Crisisonomy Vol.13 No.3, 83-92
ISSN 2466-1198 (Print) ISSN 2466-1201 (Online) http://dx.doi.org/10.14251/crisisonomy.2017.13.3.83
© 2017 Crisis and Emergency Management : Theory and Praxis. All rights reserved.

Crisisonomy

Prediction of Magnitudes and Recurrence Intervals of the Korean Earthquakes Based on the Gutenberg-Richter Magnitude-Frequency Relation

Suk Hwan Jang[1#], Kyoung Doo Oh[2+], Ji Hwan Oh[1], Jun Won Jo[1]

[1] Department of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyreonggi, Korea
[2] Department of Civil & Environment Engineering, Korea Military Academy, 574, Hwarang-ro, Nowon-gu, Seoul, Korea

Abstract

In this study, the G-R magnitude-frequency relation was derived using the data of 1,278 earthquakes measured by the Korean Meteorological Agency for 38 years from August 30, 1978 till September 12, 2016 when the Kyongju earthquake of magnitude 5.8 took place. The G-R relation of $Log_{10}(\sum N\ per\ Year) = 3.45 - 0.82\,M$ ($R^2 = 0.98$) was obtained from a linear regression fitting the earthquake data and then used to calculate the magnitudes of earthquakes for given recurrence intervals. Using this equation, earthquake magnitudes were evaluated for various recurrence intervals and compared with those for the recurrence intervals currently in use. In addition, a sensitivity analysis was performed to examine the effects of future strong shocks on the G-R relation. As the magnitude of earthquake increased, the constants a and b of the G-R relation showed a decreasing tendency along with an increasing variance of the relation.

Key words: earthquake, magnitude-frequency, recurrence interval, seismic hazard

Ⅰ. 서 론

1. 연구배경

우리나라는 오랜 기간 큰 지진의 피해가 없는 지진 안전지대로 여겨져 지진 재해는 상대적으로 주목을 받지 못하였고 그동안 지진 관련 연구도 활발하지 못했던 것이 현실이다.

그러나 2016년 9월 12일 국내 지진 계측 사상 최대인 규모 5.8의 지진이 경주에서 발생하여 많은 재산 피해와 더불어 지진동이 서울까지 체감되면서 지진에 대한 국내의 관심이 고조되고 있다.

그동안 지진에 대한 낮은 인식에도 불구하고 다행스럽게도 국내에서는 주요 시설물에 대하여 내진설계 기준을 적용해오고 있다. 원자력발전소의 경우 지반가속도 0.2g에 해당하는 규모 6.5를 기준으로 내진 설계하고 있으며 다목적댐과 높이 45m 이상의 내진특등급댐은 지반가속도 0.154g에 해당하는 규모 6.3을 내진 설계 기준으로 적용하고 있다.

그러나 최근 경주 지진 이후로 원자력발전소의 내진성능에 대하여 우려의 목소리가 커지고 있으며 이에 따

The 1st author: Suk Hwan Jang, Tel. +82-31-539-2025, Fax. +82-31-539-2020, e-mail. drjang@daejin.ac.kr
+ Corresponding author: Kyung Doo Oh, Tel. +82-2-976-0967, e-mail. okd0623@hanmail.net

www.kci.go.kr

라 정부에서는 신규로 건설하는 원자력발전소의 핵심 설비는 규모 7.4(0.5g)를 기준으로 설계하며, 기존에 건설된 원자력발전소도 내진 성능을 현재 규모 6.5에서 규모 7.0까지 보강하기로 하였다.

한편, Oh, *et. al.*(2016)은 붕괴시 대형 재난을 초래할 수 있는 댐의 내진 설계 기준을 상향할 필요성을 제기하였다. 댐설계기준(KWRA, 2003)에 의하면 내진특등급댐에 적용되는 설계 지진은 평균재현기간이 1,000년으로 되어 있다. 그리고 규모 6.3의 지진이 여기에 해당하는 것으로 보고 있으나 이는 지진 규모-빈도해석을 위한 자료의 부족 등에 기인하여 우리나라에서 발생할 수 있는 지진의 규모를 과소평가한 것으로 추정하였다.

이와 관련하여 국내에서 현재 적용하고 있는 빈도별 지진 규모의 기준은 1997년 작성된 건설교통부의 "내진설계기준연구"에 근거한 것으로 그동안 20여 년의 시일이 경과하였을 뿐만 아니라 최근 국내 지진의 발생 추이가 과거와 달라지고 있음을 감안할 때 지진의 규모와 빈도에 대한 재평가가 필요한 시점이라고 할 수 있다.

또한 사회적으로도 내진 설계 의무화 대상이 모든 주택을 포함한 일반 건축물로 확대 적용되고 있는 시점에서 내진 설계의 기준이 되는 국내 지진의 발생 규모와 재현기간에 대한 면밀한 재검토가 시급한 실정이다.

2. 국내외 연구 동향

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

$$Log_{10}(N(M)) = a - bM \qquad (1)$$

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

Gutenberg, *et. al.*(1954)은 상수 a와 b의 값을 분석한 대상 지역별로 제시하여 지역별로 그 값이 달라지는 것을 보였으며 또한 천발성 지진과 심발성 지진으로 구분하여 제시하기도 하였다.

이후 G-R 규모-빈도 관계식은 지진의 규모와 재현기간을 예측하는 대표적인 방법으로 널리 알려지게 되었으며 특히 상수 b에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Gutenberg, *et. al.*(1954)이 제시한 상수 b의 값은 천발성 지진(shollow shocks)에서는 0.45~1.4, 심발성 지진(deep shocks)에서는 1.3~1.5의 범위를 보이고 있다.

Miyamura(1962)는 대규모 지진의 상수 b 값이 지각구조와 연관성이 있는 것으로 보았다. 지진 활동이 희박한 안정된 쉴드지역(old shield areas)에서는 0.4~0.5, 비활동성인 대륙 열개대(continental rift zones)나 플랫폼지역(platform block zones)은 0.6~0.7, 화산지대의 섬과 반도를 포함한 조산대(orogenic zones)는 0.7~1.0, 해령(oceanic ridges)을 포함한 해양지역(oceanic zone)은 1.0~1.8의 값을 갖는 것으로 보았다.

Mogi(1962)는 다양한 취성재료의 파괴실험을 통하여 상수 b는 지진 발생 지역의 지각구조(geotectonic structures)와 지각이 받고 있는 응력(stress)의 분포상태와 관계가 있을 것으로 보았다. 지각구조에 균열이 증가할수록 그리고 지각이 받고 있는 응력의 분포가 불균일할수록 상수 b의 값은 증가하는 데 그 범위는 1.7 이내인 것으로 보고하였다.

Aki(1981)는 몇 가지 근사치와 가정 하에 G-R 규모-빈도 관계식이 지진 활동(seismic activity)의 프랙탈 분포를 나타내는 식임을 보이고 지진 활동(seismic activity)의 프랙탈 차원은 상수 b의 2배라고 주장하였다. 또한 상수 b가 단층대의 프랙탈 구조와 관련이 있을 것이라는 가정 하에 단층의 구조적 차원이 3차원을 초과할 수 없다는 사실로부터 상수 b의 최대치를 1.5로 추정하였다.

Xu, *et. al.*(1981)은 단일 단층에서 지진이 발생하는 경우 상수 b는 0.5, 중국대륙과 같이 압축을 받아 변형된 지각에서는 0.75, 지진대가 밀집한 화산지대에서는 1.5의 값을 갖는 것으로 보고하였다.

www.kci.go.kr

Main, *et. al.*(1986)은 1932년부터 1972년까지 40년간의 지진 계측기록을 이용하여 캘리포니아주 남부 지역의 규모-빈도 해석을 수행하였다. 규모 6.7지진을 기준으로 이 보다 작은 중간규모 지진에 대해서는 상수 b 값이 0.89, 대규모 지진에 대해서는 0.51의 값을 구하고 이렇게 구해진 회귀식을 이용하여 1년부터 200년까지 재현기간별 지진의 규모를 산정하였다. 특히 중간규모 지진 대비 대규모 지진에 대한 상수 b 값이 감소해 가는 경향에 대하여 주목하고 지진 규모에 따라 붕괴된 단층의 프랙탈 차원이 달라지기 때문으로 추정하였다.

국내에서는 Lee, *et. al.*(1980)이 1926년부터 1943년까지의 한반도 계기지진 자료 91개를 분석하여 G-R 규모-빈도 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.

그들은 또한 외국 연구사례를 지적하면서 일본 본토나 부근의 상수 b 값은 0.94 정도이고 중국은 0.57 정도로서 일본 열도(island arc)로부터 중국대륙 내부로 진행할수록 상수 b 값이 감소하는 경향이 있음을 지적하였다.

Roh, *et. al.*(2000)은 1978년부터 2000년까지 계측된 기상청의 지진 기록을 이용하여 G-R 규모-빈도 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 한국교원대 지진관측망을 통해 계측된 규모 4.2 이내의 미소지진 71개를 이용하여 G-R 규모-빈도 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 규모-빈도 관계식의 상수 $a=3.49$, $b=0.87$을 구하였다. 그리고 이렇게 구해진 G-R 규모-빈도 관계식을 이용하여 규모 3.0에서 5.0까지 지진 규모별 재현기간을 산정하였다.

Shin, *et. al.*(2013)은 701년부터 2012년까지 우리나라 동해연안에서 관측된 38개의 대규모 지진 자료에 Mixed Gumbel 분포를 적용하여 확률론적 빈도해석을 수행하고 그 결과 G-R 규모-빈도 관계식과 유사한 결과를 얻을 수 있었다고 보고하였다.

Lee, *et. al.*(2015)은 1978년 이후 남한 전역에서 관측된 지진의 연최대치 계열(annual maximum series)에 대한 확률론적 빈도해석을 수행하여 2변수 감마분포형을 한반도에 적합한 분포형으로 선정하였다.

G-R 규모-빈도 관계식은 작은 규모의 지진부터 대규모 지진까지 다양한 규모의 지진 발생 양상이 멱함수 분포 규칙(power-law distribution)을 따르는 프랙탈적인 과정(fractal processes)이라는 사실에 기초한 방법으로 해당 지역의 지각구조나 지각운동의 물리적인 특성을 반영하고 있을 뿐만 아니라 특정한 확률분포형을 가정하고 있지 않다는 점에서 일반적인 적용성이 검증된 방법이다.

그러나 지진의 연최대치 계열 등 극치사상에 대한 특정 확률분포형을 가정하는 확률론적 빈도해석의 경우 발생빈도가 높은 중소규모 지진을 포함한 다양한 지진의 발생 특성과 해당 지역의 지각구조나 지각운동의 특성을 반영하기 어려울 뿐만 아니라 정규분포형태를 벗어나 매우 큰 양의 왜곡도(skewness)를 보이는 지진의 발생분포를 적합시키기에 어려움이 있을 수 있다.

www.kci.go.kr

II. 연구 목적 및 이용 자료

본 연구에서는 우리나라의 본격적인 지진 계기관측이 시작된 1978년 8월 30일부터 2016년 9월 12일 규모 5.8의 경주 지진 발생 시점까지 1,278개의 KMA(2016) 지진자료를 이용하여 G-R 규모-빈도 관계식으로부터 국내 지진의 규모와 재현기간을 예측할 수 있는 관계식들을 도출하였다.

경주 지진 발생 이후의 지진 자료는 기존에 계측된 지진 자료와 발생 특성 등이 다른 여진(aftershocks)이 다수 포함되어 있어 분석 대상에서 제외하였다. 경주 지진 이전의 지진 기록에서는 여진 형태의 지진기록은 찾아보기 어려웠다.

〈Figure 1〉과 〈Figure 2〉는 본 연구에서 사용한 1,278개 지진 자료의 규모별 빈도수를 나타낸 히스토그램과 박스플롯이며 〈Table 1〉은 지진 자료의 통계적 특성을 정리한 것이다.

히스토그램과 박스플롯에 나타난 바와 같이 본 연구에서 활용한 우리나라의 지진 자료는 우측방향으로 강한 양의 왜곡(positive skewness)을 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(far-out values)는 중앙값(median)으로부터 1분위(1st Qu.)와 3분위(3rd Qu.)간 간격의 2배를 넘어서는 값으로 정의하고 있으며 여기서는 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.

III. G-R 규모-빈도 관계 분석

G-R 규모 빈도 관계식을 도출하기 위해서는 먼저 지진 발생 규모에 대한 시계열 자료를 크기에 따라 일정한 간격으로 구분한 구획(bin)별로 재분류하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 Iman, *et. al.*(1983)이 자료의 구획을 위한 기준으로 제시한 식 (2)를 적용하여 11개의

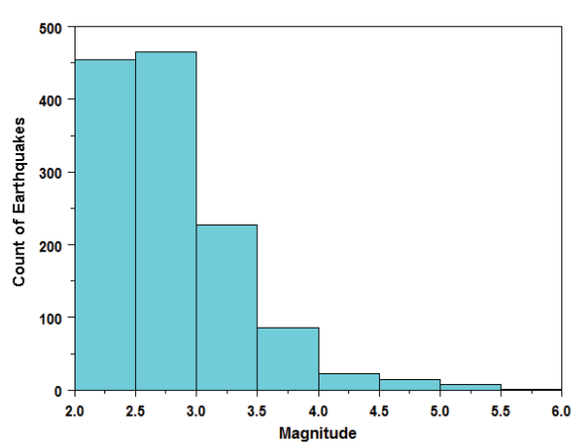


Figure 1. Histogram of earthquake magnitude data(1978~2016)

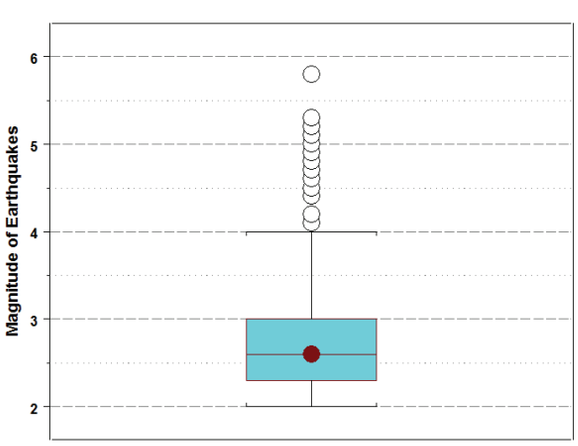


Figure 2. Boxplot of earthquake magnitude data(1978~2016)

Table 1. Summary statistics of earthquake magnitude data(1978~2016)

Total N	Min.	1st Qu.	Mean	Median	3rd Qu.
1,278	2.0	2.3	2.7	2.6	3.0
	Max.	Std. Dev.	SE of Mean	Skewness	Kurtosis
	5.8	0.56	0.016	1.42	3.04

www.kci.go.kr

Table 2. Tabulation of earthquake magnitude data for G-R relation analysis

Bin		Central Value (M)	Count		ΣN per Year (Year = 38)	Log10 (ΣN per Year)
No.	Range		N	ΣN		
1	1.962 + thru 2.285	2.1235	257	1,278	33.63158	1.526747
2	2.285 + thru 2.608	2.4465	414	1,021	26.86842	1.429242
3	2.608 + thru 2.931	2.7695	248	607	15.97368	1.203405
4	2.931 + thru 3.254	3.0925	165	359	9.447368	0.975311
5	3.254 + thru 3.577	3.4155	103	194	5.105263	0.708018
6	3.577 + thru 3.900	3.7385	45	91	2.394737	0.379258
7	3.900 + thru 4.223	4.0615	22	46	1.210526	0.082974
8	4.223 + thru 4.546	4.3845	6	24	0.631579	−0.19957
9	4.546 + thru 4.869	4.7075	5	18	0.473684	−0.32451
10	4.869 + thru 5.192	5.0305	9	13	0.342105	−0.46584
11	5.192 + thru 5.515	5.3535	3	4	0.105263	−0.97772
12	5.8	5.8	1	1	0.026316	−1.57978

등분할 구간으로 나누었다.

$$2^k \geq n \quad (2)$$

여기서, n은 자료의 수이며 구획수 k는 위 식을 만족시키는 최소의 정수로서 본 연구의 경우 자료의 수는 $n = 1,278$개이며 따라서 $k = 11$이 된다. 나머지 자료로부터 매우 멀리 떨어진 이상치 5.8은 11개 구간 외에 별도로 12번 구획을 부여하였다.

G-R 규모-빈도 관계식을 도출하기 위해 지진 규모 자료를 정리하면 〈Table 2〉와 같다. 여기서 자료의 관측기간이 1978년 8월 30일부터 2016년 9월 12일까지이므로 $Year = 38$을 적용하였다.

〈Table 2〉에서 구획별 중앙값(Central Value)과 $Log_{10}(\sum N\ per\ Year)$와의 관계를 이용하여 G-R 규모-빈도 관계식을 도시화면 〈Figure 3〉과 같다.

선형회귀분석을 통하여 구해진 회귀식 (3)의 상수는 $a = 3.45$, $b = 0.82$ 이고 결정계수 $R^2 = 0.98$이다.

$$Log_{10}(\sum N\ per\ Year) = 3.45 - 0.82\,M \quad (3)$$

이때 $F(1,10) = 612.4$ 이고 $p = 2.65E-10$ 으로 이 회귀식이 매우 유의함을 나타내고 있다.

그리고 본 연구에서 구한 상수 값들은 Lee, *et. al.*(1980)이 구한 b 값 0.80과 비슷한 값을 보였으며, Park, *et. al.*(2002)이 구한 $a = 3.49$, $b = 0.87$ 과도 비슷한 값임을 확인할 수 있었다.

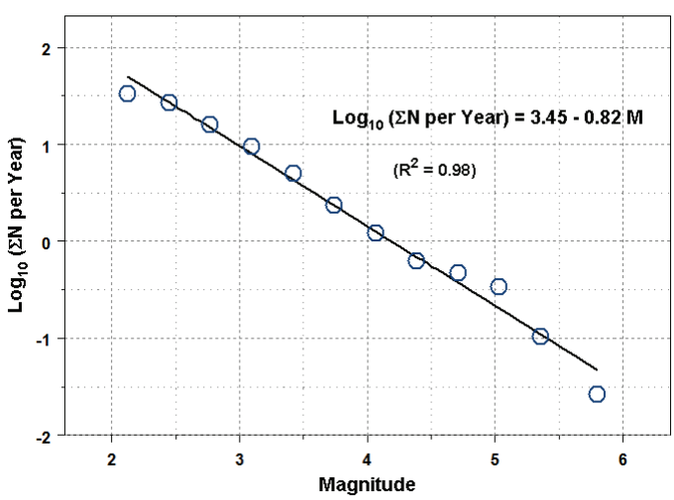


Figure 3. G-R magnitude-frequency relation of korean earthquakes(1978~2016)

www.kci.go.kr

Table 3. Magnitudes associated with recurrence interval T years

T (Years)	Magnitude (M)	Remarks
1	4.2	
2	4.6	
5	5.1	
10	5.4	
20	5.8	The maximum gauged magnitude on Sept. 12, 2016
50	6.3	Currently the 1,000-year magnitude
100	6.7	
200	7.0	
500	7.5	Currently the 500-year magnitude is 6.1
1,000	7.9	Currently the 1,000-year magnitude is 6.3

그리고 식 (3)에서 규모 M의 지진에 대한 재현기간 T (단위: Year)는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{1}{\sum N\ per\ Year} \quad (4)$$

따라서 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$Log_{10}\frac{1}{T} = 3.45 - 0.82\,M \quad (5)$$

식 (5)로부터 규모 M의 지진에 대한 재현기간 T를 구하는 식을 유도하면 식 (6)과 같다.

$$T = 10^{(-3.45+0.82M)} \quad (6)$$

또한 식 (5)로부터 어떤 재현기간 T에 해당하는 규모 M을 구하는 식을 유도하면 식 (7)과 같다.

$$M = 4.21 + 1.22\,Log_{10}\,T \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 주요 재현기간별로 지진의 규모를 산정하면 〈Table 3〉과 같다.

〈Table 3〉에 의하면 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주 지진은 재현기간이 20년 정도로 나타났다. 그리고 현재 500년 빈도와 1,000년 빈도 규모가 6.1과 6.3인데 비해 본 연구에서 산정한 규모는 7.5와 7.9로 식 (8)에 의해 지진 에너지를 비교해보면 각각 120배와 250배 정도로 나타났다.

$$Log_{10}E = 1.5M + 4.4 \quad (8)$$

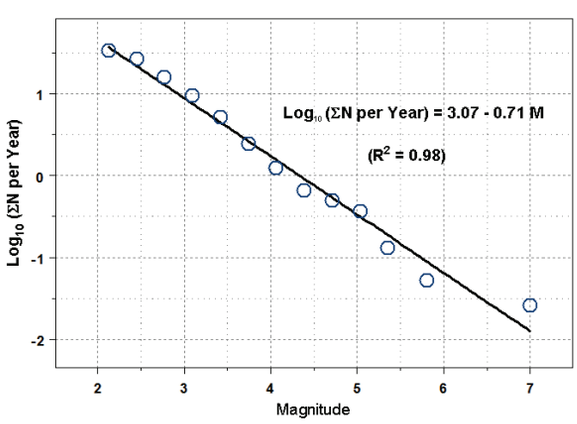
여기서, E는 지진의 에너지(Joules)이다(Lomnitz, 1994).

특히, 대형 댐 등 주요 시설물의 내진 설계기준으로 적용하고 있는 1,000년 빈도에 해당하는 규모 6.3의 지진은 현재 시점에서 평가할 때 50년 빈도에 불과한 것으로 나타났다.

Ⅳ. 미래 강진이 G-R 규모-빈도 관계식에 미치는 영향 분석

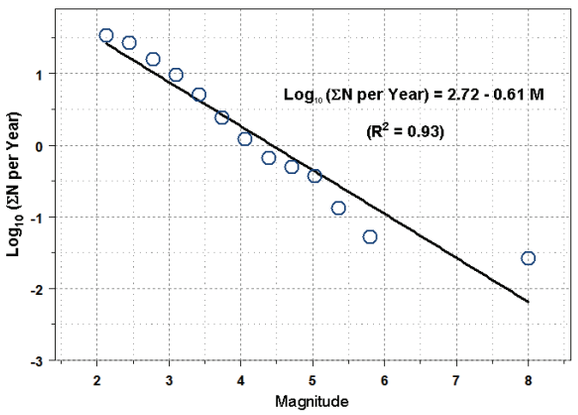
미래에 규모 7, 8, 9의 강진이 발생할 경우 G-R 규모-빈도 관계식은 어떤 형태로 달라질 것이며 그에 따라 재현기간별 규모에 미치는 영향은 어떠할지를 민감도 분석을 통해 검토해보았다.

미래에 강진이 발생할 경우에 그 전후로 규모가 작은 중소지진들이 다수 발생하겠지만 여기에서는 분석을 단순화하기 위하여 단일 강진만이 발생하는 것으로 가정하여 분석하고 그 결과를 〈Figure 4〉에 제시하였다.

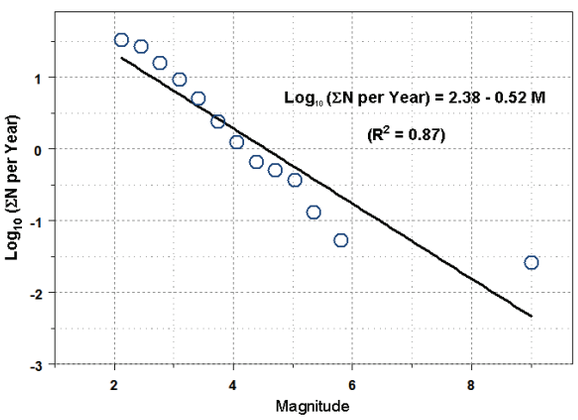


(a) For M = 7.0 event

www.kci.go.kr



(b) For M = 8.0 event



(c) For M = 9.0 e

Figure 4. Sensitivity analysis for future strong shocks on the G-R relation

미래에 발생할 강진이 7.0, 8.0, 9.0 순으로 규모가 커져함에 따라 〈Table 4〉에 제시한 바와 같이 G-R 규모-빈도 관계식의 상수 a와 b의 값이 감소해가는 것을 알 수 있다.

그리고 상수 b의 범위는 문헌에 알려진 바와 같이 0.5와 1.0 사이에 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 기존에 발생했던 중소규모 지진과 차이가 크게 나는 대규모 지진의 영향으로 자료의 분산이 증가하면서 회귀식의 결정계수 값이 감소하여 예측의 불확실성이 커져가는 것으로 나타났다.

식 (9), (10), (11)은 미래 강진 7.0, 8.0, 9.0 각각의 경우에 대한 재현기간별 규모를 산정하는 식이다.

최대 M = 7.0 지진 발생시:

$$M = 4.32 + 1.41\,Log_{10}\,T \quad (9)$$

최대 M = 8.0 지진 발생시:

$$M = 4.50 + 1.64\,Log_{10}\,T \quad (10)$$

최대 M = 9.0 지진 발생시:

$$M = 4.58 + 1.92\,Log_{10}\,T \quad (11)$$

〈Figure 5〉는 위의 식들로부터 구한 미래에 발생할 최대 강진의 규모에 따른 재현기간별 지진의 규모를 비교한 것이다.

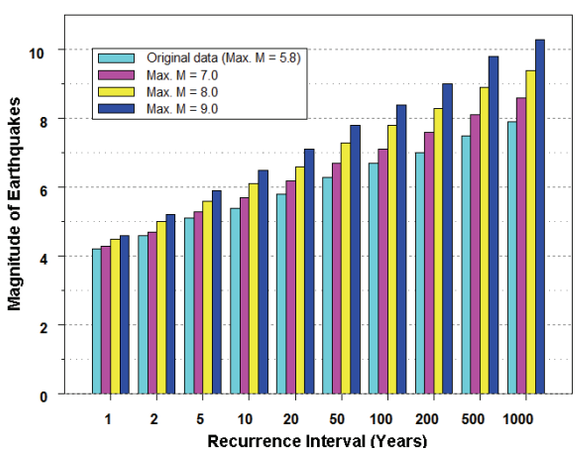


Figure 5. Magnitudes for recurrence intervals associated with different maximum shocks

재현기간이 짧은 경우에는 미래 강진의 발생 규모에 따른 재현기간별 지진 규모의 차이가 상대적으로 크지 않지만 재현기간이 길어질수록 그 차이가 점차 커져가는 것으로 나타났다. 그리고 1,000년 빈도의 경우 규모 10 이상의 지진이 발생가능한 것으로 나타났는데 일반적으로 리히터 규모에서는 규모 10까지를 상한으로 보

Table 4. Constants a and b associated with different strong shocks

Case No.	The Strongest Shock (M)	a	b	R^2	Remarks
1	5.8	3.45	0.82	0.98	Original data set
2	7.0	3.07	0.71	0.98	Future shock
3	8.0	2.72	0.61	0.93	Future shock
4	9.0	2.38	0.52	0.87	Future shock

www.kci.go.kr

지만 지질학적 시간의 관점에서는 규모 10 이상의 지진도 발생가능한 것으로 보고 있다.

이것은 일단 강한 강진이 발생하면 긴 재현기간의 관점에서 볼 때 그보다 더 큰 강진의 발생 가능성을 열어놓게 되기 때문인데 프랙탈 과정에서 나타나는 자기 유사성(self-similarity) 또는 스케일 불변성(scale invariant)의 한 측면으로 볼 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 1978년부터 2016년 경주 지진 발생 시점까지 38년 동안 기상청에서 관측한 1,278개의 지진 자료를 이용하여 G-R 규모-빈도 관계식을 도출하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 위의 지진 자료를 이용하여 선형회귀분석을 통하여 G-R 규모-빈도 관계식을 도출한 결과는 $Log_{10}(\sum N\ per\ Year) = 3.45 - 0.82\,M$으로 결정계수 $R^2 = 0.98$이며, 기존에 발표된 Lee, *et. al.*(1980), Park, *et. al.*(2002)의 회귀상수 값들과 비슷하게 나타났다.

2) 위의 G-R 규모-빈도 관계식으로부터 유도된 재현기간별 지진 규모를 산정하는 식을 이용하여 검토한 결과 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주 지진은 재현기간이 20년 정도로 나타났다. 48년 간 관측한 자료 중에 가장 큰 값인 규모 5.8의 지진이 20년 빈도에 해당하는 것으로 나타난 것은 5.8 보다는 규모가 작지만 규모 4.5를 넘는 중규모 지진의 발생 횟수가 상대적으로 많았기 때문으로 사료된다. 그리고 500년 빈도와 1,000년 빈도 규모는 7.5와 7.9로 현재의 기준인 규모 6.1과 6.3에 비교해보면 지진의 에너지가 약 120배와 250배 정도 큰 것으로 나타났으며, 대형 댐 등 주요 시설물의 내진 설계기준으로 적용하고 있는 1,000년 빈도에 해당하는 규모 6.3의 지진은 현재 시점에서 평가할 때 50년 빈도에 불과한 것으로 나타났다.

3) 미래에 규모 7, 8, 9의 강진이 발생할 경우 G-R 규모-빈도 관계식에 미치는 영향을 민감도 분석을 통해 검토한 결과 지진의 규모가 커져함에 따라 G-R 규모-빈도 관계식의 상수 a와 b의 값이 감소해가는 경향을 보였으며, 자료의 분산이 증가하면서 회귀식의 결정계수 값이 감소하여 예측의 불확실성이 커져가는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 대진대학교와 육군사관학교에 의해 연구되었음.

References

Aki, K. 1981. *Earthquake Prediction*. In Simpson, D. W. and P. G. Richards(eds.). Washington DC: American Geophysical Union. 556-574.

Gutenberg, N. and C. F. Richter. 1954. *Seimicity of the Earth and Associated Phenomena*. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press.

Iman, R. L. and W. J. Conover. 1983. *A Modern Approach to Statistics*. New York: John Wiley and Sons. 497.

Korea Meteorological Administration. 2016. *National Earthquake List*. http://www.kma.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp. Connection dates: 2016.11.7.

Korea Water Resources Association(KWRA). 2003. *Criteria of Dam Design*.

Kyung, Jai Bok, Tae Woong Chung, Duk Kee Lee, Jae Gu Lee, and Eun A Lee. 2000. Analysis of Seismicity by Observation of Micro - Earthquakes in the Central Region of South Korea. *Journal of the Korean Geophysical Society*. 3(3): 201-212.

Lee, Ho Min, Kyung Rock Paik, and Joong Hoon Kim. 2015. Earthquake Occurrence Frequency and Magnitude Analysis for South Korea on the Basis of Ground-Observed Data. *A Proceeding of Korea Society of Hazard Mitigation*. 14: 268.

Lee, Kie Hwa and Hee Ok Jung. 1980. A Study of Instrumental Earthquake Data of the Korean Peninsula. *Journal of the Geological Society of Korea*. 16(1): 32-45.

www.kci.go.kr

Lomnitz, C. 1994. *Fundamentals of Earthquake Prediction*. NY: John Wiley and Sons. 103.

Maine, I. G. and P. W. Burton. 1986. Long-term Earthquake Recurrence Constrained by Tectonic Seismic Moment Release Rates. *Bulletin of Seismological Society of America*. 76(1): 297-304.

Ministry of Construction & Transportation. 1997. *Seismic Design Standards Report*.

Mogi, K. 1962. Magnitude-frequency Relation for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and Some Related Problems in Earthquakes. *Bulletin of the Earthquakes Research Institute*. 40: 831-853.

Noh, Myung Hyun, Sang Kook Lee, and Kang Ryong Choi. 2000. Minimum Magnitudes of Earthquake Catalog of Korea Meteorological Agency for the Estimation of Seismicity Parameters. *Journal of the Korean Geophysical Society*. 3(4): 261-268.

Oh, Kyoung Doo and Soon Bo Shim. 2016. Hydroinformatics for the Age of Uncertainty and Variability. Water and the Future. *Korea Water Resources Association*. 49(11): 22-30.

Park, Jai Woo, Young Kyun Hong, and Gi Suop Hong. 2002. A Study on Analysis of the Domestic Earthquake Characteristics Using the Statistical Methods. *Proceedings of the Architectural Institute of Korea*. 22(1): 211-214.

Shin, Ji Yae, Tae Woong Kim, Ho Young Song, and Hyun Han Kwon. 2013. Application of Mixed Distribution to Statistical Frequency Analysis of Earthquake Data at East Sea. *Proceedings of Korea Society of Civil Engineers(KSCE)*. 1891-1894.

Xu, S. and P. Shen. 1981: Seismicity Patterns in China. Reprinted from Earthquake Prediction: An International Review. *Maurice Erwing Series*. 4: 1117-1125.

Korean References Translated from the English

건설교통부. 1997. 내진설계기준연구.

경재복, 정태웅, 이덕기, 이재구, 이은아. 2000. 남한 중부지역의 미소지진관측에 의한 지진활동 분석. 지구물리. 3(3): 201-212.

기상청. 2016. 국내지진 목록. http://www.kma.go.kr/weather/earthquake_volcano/domesticlist.jsp. 접속일 2016.11.7.

노명현, 이상국, 최강룡. 2000. 지진활동 매개변수 추정을 위한 기상청 지진목록의 최소규모 분석. 지구물리. 3(4): 261-268.

박재우, 홍영균, 홍기섭. 2002. 한반도지진특성의 통계학적 분석에 관한 연구. 대한건축학회 학술발표논문. 22(1): 211-214.

신지예, 김태웅, 송호용, 권현한. 2013. 동해 지진자료의 확률론적 빈도해석을 위한 혼합분포함수의 적용. 대한토목학회 정기학술대회논문집. 1891-1894.

오경두, 심순보. 2016. 불확실성과 변동성 시대의 Hydroinformatics. 물과 미래. 한국수자원학회. 49(11): 22-30.

이호민, 백경록, 김중훈. 2015. 지상관측자료에 기초한 남한 전역의 지진 빈도 및 발생규모 분석. 한국방재학회 학술발표대회논문집. 14: 268.

한국수자원학회. 2003. 댐설계기준.

Received: Feb. 8, 2017 / Revised: Mar. 21, 2017 / Accepted: Mar. 26, 2017

www.kci.go.kr

Gutenberg-Richter 규모-빈도 관계식에 의한 국내 지진 규모와 재현기간 예측

국문초록 본 연구에서는 1978년부터 2016년 경주 지진 발생 시점까지 38년 동안 기상청에서 관측한 1,278개의 지진 자료를 이용하여 G-R 규모-빈도 관계식을 선형회귀분석을 통하여 도출하였다. 본 연구에서 도출된 G-R 규모-빈도 관계식은 $Log_{10}(\sum N\ per\ Year) = 3.45 - 0.82M$ $(R^2 = 0.98)$로 통계적으로 매우 유의함을 나타내고 기존 문헌과 비교 시 비슷한 범위를 보여 적정성을 확인하였다. G-R 규모-빈도 관계식을 활용하여 재현기간에 따른 국내 지진 규모를 산정하였으며, 미래에 지진이 현재까지 발생한 지진보다 더 큰 규모의 지진이 발생할 경우를 상정하여 미래 지진이 G-R 규모-빈도 관계식에 미치는 영향을 민감도 분석을 통하여 검토하였다. 미래 강진의 영향을 검토한 결과 지진의 규모가 커져감에 따라 G-R 규모-빈도 관계식의 분산(variance)은 증가하는 경향을 보였으며 반대로 상수 a와 b의 값은 감소해가는 경향을 보였다.

주제어 : 지진, 규모-빈도, 재현기간, 지진 피해

Profiles **Suk Hwan Jang** : He received his Ph.D. from University of Seoul, Korea in 1994. He is a professor of Department of Civil Engineering at Daejin University since 1998. His interesting subject and area of research are hydraulics, hydrology, water resources management and water problem of between Korea and North Korea(drjang@daejin.ac.kr).

Kyoung Doo Oh : He received his Ph.D. from University of Washington in 1989. He is a professor of Department of Civil and Environment Engineering at Korea Military Academy since 1989. His areas of research include hydraulics, hydrology, water resources management, debris flow and earthquake(okd0629@hanmail.net).

Ji Hwan Oh : He received his Master of Engineering from Daejin University, Korea in 2014. He is a Ph.D. Candidate student of Department of Civil Engineering at Daejin University since 2014. His interesting subject are water resources management and operation contain the Dam (ojh4525@naver.com).

Jun Won Jo : He is a master course candidate student of Department of Civil Engineering at Daejin University since 2016. His interesting subject are water resources management, drought and earthquake(yhjowon@naver.com).

www.kci.go.kr