

# 新 확률론적 지진분석 및 지진계수 개발

## Part II: 확률론적 지진계수 도출

### Development of New Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Seismic Coefficients of Korea

#### Part II: Derivation of Probabilistic Site Coefficients

곽 동 엽<sup>1)</sup> · 정 창 균<sup>2)</sup> · 이 현 우<sup>3)</sup> · 박 두 희<sup>†</sup>

Kwak, Dong-Yeop · Jeong, Chang-Gyun · Lee, Hyunwoo · Park, Duhee

**ABSTRACT :** In Korea, the probabilistically developed seismic hazard maps are used with deterministically derived seismic site coefficients in developing the design response spectrum of a specific site. Even though the seismic hazard maps and seismic site coefficients are incompatible, the current design code ignores such incompatibility. If the seismic hazard map and seismic coefficients are both developed in identical probabilistic framework, such problems can be solved. Unfortunately, the available method cannot be use to derive "true" probabilistic site coefficients. This study uses the ground motion time histories, which were developed as the result of a new probabilistic seismic hazard analysis in the companion paper, as input motions in performing one-dimensional equivalent linear site response analyses, from which the uniform hazard response spectra are generated. Another important characteristic of the hazard response spectra are that the uncertainties and randomness of the ground properties are accounted for. The uniform hazard spectra are then used to derive probabilistic site coefficients. Comparison of probabilistic and deterministically site coefficients demonstrate that there is a distinct discrepancy between two coefficients.

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

**요 지 :** 국내에서는 지반의 설계응답스펙트럼을 확률론적으로 생성한 지진재해도와 결정론적으로 유도된 지진계수를 적용하여 생성한다. 지진재해도와 지진계수는 호환되지 않지만, 현 설계기준은 이런 근본적인 비호환성을 무시하고 있다. 지진재해도와 지진계수를 동일한 확률론적 기반에서 생성한다면 이와 같은 문제를 극복할 수 있지만, 기존의 방법으로는 지진계수를 확률론적으로 생성할 수 없다. 본 논문에서는 동반논문에서 新 PSHA의 결과물로써 생성된 지진기록을 입력지진파로 활용하여 1차원 등가선형 지반응답 해석을 수행하였으며 이의 결과를 기반으로 등재해스펙트럼을 생성하였다. 등재해스펙트럼의 또 한가지 장점은 지반물성치의 불확실성과 임의성이 과학적으로 고려되었다는 점이다. 등재해스펙트럼은 나아가 확률론적인 지진계수를 도출하는데 활용되었다. 확률론적인 지진계수를 내진설계기준에서 제시된 지진계수를 비교한 결과, 확률론적으로 계산된 지진계수는 결정론적으로 계산된 결과와 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다.

**주요어 :** 확률론적인 지진계수, 확률론적 지진재해분석, 등재해스펙트럼, 설계응답스펙트럼

## 1. 서 론

동반논문에서는 기존의 확률론적인 지진재해분석(PSHA)의 결과를 재현하되, 이를 유한기간내에 발생하는 가상 지진시나리오와 이에 상응하는 인공지진기록의 합으로 나타내는 신 PSHA의 이론적 배경과 이를 적용한 결과에 대하여 설명하였다. 본 논문에서는 내진설계기준(II)(건설교통부, 1997)에서 제시한 지반분류별 지진계수의 적절성을 평가하였다. 이미 설명한 바와 같이, 기존의 지진계수는 결정론적

인 방법으로 계산되었으며(Borcherdt, 1994) 확률론적으로 계산된 지진재해도와 호환되지 않음에도 불구하고 이들은 지반분류별 설계응답스펙트럼을 생성하는데 사용되어 왔다. 이는 지진재해도와 지진계수를 동일한 확률론적 기반에서 생성하여 이들을 연계할 수 있는 이론적 틀이 없었기 때문이다. Park과 Hashash(2005)는 이와 같은 비호환성을 해결할 수 있는 PSHA를 제안하였으며 이는 미국의 Mississippi Embayment의 확률론적인 지진계수를 생성하는데 사용되었다. 하지만, Park과 Hashash(2005)는 지반물성치의 불확

1) 비회원, UCLA Dept. of Civil and Env. Eng. 박사과정

2) 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

3) 비회원, 현대건설주식회사 사원

† 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (E-mail : dpark@hanyang.ac.kr)

실성과 임의성을 고려하지 않았으며 대표 주상도와 동적곡선을 사용하였기에, 엄격한 의미에서 확률론적이라고 볼 수 없다. 본 논문에서는 확률론적인 지진재해도와 호환되며 동시에 지반물성치의 불확실성·임의성을 고려할 수 있는 새로운 PSHA 기법을 개발하였으며 동반논문에서 생성된 지진기록을 사용하여 확률론적인 지진계수를 유도하였다. 계산된 지진계수는 내진설계기준(II)(건설교통부, 1997)에서 제시한 결정론적인 지진계수와 비교하였다.

## 2. 내진설계기준(II)의 지반분류 및 지진계수

국내(건설교통부, 1997)에서 암반노두의 최대지반가속도(PGA)는 동반논문에서 설명한 지진재해도를 사용하거나 표 1과 같은 지진구역계수로서 정의한다. 지진구역으로 지진재해를 정의할 경우, 재현주기 500년 지진에 대한 지진구역계수는 구역 I과 II에 대하여 각각 0.11와 0.07이다(지역계수는 단위가  $g$ 인 가속도의 계수이다). 만약, 재현주기 500년 지진 이외의 재현주기를 적용할 경우, 표 2와 같은 위험도계수를 곱하여서 PGA를 계산한다.

이와 같은 PGA는 보통암반 노두에서는 적용 가능하나, 토층에서는 사용할 수 없다. 지진파가 기반암을 지나 토층을 통과하면서 일반적으로 가속도의 크기가 증폭되기 때문이다. 지진에 의한 지반운동은 지반의 특성에 따라 결정되므로 내진설계기준(II)은 지반진동의 특성을 반영할 수 있도록 지반을 분류하여 그에 따른 지진계수를 정의하도록 한다. 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지

표 1. 지진구역 분류 기준(건교부, 1997)

지진구역	행정구역	
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주
	도	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부
II	도	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도

표 2. 위험도 계수(건교부, 1997)

재현주기(년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도계수, I	0.4	0.57	0.73	1.00	1.40	2.00

표 3. 지반분류 기준(건교부, 1997)

지반분류	지반종류의 호칭	전단파 속도(m/s)
S <sub>A</sub>	경암지반	~1500
S <sub>B</sub>	보통암지반	760~1500
S <sub>C</sub>	매우 조밀한 토사 또는 연암지반	360~760
S <sub>D</sub>	단단한 토사지반	180~360
S <sub>E</sub>	연약한 토사지반	180~
S <sub>F</sub>	특성평가가 요구되는 지반	

반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 원칙적으로 지반을 다음의 표 2와 같이 6종으로 분류하며 분류기준은 상부 30m 토층의 평균 전단파속도, SPT-N치, 또는 비배수 전단강도이다. 표 2는 이 중 널리 사용되는 전단파속도에 의한 분류기준을 비교하였다.

내진설계기준(II)은 지반분류별 지반운동을 지진계수로서 정량화하며 이는 표 3과 같다. 지진계수는 각각 PGA와 1.0초 스펙트럴 가속도를 의미하는  $C_a$  및  $C_v$ 이며 이들은 지반의 특성에 따라서 크기가 결정된다. PGA와 마찬가지로 지진계수도 재현주기 500년 이외의 재현주기에 대해서는 표 2의 위험도 계수를 곱하여 계산한다.

## 3. S<sub>B</sub>지반(암반노두)에서의 등재해스펙트럼(UHRS)

국내에서 적용된 기존의 PSHA는 PGA에 대한 예측만이 가능한 반면, 新 PSHA는 실제 지진파형의 합으로 지진재해를 예측한다. 기존의 PSHA가 PGA를 지진재해곡선으로부터 계산한 것과 마찬가지로, 新 PSHA는 생성된 모든 지진파형의 가속도 응답스펙트럼을 계산한 후, 원하는 주기에서 재현주기별 스펙트럴 가속도를 계산할 수 있다. 일정 주기 범위에 대하여 동일한 재현주기에 대한 스펙트럴 가속도를 연결한 곡선을 등재해스펙트럼(UHRS, uniform hazard response spectrum)이라 한다. UHRS의 세부 계산절차는 그림 2에 도시하였다. UHRS의 의미는 설계응답스펙트럼과 유사하지만, 보다 정밀하게 응답특성을 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있다.

그림 3은 서울( $126.95^\circ \times 37.55^\circ$ ), 광주( $126.95^\circ \times 35.15^\circ$ ), 대전( $127.45^\circ \times 36.35^\circ$ ), 부산( $129.05^\circ \times 35.15^\circ$ )에서 계산된 UHRS와 설계응답스펙트럼을 비교하고 있다. 新 PSHA로 계산한 PGA 지진재해도는 내진설계기준(II)(건설교통부,

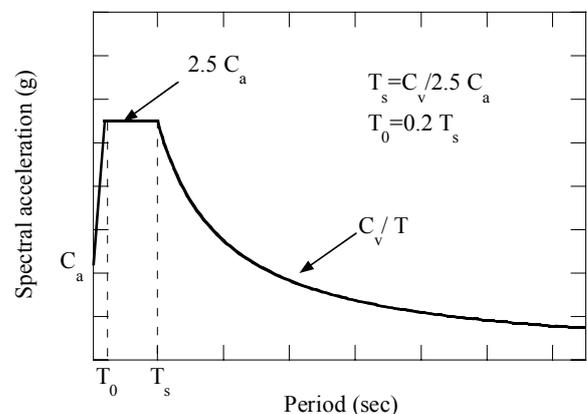


그림 1. 설계응답스펙트럼(건설교통부, 1997)

1997)와 일치하지는 않지만, 큰 차이는 없는 것을 보여주고 있다. 보통암반 노두를 의미하는 S<sub>B</sub> 지반에서 본 연구의 목적은 새로운 PGA 를 예측하는 것이 아니라 PGA 이외의 주기에서의 응답특성을 조사하여 전체적인 설계응답스펙트럼의 적절성을 평가하는 것이다. 설계응답스펙트럼과 UHRS의 형상을 비교하기 위해 네 개의 도시에서 계산된 UHRS의 PGA를 내진설계기준연구(II)(건설교통부, 1997)의 지진구역 I에 상응하도록 스케일링 하였고 이들을 설계응답스펙트럼과 비교해 보았다. PGA를 일치시킨 네 개 도시의 UHRS는 형상이 유사한 것으로 나타났다. 이는 PGA 자체는 지역별로 차이가 있지만 형상에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 설계응답스펙트럼과 UHRS를 비교한 결과, 단주기에서의 스펙트럴 가속도는 유사하나 약 0.15초

이상의 주기 영역에서는 설계응답스펙트럼이 UHRS보다 스펙트럴 가속도를 크게 예측하고 있음을 보여주고 있다.

일반적으로 지진 규모가 클수록 장주기 영역의 응답가속도가 커지는 경향이 있다. 국내의 설계응답스펙트럼은 미국 기준을 준용하였기에 중장주기 요소가 크게 예측된 것으로 판단된다. 한반도에서 발생할 수 있는 지진규모는 미국(특히 서부와 중부)에 비하여 월등하게 작으며 중소규모의 지진이 지배적이기 때문에 실제로 한반도에서 발생 가능한 지진파형을 이용하여 생성한 UHRS는 장주기 영역의 응답이 설계응답스펙트럼을 작게 예측하였다. 본 논문에서는 UHRS의 형상에 상응하는 새로운 지진계수를 제안하였으며 이는 표 5와 그림 4와 같다. 지진계수 C<sub>a</sub>는 PGA를 정의하는 값이므로 본 연구에서 변경되지 않았다. 단, 중장주기 영역의 형상을 결정하는 지진계수 C<sub>v</sub>는 UHRS형상과 일치하도록 결정하였으며(표 5), 이 값은 기존 C<sub>v</sub>와 비교 하여 약 40% 작은 값을 나타내었다.

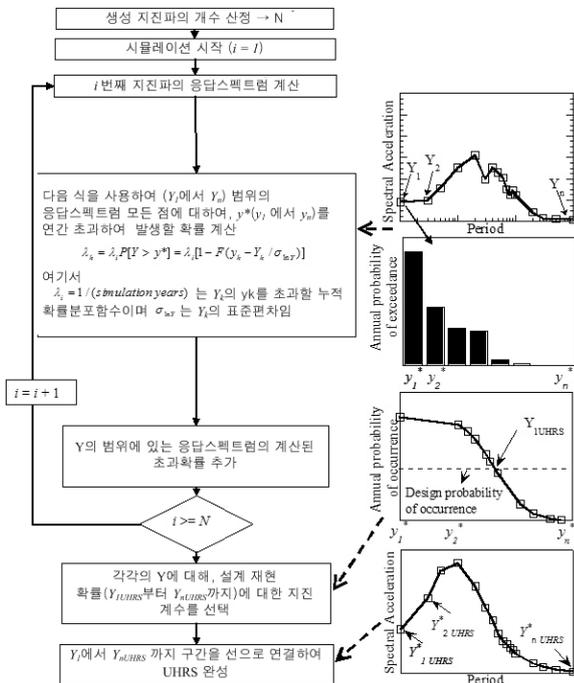


그림 2. UHRS 계산과정(Park, 2003)

#### 4. 지반분류별 확률론적인 지진계수

전절에서는 보통암반 노두 S<sub>B</sub> 지반에서의 새로운 C<sub>v</sub>를 제안하였다. 본 절에서는 나아가 S<sub>C</sub>, S<sub>D</sub>, 그리고 S<sub>E</sub> 지반에 대한 UHRS와 확률론적인 지진계수를 계산하였다. 확률론적인 지진계수는 동반논문에서 40,000년의 기간내에 생성한 지진시나리오에 상응하는 모든 지진기록에 대한 지반응답해석을 수행하여 UHRS를 생성하였으며, 이로부터 UHRS 맞춤형 지진계수를 산정하였다. 본 연구에서는 재현주기 500년 지진(PGA = C<sub>a</sub> = 0.11g)에 대해서만 지진계수를 계산하였다. 동반논문에서 기술된 바와 같이 PGA가 0.11g인 부지(128.95°, 36.15°)를 선정하여 이 부지 반경 300 km 내에 생성된 지진 시나리오에 대한 지진기록을 입력지진파로

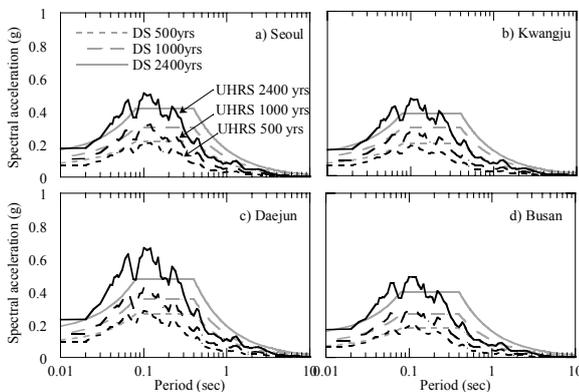


그림 3. 서울, 광주, 대전, 대구에서 계산된 UHRS와 설계응답스펙트럼의 비교

표 4. 지진계수 C<sub>a</sub>와 C<sub>v</sub> (건교부, 1997)

지반 분류	지진계수 C <sub>a</sub>		지진계수 C <sub>v</sub>	
	I	II	I	II
S <sub>A</sub>	0.09	0.05	0.09	0.05
S <sub>B</sub>	0.11	0.07	0.11	0.07
S <sub>C</sub>	0.13	0.08	0.18	0.11
S <sub>D</sub>	0.16	0.11	0.23	0.16
S <sub>E</sub>	0.22	0.17	0.37	0.23

표 5. S<sub>B</sub>에서 계산된 확률론적인 지진계수

	지진계수 C <sub>a</sub>			지진계수 C <sub>v</sub>		
	500년	1000년	2400년	500년	1000년	2400년
표준설계응답스펙트럼	0.11	0.154	0.22	0.11	0.154	0.22
제안된 설계응답스펙트럼	0.11	0.154	0.22	0.07	0.10	0.14

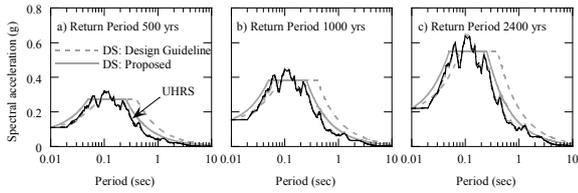


그림 4. 지진구역 I의 PGA로 정규화시킨 UHRS와 설계응답스펙트럼 비교

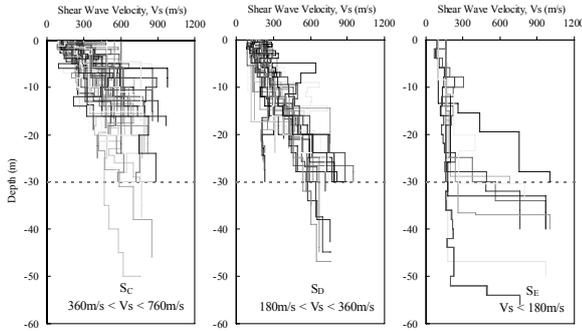


그림 5. 확률론적인 지진계수 유도에 사용된 지반의 전단파속도 주상도

표 6. 사용된 지반의 동적곡선

지반분류	연구자	비고
점토	(Dobry 등, 1987)	소성지수=15 소성지수 =30 소성지수 =50
	(Sun 등, 1988)	하한 평균 상한
	(김동수 등, 2001)	점토 매립토
총 8개		
모래	(Seed 등, 1970)	하한 평균 상한
	(김동수 등, 2001)	층적토 풍화토
총 5개		
자갈	(Seed 등, 1986)	자갈
총 1개		
암반	(Schnabel, 1973)	연암
총 1개		

표 7. 내진설계기준(II)의 지진계수와 확률론적인 지진계수의 비교

지반 분류	내진설계 기준연구 (II)	UHRS 기반		내진설계 기준연구 (II)	UHRS 기반	
	$C_a$	New $C_a$	New $C_a/C_a$	$C_v$	New $C_v$	New $C_v/C_v$
$S_C$	0.13	0.21	+64%	0.18	0.14	-22%
$S_D$	0.16	0.21	+34%	0.23	0.16	-30%
$S_E$	0.22	0.16	-26%	0.37	0.21	-43%

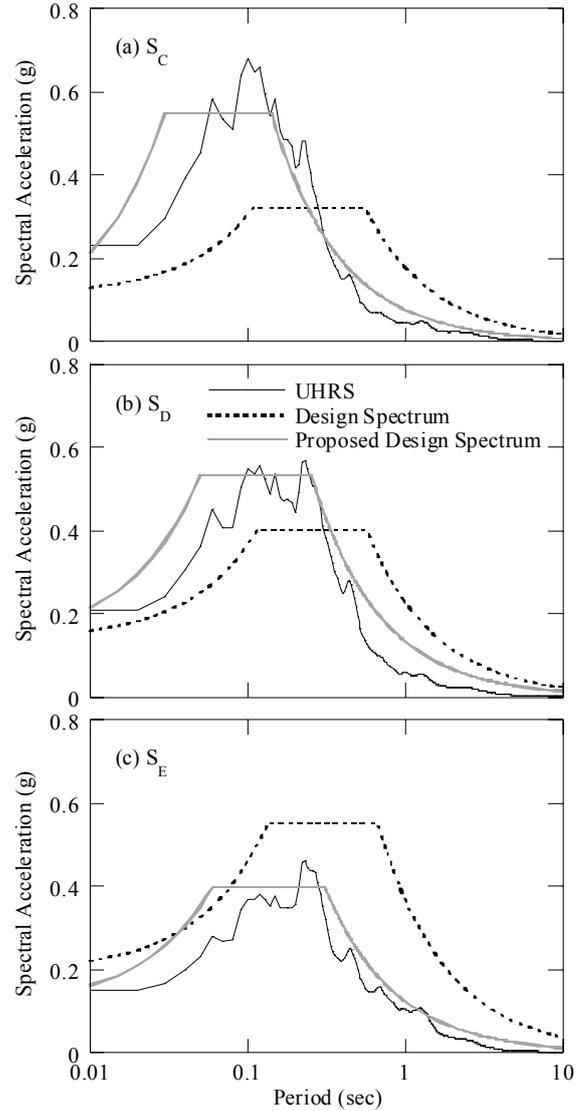


그림 6. 지반분류별 계산된 UHRS, 설계응답스펙트럼, 그리고 수정된 설계응답스펙트럼 비교

적용하여 등가선형 지반응답해석을 수행하였다. 지반응답 해석은 GEOSHAKE(Lee 등, 2008)를 이용하여 수행하였다.

진정한 의미의 확률론적인 지진계수를 유도하기 위해서는 지반물성치의 불확실성과 임의성을 고려해야 한다. 본 연구에서는 국내에서 조사된 지층 주상도와 국내의 동적곡선에 대한 데이터베이스를 구축하였으며 이들을 해석시 임의로 선정하도록 프로그래밍하였다. 그림 5는 지반분류별 구축된 전단파속도 주상도를 보여주고 있다.  $S_C$ ,  $S_D$ , 그리고  $S_E$  지반에는 각각 52, 36, 그리고 10개의 주상도가 사용되었다. 지반 동적곡선은 점토, 모래, 자갈, 암반으로 각각 분류하여 표 6과 같이 총 15개의 동적곡선이 적용되었다.

이와 같은 방법으로 계산된 UHRS는 그림 6과 같다. 그림 6은 UHRS와 내진설계기준연구(II)의 설계응답스펙트럼에는 상당한 차이가 있는 것을 보여주고 있다. 본 논문에서

는 UHRS 형상 맞춤형  $C_a$ 와  $C_v$ 를 각각 계산하였으며 이를 적용해서 생성된 수정된 설계응답스펙트럼도 그림 6에 도시하였다.  $S_C$ 와  $S_D$  지반에 대해서는 확률론적인  $C_a$ 는 기존의  $C_a$ 에 비하여 각각 +64%, +34% 크게 예측하는 것으로 나타난 반면,  $S_E$  지반에서는 26% 작게 예측하였다. 확률론적인  $C_v$ 의 경우,  $S_C$ ,  $S_D$ , 그리고  $S_E$  지반 모두에서 기존의  $C_v$ 에 비하여 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은  $S_B$ 와 동일하다.

본 연구에서 유도된 확률론적인 지진계수는 확률론적인 지진해분석과 호환되며, 지반물성치의 불확실성과 임의성을 고려할 수 있는 진보된 해석기법으로 개발되었다. 이와 같은 확률론적인 지진계수는 지반지진공학적으로 중요한 의미가 있으며 추후 널리 활용될 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

본 연구에서 동반논문에서 수행된 新 확률론적인 지진해분석의 결과인 40,000년에 상응하는 지진기록을 모두 입력지진파로 활용하며, 해석시 지반물성치의 임의성과 불확실성을 고려하기 위하여 구축된 지반주상도와 동적곡선 데이터베이스에서 임의로 이들을 적용하는 알고리즘을 적용하여, 결과적으로 등재해스펙트럼을 생성하는 프로세스를 개발하였다. 이 기법으로 생성된 등재해스펙트럼은 지진발생 빈도, 규모, 발생위치, 지진동 크기, 그리고 지반물성치의 불확실성이 모두 고려된 매우 과학적인 결과물이며 이는 결정론적인 응답스펙트럼과는 차별화된다. 본 연구에서는 생성된 등재해스펙트럼으로부터 확률론적인 지진계수를 도출하였으며 이를 내진설계기준에서 제시한 값과 비교하였다. 비교 결과, 확률론적으로 계산된 지진계수는 결정론적으로 계산된 결과와 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 알고리즘은 기존의 적용방법의 불합리성을 극복하는 과학적이며 합리적인 기법이며 추후 국내 설계기준의 업데이트에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 단, 본 연구는 제한된 계측지진기록을 기반으로 생성된 인공지진파만을 사용하였다는 단점을 가지고 있다. 이는 국내에서는 실 계측지진기록이 부족하기 때문이다. 추후, 국내 지진기록은 아니더라도 지진환경이 유사한 계측지진기록을 추가적으로 적용한 지진해분석을 수행하여 입력지진파의 영향을 규명해야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부 (1997), *내진설계기준연구(II)*, p. 493.
2. 김동수, 추연욱 (2001), 공진주시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성, *한국지반공학회논문집*, Vol. 17, No. 5, pp. 115~128.
3. Borcherdt, R.D. (1994), Estimates of Site-dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification), *Earthquake spectra*, Vol. 10, pp. 617~653.
4. 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 Vol. 2, pp. 51~87.
5. Lee, H.S., Yun, S.U., Park, D. and Kim, I.T. (2008), Estimation of Nonlinear Site Effects of Soil Profiles in Korea, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 24, No. 3, pp. 13~23.
6. Park, D. (2003), *Estimation of Non-linear Seismic Site Effects for Deep Deposits of the Mississippi Embayment*, Ph.D., University of Illinois, Urbana, p. 311.
7. 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.
8. Schnabel, P.B. (1973), *Effects of Local Geology and Distance from Source on Earthquake Ground Motions*, University of California, Berkeley, p. 280.
9. 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.
10. 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.
11. Sun, J.I., Goleosorkhi, 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, p. 48.

(접수일: 2009. 7. 14 심사일: 2009. 8. 20 심사완료일: 2009. 10. 27)