



APR1400 설계 지반 응답 스펙트럼 개발

김태영·박상욱

한국전력기술(주) 차세대원자로사업

서론

현재까지 우리 나라에서 건설된 원자력발전소의 구조물은 견고한 압반 위에 건설되었기 때문에 고정 지반으로 가정하여 지반-구조물 상호 작용을 해석에 고려하지 않았으며, 입력 지진으로 미국 원자력규제 위원회(Nuclear Regulatory Commission: NRC)의 Regulatory Guide(RG) 1.60 설계 응답 스펙트럼을 적용하여 왔다.

그러나 APR1400은 토질 지반에도 건설될 수 있도록 포괄적인 부지 조건을 고려하여 지반-구조물 상호 작용 해석을 수행하였으며, 입력 지진으로 0.3g의 SSE를 적용함과 아울러 현재의 인허가 요건에서 최소한으로 만족하여야 하는 RG 1.60을 포괄하는 설계 지반 응답스펙트럼(Design Ground Response Spectrum: DGRS)을 기준으로 국내의 관련 연구 결과를 참조하여 고진동수 영역을 다소 보강함으로써 지진 입력에 대한 합리성과 경제성

을 제고하고자 하였다.

지반의 설계 응답 스펙트럼을 개발하기 위해서는 실제 관측된 강진 기록 자료를 통계적으로 처리하여 개발하여야 하나, 공학적으로 활용 가능한 계측 자료가 부족한 우리나라에서는 지질 및 지진 특성이 유사한 외국의 강진 기록 자료를 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

이러한 취지에서 현재의 규제 요건과 지질 및 지진 특성이 우리나라와 유사한 미국 중동부의 원자력 발전소에 대하여 로렌스 리버모어 국립연구소(Lawrence Livermore National Laboratory: LLNL)와 전력 연구소(Electric Power Research Institute: EPRI)에서 수행한 지진 재해도 분석 결과를 참조하여 APR 1400의 설계 지반 응답 스펙트럼을 개발하였으며, 이에 상응하는 Target Power Spectral Density (PSD) 함수 및 인공 가속도 시간 이력도 함께 제시하였다.

주요 설계 특성

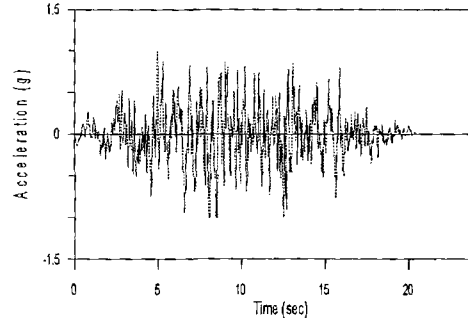
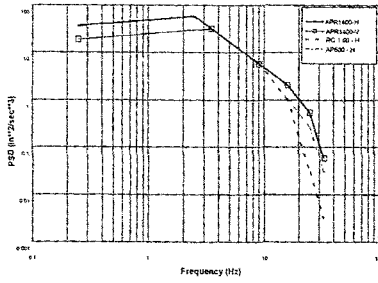
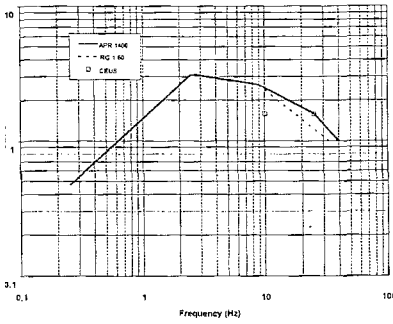
1. 설계 지반 응답 스펙트럼

가. 한반도 및 미국 중동부의 지질 비교

전반적인 지질학적 관점에서 지체 구조구의 특성은 크게 안정 대륙 지역(Stable Continental Region: SCR)과 구조 운동이 활발한 지역으로 분류할 수 있으며, 우리나라와 미국 중동부는 SCR로 분류되기 위한 기준들을 대체로 충족시키고 있다. 우리나라와 미국 중동부의 두 SCR이 유사한지 여부는 영향 면적 내 기반암의 연령뿐만 아니라 가장 최근의 주요 지각 활동에 따라 판단할 수 있으며, EPRI의 SCR에 대한 검토에 따르면 우리나라도 SCR에 속하므로 한반도의 지진학적 특성이 미국 중동부와 유사하다고 간주할 수 있다.

나. 현행 미국 NRC의 규제 요건

미국의 10 CFR Part 100의 100.23에는 자유장 지표면에서의 수평과 수직 방향 지반 응답 스펙트



〈그림 1〉 5% 감쇠에 대한 RG 1.60, 미 중 동부 부지 및 APR1400의 수평 방향 응답 스펙트럼의 비교

〈그림 2〉 APR1400의 수평 및 수직 방향 PSD 함수와 RG 1.60 수평 방향 PSD 함수의 비교

〈그림 3〉 인공 가속도 시간 이력 (동서 방향)

럼으로 표현되는 SSE 지반 운동을 요구하고 있다.

SSE의 평가에 포함된 불확실성은 확률론적 재해도 분석 (Probabilistic Seismic Hazard Analysis : PSHA)이나 민감도 분석 등의 적절한 해석을 통하여 다루어져야 한다. 미국 RG 1.165는 이 요건을 만족시키기 위한 PSHA 수행과 SSE 결정의 절차에 대한 일반적인 사항을 기술하고 있으나 국내의 강진 자료 등이 부족한 관계로 현재로서는 적용하기 어려운 실정이다. 따라서 APR1400의 잠재적인 부지에 대한 지진학적 특징이 미국 중동부와 유사하다고 가정하여 미국 중동부의 원전 부지에 대한 PSHA 결과를 적용함으로써 APR 1400에 적용할 수 있는 SSE에 대한 DGRS의 고진동수 영역에서 스펙트럼 증폭 계수를 평가할 수 있다.

다. 미국 중동부 원전에 대한 고진동수 영역에서의 스펙트럼 증폭 계수

LLNL과 EPRI는 69개의 미국 중동부 원전 부지에 대해 PSHA를 수행하여 미국 중동부 원전의 개별 부지에 대한 지표면에서의

Uniform Hazard Response Spectra와 PGA를 산출하였다.

EPRI와 LLNL의 재해도 분석은 토양 부지에서 토양을 지나 증폭된 지표면에서의 지반 운동 응답 스펙트럼과 PGA를 평가하기 위한 것이다.

이 결과를 검토하여 고진동수 영역에서의 가속도 응답 스펙트럼에 대한 증폭 계수를 결정하기 위한 기초 자료로 활용하였다. 이에 따라 APR1400의 수평 방향 SSE의 DGRS로서 RG 1.60을 바탕으로 하여 25Hz에서 RG 1.60보다 30% 보강된 DGRS와 이에 상응하는 PSD 함수도 함께 개발되었다.

라. APR1400 SSE의 제안된 DGRS

APR1400 수평 방향 SSE의 DGRS는 RG 1.60을 바탕으로 하여 좀 더 보수적으로 고진동수 영역이 보강되었으며, 0.3g PGA에 맞추어진 응답 스펙트럼으로 제안되었다. 고진동수 영역의 보강은 모든 감쇠비에 대하여 다음과 같은 절차로 이루어졌다.

① RG 1.60의 응답 스펙트럼을 25Hz에서 30% 증가시킨다.

② Log-Log 좌표계에서 RG

1.60의 응답 스펙트럼을 9Hz에서 25Hz까지 직선으로 긋는다.

③ Log-Log 좌표계에서 RG 1.60의 응답 스펙트럼을 25Hz에서 40Hz까지 직선으로 긋는다. 9Hz에서 25Hz 사이의 성분을 보강한 취지에 맞추어 PGA 값을 40Hz에 맞추었다.

〈표 1〉은 2%, 3%, 5%, 7%, 그리고 10% 감쇠비에 대하여 0.25, 2.5, 9.0, 25, 그리고 40Hz에서의 수평 방향 DGRS의 가속도 증폭 계수를 보여주고 있으며, 〈그림 1〉에서는 5% 감쇠비에 대하여 RG 1.60과 APR1400의 DGRS를 비교하여 보여주고 있다.

2. Power Spectral Density Function

수평 방향 DGRS에 대한 PSD 함수는 RG 1.60에 있는 수평 방향 설계 응답 스펙트럼에 대한 PSD 함수를 수정한 것이다. 수직 방향 DGRS에 대한 PSD 함수는 수평 방향 PSD 함수에서 3.5Hz보다 작은 진동수 구간을 수정하여 결정하였다.

미국 NRC의 Standard Review

〈표 1〉 APR1400의 수평 방향 설계 지반 응답 스펙트럼에 대한 스펙트럼 증폭 계수

Damping	Displacement Amplification*	Acceleration Amplification				
		0.25Hz	2.5Hz	9.0Hz	25Hz	40Hz
2%	2.50	0.57	4.25	3.54	1.70	1.00
3%	2.35	0.54	3.76	3.13	1.66	1.00
5%	2.05	0.47	3.13	2.61	1.60	1.00
7%	1.88	0.43	2.72	2.27	1.55	1.00
10%	1.70	0.39	2.28	1.90	1.49	1.00

* Horizontal peak ground displacement = 36 inches for horizontal PGA = 1.0g

Plan(SRP) 3.7.1 부록 A에 최대 지반 가속도가 1.0g인 RG 1.60의 수평 방향 설계 응답 스펙트럼에 대한 PSD 함수의 공식이 제공되어 있다.

APR1400의 수평 방향 DGRS에 대한 PSD 함수는 0.25Hz에서 2.5Hz까지의 구간과 2.5Hz에서 9.0Hz까지의 구간은 SRP 3.7.1 부록 A와 동일하고 9Hz에서 16Hz까지는 2.5Hz에서 9.0Hz까지의 구간을 계속하여 연장하고, 16Hz 이상의 구간에서는 SRP 3.7.1에 제시된 16Hz 이상의 구간과 대수축상에서 동일한 기울기를 갖는 평행선으로 정의하였다.

〈그림 2〉에서 볼 수 있듯이 Log-Log 좌표계에서 표현하면 연속한 통제 진동수 사이의 두 가지 수평 방향 PSD 함수는 선형으로 변화됨을 알 수 있다.

3. 인공 가속도 시간 이력

개발된 설계 지반 응답 스펙트럼에 대응하는 3 방향(동서·남북·수직) 성분의 인공 가속도 시간 이력을 Random Vibration 이론에 의해 생성하였다(그림 3).

이 인공 가속도 시간 이력은 작성된 가속도 시간 이력의 응답 스펙트럼이 DGRS를 포괄하며, 3에서 정의된 목표 PSD 함수의 80%를 상회하고, 최대 지반 가속도 1.0g에 대한 최대 변위가 36 inch 이내가

〈표 2〉 APR1400의 수직 방향 설계 지반 응답 스펙트럼에 대한 스펙트럼 증폭 계수

Damping	Displacement Amplification*	Acceleration Amplification				
		0.25Hz	2.5Hz	9.0Hz	25Hz	40Hz
2%	1.67	0.38	4.05	3.54	1.70	1.00
3%	1.57	0.36	3.58	3.13	1.66	1.00
5%	1.37	0.31	2.98	2.61	1.60	1.00
7%	1.25	0.29	2.59	2.27	1.55	1.00
10%	1.13	0.26	2.17	1.90	1.49	1.00

* Vertical peak ground displacement = 36 inches for vertical PGA = 1.0g.

되도록 하였다.

또한 총지속 시간이 10초에서 25초 이내에 들도록 20.48초의 지속 시간을 가지며, 강진 구간은 약 8초 내외이고, 각 방향 성분 상호 독립을 위하여 최대 Cross-correlation Coefficient가 0.3보다 작도록 작성되었다.

결론

앞에서 살펴본 바를 요약하면 다음과 같다.

- 우리 나라와 미국 중동부의 전반적인 지질학적 특성을 살펴보았을 때 안정 대륙 지역으로 분류되기 위한 기준들을 대체로 충족시키고 있음을 고찰하였다.

- LLNL과 EPRI에 의하여 수행

된 미국 중동부 원전의 확률론적 재해도 분석 결과를 검토하고, 이를 활용하여 설계 지반 응답 스펙트럼의 고진동수 영역에서의 가속도 응답 스펙트럼 증폭 계수를 결정하기 위한 기초 자료로 활용하였다.

- APR1400 수평 방향 SSE (0.3g)의 DGRS는 RG 1.60을 바탕으로 25Hz에서 RG 1.60보다 30% 보강되었으며 그에 상응하는 PSD 함수 및 인공 가속도 시간 이력도 함께 개발하였다.

- 우리 나라에 적용할 수 있는 합리적인 설계 지반 응답 스펙트럼을 도출하기 위해서는 확률론적 지진 재해도 분석의 이론과 절차, 관련 규정들이 확립된 만큼 많은 지질학적·지진학적 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. ☞