

중·저준위 방사성 폐기물 처분장의 지진위험도 평가를 위한 지반운동스펙트럼 산정

Development of Ground Motion Response Spectrum for Seismic Risk Assessment of Low and Intermediate Level Radioactive Waste Repositories

김민규¹⁾ · 이현미²⁾ · 이경미³⁾

Kim, Min Kyu · Rhee, Hyun Me · Lee, Kyoung Mi

국문 요약 >> 본 연구에서는 중저준위 방사성 폐기물 처분장의 지진위험도 평가를 위한 평가용 입력지반운동을 도출하였다. 방사성 폐기물 처분장 부지를 대상으로 한 지진재해도 평가를 수행하여 재해도 곡선을 도출하였으며 도출된 재해도 곡선을 바탕으로 등재해도 스펙트럼을 산정하였다. 등재해도 스펙트럼에 부합하는 30개의 인공지진파를 생성하여 해당 부지의 지반을 대상으로 한 부지응답해석을 수행하였다. 대상부지에 대한 부지응답해석을 통하여 지표면과 처분동굴의 상단과 하단부에서의 입력지진운동을 구하였고 각각의 평균값을 구하여 방사성 폐기물 처분장의 리스크 평가를 위한 평가용 응답스펙트럼을 제시하였다.

주요어 방사성 폐기물 처분장, 평가용 입력지반운동, 등재해도 스펙트럼, 부지응답해석

ABSTRACT >> In this study, a ground motion response spectrum for the seismic risk assessment of low and intermediate level radioactive waste repositories was developed. For the development of the ground motion response spectrum, a probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) was performed. Through the performance of a PSHA, a seismic hazard curve which was based on a seismic bed rock was developed. A uniform hazard spectrum was determined by using a developed seismic hazard curve. Artificial seismic motions were developed based on the uniform hazard spectrum. A seismic response analysis was performed on the developed artificial seismic motion. Finally, an evaluation response spectrum for the seismic risk assessment analysis of low and intermediate level radioactive waste repositories was developed.

Key words Nuclear waste repository, Evaluation response spectrum, Uniform hazard spectrum, Seismic response analysis

1. 서론

원자력발전소를 안전하게 이용하기 위해서는 발전소의 안전성 만큼이나 중요한 것이 방사성 폐기물 처분장의 안전성이라고 할 수 있다. 특별히 방사성 폐기물 처분장의 지진에 대한 안전성 확보는 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 중저준위 방사성 폐기물 처분장의 안전성 평가를 위한 평가용 입력지진을 도출하는 것을 그 목적으로 하였다. 국내 중저준위 방사성 폐기물 처분장 부지를

대상으로 하여 방사성 폐기물 처분장에서 가장 중요한 구조물인 처분동굴의 지진안전성 평가를 위한 평가용 입력지진을 도출하였다. 지진재해도 분석 결과로 얻어지는 재해도곡선은 보통암 기준의 지진운동이므로 처분동굴의 지진위험도 평가를 위해서는 암반내에서의 입력운동으로 변화시켜 주어야 한다. 따라서 우선적으로 방사성 폐기물 처분장 부지를 대상으로 하여 지진재해도 평가를 수행하였다. 지진재해도 평가의 신뢰성을 높이기 위해서는 전문가 패널을 구성하여 재해도 평가의 입력자료를 도출하여야 하지만 본 연구에서는 그와 같은 절차를 생략하고 과거에 월성원전 부지를 대상으로 한 지진재해도 평가시 사용하였던 입력자료 가운데 가장 타당성이 높은 것으로 평가되는 입력자료를 사용하였다.⁽¹⁾ 도출된 지진재해도를 이용하여 대상 부지에 대한 등재해도 스펙트럼을 작성하였다. 지진위험도 평가를 위한 평가용 입력지진으로는 등재해도 스펙트럼을 사용하는 것이

¹⁾ 정희원 · 한국원자력연구소, 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사
(교신저자: minkyu@kaeri.re.kr)

²⁾ 정희원 · 한국원자력연구소, 석사후 연구원

³⁾ 국립방재연구소, 위촉연구원, 이학박사

본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 6. 25 / 수정일 1차: 2010. 9. 4, 2차: 2011. 1. 27 / 게재확정일 : 2011. 1. 27)

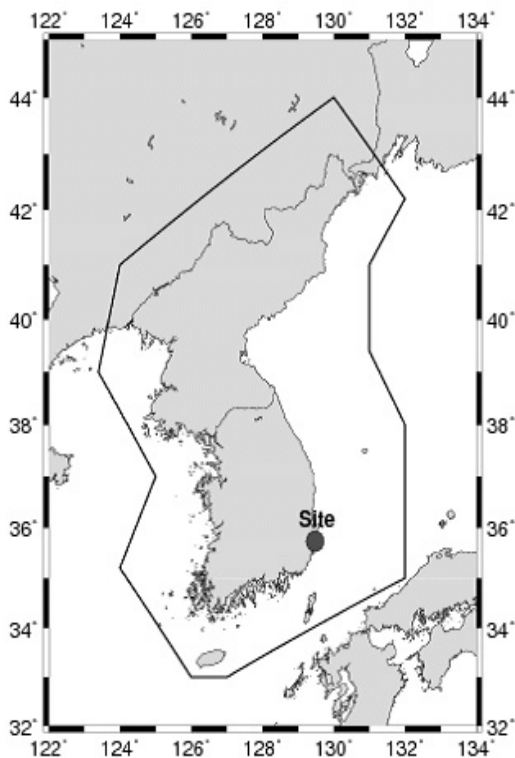
전체 진동수 구간에서 동일한 초과확률을 갖기 때문에 적절한 것으로 판단된다.⁽²⁾ 도출된 등재해도 스펙트럼을 만족시키는 30개의 인공지진파를 생성하였다. 생성한 인공지진파를 이용하여 해당부지의 지반조건에 대한 부지응답해석을 수행하였으며 그 결과를 이용하여 처분동굴의 평가용 입력 지반운동을 제시하였다.

2. 확률론적 지진재해도평가

확률론적 지진재해도평가(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)는 미래의 특정기간에 특정 장소에서 지진에 의해 유발된 다양한 지진동 수준의 초과확률 또는 빈도를 추정하는 기법이며 그 결과로서 지진재해도 곡선을 도출하게 된다. 본 연구에서는 해당 부지에 대한 지진재해도 평가를 통해서 방사성 폐기물 처분장부지의 지진재해도 곡선을 도출하였다.

2.1 지진원과 입력변수

대상부지의 기반암 재해도 곡선을 선정하기 위해서는 지진원과 입력변수가 결정되어야 한다. 본 연구에서는 그림 1에서 제시한 것과 같은 한반도 전체를 하나의 지진원으로 고려하는 면적지진원을 사용하였다.



〈그림 1〉 중·저준위 방사성 폐기물 처분장의 지진재해도 평가를 위한 면적 지진원도

〈표 1〉 지진재해도 평가에 사용한 입력변수

Parameter	Value
<i>a</i> -value	5.5±0.5
<i>b</i> -value	0.8±0.1
M_{Max}	6.7±0.5
Focal depth (km)	10±5

특정 지진원에 대한 규모-재발주기 모델은 다양한 지진규모의 발생빈도를 결정하게 되며, 가장 일반적인 모델은 Gutenberg-Richter의 규모빈도 관계식으로서, 규모 M 이상인 지진의 발생빈도 $N(M)$ 은 다음의 식으로 주어진다.

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

여기서, a , b 는 상수로서 해당 지진원 내에서는 일정한 값을 갖게 된다.

최대 지진규모를 결정하는 방법은 다양하나, 과거에 발생한 지진의 최대 규모에 0.5를 더하여 보수적으로 결정하는 것이 일반적이다. 국내 원전부지에 대한 PSHA에서 전문가(팀)이 제시한 최대 규모는 지진원에 따라 5.5-7.0 이다. 본 연구에서는 신울진 원전에 대한 PSHA 수행시 전문가들이 제안한 값의 평균값을 고려하여 최대지진규모는 6.7 ± 0.5 를 적용하였다.⁽¹⁾

진원 깊이는 감쇄식에 진원거리도 포함하기 때문에 최근에 들어서 고려되기 시작하였다. 국내 원전부지에 대한 PSHA에서 전문가(팀)이 제시한 진원깊이의 최적값은 3-15 km 범위이며 본 연구에서는 10 ± 5 를 사용하였다.

본 연구에 사용된 자료는 지진원, 지진활동변수, 최대 지진규모, 진원깊이와 같은 변수들에 내재하는 불확실성을 논리수목(Logic Tree)을 통해 고려하였으며, 각 입력변수들은 표 1에 정리하여 제시하였다.

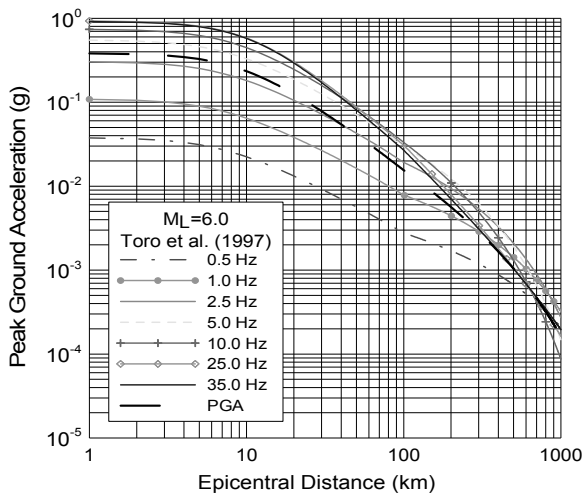
2.2 감쇄식의 결정

진원에서 발생한 지진 에너지는 기하학적 분산과 매질의 비탄성 특성에 의해 거리에 따라 감소한다. 감쇄식은 일반적으로 지반가속도로 주어지는데 진원, 전파경로 및 부지의 국부적인 매질 특성에 따라 영향을 받는다. 따라서 감쇄식은 지역적 특성에 따라 매우 다양하며, 어떤 특정한 지역의 지반진동을 고려하기 위해서는 지역적 특성에 맞는 적절한 공식을 사용할 필요가 있다.

우리나라의 경우는 강진동 기록이 없기 때문에 초기의 PSHA에서는 미국, 일본, 중국 등 다양한 국가에서 개발된 감쇄식이 사용되었다. 그러나, 최근에는 한반도 남부의 미소

〈표 2〉 감쇄식 입력상수

최대가속도(g)	Average	15 Percentile	Median	85 Percentile
0.01	3.258E-03	6.520E-04	1.904E-03	5.558E-03
0.05	3.660E-03	7.153E-05	2.113E-04	6.242E-04
0.10	1.213E-04	2.321E-05	6.928E-05	2.068E-05
0.20	3.479E-05	6.237E-06	1.923E-05	5.926E-05
0.30	1.535E-05	2.542E-06	8.140E-06	2.607E-05
0.40	8.198E-06	1.253E-06	4.168E-06	1.387E-05
0.50	4.893E-06	6.931E-07	2.389E-06	8.235E-06
0.60	3.145E-06	4.151E-07	1.478E-06	5.263E-06
0.75	1.782E-06	2.139E-07	7.952E-07	2.956E-06
1.00	8.178E-08	8.591E-08	3.388E-07	1.336E-06



〈그림 2〉 Toro의 감쇄식에 의한 감쇄특성

지진 자료를 이용하여 추계학적 방법에 의한 강진동 모사를 통해 개발된 다양한 감쇄공식과 함께 미국 중동부 지역에서 개발된 감쇄식이 사용되고 있다. 미국 중동부 지역의 감쇄식이 선호되는 이유는 지진발생 양상과 감쇄특성이 유사하다는 견해가 많기 때문이다. 본 연구에서는 월성 방사성 폐기물 처분장의 지진재해도 평가를 위한 등재해도 곡선 산정을 위해서 식 (2)와 같은 Toro 등⁽³⁾이 제안한 감쇄식을 사용하였다.

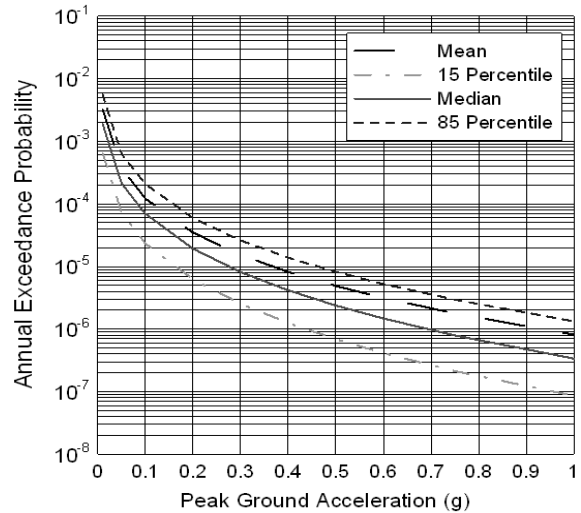
$$\ln Y = C_1 + C_2(M-6) + C_3(M-6)^2 - C_4 \ln R - (C_5 - C_4) \max\left(\ln\left(\frac{R}{100}\right), 0\right) - C_6 R \quad (2)$$

여기서, $R = \sqrt{R_{epi}^2 + C_7^2}$ 이며,

Y : 스펙트럼 가속도 또는 최대 지반 가속도 (단위: g)

M : 모멘트규모(Moment Magnitude)

$$M = 2.715 - 0.277M_L + 0.127M_L^2$$



〈그림 3〉 방사성 폐기물 처분장 부지에 대한 재해도곡선

〈표 3〉 대상지역의 연 초과확률

최대가속도(g)	Average	15 Percentile	Median	85 Percentile
0.01	3.258E-03	6.520E-04	1.904E-03	5.558E-03
0.05	3.660E-03	7.153E-05	2.113E-04	6.242E-04
0.10	1.213E-04	2.321E-05	6.928E-05	2.068E-05
0.20	3.479E-05	6.237E-06	1.923E-05	5.926E-05
0.30	1.535E-05	2.542E-06	8.140E-06	2.607E-05
0.40	8.198E-06	1.253E-06	4.168E-06	1.387E-05
0.50	4.893E-06	6.931E-07	2.389E-06	8.235E-06
0.60	3.145E-06	4.151E-07	1.478E-06	5.263E-06
0.75	1.782E-06	2.139E-07	7.952E-07	2.956E-06
1.00	8.178E-08	8.591E-08	3.388E-07	1.336E-06

R_{epi} : 진앙거리 (Epicentral Distance)

R : 진원거리 (Hypocentral Distance)

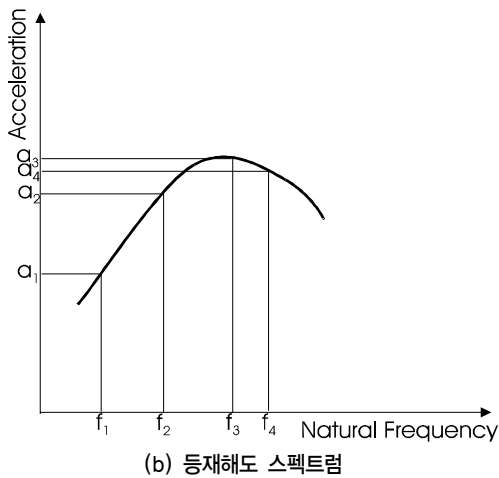
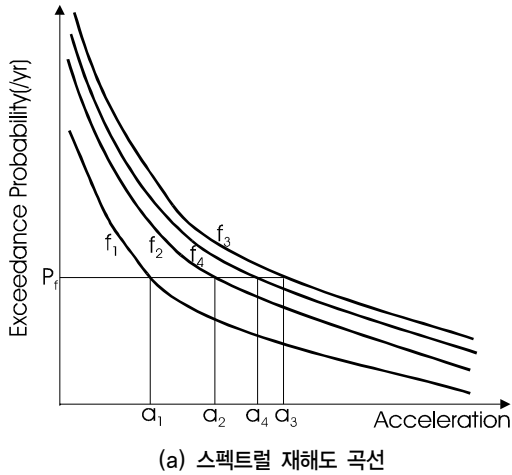
표 2는 선정된 감쇄식의 진동수별 각 입력상수이다.

2.3 지진재해도 곡선

PSHA를 통해 산출된 재해도는 최대지반가속도에 대한 값으로써 각 최대지반가속도에 대한 연초과확률(Annual Exceedance Probability)로 표시되며 평균 재해도 곡선 뿐 아니라 15, 50, 85 백분위수도 함께 제시하여 입력변수의 불확실성 범위를 나타낸다. 그림 3과 표 3은 방사성 폐기물 처분장 부지에 대하여 앞서 선정된 지진원과 입력변수, 감쇄식을 바탕으로 산출된 재해도이다.

2.4 등재해도스펙트럼

등재해도 스펙트럼의 계산은 확률론적 지진재해도 분석



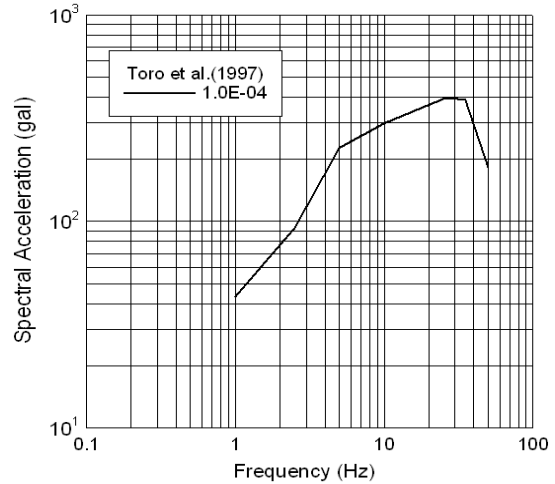
〈그림 4〉 등재해도 스펙트럼을 구하는 방법

(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)과 유사한 과정을 거친다. PSHA가 최대지반가속도에 대응하는 초과 확률을 계산하는 반면 등재해도 스펙트럼은 각 고유진동수 (f_M)에 따른 지반 응답 가속도의 초과확률을 계산하여 스펙트럴 지진재해도 곡선을 만들고 여기서 기준 확률값에 대응하는 가속도의 값을 각각 진동수의 기준재해도 곡선에서 읽는 방식으로 구하게 된다. 지진재해도 곡선으로부터 등재해도 스펙트럼을 도출하는 과정의 모식도를 그림 4에 도시하였다.^{(4),(5)}

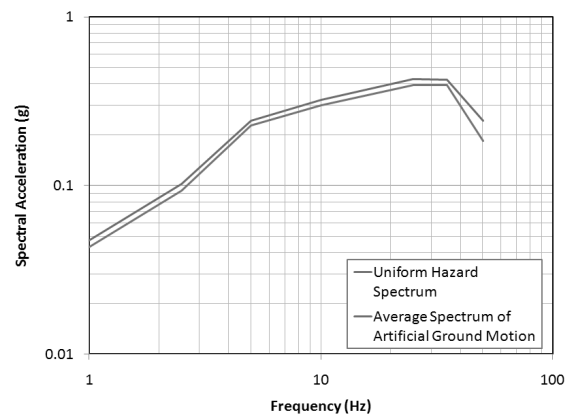
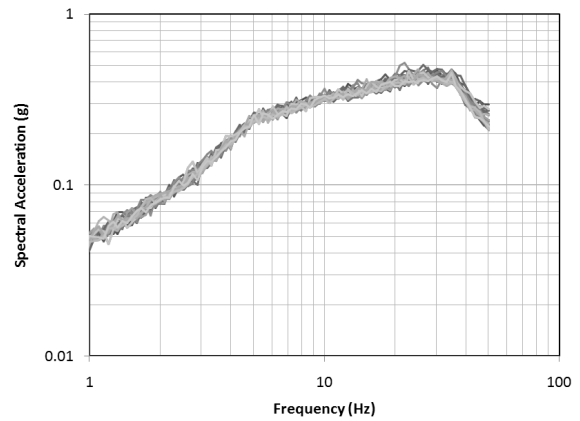
본 연구에서는 방사성 폐기물 처분장 부지에 대한 등재해도 곡선을 도출하기 위하여 연초과확률이 10^{-4} 년에 해당하는 등재해도 스펙트럼을 작성하였다.⁽²⁾ 최종적으로 도출된 등재해도 스펙트럼은 그림 5에서 제시하였다.

2.5 인공지진파의 생성

월성 방사성 폐기물 처분장 부지의 기반암 재해도 곡선을 도출하기 위해 선정된 등재해도 스펙트럼을 만족하는 인공지진파를 생성하였다. 등재해도 스펙트럼에 부합하는 인공



〈그림 5〉 방사성 폐기물 처분장 부지의 등재해도 스펙트럼



〈그림 6〉 등재해도 곡선에 부합하여 생성된 인공지진

지진파의 생성을 위하여 상용프로그램인 P-CARES⁽⁶⁾ 프로그램을 사용하였는데, P-CARES 프로그램은 미국Brookhaven National Laboratory (BNL)에서 개발한 프로그램으로서 인공지진파의 생성, 부지응답해석 및 간단한 지반-구조물 상호작용해석도 편리하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 생성된 인공지진파의 응답스펙트럼을 구하여 그림 6(a)에 도

시하였으며, 30개 인공지진파의 평균 응답스펙트럼과 등재해도 스펙트럼을 그림 6(b)에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 도출한 인공지진파가 목표로 한 등재해도 스펙트럼을 잘 만족시키고 있는 것을 알 수 있다.

3. 방사성 폐기물 처분장의 지진위험도 평가를 위한 입력 지진동 도출

3.1 방사성 폐기물 처분장 부지의 기반암의 특성

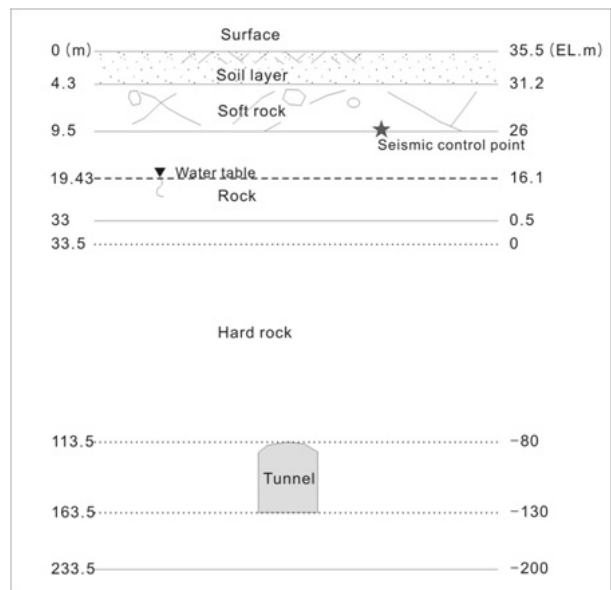
방사성 폐기물 처분장 부지의 시추조사자료를 근거로 하여 대상지반은 상부로부터 모래지반, 풍화암, 보통암, 경암의 4가지 지질공학적 경계로 구분하였고, 방사성 폐기물 처분장이 위치할 지하심부 구간은 그림 7과 같이 천정부와 바닥부 세분하였다. 지점별 심도와 물성치는 시추자료와 시험에서 얻은 결과값을 사용하였으며, 전단파속도(V_s)는 탄성파시험 자료에서 얻은 값을 사용하였다. 지진통계점은 기반암면으로 정하였으며, 기반암의 결정은 국내 내진설계기준의 보통암 기준에서 가장 전단파 속도가 큰 1500m/s을 기준으로 결정하였다.⁽⁷⁾ 따라서 지진재해도 평가를 통해 도출한 등재해도 스펙트럼의 입력은 그림 7에서의 풍화암과 보통암의 경계면으로 결정하였다.

3.2 지진위험도 평가용 응답스펙트럼의 제한

도출된 30개의 인공지진파를 이용하여 그림 7과 표 4에서 정의한 지반조건에 대한 부지응답해석을 통해 구하고자 하는 처분동굴의 상단부와 바닥면에서의 입력지진운동을 도출하였다. 부지응답해석은 지진파 응답해석에 가장 널리 사용하는 1차원 파전달해석 프로그램인 SHAKE⁽⁸⁾를 사용하였다. 좀 더 정확한 부지응답해석을 위해서는 2차원 지반조건을 고려할 수 있는 방법 또는 3차원 지반조건을 고려한 방법을 사용하는 것이 부지효과를 고려하는데에 효과적이지만 부지응답해석을 수행하기 위한 노력이 너무 많이 소요되는 것에 비하여 그 결과가 매우 효과적이지는 않으므로 1차원 부지응답해석 기법을 선택하였다.

SHAKE를 이용한 1차원 부지응답해석은 기본적으로 진동수 영역에서의 해석을 수행하므로 지반의 비선형 거동을 고려하기 위하여 등가선형기법을 사용하게 된다. 등가선형화기법은 지반의 여러 가지 조건들에 의하여 변화되는 지반의 주된 동적 물성을 지반의 변형률에 따라 변화시켜가면서 반복계산을 수행하여 지반의 비선형성을 반영할 수 있도록 하는 방법이다.

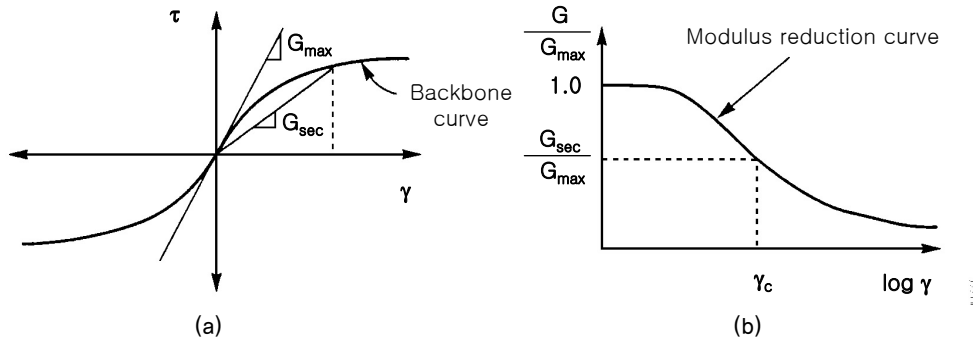
지반의 강성도는 반복 변형률 크기, 공극률, 평균 주 응력, 소성계수, 과압밀비, 반복 하중의 수에 의하여 영향을 받는다. 그림 8(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 전단탄성계수는 변형률이 0 일 때 가장 큰 값을 나타내고 전단 변형률이 커질수록 전단탄성계수는 감소하게 된다. 전단 탄성계수를 최대 전단탄성 계수로 나눈 값으로 그래프를 그리면 그림 8(b)와 같은 전단탄성계수 감쇠 곡선 (Modulus Reduction Curve) 을 얻을 수 있다. 같은 방법으로 전단 변형률에 따른 감쇠비를 모형화 할 수 있다. 따라서 지진하중이 가해질 때의 가장 주된 지반물성요소인 전단탄성계수와 감쇠비를 이용한 반복해석을 수행할 수 있게 된다. 이론적으로는 작은 전단 변형률에서 에너지의 소산은 없기 때문에 반복 전단



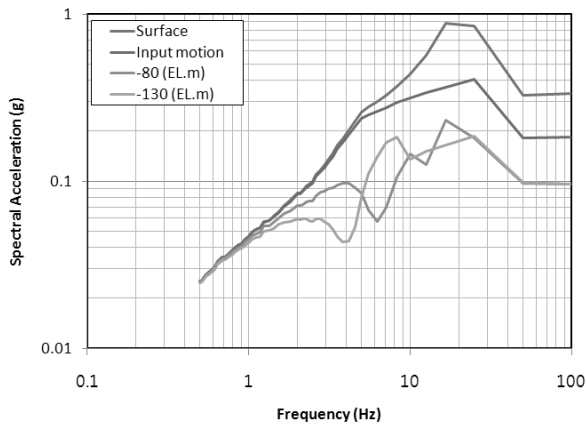
〈그림 7〉 시추자료를 통해 추정된 방사성 폐기물 처분장의 지하 단면도

〈표 4〉 대상부지의 지반물성

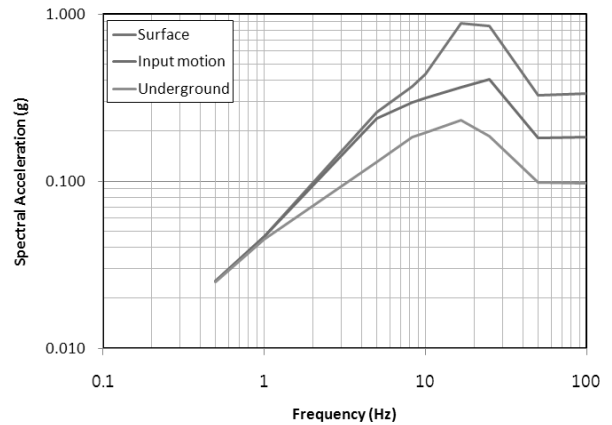
	Soil layer	Soft rock	Rock	Hard rock		
				0.5 (EL.m)	-80 (EL.m)	-130 (EL.m)
Density (g/cm ³)	1.65	1.90	2.70	2.90	2.90	2.90
Vs(m/s)	628.0	745	1500	2897	2580	3074
Layer thickness(m)	4.3	5.2	23.5	80.5	50.0	70.0
Poisson's ratio	0.33	0.3	0.27	0.20	0.23	0.12



〈그림 8〉 Backbone curve 와 전단탄성계수 감쇠 곡선⁽⁹⁾



〈그림 9〉 심도별 부지응답스펙트럼



〈그림 10〉 중·저준위 방사성 폐기물 처분장 지하구조물의 지진위험도 평가를 위한 평가용 지진응답스펙트럼

변형률이 작을 때에는 감쇠비가 0이 되어야 하나 실제 실험에 의하면 감쇠비가 0이 되지 않는다. 또한 전단 변형률이 커짐에 따라 감쇠비는 점점 증가하게 된다.

이러한 방법으로 기 생성된 30개의 인공지진파에 대한 부지응답해석을 수행하였다. 지반의 비선형 물성은 Seed and Idriss⁽¹⁰⁾의 모래질 지반에 대한 전단탄성계수 감쇠곡선과 Idriss⁽¹¹⁾의 모래질 지반에 대한 감쇠곡선을 사용하였다.

부지응답해석을 통하여 산출된 각 심도별 지진응답가속도는 응답스펙트럼으로 변환하여 심도별로 평균하여 그림 9에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 지표면의 운동은 입력운동에 비하여 5Hz 이상에서 다소 증폭되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 처분동굴의 천정부와 바닥면이 위치하는 위치에서의 응답은 전 진동수 영역에서 감소하는 것을 알 수 있다. 지반물성의 차이에 의하여 진동수 영역에 따라 스펙트럴 응답값의 차이가 발생하는 것을 알 수 있지만 이러한 차이는 20Hz 이상의 진동수 영역에서는 거의 없어지는 것을 알 수 있다. 20Hz 미만의 영역에서 지진응답의 차이가 다소 발생하는 것은 표 4에서 보는 바와 같이 처분동굴이 위치하는 부분에서의 전단파 속도가 그 아래층의 전단파 속도보다 작기 때문에 발생하는 현상인 것으로 판단되

〈표 5〉 방사성 폐기물 처분장의 지진위험도 평가용 스펙트럼

Frequency (Hz)	Surface	Input motion	Underground
100	0.334	0.184	0.097
50	0.328	0.182	0.099
25	0.844	0.408	0.187
16.67	0.877	0.365	0.231
10	0.439	0.315	0.195
8.33	0.367	0.296	0.184
5	0.258	0.237	0.130
1	0.047	0.047	0.045
0.5	0.025	0.025	0.025

며 실제적으로 암반으로서 이 정도의 전단파속도 차이로 인해서 상하부의 상대변위가 크게 발생할 것으로 판단되지는 않는다. 따라서 처분동굴에 대한 지진위험도 평가를 위하여 처분동굴의 천정부와 바닥면의 위치에서의 스펙트럼을 모두 포괄하는 하나의 응답스펙트럼을 사용하여도 무방할 것으로 판단된다. 따라서 방사성 폐기물 처분장의 지하구조물의 지진위험도 평가를 위한 평가용 스펙트럼을 그림 10과 같이 제시하였고 주요 진동수에서의 스펙트럴 응답을 표 5에 정리하였다. 그림 10과 표 5에서 보는 바와 같이 기반암

에서의 입력운동의 경우 최대지반가속도가 0.184g 인 반면 처분동굴의 위험도 평가용 응답스펙트럼의 최대지반가속도는 0.097g로서 약 53% 정도로 감소하는 것을 알 수 있다. 탁월진동수 영역은 기반암기준 등재해도 스펙트럼의 경우보다 약 10Hz 정도 저진동수 영역으로 이동하였으나 탁월진동수 영역이 크게 변동한 것으로 보이지는 않으며 지표면에 대한 응답스펙트럼은 20Hz 부근에서 탁월진동수가 형성되어 고진동수 성분이 탁월한 지반특성을 보이는 것을 알 수 있다. 입력지반운동이 작용하는 지점의 지표면 심도가 9.5m인 것에 비하여 최대가속도 기준으로 80% 가량의 증폭이 발생하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

국내 중저준위 방사성 폐기물 처분장을 대상으로 하여 지진위험도 평가를 위한 평가용 지반응답스펙트럼을 제시하였다. 확률론적 지진재해도 평가를 통하여 기반암기준의 재해도곡선을 도출하였으며 이를 바탕으로 해당 부지에 대한 등재해도 스펙트럼을 작성하였다. 등재해도 스펙트럼을 만족시키는 30개의 인공지진파를 작성하였으며 작성된 인공지진파를 대상 부지의 시추조사자료를 이용한 주상도 물성을 이용하여 부지응답을 수행하여 얻어진 30개의 지진응답 해석 결과를 평균하여 중저준위 방사성 폐기물 처분장의 가장 중요시설이라고 할 수 있는 처분동굴의 지진위험도 평가용 응답스펙트럼을 제시하였다.

본 연구를 통하여 해수면 기준으로 지하 80m에서 130m에 위치하고 있는 처분동굴에 대한 지진위험도 평가용 응답스펙트럼을 도출하였으며, 도출된 평가용 응답스펙트럼은 기반암 기준 등재해도 스펙트럼과 탁월진동수 영역에서는 큰 차이가 없으며 처분동굴의 천정부와 바닥면에서의 평균 응답스펙트럼이 20Hz 미만인 구간에서 다소 차이가 발생하지만 단일 스펙트럼을 사용하여 지진위험도 평가를 수행하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 또한 최대지반가속도 기준으로 기반암 기준 입력운동에 비하여 53% 정도로 감소하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 지식경제부의 재원으로 시행하는 에너지기술평가원의 에너지기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 2009T100100511)

참고 문헌

1. KAERI/TR-3931/2009, 원전부지 확률론적 지진재해도분석 입력변수의 민감도분석.
2. 김민규, 최인길, 평가용 스펙트럼이 구조물의 지진리스크에 미치는 영향, 한국지진공학회 논문집 제13권 제6호, 39-46, 2009.
3. Toro, G., Abrahamson, N.A., and Schneider, J.F., "Model of strong ground motions from earthquakes in Central and Eastern North America: Best estimate and uncertainties," *Seismological Research Letters*, Vol.68, No.1, 1997.
4. EERI. The Basics of Seismic Risk Analysis. *Earthquake Spectra* 5, 675-702, 1989.
5. Shin, J.S, Lee, J.R., and Jeong, E.H., "Computation of Uniform Hazard Spectrum for Wolsong Nuclear Power Plants, *Proceedings of EESK Conference-Fall*, 1998.
6. U.S. Nuclear Regulatory Commission, P-CARES: Probabilistic Computer Analysis for Rapid Evaluation, *NUREG/CR-6922*, p.158, 2007.
7. 이진선, 기반암 전단파속도의 부지응답특성 영향평가, 한국지진공학회 논문집, Vol. 13, No. 1, 1-8, 2009.
8. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B., SHAKE : A computer program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, *Report No. EERC 72-12*, University of California, Berkeley, CA, 1972.
9. Kramer, S.L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1996.
10. Seed, H.B., and Idriss, I.M., Soil Moduli and Damping Factor for Dynamic Response Analyses, *Report No. EERC 70-10*, University of California, Berkeley, CA. 1970.
11. Idriss, I.M., Response of Soft Soil Sites During Earthquakes, *Proceedings of the H.B. Seed Memorial Symposium*, Berkeley, CA, 1990.