

## 원자력발전소 내진설계기준

조 양 희\*

### 1. 서론

원자력발전소(이하 “원전”) 설계시 지진하중은 중요한 설계요소중의 하나일뿐만 아니라 그 해석 및 설계과정이 상대적으로 어렵고 복잡하다. 특히 최근 외국에서 대형지진과 이에 따른 피해사례가 빈번해짐에 따라 국내에서 가동 혹은 건설중인 원전의 내진안전성에 대한 관심이 고조되고 있다.

우리나라는 현재 원자력법 시행령<sup>1)</sup> 및 과기처장관 고시<sup>2)</sup>에 원전의 내진설계방법을 개념적으로 규정하고 있긴 하지만 지금까지 가동 혹은 건설중인 모든 원전이 그 주요기기 및 설계기술의 주도입국에서 규정된 내진설계기준에 따라 설계, 건설되어왔다. 특히, 미국의 원전 내진설계기준은 우리나라의 모든 원전의 내진설계시에 가장 중요한 지침이 되어왔다.

미국의 원전 내진설계기준도 1960년대 말까지는 동적해석을 통한 단순한 내진설계방법으로서 일반 산업시설의 내진설계방법과 큰 차이가 없었다. 그러나 1971년의 San Fernando지진에 자극을 받아 1975년에는 처음으로 원전의 안전관련시설물 설계를 위한 별도의 내진설계절차를 설정하게 되었다. 이 절차는 1981년 부분적으로 수정되었으나 그 내용의 일부가 경우에 따라서는 비안전측의 결과를 주는 반면, 전반적으로는 지나치게 보수적(Conservative)이라는 이유때문에 제정 이후 줄곧 논란의

대상이 되어왔다.

이와 같은 이유로 미국의 원자력규제위원회에서는 1970년말 기존의 내진해석절차를 미해결 안전항목(Unresolved Safety Issue : USI)으로 설정하고, 이를 해결하기 위해서 대규모 장기연구사업<sup>3)</sup>을 수행한 바 있다. 최근(1989. 11) 개정된 새로운 내진해석절차<sup>4)</sup>는 이러한 연구결과를 반영한 것으로서, 기존절차의 거의 모든 부분에 걸쳐 대폭적인 수정이 가해졌다.

본 고에서는 현재 국내 원전설계시 원용되고 있는 미국의 원전내진설계 관련기준의 구성체계를 훑어 본 다음, 최근 대폭 개정된 절차를 중심으로 그 배경 및 세부내용을 소개하고, 이들 개정내용이 설계결과에 미칠 영향을 분석하고자 한다.

### 2. 기존원전 내진설계기준의 구성체계

우리나라의 원자력법 시행령 제51조(지질 및 지진)에서는 원전부지의 지질 및 지진특성을 조사, 분석 및 평가하도록 규정하고 있으며, 동령 제61조(내진성)에서는 원자로시설을 비롯한 모든 주요설비가 설계지진력에 안전하도록 설계되어야 한다고 규정하고 있다. 그러나 이와 같은 법령은 내진설계를 위한 개념적인 사항만을 규정할 뿐 절차에 대한 세부규정은 아직 명문화되어 있지 않은 상황이다. 다만 상기 시행령 제51조에 대해서만 과기처장관 고시 제83-5호(원자로시설의 위치 규정 및 설비에 관한 기준)에서 미국의 “규정”을

\*정회원, 한국전력기술주식회사 토목구조부 차장, 공학박사

준용하도록 명시하고 있다. 이상과 같은 맥락에서 볼때, 현행 국내법령에서는 원전의 내진설계를 위한 세부사항에 대해서는 해당 외국(특히 미국) 기준의 준용을 허용하고 있다고 판단된다.

원전의 내진설계를 위한 미국의 기준은 크게 "규정(Regulations)"과 "표준(Standards)"으로 구분할 수 있다. 규정이란, 내진설계기준의 최상위급이 되는 미연방법규를 말하며 그 구체적인 내용을 보면, 10 CFR 50<sup>5)</sup>의 부록A인 원전을 위한 일반설계기준(General Design Criteria) 제2항(Design Basis for Protection against Natural Phenomena)에서 원전의 안전관련시설물의 내진설계를 요구하고 있으며, 10 CFR 100<sup>6)</sup>의 부록 A (Seismic and Geologic Siting Criteria)에서는 부지특성에 따른 설계기준지진의 종류 및 결정방법을 규정하고 있다. 여기서 이와같은 연방법규의 규정은 궁극적으로 10 CFR 20<sup>7)</sup>에서 규정한 방사선누출 제한요구사항을 만족시키기 위한 것이므로 결국 10 CFR 20가 내진설계를 위한 최상급 규정이 된다고 할 수 있다.

한편, 표준은 다시 크게 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission) 표준과 일반산업표준(Industrial Standards)으로 구분되는데, 전자는 각 기술항목별 규제지침(Regulatory Guide)형태로 되어 있으며, 주로 안전관련시설물의 설계에 적용되며, 후자는 ANSI, ASME, ACI, IEEE, API 등에서 발간되는 산업기술기준으로서 비안전관련시설물 혹은 일반시설물의 내진설계시 적용되게 된다. 표준은 원칙적으로 강제성이 없는 기준이라고는 하지만, 대부분의 경우 이를 대치할만한 여타의 합리적인 방법이 제시되어 있지 않기 때문에 실질적으로 강제기준과 대등하게 적용되고 있다. 한편, 원자력위원회의 표준심사지침(Standard

Review Plan: SRP)이 비록 규정이나 표준과는 성격이 다르긴 하지만 안전관련시설물의 내진설계를 위한 구체적인 절차와 방법에 대한 가장 중요한 세부규정이라고 할 수 있으며, 그 구체적인 내용은 표1과 같다. 한편, 본 고에서 기술하려고 하는 개정된 기준의 내용도 주로 이들 SRP 기준을 구체적인 대상으로 하고 있다.

### 3. 개정배경

미국을 비롯한 선진각국에서도 1950년대까지만 해도 지진에 대한 관심이 그다지 크지 않았으며, 일반산업시설은 물론 원자력시설까지도 등가정적 하중에 의한 정적해석을 통한 내진설계방법을 사용해 왔었다. 그러나 1950년말 이후 산업용 원자로를 이용한 원전건설이 시작되면서 부터 원전시설의 안전에 대한 중요성의 증대로 인하여 동적해석을 통한 내진설계방법이 등장하여 California의 San Onofre원전을 시초로 하여 본격적으로 적용되게 되었으며, 1960년대 말에 이르러서는 원전의 내진설계방법으로 정착하게 되었다.

그러나 1960년대에 적용되었던 동적해석을 통한 내진해석절차는 지극히 초보적인 단계로서 입력운동에서 부터 해석절차 전반에 걸쳐 정립된 방법이 없이 산만한 내용이 대부분이었다. 이는 당시까지만 해도 지진기록이 적었던 관계로 지진공학에 대한 연구가 활발하지 못했던데 기인하였다. 그러나 1970년대에 접어들면서 발생한 California의 San Fernando지진의 격심한 피해에 자극을 받아 이 지진시 얻어진 풍부한 기록을 이용한 본격적인 연구가 시작되었다. 이에 따라 1973년 원자력규제위원회에서는 최초로 종합적이고 체계적인 원전 내진설계절차를 정립하고, 1975년에는 이를 표준심사지침 3.7항 (Standard Review Plan 3.7, Rev.0)으로 정식 발간하게 되었다.

1975년 제정된 내진설계절차는 당시의 기술 및 연구결과를 최대한 반영하였으나, 비교적 짧은 기간에 만들어진 관계로 각 단계별로 기술의 깊이가 일정하지 못한 부족함이 있었다. 그 구체적인 기술상의 단점을 열거하면 다음과 같다.

— 절차중 일부는 경우에 따라서는 비안전측의

표1. 원자력규제위원회 내진설계관련 표준심사지침 목록

번 호	개정번호/발간년월	제 목
2.5.2	2/1989.11	Vibratory Ground Motion
3.7.1	2/1989.11	Seismic Design Parameters
3.7.2	2/1989.11	Seismic System Analysis
3.7.3	2/1989.11	Seismic Subsystem Analysis
3.7.4	1/1981.7	Seismic Instrumentation
3.10	2/1981.7	Seismic and Dynamic Qualification of Mechanical and Electrical Equipment

설계결과를 준다.

- 절차를 구성하는 각 단계별로 안전여유치의 차이가 지나치게 크며, 이들 안전 여유치의 정량화가 불가능하다.
- 관련기술의 발전에 따라 대부분의 단계에서 보다 단순한 방법을 통하여 정확한 결과를 얻을 수 있다.

1977년 원자력규제위원회에서는 이상과 같은 기존 내진설계절차상의 단점을 인식하고 이를 미해결 안전향목으로 설정하는 한편, 이 문제를 해결하기 위한 대규모 장기연구사업인 SSMRP(Seismic Safety Margin Research Program)<sup>9)</sup>를 국립 Lawrence Livermore 연구소(Lawrence Livermore National Laboratory : LLNL)를 주계약자로 하여 수행하였다.

1978년부터 7년동안 계속된 이 사업의 주목적은 기존 표준심사지침 3.7항에 기술된 내진설계절차에 대해 각 단계별로 그 타당성 및 보수성(Conservatism)의 정도를 평가한 다음 최신기술 특히, 확률적인 개념이 도입된 기술을 반영한 개선된 내진설계 절차를 확립하였다.

이 사업은 크게 3단계로 구분되어 수행되었으며, 1단계에서는 절차를 정립하였고, 후속단계에서는 정립된 절차를 이용한 민감도 해석 등을 통한 실용성 확인 및 증진업무를 수행하였다. 1981년초에는 1단계사업이 종료되었고, 이 결과로 얻어진 개선된 내진설계절차 제안안<sup>10)</sup>중 일부를 반영한 개정된 표준심사지침 3.7(Standard Review Plan 3.7, Rev.1)이 1981년 7월에 발간되었다.

그러나 당시의 개선안중 지반과 구조물의 상호작용에 관한 부분의 일부를 제외한 대부분의 내용이 그 실용타당성이 입증되지 못했던 상황이므로 개정안(SRP 3.7, Rev.1)에 반영되지 않았다. 1981년 이후의 후속단계사업을 비롯한 여타 많은 학계 및 산업계의 연구결과 축적된 다양한 기술현황(State-of-the-art)을 반영한 새로운 제2차 표준심사지침 3.7, 개정안(Standard Review Plan 3.7, Rev. 2)의 초안이 1988년 6월 검토용(For Review and Comment)으로 발간된 후 1년여의 검토기간을 거쳐 1989년 11월 최종확정 발간되기에 이르렀다.<sup>9)~11)</sup>

## 4. 개정내용

### 4.1 일반사항

원전의 내진설계과정은 크게 다음과 같은 다섯단계로 구분할 수 있다(그림1 참조).

- 입력지진운동의 결정(Definition of Input Motion)
- 지반-구조물 상호작용 해석(Soil-Structure Interaction Analysis)
- 동적지진응답 해석(Dynamic Analysis)
- 구조물의 내진설계(Aseismic Design of Structure)
- 기기의 내진검증(Seismic Qualification of Equipment)

이상과 같은 다섯단계의 과정중 이번 USI A-40로서 개정대상이 된 과정은 처음 3개단계이다. 첫번째 입력운동 결정단계는 SRP 2.5.2항 및 SRP 및 3.7.1항에서, 두번째와 세번째 단계는 SRP 3.7.2항 및 SRP 3.7.3항에서 취급하고 있다. 네번째 단계인 구조물의 내진설계단계는 구조물의 재료에 따라 여타 산업기준에 따르게 되며, 다섯번째 기기의 내진검증은 SRP 3.10항에서 취급되어 별도과제인 USI A-46(Seismic Qualification of Equipment in Operating Plants)로서 그 개선업무가 수행되어져 왔으나, 본 고의 기술범위 밖이다. 처음 3개 단계에 해당되는 기술내용 및 그 개정내용의 항목별 상세내용은 다음과 같다.

### 4.2 항목별 개정내용

#### 4.2.1 입력지진운동의 결정

입력지진의 결정이란, 그림1에서 보듯이 지진의 발생지인 진원(Epicenter)에서 생긴 지진운동이 전파되면서 감쇄(Attenuation) 되어 발전소 근처의 자연상태의 지점(Free Field)에 설치된 통제점(Control Point)에 도달하였을 때의 운동 즉, 통제점 운동(Control Motion)을 결정하는 과정이다. 이러한 입력지진은 실제로 생기는 지진운동을 알 수 없으므로 여타 설계하중과는 달리 결정적인(Deterministic) 어떤 값을 정할 수가 없다. 따라서 지금까지의 지진기록과 지반이 가지고 있는 지진 및

지질의 특성에 관련된 자료를 통계적으로 분석하고 설계대상시설물의 중요도를 고려하여 발생확률(혹은 재래주기)을 정하고 실제로 생길 수 있는 지진과 가장 유사하다고 생각되는 지진운동을 입력지진으로 결정하게 된다.

입력지진을 만들기 위해서는 실제로 생길 수 있는 지진운동의 여러가지 특성을 가능한 정확히 나타낼 수 있어야 한다. 여기서 지진운동의 특성이란, 해석응답 및 설계에 중요한 영향을 미치게 되는 공학적 특성을 말하는 것으로서, 우리가 흔히  $g$ -

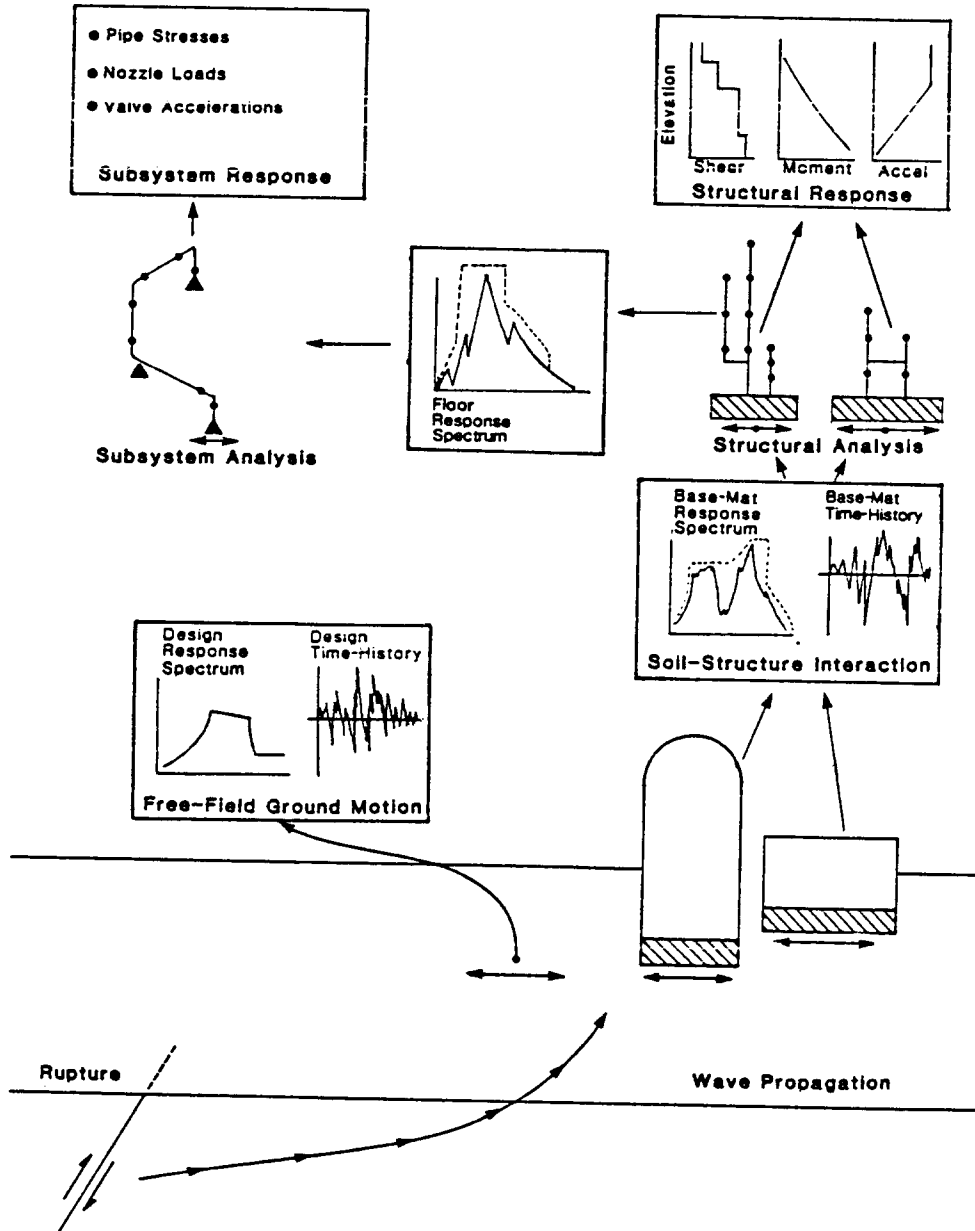


그림 1. 원전의 내진설계과정<sup>2)</sup>

표2. 입력지진운동의 결정분야 기준 개정내용

기술항목	기 존 규 준	개 정 내 용	개 정 이 유
통제점 위치	구체적인 요구사항이 없으나 주로 지표면상에 위치	지반특성에 따라 구분: - 깊고 균질한 암반/토사층이고 충분한 지진 기록이 있는 경우: 지표면 - 얇고 불균질한 토사층이나 지진기록이 불충분한 경우: 기반암상	지반의 특성이 얇고 불균질한 층으로 될 경우에는 깊이에 따른 지진운동의 변화를 정확히 예측하기가 곤란하므로 실제해석시 기반암운동과 지표면운동의 상대적 일치성(Compatibility) 이 보장되지 않음.
설계응답 스펙트럼	Reg.Guide 1.60의 표준설계 응답스펙트럼을 사용하고 필요한 경우 부지의 고유한 특성 고려	부지의 고려한 특성을 고려한 설계 응답스펙트럼을 사용을 원칙으로 하되, 가능한 경우에는 표준설계스펙트럼도 사용가능	현재 사용되고 있는 표준응답스펙트럼이 대부분 지나치게 안전측의 결과를 주는 반면에 특수한 부지조건에서는 비안전측의 결과를 줌.
설계시간이력	설계응답스펙트럼에 부합되는 한개의 시간이력을 사용	다음 두가지방법중 택일: - 설계응답스펙트럼 및 설계 PSDF(그림2 참조)에 동시에 부합되는 한개의 시간이력 사용 - 설계응답스펙트럼에 부합되는 다수(최소한 4개)의 시간이력 사용	기존기준 적용시는 동일한 설계응답스펙트럼을 부합하는 시간이력이라고도 경우에 따라서는 심한 차이가 나며, 특히 특정한 진동수구간의 경우 에너지축면에서 실제기록 지진특성을 만족시키지 못함.
	지속시간에 대한 요구조건 없음	다음과 같은 지속시간 요구조건 추가: 지속시간은 10-25초이어야 하며, 이중 강진구간은 6-15초가 되어야 함.	지진의 지속시간이 지진응답중 비선형 응답, 피로, 액상화(Liquefaction) 등과 밀접한 관계가 있음에도 지금까지 이에 대한 요건이 없었음.

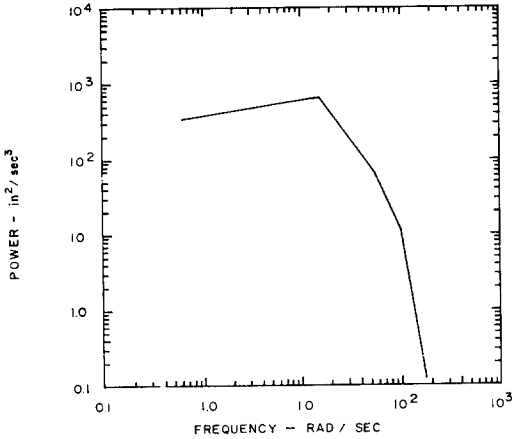


그림2. 최근 새로 채택된 설계 PSDF

값이라고 이야기하는 최대가속도값(Peak Acceleration), 지진지속시간(Duration), 진동수특성(Frequency Characteristics) 및 위상차(Phase Relation)등이 있다.

입력지진운동의 형태를 나타내는 방법으로서의 최대가속도값만을 표시하는 가장 단순한 형태인  $g$  - 값(최대가속도값)과 진동수특성을 나타내는

응답스펙트럼(Response Spectrum)이나 PSDF(Power Spectrum Density Function), 시간의 변화에 따라서 생기는 모든 값을 나타낼 수 있는 시간이력(Time History)등이 있으며, 설계대상구조물의 중요도나 해석방법 등을 고려하여 적합한 방법을 사용하게 된다. 원전의 경우는 여러가지 방법을 함께 사용하는 경우가 많다. 이중 최대가속도값과 응답스펙트럼은 지진기록이나 지반특성의 분석을 통해서 결정되며(SRP 2.5항 참조), 시간이력은 실제로 있었던 지진의 기록을 사용하기도 하지만 대부분의 경우 인공적으로 만들어 사용하게 한다. 인공시간이력은 설계기준에 정해진 응답스펙트럼을 만족할 수 있도록 만들어야 한다(SRP 3.7.1항 참조). 이들 내용의 구체적인 기술사항의 설명은 생략하고, 이번 개정사항중 가장 중요한 내용을 요약하면 표2과 같다.

#### 4.2.2 지반-구조물 상호작용 해석

구조물의 영향권밖에 위치하는 통제점에 도달한 통제운동 즉, 지진입력운동은 대상구조물까지 전달되면서 부딪치는 전 과정에 걸쳐서 에너지의 소산(Scattering), 지진파의 굴절(Refraction) 및 반사

(Reflection), 지반 및 구조물과의 공진(Resonance) 등에 의하여 그 형태 및 크기가 달라지게 된다. 이러한 현상을 지반-구조물 상호작용이라고 한다. 즉, 통제점의 입력운동으로부터 설계대상이

되는 구조물 직하부에서의 운동을 구하는 과정을 지반-구조물 상호작용 해석이라고 한다.

지반-구조물 상호작용 해석은 입력운동 뿐만 아니라 시스템을 구성하는 지반의 공학적(재료 및 기하학적) 특성도 그 특성상 많은 불확실성을 내포하고 있기 때문에 정확한 해석결과를 예측하기가 어렵다. 따라서 이 분야는 타분야에 비하여 가장 많은 연구가 이루어져 왔음에도 불구하고 현재까지도 논란이 끊이지 않고 있는 실정이다. 그래서 이번 개정규준에서도 이 분야의 SRP 전체가 개정되었으

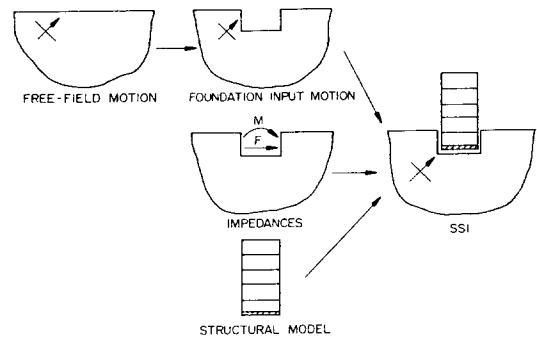
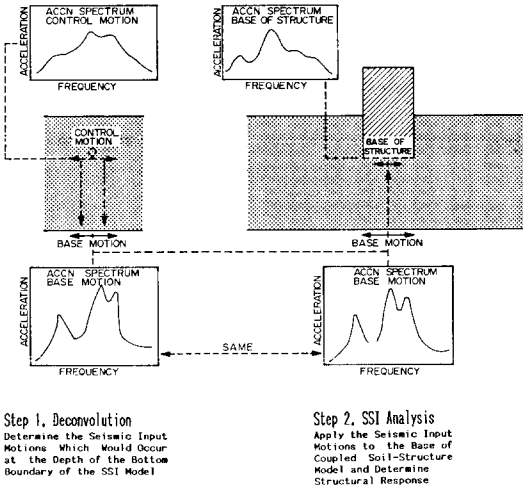


그림3. 직접법에 의한 지반-구조물 상호작용해석

그림4. 부분구조법에 의한 지반-구조물 상호작용해석

표3. 지반-구조물 상호작용 해석분야 규준 개정내용

기술행목	기 준 규 준	개 정 내 용	개 정 이 유
지반-구조물 상호작용을 고려해야 하는 단계	지반이 "암반(Rock)"인 경우	전단변형율이 10 <sup>-6</sup> 일때의 전단파속도가 3,500 ft/sec 이상이면 지반-구조물 상호작용 무시가능. 단, 이때 지반을 고려하는 경우와 고정지반과 고유 진동수 비교를 통한 확인필요	기존규준상의 "암반"이라는 개념이 모호하여 논란이 되어 있음.
지반의 재료 특성	저변형율(Low Strain)에 해당하는 값 사용	전단변형율이 10 <sup>-7</sup> 일때의 평균값, 평균값의 2배, 평균값의 1/2배에 대하여 각각 해석수행 요구	지반조사결과에 따라 지반특성자료의 분산도가 크기 때문에 특정값을 사용한 경우 안전측 결과를 기대하기 곤란함.
해석방법	특정한 방법이 타방법에 비해 항상 안전측 결과를 입증할 수 없는 경우에는 직접법과 부분구조법을 동시에 수행하고 그 결과를 보합	입력운동과 모델이 타당하게 결정되면 어느 한 방법을 사용해도 무방	기존의 두방법 모두가 사용되는 요소(Parameter) 들만 타당하게 정의된다면 그 공학적 사용성이 입증되었음.
매입(Embedded) 구조물의 경우에 적용되는 입력운동	지표면에서 정의된 입력운동을 매입된 깊이의 위치에 그대로 적용	깊이에 따른 입력운동의 변화를 고려하여 해당위치에서 계산된 입력운동적용. 이때 계산된 운동이 원운동의 60%보다 작지 않아야 함.	기존규준의 요건은 지표면운동의 지하로 내려갈수록 감소된다는 가정하에서 설정되었지만, 이러한 가정사항이 실제의 경우와 다를 수 있음.
직접법사용시 지반모델의 경계조건	요건없음	다음 요건 추가: - 수직경계의 위치: 구조물기초폭 기초 끝단에서 기초폭의 3배 이상 - 수평(바다) 경계의 위치: 기초바닥면에서 기초폭의 2배 이상	직접법 적용의 구체적방법 추가에 따른 최소요구사항 삽입

며, 개정항목수도 가장 많다.

지반-구조물 상호작용 해석방법의 종류는 여러 가지 측면에서의 분류가 가능하지만, 현행 기준에서는 크게 직접법(Direct Solution Technique or Finite Boundary Modeling Technique)과 부분구조법(Substructure Solution Technique or Half Space Technique)으로 구분하여 취급하고 있다. 직접법이란 대상지반과 구조물을 모두 포함하는 소위 지반-구조물 시스템(Soil-Structure Interaction System) 전체를 수학적 모델(Mathematical Model)로 이상화하여 동시에 일괄적인 해석을 수행하는 방법이며(그림3 참조), 부분 구조법이란 전체 해석 과정을 크게 3단계(입력운동정의, 지반의 임피던스(Impedence)함수 결정, 시스템해석)로 구분하여 해석하는 방법이다(그림4 참조). 이번 개정된 SRP에서는 기존기준에는 없는 지진파의 전파, 지반특성, 지반모델, 재료의 비선형특성, 지하수위변동, 지반과 구조물의 분리현상 등에서 발생할 수 있는 모든 불확실성에 대한 의무검토조항을 추가하였으며, 이외에도 표3에 요약된 것과 같은 여러가지 요건의 개정이 이루어졌다.

### 4.2.3 동적지진응답 해석

동적지진응답 해석은 전단계에서 얻어진 대상구

조물 혹은 기기의 직하부에서 정의된 입력운동을 대상시설물에 작용시켜 대상시설물 각 위치에서 필요한 형태의 지진응답을 계산하는 과정을 말한다. 현행요건상 그 타당성이 입증되는 경우에 한해서 등가 정적해석(Equivalent Static Analysis)을 사용할 수도 있다고 규정하고 있으며, 지진활동이 적은 지역에서 많이 사용되고 있다. 한국의 원전 내진설계의 거의 예외없이 이용되는 동적해석방법은 크게 응답스펙트럼해석법(Response Spectrum Analysis)과 시간이력해석법(Time History Analysis)으로 구분되는데, 전자는 주로 구조물 설계를 위한 구조물의 단면지지력을, 후자는 기기의 내진 검증이나 부계통(Subsystem)의 내진설계에 사용되는 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum)을 각각 얻기 위해 사용되고 있다.

동적해석은 대상물을 수학적 해석이 가능한 형태로 이상화시키는 과정인 모델링과정과 동적운동방정식의 해를 구하는 해석과정으로 나누어질 수 있다. 이상적인 모델링과정을 위해서는 특정한 기준이나 이론이 필요하다기 보다는 실제 경험을 통해 얻어지는 공학적인 감각이 더욱 중요한 반면 해석과정은 다양한 이론적인 연구결과의 적절한 적용이 중요한 부분을 차지하게 된다. 해석과정분야에서는 현재 모드중첩법에 적용되는 각 모드응답의 합성, 각 방향성분의 합성, 효과적인 감쇠

표4. 동적지진응답 해석분야 기준 개정내용

기술항목	기 준 규 준	개 정 내 용	개 정 이 유
응답스펙트럼 해석을 위한 모드응답조합	밀착(Closely-Spaced Mode)모드를 제외하고는 모든 진동수구간에 걸쳐 SRSS(Square Root of the Sum of the Squares) 사용	33 Hz 이하의 진동수구간에서는 동일방법을 사용하고, 33 Hz 이상의 고진동수 구간에서는 산술적 가산방법을 사용해 조합한 후 두 구간의 결과를 SRSS합.	SRSS 방법은 각 모드응답의 최대치의 시간상 위상이 임의(Randomly)로 분포한다는 가정하에 사용하는 방법인데 반하여, 실제 고진동수 모드에서는 이 가정이 성립하지 않음. 따라서 기존 기준 사용시 대부분의 경우 비안전측의 결과를 주게 됨.
감쇠값의 적용	Reg. Guide. 1.61의 값 사용	Reg. Guide. 1.61의 값을 사용하되, 발생응력의 상관관계에서 부합되도록 하는 요구사항을 강조	기존규정을 구체화시킴.
지상탱크구조의 내진설계	없음	탱크의 구조적 유연성(Flexibility)과 내부 유체의 동수력학적인 거동(Sloshing)을 고려하는 새로운 설계요구사항 추가	지금까지 특정한 기준이 없었던 관계로 탱크를 강체로 가정하는 설계(Housner Method)를 주로 사용해왔는데, 이는 경우에 따라 비안전측 결과를 줌.
지하매설관의 내진설계	지하매설관을 비롯한 지하 구조물이 지진시 지반과 일체로 거동함을 가정하는 관성효과(Inertial Effects)에 의한 설계수행	관성효과에 의한 설계요구사항을 삭제하고 지반의 구조물에 대한 상대운동(Relative Deformation and Earth Pressure)에 의한 영향 고려항목 추가	기술현황 반영을 통하여 기존규정을 구체화시킴.

(Damping)값의 결정, 비선형특성의 고려방법 등과 같은 기술항목에 있어서 많은 논란이 있어 왔으며, 이번 개정내용도 주로 이들 분야에 관련된 것들이다. 이번 개정내용을 요약하면 표4와 같다.

#### 4.3 개정에 따른 영향

개정된 내진설계규준의 내용은 1975년 이후의 연구결과, 산업계의 경험, 새로운 설계 및 규제절차 등을 충분히 반영한 개선된 방법을 채택하고 있기 때문에 기존규준 적용시 문제시 되어왔던 과다설계(Excessive Conservatism)를 줄임으로써 건설비의 감소효과 뿐만아니라 발전소 전체의 내진안전성도 제고시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 경우에 따라서는 새롭고 좀더 까다로운 해석절차로 인한 해석 및 설계비용의 증가, 이에 따른 인허가비용의 증가 등이 예상되기도 한다.

이번에 개정된 내용은 전술한 바와 같이 기존의 규준적용시 안전성에 문제가 있어서라기 보다는 기존규준의 지나친 보수성 및 일관성없는 안전여유치 등의 개선에 목적이 있으므로 기설계된 원전에는 적용할 필요가 없고, 다만 차후 건설될 원전의 내진설계에만 적용된다. 개정내용중 많은 부분이 원천적인 내용의 개정없이 기존규준의 적용방법을 구체화하거나 표현방법의 개선에 관련된 것이기 때문에 그 개정에 따른 영향이 크지 않을 것으로 판단된다. 그러나 개정내용중 공학적 영향이 있을

것으로 판단되는 주요기술항목 및 그 영향을 요약하면 표5와 같다.

#### 5. 결론

원전의 내진설계는 원전고유의 안전에 대한 중요성을 감안하여 일반산업시설의 경우보다 월등히 복잡하고 정확한 설계를 요구하는 별도의 규준에 근거하여 이루어지게 된다. 최근 개정된 미국의 원전 내진설계규준에서는 1975년 최초 발간된 이후 최근까지 축적된 학문적 연구결과, 실무에서의 경험, 실측자료의 분석결과 등을 최대한 반영함으로써 지금까지 줄곧 논란의 대상이 되어왔던 모든 기술항목을 개선하였다. 이를 통하여 한편으로는 원전의 내진안전성 제고와 각 단계별 안전여유치의 평준화를 추구하였으며, 또다른 한편으로는 일부 기술항목에 대한 지나친 내진과다설계를 개선함으로써 경제적인 설계와 발전소 전체공사비 절감의 효과가 있을 것으로 예상된다.

현재 국내의 내진해석기술은 그간의 기술개발이나 원전 내진설계 참여 및 주도를 통하여 해석 및 설계기술 자체는 극히 일부를 제외하고는 자립되어 있는 수준이지만, 가장 중요한 내진설계 관련규준 및 절차가 정립되어 있지 못한 관계로 독자적인 내진설계업무와 인허가측면에서 심한 혼선을 빚고 있는 실정이다. 따라서 이번 미국의 내진설계규준 개정을 계기로 차후 우리나라에서도 국내의 고유한

표5. 주요개정항목의 공학적 영향(예상)

SRP 항목번호	개 정 내 용	설계 및 시공에 미치는 영향	인허가에 미치는 영향
3.7.1	설계시간이력의 추가요구사항(PSD 혹은 다수의 시간이력 사용)	- 계산된 인공시간이력의 설계 PSD와 비교를 위한 추가계산비용 소요, 특히 다수시간이력 사용시는 전체 내진해석비가 2배이상 증가 예상 - 기존규준 적용시보다 내진안전성 향상	규제기간의 검토 비용 증가
3.7.2	지반 - 구조물 상호작용 해석시 불확실성에 의한 영향 고려	- 새로 제시된 각종 불확실성을 고려하기 위한 추가해석비용 소요 - 과다설계방지로 인한 설계 및 시공비 감소 예상 - 내진안전성 향상	-
3.7.2	동적해석을 위한 모드조합법의 개선(고진동수 모드의 조합방법)	- 모드조합을 위한 전산프로그램 수정(일회성) 비용 소요 - 내진안전성 향상	-
3.7.3	지상탱크구조의 내진설계규준 추가	- 유연성을 고려한 탱크의 내진해석시 기존방법보다 25% 정도의 해석비 증가 예상 - 기존방법 사용시보다 탱크재료비 10%이상 증가 예상 - 내진안전성 향상	-



지진 및 지질특성, 기술수준 및 특성 등을 감안한 독자적인 기준 및 절차를 개발함으로써 신규로 건설되는 원전에 대한 품질높은 내진성 확보, 나아가서는 관련기술의 해외진출을 추진할 수 있도록 해야겠다.

### 참 고 문 헌

1. 원자력법 시행령, 대통령령 제12729호, 제51조(지질 및 지진)와 제61조(내진성), 1989. 6. 16.
2. 과기처장관 고시 제83-5호, 원자로 시설의 위치구조 및 설비에 관한 기술기준, 1983. 10. 20
3. Smith, P.D., et al. Seismic Safety Margin Research Program Phase I Final Report, NUREG/CR-2015, Lawrence Livermore National Laboratory, 1981. 4.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan, Rev.2, Nov. 1989.
5. Title 10, Atomic Energy, Code of Federal Regulation, Part 50, Licensing of Production and Utilization Facilities
6. Title 10, Atomic Energy, Code of Federal Regulation, Part 100, Reactor Site Criteria
7. Title 10, Atomic Energy, Code of Federal Regulation, Part 20, Standard of Protection against Radiation
8. Coats, D.W., Recommended Revision to Nuclear Regulatory Commission Seismic Design Criteria, NUREG/CR-1161, Lawrence Livermore National Laboratory, May 1980.
9. Coast, D.W. and Lappa, D.A., Value/Impact Assessment for Seismic Design Criteria, NUREG/CR-3480, Lawrence Livermore National Laboratory, Aug. 1984.
10. Shaukat, S.K., Chokshi, N.C., and Anderson, N.R., Regulatory Analysis for USI A-40, "Seismic Design Criteria", Draft Report for Comment, NUREG-1233, Nuclear Regulatory Commission
11. Philippacopoulos, A.J., Recommendations for Resolution of Public Comments on USI A-40, "Seismic Design Criteria", NUREG/CR-5347, Brookhavn National Laboratory, June 1989.
12. Wheaton, R.D., Evolving Technology in Seismic Engineering, EDS Nuclear, July 1982