

# 원자력 발전소의 내진설계



이 상 훈

한국전력기술주식회사 원자력본부  
토목건축기술그룹 책임기술원

shljri@kepco-cnc.com

## 1. 서론

최근 일본에서 발생한 대지진으로 인한 후쿠시마 원자력발전소(이하 원전) 사고로 원전의 안전성에 대한 국민적 관심이 집중되고 있다. 판의 경계부에 위치하여 강진이 빈발하고 국토의 거의 전체가 활성단층의 영향을 받고 있는 일본과 달리 우리나라는 원전의 설계기준을 초과하는 지진의 발생 가능성이 매우 희박하나, 만일의 사고시 방사능 물질의 유출로 인해 인근 주민과 환경에 치명적인 피해를 입힐 수 있으므로 다른 산업시설에 비하여 보다 엄격하고도 정밀한 지진해석과 내진설계 요건을 적용하고 있다.

원전의 내진설계는 일반 건물과 달리 부지조사 단계에서 분석한 부지 주변의 단층과 과거 발생 지진을 토대로 부지에 영향을 미칠 수 있는 최대지진값을 산정하여 내진

설계 수준을 정하고 있으며, 우리나라의 경우 세부적인 지진해석 및 내진설계절차는 현재 미국에서 적용되고 있는 수준과 거의 일치한다. 이 논고에서는 우리나라 원전 구조물 및 시설물에 대하여 설계단계에서 내진성능이 어떻게 고려되고, 운영과정에서 내진 안전성을 지속적으로 유지하기 위한 절차에 대하여 간단히 소개하였다.

## 2. 지진해석 및 내진설계

원전 시설물의 지진해석 및 내진설계는 원전의 구조물 및 각종 기기의 내진성 확보를 목적으로 수행된다. 지진해석은 발전소 부지에 발생 가능한 설계입력지진을 정의하고 구조물의 동적해석모델을 이용한 동적 응답해석을 수행하여 구조물 및 기기에 작용하는 지진력을 산출하는 일련의 과정이다. 내진설계는 지진해석결과로 얻은 지진력

에 대하여 구조물과 기기가 안전하게 역할을 수행하도록 단면을 결정하고 배치하는 단계이다. 구조물의 경우는 설계지진력에 견딜 수 있도록 단면을 결정하고, 대부분의 기기는 기성 제품이 특정 원전의 설계지진력 하에서 성능이 유지되는지를 확인하는 내진검증(Seismic Qualification) 과정을 거친다.

## 2.1 내진설계 관련 요건 및 설계 과정

### (1) 관련 요건

국내 원전의 내진설계는 원자력법, 교과부 고시 2009-37호, 미연방법 10CFR Part 100 부록 A를 따라 수행한다. 이외에도 국내 원전의 내진설계와 관련한 규제요건, 설계기준 및 표준 들은 다음과 같다.

- 국내 원자력법 및 관련규정
  - 원자력법 시행령 및 시행규칙
  - 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(교육과학기술부령)
  - 경수로형 원자력발전소 안전심사지침(한국원자력안전기술원)
  - 대한전기협회, KEPIC STB, SNC 등
- 미국 연방법 및 관련규정
  - US 10CFR(미국연방법규)
  - USNRC Regulatory Guides(미국 원자력규제위원회 규제지침)
  - USNRC Standard Review Plan(미국 원자력규제위원회 표준심사지침)
  - 일반산업기준: ASCE, IEEE Standard, ACI 349 등

### (2) 내진설계 과정

원전 내의 구조물, 기기, 시스템은 고유기능 및 중요도에 따라 내진등급이 분류되며 내진설계는 다음의 다섯 가지 과정을 거쳐 수행된다.

- 설계입력지진의 결정

- 지반-구조물 상호작용해석 (Soil-Structure Interaction; SSI)
- 동적응답해석
- 구조물의 내진설계
- 안전관련기기의 내진검증

## 2.2 중요도에 따른 내진분류

원전내의 구조물, 계통 및 기기에 대하여 다음과 같이 3가지로 등급을 부여하며, 등급에 따라 지진해석 및 내진설계 절차를 수행한다.

- 내진범주 I 급 (Seismic Category I)
  - 원자로의 안전에 중요한 시설물로서, 원자로를 포함한 원자로계통, 이를 보조하는 모든 계통 및 이들을 수용하고 있는 건물들
  - 안전정지지진 발생시 기능을 유지할 수 있도록 설계
  - 완전한 탄성범위의 지진해석과 내진설계 수행
  - 예: 원자로건물, 보조건물, 비상디젤발전기건물, ESW Intake Structure, CCW Hx 건물 등
- 내진범주 II급 (Seismic Category II)
  - 원자로의 안전에는 직접적인 관련은 없으나 파손시 안전관련 기능을 저해할 수 있는 시설물
  - 안전정지지진 발생시 건전성을 유지할 수 있도록 설계
  - 탄성범위의 지진해석을 수행하지만 일부 비선형거동을 고려하는 내진설계 허용
  - 예: 복합건물, 터빈건물 등
- 내진범주 III급 (Seismic Category III)
  - 위의 내진범주 I, II급에 속하지 않는 나머지 모든 시설물
  - 일반 산업기준에 따른 내진설계
  - 예: Cold Machine Shop, Chlorination Building, Tank 기초 등

## 2.3 설계입력지진

원전의 지진해석은 미국의 연방법(10CFR100, App. A,

SRP2.5.2)과 IAEA의 Safety Guide(50-SG-S1)에서 규정된 운전기준지진(OBE) 및 안전정지지진(SSE)의 두 단계 지진하중을 적용하여 수행된다.

□ 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)

광역 및 국지 지질과 지진자료, 부지의 지질특성을 고려하여 해당 원전 부지에서 발생 가능한 최대지진을 근거로 산정하는 값으로 안정정지지진 발생시 원전은 가동이 정지된다. 또한 안정정지지진이 발생하더라도 원전의 안전에 중요한 시설물은 다음과 같은 기능을 유지할 수 있도록 설계, 건설되어야 한다.

- 원자로 냉각재 압력한계의 완전한 기능 유지
- 원자로를 즉각 정지할 수 있고 또한 완전한 정지상태로 계속 유지할 수 있는 능력
- 불의의 사고로 인하여 법정한계 이상의 방사능 방출 현상이 발생될 때 발전소 부지 밖으로 미치는 영향을 방지하거나 완화할 수 있는 능력

□ 운전기준지진(Operating Basis Earthquake, OBE)

광역 및 국지 지질과 지진자료, 부지의 지질특성을 고려할 때 원전 수명기간동안 발생 가능하여 발전소 시설물에 영향을 줄 수 있을 것으로 예상되는 지진으로서, 원전

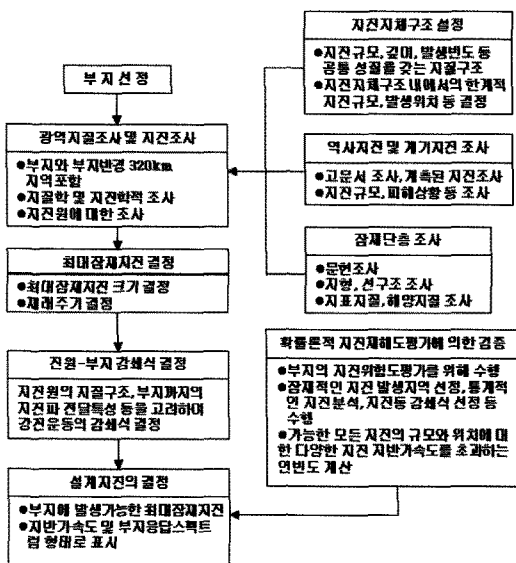
의 안전에 중요한 시설물은 이러한 지진이 발생하더라도 공중의 안전과 건강에 영향 없이 정상적인 가동이 가능하도록 설계, 건설되어야 한다.

원자력발전소의 내진설계를 위한 설계최대지진은 그림 1과 같이 광역 및 세부지질조사, 과거에 발생한 지진 등을 상세히 조사, 검토하고 단층으로부터 발생 가능한 지진의 규모를 평가하고 부지까지 전달되는 거리 및 경로상의 지반 특성을 고려하여 부지에서 발생할 수 있는 최대잠재지진을 결정한다.

그림 1의 절차를 통해 원전 부지에 대한 규모, 최대지반 가속도 등의 값이 결정되면, 관련 요건을 만족하는 설계응답스펙트럼과 이에 대응하는 가속도시간이력을 정의하여 지진해석 및 내진설계를 수행한다. 우리나라 원전에 적용되는 안전정지지진은 0.2g이며 이는 한반도 지진원의 특성과 40년의 원전 설계수명 등의 조건을 근거로 산출된 값이다. 기술자립 및 해외수출을 목표로 개발된 APR1400(Advanced Power Reactor 1400MW)은 0.3g로 더욱 보수적으로 설계하고 있다. 이는 지진 발생 확률이 낮은 우리나라의 상황을 감안할 때 매우 엄격한 수준이다. 참고로 APR1400 표준설계 지진해석은 한반도 지반 특성을 고려하여 Reg. Guide 1.60 표준응답스펙트럼을 기준으로 고진동수영역을 보강한 설계응답스펙트럼(CMS1+)을 적용하였다. 표 1은 우리나라 원전의 설계지진동 및 안전정지지진 현황 (김중학 등, 2007)

(표-1) 우리나라 원전의 설계지진동 및 안전정지지진 현황 (김중학 등, 2007)

발전소	안전정지지진	설계지진동	비고
고리 1	HME 0.2g	EI Centro	가동중
고리 2,3,4	SSE 0.2g	RG 1.60	
월성 1,2,3,4	DBE 0.2g	Newmark	
영광 1,2,3,4,5,6	SSE 0.2g	RG 1.60	
울진 1,2,3,4,5,6	SSE 0.2g	RG 1.60	
신곡리 1	SSE 0.2g	RG 1.60	
신곡리 2, 신월성 1,2	SSE 0.2g	RG 1.60	건설중
신곡리 3,4	SSE 0.3g	CMS1+	



(그림 1) 설계최대지진 결정절차

### 2.3.1 설계응답스펙트럼

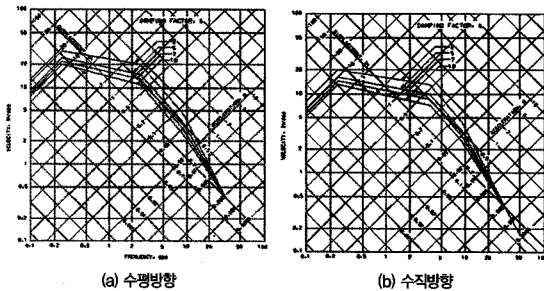
설계응답스펙트럼은 크게 부지고유응답스펙트럼과 표준지반응답스펙트럼으로 구분된다.

#### □ 부지고유응답스펙트럼

특정 부지의 지진성 평가를 통하여 결정된 그 부지에 고유한 형태의 지반응답스펙트럼이다. 일반적으로 광폭의 지반응답스펙트럼을 얻기 위해서는 대상 부지에 적용할 수 있는 충분히 많은 지진기록과 지반응답스펙트럼이 필요하다. 지진해석에 사용되는 최종 형태는 구간별로 단순 직선으로 변환된 일반적인 설계응답스펙트럼 형상을 갖춘다.

#### □ 표준지반응답스펙트럼

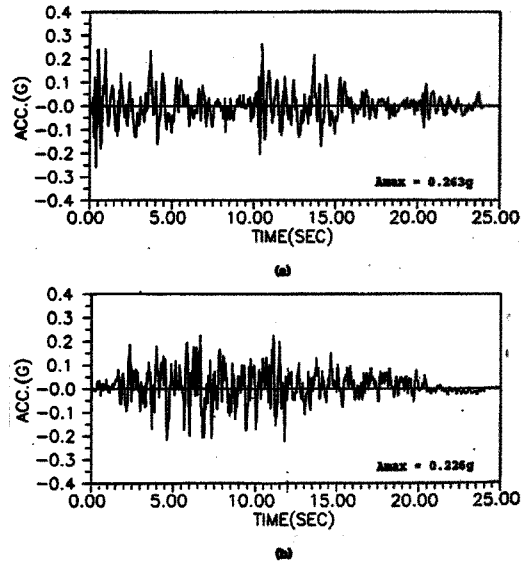
다양한 지반조건에서 기록된 다수의 지진기록으로부터 통계적 처리를 통하여 결정된 대부분의 부지에 적용할 수 있는 지반응답스펙트럼이다. 우리나라 원전은 그림 2와 같이 ASCE의 Committee on Nuclear Structures and Materials of Structural Division에서 제안한 설계응답스펙트럼을 사용하여 지진해석을 수행한다.



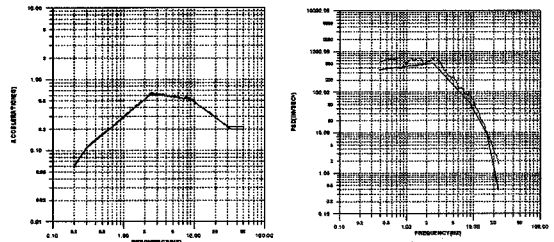
〈그림 2〉 우리나라 원전에 적용되는 표준설계응답스펙트럼

### 2.3.2 설계가속도시간이력

설계가속도시간이력은 시간이력해석의 입력으로 사용된다. 그림 3은 원전의 시간이력해석에 사용되는 전형적인 설계가속도시간이력의 예이다. 규제기준은 단일 세트 또는 복수 세트의 시간이력을 사용하는 경우에 대한 설계가속도시간이력 작성요건을 명시하고 있으나, 복수의 시간이력을 사용하면 해석의 경우가 지나치게 많아지기 때



〈그림 3〉 가속도시간이력의 형태



〈그림 4〉 가속도시간이력의 설계 (그림 5) 가속도시간이력의 최소목  
응답스펙트럼 포괄여부 검토      표파워스펙트럼밀도함수  
검토      포괄여부 검토

문에 대부분 단일 세트의 설계가속도시간이력을 이용하여 지진해석을 수행한다. 단일 세트의 설계가속도시간이력은 복수 세트의 시간이력보다 엄격한 규제기준이 적용된다. 이 가운데 몇 가지 중요한 요건은 다음과 같다.

- 각 시간이력의 응답스펙트럼은 설계응답스펙트럼을 포괄 (그림 4)
- 각 시간이력의 파워스펙트럼밀도함수가 최소목표파워스펙트럼을 포괄 (그림 5)
- 각 방향별 시간이력은 상호 통계학적 독립성 유지

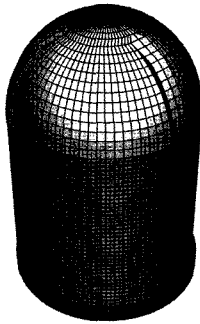
## 2.4 지진해석

### 2.4.1 구조물 모델링

지진으로 인한 원전구조물의 거동을 해석하기 위하여 동적해석모델을 작성한다. 원전구조물의 해석에 사용되는 모델은 수학적 이상화 기법에 따라 크게 세가지로 분류된다.

#### □ 유한요소모델

구조물을 구성하는 벽체, 슬래브, 프레임과 같은 부재들의 기하학적 배치를 고려하여 보, 셸, 솔리드 등과 같은 유한요소를 사용하여 상세 모델링 하는 방법이다. 가장 정확한 결과를 기대할 수 있으나, 가장 많은 자유도가 고려되므로 해석이 복잡하고 해석에 장시간이 소요되며, 특히 구조물이 변경되거나 재료특성 또는 강성에 관련된 변화가 있는 경우 이를 모델에 반영하기 위해서는 많은 노력이 필요한 단점이 있다.



〈그림 6〉 전형적인 유한요소모델

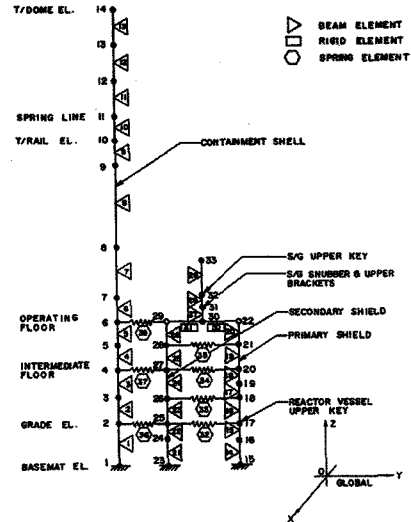
#### □ 집중질량-보요소 모델

전체적인 구조물의 기하학적 특성을 단순한 보요소와 집중질량의 조합으로 이상화한 모델링이며, 격납건물 등과 같이 모멘트 거동이 지배적인 구조물에 주로 사용된다. 그림 7은 원자로건물을 집중질량-보요소 모델로 이상화한 예이다.

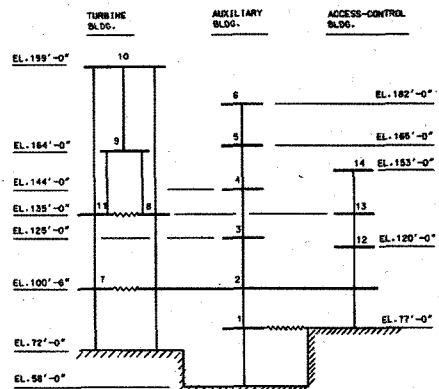
#### □ 슬래브-전단벽 모델

집중질량-보요소 모델과 유사하지만 원전 구조물과 같이 두꺼운 슬래브와 전단벽으로 이루어진 구조물에 효과적으로 적용할 수 있는 모델이다. 각 층 슬래브는 3개의

평면내 자유도( 두 수평 병진방향과 비틀림방향)와 필요시 평면외의 진동모드를 갖는 강체 다이아프램으로 모델링되며, 전단벽은 두 층 사이를 연결하는 탄성 전단스프링으로 모델링 된다. 그림 8은 슬래브-전단벽모델을 이용하여 보 조건물을 모델링한 예이다.



〈그림 7〉 전형적인 집중질량-보요소 모델



〈그림 8〉 전형적인 슬래브-전단벽 모델

### 2.4.2 지진해석 방법

원전구조물의 지진해석에서 일반적으로 사용되는 지진 응답해석 방법은 다음과 같다.

- 모드해석(Modal Analysis)
- 응답스펙트럼해석(Response Spectrum Analysis)
- 시간이력해석(Time History Analysis)

- 복소진동수 응답 해석 (Complex Frequency Response Analysis)
- 등가정적해석 (Equivalent Static Analysis)

□ 모드해석

이론적 모드해석은 구조물의 질량과 강성만을 갖는 비감쇠시스템에 대한 자유진동문제 (Free Vibration Problem)로서, 고유치해석 (Eigenvalue Analysis) 이라고도 한다. 해석으로부터 지진해석모델의 고유진동수 또는 모드형태와 같은 동특성을 파악할 수 있으며, 일반적으로 모드를 이용한 시간이력해석 또는 응답스펙트럼해석과 연계하여 수행된다.

□ 응답스펙트럼해석

모드해석 결과와 설계응답스펙트럼을 이용하여 변위, 축력, 전단력, 휨모멘트 등과 같은 구조물의 최대응답값들을 구하는 해석법이다. 시간이력해석법에 비하여 간단하게 해석결과를 얻을 수 있어 고정지반위에 놓인 구조물의 지진응답해석에서 많이 사용된다.

□ 시간이력해석

모드해석 결과와 설계가속도시간이력을 이용하여 구조물 주요 위치에서의 응답시간이력을 구하는 해석법이다. 비교적 정확한 해석 결과를 얻을 수 있기 때문에 계산된 응답시간이력을 이용하여 2차구조물 해석의 입력기준이 되는 층응답스펙트럼을 작성할 때 주로 사용된다.

□ 복소진동수응답해석

구조물과 입력운동 특성을 진동수영역으로 변환하여 동적응답을 얻는 방법이다. 설계시간이력을 Fourier 변환으로 진동수 함수로 표현하고, 지반-구조물 상호작용 시스템과 같은 대규모 해석모델의 동적해석에 주로 적용한다.

□ 등가정적해석

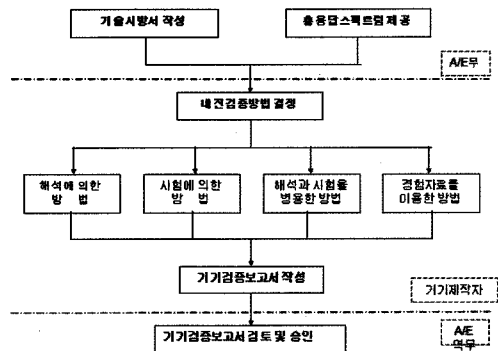
가장 간편하게 지진력을 계산하는 방법이나 정확도가 떨어져 원전의 안전관련 구조물 설계에는 적용될 수 없으며, 일반 구조물로 분류할 수 있는 내진범주 III급 또는 단순한 내진해석모델로 나타낼 수 있는 구조물의 예비 설계 단계에서 활용된다.

## 2.5 지반-구조물 상호작용 해석

지반-구조물 상호작용 (SSI) 해석은 1960년 말부터 미국에서 이론적, 실험적 연구가 진행되어 왔으며, 현재 FLUSH, SASSI, CLASSI, HASSI 등 SSI해석용 컴퓨터 프로그램이 개발되어 실무에 활용되고 있다. 그러나 지반의 모델링 방법, 해석 절차 등의 차이로 인해 프로그램에 해석결과가 달라 Lotung 시험, Hualien 시험 등 실험을 통한 비교 연구가 수행된 바 있다. 우리나라의 경우 Hualien 시험 참여를 통하여 본격적인 연구를 시작하였고, APRI400 설계에 SSI 기법을 적용한 바 있다.

## 2.6 기기의 내진검증

원전에 설치되는 원자로의 안전에 관련된 중요한 계통, 기기 및 부품은 지진발생시에도 안전하게 그 기능을 수행할 수 있어야 하므로 규제기준에서 정하는 내진설계 또는 내진검증을 거쳐 제작되도록 하고 있다. 이러한 안전관련 기기의 내진검증절차는 그림 9에 보인 바와 같으며, 주요 내진검증방법은 다음과 같다.



〈그림 9〉 안전관련 기기의 내진검증 절차

□ 해석에 의한 방법

기기를 지진해석에서 적용한 방법과 유사하게 이론적인 동적응답해석을 수행하여 검증하는 방법으로서 해석 방법은 다음과 같다.

- 등가정적해석: 구조물의 등가정적해석법과 동일
- 동적해석: 주로 응답스펙트럼해석법이 사용되나 더 복잡한 동적해석방법의 사용도 가능

□ 시험에 의한 방법

기기를 진동대 위에 설치하여 실제 진동시험을 실시하여 검증하는 방법으로서 시험방법은 다음과 같다.

- 극한시험(Fragility Test): 기기의 극한상태까지 시험하여 극한저항능력을 평가
- 입증시험(Proof Test): 주어진 조건(요구응답스펙트럼)에 대하여 기기가 안전함을 검증
- 포괄시험(Generic Test): 기기가 다수의 발전소, 건물 및 위치에 동시에 설치되는 경우 극한상태까지는 아니지만 충분히 높은 지진준위에 대하여 검증

□ 해석과 시험을 병용한 방법

이 방법은 기기들이 다음 세 가지 경우에 해당될 때 적용이 가능하다.

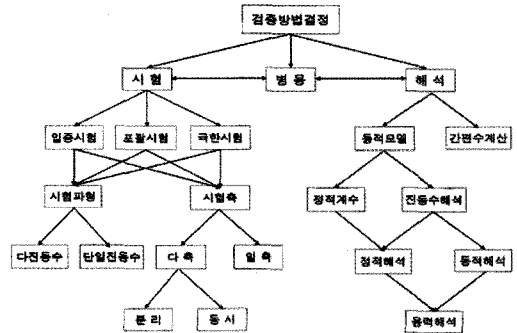
- 작성된 해석모델의 검증이 필요한 경우: 기기의 형상이 복잡하여 정확한 수학적 모델링이 어려운 경우 시험을 통하여 기기의 동적특성을 구한 후 이에 적합한 해석모델을 작성하여 동적해석을 수행하는 경우
- 특정한 시험결과를 유사한 기기에 확대 적용하는 경우: 시험에 의하여 검증된 특정 기기의 시험결과를 유사한 형식의 다른 기기에 적용하여 해석하는 경우
- 기기에 부착된 부품의 시험이 필요한 경우: 기기에 설치된 부품의 해석적인 검증이 불가능한 경우 시험 검증요건을 제공하기 위하여, 기기의 동적해석을 수행하여 얻은 특정 위치에서의 해석결과(응답스펙트럼)를 부품의 시험시 입력운동으로 사용하는 경우

□ 경험자료를 이용한 방법

기 검증된 기기와 기능 및 물리적 특성이 유사한 기기나 실제 지진을 경험한 기기와 유사한 기기의 검증시 기존 기기의 경험자료를 이용하여 검증하는 방법이다. 경험자료로는 기 수행된 해석 또는 시험에 의한 검증자료, 지진을 경험한 시설 내의 기기로부터 얻은 문서화된 자료, 운전 중 동적 환경에 노출된 기기로부터 얻은 자료 등이 해당된다. 경험자료는 많은 경우의 수를 갖는 문서화 또는 수치화된 자료이어야 하며, 사용할 경험자료와 검증할 기

기의 유사성을 기술적으로 신중히 검토하는 과정이 수반되어야 한다.

이상과 같이 열거된 검증방법을 통해서 안전관련 기기의 내진성능을 결정하는 과정은 그림 10과 같이 요약될 수 있다.



<그림 10> 내진검증방법의 결정과정

### 3. 결론

지금까지 원전 구조물 및 시설물에 대한 설계 시 내진 성능이 어떻게 고려되는지에 대하여 간략히 살펴보았다. 지진에 대한 대비는 물리적인 측면 외에도 시스템적인 대응 부분이 있으며, 비록 이곳에 다루지는 못하였으나 생각할 수 있는 모든 사고시나리오에 대한 대응책이 설계에 반영되어 있음을 언급한다. 또한 국내외에서 실용적으로 검증된 기술들을 적극 도입하여 지속적으로 원전의 설계에 적극 적용하고 있다.

### 참고문헌

1. 김종학, 이종보, "APR1400 원자력발전소의 강화된 내진설계에 관한 고찰," 2007 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.2103-2106.
2. 박세문, 김종학, "국내원자력발전소의 지진안전성 확보현황," 한국방재학회지, Vol.8, No.2, 2008, pp.25-34.
3. 김성택, "국내 원전의 내진안전성 증진대책," 한국지진공학회 추계워크샵 발표논문집, 2009, pp.329-337.
4. 한국원자력안전기술원, "원전 등 원자력시설 설계기준 초과 지진에 대한 대응방안 연구," KINS/GR-392, 2008.
5. 현창현, 최호선, 이용일, 김문수, 김상윤, "원자력발전소 내진 설계 규정 개정 방향," 한국지진공학회 추계워크샵 발표논문집, 2008.