



원자력발전소의 내진설계

조 호 현*

(한국원자력안전기술원)

1. 머리말

원자력발전소(이하 “원전”이라 함) 설계에서 가장 중요한 것은 원자로 냉각재 유실사고(loss of coolant accident, LOCA)와 지진에 대해 충분한 안전성을 확보하도록 설계해야 한다는 것이다. 특히 원전의 구조물 및 기기 설계에서 가장 지배적인 하중은 대부분 지진하중으로 원전설계에서 지진은 매우 중요한 요소이다. 따라서 원전의 내진설계는 일반 구조물에 내진설계기준이 적용되기 전부터 일찍이 적용되었다. 원전의 내진설계는 일반 구조물과 달리 설계지진 결정부터 설계·건설·운영까지 단계별로 매우 엄격한 규제기준을 적용하며, 내진설계 과정과는 별개로 확률론적 지진안전성 평가를 수행하여 설계지진의 재현주기와 발전소의 지진 안전여유도를 평가한다. 이에 더하여 원전에는 지반과 구조물에 다수의 지진계측기를 설치하여 정해진 지진동(地震動)을 초과하는 지진이 발생했을 때 지진동의 크기에 따라 발전소의 가동을 중지하거나 다양한 안전점검과 비상대응조치를 취하도록 되어 있다. 이는 원전설계에는 경제성보다 안전성이 더욱 강조되기 때문이다.

2. 원전의 내진설계에 대한 규제기준체계

원전시설의 내진설계는 일반 시설물과 달리 설

계기준뿐 아니라 기술기준 및 규제기준에서 지진해석 및 설계 방법이 상당히 구체적이며 엄격하게 규정되어 있다. 우리나라 원전의 내진설계와 관련된 규정은 1971년에 제정된 “원자로시설의 기술기준 및 보안조치 등에 관한 규정” (1971.01.22. 제정, 대통령령 제5493호)에서 최초로 법규화되었다. 이후 여러 차례의 개정을 거쳐 지금은 “원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙”(원자력안전위원회공고 제2011-6호) 제4조(지질 및 지진)와 제13조(외적 요인에 관한 설계기준)를 따르고 있다. 고시 수준의 규정으로 원자력안전위원회 고시 제2012-3호(원자로시설의 위치에 관한 기술고시)에 설계지진 결정에 대한 구체적인 기준이 규정되어 있으며 원자력안전위원회 고시 제2012-13호(전력산업기술기준의 원자로시설 기술기준 적용에 관한 지침)에서는 전력산업기술기준(KEPIC)을 원전 시설의 설계에 적용할 수 있도록 하고 있다. 원전의 내진설계를 위한 세부 절차와 방법에 대해서는 “경수로형 원자력발전소 안전심사지침서”(한국원자력안전기술원)에 구체적으로 제시되어 있다. 원전의 구조물, 계통 및 기기는 규제지침서에 따라 내진범주 I급, II급 및 III급(비내진범주)으로 분류하여 원자로 안전정지유지 계통에는 보다 엄격한 내진설계기준을 적용하고 있다. 내진범주 I급 구조물, 계통 및 기기는 원전의 안정정지지진(SSE)에 대해서도 본래의 기능을 유지하도록 다음 사항을

* E-mail : hhcho@kins.re.kr / Tel : (042) 868-0894

Advanced Power Reactor 1400

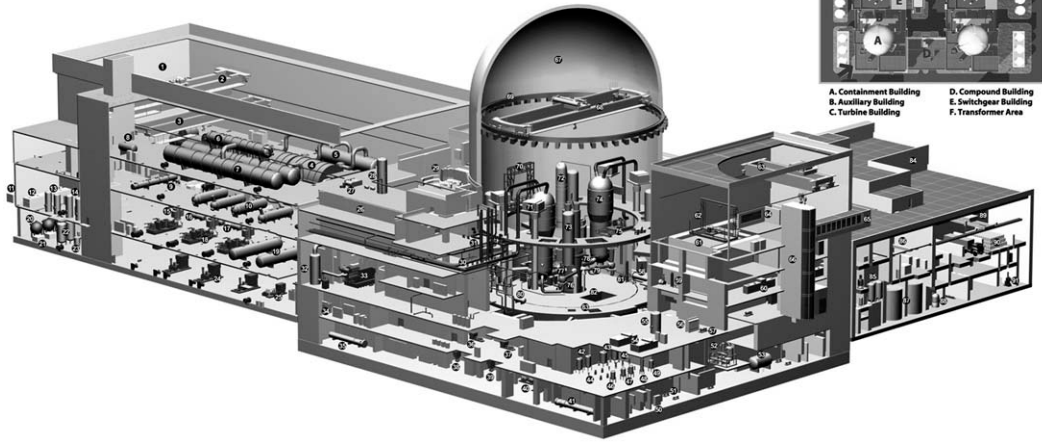


그림 1 3세대 신형 경수로 APR1400 조감도



그림 2 원전 구조물 시공전경

보장하도록 설계해야 한다.

- 원자로 냉각재 압력경계의 건전성
- 원자로를 안전 정지시킬 수 있는 능력과 원자로를 안전정지상태로 유지시킬 수 있는 능력
- 10CFR50.34의 지침을 초과하는 소외 방사선 피폭을 초래할 가능성이 있는 사고를 방지하거나 결과를 완화시킬 수 있는 능력

또한 원자력안전위원회 고시에서는 내진설계만 국한된 것이 아니라 원전의 건설과정과 운영과정에서도 구조물 및 기기에 대한 규제기관의 주기적 또는 정기적인 검사를 받도록 하고 있

며 엄격한 품질보증 절차를 따르도록 하고 있다. 이를 통해 내진설계로 확보된 원전의 내진성능은 운영 중 항상 적절한 수준으로 유지하도록 관리하고 있다.

2. 원전의 내진설계

원전의 내진설계과정은 내진설계 입력 자료의 선정 단계, 동적 지진응답해석 단계, 구조물 및 기기의 내진설계 단계, 기기의 내진검증 단계 등으로 구분되며, 동적 지진응답해석 단계에서 지반이 견고하지 않을 때에는 지반-구조물 상호작용 해석을 수행해야 한다. 그림 3에 일반적인 원전의 내진설계절차를 나타내었다.

2.1 내진설계 입력 자료 선정

원전의 내진설계를 위해서는 내진설계에 사용할 설계지진 및 감쇠비와 같은 내진해석 입력 자료를 타당하게 선정해야 한다. 일반 건축물이나 산업시설은 우리나라 지역별로 규정된 설계지진을 사용하지만, 원전의 내진설계에서는 원자로 반경 320 km 지역의 지진 및 지질특성 평가와 반경 8 km 지역에 대한 정밀 지질조사를 통해 원

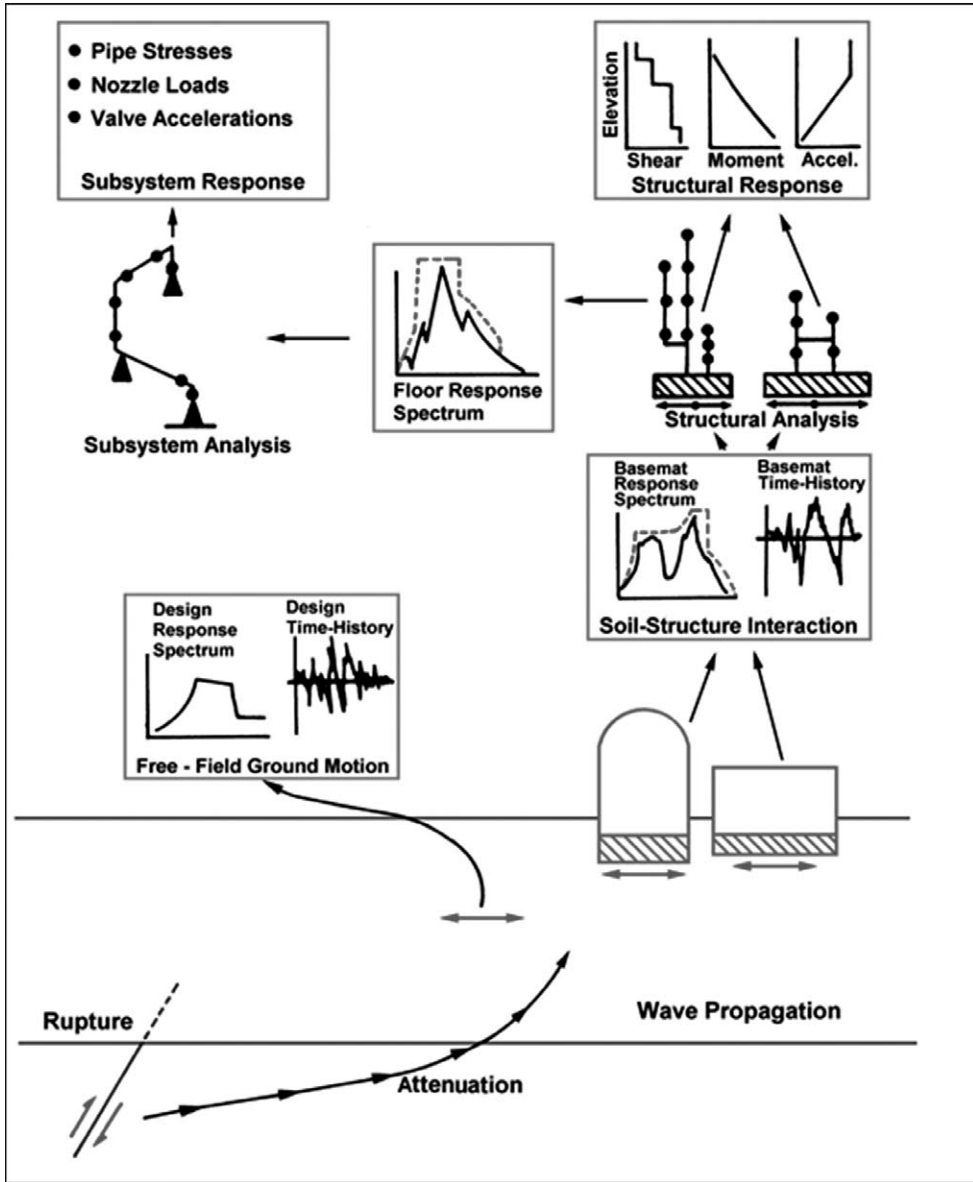


그림 3 일반적인 원전의 내진설계절차

전 부지에서 예상되는 최대지진동을 산정한 후 여기에 보수성을 더하여 설계지진을 결정한다. 이러한 과정을 거쳐 결정된 안전정지 설계지진의 최대지반가속도는 우리나라 대부분 발전소의 경우 0.2 g이며 부지의 지질 및 지진특성에 관계없이 설계지진을 미리 정해놓은 신형 원자로인 신고리 3,4호기 및 신울진 1,2호기의 경우는

0.3 g이다. 신형 원자로를 우리나라 및 외국의 다양한 부지에도 재설계를 하지 않고 건설할 수 있도록 하기 위해 표준설계개념으로 설계된 원전으로 근래에 미국과 유럽에서 이러한 내진설계 방식을 채택하고 있다. 또한 원전의 내진설계에 적용하는 설계지진동은 운전기준지진(operating basis earthquake, OBE)과 안전정지지진(safe

표 1 원전 구조물, 계통 및 기기의 감쇠비(임계감쇠의 백분율)

구조형태	안전정지지진	운전기준지진
철근콘크리트구조	7	4
보강된 조적 구조	7	4
프리스트레스트 콘크리트구조	5	3
용접된 강구조 또는 마찰형 볼트 접합된 강구조	4	3
지압형 볼트 접합된 강구조	7	5
배관계통	4	3
기기	3	2

shutdown earthquake, SSE)과 같이 두 수준으로 고려하여 설계한다.

감쇠(減衰)는 구조물 또는 기기가 운동을 할 때 외부로 발산되는 에너지양을 정의하는 특성값으로서 동적 응답에 큰 영향을 미치며, 일반적으로 재료 특성, 응력 수준, 변형 상태, 구조물의 기하학적 형상, 구조부재의 연결방법 등과 같은 많은 요인에 따라 달라진다. 동적지진응답해석에서는 감쇠를 등가 점성감쇠의 향으로 나타내어 사용하며 감쇠특성을 감쇠비로 나타내 사용한다. 규제기준에서는 구조 부재의 특성 및 접합방법, 응력수준 등에 따라 표 1과 같이 감쇠비가 제시되어 있으며 이 또한 일반 건축물이나 산업시설의 내진설계와 크게 다른 점이다. 그림 4에는 여러 감쇠비에 대한 가동중 원전의 설계지진 응답스펙트럼을 나타내었다. 설계지진 응답스펙트럼에 부합하는 인공 지진가속도 시간이력을 내진설계에 적용할 때에는 다음의 조건을 만족해야 한다.

- 설계응답스펙트럼 및 목표 파워스펙트럼밀도를 포괄해야 함.
- 충분한 강진운동 구간을 가져야 함.
- 영주기 가속도(ZPA, zero-period acceleration) 값은 설계지반가속도를 초과해야 함.
- 여러 개의 시간이력을 작성하여 지진응답해석에 적용해야 함.
- 세 방향 지진성분의 통계적 독립성이 확인되어야 함.

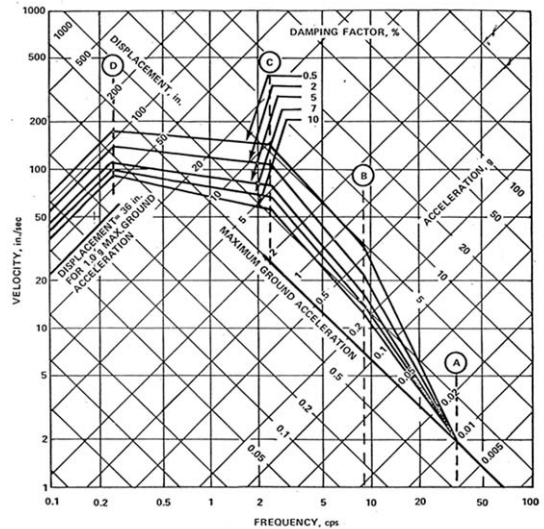


그림 4 수평방향 설계지반응답스펙트럼(수평지반가속도 1.0 g 기준)

2.2 동적 지진응답해석

지진응답을 구하는 방법은 크게 정적 해석법에 의한 방법과 동적 해석법에 의한 방법으로 나눌 수 있으며 대상 시설이 매우 단순한 경우를 제외하고는 동적 해석법에 의해 지진응답을 구한다. 동적 지진응답해석 방법으로는 응답스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법을 사용한다. 응답스펙트럼 해석법은 주로 대상시설의 설계를 위한 부재력을 구하기 위하여 사용하며 시간이력해석법은 기기의 내진검증이나 부계통 및 기기의 내진설계를 위한 입력으로 사용하는 층응답 스펙트럼

펙트럼(floor response spectrum)을 구하기 위하여 사용한다. 또한 지반이 견고하지 않을 경우(지반의 전단파 속도가 약 2,400 m/sec 이하인 경우)에는 일반 건축물 내진설계와 달리, 지반에서 지진동이 증폭되는 현상과 지반-구조물 간의 상호작용을 평가하는 해석인 지반-구조물 상호작용 해석을 수행한다.

2.3 원전 구조물 및 기기의 내진설계

내진설계 단계에서는 동적 지진응답해석으로부터 얻어진 지진응답(변위, 속도, 부재력 등)을 다른 하중들에 의한 응답과 조합하여 구조물에 고려하는 하중에 대한 저항력을 가지도록 설계한다. 이 과정에서는 다른 하중들과 지진하중의 조합 방법과 설계저항력 결정이 중요하다. 원자로 격납건물의 예를 들면, 설계하중으로 가동전 시험 중에 받는 하중, 정상운전 및 운전정지시 받는 하중, 설계지진과 같은 극한환경에서 받는 하중, 냉각재 상실사고를 포함한 비정상 상태에서 받는 하중 등을 고려하며 이 하중들을 모두 조합하여 설계한다. 또한 국내 원전 구조물의 내진설계에서는 일반 구조물과 달리 구조물의 비탄성 거동을 고려하지 않는다.

그림 1과 같이 원전에는 원자로의 안전에 관련된 매우 많은 계통 및 기기를 포함하고 있다. 이러한 중요 계통 및 기기들은 지진 발생 시에도 원자로를 안정적으로 정지시킬 수 있어야 한다. 따라서 원자로의 안전에 관련된 계통 및 기기들은 설계지진에 대해서도 건전성과 작동성이 보장되도록 설계되어야 한다. 이를 위해 원자로 안전 관련 계통 및 기기의 내진설계에는 앞의 시간이력해석에 구한 각 층의 층응답 스펙트럼을 이용한다. 즉, 원전 구조물 내의 구조물, 계통 및 기기의 내진설계는 해당 높이에서 계산된 층응답 스펙트럼을 지진하중으로 이용한다. 이때 구조물의 불확실성을 고려하기 위한 방법으로 그림 5와 같이 시간이력해석에서 얻은 층응답 스펙트럼을 평활화하고 첨두값을 확장하여 계통 및 기기의 내진설계에 적용한다.

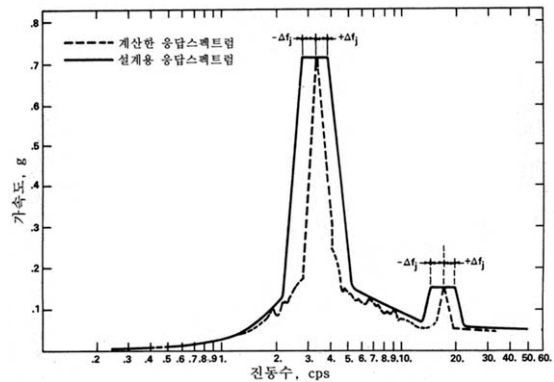


그림 5 층응답 스펙트럼 첨두값 확장 및 평활화

2.4 기기의 내진검증

지진 발생 시 원자로 안전에 관련된 기기는 건전성뿐 아니라 원자로를 안정적으로 정지시킬 수 있는 능력을 유지해야 한다. 이를 위해 원전의 안전관련 기기는 별도의 정해진 기준 및 절차에 따라 내진안전성을 입증하여야 하며 이를 내진 검증이라 한다. 기기의 내진검증은 지진하중을 받는 대상 기기의 구조적 건전성 및 작동성을 확인함으로써 내진안전성을 입증하게 된다.

내진검증 방법은 크게 해석에 의한 방법, 시험에 의한 방법, 해석 및 시험을 혼용하는 방법, 경험 자료를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 해석에 의한 방법은 수학적 해석모델 작성이 가능한 기기, 즉 주로 기계기기에 적용되는 방법으로 이 방법에서는 구조물의 내진해석 과정과 유사한 과정을 거쳐 검증을 수행한다. 시험에 의한 방법은 전기 및 계측기기 같이 해석으로 작동성 확인이 불가능한 기기에 주로 적용하며 진동대(振動臺)를 사용한 실증시험을 수행함으로써 내진안전성을 입증한다. 해석 및 시험을 혼용하는 방법은 해석 및 시험 중 한 가지 방법만으로는 내진성능 확인이 어려운 기기의 경우 두 가지 방법을 상호보완적으로 혼용하는 방법이다. 경험 자료를 이용하는 방법은 기존 유사 기기에 대한 검증결과 또는 실제 지진발생시의 지진거동 등과 같은 경험 자료를 이용하여 간접적으로 내진안전성

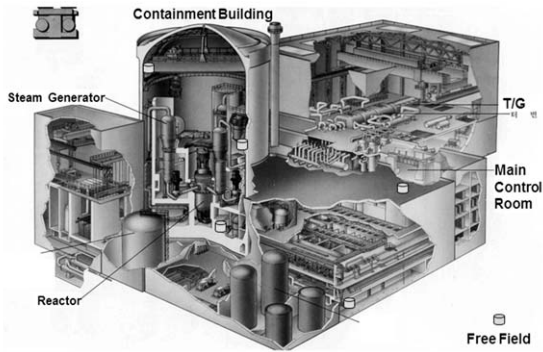


그림 6 원전 지진감시시스템

을 확인하는 방법이다.

2.5 지진계측설비 및 지진대응절차

원전에서는 지진에 대비하여 지진계측설비를 설치하여 운영하고 있다. 지진계측설비는 원전의 지진응답을 측정·기록하여 운전원에게 발전소 가동정지에 대한 판단기준을 제공하고 시설물의 안전성 평가를 위한 자료를 제공하기 위한 설비이다. 이러한 지진계측설비 역시 규제기준 및 지침에 그림 6과 같이 계측기 종류 및 설치위치 등이 구체적으로 규정되어 있다.

운전 중 격납건물이나 보조건물 기초 또는 자유장(自由場) 지표면에 설치된 지진계측기에 의해 최대지반가속도 0.01 g(설계지진의 1/20) 이상의 지진동이 감지되면 원전 주제어실에 지진기록장치 동작 신호 및 경보가 발생하고 지진대응절차서(비정상절차서)에 따라 주요 구조물 및 기기의 지진 영향을 점검하며, 운전기준지진(0.1 g) 이상의 지진동이 감지되면 비정상절차에 따라 원전을 정지시킨 후 후속조치를 취한다. 우선 비정상절차서에 따라 주요 구조물 및 기기의 지진 영향을 점검하고 지진에 대한 발전소의 안전성을 평가한다. 또한 방사선비상계획에 따라 지진의 크기 및 발전소 상태별로 정해진 백색/청색/적

색 비상을 발령하여 주민 보호조치를 취할 수 있도록 하고 있다. 지진에 의해 원자로가 정지된 경우에는 안전관련 시설의 손상여부 확인을 위한 현장조사, 손상 발생 시 보수 후 성능확인검사, 실제 발생한 지진으로부터 지진력을 계산하여 설계 지진력과 비교하는 안전성 평가 등을 수행하고 발전소에 영향이 없음이 확인되면 정부의 허가를 거쳐 운전을 재개한다.

3. 맺음말

우리나라의 원전 내진설계 규제기준은 관련 법령인 “원자력시설 등의 기술기준에 관한 규칙”으로부터 상세 설계지침에 이르기까지 체계적이고 구체적인 설계절차를 제시하고 있다. 이러한 규제기준들은 미국 및 국제원자력기구의 기준과 대등한 기준으로서 우리나라 모든 원전에 대하여 엄격히 적용되어 왔다. 따라서 우리나라의 원전은 예상되는 최대잠재지진에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있다고 할 수 있다. 그러나 2007년 7월 일본 니가타현 주에쓰 앞바다 지진 때에는 진앙지 인근 가시와자키 가리와 원전에서 지반 진동이 설계지진을 초과하였으며 저준위방사성 고체폐기물 저장고, 소내 변압기 등 안전과 무관한 시설들이 손상을 입은 것을 계기로 국내에서도 원전의 내진성능 향상을 위한 개선방안을 도출하여 추진 중이다. 또한 2011년 3월 발생한 동일본 대지진에 따른 국내 원전 안전 점검 결과에 따라 원전 부지에서의 최대지진을 다시 평가하고 모든 가동원전이 0.3 g의 지진에 대해 안전정지 유지기능(냉각상태 유지 포함)을 갖도록 개선 중이며 만일의 사태를 대비하기 위해 주요 건물들에 방수문 설치, 지진 발생시 원자로 자동정지 시스템 설치 등의 다양한 대비책을 마련하고 있다. [KSNVE](#)