

한반도 주요 지체구조구별 지진학적 특성 Seismic Characteristics of Tectonic Provinces of The Korean Peninsula

이 기 화* 김 정 기**
Lee, Kiehwa Kim, Jung Ki

ABSTRACT

Seismicity of the Korean Peninsula shows intraplate seismicity that has irregular pattern in both time and space. Seismic data of the Korean peninsula consists of historical earthquakes and instrumental earthquakes. In this study, we divide these data into complete part and incomplete part and considering earthquake size uncertainty, estimate seismic hazard parameters - activity rate λ , b value of Gutenberg-Richter relation and maximum possible earthquake I_{MAX} by statistical method in each major tectonic provinces. These estimated values are expected to be important input parameters in probabilistic seismic hazard analysis and evaluation of design earthquake.

1. 서 론

한반도는 판구조론적 견지에서 볼 때 유라시아판 내부에 속하며 그 지진활동은 시간과 공간에서 매우 불규칙성을 갖는 전형적인 판내부 지진활동의 특성을 보여준다(Lee⁽¹⁾).

한반도의 지진활동 연구에 필요한 지진자료는 크게 볼 때 지진계가 설치되기 이전 19세기까지의 역사기록에 남아있는 역사지진자료와 그 이후의 지진계가 설치된 이후 지진계에 기록된 계기 지진자료로 구분할 수 있다. 계기지진자료는 지진기록계 분석을 통하여 진앙의 위치, 진원깊이, 발진시간, 지진의 규모 등을 정량적으로 측정할 수 있는 이점이 있으나 그 기간이 불과 100년 미만의 짧은 기간에 제한된다는 문제점이 있다. 전세계적으로 지진활동이 매우 활발한 판경계 지역을 제외하고는 대부분 판내부에서의 지진활동은 대체로 수백 년 내지 수천 년의 낮은 지진활동 간격을 두고 다시 활발하게 전개된다고 알려져 있다. 따라서 불과 100년 미만의 계기지진자료는 판내부 지역의 지진활동을 완전히 표현하기에는 다소 부족하다. 이러한 맥락에서 지진활동이 비교적 낮은 판내부 지역에서는 수 천년의 기간을 포괄하는 역사지진자료의 중요성이 부각된다.

한편 역사지진자료는 진앙의 위치, 진원깊이, 발진시간, 지진의 규모 등을 정량적으로 결정할 수

* 서울대학교 교수, 정회원

** 서울대학교 석사과정, 학생회원

없는 문제점이 있고 - 진앙위치의 오차범위는 $1/4^{\circ} - 1/2^{\circ}$, 진도의 오차범위는 $\pm 1(\text{Bath}^{(2)})$ - 또한 고대로 갈수록 인구가 줄어들고 지역에 따라 밀도가 균질하지 않으므로 실제 발생한 지진들이 역사기록에 누락되었을 가능성 즉, 지진자료의 불완전성의 문제가 제기된다. 이런 경우 이들 자료로부터 지진위험요소를 추정할 때는 그 자료들의 불완전성을 고려해주는 것이 바람직하다.

한반도의 역사지진자료에 관한 연구는 아직 시작단계에 있으며 현재까지 출판된 비교적 완전한 목록으로서는 이기화⁽³⁾가 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록 등의 사료에서 1965회의 지진자료를 검색하여 진앙의 위치, 진도 등을 결정한 것을 들 수 있다.

본 연구에서는 역사지진자료로는 이 목록을 이용하였고 계기지진자료는 1905년 한반도에 최초로 지진계가 설치된 후 지금까지의 계기지진자료를 보유하고 있는 기상청 자료를 이용하였다.

한반도는 Sino-Korean 지괴, 만주 지괴, 양쯔 지괴 이 세 지괴의 한 부분으로 중국 북동부와 유사한 지체구조적인 특징을 보여주고 있으며(Lee⁽¹⁾) 또한 중생대 이전에 특기할만한 지체구조적인 변동이 거의 없었던 안정지괴로 알려져 있다(Kim⁽⁴⁾). 하지만 한반도는 고생대, 중생대, 신생대를 걸친 여러 조륙 운동, 조산 운동(송림 변동, 대보 조산 운동, 불국사 변동), 화산 활동 등과 여러 지질학적인 정보에 의하여 세부적으로 여러 지체구조구로 나누어진다(Lee⁽¹⁾). 본 연구에서는 바다에서 발생한 지진자료를 포함하기 위하여 기존의 한반도 지체구조도를 바탕으로 그림 1과 같은 확장된 지체구조도를 이용하였다.

본 연구에서는 역사지진자료와 계기지진자료를 이용하여 한반도의 주요 지체구조구별로 지진위험요소 - 활동을 λ , Gutenberg-Richter 관계식에서의 b 값, 최대가능지진 I_{\max} - 를 통계적 방법을 이용하여 추정하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 지진 자료

2.1.1. 역사지진 자료

삼국사기, 고려사, 조선왕조실록, 승정원일기, 증보문헌비고 등의 사료에서 수집 분석한 역사지진자료는 총 1965회에 이른다.

삼국시대(서기 2년 ~ 936년)에는 총 113회의 역사지진기록이 있고 이 시대에 발생한 지진들의 대부분이 삼국의 수도에서 발생한 것으로 나타났다. 건조물에 상당한 파괴를 가져오는 $MMI VIII$ 이상의 지진만도 16회 정도 발생했고 특히 779년에 경주에서 발생한 지진은 집들이 무너지고 100여명이 사망했다고 기록되어 있으며 이 지진은 한반도에서 가장 큰 인명피해를 가져 온 지진이다.

고려시대(서기 937년 ~ 1391년)에는 총 187회의 역사지진기록이 있고 대부분 당시 수도인 개성에서 감지되었다. $MMI VIII$ 이상의 지진은 6회 발생했다.

조선시대(서기 1392년 ~ 1904년)에 와서 지진자료 수집은 인구의 증가 등으로 비교적 완전하다고 여겨지고 총 1665회의 지진이 발생했으며 한반도 전역에서 감지되었으며 $MMI VIII$ 이상의 지진은 40회 정도였다. 15세기에서 18세기에 걸쳐 지진활동이 매우 활발하였고 한반도에서 지진으로 방출된 에너지의 태반이 이 시기에 방출되었다. 1643년 7월 24일 울산에서 발생한 지진은 $MMI X$ 로 추정되며 한반도에서 발생한 가장 큰 규모의 지진으로 여겨진다. 또한 1565년 9월 6일과 1566

년 1월 26일까지 평안도 상원에서는 100여 회의 균발지진이 발생하였다.

그림 2는 한반도의 지체구조도에 MMI V이상의 역사지진들의 진앙위치를 도시한 것이다.

2.1.2. 계기 지진 자료

1905년 인천에 최초로 지진계가 설치된 이후로 1996년 12월 21일까지 810회의 지진들이 한반도 및 그 주변에서 발생했다. 이 지진들의 연 발생률은 0 ~ 30회의 범위에 걸치며 이는 지진계의 분포가 이 기간에 고르지 못한 것에 그 주원인이 있다.

계기지진의 평균 연 발생률은 대략 10회인데 1980년대 이후로는 지진발생횟수가 대략 20회에 이른다. 이는 1980년대 이후에 실질적인 지진활동의 증가라기 보다는 전국적으로 지진관측망이 확장된 것에도 부분적인 원인이 있으리라 생각된다.

그림 3은 한반도의 지체구조도에 규모 4이상의 계기지진들의 진앙위치를 도시한 것이다.

2.2. 지진 크기의 불확정성과 지진 자료의 불완전성

역사지진자료와 계기지진자료는 지진 크기 결정에 있어서 상당한 불확정성을 내포하고 있다. 이에 본 연구에서는 지진 크기 결정의 불확정성을 고려하기 위하여 두 가지 모델을 가정하였다. 첫 번째 모델(모델 I)은 실제 미지의 지진 크기는 우리가 알고 있는 지진 크기 - 겐보기 지진 크기 - 에 δ 를 더한 상한값과 δ 를 뺀 하한값 사이에 일정하게 분포한다는 가정이고 두 번째 모델(모델 II)은 실제 미지의 지진 크기는 겐보기 지진 크기를 평균으로 하고 σ 를 표준편차로 하는 정규분포를 따른다는 가정이다(Kijko and Sellevol⁽⁵⁾).

지진 목록은 수백 또는 수천년에 걸쳐서 발생한 큰 지진들로 이루어진 불완전한 자료와 상대적으로 짧은 기간에 지진계에 측정된 완전한 자료로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 조선시대 이전의 역사지진자료를 불완전한 자료로 그리고 조선시대 이후의 역사지진자료와 1905년 이후의 계기 지진자료를 완전한 자료로 가정하였다.

지진 크기의 일관성을 위해 다음과 같은 진도-규모 변환공식을 이용하여 모든 지진 자료의 지진 크기는 진도로 통일하였다(Trifunac and Brady⁽⁶⁾).

$$M = 1 + \frac{2}{3} I \quad (1)$$

2.3. 지진 위험 요소의 추정

불완전한 지진 자료와 완전한 지진 자료를 결합하여 지진 크기의 불확정성에 따른 두 가지 모델에 의해 지진 위험 요소를 추정하기 위해서 지진 발생 횟수는 활동률이 λ 인 포아송 분포를 따르고 지진 크기의 누적 확률 분포 함수는 doubly truncated Gutenberg-Richter 관계식에 의해 다음과 같다고 가정한다(Cosentino *et al.*⁽⁷⁾).

$$F(x|m_0) = [\exp(-\beta m_0) - \exp(-\beta x)] / [\exp(-\beta m_0) - \exp(-\beta m_{\max})] \quad (2)$$

여기서 m_0 , m_{max} 는 각각 지진크기 x 의 시발값, 최대값이며 β 는 Gutenberg-Richter 관계식의 b 값과 관련된 $\beta = b \ln(10) - \text{값}$ 이다.

위의 가정에 의해서 시간 간격, t 동안에 발생한 강진크기의 누적확률분포함수는 다음과 같이 유도된다(Gan and Tung⁽⁸⁾).

$$G(x|m_0, t) = \frac{\exp\{-\lambda(m_0)t[1 - F(x|m_0)]\} - \exp[-\lambda(m_0)t]}{1 - \exp[-\lambda(m_0)t]} \quad (3)$$

여기서 $\lambda(m_0) = \{\lambda[1 - F(m_0|m_{min})]\}$ 이고 m_{min} 은 지진자료의 최소값이다.

주요 지체구조구별로 추정되어야할 지진위험요소는 활동을 λ , Gutenberg-Richter 관계식에서의 b 값, 최대가능지진 m_{max} 으로써 활동을 λ , Gutenberg-Richter 관계식에서의 b 값을 추정하기 위해서 최우도 방법을 이용하였고(Kijko and Sellevoll⁽⁹⁾; Kijko and Sellevoll⁽⁵⁾) 최대가능지진 m_{max} - 실제로 본 연구에서는 진도에 의한 최대가능지진 I_{MAX} 이다 - 를 추정하기 위해서 Kijko and Dessokey⁽¹⁰⁾에 의해 제시된 방법을 이용하였다.

지진크기의 불확정성의 첫 번째 모델의 δ 값과 두 번째 모델의 σ 값은 불완전한 지진자료에는 0.2를 가정하고 완전한 지진자료에서는 0.1을 가정하였다.

표 1은 추정된 지진위험요소를 주요 지체구조구별로 나타낸 것이다. 표 1의 값들을 계산하기 위해서 본 연구에서는 Kijko and Sellevoll⁽⁵⁾의 FORTRAN 프로그램을 수정하여 이용하였다.

3. 결 론 및 토 의

한반도에서 발생한 지진에 대한 역사지진자료와 계기지진자료를 고려시대 이전의 불완전한 자료와 조선시대 이후의 완전한 자료로 가정하여 이 두 자료를 조합하여 한반도의 주요 지체구조별로 지진위험요소를 추정하였다.

지진크기의 불확정성을 고려한 두 모델에서의 지진위험요소는 모델 II에 의한 값이 모델 I에 의한 값보다 다소 크게 추정되었으나 큰 차이는 나타나지 않았다.

b 값은 옥천대에서 가장 높게 추정되었고 반면 평남분지에서는 가장 낮게 추정되었으며 그 외 지역에서는 일정한 양상을 보였고 일반적인 판내부 지진활동지역의 b 값과 유사하게 나타났다. λ 값은 영남육괴에서 가장 높았고 평남분지에서는 가장 낮았다. I_{MAX} 는 전 지역에 걸쳐 일정한 양상을 나타내었다.

이러한 지진위험요소들의 추정치는 한반도에서 확률론적인 지진 재해를 분석할 때 입력요소로써 중요한 변수가 될 뿐만 아니라 원자력 발전소등의 주요 토목구조물의 내진 설계에서 가장 중요한 변수인 설계지진을 추정하는 데에도 중요한 기본 자료가 된다.

좀 더 합리적인 지진위험요소를 추정하기 위해서는 앞으로 한반도의 지진원에 관한 연구 - 특

히 활성단층의 규명 및 지진학적 특성에 관한 연구 - 의 활성화가 긴요하며 또한 역사지진자료와 계기지진자료의 합리적 평가과 한반도 지진환경에 적합한 지진위험요소 추정방법의 개발이 아울러 요구되어진다.

4. 참고 문헌

1. K. Lee(1987), "Earthquake,": in D. S. Lee(editor), "Geology of Korea," Geological Society of Korea, Kyohaksa.
2. M. Båth(1979), "Introduction to seismology," Birkhä user Verlag.
3. 이기화(1999), "역사지진 평가 및 목록작성", 한국원자력안전기술원.
4. J. H. Kim(1998), "Tectonic framework of the Korean peninsula,": in H. J. Koh, and B. J. Lee(editors), "Tectonic evolution of east asia," Korea Institute of Geology, Mining and Materials.
5. A. Kijko, and M. A. Sellevoll(1992), "Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II. Incorporation of magnitude heterogeneity," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 82, No. 1, pp.120-134.
6. M. D. Trifunac, and A. G. Brady(1975), "On the correlation of seismic intensity scales with peaks of recorded strong ground motion," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 65, No. 1, pp.139-162.
7. P. Cosentino, P. Ficarra, and D. Luzio(1977), "Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 67, No. 6, pp.1615-1623.
8. Zi Jun Gan, and C. C. Tung(1983), "Extreme value distribution of earthquake magnitude," Phys. Earth Planet. Inter., Vol. 32, pp.325-330.
9. A. Kijko, and M. A. Sellevoll(1989), "Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 79, No. 3, pp.645-654.
10. A. Kijko, and M. M. Dessokey(1987), "Application of the extreme magnitude distributions to incomplete earthquake files," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 77, No. 4, pp.1429-1436.

표 1. 주요 지체구조구별 지진위험요소

지체구조구	b		λ		I_{MAX}	
	모델 I	모델 II	모델 I	모델 II	모델 I	모델 II
평남분지	0.23 ± 0.03	0.31 ± 0.02	0.02 ± 0.00	0.08 ± 0.02	9.18 ± 0.83	9.19 ± 0.74
경기육괴	0.72 ± 0.02	0.75 ± 0.03	0.20 ± 0.02	0.27 ± 0.02	9.75 ± 0.74	9.77 ± 0.82
옥천대	0.81 ± 0.07	0.87 ± 0.04	0.28 ± 0.03	0.32 ± 0.02	9.87 ± 0.56	9.88 ± 0.47
영남육괴	0.65 ± 0.04	0.71 ± 0.02	0.32 ± 0.03	0.36 ± 0.05	9.42 ± 0.35	9.44 ± 0.40
경상분지	0.68 ± 0.04	0.70 ± 0.03	0.25 ± 0.02	0.33 ± 0.03	9.68 ± 0.21	9.72 ± 0.39
한반도 전역	0.57 ± 0.06	0.63 ± 0.07	0.78 ± 0.03	0.82 ± 0.05	10.17 ± 0.97	10.32 ± 0.82

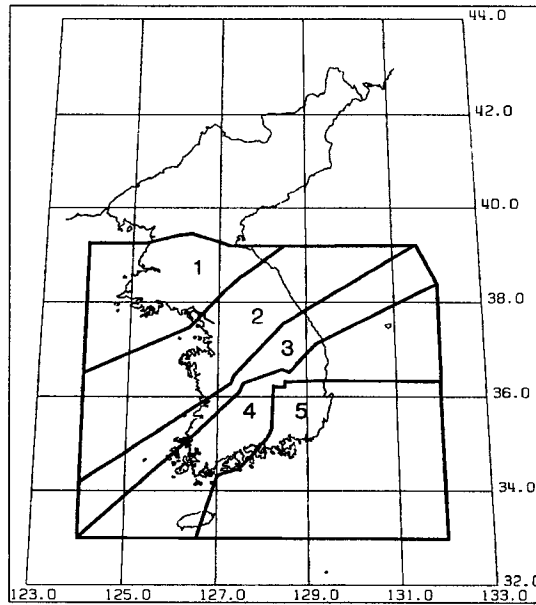


그림 1. 한반도의 지체구조도

(1:평남분지, 2:경기육괴, 3:옥천대, 4:영남육괴, 5:경상분지)

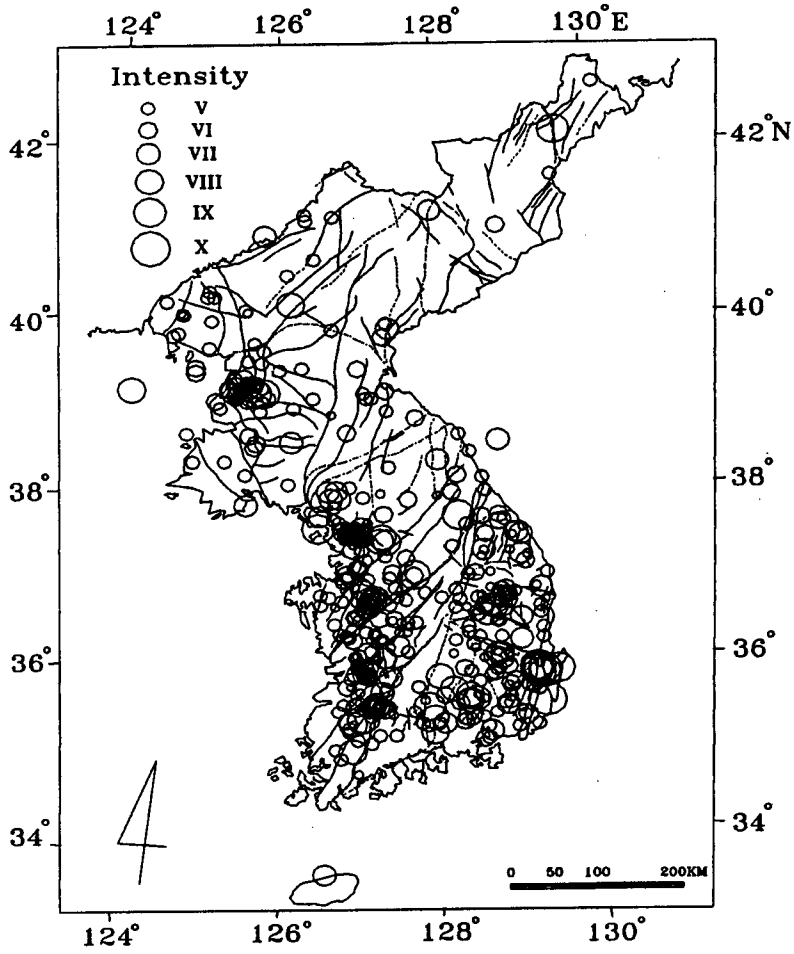


그림 2. MMI V이상의 역사지진(A. D. 2 ~ 1904)의 진앙위치

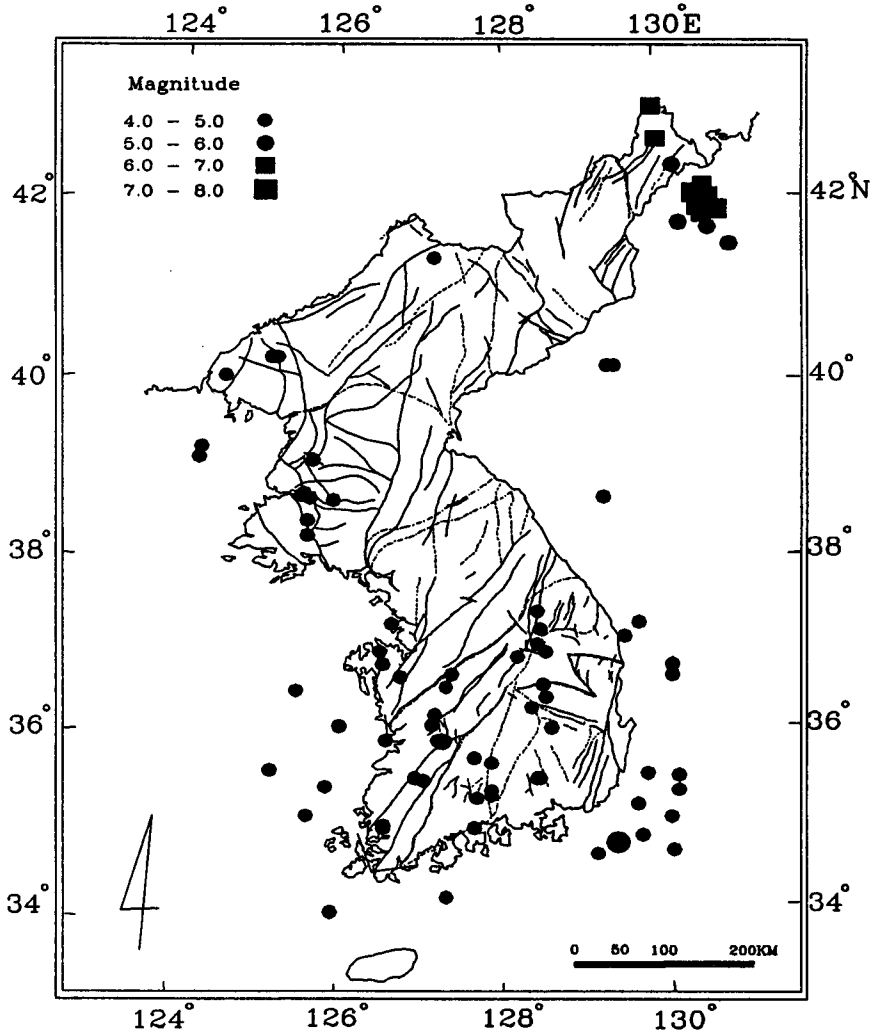


그림 3. 규모 4이상의 계기지진(A. D. 1905 ~ 1996)의 진앙위치(원:천발지진, 사각형:심발지진)