

점진원 모델을 이용한 한반도내의 인공지진 생성 Artificial Earthquakes Generation in Korean Peninsular using point source model

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

ABSTRACT

This study introduces a method to generate artificial earthquakes in Korean Peninsular using historical earthquake catalogues and point source model. For this purpose, three earthquake catalogues compiled by different researchers are compared to each other. And epicenters and magnitudes of future earthquakes are generated based on those catalogues. In generating ground motion acceleration, point source model proposed by Boore and Atkinson was adopted. Parameters of the model for South-Eastern part of Korean Peninsular was proposed by Noh and Lee. From the epicenters, magnitudes, and ground motion models, possible earthquakes for 50,000 years are generated. Using these generated earthquakes ground accelerations and uniform hazard response spectra (UHRS) having 2%, 5%, and 10% exceedance probability in 50 years are proposed.

1. 서 론

지진 발생에 의해 구조물의 각 부재에 작용하는 하중을 구하기 위한 목적으로 응답스펙트럼 해석법 및 동적 해석법 등을 사용한다. 이러한 해석시 사용하는 지반 운동 가속도 및 설계응답스펙트럼 등은 해석하고자 하는 구조물이 위치한 지역에서 발생할 수 있는 지진의 규모 및 빈도, 거리에 따른 감쇄 특성, 지반 조건에 따른 증폭 효과 등을 반영할 수 있어야 한다. 지진 빈도가 높은 지역에서는 측정된 지진 기록을 바탕으로 하여 신뢰성 있는 설계 응답스펙트럼 및 지반 가속도 기록을 사용할 수 있지만 국내와 같이 지진 빈도가 낮고, 계기로 측정된 지반운동 가속도 기록이 많지 않은 지역에서는 유사한 지반 조건을 갖는 다른 지역의 지반 운동을 이용하거나 인공적으로 지반운동 가속도 기록을 생성하여 사용한다.

구조물의 신뢰성 및 지진 위험도 평가를 목적으로 한 인공지반운동을 생성하기 위한 연구는 여러 연구자에 의해 진행되어 왔다. Katayama(1982)는 일본에서 측정된 277개 지반 운동 응답 스펙트럼의 회귀분석을 바탕으로 하여 가속도 응답 스펙트럼 예측 모델을 제안하였다. Yeh(1989), Eliopoulos(1991), Saito(1994) 등은 지반운동을 시간영역에서의 지반 가속도 진폭의 포락선을 나타내는 강도함수(Intensity Function), 각 주기별 에너지 분포를 나타내는 Kanai-Tajimi Filter 및 Clough-Penzien Filter (KT-CP filter), 시간에 따라 각 주파수별 에너지 분포의 변화를 나타내는 주파수 변조 함수(Frequency modulation function) 등을 이용하여 생성하였다. 미국 중부 지진센터에서는(Mid-America Earthquake Center, 1999) 확률론적인 기법을 도입하여 미국 중부지역에서 50년간 초과확률 2%, 5%, 10%를 갖는 지진을 생성하였다. 이것은 과거에 발생한 지진의

* 한양대학교 건축공학과 연구원

** 정회원 · 한양대학교 건축공학과 조교수

진앙 위치 및 규모를 바탕으로 각 위도, 경도에서의 연간 지진 발생률을 구한 후 규모 8 미만의 지진에 대해서는 Atkinson과 Boore(1995)가 제시한 점진원 모델, 8 이상의 지진에 대해서는 Johnston(1996)의 유한단층 모델을 적용하여 지반 운동을 생성하였다.

본 연구에서는 미국 중부 지진연구센터에서 사용한 방법을 이용하여 국내에서 발생한 역사 지진과 점진원 모델을 바탕으로 한반도에서 50,000년 동안 발생할 수 있는 지반 운동 가속도 기록을 생성하였다. 그리고, 이를 바탕으로 하여 서울에서 50년간 초과확률 2%, 5%, 10%를 갖는 지반운동 가속도 기록과 Uniform Hazard Response Spectra(UHRS)를 생성하였다.

2. 역사 지진 기록

본 연구는 역사지진 기록을 바탕으로 하여 앞으로 발생할 지진의 진앙 위치 및 규모 등을 산정한다. 하지만 역사지진 자료는 역사 문헌에 기록된 지진에 관한 자료를 분석하여 연구자가 진앙의 위치 및 규모 등을 결정하는 것이다. 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. 본 연구에서는 정리된 역사지진 목록의 차이점 등을 분석하기 위해 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 판단된다. 그리고 세 지진 목록 중 지진목록 1과 3은 지진의 크기를 MM진도로 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.

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

지진 자료를 분석해 보면 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 발생빈도를 비교하더라도 세 지진목록 모두에서 조선 중기의 지진활동이 상대적으로 활발했음을 보여준다. 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. 조선시대(1392~1910)에 발생한 지진의 규모에 대한 누적발생빈도는 모든 지진목록이 거의 직선 관계가 성립된다. 이 사실로부터 조선시대의 역사기록은 규모 5이상에 대하여 거의 완전하게 서술되었음을 알 수 있다. 그러나 조선시대 이전의 역사기록이 작은 규모의 지진에 대하여 상당수 누락되어 있음을 알 수 있다. 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.

역사지진목록을 바탕으로 하여 한반도의 연간 지진 발생빈도를 구하였다. 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 평활화 한 후 그래프로 나타내면 [그림 2, 3, 4]와 같다. [그림 2, 3, 4]를 보면 각 격자당 연간 지진 발생률의 전체적인 규모가 상당한 차이가 있을 뿐만 아니라 최대값으로 정규화시켜 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 된다. 하지만 지진 목록 자체가 연구자에 따라 많은 차이를 보이기 때문에 신뢰성 있는 지진 하중 산정을 위해서는 객관적이고 통일된 지진 목록의 작성이 필요하다고 판단된다.

3. 지진의 위치 및 규모 산정

3.1 진앙의 위치 산정

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

$$P(x_i) = P((i-1)N_C + j) = \frac{R_{ij}'}{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{m=1}^{N_C} R_{ij}'} \quad (3)$$

$$C(x_i) = \sum_{i=1}^{x_i} P(i) \quad (4)$$

여기서

x_i : 좌표상의 각 격자점(i, j)에 대한 인덱스

$P(x_i)$: 격자점 x_i 에서의 지진연간발생률의 확률밀도함수

$C(x_i)$: 격자점 x_i 에서의 지진연간발생률의 누적확률분포함수

N_C : 전체 열의 수 (=81)

N_R : 전체 행의 수 (=111)

0에서 1사이의 균등하게 분포한 난수를 발생시킨 후 식

(4)에서 그러한 값을 갖는 x 를 수치적인 방법을 이용하여

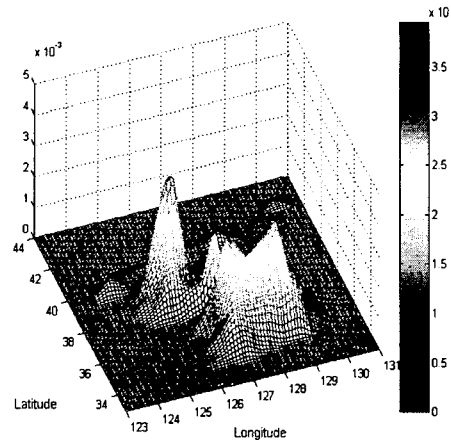


그림 1. 지진목록 1에 따른 연간 발생률

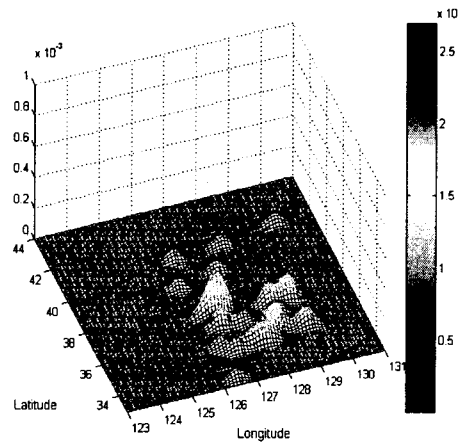


그림 2. 지진목록 2에 따른 연간 발생률

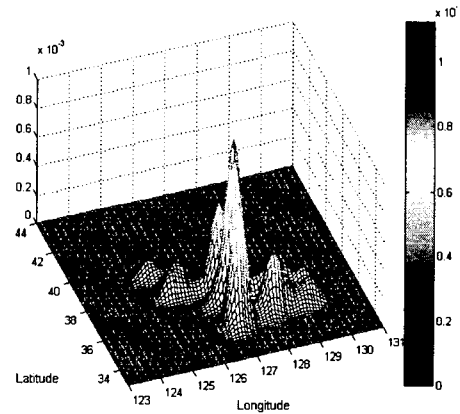


그림 3. 지진목록 3에 따른 연간 발생률

구하고, 그 x 값을 열과 행의 인덱스로 변환하면 [그림 1, 2, 3]의 지진의 연간 발생률을 따르면서 임의로 생성된 지진의 진앙지를 구할 수 있다.

3.2 지진의 규모 산정

임의로 발생시킨 지진의 규모를 산정하기 위하여 지진 규모 M_i ($i = 1, 2, 3, \dots, k$)는 통계적으로 독립이라는 가정을 하였다. 그러므로 한 번 발생한 지진의 규모는 다음에 발생할 지진의 규모에는 영향을 미치지 않는다. 지진의 규모는 규모별 지진 발생 빈도를 식(2)의 Gutenberg-Richter 식에 따르는 분포로 발생한다고 가정한다. Gutenberg-Richter식의 확률누적분포함수(CDF)는 식(5)와 같다.

$$F_M(m) = 1 - N(m)/N_0, \quad N_0 = N(M_0) \quad (5)$$

0과 1사이의 난수를 발생할 지진의 수 만큼 생성시킨 후 식(5)의 확률누적 분포함수를 이용하여 지진의 규모를 산정하였다. 이러한 방법으로 진앙의 위치 및 지진의 규모를 산정하여 앞으로 발생할 1,000년간의 지진을 지도에 나타내 보면 [그림 4]와 같다. 지진목록에 의한 역사지진 [그림 5]와 비교해 보면 진앙의 분포가 유사함을 알 수 있다.

4. 점지진원 모델

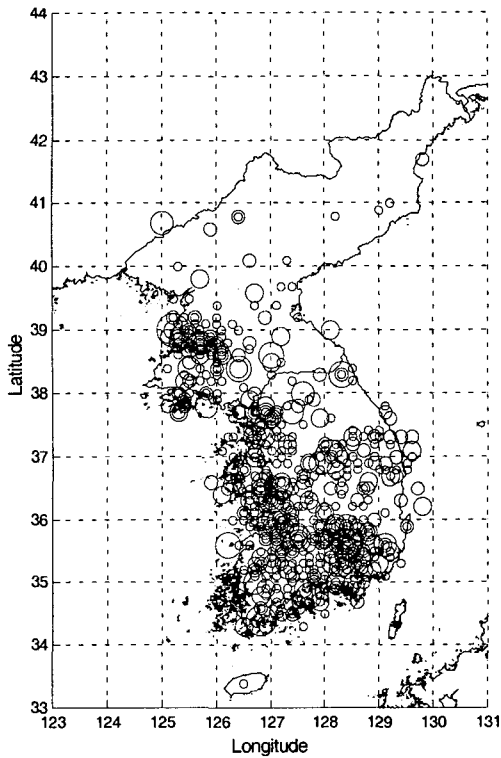


그림 4. 생성된 지진의 진앙위치 및 규모
기간: 1000년 (지진목록 1)

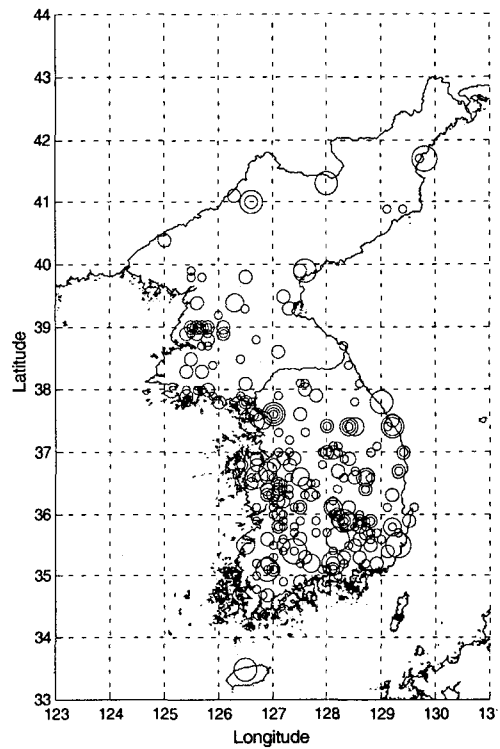


그림 5. 기록된 지진의 진앙위치 및 규모
AC 1392~1904 (지진목록 1)

앞에서 생성한 지진의 진앙 위치 및 규모로부터 지반 가속도 기록을 생성해내기 위해 본 연구에서는 Boore(1983)에 의해 처음 개발되었고 Boore와 Atkinson(1987)이 다시 수정한 지반 운동 모델을 적용하였다. 모델 파라미터들은 Noh와 Lee(1995)가 한반도 남동부 지역에 대하여 제안한 값들을 사용하였다. 지반운동 생성을 위한 프로그램은 이러한 모델을 바탕으로 Boore(2000)가 작성한 지반운동 생성 프로그램인 SMSIM ver 2.00을 사용하였다.

4.1 점지진원 모델

점지진원 모델의 푸리에 진폭 스펙트럼의 수학적 형태는 식(6)과 같다.(Boore and Atkinson, 1987) 점지진원 모델의 파라미터는 지역에 따라 서로 다른 값들을 갖는다. 본 연구에서는 Noh와 Lee(1995)가 한반도 남동부 지역에 대하여 제안한 파라미터들을 한반도 전체에 대하여 적용 가능하다고 가정하였다. Boore와 Atkinson (1987)의 지반 운동 모델은 지진의 모멘트 규모를 이용하도록 되어 있으나 역사 지진의 규모에 대한 구체적인 자료가 부족하기 때문에 정리된 역사 지진의 규모는 모멘트 규모와 일치한다고 가정하였다.

SMSIM Ver 2.00은 이러한 지반운동의 수학적 모델을 이용하여 인공지진을 생성할 수 있도록 작성된 프로그램으로, 모델 파라미터를 입력 데이터로 사용하면 인공으로 생성된 지진의 응답스펙트럼, 시간이력 데이터 등을 출력한다.

$$A(f) = C \cdot S(f) \cdot D(f) \cdot I(f) \quad (6)$$

여기서, $A(f)$: Fourier amplitude spectrum

C : scaling factor

$S(f)$: source spectral function

$D(f)$: diminuation function

$I(f)$: type of motion being computed

4.2 지반운동 모델 파라미터의 검증

Noh와 Lee(1995)가 제안한 지반운동 파라미터를 이용하여 SMSIM 입력 데이터를 작성하였고, 이를 이용하여 인공 지반 운동을 생성한 후 실제의 지진에서 기록된 지반 가속도의 응답 스펙트럼과 비교해 보았다. 대상 지진은 1996년 12월 13일 발생한 영월 지진으로 진앙지와 지진을 측정된 관측소는 그림 6과 같다.

대상 지진

지진명 : 영월지진

발생일 : 96/12/13 13:10:16.91

진 양 : 위도 37-15.11, 경도 128-42.68

모멘트규모: 4.3 (박창업 2000)

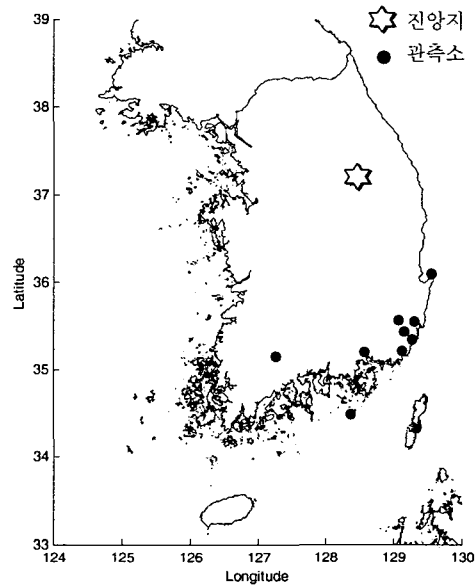


그림 6. 영월지진의 진앙지 및 관측소

Noh와 Lee(1995)의 지반운동 모델 파라미터와 영월 지진의 모멘트 규모, 진앙 거리를 입력하여 SMSIM프로그램으로 지반 운동 기록을 생성한 후 응답스펙트럼을 작성하였다. 각각의 관측소에 대하여 200개의 지반 운동을 생성시킨 후 평균 응답 스펙트럼을 작성하였다. 이를 실제 관측소에서 측정된 지반 운동 기록의 응답 스펙트럼과 비교하여 보았다. 관측소 지역에서의 국지적인 지반 증폭효과를 고려하기 위해서는 해당 지역의

깊이에 따른 전단파 속도 및 지각 밀도 등의 데이터를 이용하여 지반의 동적 해석을 시행하여야 한다. 하지만 그러한 지반 데이터의 부족으로 영월 지진과의 비교에서는 국지적인 지반 증폭효과를 고려하지 않았다. 그림 7 (b), (c), (d), (e), (f)를 보면 측정된 지반 기록과 생성된 기록이 유사함을 알 수 있다. 그림 7 (a), (g), (h)와 같이 측정된 데이터와 생성된 기록간의 차이는 국지적인 지반 증폭효과에 대한 고려가 없었기 때문으로 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 Noh와 Lee(1995)의 연구로부터 산정한 지반 운동 모델의 파라미터가 우리나라 지반의 감쇠 특성 및 지진원 특성을 잘 반영한다고 가정한다.

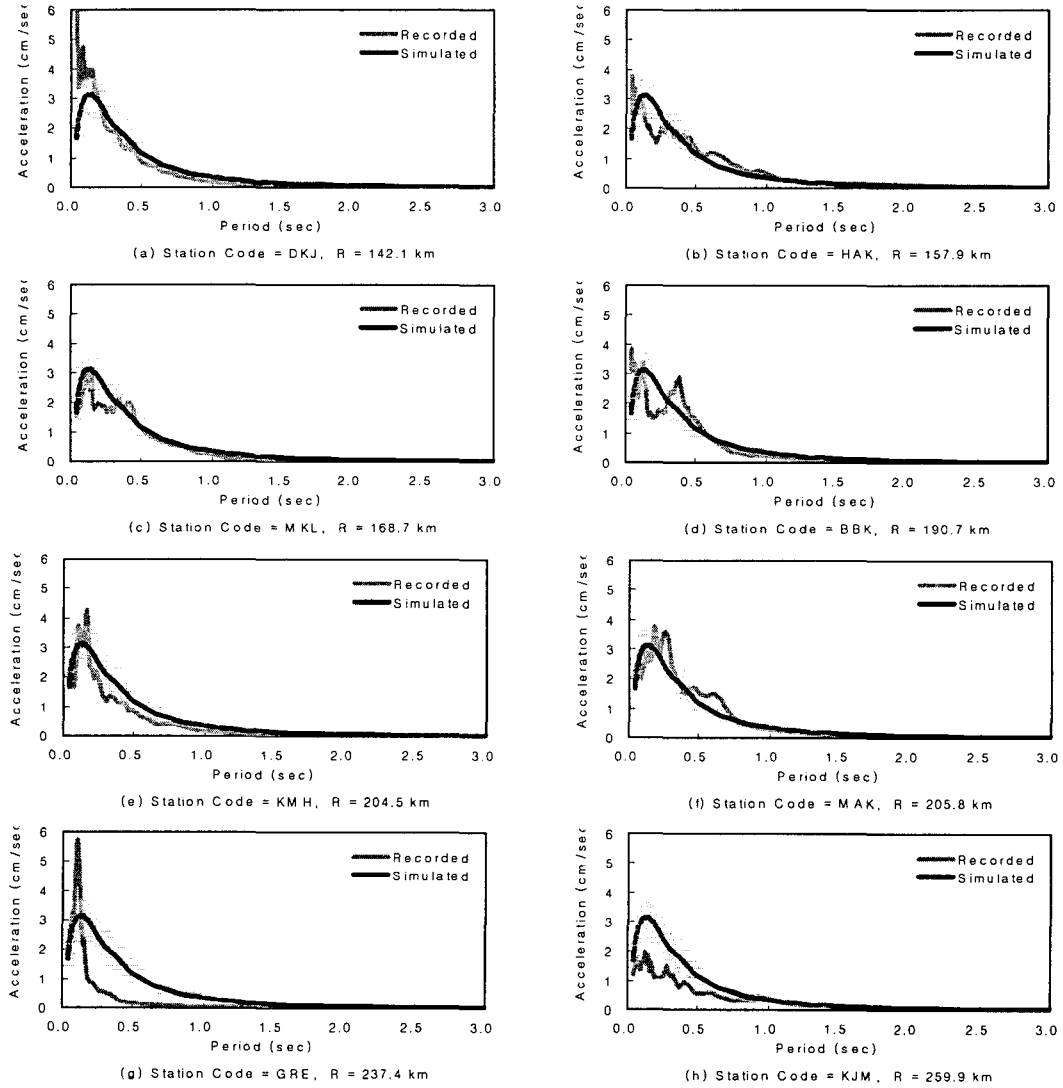


그림 7. 인공으로 지반 운동과 측정된 지반 운동의 응답스펙트럼 비교 (지진복록 1)

4.3 지반 증폭 효과

관측지에서의 깊이에 따른 지반 밀도와 전단파 속도 자료를 바탕으로 하여 진앙지에서 전파해온 지진파가 관측지의 지반조건으로 인해 증폭되는 영향을 고려하였다. 지반 증폭 효과를 고려하기 위해 SMSIM의 부프로그램인 Site_amp를 사용하였다. 지반 동특성 데이터는 천일지오컨설턴트(주)에서 지반조사를 목적으로 실시한 33곳의 데이터를 활용하였다.

4.4 서울의 지반운동 기록 및 UHRS의 생성

앞에서 제시한 지진의 진앙 위치, 규모 산정 방법 및 국내 지반의 지진원, 지진파 감쇄 특성, 지반종류(SA~SE)별 증폭효과 등을 고려하여 인공지반 운동을 생성하였다. 지진목록 1을 바탕으로 50,000년간 한반도에서 발생할 지진의 수는 각각 34,502회이고 이 중 서울로부터 반경 300km 이내에서는 31,551회의 지진이 생성되었다. SMSIM의 부프로그램인 td_drvr를 이용하여 서울지역에서 발생할 수 있는 지반 운동 가속도 기록을 31,551개 생성하였다.

td_drvr에 의해 생성한 지반 운동으로부터 각각의 지역에 대하여 Uniform Hazard Response Spectra (UHRS)를 생성하였다. UHRS를 생성하기 위해 각 지진의 응답 스펙트럼을 바탕으로 하여 spectral acceleration의 50, 100, 250, 500, 1000년간의 최대치들을 각각 구한 후 Type II 극한치 모델을 적용하였다. UHRS는 모드 중첩법을 이용하여 선형 시스템의 성능을 평가하는데 사용될 수 있다. 비선형 시스템의 성능을 평가하기 위해서는 시간이력 해석이 필요하므로 각각의 확률수준에 해당하는 지반 가속도 기록을 10개씩 선정하였다. 지반 가속도 기록의 중간값(median)과 UHRS의 편차가 가장 작아지도록 하기 위해 0.04초~15초 사이의 91개의 주요 주기에서 응답 가속도 차이의 로그값 제곱의 평균(mean square logarithmic difference)이 최소가 되도록 지반 운동을 선택하였다. 이러한 방법으로 응답 가속도를 맞추어 나가는 것이 확률론적 비선형 해석을 수행하기 위해 지반운동을 선택하는 방법 중 가장 효과적인 것이다. (Shome, Cornell, 1999)이 밝혔다. 서울의 지반종류(SA~SE)에 따른 지진목록 1에 근거한 UHRS와 건설교통부 내진설계기준Ⅱ에 같은 지역에 대하여 제시된 설계응답스펙트럼은 그림 8과 같다. 마찬가지로 방법으로 지진목록 2를 이용하여 UHRS를 산정하였다.

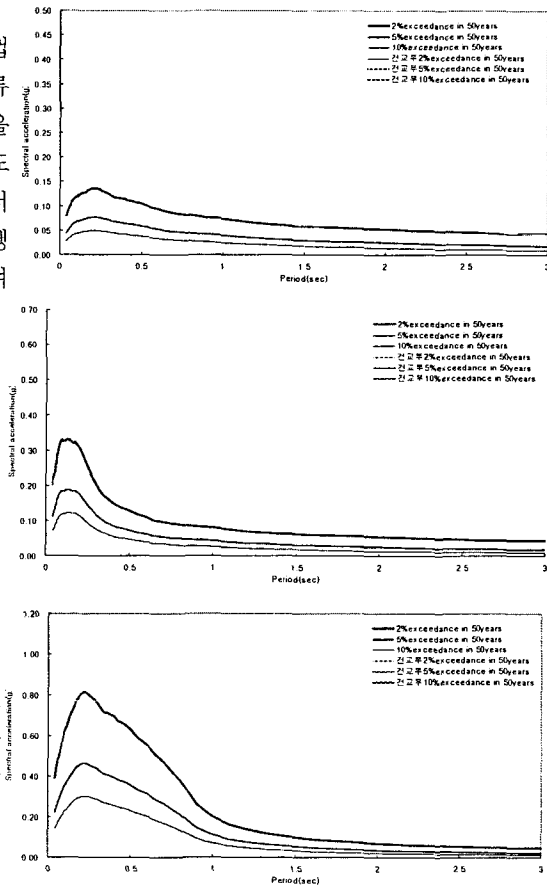


그림 8. SA 지반에서의 UHRS, 상부에서부터 지반조건 SA, SC, SE (지진목록 1)

5. 결 론

본 연구에서 한반도의 지리적 위치에 따른 지진의 진앙 위치 및 규모를 산정하는 방법을 제시하고, 50,000년간의 지진 목록을 생성시킨 후 이를 바탕으로 하여 한반도의 지진 재해도를 작성하였다. 진앙 거리 및 지진의 모멘트 규모에 따른 지반 운동의 전파는 Atkinson과 Boore(1987, 1995)을 이용하여 Noh와 Lee(1995)가 한반도 남동부 지역을 대상으로 산정한 파라미터를 이용하였다. 지반 운동의 국지적인 증폭효과를 고려하기 위하여 제한적인 숫자이지만 지반 깊이에 따른 전단파 속도 및 지각 밀도의 자료를 이용, 지반을 분류(SA~SE)하여 서울지역을 대상으로 UHRS를 작성하였다.

생성된 UHRS를 건설교통부 내진설계기준Ⅱ에 의한 설계응답스펙트럼과 비교해 본 결과 지진목록 1에 의한 UHRS는 설계 응답 스펙트럼보다 다소 작은 값을, 지진목록 2에서는 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 역사지진 목록을 어떠한 것을 사용하느냐에 따라 생성된 지반운동의 규모가 크게 달라짐을 알 수 있다. 그러므로 일반적으로 받아들여질 수 있는 객관적인 역사지진 목록의 표준안을 제시하는 것이 바람직하다.

지반 깊이에 따른 전단파 속도 및 지각 밀도에 대한 자료 부족으로 본 연구에서 제시한 결과들은 제한적인 숫자의 지반데이터를 토대로 국지적인 증폭효과를 고려하였다. 따라서 보링 조사를 통한 지역별 지반 동특성에 대한 자료가 충분히 제공된다면 지반 종류에 따른 증폭효과를 합리적으로 반영할 수 있으므로 보다 신뢰성 있는 인공 지반 운동을 생성할 수 있을 것이다.

우리나라는 아직 지반운동 데이터가 절대적으로 부족한 상황이나 지진의 안전지대라고 확신할 수 없다. 따라서 구조물의 내진해석 및 손상도 평가 등을 위해 인공적으로 생성된 지진기록을 사용한다면 지진에 대한 구조물의 신뢰성 확보에 많은 도움이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 초애형구조시스템 연구센터의 지원으로 수행된 과제로 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, "내진설계기준연구(Ⅱ)", 1997. 12.
2. Cornell, C.A. "Engineering Seismic Risk Analysis," Bull. Seis. Soc. A., Vol.58, pp. 1583-1606, 1968
3. Chin-Hsun Yeh "Modeling of Nonstationary Earthquakes Ground Motion and Biaxial and Torsional Response of Inelastic Structures", UIUC, Jan. 1991
4. 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
5. Noh, M., and Lee. K., "Estimation of Peak Ground Motions in the southeastern Part of the Korean Peninsula (I): Estimation of Spectral Parameters", Jour. Geol. Soc. Korea, 30, 297-306, 1994
6. Noh, M., and Lee. K., "Estimation of Peak Ground Motions in the southeastern Part of the Korean Peninsula (II): Development of Predictive Equations", Jour. Geol. Soc. Korea, 31, 175-187, 1995
7. S.G. Kim, F. Gao, "Korean Earthquake Catalogue", The Seismological Institute, Hanyang University, 12/1995
8. 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
9. Y.K. Wen and C.L. Wu "Generation of Ground Motions for Mid-America Cities", Mid-America Earthquake Center, 1999