

## 원전 구조물의 내진성능 확보와 진단 평가

Seismic Capability and Evaluation of Nuclear Power Plant Facilities



이상훈\*  
Sang-Hoon Lee

### 1. 머리말

모든 구조물 및 산업시설의 설계에서는 안전성과 경제성이라는 다소 상반적인 두가지 목표를 대상의 특성에 따라 적절히 고려하게 된다. 원자력발전소(이하 "원전")의 경우 자연 및 사회 환경 전반에 끼치는 중대한 영향을 감안하여 안전성을 절대적 우위에 두기때문에 일반 건축물이나 여타의 산업시설에 비해 현저히 높은 설계기준이 적용되고 있다. 아울러 원전에서는 부지 결정에서부터 건설과 운영 및 유지관리 단계까지 안전성 확보를 위한 다양한 활동과 조치가 이루어지게 된다.

특히 지진 현상은 다른 자연재해에 비해 발생 확률은 낮지만 원전에 있어서는 설계의 핵심인자가 될 만큼 중요하게 다루어지고 있으며, 구조물뿐만 아니라 내부 설비와 기기에 대해서도 일일이 내진 검증이 이루어지는 등 원전의 생애 주기 전체 동안 설계와 건설, 운영의 지배적인 요인으로 고려되고 있다.

여기서는 독자들이 원전의 내진 안전성에 대하여 쉽게 이해할 수 있도록 원전 구조물이 어떠한 방법으로 내진성능을 확보하고 있으며, 내진 안전성에 대한 진단 및 평가 방법에 대한 내용들을 개념적으로 기술하였다.

### 2. 원전 구조물의 내진성능 확보와 진단 평가

#### 2.1 부지의 결정과 조사

원전은 계획 및 부지 조사 단계에서부터 지진에 대한 안전성을 최우선으로 고려하고 있다. 후보 지역 반경 320 km의 광역 조사와 함께 40 km, 8 km, 1 km의 단계적 정밀 조사를 실시하여 부지 적합성을 확인한 후 건설을 결정하고 있으며, 이 과정에서 역사 문헌조사, 위성 및 항공사진 분석, 육상과 해상

광범위한 단층 조사, 그리고 현장의 탄성파, 시추, 트랜치 조사 등의 상세 조사가 실시되고 조사 결과들이 내진설계에 반영되고 있다.

#### 2.2 구조물의 내진설계

원전 구조물의 설계에서는 부지 조사 단계에서 분석한 결과를 토대로 부지에 영향을 미칠 수 있는 최대 지진값을 산정하고 이에 충분한 여유치를 두어 내진설계 수준을 결정한다. 우리나라 원자력법 및 원자력 설계기준의 모태가 되는 미국의 연방법규(10CFR)에서는 원전의 안전관련 설비가 지진을 포함, 어떠한 자연재해 발생시에도 원래의 안전 기능을 상실하지 않도록 설계, 시공되어야 한다고 명시하고 있다. 이에 따라 원전의 다중방호 개념상 내외부 환경에 대한 최종 격리 역할을 담당하는 구조물에 대해서도 매우 높은 수준의 설계기준과 해석 기법들이 적용되고 있으며, 이를 통해 설령 설계지진보다 더 큰 지진이 발생한다 하더라도 원전의 안전정지가 보장될 수 있도록 하고 있다. 일례로 원자로 구조물에 적용되고 있는 지진 응답해석 과정은 <그림 1>과 같이 표현될 수 있다.

#### 2.3 기기의 내진 검증

<그림 1>에서도 알 수 있듯이 원전의 경우 구조물뿐만 아니라 구조물내에 설치된 각종 기기 설비들에 대해서도 내진 안전성이 확보될 수 있도록 설계되고 있다. 즉 원전에 설치되는 모든 안전 관련 기기는 별도로 정해진 규제기준 및 절차에 따라 내진 안전성을 검증 받아야 제작과 설치가 가능하다. 이에 따라 표준형 원전의 경우 호기당 300개 이상의 기기에 대해 막대한 비용을 들여 일일이 해석, 실증 시험, 그리고 경험 자료

\* 한국전력기술(주) 책임기술원  
shljrl@kopec.co.kr

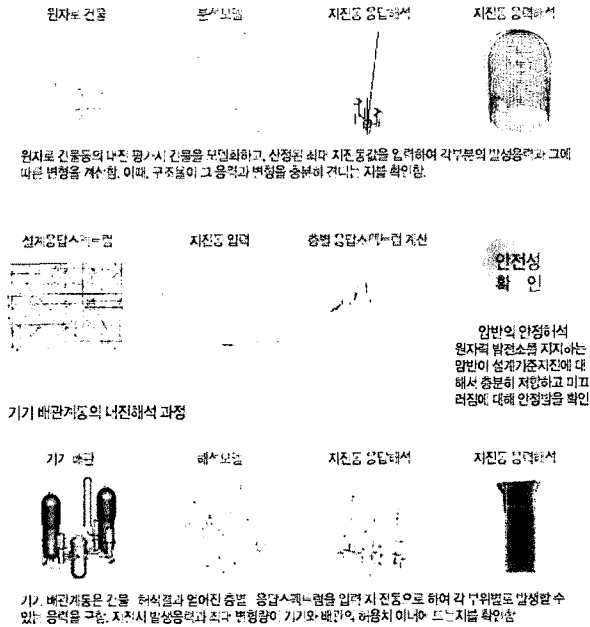


그림 1. 원자로 구조물의 지진응답해석 과정

등을 바탕으로 검증 절차가 이루어진다.

### 2.4 원전의 시공과 준공

국내의 모든 원전 구조물은 연약지반에 의한 지진동의 증폭 영향을 가능한 배제하기 위하여 견고한 암반 상에 건설되어 왔다. 아울러 재료의 선정, 제작, 설치 등 단계별로 엄격한 품질 관리가 이루어져 설계 목표를 달성할 수 있음이 입증된 경우에 대해서만 시공이 가능하도록 규제된다. 또한 준공 후에는 시공된 구조물 및 설비들이 요구하는 안전 여유치를 포함, 목표 성능을 제대로 발휘하는지를 테스트하고 최종 시운전을 통해 기본적인 안전 성능을 확보하게 된다.

### 2.5 확률론적 지진 안전성 분석

원전의 내진 안전성 확보가 아무리 엄격하게 이루어진다 하더라도 지진이라는 현상 자체가 불확실성을 항상 내포하고 있고, 설계, 제작, 시공 과정에서도 불확실성이 뒤따르게 된다. 이에 따라 원전은 각 과정, 그리고 그 과정의 세부 단계마다 상당량의 안전 여유를 두고 설계와 시공이 이루어지는데 이러한 여유가 누적되어 최종 결과물이 완성된다고 할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 결정론적인 접근에 근거하여 이루어진 것이기 때문에 완공 후 원전이 지진에 대하여 갖고 있는 전체적인 안전 여유도, 그리고 부분적인 내진성능 분석을 통한 취약 부분을 구명(究明)할 필요가 있다. 이 문제를 해결하기 위해,

기존의 내진설계 방법 이외에 확률론적인 방법을 이용하여 발생 지진의 정도에 따른 원전의 내진신뢰도를 분석하고 있다.

이러한 과정을 확률론적 지진 안전성 분석이라고 하는데, 여기에는 대상 부지에서 발생할 수 있는 지진의 각종 크기를 확률값으로 제시하는 지진재해도 분석 과정, 지진이 각종 설비들에 가해졌을때 파괴될 가능성을 제시하는 취약도 분석 과정, 그리고 이들의 분석 결과를 발전소 전체의 파괴 순서 및 논리 수목과 연계시켜 원전 전체의 최종 지진손상확률을 계산하는 내진신뢰도 분석 과정이 포함된다. 이러한 과정들에서는 종래의 설계에서 결정론적 변수로 취급되었던 모든 변수(가령 설계 지진, 지반 특성, 재료와 단면 특성 등)들이 변동성이 있는 확률 변수로 취급되며, 이들의 확률밀도함수는 대상 원전의 현장 조사, 시험, 운전 및 시공경험상 누적된 데이터베이스 등을 통하여 실제 상황에 맞게 결정된다.

확률론적 지진 안전성 분석은 기존의 결정론적 방법이 부족해서라기보다는 원전의 지진에 대한 안전 성능을 보다 확실한 수치적 개념으로 제시하여 그 신뢰도를 높이는 것을 목적으로 하고 있다. 아울러 그 결과를 이용하면, 안전 여유도가 상대적으로 떨어지는 특정 부분이 파악되고, 이에 대한 보강이 이루어지므로 시스템 전체의 내진 안전성이 향상될 수 있다.

### 2.6 운영 중 지진 감시 및 지진 발생 후 조치

원전은 주요 구조물과 기기, 부지주변에 지진 감시 설비가 설치되어 상시 지진 감시 체계를 갖추고 있으며, 발생 지진의 크기에 따라 경보 발령, 원자로 안전정지 등 비상 대응 절차를 마련하여 운영되고 있다. 표준형 원전의 경우 설계지진의 1/20 크기의 최대지반가속도를 갖는 지진 발생시 중앙 제어실에 경보가 내려지게 되고, 설계 지진의 1/2 크기에서는 원자로에 대한 안전정지가 이루어지며, 혹 설계 지진 이상의 지진이 발생한다 하더라도 원자로 안전정지 후 방사선 비상 계획에 따른 조치가 취해지도록 되어있다. 한편, 지진 감시 설비에 저장된 지진 기록들은 원전 구조물 및 기기 설비들의 내진 평가의 자료로 활용된다.

### 2.7 내진 범주에 따른 성능 목표 기준

수많은 구조물과 기기의 복합체인 원전의 설계와 시공, 운영에 있어서는 각 부분의 기능과 역할에 따라 안전 성능 목표가 상이하게 정해진다. 이는 원전을 이루는 많은 계통 중 안전성에 중대한 영향을 끼치는 부분을 파악하고 이에 대하여는 더욱 엄격한 안전 성능과 품질을 요구한다는 점에서 매우 합리적인 접근 방법이라고 할 수 있다. 이에 따라 원전의 모든 구조물과

표 1. 원전 구조물의 요구 성능과 내진 등급 분류

등급	요구 성능 및 분류 기준	해당 구조물
내진 범주 I	안전정지지진(SSE)시에 다음의 기능을 유지할 수 있도록 설계되어야 함 - 원자로 냉각재 압력경계의 건전성 - 원자로를 정지시키며, 안전한 상태로 유지할 수 있는 능력 - 10CFR 100.11의 선량한도에 상당하는 잠재적인 외부파괴를 초래할 수 있는 사고의 결과를 방지하거나 완화시킬 수 있는 능력 운전기준지진(OBE)과 정상운전의 하중을 조합한 진동에도 기능을 유지할 수 있도록 설계되어야 하며, 응력 및 변형이 허용한계 이내에 있어야 함	Containment Building(원자로 격납건물) Auxiliary Building(보조건물) Fuel Building(핵연료건물) EDG Building(비상디젤발전기 건물) ESW Intake Structure (기기냉각해수 취수구조물) CCW H/Ex Building (기기냉각수 열교환기 건물)
내진 범주 II	안전정지를 위한 설비(또는 규제요건이나 다른 기준을 만족하기 위하여 내진 범주 I급으로 설계된 비안전성관련 설비)에 물리적으로 근접해 있어 해당 계통의 손상으로 안전정지를 위한 설비와 기기의 안전기능을 방해할 수 있는 구조물, 계통 및 기기를 의미함. 지진사고에 의해 구조적 파손 및 주변의 안전정지 설비기기 또는 비안전성관련 내진범주 I급 기기의 기능을 저하시키지 않도록 설계해야 함. 내진범주 I급 구역의 비안전성관련 구조물과 계통은 내진범주 II급으로 분류함.	Compound Building(복합건물) Turbine Generator Building (터빈발전기 건물) Radwaste Building(폐기물 건물) Access Control Building(출입통제 건물) Yard Fire Protection System (옥외 화재설비)
내진 범주 III	내진범주 I 및 II급에 포함되지 않은 모든 구조물과 설비는 내진범주 III급으로 분류하며, 일반적인 건물 설계규정과 산업시설의 규정 및 기술기준에 따라 설계할 수 있음	그 외 구조물

계통 및 기기는 원전 설계의 핵심인자인 지진 안전성에 따라 내진 범주 등급이 부여되며, 구조물의 경우 요구 성능과 등급 분류를 표시하면 <표 1>과 같다.

2.8 주기적 안전성 평가(경년열화평가)

원전은 철저한 사전 조사와 안전성을 최우선하는 설계, 품질 보증 시공이 된 이후에도 주기적으로 그 안전성을 재평가하도록 법령으로 정해져 있다. 이에 따라 원전은 운영 허가를 받은 날로부터 매 10년마다 원자력법 시행령, 시행규칙 등에서 정하는 구체적인 사항에 대해 그 안전성을 재평가 받고 있다. 이 평가를 통하여 각종 안전 관련 구조물에 대하여 정상적 구조 기능을 확인하는 시험을 실시하고, 검사 결과 및 보수 기록을 검토하여 구조물의 현재 물리적 상태를 확인한다. 또한 안전 여유도를 지속적으로 유지하기 위하여 구조물의 경년열화가 효과적으로 관리되고 있는지의 여부와 적절한 경년열화관리계획이 확립되어 있는지를 확인하고 있다.

상기와 같은 주기적 안전성 평가 이외에도 각 발전소에서는 안전 관련 구조물을 대상으로 반년 주기의 일상 점검과 5년 주기의 정밀 점검을 수행하고 있다. 정밀 점검에서는 육안검사 이외에도 콘크리트 강도 측정, 초음파를 이용한 콘크리트 품질 측정, 염화물 함유량, 중성화 깊이 측정 등의 검사를 수행하여 구조물의 건전성을 정량적으로 평가하고 있으며 지표하 구조물의 관리를 위한 토양 부식성 환경 평가도 수행하고 있다. 특히 발전소가 주로 해안에 위치한 관계로 해수 접촉부에 대한 정밀 점검을 주기적 안전성 평가에서 추가적으로 수행하고 있다. 이 같은 구조물의 검사, 보수 활동과 관련된 모든 기록을 전산화된

구조물수명관리시스템에 입력하여 경향 분석이 가능하도록 체계적으로 유지관리하고 있다. 최근 고리 1호기 계속운전을 위한 국제원자력기구의 현장 검사에서도 국내 원전의 구조물에 대한 경년열화관리 활동 및 프로그램의 적절성을 확인받은 바 있다.

3. 맺음말

지금까지 원전 구조물 및 시설물에 대하여 설계와 건설 단계에서 내진성능이 어떻게 확보되고, 운영 과정에서 내진 안전성을 지속적으로 유지하기 위하여 어떠한 진단과 평가 방법들이 이용되고 있는지에 대하여 간단히 살펴보았다. 이를 통하여 원전 구조물은 초기 단계에서부터 지진에 의한 영향을 최우선적으로 고려하여 설계되고 있으며, 전 생애 주기 동안 충분한 내진 안전 성능이 확보될 수 있도록 엄격한 기준과 다양한 기술이 적용되고 있음을 확인하였다. 이밖에도 원전의 내진 분야에서는 지진동 평가와 제어, 면진 시스템 등 지면 관계상 미처 소개되지 않은 여러 기술들이 개발되었거나 연구중에 있으며, 실용적으로 검증된 기술들은 국내 원전 설계 및 유지 과정에 적극 적용함으로써 원전의 내진 안전성 향상에 기여하고 있다. □

참고문헌

1. *Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plants*, USA, 10 CFR 100, App. A.
2. 원자력법 시행령 제3장 1절, 발전용 원자로 및 관계시설, 대통령령 제19929호, Mar. 2007.