

역사지진 기록을 기초로한 지진규모와 위치 예측 방법

Determination of epicenters and magnitudes of future earthquakes based on the historical earthquake catalogues

권 오 성* 한 상 환**
Kwon, Oh-Sung Han, Sang-Whan

ABSTRACT

Three historical earthquake catalogues were compared with each other in the view of frequency of events per century, cumulative magnitude distribution, and annual earthquake occurrence rate in each unit grid of 0.1° by 0.1° . And, a method to determine earthquake epicenters and magnitudes was proposed given the historical earthquake data. With this method, the epicenters and magnitudes of future earthquakes in Korean peninsula for 1,000 years were generated with each earthquake catalogue. Earthquake PGAs with 10% exceedance probability in Seoul were calculated for each catalogue and compared.

1. 서 론

특정 지역에서 지진 활동의 특성을 규명하고 앞으로 일어날 지진 활동을 예측하기 위해서는 그 지역에서 발생한 장기간의 지진 기록이 필요하며, 이러한 목적으로 역사 지진 및 계기 지진 기록을 사용한다. 우리나라의 지진 자료는 1904년 이전 1900여년 간의 역사지진 기록과 1905년 이후의 계기 지진 기록으로 분류된다. 우리나라는 규모가 큰 지진의 연간 발생률이 낮고, 신뢰할 수 있는 계기 지진 기록의 수도 많지 않기 때문에 국내 지진 활동의 특성을 파악하고 그것을 기반으로 앞으로 일어날 지진 활동을 예측하기 위해서는 역사 지진 기록을 사용하는 수밖에 없다.

역사지진 기록은 역사적인 문헌에 기록된 지진현상을 분석하여 산정하게 된다. 우리나라에서의 최초의 역사지진 자료정리는 1912년 와다(和田雄治)가 삼국사기, 고려사, 조선왕조실록 등의 역사문헌 14종으로부터 지진에 관한 기록을 정리한 것이다. 그 후 여러 국내의 학자들에 의해 수정 및 보완이 이루어져 왔지만 평가자에 따라 지진발생 위치와 진도 등을 다르게 해석하여 차이를 보이고 있다. 계기지진자료 역시 자료출처에 따라 진앙지, 규모, 발생일시 등에 대한 기록이 상이하거나 누락 또는 잘못 기재된 경우가 많다. 본 연구에서는 내진설계기준연구(II)에서 사용된 세 종류의 역사 지진 기록을 서로 비교 분석하였다.

그리고, 이러한 기록을 바탕으로 하여 우리나라 위도 $33^\circ \sim 43^\circ$, 경도 $123^\circ \sim 131^\circ$ 의 지역에 대하여 단위 격자 당 연간 지진 발생률을 구한 후 그 분포에 따라 앞으로 1,000년간 발생할 지진의 진앙의 위치를 산정하였다. 국내에서 발생하는 지진은 진원 깊이 10km안팎의 천발 지진으로 특정 지역과 그곳에서 발생하

* 한양대학교 건축공학과 석사과정

** 정희원 · 한양대학교 건축공학과 조교수

는 지진의 규모와는 서로 상관관계가 없다는 가정 하에 지진의 규모를 산정하였다. 지진의 규모는 Gutenberg-Richter의 분포를 따른다고 가정하였다.

2. 역사 지진 기록의 비교

역사 지진 자료는 역사 문헌에 기록된 지진에 관한 자료를 분석하여 연구자가 진앙의 위치 및 규모 등을 결정하게 된다. 역사 문헌에 기록된 자료는 객관적인 수치보다는 서술형으로 기록된 것이 많기 때문에 진앙의 위치 및 규모 등을 산정시 연구자의 주관이 개입하기 매우 쉽다. 또 시대에 따라 자료의 누락, 과장이 있을 수 있어 일관성이 결여된다. 건설교통부 내진설계기준연구(II)에 사용된 세 종류의 역사 지진 목록을 세기별 발생빈도, 규모별 누적 빈도, 연간 지진발생률 분포도의 측면에서 비교하여 보았다. 비교된 역사 지진 목록은 [표 1]과 같다.

표 1. 역사지진 목록 (AC 1 ~ 1904)

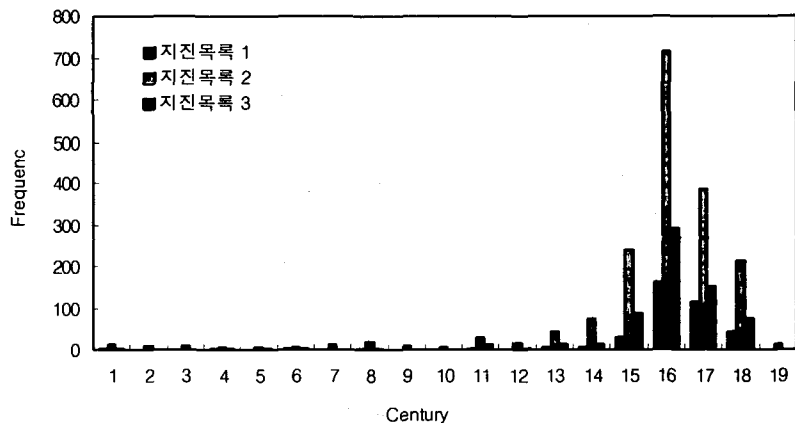
	김우한 외 5명 (지진목록 1)	김소구 (지진목록 2)	이기화 (지진목록 3)
전체 역사 지진의 수	389	1841	672
규모 범위	MMI V ~ X	M_L 3.8 ~ 7.6	MMI V ~ IX

위의 표를 보면 지진의 발생 빈도 면에서 지진 목록 1, 2, 3은 각각 연평균 발생률 0.2, 0.97, 0.35회 발생하여 발생 빈도가 큰 차이를 보인다. 그러므로 앞으로 발생할 지진의 규모를 예측함에 있어 어떠한 지진 목록을 사용하느냐에 따라 얻어지는 결과는 상당한 차이가 있으리라 사료된다. 그리고 세 지진 목록 중 지진목록 1과 3은 지진의 크기를 MMI진도로 표현한 반면 지진목록 2는 지진의 크기를 리히터 규모로 표현하였다. 본 연구에서는 규모의 상대적인 분포를 비교하기 위하여 식(1)과 같은 진도-규모 변환 공식을 사용하였다.

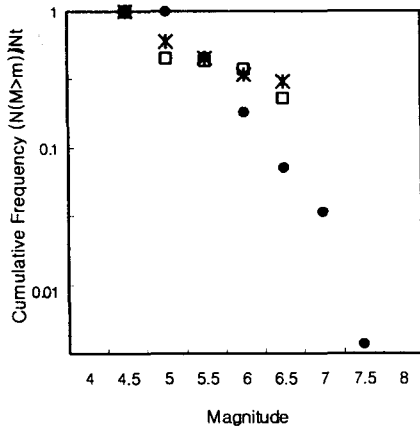
$$M = 1.75 + 0.5 I \quad (1)$$

2.1 세기별, 규모별 역사지진의 비교

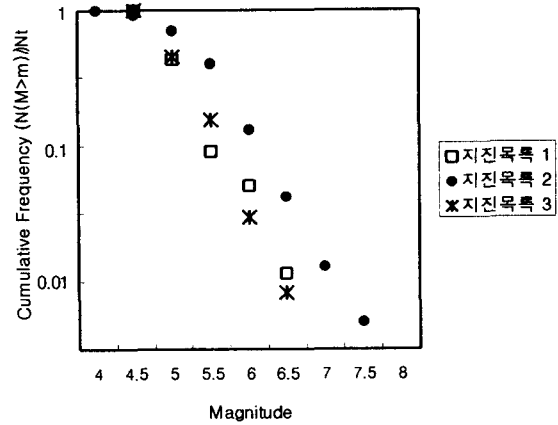
[그림 1]은 세기별로 피해지진의 발생빈도를 나타내고 있다. 그림에서 지진활동은 조선 중기, 즉, 15~17 세기에 특히 활발했음을 보여주고 있다. 물론 고대로 갈수록 작은 지진의 누락 가능성이 크다는 사실을 인정할 수 있다. 그러나 비교적 진도가 큰 피해지진의 발생 빈도를 비교하더라도 세 지진 목록 모두에서 조선 중기의 지진활동이 상대적으로 활발했음을 보여준다.



[그림 1] 역사지진의 세기별 발생빈도



[그림 2] 조선시대 이전의 규모별 누적빈도



[그림 3] 조선시대의 규모별 누적빈도

[그림 2]는 조선시대 이전의 규모별 누적빈도를, [그림 3]은 조선시대의 규모별 누적빈도를 도시하였다. Gutenberg-Richter 식은 지진 기록의 규모에 따른 분포를 나타내는 일반적인 식으로 식(2)와 같다.

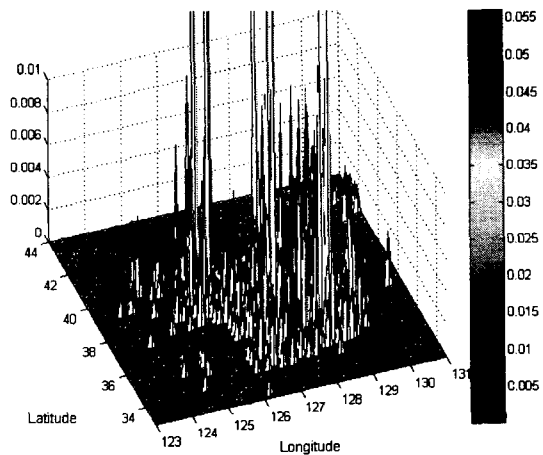
$$\log N(M) = a - bM \quad M > M_0 \quad (2)$$

일반적으로 지진의 규모에 따른 분포가 식(2)를 만족한다고 할 때 규모의 누적빈도의 로그값은 직선을 유지해야 한다. [그림 3]에서 규모에 대한 누적발생빈도는 모든 지진목록이 거의 직선관계가 성립된다. 이 사실로부터 조선시대의 역사기록은 규모 5이상에 대하여 거의 완전하게 서술되었음을 알 수 있다. 그러나 [그림 2]에서 규모와 누적 빈도와와의 비직선성은 조선시대 이전의 역사기록이 작은 규모의 지진에 대하여 상당수 누락되어 있음을 암시한다.

진도별 누적발생빈도 등을 참조할 때, 조선시대 이전의 역사기록은 통일성과 완전성이 결여되어 있어 확률론적인 지진재해계산에 사용하기 위해서는 특별한 주의를 요한다. 이에 반하여, 조선시대의 역사기록은 규모 5이상에 대해서는 비교적 누락의 가능성이 적어 본 연구의 입력자료로 적절함을 알 수 있다.

2.2 지리적 위치에 따른 지진 발생빈도

역사지진목록을 바탕으로 하여 한반도의 연간 지진 발생빈도를 구한다. 본 연구에서는 점지진원모델(point source model)에 의한 확률론적 접근이 시도되었다. 점지진원모델은 과거 지진의 진앙들을 지진원으로 보고, 지진감쇠공식을 적용하여 격자 위의 일련의 점들에서 지반 최대가속도의 누적빈도분포를 얻어 이를 확률론적으로 분석한다. 점지진원방법의 결점은 지



[그림 4] 지진목록 2의 격자당 연간 지진 발생률 - 평활화 시키지 않았을 때

진원의 규정에 지질학적 정보가 고려되지 않는 점이다. 따라서 이 방법은 과거 지진활동이 그 지역 지진 활동을 완전하게 표현한다는 전제하에 유효하다.

지리적 위치에 따른 연간 지진발생빈도를 계산하기 위하여 위도 33° ~ 43°, 경도 123° ~ 131° 사이의 지역을 0.1°의 격자로 나누어 조선시대 이후, 규모 5 이상의 지진이 발생한 횟수를 정리하여 그래프로 나타내면 [그림 4]와 같다.

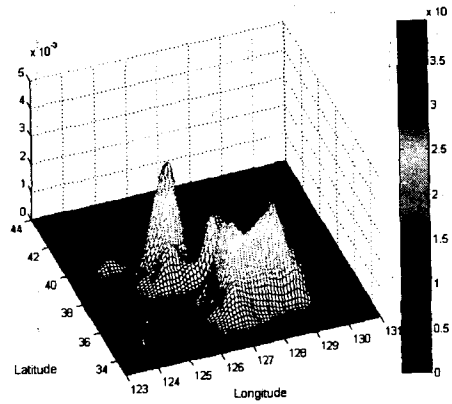
이러한 분포를 따르는 지진의 진앙의 위치를 결정하기 위해서는 위의 자료를 평활화 할 필요가 있다. 평활화 기법으로 다음과 같은 2차원적인 윈도를 설정하여 적용하였다.

경도 x , 위도 y 에서의 지진의 연간 발생빈도를 R_{ij} 라고 하고 식(3)과 같은 2차원 윈도 W 를 정의하였다. 평활화 시킨 지진의 발생빈도를 R'_{ij} 라 하면

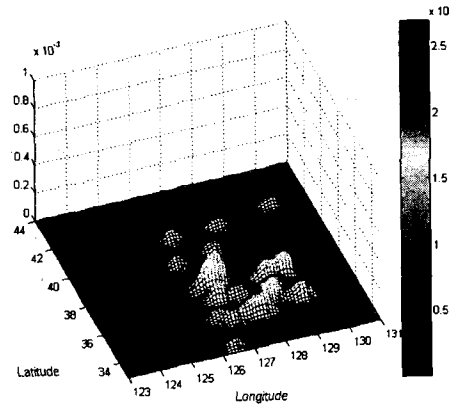
$$W = \begin{bmatrix} 1/16 & 1/8 & 1/16 \\ 1/8 & 1/4 & 1/8 \\ 1/16 & 1/8 & 1/16 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R'_{ij} = \sum_{l=i-1}^{i+1} \sum_{m=j-1}^{j+1} R_{lm} W_{l-(i-2), m-(j-2)} \quad (4)$$

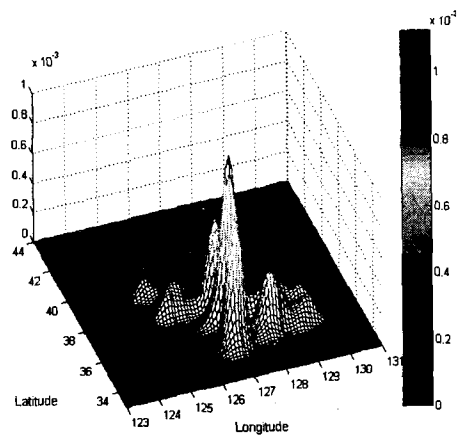
식(4)를 [그림 4]의 데이터에 적용시켜 각 지진목록의 격자별 연간 지진 발생률을 평활화 시키면 [그림 5], [그림 6], [그림 7]을 얻게 된다. [그림 5, 6, 7]을 보면 각 격자당 연간 지진 발생률의 전체적인 규모가 상당한 차이가 있을 뿐만 아니라 최대값으로 정규화 시켜 본다고 할 지라도 연간 발생률의 분포가 지진 목록에 따라 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 구조물의 설계시 지역에 따라 서로 다른 내진 등급을 정하게 되고 이 등급은 역사적 지진을 기초로 하게 되는 지진 목록 자체가 연구자에 따라 많은 차이를 보이기 때문에 객관적이고 통일된 지진 목록의 작성이 필요하다고 사료된다.



[그림 5] 지진목록 1에 따른 연간 발생률



[그림 6] 지진목록 2에 따른 연간 발생률



[그림 7] 지진목록 3에 따른 연간 발생률

3. 인공지진의 생성

3.2.1 진앙의 위치 산정

2차원으로 이루어진 연간 지진 발생률을 따르는 지진의 진앙 분포를 결정하기 위하여 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 의 격자로 구성된 2차원적인 연간 지진 발생률을 다음과 같이 1차원의 확률밀도 함수 및 누적 확률분포 함수로 표현하였다.

$$P(x) = P((i-1)N_C + j) = \frac{R_{ij}'}{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{m=1}^{N_C} R_{ij}'} \quad (5)$$

$$C(x) = \sum_{i=1}^x P(i) \quad (6)$$

여기서

P : 격자점에서의 지진의 연간 발생률의 확률 밀도함수

C : 격자점에서의 지진의 연간 발생률의 누적 확률 분포함수

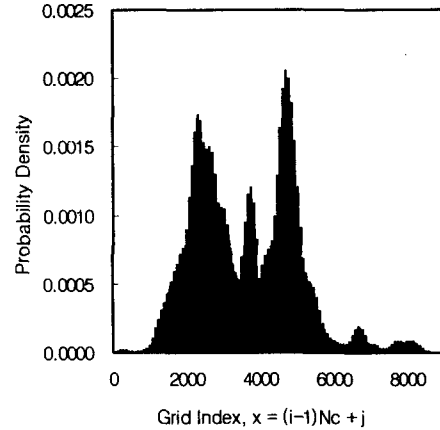
x : 2차원 인덱스 i, j 로부터 얻은 1차원 인덱스

N_C : 전체 열의 수

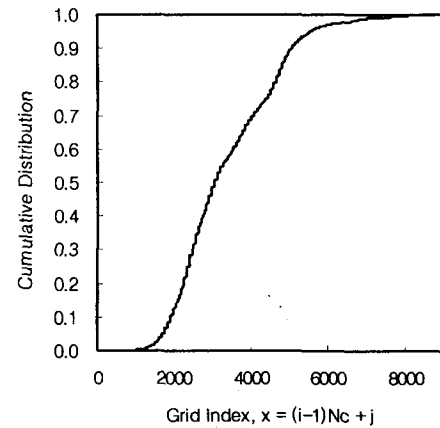
N_R : 전체 행의 수

이렇게 구한 확률 밀도 함수 및 누적 확률 분포 함수는 [그림 8], [그림 9]와 같다.

0에서 1사이의 균등하게 분포한 난수를 발생시킨 후 식(8)의 예서 그러한 값을 갖는 x 를 수치적인 방법을 이용하여, 그 x 값을 열과 행의 인덱스로 변환하면 [그림 5, 6, 7]의 지진의 연간 발생률을 따르면서 임의로 생성된 지진의 진앙지를 구할 수 있다.



[그림 8] 지진 발생률 확률 밀도 함수



[그림 9] 지진 발생률 확률 누적 함수

3.2.2 지진의 규모 산정

임의로 발생시킨 지진의 규모를 산정하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 지진 규모 X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$)는 통계적으로 독립이고, 다음 확률누적분포함수의 X 와 동일한 분포를 이룬다.

$$P(X \leq x) = F(x) \quad (7)$$

- (2) T 기간동안 지진발생수 n 과 지진 규모 X_i 는 통계적으로 독립이다. 즉, 임의의 자연수 k 와 규모 X_i ($i = 1, 2, 3, \dots$)에 대해서 다음이 성립한다.

$$P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n | n = k) = P(X_1 \leq x_1) \cdot P(X_2 \leq x_2) \cdots P(X_k \leq x_k) \quad (8)$$

지진의 규모는 규모별 지진 발생 빈도를 식(2)의 Gutenberg-Richter 식에 따르는 분포로 발생한다고 가정한다. 비선형 최소자승법을 적용하여 계수를 구하면 표 2와 같다.

[표 2] Gutenberg-Richter Formula parameters

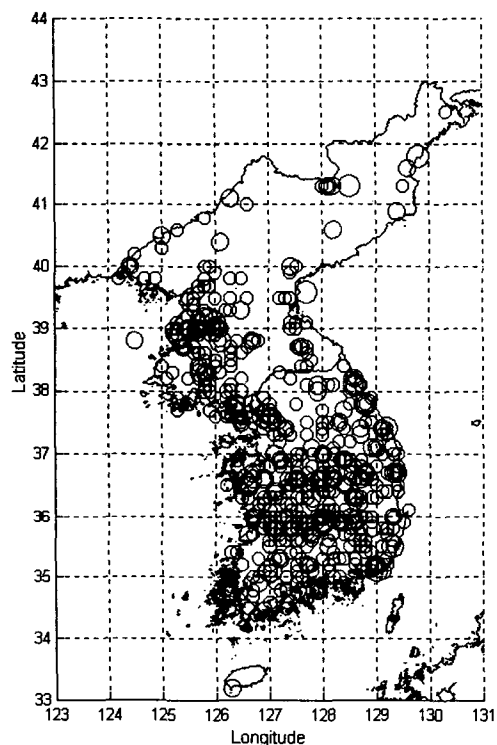
	<i>a</i>	<i>b</i>
지진목록 1	4.0153	0.7902
지진목록 2	4.1204	0.8218
지진목록 3	6.8096	1.3491

Gutenberg-Richter식의 확률 누적 분포 함수(CDF)는 다음과 같다.

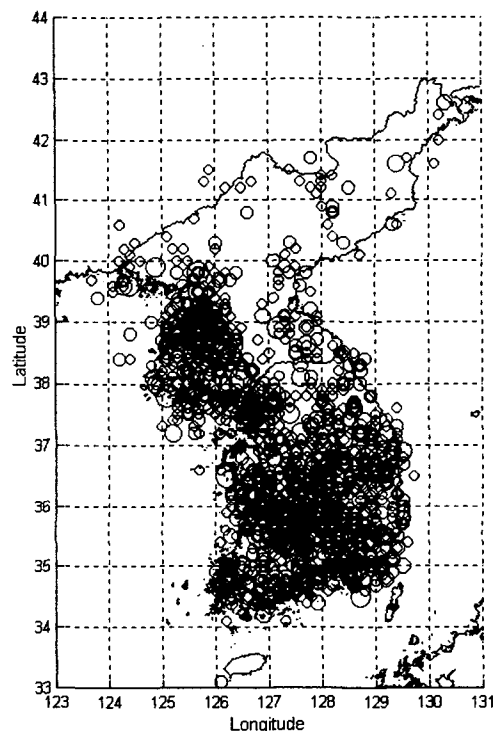
$$F_M(m) = 1 - N(m)/N_0, \quad N_0 = N(M_0) \quad (9)$$

0과 1사이에서 균등하게 분포된 난수를 발생시켜 식(9)를 따르도록 지진의 규모를 산정한다.

이러한 방법으로 진앙의 위치 및 지진의 규모를 산정하여 앞으로 발생할 1,000년간의 지진을 지도에 나타내 보면 [그림 11]과 같다. 지진목록에 의한 역사지진 [그림 10]과 비교해 보면 진앙의 분포가 유사함을 알 수 있다.



[그림 10] Epicenters and Magnitude of Earthquakes in Korean Peninsula, AC 1392 ~ 1904 (지진목록 2)



[그림 11] Epicenters and Magnitude of Simulated Earthquakes for 1000 years (지진목록 2)

4. 생성된 인공지진의 활용

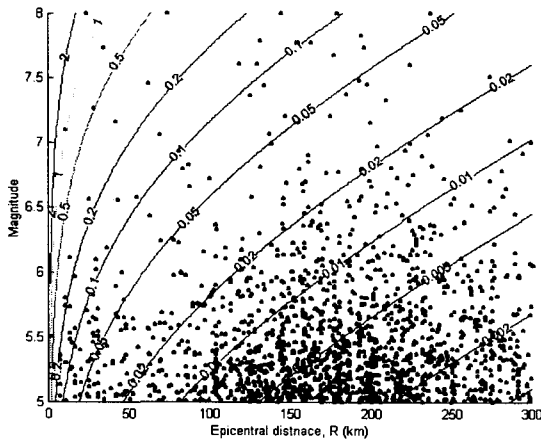
앞과 같은 방법으로 인공지진을 생성하여 진앙의 위치 및 지진의 규모를 산정할 수 있다. 이렇게 산정된 지진 자료는 인공지진파의 생성, 지진 재해도의 작성, 구조물의 위험도 평가 등에 활용 될 수 있다.

각각의 지진 목록을 이용하여 서울(위도 37.52°, 경도 126.92°)에서 일정기간 동안 특정 초과확률을 갖는 지진의 최대 지반 가속도를 구하여 보았다. 이 때 규모, 거리에 따른 최대 지반 가속도를 위한 감쇄식은 다음을 이용하였다.

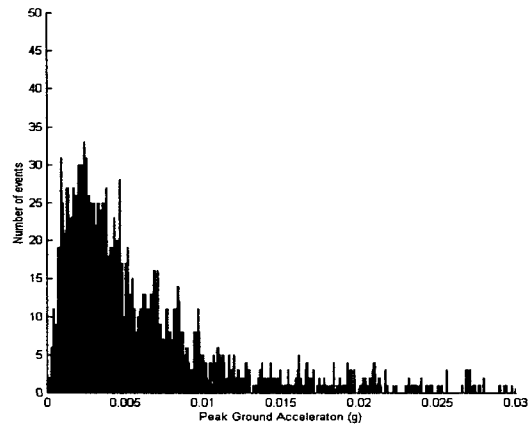
$$\ln a \text{ (cm/sec}^2\text{)} = c_0 + c_1M + c_2R(\text{km}) + c_3R(\text{km}) \quad (10)$$

여기서 a : 지반가속도 M : 지진규모 R : 진원거리

앞에서 발생시킨 각각의 지진에 대하여 해당지역(서울)과의 거리를 각각 구한 후 지진 규모와 지반가속도와 의 관계를 도식화하면 [그림 12]와 같다. [그림 12]를 보면 대부분의 지진이 0.1g를 나타내는 PGA선 아래에 있음을 알 수 있다. 서울에서 1,000년간 겪을 수 있는 지반 가속도의 히스토그램을 그리면 [그림 13]과 같다.



[그림 12] R-M-PGA 상관 곡선, 지진목록 2



[그림 13] 지반 가속도 히스토그램(서울), 지진목록 2

이러한 자료들을 바탕으로 각각의 지진 목록에 대하여 서울 지역에서 일정기간 동안 10%의 초과 확률을 갖는 최대 지반 가속도를 구하면 표 3과 같다. 표 3을 보면 지진 목록에 따라 최대 지반 가속도가 현저히 다른 값을 보임을 알 수 있다.

[표 3] 초과 확률에 따른 최대 지반 가속도

	지진목록 1	지진목록 2	지진목록 3
50년 10%	0.15 g/0.09	0.49 g	0.12 g
100년 10%	0.28 g/0.12	0.72 g	0.18 g
250년 10%	0.46 g/0.16	1.26 g	0.26 g
500년 10%	0.70 g/0.80	2.03 g	0.33 g

5. 결 론

본 연구에서는 3 종류의 역사지진 목록을 세기별 발생빈도, 규모별 누적 빈도, 지역별 연간 지진발생률 분포도의 측면에서 비교 검토한 후 그 결과를 바탕으로 하여 한반도의 연간 지진발생률을 지리적인 위치에 따라 구하였다. 지진목록에 따라 연간 발생률 뿐만 아니라, 규모별 누적 빈도, 지리상의 위치에 따른 발생빈도가 서로 매우 상이함을 볼 수 있었다.

또한, 역사지진 목록이 주어졌을 때 역사지진의 분포를 따르는 향후 지진의 진앙 위치 및 지진 규모 산정을 위한 방법을 제시하였고, 그에 따라 각각의 목록에 대하여 앞으로 발생할 1,000년간의 지진의 진앙 위치 및 규모를 산정하였다. 이러한 자료를 바탕으로 하여 서울에서 일정기간에 초과확률 10%를 갖는 최대지반가속도를 구하였을 때 지진 목록에 따라 매우 상이한 결과를 보여줌을 알 수 있다.

역사지진 목록을 바탕으로 내진 설계 기준이 만들어지고, 구조물이 설계된다는 측면에서 볼 때, 지진목록에 따른 이러한 차이는 내진 설계 기준 산정의 불확실성을 높여주게 된다. 또한 과거 지진 목록을 바탕으로 하여 구조물의 위험도 평가를 실시하게 되는데, 아직 일반적으로 받아들여지는 역사지진 목록이 없어 신뢰성 있는 구조물의 위험도 평가가 어렵다. 그러므로 모든 연구자에 의해 일반적으로 받아들여질 수 있는 역사 지진목록의 작성이 중요하다 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, "내진설계기준연구(II)", 1997. 12.
2. 이기화, 이태국 "서울 수도권 일원의 지진위험 분석(I)", 한국 지진공학회 논문집 제1권 제4호, PP. 29-35, 1997.12
3. Ang, Tang "Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol II. Decision, Risk, and Reliability", John Wiley & Sons, 1975
4. Chin-Hsun Yeh "Modeling of Nonstationary Earthquakes Ground Motion and Biaxial and Torsional Response of Inelastic Structures", UIUC, Jan. 1991
5. Dimitris F. Eliopoulos, Y.K. Wen "Method of Seismic Reliability Evaluation for Moment Resisting Steel Frames", Civil Engineering Structural Research Series No. 562, UIUC, Jan. 1991
6. S.G. Kim, F. Gao, "Korean Earthquake Catalogue", The Seismological Institute, Hanyang University, 12/1995
7. Taiki Saito, Y.K. Wen "Seismic Risk Evaluation of R.C. Buildings in Japan Designed in Accordance with 1990 AIJ Guidelines", Civil Engineering Structural Research Series No. 587, UIUC, Jan. 1994
8. Y.K. Wen and C.L. Wu "Generation of Ground Motions for Mid-America Cities", Mid-America Earthquake Center, 1999