혼합분포함수를 이용한 동해 지진자료의 확률론적 빈도해석

Statistical Frequency Analysis of Earthquake Data at East Sea Using Mixed Distribution Functions

신지예* · 김태웅** · 김석천*** · 윤성범****

Shin, Ji Yae · Kim, Tae-Woong · Kim, Seok Cheon · Yoon, Sung Bum

Abstract

In Korea, the occurrence frequency of earthquakes has recently increased compared to the past. In neighboring countries such as Japan and China, damage from major earthquakes has also increased leading to high earthquake risk. This study quantitatively estimated the occurrence probability and frequency of huge earthquake using statistical frequency analysis on instrumental earthquake data at East sea in order to cope with earthquake damage. After adapting Various distribution functions such as Gumbel, Lognormal, Gamma, and Weibull for earthquake data, we applied mixed distributions to reflect the characteristics of the occurrence of earthquakes. The results show that the mixed models estimated earthquake magnitude larger than the Gutenberg-Richter (G-R) equation, and the mixed Gumbel distribution estimated most closed values with the G-R equation. It was found that the G-R equation is very limited to estimate a huge earthquake since there is no observed data over magnitude 8.0 and the frequency analysis is also limited to be applied in practice because the lack of data induces high uncertainty on the estimates of 1,000 year-earthquake. However, this study has an experiential significance in that the statistical frequency analysis was applied to instrumental earthquake data at East sea as an alternative.

Key words : Earthquake data, Gutenberg-Richter equation, Mixed distribution, Statistical frequency analysis

요 지

최근 국내에서는 지진의 발생빈도가 과거와 비교하여 점차적으로 증가하고 있으며, 주변국가인 일본과 중국에서도 대규모의 지진으로 인한 피해가 빈번하게 발생하면서 지진에 대한 위험도가 증가하고 있다. 본 연구에서는 지진으로 발생하는 피해에 대비하기 위하여 동해 연안의 지진자료에 확률론적 빈도해석을 적용하여 지진의 발생확률 및 발생빈도를 정량적으로 산정하였다. 연도별 최대값을 활용하는 수문빈도해석과는 다르게 연도별 지진의 발생유무를 반영하기 위하여 혼합분포함수를 활용하였으며, 분포모형으로는 Gumbel, Lognormal, Gamma, Weibull 분포를 적용하였다. 적용결과, 국내의 지진-규모식보다 혼합분포모형이 재현기간에 대하여 지진규모를 작게 산정되는 것을 확인할 수 있었으며, 분포모형 중 500년 이하의 재현기간에 대해서는 혼합 Gumbel, Weibull 분포모형이, 500년 이상의 재현기간에서는 혼합 Lognormal, Gamma 분포모형이 지진-규모식과 가장 근접한 결과를 도출하였다. 본 연구의 비교·분석을 위하여 사용된 규모-빈도식에서는 M_w 8.0 이상의 관측자료가 존재하지 않아 그 이상 규모의 지진에 대한 발생빈도의 정확도가 낮으며, 지진빈도해석 역시 31개의 적은 수의 지진 관측자료를 이용하여 1,000년 빈도의 지진규모를 추정하였으므로, 신뢰성이 낮은 한계가 존재한다. 하지만 본 연구는 국내의 관측자료를 활용하여 확률론적 지진빈도해석을 수행함으로써, 새로운 접근방법으로 지진의 발생빈도를 추정하였다는데 의의가 있다.

핵심용어 : 지진자료, 구텐베르그-리히터 관계식, 혼합분포함수, 확률론적 빈도해석

1. 서 론

2011년 3월 일본 후쿠시마현의 지진해일(tsunami)과 2008년 5월과 2013년 4월에 중국 쓰촨성에서 발생한 대규모 지

진과 같이, 최근 우리나라의 주변국가에서는 큰 규모의 지진의 발생빈도가 증가하고 있다. 우리나라 기상청 지진센터(<http://www.kma.go.kr/mini/earthquake/main.jsp>)에 의하면 전 세계적으로 지진의 발생빈도는 증가하고 있는 추세이며, 우리

*정회원. 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정(E-mail: starzee@hanyang.ac.kr)

Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**교신저자. 정회원. 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 부교수(Tel : +82-31-400-5184, Fax: +82-31-436-8170, E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author: Member, Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University.

***한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

****정회원. 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 교수

Member. Professor. Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

나라도 역시 증가하는 양상을 보이고 있다. 우리나라에서는 1978년 기상청에서 지진 관측이 시작된 이래로 2012년까지 총 1,026회가 발생하였다. 지진의 발생횟수는 과거 20년(1978년~1997년)에는 평균 19.2회인 반면, 최근 20년 동안에는 평균 44.5회로 발생빈도가 증가하고 있다. 특히 최근에는 서해안 보령지역에서 연속적으로 10회의 지진이 발생(2013년 7월 23일부터 8월 1일까지)하였으며, 군산시 어청도 부근에서는 17차례의 지진이 발생(2013년 6월 5일부터 7월 15일까지)한 바 있어 국내에서 지진에 대한 심층적인 분석의 필요성이 제기되고 있다. 이에 본 연구에서는 확률론적 분석방법인 수문학적 빈도해석 이론을 지진자료에 적용하여 지진의 발생확률 및 발생빈도를 정량적으로 산정하고자 한다.

우리나라에서 지진규모의 발생빈도를 파악하기 위하여 일반적으로 적용되는 방법은 Gutenberg과 Richter가 제안한 규모-빈도의 관계식(G-R equation 혹은 Gutenberg-Richter law)이다. 국내에서 적용되는 G-R law는 연구자에 따라 지진변수가 다르게 산정되기 때문에 지진규모에 따른 발생빈도의 불확실성이 큰 실정이다(Seo *et al.*, 2010). 또한 현재 국내에서 지진의 재현기간을 산정을 위한 체계적인 기준이 없으며, 확률론적 빈도해석을 활용한 지진빈도해석은 거의 수행되고 있지 않은 실정이다. 국내에서 확률모형을 활용한 지진빈도해석에 대한 연구로는 Choi *et al.* (1999)가 극한이론과 Weibull 분포를 이용하여 재현기간과 최대잠재지진의 규모를 결정하고, 초과확률을 이용하여 지진위험도를 작성하였다. 국외에서는 Nordquist (1945)가 처음으로 Gumbel 분포를 활용하여 미국 캘리포니아 지역의 지진자료에 대하여 10일 단위로 최대 규모의 지진을 추출하여 재현기간별 지진규모를 산정한 이후, G-R law를 활용한 지진빈도해석 방법과 확률론적 지진빈도해석을 활용한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 각 나라별로 적합한 G-R 관계식 혹은 확률분포모형을 찾기 위한 연구가 수행되고 있다.

최근에는 확률론적 지진빈도해석을 수행하기 위하여 극치이론(extreme value theory)을 바탕으로 지진자료의 기준 간격에 대한 극치값(extreme value)과 초과치(peak over threshold: POT)를 활용하여 단일 분포모형인 Gumbel, GEV, GP 분포를 비롯하여 혼합분포(mixed distribution)를 적용하는 등 다양한 접근방법이 시도되고 있다. Zimbidi *et al.* (2007)은 극치값에 GEV 분포모형을 적용하여 일정규모 이상의 지진에 대한 재현기간을 산정하였으며, Pisarenko *et al.* (2010)은 GEV와 GP 분포모형으로 일본 주변에서 발생하는 지진에 대한 재현기간별 확률지진규모를 추정하였다. 확률분포모형을 활용한 연구로는 Fahmi and Al Abbasi (1987)은 지진자료의 극한값에 대하여 Extreme Value Type I과 Extreme Value Type III 분포를 혼합하여 지진규모에 따른 발생빈도를 산정하여 제시하였으며, Husein Malkawi *et al.* (1999)는 연최대지진자료를 활용하여 Gumbel 분포와 Weibull 분포를 혼합하여 재현기간별 지진규모를 산정하였다. 최근의 연구로는 Talbi and Yamazaki (2010)가 혼합 Gamma 및 혼합 Weibull 분포모형을 적용하여 지진규모의 재현기간을 산정하였으며, Erisoglu *et al.* (2011)은 Gamma, Weibull, Exponential

분포를 이용하여 혼합분포모형을 개발하였으며, 단일 분포모형을 사용하였을 경우와의 적합도 검정을 통한 비교를 수행하여 혼합분포모형의 적용성이 높음을 확인하였다.

본 연구에서는 강우 자료와 다른 특성을 지니고 있는 지진 자료에 대하여 혼합확률분포모형을 적용하여 빈도해석을 수행하였으며, 규모-빈도 관계식을 통한 결과와의 비교를 수행하여 지진빈도해석의 적용성을 검토하였다.

2. 지진 규모별 발생빈도 산정

2.1 규모-빈도 관계식

규모-빈도의 관계식(G-R equation 혹은 Gutenberg-Richter law)은 지진의 규모(magnitude)와 발생빈도(frequency) 사이의 관계를 나타내는 경험식(Gutenberg and Richter, 1942)으로 식 (1)과 같다.

$$\log_{10}N(x) = a - bx \quad (1)$$

여기서, x 는 발생한 지진의 규모(magnitude), $N(x)$ 는 x 이상의 지진규모가 발생한 사건의 수, Gutenberg-Richter 변수인 a 와 b 는 지역에 따라 변화하는 상수로 해당 지진원 내에서는 일정하다. a 는 지진발생율을 나타내며 대상 지진원에서 발생하는 지진 중 어느 규모 이상의 지진이 매년 평균적으로 발생하는 횟수로 자료의 대상지역과 기간에 따라 다른 값이 도출되며, b 는 전 세계적으로 약 0.9에 가까운 값이다(Seo *et al.*, 2010; Park, 2002). 국내에서 산정한 규모-빈도 관계식으로는 Noh *et al.* (2000)이 1978년에서 2000년의 계기지진자료를 활용하여 $a=5.66$, $b=1.11$, Kyung *et al.* (2009)는 1978년에서 2007년까지의 계기지진자료로 $a=4.45\sim 4.27$, $b=0.76\sim 0.78$ 과 같은 결과를 도출하였으나, 연구자간 Gutenberg-Richter 변수의 차이가 크게 존재하는 실정이다. 또한, 로그함수 내에서 선형으로 추정되는 규모-빈도 관계식은 과거의 관측자료가 없는 극한 규모의 재현기간에 대해서는 신뢰성이 낮은 편이며, 이를 극복하기 위하여 Kagan (1999)와 Kagan and Schoenberg (2001)은 변형된 지진-규모 관계식을 제시하였다.

2.2 확률론적 빈도해석

확률론적 빈도해석(statistical frequency analysis)이란 확률이론을 바탕으로 확률변수의 크기(magnitude)와 발생확률(exceedance probability)간의 관계를 분석하는 절차를 통칭하는 것이다. 확률론적 빈도해석이 수문학적 확률변수에 적용되면 수문학적 빈도해석(hydrological frequency analysis)이라 한다. 대표적으로 강우 및 유량 자료에 확률분포모형을 적용함으로써, 수문사상에 대한 발생빈도를 추정하여 수공구조물의 설계수문량을 산정하기 위하여 활용되는 기법이다. 극치이론을 기반으로 하며, 극한사상(extreme event) 혹은 초과치사상(POT event, 일정 기준 이상의 강우 및 홍수 자료를 추출한 사상)의 자료에 대하여 특정 크기의 수문사상이 다시 발생하거나 초과되는 평균간격인 재현기간(return period)을 산정한다. 이러한 수문학적 빈도해석의 결과는 주로 수문변수

Fig. 1. Statistical Frequency Analysis Process (Lee, 2006)

의 크기와 재현기간간의 관계를 나타내는 빈도곡선(frequency curve)의 형태로 나타낸다. 예를 들어, 국토교통부 한국화물강우량정보(<http://www.k-idf.re.kr/>)에서는 우리나라 전 지역에 대하여 재현기간별 강우량이 제시되어 있다. 본 연구에서 지진 자료를 활용하여 수행되는 빈도해석의 절차는 Fig. 1과 같다.

2.3 혼합분포함수

지진자료는 확률론적 빈도해석에 주로 적용되는 강우, 유량, 풍속, 해수면 자료와는 다른 특성을 지니고 있다. 가장 큰 특성으로는 지진의 발생은 다른 자연현상과 다르게 자주 발생하지 않으며, 동일한 관측지점, 발생지점이 거의 없다는 것이다. Fig. 2는 동해연안에서 관측된 지진자료이며, 지진은 매년 발생되지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 이 때문에 지진자료를 활용한 빈도해석 시, 다른 자료들과 다르게 2년, 10년을 기준기간으로 적용하여 분석이 이루어진다(Silbergleit and Prezzi, 2012; Pisarenko *et al.*, 2008).

혼합분포함수는 두 가지 이상의 확률분포함수를 결합한 모형으로, Kedem *et al.* (1990)가 제시한 두 가지 모형의 확

Fig. 2. Earthquakes at East Sea

률분포함수로 구성된 혼합분포함수는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G(x) = pH(x) + (1-p)F(x) \quad (2)$$

여기서, $F(x)$ 와 $H(x)$ 는 관측값 x 에 대한 서로 다른 누적분포함수이며, p 는 각각의 분포모형의 사건에 대한 발생확률을 의미한다. 본 연구에서는 지진 자료에 대하여 연도에 따른 자료의 유무를 바탕으로 혼합분포함수를 적용하였으며, 적용방법은 3장에서 자세히 설명하였다.

3. 연구방법

3.1 대상자료

본 연구에서는 미국 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 NGDC(National Geophysical Data Center)에서 제공하는 Global Significant Earthquake Database(GSED)의 지진자료(<http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1> 참고) 중 동해연안부에서 발생하는 지진자료를 추출하여 활용하였다. 자료 추출 대상지역으로는 북위 34°에서 47°까지, 동경 128°에서 140° 사이이다. NOAA에 의하면 해당지역에서는 128번의 지진이 발생하였다. Kulikov *et al.* (2005)은 1900년대 이전의 지진자료는 역사적 기록을 바탕으로 재구성된 값으로 자료의 신뢰성이 낮기 때문에 계기관측이 시작된 1900년대 이후의 지진자료를 사용할 것을 권장하였으나, 1900년대 이후의 지진자료는 16개가 되어 자료수가 적기에 본 연구에서는 전체 기간의 자료를 활용하였다. 또한, 동해연안의 자료만을 추출하기 위하여 우리나라와 일본의 육지에서 발생한 지진자료를 제외하여 동해연안에서만 발생한 38개의 지진자료를 추출하였으며, 동일년도에 발생한 지진에 대해서는 가장 큰 값을 사용하는 빈도해석 방법을 적용하여 총 31개의 지진자료를 활용하였다(Fig. 2와 Table 1).

Table 1. Magnitude of Earthquakes at East Sea (Censored Data)

Year	Magnitude(M_w)	Year	Magnitude(M_w)
701	7.0	1804	7.3
850	7.0	1810	6.6
863	7.0	1833	7.4
887	6.5	1863	6.4
1026	7.5	1872	7.4
1341	7.0	1894	7.0
1448	7.0	1927	7.3
1614	7.7	1939	7.0
1644	6.9	1940	7.5
1700	7.0	1947	7.0
1726	6.6	1964	7.5
1751	6.6	1983	7.9
1762	6.6	1987	5.5
1792	6.9	1993	7.7
1793	6.9	2007	6.7
1802	6.6		

3.2 혼합분포를 적용한 지진빈도해석

3.2.1 확률분포함수와 최우도법(ML)

본 연구에서는 지진빈도해석을 위한 확률분포함수로 Gumbel, Lognormal, Gamma, Weibull 분포를, 모수 추정법으로는 최우도법(method of maximum likelihood: ML)을 적용하였다. 각각의 확률분포에 대한 누적분포함수(cumulative distribution function: cdf)는 식 (3)과 같다.

$$F_{gumbel}(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right], \quad -\infty < x < \infty \quad (3a)$$

$$F_{logn}(x) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_x^1 \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right] dx, \quad 0 \leq x < \infty, y = \ln x \quad (3b)$$

$$F_{wbl}(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (3c)$$

$$F_{gam}(x) = \int_0^x \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) dx \quad (3d)$$

여기서, α 는 척척모수(scale parameter), β 는 형상모수(shape parameter), x_0 는 위치모수(location parameter)이며, μ_y 는 y 의

Fig. 3. PDF and CDF of Mixed Distributions

평균이고 s_y 는 y_j 의 표준편차이다.

확률분포모형의 모수 추정방법 중의 하나인 최우도법은 우도함수(likelihood function)를 결정하고, 우도함수를 최대화하는 확률분포의 모수를 결정하는 방법으로 계산방법이 쉽다는 장점이 있다. 우도함수는 어떤 확률분포의 확률밀도함수(probability density function: pdf)가 $f(x)$ 로 주어졌을 때, 표본자료의 결합확률밀도함수(joint probability density function)는 식 (4)와 같이 표현되며, 이때 $\ln L$ 을 최대로 하는 값이 해당 확률분포의 모수이다.

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i, \alpha) \quad (4a)$$

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i, \alpha) \quad (4b)$$

3.2.2 혼합분포함수의 적용

일정규모 이상의 지진자료 혹은 지진해일자료는 강우자료와 다르게 관측 자료가 연속적으로 존재하지 않는 시기가 존재한다(Fig. 2참고). 따라서, 본 연구에서는 연도별 지진자료의 존재여부를 반영하기 위하여 혼합분포함수를 활용하여 확률론적 지진빈도해석을 수행하였다.

전체 관측 기간에 대한 관측지진자료는 지진이 발생한 기간의 자료와 지진이 발생하지 않은 기간의 자료로 두 가지 모집단으로 이루어져 있다. 지진이 발생한 기간에는 확률분포함수 $H(x)$ 를, 지진이 발생하지 않은 기간에는 확률분포함수 $F(x)$ 를 적용한다(식 (2) 참고).

$$F(x) = 0 \quad \text{if } x = 0 \quad (5a)$$

$$F(x) = 1 \quad \text{if } x > 0 \quad (5b)$$

여기서, $F(x)$ 는 계단함수(step function)로 x 가 0인 경우에 $F(x)=0$ 이며, x 가 0보다 큰 값인 경우에는 $F(x)=1$ 이다. 혼합분포함수에 대한 식 (2)는 본 연구에서 적용할 지진자료에 대하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다(Yoo et al., 2005).

$$G(x) = pH(x) + (1 - p) \quad (6)$$

여기서, $G(x)$ 는 관측 지진규모 x 에 대한 누가분포함수이며, $H(x)$ 는 본 연구에서 적용할 Gumbel, Lognormal, Gamma, Weibull 확률분포함수의 누가분포함수, p 는 전체기간에 대한 관측 지진규모가 있는 기간의 비율로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{n}{N} \quad (7)$$

여기서, n 은 관측된 지진의 수이고, N 는 지진자료의 전체 관측기간이다.

4. 결 과

본 연구에서는 우리나라의 지진빈도-규모 관계를 분석하기 위하여 Gumbel, Lognormal, Gamma, Weibull 분포에 대한

혼합분포함수를 이용한 동해 지진자료의 확률론적 빈도해석

혼합분포모형을 동해연안의 지진자료에 적용하였다.

4.1 기초통계량

본 연구에서 사용한 동해연안 지진자료의 통계학적 특성은 Table 2와 같다. 동해연안의 지진자료는 평균 지진규모 7.00이며, 왜곡도(skewness)가 0보다 작은 음의 왜곡도를 가지고 있어 분포모형이 오른쪽으로 기울어지고 왼쪽으로 긴 꼬리를 가진다는 것을 확인할 수 있다.

4.2 혼합 확률분포모형의 적용

본 연구에서는 동해연안 지진자료의 빈도해석을 위하여 Gumbel, Lognormal, Gamma, Weibull 분포를 이용한 혼합분포모형을 활용하였다. 전체 기간인 701년에서 2012년까지(1312년 동안) 동해연안에서는 총 38회의 지진이 발생하였으며, 그 중에서 지진 관측자료가 존재하는 년수는 31개년으로 동일 연도에 발생한 지진에 대해서는 가장 큰 값만을 선택하여 분석을 수행하였다. 따라서 지진발생확률 $p=0.0236$ 으로 혼합분포함수의 확률밀도함수와 누적분포함수를 도식하면 Fig. 3과 같다.

4.3 혼합 확률분포모형의 검정

본 연구에서 도출한 혼합확률분포모형의 적합성을 검토하기 위하여 적합도 검정(goodness of fit test)을 수행하였다. 적합도 검정 방법으로는 χ^2 검정(Chi-square Test), K-S 검정(Kolmogorov-Smirnov Test)이 많이 활용된다. 본 연구에서 표본수가 적은 경우에 효율적인 K-S 검정을 이용하였다. K-S 검정은 표본누가분포함수가 산정된 분포함수의 모수로 추정된 누가분포함수와 같다는 귀무가설을 검정하는 것으로 검통계량 D_n 은 식 (8)과 같으며, D_n 이 검통계량의 한계치보다 크면 유의수준 α 에서 기각된다(Yoon, 2011).

$$D_n = \max_{all x} |F_n(x) - F(x)| \quad (8)$$

여기서, $F_n(x)$ 는 n 개의 관측치에 대한 표본의 분포이며, $F(x)$

Table 2. Basic Statistics of Earthquakes at East Sea

Mean	Variance	Skewness	Kurtosis
7.00	0.227	-0.688	2.019

는 가설누가분포함수로 4.2절에서 산정한 혼합분포함수이다. 본 연구에서는 5% 유의수준에 대하여 K-S 검정을 수행하였으며, Mixed Gumbel, Mixed Lognormal, Mixed Gamma, Mixed Weibull에 대한 결과를 Table 3에 정리하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 모든 혼합분포함수에 대하여 p -값이 0.05보다 크며 유의수준 5%에서 가설이 채택되어 혼합분포함수의 적용이 적합한 것으로 판단되었다. 반면에 수자원 분야에서 일반적으로 활용되는 연최대치자료(701년에서 2012년까지의 동해연안의 지진자료에서 매년 최대지진규모 자료 활용하며, 지진관측치가 없는 기간에 대해서는 최대값이 '0'이됨)를 활용한 단일 확률분포모형에 대한 K-S 검정 결과는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 적용되는 지

Table 3. P-value of Mixed Distributions (K-S test)

Mixed Distribution	Mixed Gumbel	Mixed Lognormal	Mixed gamma	Mixed Weibull
P-value	0.0557	0.3363	0.3079	0.0726

진자료계열이 다수의 '0'을 포함하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

4.4 재현기간별 지진규모 산정

4.2절에서 산정한 혼합분포함수의 누적분포함수와 재현기간의 관계(식 (9))를 이용하여 재현기간에 따른 지진규모를 산정하였다.

$$G(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (9a)$$

$$H(x) = 1 - \frac{1}{pT} \quad (9b)$$

$$x = H^{-1}\left(1 - \frac{1}{pT}\right) \quad (9c)$$

여기서, T 는 재현기간(return period 또는 recurrence interval: 어떤 사상의 크기가 평균적으로 T 년 동안 1회 발생할 확률), $G(x)$ 는 비초과확률(non-exceedance probability)이다. Table 4와 Fig. 4는 재현기간에 따라 산정된 지진의 규모를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 4가지 혼합확률분포모형(Mixed Gumbel, Mixed Lognormal, Mixed Gamma, Mixed Weibull)과 관측된 지진 자료를 활용하여 규모-빈도 관계를 그래프로 나타낸 것(이하 규모-빈도식으로 간단하게 표현, 그래프에서는 'Observed (GR)'로 표현)이다. 규모-빈도식은 연도별 최대값을 뽑아내기 이전의 전체 38개의 관측 자료(Table 1 참고)를 활용하여 전 기간 동안의 일정규모 이상의 지진에 대한 발생확률을 나타낸 것으로, 관측값만을 활용하여 추정된 지진규모별 빈도를 도시화하였으며, 8.0 이상의 규모에 대해서는 관측값이 존재하지 않는다. 지진에너지와 지진규모의 관계식은 식 (10)과 같다.

$$\log_{10}E = 11.8 + 1.5M \quad (10)$$

여기서, E 는 지진에너지를 나타내고, M 은 지진규모를 나타낸다. 따라서, 지진규모가 1.0 증가하면 지진에너지는 약 32배 증가하게 된다(<http://earthquake.usgs.gov>). 이와 같이 지진규모에서의 작은 변화가 지진에너지에 큰 영향을 주기 때문에, 본 연구에서는 특성 재현기간에 대한 지진규모의 값을 제시

Fig. 4. Earthquake according to Return Period at East Sea

Fig. 5. Earthquake according to Return Period (Mixed Gumbel distribution)

하기 보다는 지진-규모식과의 비교를 통하여 본 연구방법의 적용가능성을 확인하였다. Fig. 5에 의하면 지진-규모식과 확률분포모형으로 도출한 재현기간에 따른 지진규모가 서로 비슷한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 500년 이하의 재현기간에 대해서는 Mixed Gumbel과 Mixed Weibull 분포가 지진-규모식과 유사한 결과를 보여주며, 500년 이상의 재현기간에 대해서는 지진-규모식은 Mixed Lognormal과 Mixed Gamma 분포와 비슷한 양상으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

4가지 혼합분포모형 중에서 Mixed Gumbel과 Mixed Lognormal분포에 대한 규모-빈도식의 대응관계를 구체적으로 확인하기 위하여, 분포모형의 신뢰구간에서의 포함여부를 확인하였다.

$$X_{CI} = X_t \pm u_{1-\alpha/2} S_t \quad (11)$$

여기서, X_t 는 추정된 재현기간에 따른 규모 값이며, $u_{1-\alpha/2}$ 는

Table 4. Earthquake according to Return Period at East Sea

Distribution	Return Period (year)				
	50	100	200	500	1000
Gumbel	6.48	7.16	7.41	7.60	7.70
Lognormal	6.50	7.08	7.39	7.69	7.88
Gamma	6.51	7.08	7.38	7.67	7.85
Weibull	6.50	7.15	7.40	7.60	7.71

Fig. 6. Earthquake according to Return Period (Mixed Gumbel Distribution)

표준정규분포함수의 $1-\alpha/2$ 에 대한 분위 수, S_n 는 X_n 에 대한 표준오차이다(Heo and Salas 1996). Fig. 5와 Fig. 6에서 7.0 이상 규모의 지진은 Mixed Gumbel과 Mixed Lognormal의 90% 신뢰구간 내에 규모-빈도식이 포함됨을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 NOAA에서 제공하는 1900년에서 2012년까지 동해연안의 지진자료에 대하여 확률론적 빈도해석 이론을 적용하여 지진빈도해석을 수행하였다. 지진자료의 불연속적 발생과 일정규모 이상의 지진자료를 활용하여 분석이 이루어진다는 특성을 반영하기 위하여 혼합분포함수를 활용하여 재현기간별 지진규모를 도출하였으며, 그로 인한 결론은 다음과 같다.

- 1) 동해연안에서는 혼합분포함수(Mixed Gumbel, Mixed Lognormal, Mixed Gamma, Mixed Weibull)를 활용한 지진빈도해석의 재현기간에 따른 지진규모는 관측 지진자료를 바탕으로 도출한 지진-규모식의 지진규모보다 큰 값이 산정되었다. 분포모형 중에서 500이하의 재현기간에서는 Mixed Gumbel, Mixed Weibull이 가장 근접한 값이 추정되었으며, 500이상의 재현기간에서는 Mixed Lognormal과 Mixed Gamma 분포가 4가지 분포모형 중에서 적합한 모형임을 확인할 수 있다.
- 2) 지진-규모식과 지진빈도해석의 재현기간별 지진규모 결과가 일부 혼합분포모형에서는 유사한 규모-빈도곡선이 작성되었다. 그러나 관측자료가 적기 때문에 100년 이상의 빈도를 추정한 결과에 대해서는 정량적인 비교분석이 수행되지 못하였다. 본 연구에서 적용된 자료기간인 1312년 동안 관측된 지진은 38회이며, 지진빈도해석을 위하여 활용한 지진자료는 31년도 자료로, 일반적으로 수문학에서 30개 이상의 자료로 100년 빈도를 추정하는 것과 비교하여 과다산정 될 위험이 존재한다(Linsley *et al.*, 1982). 이를 극복하기 위하여 혼합확률분포함수를 적용하였으며, 재현기간 10년에서 500년 사이의 규모는 Mixed Gumbel과 Mixed Weibul 분포가 규모-빈도식과 유사한 결과를 도출하였으며, 재현기간 500년 이상의 지

혼합분포함수를 이용한 동해 지진자료의 확률론적 빈도해석

진규모에 대해서는 Mixed Lognormal과 Mixed Gamma 분포가 서로 유사한 값을 추정하였다. 하지만 활용된 지진자료는 5.1에서 7.9 사이 규모로, 이후의 규모에 대한 정확한 예상 규모-빈도식을 본 연구에서는 도출하지 않았으나 전반적인 그래프의 흐름으로는 100년 이상의 재현기간에 대해서는 Mixed Lognormal과 Mixed Gamma 분포에서 도출된 규모와 비슷할 것으로 예상된다.

- 3) 또한, 본 연구는 Mixed Gumbel과 Mixed Lognormal 분포에서 규모-빈도식이 신뢰구간 내에 포함됨으로써 국내의 지진자료에 대하여 혼합분포를 적용한 지진빈도해석방법의 적용가능성을 확인할 수 있었다. 지진자료는 수문자료와 다르게 규모가 1.0 차이가 발생하더라도 지진에너지는 약 32배의 차이가 발생하므로 정확한 분석이 요구되고 있기에 본 연구에서는 국내에서 발생한 지진에 대하여 다양한 분석을 위한 추가적인 연구가 필요할 것이며, 본 연구를 바탕으로 지진자료의 통계적 특성을 도출하도록 하며, 본 연구결과를 지진위험도분석을 비롯한 국내의 지진빈도곡선을 산정할 수 있는 연구의 기반으로 활용될 수 있을 것이라 생각된다.

References

- Choi, H.S., Son, Y.H., Kim, J.Y. and Choi K.K. (1999) A study on the estimation of design earthquake base on the earthquakes's character of Korean peninsula. *Collection of Dissertations of Dong-A University*, Vol. 22, No. 2, pp. 97-106.
- Erisoglu, M., Calis, N., Servi, T., Erisoglu, U. and Topaksu, M. (2011) The mixture distribution models for interoccurrence times of earthquakes. *Russian Geology and Geophysics*, Vol. 52, No. 7, pp. 737-744.
- Fahmi, K.J. and Al Abbasi, J.N. (1987) Mixture distributions-an alternative approach for estimating maximum magnitude earthquake occurrence. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 89, pp. 741-747.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F. (1942) Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 32, No. 3, pp. 163-191.
- Heo, J.H. and Salas, J.D. (1996) Estimation of quantiles and confidence intervals for the log-Gumbel distribution. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 10, No. 3, pp. 187-207.
- Husein Malkawi, A.I., Abdulla, F.A., Barakat, S.A. and Al-Sheriadeh, M.S. (1999) Application of extreme value statistics to annual maximum magnitudes in Jordan employing a mixture distribution. *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 4, pp. 711-724.
- Kagan, Y.Y. (1999) Universality of the seismic moment-frequency relation. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 155, Issue 2-4, pp. 537-573.
- Kagan, Y.Y. and Schoenberg, F. (2001) Estimation of the upper cut-off parameter for the tapered Pareto distribution. *Journal of Applied Probability* Vol. 38, pp. 158-175.
- Kedem, B., Chiu, L.S., Karni, Z. (1990) An analysis of the threshold method for measuring area-average rainfall. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 29, pp. 3-20.
- Kulikov, E.A., Rabinovich, A.B. and Thomson, R.E. (2005) Estimation of tsunami risk for the coasts of Peru and northern Chile. *Natural Hazards*, Vol. 35, No. 2, pp. 185-209.
- Kyung, J.B., Kim, S.H., Kim, U. and Seo W.T. (2009) Seismic activ-

- ity of Korea since 1978. *Proceeding of Earthquake Engineering Society of Korea Conference*, pp. 50-57.
- Lee, J.S. (2006) *Hydrology*. Goomibook
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., and Paulhus, I.L. (1982) *Hydrology for Engineers*. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York.
- 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.
- Nordquist, J.M. (1945) Theory of largest values applied to earthquake magnitudes. *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 26, Issue 1, pp. 29-31.
- Park, J.W. (2002) *A study on statistical evaluation of earthquake design load according to Korean earthquake data*, MS Thesis, Hongik University
- Pisarenko, V.F., Sornette, A., Sornette, D. and Rodkin, M.V. (2008) New approach to the characterization of $M_{\max}$ and of the tail of the distribution of earthquake magnitudes, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 165, Issue 5, pp. 847-888.
- Pisarenko, V.F., Sornette, D. and Rodkin, M.V. (2010) Distribution of maximum earthquake magnitudes in future time intervals: application to the seismicity of Japan (1923-2007), *Earth, Planets and Space*, Volume 62, Issue 7, pp. 567-578.
- Seo, J.M., Rhee, H.M. and Choi, I.K. (2010) A study on the best estimate of seismicity parameter b-value and its application for the seismic hazard analysis of the Korean peninsula. *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 14, No. 1, pp. 35-42.
- Silbergleit, V., and Prezzi, C. (2012) Statistics of major Chilean earthquakes recurrence. *Natural Hazards*, Vol. 62, No. 2, pp. 445-458.
- Talbi, A. and Yamazaki, F. (2010) A mixed model for earthquake interevent times. *Journal of Seismology*, Vol. 14, No. 2, pp. 289-307.
- Yoo, C., Jung, K.S. and Kim, T.W. (2005) Rainfall frequency analysis using a mixed Gamma distribution: evaluation of the global warming effect on daily rainfall. *Hydrol. Process.*, Vol. 19, pp. 3851-3861. doi: 10.1002/hyp.5985
- Yoon, T.H. (2011) *Applied Hydrology-Theory and Practice*, Cheong Moon Gak Publishing Cooperate
- Zimbidis, A.A., Frangos, N.E. and Pantelous, A.A. (2007) Modeling earthquake risk via extreme value theory and pricing the respective catastrophe bonds. *ASTIN Bulletin*, Vol. 37, No. 1, pp. 163-184.

© Received August 7, 2013

© Revised August 13, 2013

© Accepted October 11, 2013