

확률론적 지진계수 개발

Development of Probabilistic Site Coefficient

곽동엽¹⁾, Dong-Yeop Kwak, 정창균²⁾, Chang-Gyun Jeong, 박두희³⁾, Duhee Park

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

³⁾ 한양대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : The design response spectrum generally used in Korea is decided by the site coefficients determined by deterministic methodology, while it is based on probabilistic seismic hazard analysis. The design response spectrum has to be made using probabilistic method which includes uncertainties of ground motions and ground properties for coincide with probabilistic methodology of seismic hazard analysis. In this study probabilistic site coefficients were developed, which were defined by the results of site response analysis using a set of ground motion that was compatible with present seismic hazard map. The design response spectrum defined by probabilistic seismic coefficients resulted in lower spectrum in long period area and larger spectrum in short period area. Also, the maximum spectral accelerations in site class D and site class E were lower than one in site class C while in the previous design response spectrum the maximum spectral acceleration increased from site class A to E.

Keywords : probabilistic seismic hazard analysis, design response spectrum, site coefficient, UHRS

1. 서론

현재 국내에서 널리 사용되는 내진설계기준(내진설계기준연구(II), 1997)에서는 다음과 같은 방법으로 각 지역에서 설계응답스펙트럼을 제시한다. 1) 확률론적 지진재해도를 기본으로 한반도를 두 구역으로 분류한 후 구역계수를 정의한다. 3) 지진의 연간발생확률인 재현주기에 따라 위험도계수를 정의한다. 2) 토층의 평균전단파 속도를 기준으로 지반을 분류한다. 4) 구역과 지반에 맞는 지진계수 C_a 와 C_v 에 위험도계수를 곱하여 설계응답스펙트럼을 작성한다. 하지만 이와같은 설계응답스펙트럼 작성법은 한반도의 확률론적 지진재해분석으로부터 각 지역에서 기반암의 최대가속도를 정의한 반면 설계응답스펙트럼을 정의하는 C_a 와 C_v 는 국내의 지진파 전달특성과 지진발생특성을 고려하지 않고 국내설계응답스펙트럼의 모태인 1997 NEHRP(BSSC, 1997), 1997 UBC(ICBO, 1997)와 같은 미국 기준을 준용하여 결정론적 방법으로 정의하는데 문제가 있다.

이번 논문에서는 국내의 지진파 전달특성과 지진발생특성을 고려하고 또한 확률론적 지진재해분석과 상응하는 설계응답스펙트럼을 작성하기 위하여 확률론적 방법을 이용하여 지진계수를 정의하였다. 우선 국내의 확률론적 지진재해분석 작성방법을 따라 확률론적 지진재해도를 재현하여 한반도의 각 격자에서 지진의 연간발생확률 정보를 획득하였다. 획득한 정보를 이용하여 새로운 확률론적 지진재해분석 방법인 PSHA-NL(Park and Hashash, 2005)기법에 적용, 기 재현된 확률론적 지진재해분석과 상응하는 지진파를 획득하였다. 국내 114개 토층(윤종구 등, 2006)에 생성한 지진파를 적용하여 지반응답해석을 수행한 후 토층의 불확실성과 지진파의 불확실성을 고려하는 확률론적 응답스펙트럼인 등재해스펙트럼

(Uniform Hazard Response Spectrum, UHRS)을 작성하였다. 최종적으로 UHRS와 호응하는 설계응답스펙트럼을 나타내는 지진계수를 정의하였다. 이 지진계수는 확률론적 응답스펙트럼을 기반으로 정의된 것이므로 확률론적 지진재해분석과 호환되며 국내에 발생가능한 지진에 의한 응답스펙트럼을 더욱 현실적으로 표현한 것이라 할 수 있다.

2. 신 확률론적 지진재해분석

PSHA-NL은 지진재해를 유한기간 내 발생하는 가상 지진 시나리오와 이에 의하여 발생하는 지진파형의 합으로 표현하는 기법이다. PSHA-NL은 확률론적 지진재해도와 부합하는 지진시나리오와 지진파형을 얻을 수 있는 지진재해 분석기법으로 확률적인 지진계수를 산정할 수 있다.

2.1 지진시나리오 생성

PSHA-NL은 다음과 같은 방법을 이용하여 한 지역에서 지진시나리오를 작성한다. 우선 한반도를 격자로 구분한 후 한 격자에서 10년의 기간 중에 발생하는 지진의 횟수를 식 (1)을 이용하여 계산한다.

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

여기서 t =시뮬레이션 기간(10년), λ_k =연간평균지진발생률, $u_k=0\sim 1$ 사이에 균등분포하고 있는 임의숫자, n_k =시뮬레이션 기간 중 발생한 지진횟수이다. 연간평균지진발생률인 λ_k 는 확률론적 지진재해도를 재현함으로 구할 수 있다(곽동엽, 2009). 식 (1)에 사용되었던 임의숫자 u_k 는 식 (2)에 사용되어 각 격자에서 생성된 지진에 대하여 격자의 지진활동도에 순응하는 지진규모를 결정한다.

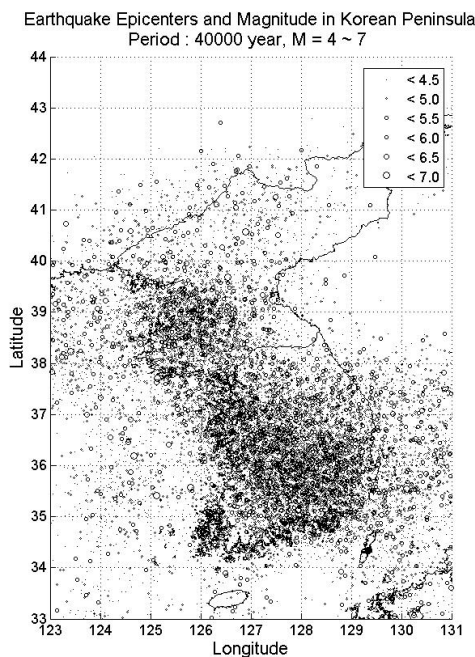
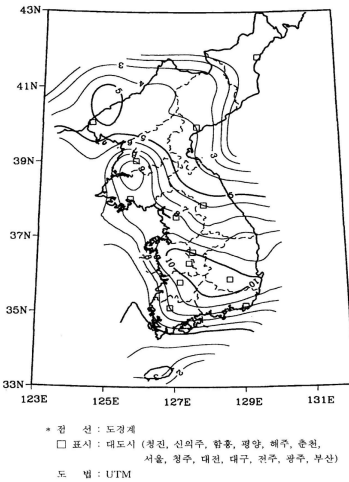
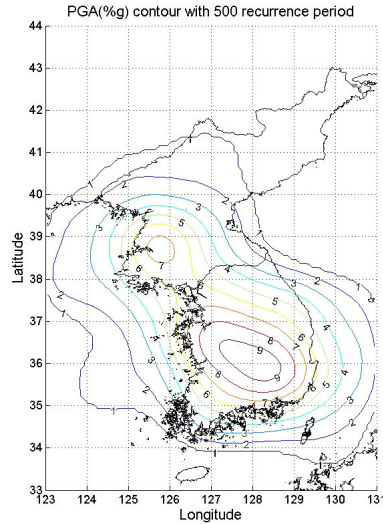


그림 1. PSHA-NL기법으로 생성한 지진시나리오

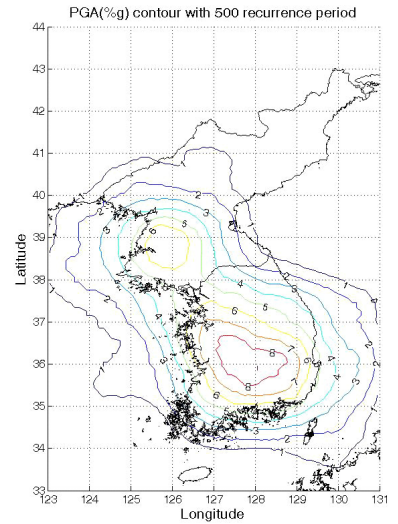
Peak Acceleration (%g) with 10% Probability of Exceedance in 50 Years



(a)



(b)



(c)

그림 2. (a) 재현주기 500년 한반도 확률론적 지진재해도(내진설계기준연구(II)), (b) 재현된 확률론적 지진재해도, (c) PSHA-NL기법을 이용한 확률론적 지진재해도

$$m_b = m_{low} - \log_{10} (1 - u_k (1 - 10^{m_{low} - m_{max}})) \quad (2)$$

여기서 m_b =지진규모, m_{low} =지진재해분석 시 고려되는 최소 지진규모, m_{max} =최대 가능 지진규모이다. 지진규모는 위와 같은 방법을 이용하여 결정하고 부지-지진원의 이격거리는 격자와 부지와의 거리를 계산하여 구할 수 있다. 이와 같은 과정을 통해 정해진 기간 내 각 격자에서 생성된 지진의 개수와 각 지진의 규모를 정할 수 있다. 지진의 발생 위치는 격자 내에서 임의로 정의된다.

2.2 확률론적 지진재해도

2.1절과 같은 과정을 충분한 수의 10년 기간 시뮬레이션으로 반복하면 기존 지진재해도와 동일한 재해예측결과를 얻을 수 있다. 그림 1은 4000번의 10년 기간 시뮬레이션에 의한 지진시나리오를 나타낸다. 총 40000년 기간동안 15783개의 지진시나리오가 생성되었으며 생성된 지진시나리오와 일치하는 지진파를 지진파 생성프로그램인 SMSIM(Boore, 2002)을 이용하여 생성하였다. 여기서 지진파 전달 특성을 고려하기 위해 내진설계기준연구(II)(1997)에서 제시하는 감쇠공식을 이용하여 지진파를 생성하였다. 그림 2는 기존의 지진재해도와 재현한 지진재해도, 지진시나리오를 이용하여 생성한 지진파에 의한 지진재해도를 나타내고 있다. 그림 2(a)는 내진설계기준연구(II)에서 제시하는 재현주기 500년 지진재해도를 나타낸다. 이 지진재해도를 그리는데 사용한 절차를 따라 그림 2(b)의 지진재해도를 그렸으며 그림 2(c)는 PSHA-NL기법으로 생성된 지진시나리오를 이용하여 작성한 확률론적 지진재해도이다. 그림 2(c)는 그림 2(b)와 유사하며 따라서 PSHA-NL로 생성된 지진시나리오는 기존의 확률론적 지진재해분석과 호응된다.

3. 등재해스펙트럼

PSHA-NL기법의 장점은 지진시나리오를 정의하여 지진파 시간이력곡선을 획득할 수 있다는 것이다. 이 지진파들이 한반도의 지진재해분석과 일치하는 것은 지진재해도의 유사성을 통해서 증명되었다. 모든 지진파의 응답스펙트럼 곡선을 구한 후 각 주기에서 정해진 확률에 따라 가속도 값을 선택한다면 정

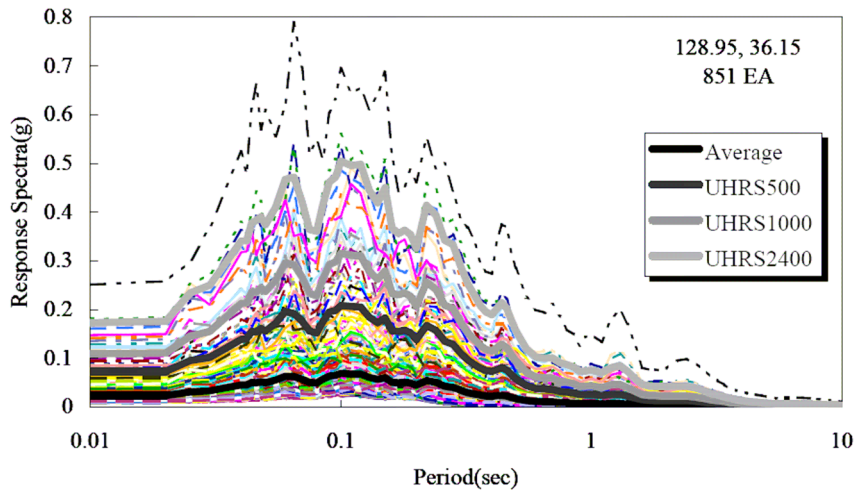


그림 3. 지진과 응답스펙트럼과 UHRS

해진 확률에 해당하는 응답스펙트럼을 구할 수 있다. 이를 등재해스펙트럼(UHRS)이라고 한다. 그림 3은 생성된 지진과 중 경도 128.95°, 위도 36.15° 에 영향을 주는 지진과 851개의 응답스펙트럼을 나타내고 있다. 이는 40000년 기간 동안 발생한 지진과로써 각 주기에서의 응답을 재현주기 500년, 1000년, 2400년의 확률을 가지는 값으로 나타내면 그림 3의 UHRS500, UHRS1000, UHRS2400과 같이 표현된다. 이와같이 UHRS는 확률론적 지진재해분석과 같은 확률론적 방법으로 응답스펙트럼을 선정한다.

4. 확률론적 지진계수

4.1 지반응답해석

지진파는 국지적 지반증폭효과에 의해 그 성질이 크게 바뀔 수 있다. 1989년 Loma Prieta 지진에서 Treasure Island와 Yerba Buena Island의 지반응답은 지반증폭효과의 중요성을 나타내는 좋은 본보기이다. 따라서 설계응답스펙트럼 또한 지반증폭효과를 고려하여 작성되어야 한다. 이번 논문에서는 국내

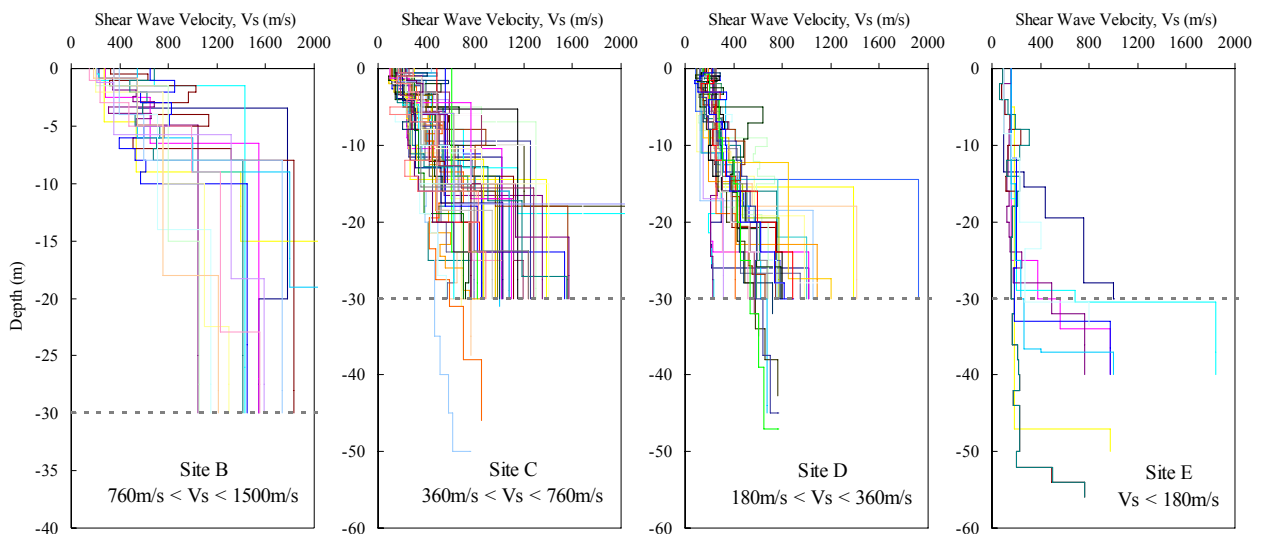


그림 4. 지반종류별 전단파 속도 주상도

114개의 토층자료(윤종구 등, 2006)를 지반분류에 맞게 분류한 후 생성한 지진파를 적용시켜 1차원 지반 응답해석(Schnabel et al., 1972)을 수행하였다. 그림 4는 분류된 토층의 진단파 속도 주상도를 나타내고 있다.

4.2 확률론적 지진계수

4.2.1 기반암에서의 지진계수

설계응답스펙트럼은 지진계수를 이용하여 결정된다. 국내 내진설계기준에 제시되어 있는 지진계수인 C_a 와 C_v 는 전술한 바와 같이 1997 NEHRP(BSSC, 1997), 1997 UBC(ICBO, 1997)와 같은 미국 기준을 따라 식 (3), 식 (4)와 같이 정해진다.

$$C_a = A_a \times F_a \quad (3)$$

$$C_v = A_v \times F_v \quad (4)$$

여기서 A_a 는 기반암의 최대가속도, A_v 는 주기 1초에서의 응답가속도를 나타내며, F_a 는 단주기 증폭계수, F_v 는 장주기 증폭계수를 나타낸다. 기반암에서는 증폭이 없으므로 F_a 와 F_v 는 1로 정해진다. 따라서 기반암에서의 설계응답스펙트럼은 A_a 와 A_v 에 의존하여 그려진다. 그림 5는 국내 내진설계기준에 제시되어 있는 재현주기 500년에서의 설계응답스펙트럼과 UHRS, 그리고 UHRS에 맞춘 설계응답스펙트럼을 나타내고 있다. 기존의 내진설계기준에서는 재현주기 500년 기준에서 A_v 를 A_a 와 같은 값인 0.11g로 산정하였다. 하지만 이는 장주기 증폭이 큰 국외 지진의 영향을 나타낸 것으로 지진발생규모가 작은 국내의 상황과는 맞지 않다. 국내 발생가능한 지진파를 이용하여 그려진 UHRS를 보면 장주기 증폭이 크게 감소되어 있는 것을 볼 수 있다. UHRS의 형상을 따라가는 최적 A_v 로 0.062g를 선택하였다.

4.2.2 토층에서의 지진계수

지반증폭효과를 반영한 토층에서의 지진계수는 기반암 응답스펙트럼과 증폭된 토층의 응답스펙트럼의 비율(Ratio of Response Spectra, RRS)을 이용하여 결정된다. 미국 NEHRP의 내진설계기준에서는 응답스펙트럼비에서 단주기 증폭계수의 적분구간을 0.1~0.5초, 장주기 증폭계수의 적분구간을 0.4~2.0초로 정

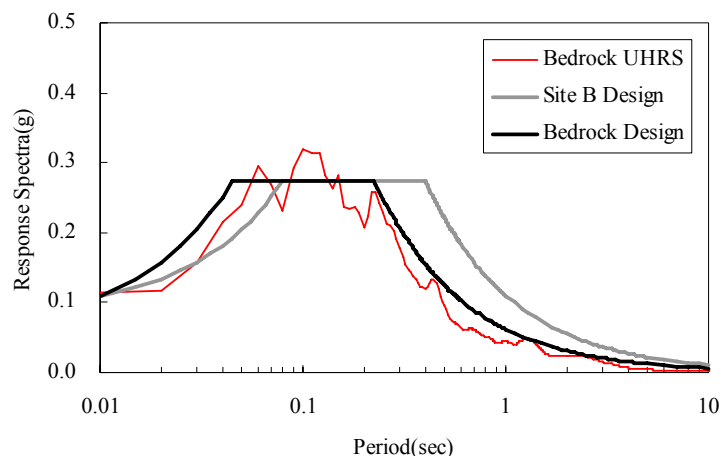


그림 5. 기반암에서의 UHRS와 설계응답스펙트럼

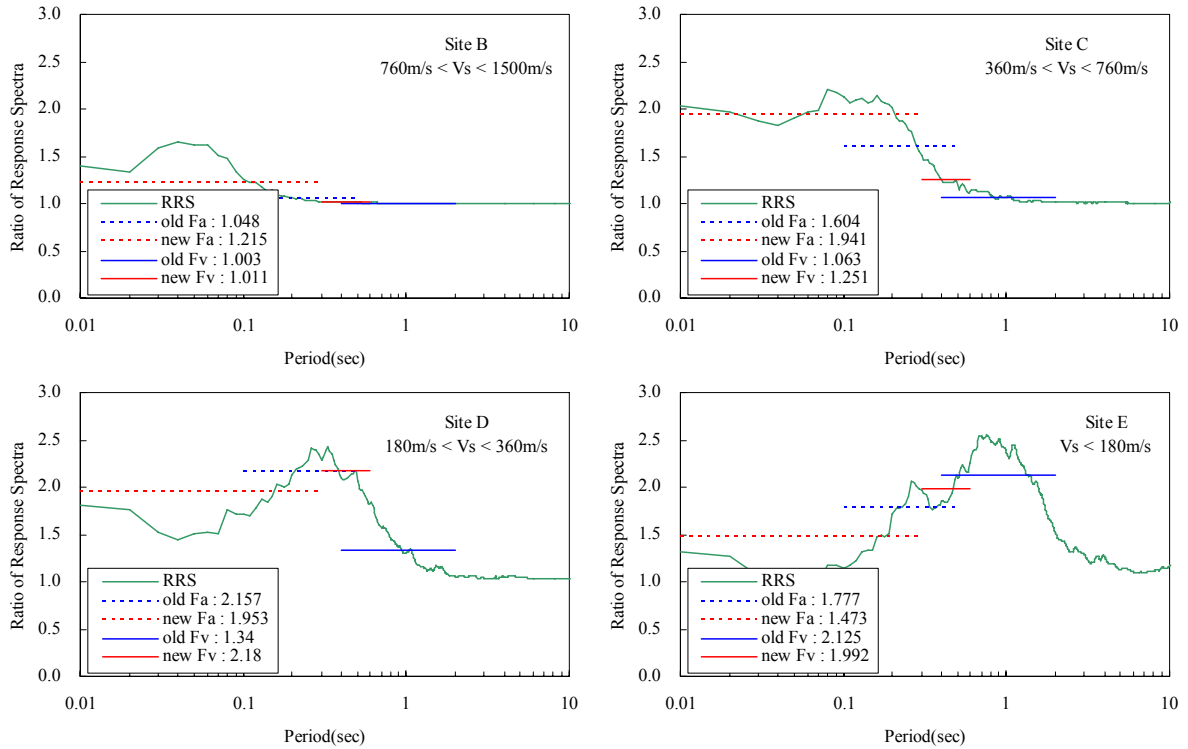


그림 6. 응답스펙트럼비로부터 결정된 단주기 및 장주기 지진계수

의하였고 각각 식 (5), 식 (6)을 이용하여 계산한다.

$$F_a(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (5)$$

$$F_v(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (6)$$

이 적분구간은 장주기 응답계수 A_v 의 값이 단주기 응답계수 A_a 와 비슷한 응답스펙트럼에서 유효하다. 하지만 이는 단주기 영역이 지배적인 국내 발생 가능 지진파와 기반암 위치가 낮아 단주기의 고유주기를 갖는 국내지반의 특성을 적절히 반영할 수 없다. 이번 연구에서는 단주기 쪽의 영향이 강한 국내 응답스펙트럼 특성을 반영하기 위하여 증폭계수 적분구간을 전체적으로 단주기 쪽으로 이동시켜 F_a 의 적

표 1. 각 지반분류 별 결정론적 지진계수 및 확률론적 지진계수 비교

	내진설계기준연구(II) ($A_a = 0.11$)		UHRs ($A_a = 0.11$)		내진설계기준연구(II) ($A_v = 0.11$)		UHRs ($A_v = 0.062$)	
	C_a	F_a	old F_a (0.1~0.5)	new F_a (0.0~0.3)	C_v	F_v	old F_v (0.4~2.0)	new F_v (0.3~0.6)
Site B	0.11	1.0	1.048	1.215	0.11	1.0	1.003	1.011
Site C	0.13	1.182	1.604	1.941	0.18	1.636	1.063	1.251
Site D	0.16	1.455	2.157	1.953	0.23	2.091	1.777	1.473
Site E	0.22	2.0	1.34	2.18	0.37	3.364	2.125	1.992

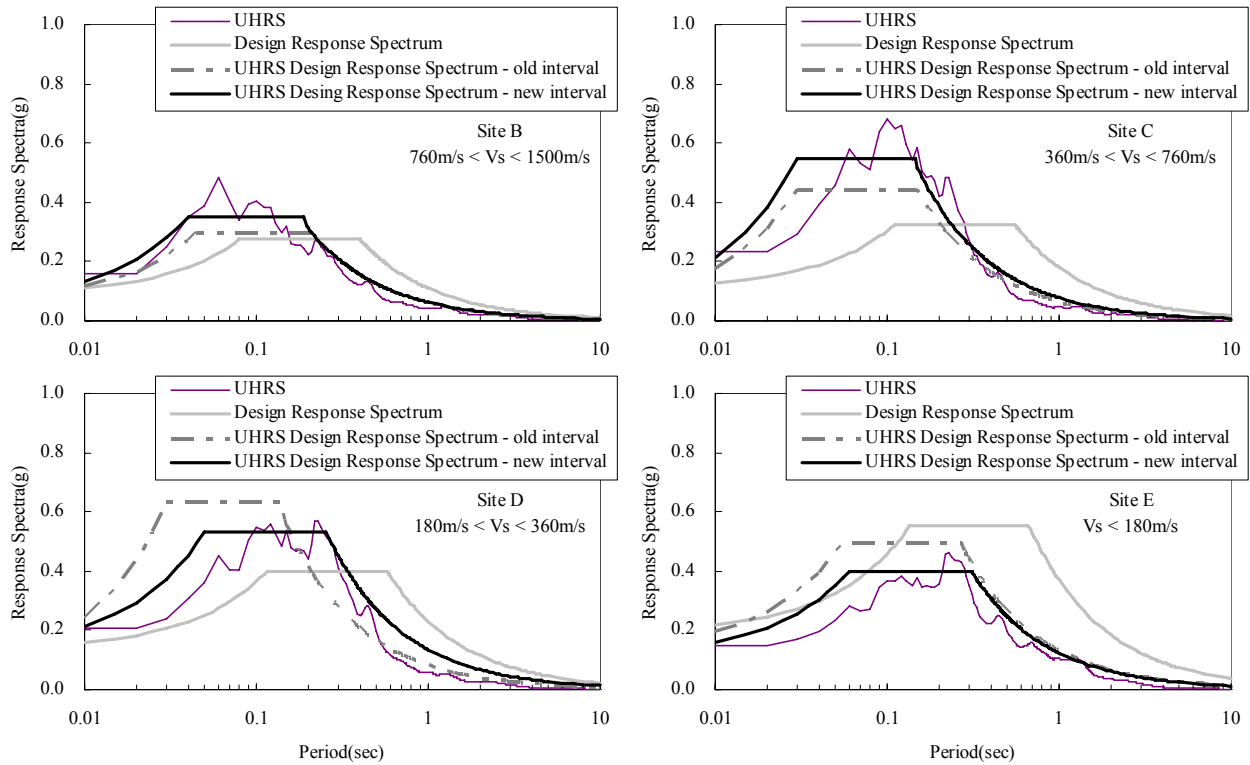


그림 7. UHRS와 설계응답스펙트럼

분구간을 0~0.3초, F_v 의 적분구간을 0.3~0.6초로 정의하였다. 그림 6은 RRS에서 기존의 적분구간과 이번 연구에서 제안한 적분구간에 의한 F_a 및 F_v 를 나타내고 표 1은 내진설계기준연구(II)의 증폭계수, 0.1~0.5초 적분구간에서의 F_a 와 0.0~0.3초 적분구간에서의 F_a , 0.4~2.0초에서의 F_v 와 0.3~0.6초에서의 F_v 를 나타낸다. 각 증폭계수에 A_a 와 A_v 를 곱하여 지진계수인 C_a 와 C_v 를 계산한 후 설계응답스펙트럼을 그려본 결과 그림 7과 같이 나타났다.

그림 7을 살펴보면 우선 기존의 적분구간을 따르는 증폭계수를 이용하여 설계응답스펙트럼(old interval)을 그리면 UHRS를 잘 반영하지 못하나 새로운 적분구간을 이용한 설계응답스펙트럼(new interval)은 UHRS를 잘 따라감을 볼 수 있다. 따라서 단주기 증폭이 큰 국내 지반에서는 새로운 적분구간을 이용하여 증폭계수를 선정, 설계응답스펙트럼을 작성하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 한편, 내진설계기준연구(II)에 나타나 있는 기존의 설계응답스펙트럼(Design Response Spectrum)은 Site B에서 Site E로 갈수록 증폭의 크기가 커지고 또한 장주기 쪽 증폭이 완연함을 알 수 있다. 하지만 UHRS의 결과는 이와 다르다. UHRS는 Site C에서 가장 큰 응답을 보이고 있으며 Site D, Site E로 갈수록 장주기 영역의 크기는 증가하고 있지만 최대응답값은 줄어들고 있다. 이는 기반암 깊이가 얇고 지진의 규모가 작은 국내 지반 및 지진 특성을 잘 반영한다고 할 수 있다. 기존의 방법은 장주기 영역의 응답스펙트럼을 과대예측하고 있으며 오히려 Site C에서 단주기영역의 지반응답을 과소 예측하는 것으로 나타난다.

5. 결론

현재 내진설계기준에서 제시하고 있는 설계응답스펙트럼은 미국의 설계기준을 준용하는 것으로서 국내의 확률론적 지진재해분석과 호환되지 못하는 결정론적 방법으로 작성되고 있다. 이번 논문에서는 이러한 불일치를 해결하고자 새로운 확률론적 지진재해분석 방법인 PSHA-NL기법을 이용하여 확률론적인 지진계수를 계산하였고 그에 의한 설계응답스펙트럼을 제시하였다.

1. PSHA-NL기법과 기존의 확률론적 지진재해분석과의 일치성을 보이기 위해 기존의 방법과 PSHA-NL의 지진재해도를 비교하였다. 두 지진재해도의 유사성은 PSHA-NL기법으로 생성된 지진파형이 한반도의 확률론적 지진재해분석과 호응하는 것을 증명한다.
2. 생성된 지진파형의 응답스펙트럼을 확률론적 방법을 이용하여 UHRS로 나타낸 결과 기반암에서 기존의 설계응답스펙트럼이 장주기 쪽으로 치우쳐 있는 것으로 판단되었다. UHRS에 맞는 주기 1초에서의 응답가속도 값을 새로 제시하여 기반암에서의 설계응답스펙트럼을 제안하였다.
3. 국내의 토층과 생성된 지진파를 이용하여 지반응답해석을 수행하였다. 각 지반분류의 UHRS에서 국내 설계기준의 모태인 미국 설계기준의 방법대로 단주기 증폭계수와 장주기 증폭계수를 계산한 결과 UHRS의 형상을 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 국내의 응답스펙트럼은 장주기 증폭보다 단주기 증폭이 크게 나타나므로 단주기 증폭계수와 장주기 증폭계수의 적분구간을 단주기 쪽으로 이동하여 UHRS와 상응하는 적분구간을 제시하였다.
4. 기존의 설계응답스펙트럼은 지반분류단계가 내려갈수록 최대응답가속도와 장주기 영역 증폭이 커지지만 UHRS는 Site C 분류에서 가장 큰 응답가속도 값을 보였으며 Site D, Site E 분류로 갈수록 장주기 영역 증폭은 두드러지지만 그 크기는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 기반암의 깊이가 얇은 국내의 토층 특성을 반영하는 것으로 보인다. 기반암의 깊이가 얇으면 토층의 고유주기가 작아지므로 장주기 영역의 증폭보다는 오히려 단주기 영역의 증폭이 크게 나타나게 된다. 따라서 도심도 지반에서 평가된 기존의 미국의 설계기준을 국내의 설계에 그대로 반영하는 것은 실제 국내에 발생할 수 있는 지진의 응답스펙트럼을 잘못 예측할 수 있다. 국내의 지반 상황을 고려하고 또한 국내에서 발생 가능한 지진의 더욱 정확한 예측을 통해 설계응답스펙트럼의 신빙성을 높여야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부 (1997), **내진설계기준연구(II)**.
2. 광동엽 (2009), "확률론적 지진재해분석에 상응하는 확률론적인 지진계수 개발에 관한 연구", **한양대학교**, 토목공학과 석사학위논문, 60p
3. 윤종구, 김동수, 방은석 (2006), "국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구 (I) - 국내 내진설계기준의 문제점 분석", **한국지진공학회 논문집**, 제 10권, 제 2호, pp. 39-50.
4. Boore, D.M. (2002), *SMSIM Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.16*. A revision of OFR 96-80-A, Menlo Park.
5. BSSC (1997), *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Part 1-Provisions, 1997 Edition, Washington D.C.
6. ICBO (1997), *1997 Uniform Building Code*, Volume 2-Structural Engineering Design Provisions, California.
7. Park, D., 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, 2, pp. 145-156
8. Schnabel, P.B., Lysmer, J.L., and Seed, H.B. (1972), *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*, Berkeley, CA.