암반 지반의 재해도 스펙트럼에 기반한 토사지반 원전 부지의 등재해도 스펙트럼 평가 기법

Uniform Hazard Spectrum Evaluation Method for Nuclear Power Plants on Soil Sites based on the Hazard Spectra of Bedrock Sites

함대기¹⁾ · 서정문²⁾ · 최인길³⁾ · 이현미⁴⁾

Hahm, Daegi · Seo, Jeong-Moon · Choi, In-Kil · Rhee, Hyun-Me

국문 요약 >> 암반지반에 주어진 등재해도 스펙트럼에 상응하는 원전부지 토사지반에서의 등재해도 스펙트럼을 도출하기 위한 확률론적 방법론을 제시하였다. 이를 위해 지진 운동 및 지반의 불확실성을 고려한 지반응답 해석을 통해 토사지반 지표에서의 지진동 증폭계수를 산정하였다. 증폭계수는 가장 상관관계가 높은 지반운동의 스펙트럼 가속도 규모와의 회귀분석을 통해 계산되었다. 이 방법론을 적용하여 국내 KNGR (Korean Next Generation Reactor) 및 APR1400 (Advanced Power Reactor 1400) 원전의 포괄부지 지반 중 B1, B4, C1 및 C3 지반을 대상으로 등재해도 스펙트럼을 도출하였다. 등재해도 스펙트럼을 통해 지진동 발생 빈도 별 위험 주파수 대역을 평가하고 분석하였다. 이 결과는 원전의 종합적 지진리스크 평가 결과를 보다 합리적으로 개선하는 데에 활용될 수 있으며, 향후 다양한 종류의 토사지반에 대한 등재해도 스펙트럼을 평가하는 데에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 등재해도 스펙트럼, 확률론적 지진 재해도 평가, 불확실성, 지반응답 해석, 원전 부지

ABSTRACT >> We propose a probabilistic method to evaluate the uniform hazard spectra (UHS) of the soil of nuclear power plant(NPP) sites corresponding to that of a bedrock site. To do this, amplification factors on the surface of soil sites were estimated through site response analysis while considering the uncertainty in the earthquake ground motion and soil deposit characteristics. The amplification factors were calculated by regression analysis with spectral acceleration because these two factors are mostly correlated. The proposed method was applied to the evaluation of UHS for the KNGR (Korean Next Generation Reactor) and the APR1400 (Advanced Power Reactor 1400) nuclear power plant sites of B1, B4, C1 and C3. The most dominant frequency range with respect to the annual frequency of earthquakes was evaluated from the UHS analysis. It can be expected that the proposed method will improve the results of integrated risk assessments of NPPs rationally. We expect also that the proposed method will be applied to the evaluation of the UHS and of many other kinds of soil sites.

Key words Uniform hazard spectrum, Probabilistic seismic hazard assessment, Uncertainty, Site response analysis, Nuclear power plant sites

1. 서론

Regulatory Guide (Reg. Guide) 1.60 - Design Response

¹⁾ 정회원·한국원자력연구원, 선임연구원
(교신저자: dhahm@kaeri.re.kr)

²⁾ 정회원·한국원자력연구원, 책임기술원

³⁾ 정회원·한국원자력연구원, 책임연구원

⁴⁾ 정회원·한국원자력연구원, 연구생

본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2012. 3. 26 / 수정일 1차: 2012. 5. 3, 2차: 2012. 5. 29 /
게재확정일 : 2012. 5. 30)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants 이후 원전 구조물의 내진설계는 표준 설계 응답 스펙트럼(Standard Design Response Spectra)의 형태로 주어진 설계 지진에 기반하여 이루어져 왔다.¹⁾ 이후 Reg. Guide 1.165 - Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion을 통하여 확률론적 지진 재해도 분석(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)에 의한 안전정지 지반운동(Safe Shutdown Earthquake Ground Motion, SSE) 개념이 도입되면서 설계 지반운동 평가 시 기존의 결정론적 방법으로부터 확률론적 방법으로의 전환이 이루어지기 시

작하였다.⁽²⁾ 최근에는 Reg. Guide 1.208 - A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion이 발효됨과 함께 성능기반 설계(Performance-Based Design) 기법이 도입되면서 설계 지반운동으로서 연간 10^{-5} 발생 빈도의 등재해도 스펙트럼(Uniform Hazard Spectrum, UHS)을 사용할 것이 권장되고 있다.⁽³⁾

이에 따라 국내 원전의 내진설계를 위한 설계 지반운동의 설정에 있어서도 향후에는 원전 부지의 등재해도 스펙트럼이 요구될 것이다. 원전 부지의 등재해도 스펙트럼 평가를 위해서는 지반의 감쇄식 정보가 필요하다. 그러나 대부분의 국내 지반 감쇄식은 암반지반을 대상으로 하여 정의되어 있다.^(4,6) 따라서 일반적인 원전 부지의 설계 지진동 규모를 평가하기 위해서는 암반지반에 대하여 도출된 등재해도 스펙트럼을 기반으로 하여 토사지반 지표에서의 등재해도 스펙트럼을 도출할 수 있는 기법이 필요하다. 이는 토사지반의 비선형성을 고려한 부지 지반응답 해석을 통하여 가능하다.

지반의 비선형성을 고려한 지반응답 해석법으로는 결정론적 기법인 해석적 방법⁽⁷⁾과 불확실성을 고려한 확률론적 방법이 존재한다.^{(8),(9)} 지반응답 해석 시에는 실제로 지층(Soil Deposits)의 구조·구성 및 재료상수의 본질적인 불확실성 특성과 지층에 대한 구성 모델의 불확실성(지반 강성, 감쇠 등), 그리고 토사의 비선형 거동에 따른 불확실성 등 매우 다양한 불확실성 인자들이 존재하게 된다.⁽¹⁰⁾ 따라서 최근에는 많은 국내·외 관련 규정 및 기준을 통하여 지반응답 해석 시 지반의 변동성을 고려한 확률론적 해석 기법의 도입을 추천하고 있다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

이 연구에서는 지반의 불확실성을 고려한 지반응답 해석을 통해 토사지반 지표에서의 지진동 증폭계수(Amplification Factor)를 산정하였으며, 이로부터 암반지반에 주어진 등재해도 스펙트럼에 상응하는 토사지반에서의 등재해도 스펙트럼을 제시하기 위한 확률론적 방법론을 제시하였다. 이 방법론을 적용하여 국내 KNGR (Korean Next Generation Reactor) 및 APR1400 (Advanced Power Reactor 1400) 원전의 포괄부지 지반을 대상으로 토사지반에서의 등재해도 스펙트럼을 도출하였다.

확률론적 지반응답 해석과 관련한 연구에서는 Faccioli et al.에 의해 불확실성을 고려하여 지반에 따른 지진동의 증폭 효과를 평가하기 위한 연구가 수행된 이후,⁽⁸⁾ 많은 연구자들에 의한 후속 연구들이 이어져 왔다.^{(9),(13-19)} 이 연구가 기존의 확률론적 지반응답 해석 연구들에 비하여 가지는 몇 가지 차별성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 이 연구는 지반 운동의 불확실성과 지반 물성치의 불확실성 특성을 동시에 고려한다.
- 토사지반 지표에서의 지진동 응답을 평가하기 위한 암반지반에서의 지진동 기록으로는 미국, 일본, 터키 등 세계 각지에서 발생한 15개 암반지반지진동 기록을 사용하였다.
- 지층의 비선형 지반응답 거동을 모사할 수 있는 해석 소프트웨어를 적용하였다.
- 지반 물성치의 불확실성을 고려함에 있어, 입력 변수값을 추출(Sampling) 할 때에는 적은 추출 횟수로도 합리적인 불확실성 평가가 가능한 Latin Hyper-cube Sampling (LHS) 기법을 적용하였다.
- 지반 물성치의 불확실성 특성을 고려한 입력 변수를 추출하고 자동적으로 해석 소프트웨어의 입력문을 생성하여 줌으로써 불확실성 평가 작업의 효율성을 높이고 반복 작업에 의한 인적 오류를 최소화 할 수 있는 전처리 소프트웨어를 적용하였다.
- 각 주파수 대역에서의 지진동 증폭계수를 산정함에 있어서, 지반운동의 스펙트럴 가속도 규모와 증폭계수 간의 상관관계가 가장 유의할만한 수준에 있기 때문에 이에 대한 회귀분석(Regression Analysis)을 통하여 증폭계수를 산정하였다.

2. 입력 지반운동 선정

불확실성을 고려한 토사지반의 등재해도 스펙트럼 평가를 위해서는 지반운동에 대한 불확실성도 함께 고려하는 것이 바람직하다. 지반운동의 불확실성을 고려하기 위하여 기반암에서 기록된 15개의 입력지진동, 즉 미국, 일본, 터키 등에서 발생한 강진기록 15개(규모 5.9~7.4, 진앙거리 0.6~91.4km, PGA 0.015~0.978g)로 구성된 지반운동 Database를 선정하였다. 선정된 지반운동 Database의 각 발생연월일, 규모, 진앙거리, PGA(Peak Ground Acceleration), PGD(Peak Ground Displacement) 등 주요 특징은 표 1에 정리된 바와 같다. 선정된 지반운동 Database의 주파수 성분 특성을 분석하기 위하여 5% 감쇄 가속도 응답 스펙트럼을 도시하면 그림 1과 같다. 그림에서 나타난 평균 및 중앙값 그래프를 통해 볼 수 있듯이 구성된 지반운동 Database는 약 1.5Hz의 저주파수 대역부터 20Hz의 고주파수 대역까지 고른 주파수 대역 성분을 포함하고 있음을 알 수 있다.

〈표 1〉 입력 지반운동 Database의 특성

번호	지진	발생연월일	규모	지진 관측소	거리(km)	PGA(g)	PGV(cm/s)
1	N. Palm Springs	1986/07/08	6.0	Hurkey Creek Park	34.9	0.187	9.1
2	Parkfield	1966/06/28	6.1	Temblor pre-1969	9.9	0.357	21.5
3	Loma Prieta	1989/10/18	6.9	LGPC	6.1	0.563	94.8
4	Victoria, Mexico	1980/06/09	6.1	Cerro Prieto	34.8	0.621	31.6
5	Whittier Narrows	1987/10/01	6.0	Malibu-Las Flores	46.3	0.065	2.3
6	Northridge	1994/01/17	6.7	LA-Chalon Rd	23.7	0.185	27.1
7	Northridge	1994/01/17	6.7	Villa Park-Serrano Ave	79.5	0.103	4.3
8	San Fernand	1971/02/09	6.6	Upland-San Antonio	58.1	0.079	3.5
9	Kobe, Japan	1995/01/16	6.9	KJMA	0.6	0.599	74.3
10	Kokaeli,Turkey	1999/08/17	7.4	Goynuk	35.5	0.132	8.8
11	Saguenay	1988/11/25	5.9	ECTN:A54	91.4	0.015	0.3
12	Saguenay	1988/11/25	5.9	GSC Site 17	70.3	0.169	1.6
13	Morgan Hill	1984/04/27	6.2	Gilroy Array #6	11.8	0.465	12.3
14	Morgan Hill	1984/04/27	6.2	Corralitos	22.7	0.155	7.5
15	Nahanni	1985/12/23	6.8	MACKENZIE, ST1	6.0	0.978	46

〈그림 1〉 입력 지반운동의 가속도 응답 스펙트럼(5% 감쇠)

3. 해석 대상 부지 선정 및 지진동 증폭계수 도출

해석 대상 부지로는 KNGR 및 APR 1400의 포괄부지 종류 중 100ft 지점에 경암 지반이 위치하는 Category B의 B1 및 B4, 200ft 지점에 경암 지반이 위치하는 Category C에서는 C1 및 C3의 4개 토사지반 부지를 선정하였다. 이

는 포괄부지 지반종류 중 상대적으로 견고한 지반임에 따라 지반운동 증폭 효과가 적을 것으로 판단되는 Category A와 지반의 건전성에 비추어 현실적으로 원전 건설이 이루어지지 않을 것으로 평가되는 Category D를 제외한 지반 중 경향성을 파악하기에 적합한 부지를 선정할 결과이다. 각 대상 부지의 전단파 속도(Shear Wave Velocity) 주상도(Profile)를 도시하면 그림 2와 같다. B1 및 C1 지반은 불연속면이 포함되지 않은 연속 지반이며, B4 지반은 기초가 위치하는 53ft(16.2m) 위치에, C3 지반은 100ft(30.5m) 위치에 각각 불연속면이 존재한다. 전단파 속도 1,000fps(304.8m/s)인 지반은 모래/자갈(Sand/Gravel)로 구성되어있으며, 2,000fps(609.6m/s)인 지반은 풍화암(Weathered Rock)으로 구성되어 있다.

지반응답 해석을 위한 소프트웨어는 ProShake (Ver.1.12) 프로그램을 사용하였다.⁽²⁰⁾ 이 프로그램은 지층 구성 물질의 계수 감쇠 곡선(Modulus Reduction Curve), 감쇠비 곡선

〈그림 2〉 해석 대상 부지의 전단파 속도 주상도

(a) 모래/자갈 지층

(b) 풍화암 지층

〈그림 3〉 지층 별 계수 감쇠 곡선 및 감쇄비 곡선 입력

(Damping Curve), 단위 중량(Unit Weight) 및 전단파 속도를 입력으로 하여 지층의 비선형 거동을 고려한 응력-변형률 곡선, 응답 스펙트럼 및 그 외 다양한 인자들의 주상도를 출력으로 제공한다. 자갈/모래 및 풍화암 층의 계수 감쇠 곡선 및 감쇄비 곡선은 Idriss et al.에 의해 제안된 그림 3의 곡선을 사용하였다.^{(21),(22)}

기존의 결정론적 방법을 적용하여 각 해석 대상 부지에 대한 지진동 증폭계수 값을 15개 입력 지반운동에 대하여 도출하였다. 기존 연구 결과에 의하면, 지진동 증폭계수는 지반운동의 특성을 표현하는 여러 인자들 중 스펙트럴 가속도 값($S_a(f)$)에 대하여 가장 민감한 상관관계를 가지는 것으로 보고된 바 있다.⁽⁹⁾ 따라서 이 연구에서는 지진동 증폭계수($AF(f)$)를 기반암에서의 스펙트럴 가속도($S_a^r(f)$)에 대한 지표면에서의 스펙트럴 가속도($S_a^s(f)$)의 비로서 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$AF(f) = S_a^s(f) / S_a^r(f) \quad (1)$$

각 해석 대상 부지에 대한 주파수 대역에 따른 지진동 증폭계수 그래프는 그림 4에 나타난 것과 같다. B1과 C1 지반은 불연속면이 없는 연속 지반이기 때문에 한 부분의 첨두(Peak) 증폭 주파수 대역이 존재하는 데 반하여, B4와 C3 지반은 불연속면이 있는 두 종류의 지층으로 이루어져 각각 두 개의 첨두 증폭 주파수 대역이 존재함을 볼 수 있다. B1 지반은 약 2~3Hz, B4 지반은 약 3~4Hz 대와 10Hz 대역에서 증폭이 가장 크게 일어나고 있다. C1 지반은 B1 지반에

(a) B1 지반

(b) B4 지반

(c) C1 지반

(d) C3 지반

〈그림 4〉 지반종류 별 지진동 증폭계수

비하여 경암 지반이 더 깊이 위치하고 있기 때문에 상대적으로 유연한 지반이라 할 수 있다. 따라서 최대 증폭이 발생하는 주파수 대역도 B1 지반보다 낮은 1~1.5Hz에 위치하고 있다. C3 지반도 B4 지반에 비하여 상대적으로 낮은 1.5~2Hz 대역과 4~5Hz 대역에서 가장 큰 증폭이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 경향을 통하여 볼 때, 이 연구에서 사용된 지층 모델과 해석 소프트웨어 및 지진동 증폭계수는 해석 대상 지반의 물리적 특성을 합리적으로 반영하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

4. 불확실성을 고려한 지반 모델링

지반의 불확실성을 고려한 확률론적 지진재해도 평가를 위해서는 많은 수의 반복 해석이 필요하게 되므로, 효율적인 불확실성 변수(Random Variables)의 추출 기법을 도입하는 것이 바람직하다. 이 연구에서는 적은 추출 횟수로도 상대적으로 정확한 불확실성 평가가 가능한 것으로 알려진 LHS 기법을 적용하여 불확실성 변수들을 추출하였다.⁽²³⁾

또한 반복 작업의 효율성을 높이고 단순 반복 작업에서 개입될 수 있는 인적 오류의 발생 가능성을 최소화하기 위하여, 한국원자력연구원에서 개발된 MOSAQUE 소프트웨어를 불확실성 해석을 위한 전처리기로 사용하였다.⁽²⁴⁾ 이 프로그램은 불확실성 변수의 확률분포 특성에 따라 입력 변수를 추출하고 이를 반영한 해석 프로그램 입력문까지 자동으로 생성하여 줄 뿐만 아니라 추출된 불확실성 변수 조합의 확률밀도함수도 바로 확인할 수 있는 기능을 가지고 있어, 해석 프로그램의 반복 실행을 통한 불확실성 해석 과정의 효율성 및 정확성을 대폭 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.

지반의 불확실성을 고려하기 위하여, 지반의 동적 거동에 있어서 주요한 인자일 뿐만 아니라 해석 소프트웨어의 주요 입력변수로 사용되는 전단파 속도(V_s)와 단위 중량(γ)을 불확실성 변수로 선정하였다. 각 불확실성 변수의 변동계수(Coefficient of Variance, COV) 등 확률분포 특성은 관련 기준으로부터 가정하였으며,⁽¹⁰⁻¹²⁾ 이를 표 2에 나타내었다. 전단파 속도와 단위 중량은 서로 독립적인 확률변수인 것으로 가정하였다.

불확실성 변수 추출 결과의 일례로서 C3 지반에 대하여 30개의 불확실성 변수를 추출하여 전단파 속도에 대한 각 입력 변수 조합의 주상도를 도시하면 그림 5와 같으며, 모래/자갈 지층 및 풍화암 지층의 단위 중량 추출 값 분포를 확인하기 위한 히스토그램은 그림 6과 같다. 각 그림을 통하여 볼 때, 이 연구에서 사용된 입력변수 추출 기법을 적용하여

〈표 2〉 지반 불확실성 변수의 확률분포 특성

불확실성 변수	변동계수(COV)	확률분포
전단파 속도	0.5	대수정규분포
단위 중량	0.5

〈그림 5〉 추출된 전단파 속도 주상도(C3 지반)

〈그림 6〉 추출된 단위 중량 히스토그램(C3 지반)

추출된 불확실성 변수 조합은 목표로 하는 확률밀도함수에 근사하게 근접하고 있음을 알 수 있다.

5. 지진동 증폭계수 회귀분석 및 UHS 도출

앞서 언급하였다시피, 지진동 증폭계수는 지반운동의 특

성을 표현하는 여러 인자들 중 스펙트럴 가속도 값과 가장 밀접한 상관관계를 보인다. 따라서 부지 지반 종류별로 기반암에서의 스펙트럴 가속도 값에 따른 지진동 증폭계수 값을 Plotting 하고 이를 회귀분석하면 기반암 스펙트럴 가속도와 지진동 증폭계수 간의 관계식을 도출할 수 있다. 그림 7은 지반종류 B4 및 C3에서의 주파수별 회귀분석을 통해 지진동 증폭계수를 도출한 결과이다. B4 지반의 경우 50Hz의 고주파수 대와 0.2Hz의 저주파수 대에서 가장 뚜렷한 상관

관계를 가지는 것으로 나타났으며, 5Hz 및 1Hz대에서는 매우 약한 상관관계를 가지는 것을 볼 수 있다. C3 지반의 경우에는 50Hz, 5Hz의 고주파수 대와 0.2Hz의 저주파수 대에서 상대적으로 높은 상관관계를 보였으며, 2Hz 대에서는 매우 낮은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. B1 및 C1 지반에 대해서도 동일한 과정을 통하여 기반암의 스펙트럴 가속도에 따른 주파수별 지반운동 증폭계수를 도출할 수 있다. 주어진 기반암 UHS⁽²⁵⁾에 대하여 주파수에 따른 지진동

(a) B4 지반

(b) C3 지반

〈그림 7〉 기반암 스펙트럴 가속도와 지진동 증폭계수 간의 회귀분석 결과

(a) 발생 빈도 10^{-4} , B1 & B4 지반

(c) 발생 빈도 10^{-5} , B1 & B4 지반

(b) 발생 빈도 10^{-4} , C1 & C3 지반

(d) 발생 빈도 10^{-5} , C1 & C3 지반

〈그림 8〉 지반종류 및 연간 빈도수 별 등재해도 스펙트럼

증폭계수 값을 회귀분석 결과에 따라 적용하면 토사지반 지표에서의 UHS를 도출할 수 있다. 그림 8은 각 연간 빈도수 (Annual Frequency) 별로 주어진 기반암 UHS에 대한 토사지반의 지반 종류별 UHS를 도출한 결과이다. 이를 통하여 볼 때, B1 지반의 경우 B4 지반에 비하여 1Hz 부근에서 큰 증폭이 발생하였으며, 낮은 빈도(10^{-5}) 지진동의 경우에 전반적으로 증폭되는 양이 적어지는 것을 확인할 수 있었다. B4 지반은 1Hz 이하의 저주파수 대역에서는 B1 지반에 비하여 증폭의 폭이 크지 않았으나, 5Hz 이상의 고주파수 대역에서는 매우 큰 증폭이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이에 대한 원인은 그림 4에서 확인할 수 있는 지층의 고유주파수 대역으로부터 유추해 볼 수 있다. 즉, B4 지반보다 상대적으로 유연한 지반이라고 할 수 있는 B1 지반의 경우에는 저주파수 대역에서 높은 증폭이 발생하는 반면, 상대적으로 견고한 지반인 B4 지반에서는 고주파수 대역에서 높은 증폭이 발생한 것이다.

C1 지반의 경우 0.5Hz 및 1Hz의 저주파수 대역에서 큰 증폭이 발생하였으며, 고진동수(5Hz 이상) 낮은 빈도(10^{-5}) 지진동의 경우에는 오히려 감쇄 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. C3 지반은 마찬가지로 0.5Hz 및 1Hz의 저주파수 대역

에서 큰 증폭이 발생하였으며, 거의 모든 주파수 대역 및 지진동 발생 빈도에서 C1 지반에 비하여 상대적으로 큰 증폭이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과도 그림 4에 나타난 지층의 고유주파수 대역 경향과 일치하는 것이라 할 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 지반 및 지반운동의 불확실성을 고려하여 지반응답 해석을 수행하고, 이로부터 토사지반 지표에서의 지진동 증폭계수를 산정하였다. 이를 통해 암반지반에 주어진 재해도 곡선 및 등재해도 스펙트럼을 기반으로 토사지반 지표에서의 재해도 곡선 및 등재해도 스펙트럼을 도출할 수 있는 방법론을 제시하였다. 해석 대상 예제로서 KNGR, APR1400 포괄부지 지반의 지반종류 B1, B4, C1, C3 지반을 선택하고, 각 지반에 대한 등재해도 스펙트럼을 도출하였다. 이상의 등재해도 스펙트럼 도출 결과를 분석함으로써 지진동 발생 빈도 별 위험 주파수 대역을 평가하고 분석할 수 있었다.

이 연구 결과를 통하여 토사지반에서의 등재해도 스펙트럼을 확률론적으로 평가할 수 있는 체계적인 기법을 갖추게

되었다고 할 수 있으며, 이를 이용하여 향후 다양한 종류의 토사지반에 대한 등재해도 스펙트럼을 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 이러한 결과들은 원전의 종합적 지진리스크 평가 결과를 보다 합리적인 값으로 개선하는 데에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 본 연구를 가능케 한 교육과학기술부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. U.S. AEC, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, Revision 1, Regulatory Guide 1.60, U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1973.
2. U.S. NRC, Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.165, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 1997.
3. U.S. NRC, A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.208, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 2007.
4. Baag, C.E., "Seismic wave attenuation in the Korean peninsula," *International Workshop & Seminar on Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, Nov. 17-20, 1997.
5. Junn, J.G., Jo, N.D., and Baag, C.E., "Stochastic prediction of ground motions in southern Korea," *Geosciences Journal*, Vol. 6, No. 3, 203-214, 2002.
6. Lee, J.M., A study on the characteristics of strong ground motions in southern Korea, KINS/HR-422, Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 77, 2002.
7. Schnabel, P.B., Seed, H.B., and Lysmer, J., "Modification of seismograph records for effect of local soil conditions," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 62, 1649-1664, 1972.
8. Faccioli, E., "A stochastic approach to soil amplification," *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 66, No. 4, 1277-1291, 1976.
9. Bazzurro, P., Probabilistic Seismic Demand Analysis, Ph.D. Thesis, Stanford University, 1998.
10. U.S. NRC, Seismic system analysis, Revision 3, *Standard Review Plan 3.7.2*, NUREG-0800, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 2007.
11. ASCE, Seismic analysis of safety-related nuclear structure and commentary, Standard No. 004-98, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 1999.
12. 대한전기협회, 지반-구조물 상호작용 해석, STB 3317, KEPIC ST 구조충치, Korea Electric Power Industry Code, 서울, 2000.
13. Whitman, R.V., and Protonotarios, J.N., "Inelastic response to site-modified ground motions," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 103, No. GT10, 1037-1053, 1977.
14. Costantino, C.J., Miller, C.A., and Heymsfield, E., "Site specific seismic hazard calculations at deep soil sites," *Proceedings of 4th DOE Natural Phenomena Hazards Mitigation Conference*, LLNL CONF-9310102, 199-205, 1993.
15. Silva, W.J., "Factors controlling strong ground motions and their associated uncertainties," *Seismic and Dynamic Analysis and Design Considerations for High Level Nuclear Waste Repositories*, ASCE, 132-161, 1993.
16. Electric Power Research Institute (EPRI), Guidelines for site specific ground motions, Rept. TR-102293, Vol. 1-5, Palo Alto, CA, 1993.
17. Hwang, H.H.M., and Huo J.R., "Generation of hazard-consistent ground motion," *International Journal of Soil dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 13, No. 6, 377-386, 1994.
18. Brookhaven National Laboratory (BNL), Description and validation of the stochastic ground motion model, submitted to Brookhaven National Laboratory, Associated Universities, Inc. Upton, New York, 1997.
19. Lee, R., Silva, W., and Cornell, A., "Alternatives in evaluating soil- and rock-site seismic hazard (abs)," *Seismological Research Letters*, Vol. 69, No. 1, 81, 1998.
20. EduPro Civil Systems, *ProShake: Ground Response Analysis Program*, User's Manual, EduPro Civil Systems, Inc., Washington, 2003.
21. Seed, H.B., and Idriss, I.M., Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1970.
22. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K., "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 11, 1016-1032, 1986.
23. Iman, R.L., and Conover, W.J., "Small sample sensitivity analysis techniques for computer models with an application to risk assessment," *Communications in Statistics - Theory and Methods*, Vol. 9, No. 17, 1749-1842, 1980.
24. Han, S.H., Lim, H.G., and Cho, Y.J., "MOSAQUE - A Software for Estimating Probabilistic Uncertainty of Safety Analysis using Computerized Simulation Models," *ESREL 2010 Annual Conference*, European Safety and Reliability Association, Sep. 6-9, 2010.
25. Rhee, H.-M., Seo, J.-M., Choi, I.-K., and Hahm, D., "A Study on the Site Response Spectrum for Ulchin Region," *Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Gyeongju, Korea, Oct. 27-28, 2011.