

## 국내 확률론적 지진계수 생성

### Development of Probabilistic Seismic Coefficients of Korea

곽 동 엽<sup>1</sup> Kwak, Dong-Yeop

정 창 균<sup>2</sup> Jeong, Chang-Gyun

박 두 희<sup>3</sup> Park, Duhee

이 홍 성<sup>4</sup> Lee, Hong-Sung

#### Abstract

The seismic site coefficients are often used with the seismic hazard maps to develop the design response spectrum at the surface. The site coefficients are most commonly developed deterministically, while the seismic hazard maps are derived probabilistically. There is, hence, an inherent incompatibility between the two approaches. However, they are used together in the seismic design codes without a clear rational basis. To resolve the fundamental incompatibility between the site coefficients and hazard maps, this study uses a novel probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) technique that simulates the results of a standard PSHA at a rock outcrop, but integrates the site response analysis function to capture the site amplification effects within the PSHA platform. Another important advantage of the method is its ability to model the uncertainty, variability, and randomness of the soil properties. The new PSHA was used to develop fully probabilistic site coefficients for site classes of the seismic design code and another sets of site classes proposed in Korea. Comparisons highlight the pronounced discrepancy between the site coefficients of the seismic design code and the proposed coefficients, while another set of site coefficients show differences only at selected site classes.

#### 요 지

지진계수는 지진재해도 함께 지표면에서의 설계응답스펙트럼을 생성하는데 사용된다. 지진계수는 일반적으로 결정론적인 방법으로 도출되는 반면 지진재해도는 확률론적으로 계산되어 이들은 혼용될 수 없으나, 국내외 내진설계기준에서는 이들을 명확한 근거없이 혼용하고 있다. 이와 같은 근본적인 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 기존의 지진재해분석과 암반노두에서는 동일한 결과를 재현하되 지반응답해석 기능을 추가하여 토층에서의 부지증폭현상을 고려한 확률론적인 지진계수를 도출할 수 있는 新 지진재해분석 기법을 적용하였다. 新 지진재해분석 기법의 또다른 장점은 지반의 불확실성과 임의성을 합리적으로 고려할 수 있다는 점이다. 본 연구에서 계산된 확률론적 지진계수는 내진설계기준(II)과 국내에서 제안된 지진계수 세트들과 비교하여 차이점을 분석하였다. 비교 결과, 내진설계기준(II)과는 현격한 차이가 있는 반면, 또다른 지진계수와는 일부 지반분류에서만 차이가 나는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Design response spectrum, Probabilistic seismic hazard analysis, Seismic hazard map, Seismic site coefficients, Site response analysis, Uniform hazard response spectrum

1 한양대학교 건설환경공학과 포스트석사 (Post-master, Dept. of Civil and Env. Engrg. Hanyang Univ.)

2 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Env. Engrg. Hanyang Univ.)

3 정희원, 한양대학교 건설공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Env. Engrg. Hanyang Univ., dpark@hanyang.ac.kr, 교신저자)

4 정희원, 현대건설 기술연구소 책임연구원 (Member, Hyundai Engrg. & Construction, Senior Researcher)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

확률론적인 지진재해분석(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis)은 Cornell(1968)에 의해서 최초로 제안된 후 이후 많은 수정과 보완을 거쳐서 현재 전세계적으로 지진재해예측에 가장 널리 사용되는 방법이다. PSHA는 지진원, 전파경로, 부지효과 등의 불확실성을 고려할 수 있으며 특정 기간내에 특정 크기를 초과하는 지진동이 부지에 발생할 확률을 예측한다. PSHA의 결과물은 특정 지진위험도(지진의 재현주기 또는 연간초과확률)에 대한 설계지반운동변수이며 결과는 지진재해도로 나타낸다. 일반적으로 PSHA는 부지효과를 포함하지 않으며 암반노두에서의 설계지반운동변수만을 계산한다. 국내의 지진재해도는 7개의 지진 재현주기에 대한 보통암 노두(지반분류: S<sub>B</sub>)에서의 PGA 분포를 나타낸다(건교부, 1997). PGA는 지진구역계수와 위험도계수로 정의할 수도 있다(건교부, 1997).

PSHA로부터 결정된 설계지반운동변수는 내진설계기준에 의거하여 암반노두에서의 설계응답스펙트럼을 생성하는데 사용된다. 지반이 암반이 아니라 토층인 경우에는, 지진파가 일반적으로 크게 증폭되기 때문에 암반노두에서 정의된 설계응답스펙트럼을 사용할 수 없다. 국내외 모두에서 토층에 의한 지진파의 증폭 정도는 지진계수로써 정량화한다(IBC, 2000; 건설교통부, 1997). 지진계수는 확률론적으로 결정된 암반노두 설계응답스펙트럼에 상응하는 지진파들을 입력지반운동으로 사용하여 이들에 대한 포괄적인 지반응답해석을 수행한 후, 해석결과를 기반으로 부지효과를 정량화하여 계산된다(Borcherdt, 1994). 이와 같이 계산된 지진계수의 문제점은 결정론적인 방법으로 도출된 지진계수와 확률론적인 프레임워크에서 개발된 지진재해분석 결과가 혼용되고 있다는 점이다. 이들이 상호호환되기 위해서는 지진계수가 PSHA와 동일하게 확률론적인 기반에서 결정되어야 하나, 이를 기존의 PSHA 기법으로는 계산할 수 없다.

본 연구에서는 PSHA와 지반응답해석을 융합한 新 PSHA 기법을 적용하여 내진설계기준(II) 맞춤형 확률론적인 지진계수를 도출하였다. 지반의 불확실성과 임의성은 구축된 국내의 지반조사자료 데이터베이스로써 모델링되었다. 새롭게 유도된 지진계수는 결정론적으로 생성된 내진설계기준(II)와 또다른 지진계수 세트와 비교하여 이들 간의 차이점을 분석하였다.

# 2. 新 PSHA

PSHA 기법으로 지진재해도를 생성하는 과정은 그림 1과 같이 총 5개의 단계로 나눌 수 있다. 1단계에서는 지진재해도를 생성할 대상지역을 일정한 크기의 격자로 분할한다. 2단계에서는 각 격자의 지진활동도(seismicity)를

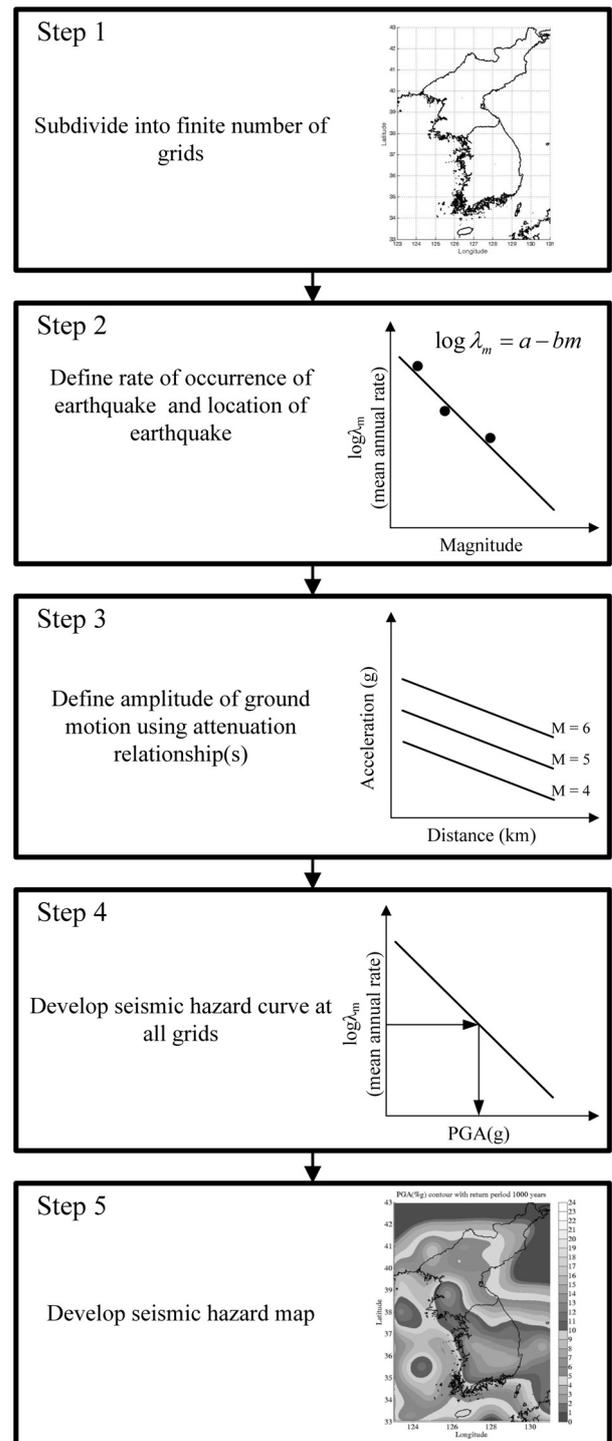


그림 1. PSHA 순서도

정의한다. 지진활동도는 일반적으로 다음과 같이 정의되는(Gutenberg와 Richter, 1944)의 관계식(G-R)로써 정의한다:

$$\log \lambda_m = \log \frac{n_m}{T} = a - bM \quad (1)$$

여기서  $M$  = 지진규모,  $\lambda_m = M$  이상의 지진이 연간 발생할 확률,  $n_m =$  규모  $M$  이상 지진이 시간  $T$  동안 발생한 횟수,  $a$ 와  $b =$  G-R 상수이다. 3단계에서는 지반진동 크기와 지진규모( $M$ )-이격거리( $R$ )의 관계를 나타내는 감쇠공식(attenuation relationship)을 정의한다. 4단계에서는 다음의 식을 이용하여 지반운동변수(ground motion parameter)의 연간초과확률을 계산한다:

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} \frac{n_i^{ref}}{T} P[Y > y^*] P[M = m_j] P[R = r_k] \quad (2)$$

여기서  $\lambda_{y^*}$ 은 연간 지반운동변수  $Y$ 가  $y^*$ 를 초과할 확률,  $P[M=m_j]$ 는 지진규모  $m_j$ 가 발생할 확률,  $P[R=r_k]$ 은 지진원과 부지와 이격거리가  $r_k$ 일 확률,  $P[Y>y^*]$ 는 규모  $m_j$  - 이격거리  $r_k$  지진에 의하여 발생하는 진동  $Y$ 의 크기가  $y^*$ 을 초과할 확률이다.  $P[M=m_j]$ 은 식 (1)로 계산되며,  $P[Y>y^*]$ 는 감쇠공식으로 계산된다. 위의 방법으로 다양한  $y^*$ 에 대한 연간초과확률을 구한 후 지반운동변수 크기 - 연간초과확률 관계를 곡선화한 것이 지진재해곡선이다. 지진재해곡선을 대상 지역의 모든 격자에서 계산한 후, 특정 재현주기에 대한 지반운동변수의 크기를 등고선으로 나타낸 것이 확률론적인 지진재해도이다(5 단계).

新 PSHA 기법은 기존의 PSHA와 암반노두에서는 근본적으로 동일한 결과를 예측하지만, 계산과정은 다음과 같이 두가지 측면에서 차별화된다.

1. 新 PSHA는 G-R 관계식으로부터 지진규모별 발생 확률을 적용하는 것이 아니라 G-R에 상응하는 지진을 유한기간내에 생성한다.
2. 감쇠공식만으로 지반운동변수의 크기를 예측하는 것이 아니라 지진 시나리오에 상응하는 인공지진 기록을 생성한다.

新 PSHA은 총 7단계로 수행되며 Step 1 - Step 3까지는 기존의 PSHA와 동일하다(그림 1). Step 4에서는 G-R에 상응하는 지진을 유한기간내에 다음과 같이 생성한다. 먼저, 모든 격자에서 0~1 사이의 균등분포하는 임의의 숫자  $u_k$ 를 생성한다. 생성된 임의의 숫자로서 단위

기간 중 격자내에서 발생한 지진 발생횟수를 다음과 같은 식으로서 정의할 수 있다(Wen과 Wu, 2001):

$$\sum_{X=0}^{n_k-1} \frac{(t\lambda_k)^X}{X!} e^{-t\lambda_k} < u_k \leq \sum_{X=0}^{n_k} \frac{(t\lambda_k)^X}{X!} e^{-t\lambda_k} \quad (3)$$

여기서  $t$  = 시뮬레이션 기간(본 연구에서는 10년),  $\lambda_k =$   $k$ 번째 격자의 연간지진발생률,  $u_k = 0 \sim 1$  사이에 균등분포하고 있는 임의숫자,  $n_k =$  단위기간 중 발생한 지진횟수이다. 식 (3)은  $u_k$ 를 CDF(cumulative distribution function)이라고 가정하며, 지진의 발생은 Poisson process에 순응한다고 가정하여 계산되었다(Wen과 Wu, 2001). 참고로 지진 발생이 Poisson process을 따른다고 가정하였을 경우, 특정 규모의 지진이 일정기간  $t$  동안에  $n$ 번 발생할 확률은 다음과 같이 계산된다(Kramer, 1996):

$$P[N = n] = \frac{(t\lambda)^n e^{-t\lambda}}{n!} \quad (4)$$

계산된 지진발생횟수로 다음의 식을 이용하여 지진 규모를 결정할 수 있다(Wen과 Wu, 2001).

$$M = m_0 - \frac{1}{\beta} \ln \left[ 1 - u_k \left\{ 1 - \exp(-\beta(m_{\max} - m_0)) \right\} \right] \quad (5)$$

여기서  $m_0$ 는 하한지진규모,  $m_{\max}$ 는 상한지진규모,  $\beta$ 는 G-R 상수( $2.303 \times b$ )이다. 이와 같이 충분한 수의  $t$  기간 시뮬레이션을 수행하여 모든 격자에서 충분한 수의 지진원을 생성한다.

Step 5에서는 모든 격자에서 각각 격자의 영향범위내(특정 반경으로 정의)에서 생성된 모든 지진원과의 이격거리를 계산하며 이를 통하여 지진 시나리오(지진규모-이격거리) 리스트를 완성한다. Step 6에서는 지진 시나리오에 상응하는 지진파 시간이력과 응답스펙트럼을 SMSIM(Boore, 2002)으로 생성한다. SMSIM(Boore, 2002)은 지진환경과 지진규모( $M$ ) - 이격거리( $R$ )에 상응하는 인공지진파를 생성하는 프로그램이며 미국 지진재해도 개발에 사용되었으며 철저하게 검증된 소프트웨어이다(FEMA, 1997). PSHA에서 부지효과를 고려할 경우에는 생성된 지진파에 대한 지반응답해석을 수행하면 된다.

최종 단계인 Step 7에서는 이와 같은 과정을 모든 격자에서 해석기간동안 반복하며 생성된 지진기록들에 대하여 식 (2)을 사용하여 지진재해곡선을 계산하며 이를 바탕으로 지진재해도를 계산한다. 지진재해곡선은 Step

6에서 생성된 지진파 응답스펙트럼 세트를 기반으로 계산되기에 국내 지진재해도와 같이 PGA(최대지반가속도, peak ground acceleration)에 대해서만 구할 수 있는 것이 아니라 모든 주기의 스펙트럴 가속도에 대하여 계산할 수 있다. 위의 방법은 미국 Mississippi Embayment에서 적용되어 성공적으로 이 지역의 지진재해도를 재

현하는데 성공한 바 있다(Park과 Hashash, 2005).

본 연구에서는 新 PSHA를 한반도에 적용하여 지진재해도를 생성하였다. 본 연구의 궁극적인 목적은 내진설계기준연구(II)(건설교통부, 1997) 맞춤형 지진계수를 도출하는 것이므로 지진계수의 기반이 되는 지진재해도를 내진설계기준(II)과 일치시켜야 한다. 이를 위해서는 내진설계기준연구(II)의 지진재해도와 동일한 지진활동도(G-R의 상수)와 감쇠공식을 적용해야 한다. 미국의 경우, 격자별로 G-R 상수를 공개하였으므로 지진재해도를 재현하는 데에 문제가 없는 반면 내진설계기준연구(II)(건설교통부, 1997)에서 제시한 지진재해도는 7개의 연구팀들이 각각 계산한 지진재해도를 산술적으로 평균을 내어 생성하였으며 연구자별로 적용한 지진구역 - G-R 상수에 대한 상세한 정보가 제시되지 않았으므로 이를 예측하는 데에 어려움이 있었다. 지진재해도에 상응하는 a - b를 산정하기 위한 역예측 과정은 곽동엽 등(2009)에 자세하게 설명하였다. 본 연구에서는 곽동엽 등(2009)의 방법에 의거하여 내진설계기준연구(II)(건설교통부, 1997) 맞춤형 G-R 상수를 추정하였으며, 감쇠공식은 내진설계기준연구(II)(건설교통부, 1997)에서 사용된 공식 3개 중에서 가장 적용비율이 높았던 공식 1을 사용하였다. 新 PSHA의 경우, 정확한 해석을 위하여 10년-기간 시뮬레이션을 4,000번 수행하여 40,000년 기간에 상응하는 16,378개의 가상 지진원을 생성하였다(그림 2).

SMSIM의 지진환경 변수는 Noh와 Lee(1994)가 국내 계측지진기록을 기반으로 제안한 값들을 적용하여 인

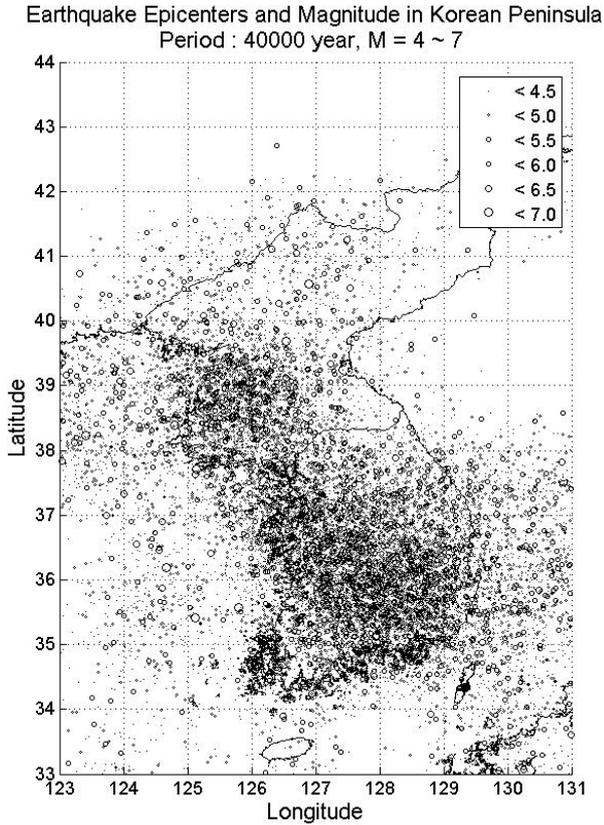


그림 2. 40,000년 기간 생성된 가상 지진 기록

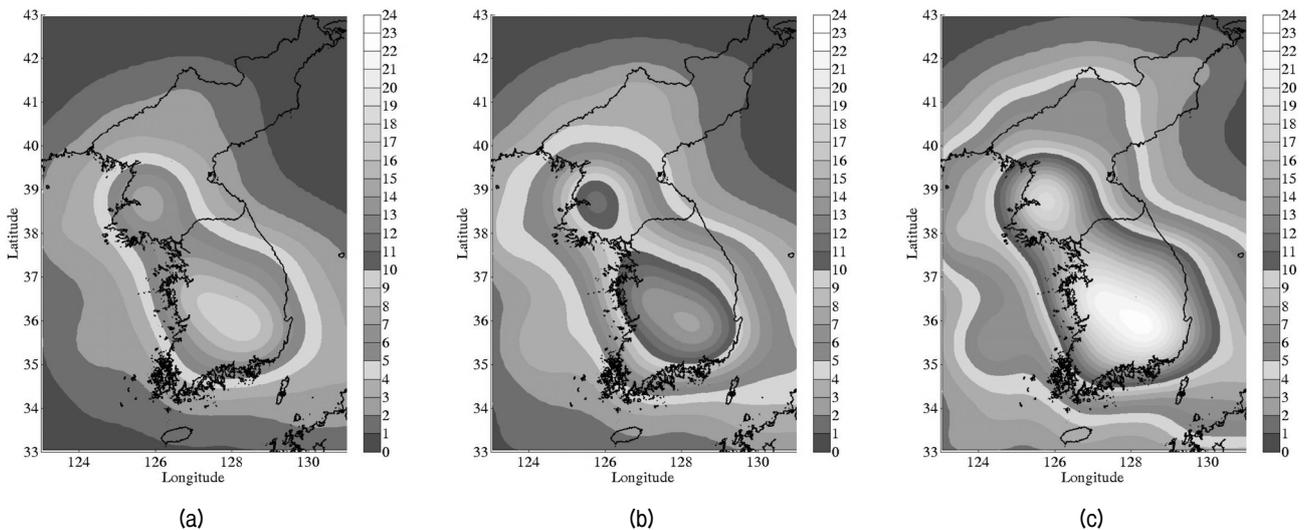


그림 3. 내진설계기준(II)의 지진재해도: 재현주기 (a) 500년, (b) 1000년, (c) 2400년

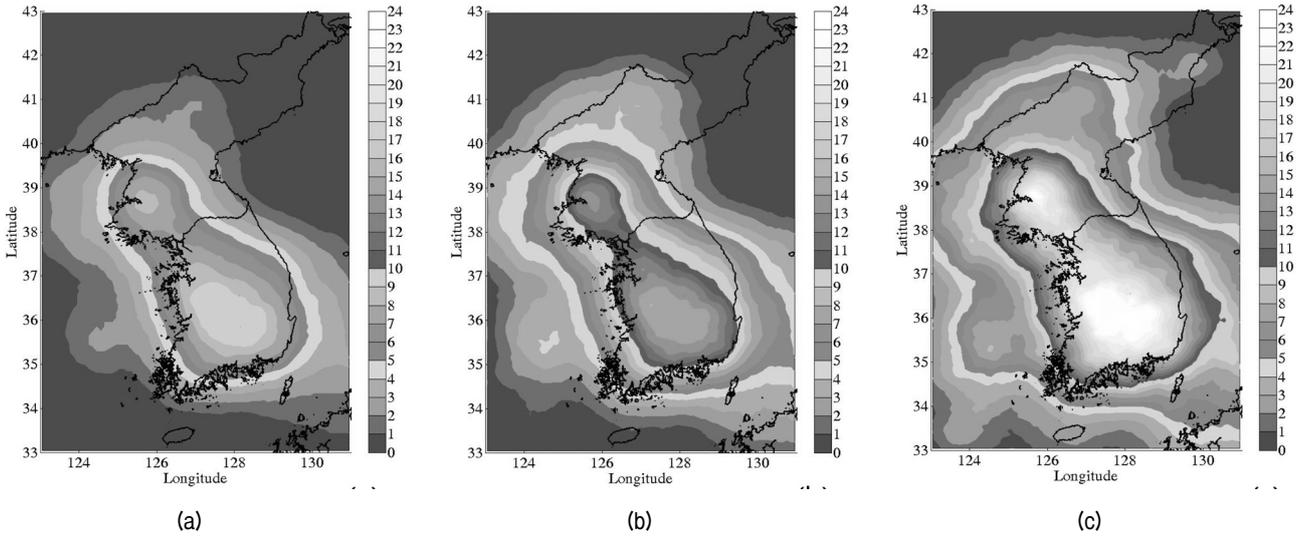


그림 4. 新 PSHA로 생성된 지진재해도: 재현주기 (a) 500년, (b) 1000년, (c) 2400년

공지진파를 생성하였다. SMSIM으로 인공지진기록의 PGA는 감쇠공식에 상응하도록 조절하였다. 그림 3은 기존의 PSHA방법으로 계산된 내진설계기준(II)의 지진재해도이며 그림 4는 新 PSHA로서 생성된 지진재해도이다. 두 가지 방법으로 각각 생성된 지진재해도는 매우 유사하며 이는 예측된 G-R 상수의 적절성과 新 PSHA의 정확성을 입증하고 있다.

### 3. 확률론적인 지진계수

유한기간내에 생성된 지진기록의 합으로 지진재해를 예측하는 新 PSHA는 전술한 바와 같이 생성된 지진기록 시간이력들로부터 원하는 모든 주기에서의 스펙트럴 가속도 지진재해곡선을 구할 수 있다. 이와 같이 계산된 다양한 주기의 지진재해곡선들로부터 특정 재현주기에 대한 스펙트럴 가속도의 분포를 계산할 수 있으며, 이를 등재해스펙트럼(UHRS, uniform hazard response spectrum)이라고 한다. 기존의 설계응답스펙트럼은 PGA 결과만을 기반으로 생성되는 반면, UHRS는 다양한 주기에서의 스펙트럴 가속도를 바탕으로 생성되기에 설계응답스펙트럼에 비하여 보다 정밀하다고 볼 수 있다.

新 PSHA의 가장 큰 장점은 부지효과를 정량화할 수 있다는 점이다. 전절에서 설명하였다시피, 新 PSHA는 암반노두에서 생성된 지진기록들을 입력지진파로 사용하여 특정 부지에 대한 지반응답해석을 수행할 수 있으며, 계산된 해석결과로부터 토층의 UHRS와 확률론적인 지진계수를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 내진설계

기준(II)와 Kim 등(2008)의 지진계수와 新 PSHA로 계산된 지진계수를 비교하였다.

#### 3.1 내진설계기준(II)와의 비교

내진설계기준(II)는 토층 상부 30m의 평균 전단파속도( $V_s$ ), SPT N치, 비배수전단강도, 그리고 지반의 특성을 고려해서 지반을 6개로 분류하였으며 지반분류별 지진계수( $C_a$ 와  $C_v$ )를 제안하였다.  $C_a$ 와  $C_v$ 는 각각 PGA와 1초 스펙트럴 가속도를 의미한다. 내진설계기준(II)은 재현주기 500년 지진에 대해서 지반분류별  $C_a - C_v$ 를 제시하였으며 이외의 재현주기에서는 위험도지수를 곱하여 계산하도록 제안하였다. 내진설계기준(II)은 직접  $C_a$ 와  $C_v$  값을 제시한 반면, 1997 NEHRP(FEMA, 1997)은 지반에 의한 증폭계수로 부지효과를 정의한다. 1997 NEHRP(FEMA, 1997)의 지진계수  $F_a$ 와  $F_v$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$F_a(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (6)$$

$$F_v(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (7)$$

여기서 RRS는 토층과 암반과의 응답스펙트럼 비율(Ratio of response spectra),  $RS_{soil}$ 과  $RS_{rock}$ 은 각각 주기  $T$ 에 대한 토층 그리고 암반노두의 스펙트럴 가속도,  $R_{soil}$  and  $R_{rock}$ 은 각각 토층과 암반 기록지점과 지진원과의 이격 거리이다. 본 논문에서  $R_{soil} / R_{rock}$ 은 1로 가정하였다.

1997 NEHRP(FEMA, 1997)의 근간이 된 Dobry 등(1994)과 Dobry 등(1999)에서  $F_a$ 은 RRS의 평균값, 그리고  $F_v$ 는 RRS의  $+1\sigma$ 를 취했다고 설명하였다. 표 1은 내진설계기준(II)의  $C_a$ 와  $C_v$ 와 NEHRP(FEMA, 1997) 기준에 상응하는  $F_a - F_v$ , 1997 NEHRP(FEMA, 1997)의  $F_a - F_v$ 를 비교하고 있다. 미국과 국내 지반과는 명확한 차이가 남에도 불구하고 지진계수는 상당히 유사한 것으로 나타났다.

본 연구에서는  $S_c$ ,  $S_D$ , 그리고  $S_E$  지반에 대한 UHRS 으로부터 새롭게 재현주기 500년 지진에 대한 확률론적인 지진계수를 계산하였다. 대상 부지는 PGA가 0.11g인 위치(36.15°, 128.95°)를 선정하여 이 부지 반경 300km 내에 생성된 지진 시나리오에 대한 지진기록을 입력지진파로 적용하여 지반응답해석을 수행하였다. 해석에 적용된 지진파는 총 851개 였다. 즉, 하나의 UHRS를 생성하는데 필요한 지반응답해석 횟수는 851회이며 1차원 등가선형해석을 수행하였다.

진정한 확률론적인 지진계수를 유도하기 위해서는 지반물성치의 불확실성과 임의성이 반영되어야한다. 대표 지층과 동적곡선을 적용하였을 경우, 이를 적절히 고려하지 못하므로 엄격한 의미의 확률론적인 지진계수라고 볼 수 없다. 본 연구에서는 지반의 불확실성과 임의성을 고려하기 위하여 지층 주상도와 동적곡선에 대한 데이터베이스를 구축하였으며 해석시 임의로 이들을 선정하도록 해석기법을 프로그래밍하였다.

그림 5는 지반분류별 전단파속도 주상도를 보여주고 있다. 그림 5의 주상도는 모두 국내에서 측정된 주상도이며 KAIST 지반동역학 연구실에서 구축한 자료이다. 각각의 주상도에는 상응하는 지층구성도 자료가 확보되었다.  $S_c$ ,  $S_D$ , 그리고  $S_E$  지반에는 각각 52, 36, 그리고 10개의 주상도가 사용되었다. 지반 동적곡선은 점토, 모래, 자갈, 암반으로 각각 분류하여 표 2와 그림 6과 같은 총 15개의 동적곡선이 적용되었으며 지층구성도를 바탕으로 상응하는 동적곡선이 적용되었다.

표 1. 내진설계기준(II)의 지진계수와 등가  $F_a - F_v$ , 그리고 1997 NEHRP의  $F_a - F_v$

Site	$C_a$	$F_a$ (내진설계기준)	$F_a$ (NEHRP)	$C_v$	$F_v$ (내진설계기준)	$F_v$ (NEHRP)
$S_A$	0.09	0.81	0.80	0.09	0.81	0.80
$S_B$	0.11	1.00	1.00	0.11	1.00	1.00
$S_C$	0.13	1.17	1.20	0.18	1.62	1.69
$S_D$	0.16	1.44	1.58	0.23	2.07	2.36
$S_E$	0.22	1.98	2.42	0.37	3.33	3.47

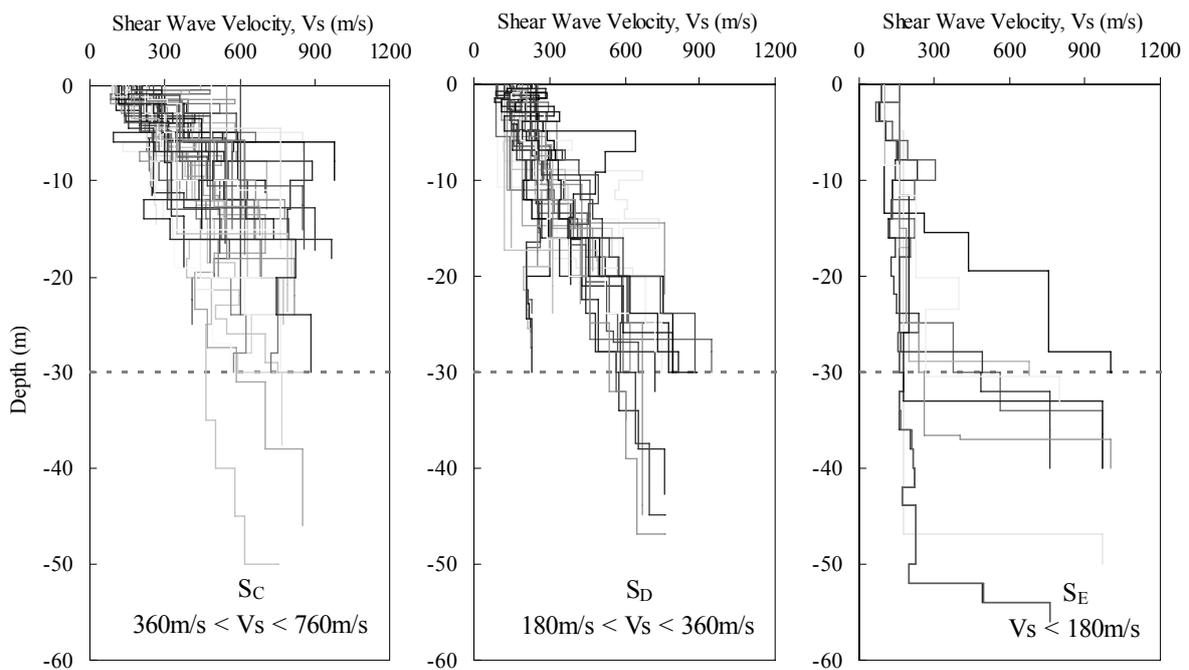


그림 5. 확률론적인 지진계수 유도에 사용된 지반의 전단파속도 주상도

전술한 바와 같이 851회의 해석을 수행하여 계산된 지반분류별 UHRS는 그림 7에 도시하였다. 그림 7은 UHRS와 내진설계기준연구(II)의 설계응답스펙트럼(DS)에는 상당한 차이가 있는 것을 보여준다. S<sub>c</sub> 지반에서는 UHRS가 DS에 비하여 월등하게 큰 것으로 나타났다. 또한,

UHRS의 강성이 DS보다 현저하게 커서 전체적으로 낮은 주기로 이동한 것을 확인할 수 있다. S<sub>b</sub> 지반은 UHRS가 DS에 비하여 크기는 하나, S<sub>c</sub> 지반과 같이 현격한 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 마지막으로, S<sub>b</sub> 지반은 UHRS에 비하여 DS가 오히려 큰 것으로 나타났다. 전

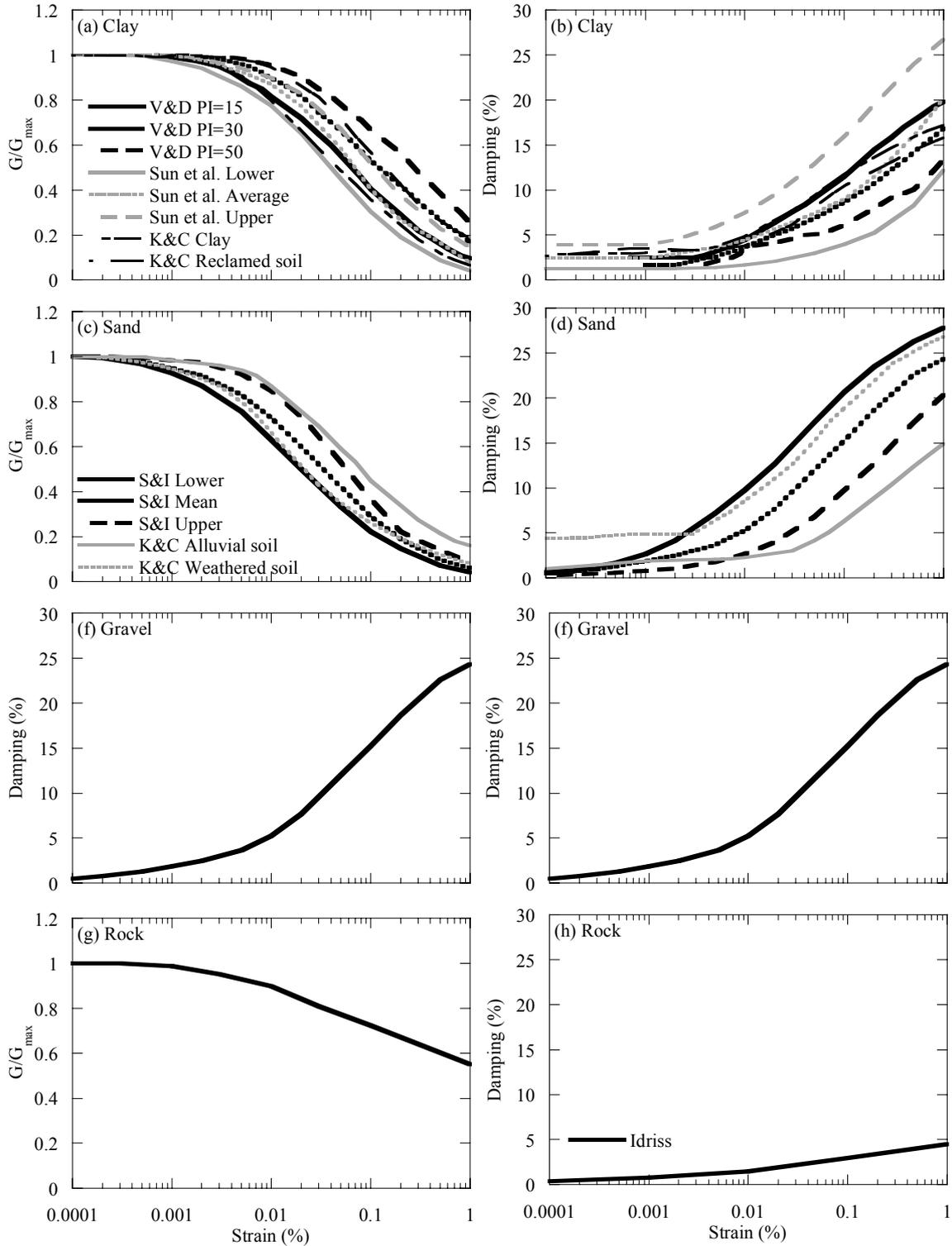


그림 6. 新 PSHA에 사용된 동적곡선

표 2. 사용된 지반의 동적곡선

지반분류	연 구 자	선택된 동적곡선
점토	Dobry와 Vucetic(1987)	PI=15, 30, 50
	Sun 등(1988)	Lower, Average, Upper
	김동수와 추연욱(2001)	점토, 매립토
모래	Seed와 Idriss(1970)	Lower, Mean, Upper
	김동수와 추연욱(2001)	충적토, 풍화토
자갈	Seed 등(1986)	자갈
암반	Schnabel(1973)	연암

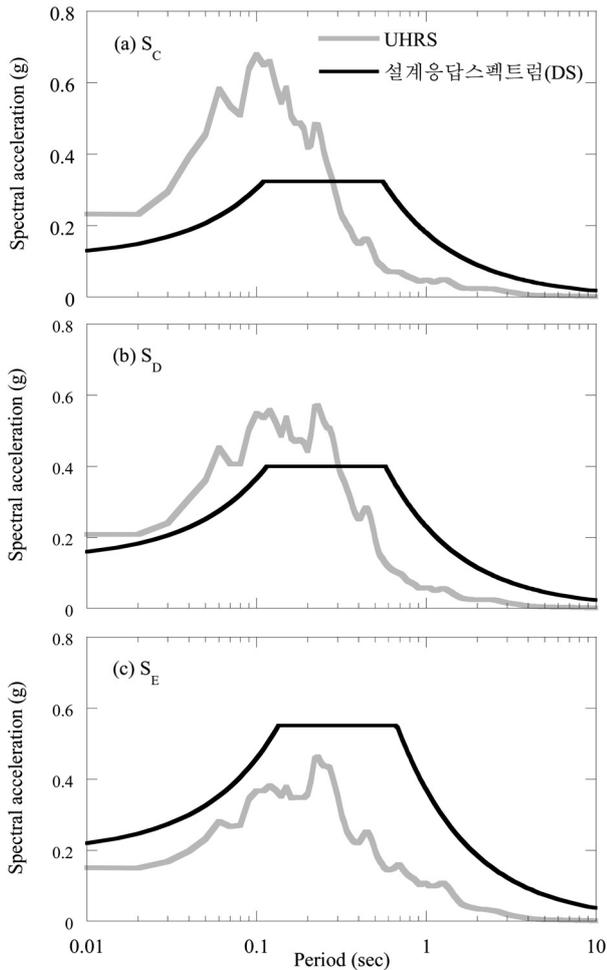


그림 7. 내진설계기준(II) 지반분류별 계산된 UHRS와 내진설계기준(II) 설계응답스펙트럼(DS) 비교

체적으로  $S_c$ ,  $S_d$ ,  $S_e$ 의 UHRS와 DS는 상당한 차이를 보이며 DS의  $T_0$ 와  $T_s$ 는 UHRS에 비하여 큰 것으로 나타났다. 위와 같이 내진설계기준(II)의 지진계수는 국내 지반 특성에는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 이와 같은 문제점은 기존의 연구(Kim과 Yoon, 2006; Sun 등, 2005)에서도 지적된 바 있으며 전체적인 경향은 본 연구결과와 유사하다.

본 연구에서는 내진설계기준(II)의 지진계수를 대체

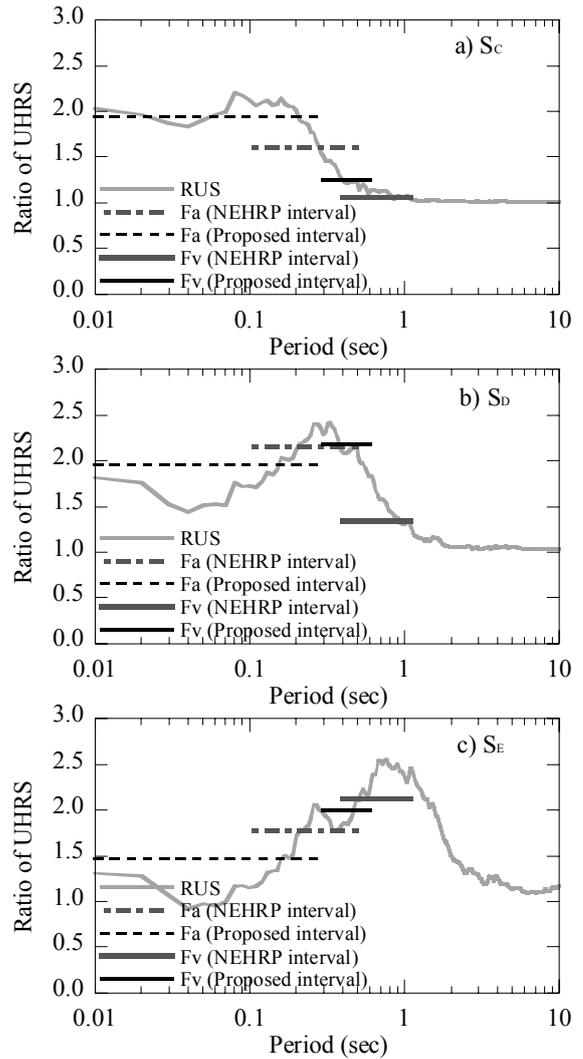


그림 8. 지반분류별로 계산된 RUS 비교

하는 새로운 지진계수를 개발하되 결과는 1997 NEHRP (FEMA, 1997)과 동일하게 Fa와 Fv로 나타내었다. 전술하였다시피 NEHRP(FEMA, 1997)은 각각 주기 범위 0.1 - 0.5s, 0.4 - 2.0s에 대한 RRS의 평균값과 +1 $\sigma$ 을 계산하여 Fa와 Fv를 결정하였다. 본 연구에서는 이 주기 범위를 “NEHRP interval”이라 명하였다. 그림 8에는 RUS와 Fa - Fv를 도시하였다. 여기서 RUS는 암반노두 ( $S_b$ )와 토층 지표면에서 계산된 UHRS의 비율을 나타내며 식 (6) - (7)의 RRS와는 다르게 확률론적인 결과이다. 또한, RRS는 여러 결과로부터 평균, +1 $\sigma$ , +2 $\sigma$  등을 구할 수 있지만, UHRS로부터 계산된 RUS는 단 하나의 값만을 준다. 그림 9는 NEHRP interval를 적용하여 계산된 DS와 UHRS를 비교하고 있다. 새롭게 계산된 DS는 내진설계기준(II)의 DS(그림 7)에 비하여는 정확성이 향상되었지만, 여전히 UHRS과는 차이가 있음을 보여

준다. 이는 미국과 국내 지반과는 근본적인 차이가 있으며 동일한 주기 범위를 적용할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 가장 UHRS와 일치성이 높은 주기 범위를 찾

기 위하여 다양한 범위들을 시험한 결과,  $F_a$ 는 0 - 0.3s,  $F_v$ 는 0.3 - 0.6s가 가장 적절한 것으로 나타났다. 새롭게 정의한 주기 범위(New interval)를 적용하여 계산된  $F_a$ 와  $F_v$ 를 적용한 DS도 그림 9에 비교하였으며 도출된  $F_a$ 와  $F_v$  값은 표 3에 정리하였다. 비교결과, 새롭게 지진계수의 주기범위를 적용하였을 경우, UHRS 맞춤형 DS를 생성할 수 있는 것으로 나타났다.

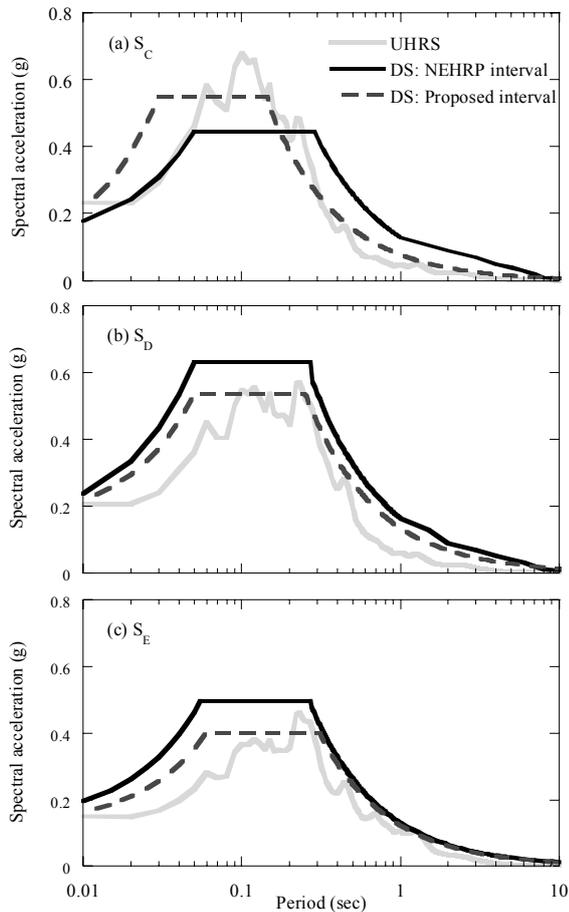


그림 9. 내진설계기준(II) 지반분류별 계산된 UHRS과 본 연구에서 제안한 설계응답스펙트럼

표 3. 내진설계기준(II)와 본 연구의 지진계수 비교

지반분류	$F_a$ (내진설계기준)	$F_a$ (본 연구)	$F_v$ (내진설계기준)	$F_v$ (본 연구)
SC	1.17	1.91	1.62	2.00
SD	1.44	1.91	2.07	2.29
SE	1.98	1.45	3.33	3.00

표 4. Kim 등(2008)과 본 연구의 지진계수 비교

지반 분류	기반암심도 H (m)	전단파속도 $V_s$ (m/s)	$F_a$ (김동수 등)	$F_a$ (본 연구)	$F_v$ (김동수 등)	$F_v$ (본 연구)
H1-1	<10	< 300	1.34	1.72	1.03	1.05
H1-2		300	1.08	1.28	1.01	1.02
H2-1	10H<20	< 300	1.94	2.05	1.16	1.93
H2-2		300	1.40	1.74	1.05	1.12
H3-1	20	< 200	1.42	1.46	2.55	2.00
H3-2		200 $V_s$ < 360	2.11	2.00	1.56	1.97
H3-3		360	1.67	2.02	1.14	1.39

### 3.2 Kim 등(2008)의 지진계수와 비교

新 PSHA는 나아가 Kim 등(2008)이 제안한 새로운 지반분류에 대한 지진계수를 도출하는데 사용되었다. Kim 등(2008)은 내진설계기준(II)의 지반분류 방법의 문제점을 인식하여 국내 지반 환경에 보다 적합한 새로운 분류 기준을 제안하였으며 이는 표 4에 정리하였다. 지반분류 기준은 기반암 심도와 평균 전단파속도 2가지를 적용하였으며 총 7가지로 분류하였다. 지반분류별  $F_a$ 와  $F_v$ 는 NEHRP (FEMA, 1997)과 동일하게 주기범위 0.2 - 0.5s와 0.4 - 2.0을 적용하였으며 각각 RRS 평균값과  $+1\sigma$ 을 적용하였다.

Kim 등(2008) 지반분류별 지진계수를 계산하기 위하여 전절에 적용하였던 지반주상도(그림 5)들을 새로운 분류기준에 맞추어 분류하였다. 지반 동적곡선은 전절과 동일하게 적용되었다. 계산된 지진계수와 Kim 등(2008)의 지진계수는 표 4에 비교하였으며, UHRS, Kim 등(2008)과 본 연구에서 계산된 DS는 그림 10에 도시하였다. 비교 결과 Kim 등(2008)과 본 연구에서 제안한 지진계수와 DS와는 H1-1을 제외하고는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. H1-1 지반에 대한 추가적인 연구를 수행하여 이의 원인을 규명할 필요가 있을 것으로 판단된다. Kim 등(2008)은 H2-1과 H3-1 지반에서는 DS를 본 연구보다 크게 예측하였으며, H2-2와 H3-2에서는 작게 예측하였다. H3-3은 거의 동일하게 예측하였다. Kim

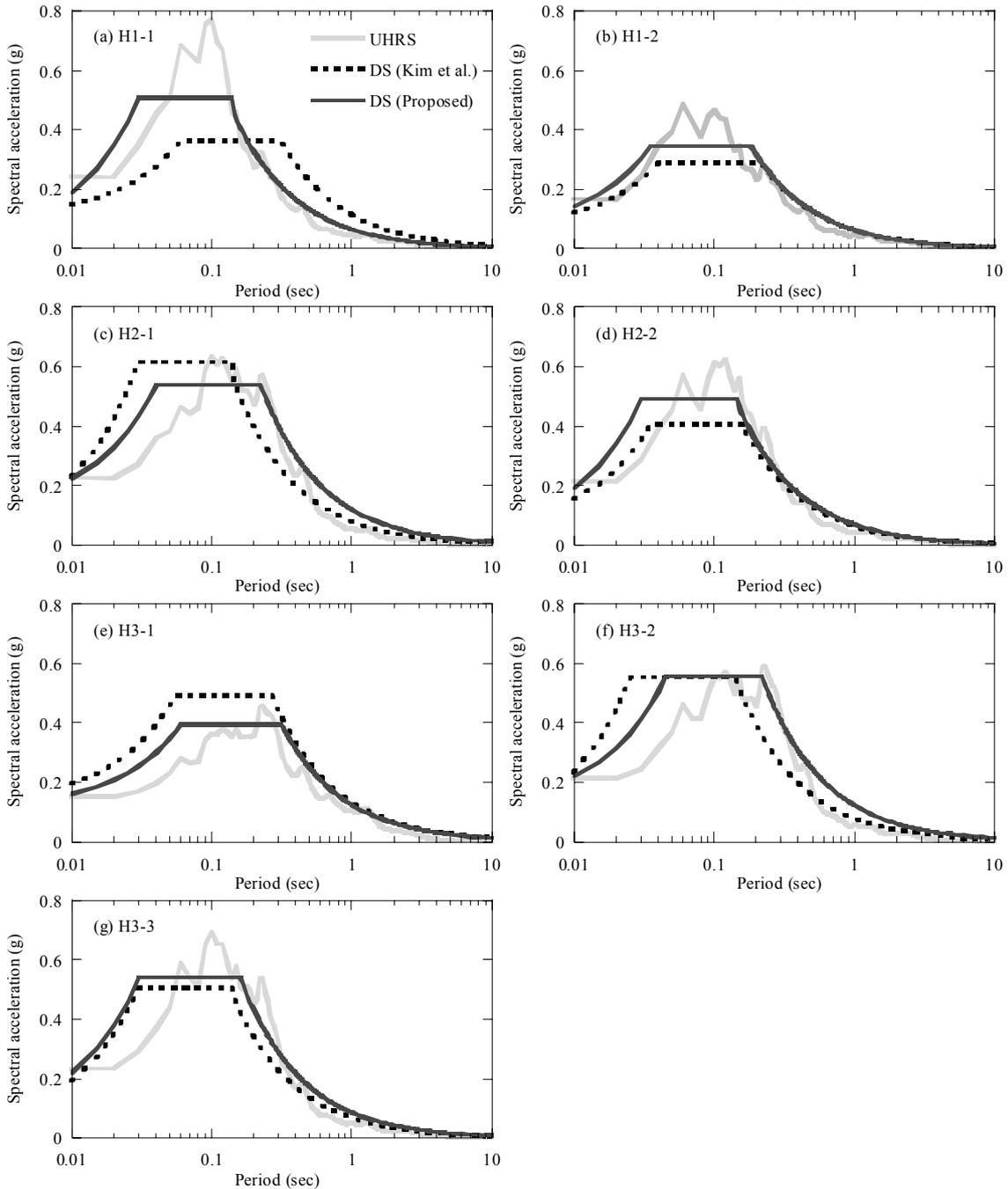


그림 10. 김동수 등(2008) 지반분류별 계산된 UHRS와 설계응답스펙트럼 비교

등(2008)과 본 연구에서 계산된  $F_a$ 와  $F_v$ 은 각각 최대 28%와 66% 차이가 나는 것으로 나타났다.

Kim 등(2008)의 지진계수는 결정론적인 방법으로 유도되었으며,  $F_a$ 와  $F_v$ 에 각각 RRS의 평균값과  $+1\sigma$ 을 사용하였으며, 다른 주장도, 동적곡선, 입력지진파를 적용하였음에도 불구하고 본 연구와 결과가 비교적 유사하게 나온 것은 매우 흥미롭다. 본 연구결과만으로 결과가 유사하게 계산된 이유를 규명하기는 어려우며 추후 이

에 대한 이유를 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지진재해도와 호환되는 확률론적인 지진계수를 유도하였다. 이를 위해서 기존의 확률론적인 지진재해분석(PSHA)과 근본적으로는 동일하지만, 지진재해를 유한기간 내에 가상의 지진시나리오를 발

생시킴에 이에 상응하는 인공지진기록으로 나타내는 新 PSHA 기법을 적용하였으며 생성된 모든 지진기록에 대한 지반응답해석을 수행하여 확률론적인 지진계수를 계산하였다. 나아가, 지반 물성치의 불확실성과 임의성을 과학적으로 고려하기 위하여 98개의 지반주상도와 15개의 동적곡선을 적용하였다. 新 PSHA 기법을 적용하여 등재해스펙트럼(UHRS)을 생성하였으며 이를 기반으로 확률론적인 지진계수를 유도하여 기존의 결정론적으로 유도된 지진계수와 비교하였다. 먼저, 내진설계기준(II)와 본 연구결과를 비교한 결과, 내진설계기준(II)은  $S_c$ ,  $S_d$  지반은 각각 크게 예측한 반면,  $S_e$  지반에서는 과도하게 작게 예측하는 것으로 나타났다. 내진설계기준(II)은 특히 SC 지반의 응답을 매우 크게 과소예측하는 것으로 나타났다. 추후 지반분류별 지진계수는 반드시 수정·보완이 필요할 것으로 판단된다. 新 PSHA 기법은 나아가 국내에서 새롭게 도출된 지진분류기준과 이에 상응하는 지진계수와도 비교되었다. 비교결과, 본 연구결과와 새롭게 도출된 계수와는 한 가지 지반을 제외하고는 차이가 내진설계기준(II)에 비하여 작은 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 중견연구자지원사업의 연구과제인 “신 확률론적 지진재해분석기법과 부지효과 모델을 융합하는 온라인 통합 플랫폼 개발(R01-2007-000-11793-0)”에서 연구비를 지원받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 건설교통부 (1997), 내진설계기준연구(II), pp.493.
2. 광동엽, 정장균, 박두희 (2009), “한반도 확률론적인 지진재해분석과 Deaggregation”, *한국지진공학회 논문집*.
3. 김동수, 추연옥 (2001), “공진주시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성”, *한국지반공학회논문집*, Vol.17, No.5, pp.115-128.
4. Boore, D.M. (2002), *SMSIM Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.16. A revision of OFR 96-80-A*, US Geological Survey, Menlo Park.
5. Borcherdt, R.D. (1994), “Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)”, *Earthquake Spectra*, Vol. 10, pp.617-653.

6. Cornell, C.A. (1968), “Engineering seismic risk analysis”, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.58, pp.1583-1606.
7. Dobry, R., Martin, G., Parra, E. and Bhattacharyya, A. (1994), “Development of site-dependent ratios of elastic response spectra (RRS) and site categories for building seismic codes”, pp.18-20.
8. Dobry, R., Martin, G., Parra, E. and Bhattacharyya, A. (1999), “Development of Site Dependent Ratio of Elastic Response Spectra (RRS)”, pp.
9. Dobry, R. and Vucetic, M. (1987), “Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits”, *International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils*, Mexico City, 2, pp.51-87.
10. FEMA (1997), “NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part I”, p.337.
11. Gutenberg, B. and Richter, C. (1944), “Frequency of earthquakes in California”, *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol.34, No.4, pp.1985-1988.
12. IBC (2000), International Building Council, Whittier, CA.
13. Kim, D.-S., Lee, S.-H. and Yoon, J.-K. (2008), “Development of Site Classification System and Modification of Site Coefficients in Korea Based on Mean Shear Wave Velocity of Soil and Depth to Bedrock”, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.28, No.1C, pp.63-74.
14. Kim, I.T. and Yoon, J.K. (2006), “Development of new site classification system for the regions of shallow bedrock in Korea”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.10, No.3, pp.331-358.
15. Kramer, S.L. (1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., pp.xviii, 653.
16. Noh, M. and Lee, K. (1994), “Estimation of Peak Ground Motions in the southeastern Part of the Korean Peninsula (I): Estimation of Spectral Parameters”, *Jour. Geol. Soc. Korea*, Vol.30, pp.297-306.
17. Park, D. and Hashash, Y.M.A. (2005), “Evaluation of seismic site factors in the Mississippi Embayment. II. Probabilistic seismic hazard analysis with nonlinear site effects”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.25, No.2, pp.145-156.
18. Schnabel, P.B. (1973), *Effects of local geology and distance from source on earthquake ground motions*, University of California, Berkeley.
19. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970), *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*, College of Engineering University of California Berkeley., Berkeley, p.41.
20. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokmatsu, K. (1986), “Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, No.11, pp.1016-1032.
21. Sun, C.-G., Kim, D.-S. and Chung, C.-K. (2005), “Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea”, *Engineering Geology*, Vol.81, No.4, pp.446-469.
22. Sun, J.I., Golesorkhi, R. and Seed, H.B. (1988), *Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils*, Report No. UCB/EERC-88/15, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California.
23. Wen, Y.K. and Wu, C.L. (2001), “Uniform hazard ground motions for Mid-America Cities”, *Earthquake Spectra*, Vol.17, No.2, pp.359-384.

(접수일자 2009. 7. 15, 심사완료일 2009. 10. 20)