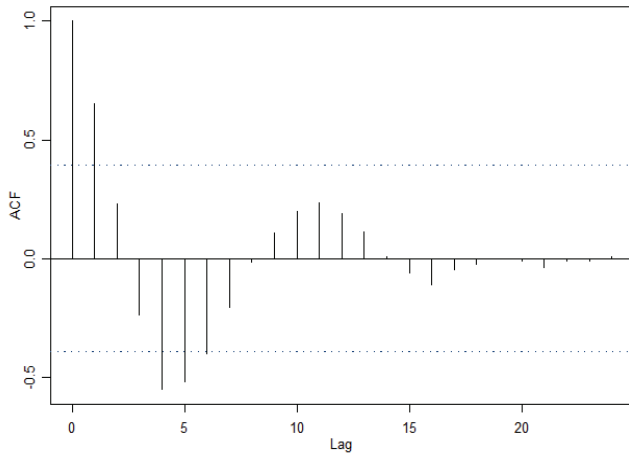


Fig. 6. Autocorrelation Function and Power Spectrum of the Earthquake Energy for 25 Consecutive Samples Using a 200-event Window Sliding by 50 Events Excluding Outliers (1978.8-2016.11)

그러나 시퀀스 1의 경우 지진 에너지는 평균치의 3.7배에 해당하는 6,309(GJ)이며 시퀀스 23은 9.3배에 해당하는 15,818(GJ)로 준안정상태의 지진들과는 매우 다른 에너지 수준을 보이고 있기 때문이다.

시퀀스 1에 포함된 지진으로 1978년 9월 16일 규모 5.2의 상주지진, 1978년 10월 8일 규모 5.0의 홍성지진, 1980년 1월 8일 규모 5.3의 북한 삭주지진 등이 있다. 이 지진들이 있기 전인 1975년 2월 4일 규모 7.4의 하이청지진과 1976년 7월 28일 규모 7.8의 당산지진이 있었다. 앞으로 추가적인 연구가 필요하겠지만 우리나라와 비교적 가까운 거리에 위치한 중국 동북부지방에서 발생한 이들 지진이 우리나라의 지진 발생에 영향을 미쳤을 가능성이 우연일 가능성 보다 높아졌다고 보인다.

시퀀스 23에서 26의 지진 자료는 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주지진으로 인하여 이상치로 분류되었다. 경주 지진이 있기 전인 2011년 3월 11일 규모 9.0의 동일본 대지진이 발생하였는데 이때 큰 지각 변형률을 보인 지역들은 진원지와 거리상으로 가까운 동해안을 연한 지역으로 경주 일대도 여기에 포함된다(Cho, 2015). 역시 앞으로 추가적인 연구가 필요하겠지만 동일본 대지진이 경주지진 발생에 영향을 미쳤을 가능성이 우연일 가능성 보다 높아졌다고 보인다.

3.4 지진 에너지와 G-R 상수와와의 관계 분석

Fig. 7은 상수 b 값이 0.5 미만으로 이상치를 보인 1번과 2번 시퀀스를 제외한 24개 시퀀스(Table 2에서 경주지진은 제외하여 분석한 자료)에 대한 G-R 관계식의 상수 a 와 b 를 Kernel-Smoother(kernel=normal, bandwidth=2.5) 곡선을 이용하여 나타낸 것이다.

상수 a 와 b 의 변동 추세가 대체적으로 비슷한 경향을 보이고 있다. 상수 a 와 b 의 상관계수를 분석한 결과 0.77로

비교적 높은 정비례 관계로 나타났으며 상수 a 와 지진 에너지와는 -0.46으로 다소 낮은 반비례 관계를 보였다.

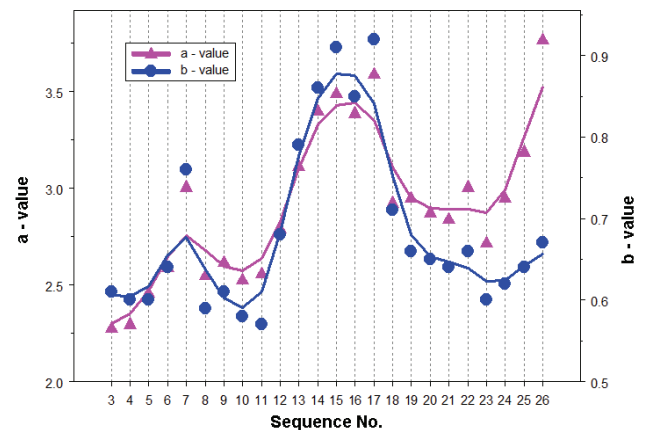


Fig. 7. Variation of Parameters a - and b -values of the G-R Relation for 24 Consecutive Samples Using a 200-event Window Sliding by 50 Events Excluding Outliers (1978.8-2016.11)

상수 a 는 어떤 상수 b 의 값을 갖는 지진 집합에 대해서 전체적인 지진의 에너지 수준을 나타내는 매개변수이다. 예를 들어 두 개의 지진 집합이 약한 지진과 강한 지진의 상대적인 비율을 나타내는 상수 b 의 값이 같을지라도 전체적인 지진의 에너지 수준은 다를 수 있다. 상수 b 의 값이 같을 경우 지진 집합의 에너지 수준이 낮을수록 상수 a 는 큰 값을 갖게 된다.

또한 상수 a 는 G-R 관계식에서 알 수 있듯이 지진의 발생 빈도와도 관계가 있어서 같은 기간 내에 지진이 많이 발생할수록 큰 값을 갖는 경향을 보이게 된다.

Fig 8은 같은 자료에 대해 GR 관계식의 상수 b 와 지진 에너지와의 관계를 Kernel-Smoother(kernel=normal, bandwidth=2.5) 곡선을 이용하여 나타낸 것이다.

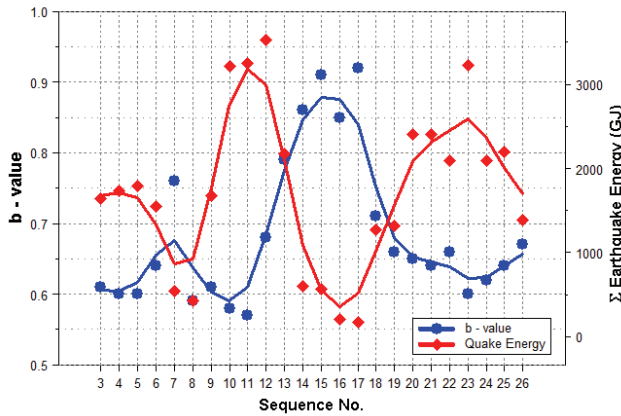


Fig. 8. Variation of Parameter b-values of the G-R Relation and Earthquake Energy for 24 Consecutive Samples Using a 200-event Window Sliding by 50 Events Excluding Outliers (1978.8-2016.11)

상수 b 와 지진 에너지의 변동 추세가 대체적으로 반비례하는 경향을 보이고 있다. 상수 b 와 지진 에너지와의 상관계수를 분석한 결과 -0.64 로 비교적 높은 반비례 관계로 나타났다.

지진 에너지가 증가하면 상수 b 값은 감소하는 경향을 보이는데 이것은 기존 문헌에서 지각의 응력이 증가하면 상수 b 값이 감소하는 경향과 일치하는 결과라고 할 수 있다.

상수 b 는 Eq. (1)에서 지진의 규모와 발생횟수의 상용대수 값 간의 반비례 관계를 나타내는 매개변수인데 약한 지진에 비해 강한 지진의 비율이 증가할수록 상수 b 는 감소하는 경향을 보인다. 이것은 상수 b 가 G-R 관계식을 그래프로 나타냈을 때 선형회귀식의 기울기를 의미함을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다.

또한 지진의 규모 M 은 지진 에너지와 Eq. (2)의 관계를 나타내므로 상수 b 는 지진 에너지의 상용대수 값과 발생 빈도의 상용대수 값과의 반비례 관계를 나타내는 매개변수라고 할 수 있다.

$$\text{Log}_{10} E = 1.5M + 4.4 \quad (2)$$

여기서, E 는 지진의 에너지(Joules)이다(Lomnitz, 1994).

종합하면 상수 b 는 G-R 관계식에서 지진의 에너지 분포와 밀접한 관계를 갖는 매개변수이며 본 연구에서 실제 계측된 지진자료의 분석을 통하여 이를 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 1978년부터 2016년까지 38년 동안 기상청에서 관측한 1,450개의 지진 자료를 이용하여 우리나라 지진 에너지의 변동성과 G-R 관계식의 상수들과의 관계를 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 위의 지진 자료를 이용하여 200개의 지진으로 구성된

26개의 지진 샘플(시퀀스)을 구성하여 지진 에너지를 분석한 결과 최소 173(GJ)에서 최대 15,818(GJ)에 이르기까지 변화가 크고 우측 편기가 강하게 나타났다. G-R 관계식의 상수 a 값은 1.83에서 3.77 사이의 값을 보였으며 거의 편기됨이 없이 분포하는 것으로 분석되었고 상수 b 값은 0.43에서 0.92 사이의 값으로 기존 문헌에 제시된 값들과 비슷한 범위를 보였으며 다소 우측으로 편기하여 분포하는 것으로 분석되었다.

- (2) 이상치를 제거한 시퀀스별 지진 에너지는 활동기(active period)와 비활동기(inactive period)가 교대로 이어지는 준안정(metastable) 상태를 보이고 있으며 본 연구에서 제시한 LEL 모형에 가까운 것으로 나타났다.
- (3) 경주지진 발생 이후 여진(aftershocks)의 영향으로 지진 에너지가 일시적으로 상승했지만 여진이 줄어들면서 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 앞으로 면밀한 관찰이 필요하겠지만 우리나라는 지진이 비활동기에 접어들어 지진 에너지가 감소하는 경향을 보일 것으로 추정된다.
- (4) G-R 관계식의 상수 a 와 b 의 상관계수를 분석한 결과 0.77로 비교적 높은 정비례 관계로 나타났으며 상수 a 와 지진 에너지와는 -0.46 으로 다소 낮은 반비례 관계를 보였다.
- (5) 상수 b 와 지진 에너지와의 상관계수를 분석한 결과 -0.64 로 비교적 높은 반비례 관계를 보였다.

References

Bak, P., and Tang, C. (1989) Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. B11, pp. 15,635-15,637.

Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1988) Self-organized criticality. *Physical Review A*, Vol. 38, No. 1, pp. 364-374.

Chen, K., Bak, P., and Obukhov, S.P. (1991) Self-organized criticality in a crack-propagation model of earthquakes. *Physical Review A*, Vol. 43, No. 2, pp. 625-630.

Cho, J.M. (2015) Estimation of the crustal deformation caused by earthquake and its use in updating published coordinates of geodetic control points: a case study of the 2011 Tohoku earthquake's impact in South Korea. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 33, No. 6, pp. 485-495.

Corral, Á. (2007) Statistical features of earthquake temporal occurrence. *Lecture Notes in Physics*, Vol. 705, Springer-Verlag, pp. 191-221.

- Gutenberg, N., and Richter, C.F. (1954) *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, 2nd ed., Princeton University Press, Princeton.
- Iman, R.L., and Conover, W.J. (1983) *A Modern Approach to Statistics*. John Wiley and Sons, New York, p. 497.
- Kim, K.H., Kang, T.S., Rhie, J., Kim, Y., Park, Y., Kang, S.Y., Han, M., Kim, J., Park, J., Kim, M., Kong, C., Heo, D., Lee, H., Park, E., Park, H., Lee, S.J., Cho, S., Woo, J.U., Lee, S.H., and Kim, J. (2016) The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 2. Temporary seismic network for monitoring aftershocks. *Geosciences Journal*, Vol. 20, No. 6, pp. 753-757.
- Kim, Y., Rhie, J., Kang, T.S., Kim, K.H., Kim, M., and Lee, S.J. (2016) The 12 September 2016 Gyeongju earthquakes: 1. Observation and remaining questions. *Geosciences Journal*, Vol. 20, No. 6, pp. 747-752.
- KMA (2016) A catalogue of Korean earthquakes. from http://www.kma.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp (Retrieved: November 7, 2016).
- Kyung, J.B., Chung, T.W., Lee, D.K., Lee, J.G., and Lee, E.A. (2000) Analysis of Seismicity by Observation of micro - earthquakes in the Central Region of South Korea. *Journal of the Korean Geophysical Society*, Vol. 3, No. 3, pp. 201-212.
- Lee, K.H., and Jung, H.O. (1980) A study of instrumental earthquake data of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 16, No. 1, pp. 32-45.
- Liritzis, I., and Tsapanos, T.M. (1993) Probable evidence for periodicities in global seismic energy release. *Earth, Moon, and Planets*, Vol. 60, pp. 93-108.
- Lomnitz, C. (1994) *Fundamentals of Earthquake Prediction*. John Wiley and Sons, New York, p. 103.
- Main, I.G. (1996) Statistical physics, seismogenesis, and seismic hazard. *Review of Geophysics*, Vol. 34, No. 4, American Geophysical Union, pp. 433-462.
- Mogi, K. (1985) *Earthquake prediction*. Academic Press Japan Inc., Tokyo.
- Noh, M.H., Lee, S.K., and Choi, K.R. (2000) Minimum magnitudes of earthquake catalog of Korea Meteorological Agency for the estimation of seismicity parameters. *Journal of the Korean Geophysical Society*, Vol. 3, No. 4, pp. 261-268.
- Park, J.W., Hong, Y.G., and Hong, G.S. (2002) A Study on Analysis of the Domestic Earthquake Characteristics using the Statistical Methods. *The Architectural Institute of Korea*, Vol. 22, No. 1, pp. 211-214.
- Payne, J.A. (1982) *Introduction to simulation: Programming techniques and methods of analysis*. McGraw-Hill Book Company.
- Sammonds, P.R., Meredith, P.G., and Main, I.G. (1992) Role of pore fluids in the generation of seismic precursors to shear fracture. *Nature*, Vol. 359, No. 6392, pp. 228-230.
- Scholtz, C.H. (1968) The frequency-magnitude relation of microfracturing in rocks and its relation in earthquakes. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 1, pp. 399-415.
- Schorlemmer, D., Wiemer, S., and Wyss, M. (2005) Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature*, Vol. 437, No. 7058, pp. 539-542.
- Smith, W.D. (1981) The b-value as an earthquake precursor. *Nature*, Vol. 289, pp. 136-139.

Received	February 24, 2017
Revised	March 7, 2017
Accepted	May 2, 2017

