

원자력발전소의 내진 안전성 확보 Verification of Seismic Safety of Nuclear Power Plants

이종림* 장천중** 주광호***
Lee, Jong-Rim Chang, Chun-Joong Joo, Kwang-Ho

Abstract

The ultimate safety-goal of nuclear power plants should be targeted at preventing release of nuclear radiation compared to general structures. Accordingly, the phases of siting, design, construction and operation of NPPs are severely regulated by codes of aseismic design so as to assure safety of NPPs. To accomplish this goal, strict quality assurance and seismic qualification tests should be conducted for all phases of NPP construction. In addition, seismic monitoring systems should be installed and always in operation to provide proper post-earthquake procedures. Besides, periodic safety review should be performed during operation along with the seismic margin assessment. In this paper, general procedures to secure seismic safety of NPPs are systematically reviewed and additional considerations for improvement are suggested.

1. 서론

최근 세계적인 지진피해의 경험으로부터 지진대응기술이 활발하게 개발되고 있으며 국내에서도 사회기반시설에 대한 내진설계가 강화되고 있다. 그러나 원자력발전소(이하 원전)의 내진안전성 확보 문제는 국내·외를 막론하고 새삼스러운 문제가 아니다. 원전의 경우 내진안전성이 확보되어야 하는 가장 큰 이유는 궁극적인 안전목표가 방사능 물질의 외부누출 방지에 있기 때문이다.

원전 내진설계와 관련된 국내 원자력법 및 원전 설계기준으로 준용하고 있는 미국 연방법규(10CFR)에서는 원전의 안전관련 설비가 지진을 포함하는 모든 자연재해 발생시 혹은 그 이후에도 본래의 안전기능을 상실하지 않도록 설계, 시공되어야 한다고 명시하고 있다. 그 세부 절차와 방법은 한국원자력안전기술원의 "안전심사지침서"에 제시되어 있으며, 추가로 미국 NRC(Nuclear Regulatory Committee)의 규제지침과 산업표준을 일부 준용하도록 하고 있다. 근래에는, 우리나라의 독자적인 기술기준을 수립하기 위하여 대한전기협회의 주관하에 미국의 관련 기술기준의 내용을 중심으로 작성된 전력산업 기술기준(KEPIC)을 부분적으로 적용하고 있다.⁽¹⁾

이러한 법규에 따라서 현재 국내에서 가동 혹은 건설 중인 원전의 내진설계기준은 일반 구조물과는 비교가 되지 않을 정도로 엄격하고 정밀한 설계 및 품질관리를 요구하고 있다. 최근 개정된 기준에는 원전설비의 지진감시시스템 및 지진발생 후 원전의 안전확인 및 조치절차에 대한 대폭적인 보강으로, 설계지진보다 더 큰 지진이 발생되더라도 원전의 안전정지만은 보장될 수 있도록 요구하고 있다. 본 고에서는 국내 원전의 지진에 대한 안전성확보 방안을 체계적으로 정리하고 향후 기술개선 방안을 제시코자 한다. 원전의 내진안전성 확보의 기본 과정인 내진설계는 차세대 원전을 예로 들어 기술하고자 한다.

원전의 내진설계는 원전 내·외부에서 발생가능한 모든 사건에 대한 안전설계의 일환으로 이

* 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정회원
** 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원
***한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

루어지고 있는데, 여기서 언급한 사건이란 연간 발생확률이 천만분의 일을 초과하는 모든 사고 즉, 압력용기 및 배관의 파단사고, 터빈날개의 파단사고, 비행기의 추락사고, 태풍에 의한 비산물 충격하중까지도 포함되어 있다. 또한, 원전의 내진안전성 확보란 구조물의 내진설계만이 아니라 원전의 모든 안전설비(구조물, 배관, 시스템, 부품 등)를 대상으로 설계, 구매, 시공, 운영 전반에 걸쳐 내진안전성을 확보하는 것을 의미하는 것으로서 그 과정은 크게, 1) 설계지진력의 결정, 2) 구조물의 동적 지진응답해석, 3) 구조물 및 설비의 내진설계, 4) 구조물 및 기기계통의 내진검증, 5) 확률론적 지진위험도 평가와 같은 5 단계로 나눌 수 있다.

이 과정 중 거의 대부분은 일반 구조물의 내진설계 과정에 없는 원전에만 적용되는 고유한 것으로서, 내진안전성 향상을 위한 중복개념으로 이해될 수 있다. 즉, 일반 구조물의 경우에는 해당 설계기준에서 사전에 명시된 표준설계지진을 대상으로 하여 구조물의 지진응답을 계산하고 이 결과 얻어진 지진력에 저항할 수 있을 정도로만 내진설계하고 있는데 비하여, 원전의 경우 개별 원전부지에 고유한 설계지진 결정, 안전관련 기기에 대한 내진성 검증, 실제지진에 대비한 정밀지진 계측시스템의 설치, 지진 발생시 안전조치 및 손상도 평가 등의 과정이 추가로 이루어진다. 특히, 결정론적인 방법으로 이루어진 내진설계 결과를 검증하기 위하여 최종 건설 완료 상태에 근거한 확률론적 지진 PRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment: 지진위험도 평가)를 별도로 수행함으로써 원전의 내진안전성을 재확인하게 된다. 상기와 같은 일련의 과정을 통한 원전의 내진안전성 확보 절차의 흐름도는 그림 1과 같다.

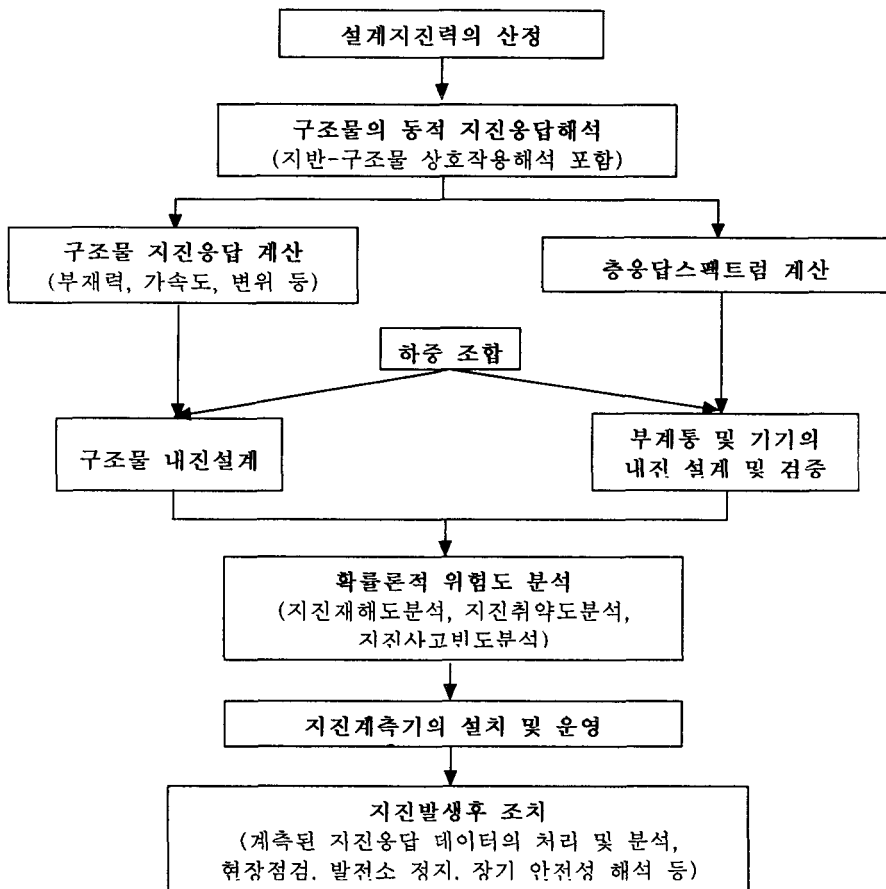


그림 1. 원전의 내진안전성 확보 절차

2. 설계지진의 평가

국내 원전의 설계지진은 과학기술부 고시 제 83-5호 “원자로 시설의 위치, 구조 및 설비에 관한 기술기준”에서 준용하도록 규정된 미국 연방법(10 CFR Part 100의 Appendix A)에 따라 결정된다. 원전 설계지진의 결정은 전체 내진성 확보 과정 중 가장 중요한 과정이나 아직도 설계지진의 결정과정에는 많은 불확실성이 내포되어 있다. 원전부지에서 발생 가능한 최대 지진을 SSE(Safe Shut-down Earthquake: 안전정지지진)이라 하는데, 이 SSE 발생 시에도 원전의 모든 안전관련 설비가 건전성을 유지하도록 설계한다. 또한, 발전소 수명기간 동안 위험을 초래하지 않고 지속적으로 발전설비가 제 기능을 유지하도록 설계하는 OBE(Operating Basis Earthquake: 운전기준지진)를 설정하여 지진 발생시 운전지속 여부를 판단하고 있다.

국내 원전의 설계지진은 원전부지로부터 320km 반경 이내에 있는 지질 및 지진학적 조사를 통하여 地震地體構造區(Seismotectonic Province) 및 地構造(Tectonic Structure)를 결정한다. 지진지체구조란 지진 발생빈도 및 최대지진 등 지진특성이 동일할 것으로 추정되는 구역을 말하며, 지구조란 활동성 단층과 같이 지진활동과 직접적으로 관련된 지질구조를 말한다. 이때, 전체뿐만 아니라 일부라도 반경 320km 이내에 속하는 지진지체구조구나 지구조는 모두 포함되어야 하기 때문에 실질적으로는 반경 320km 밖의 지역도 조사·분석에 포함된다.

다음 단계로 각 지진지체구조구 및 지구조의 최대지진이 부지에 야기시킬 수 있는 최대 지반 가속도를 모두 평가하여 그 중 가장 큰 값을 원전부지의 설계지진으로 결정한다. 통상, 지진 발생 위치에 대한 가정은 실제 최대지진의 발생위치에 관계없이 해당 지진지체구조구 내에서 또는 해당 지구조 상에서 부지에 가장 가까운 지점을 발생위치로 가정하고 이 지점에서부터 부지까지는 적절한 감쇠식을 적용하여 매우 보수적으로 평가한다. 예를 들면, 월성원전 부지의 경우에는 지진지체구조구의 경계에서 최대지진이 부지에서 발생한 것으로 가정하지 않고 최대지진(지리산지진)이 부지에서 발생하는 것으로 보수적으로 가정하였다. 국내 기존 원전부지의 경우 여기에 안전여유도를 추가하여 0.2g를 SSE 값으로 결정한 반면, 2010년을 준공목표로 현재 개발중인 차세대원전의 경우에는 국내·외 지진특성 및 경제성을 고려한 표준설계와 국외 차세대원전의 내진설계값 상향 추세 및 국내 일부 부지에서 SSE가 0.26g로 조사된 바가 있어 SSE를 0.3g로 결정하여 설계하고 있다.^{(2), (3)}

2-1 원전부지 지반안정성 평가

국내 원전의 경우 원전의 지진안전성 확보를 위한 설계지진 결정 이외에도 원전부지의 지반 안정성 확보를 위하여 지질조사, 지진해일 평가, 사면안정성 평가 등을 수행한다. 특히 지질조사는 원전의 지반안정성 평가에서 매우 중요한 요소로서 조사의 상세 정도에 따라 광역조사(반경 320km), 부지조사(반경 8km), 그리고 발전소 부지조사(반경 약1km)로 구분된다. 광역조사에서는 광역적 지질환경 및 지질구조(단층, 습곡, 파쇄대 등)와 지진특성을 평가하며, 부지조사에서는 지표 지질 조사 및 지진자료 평가를 통하여 원전의 안전성에 영향을 줄 수 있는 지질구조의 존재 여부를 정밀하게 조사한다. 발전소 부지조사에서는 안전관련 구조물 및 기기의 공학적 설계에 필요한 각종 지반공학적 특성값을 얻기 위하여 정밀 지질조사, 시추조사 및 물리탐사를 수행한다. 발전소 부지조사에서 가장 중요한 것은 활동성 단층, 지반의 함몰 가능성 등 지반의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 요소에 대하여 발전소 기초지반 굴착시 각 단계별로 현장평가를 수행하여 안정성을 분석한다.

2-2 단층의 활동성 평가 방법

세계 여러 나라에서는 각국의 지질 및 지진특성에 맞고 또한 각 산업시설의 종류에 따라 활성단층의 정의를 달리하고 있다. 국내 원전에서는 미국 규정에 따라 표 1과 같이 5만년 이내에 한

번 이동한 단층 혹은 50만년 이내에 2번 이상 이동한 단층을 활성단층(Capable Fault)이라고 정의하고 있고, 원전부지 반경 8km 이내에 활성단층이 있는지를 정밀조사하고 원전에 미치는 영향을 분석하도록 하고 있다

단층의 활동성을 평가하기 위해서는 먼저 과거 문헌을 충분히 분석하고 조사지역의 항공사진 혹은 지형도를 이용하여 선형구조를 파악한다. 선형구조는 최근 운동한 지형의 변화를 나타내어 주기 때문에 활성단층의 조사과정에 제일 먼저 수행되어야 한다. 선형구조가 파악되면 현장 지질 조사를 수행하여 단층인지 아닌지를 검토해야 하고, 지표지질조사 결과 일정 규모 이상의 단층이 발견될 경우 단층의 변위량과 이동 연대를 측정한 후 변위속도를 판정하여 단층이 등급을 판정한다. 지표지질조사를 수행할 때에는 분포암석의 상세한 내용이 파악되어야 하며 단층의 운동특성과 연관지어 고려해야 한다. 단층의 운동시기를 파악하기 위해서는 연대측정(절대연대 혹은 상대연대)은 다양하게 분석하여 정확한 값을 계산해야 한다.

일본에서는 활성단층의 연대측정을 위하여 주로 C¹⁴을 수행하고 있으며, C¹⁴(방사성 원소)에 의해 구하기 어려운 5만년 이상된 지층의 연대를 구하기 위하여 최근에 개발된 ESR(Electron Spin Resonance), OSL(Optical Stimulated Luminescence) 및 TL(Thermo Luminescence)의 적용을 검토하고 있다. 그러나, 지금까지의 연구경험에 의하면, OSL시험방법은 해안 및 하안단구 퇴적물에 매우 효과적이고 TL 시험방법은 해양퇴적물에 적용가능하나, 우리 나라에서 지금까지 적용하여온 ESR 시험방법은 신뢰하지 않고 있다. 그 주요 원인은 단층작용시 역학적 파쇄 및 마찰 열작용에 의해 단층 비지내 석영입자의 ESR Signal이 완전히 재구성된다는 가정에 근거를 두고 있으나, 연구결과 지표근처 단층이 일어날 때 완전한 재배열이 거의 이루어지진 않는 것으로 밝혀졌기 때문이다.⁽⁴⁾

표 1. 각국의 활성단층 기준

미 국 (Capable Fault)	과거 5만년 이내에 적어도 한번의 지표 가까이 또는 지표에서 이동이 있거나 50만년 이내에 재이동을 갖는 단층
일 본 (Active Fault)	제4기에 활동한 적이 있는 단층: A급 : $1 \leq S \leq 1000$ 년 동안 평균변위속도(mm/year) B급 : $0.1 \leq S < 1$ C급 : $S < 0.1$
IAEA (Capable Fault)	지표 근처 또는 지표에서 상대적인 변위에 대한 증대한 잠재성을 갖는 단층

3. 설계입력지진의 산정

원전 내진설계를 위해서는 먼저 내진해석에 사용할 입력지진 및 감쇠비와 같은 내진해석 입력 자료를 타당하게 선정하여야 한다. 원전 내진설계시 적용하는 입력지진은 최대 지진가속도의 크기, 지진의 진동수 특성, 지진의 지속시간 등을 이용하여 정의한다. 이 응답스펙트럼을 포괄하는 지진가속도 시간이력을 작성할 때에는 전체 지속시간이 10초-25초 이상, 강진운동 부분 지속시간은 6초-15초 이상이 되도록 한다.

감쇠는 구조물 또는 기기가 운동을 할 때 외부로 발산되는 에너지량을 정의하는 특성값으로서 동적 응답에 큰 영향을 미친다. 감쇠는 일반적으로 재료 특성, 응력 수준, 변형 상태, 구조물 또는 기기의 기하학적 형상, 구조 부재의 연결방법 등과 같은 많은 요인에 따라 달라지며, 따라서 여러 종류의 감쇠가 존재한다. 그러나 동적 지진응답해석에서는 이 여러 종류의 감쇠들을 등가 점성감쇠의 향으로 나타내는 것이 효과적이며, 이 경우 감쇠특성을 구조 부재의 특성과 지진하중의 크기에 따라 감쇠비로 나타내어 사용한다.

3-1. 부지고유 응답스펙트럼 작성

설계지진입력운동을 자유장 지표면에 정의하는데 그 이유는 대부분의 강진 지반운동 기록은 지표면 또는 지표면 부근의 구조물 기초 바닥층에서 기록된 것들이기 때문이다. 따라서, 원전의 내진 설계 입력지진을 산정하기 위하여는 대상 부지의 지각구조상의 환경(잠재적인 지진원, 크기 및 위치)이 비교적 잘 알려져 있을 때 지반 조건을 고려하여 부지고유의 지반응답스펙트럼을 개발하여 사용하게 된다. 이러한 응답스펙트럼의 개발은 해당 부지에 특별히 적용될 수 있거나 아울러 해당부지의 지반운동에 대한 물리적 특성들(지진원의 특성, 지진파의 지질학적 진행 경로, 국부적인 지반조건)들의 영향을 모델링하고 해석하는데 특별히 적용할 수 있다고 간주되는 선택된 여러 강진운동에 대한 통계적 해석에 기초를 둘 수 있다.

부지 고유한 응답스펙트럼을 작성하는 방법으로는 1) 강진 관측기록에 의한 방법 2) 확률론적 지진재해도를 이용한 방법 3) 유사 지진기록을 이용하는 방법 4) 합성지진파를 이용하는 방법 등이 있다. 부지 고유한 응답스펙트럼을 작성할 때에는 확률론적인 기법이 고려하여야 하며, 응답스펙트럼의 수준은 대상 발전소에 대하여 요구되는 초과확률의 수준에 상응하여야 한다. 부지 고유한 응답스펙트럼이 평균 + 표준편차 수준에서 작성되어야 하는데 이 요건은 주어진 설계지진에 대하여 약 90% 이상의 비초과 확률을 갖게 하는 응답요소가 계산되도록 하기 위한 것이다.

그러나 우리 나라의 경우, 부지고유 응답스펙트럼을 개발하는데 필요한 지진자료가 아직도 충분하지 않기 때문에 원전의 내진설계를 위한 지반응답스펙트럼은 아래 그림 2와 같이 미국 NRC의 표준 설계지반응답스펙트럼을 사용한다. 수직 성분은 모든 진동수 구간을 통하여 상응하는 수평 성분의 값에 2/3를 곱한 값으로 한다.⁽⁵⁾

차세대원전에서는 설계지반응답스펙트럼으로 그림 2에 보여주고 있는 미국 NRC의 표준설계지반응답스펙트럼 이외에 포괄부지조건을 고려하여 입력지진동의 통계점을 암반노두에 정의한 NUREG/ CR-0098 스펙트럼의 저·고주파수 영역을 확장한 설계지반응답스펙트럼을 추가로 사용하여 2개의 설계지반응답스펙트럼으로 기본설계를 하였다(그림 3 참조).^{(6), (7)}

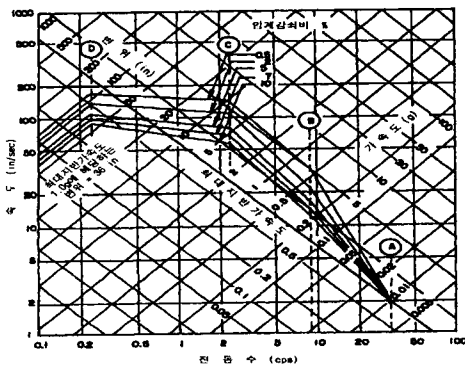


그림 2. 미국 NRC 표준설계지반응답스펙트럼 (수평지반가속도 1.0 g 기준)

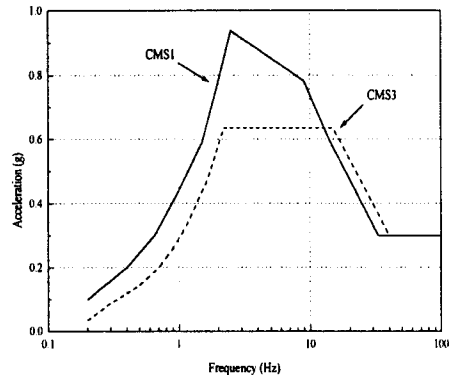


그림 3. 차세대원전의 설계지반응답스펙트럼 (수평방향, 5% Damping)

4. 지진응답 해석

구조물의 응답을 계산하는 과정은 원전의 내진안전성 확보를 위한 기본자료를 얻는 가장 중요한 과정이다. 그러나 설계입력운동을 비롯하여 지반의 불균질 특성, 해석모델링의 주관성 등의 많은 불확실성을 내포하고 있다. 일반구조물의 지진응답해석은 구조물 자체의 구조단면설계를 위한 설계지진단면력을 계산하기 위하여 이루어지는데 비하여, 원전 구조물의 경우는 구조물의 내진설계 이외에 구조물의 각 층에 설치되는 안전관련 기기의 내진설계와 기기 내진검증을 하는데 필요

한 층응답스펙트럼을 구하는 또 다른 목적이 있다. 이를 위하여는 원전 구조물의 지진응답을 구하기 위하여 절대적으로 안전측의 응답을 주는 단순화된 약식 해석법을 사용하기 보다는, 상대적으로 더욱 정밀한 모델과 해석법을 사용하여 가능한 한 정해에 가까운 지진응답을 구하여야만 원전의 내진안전성을 확보할 수 있게 된다.

원전의 지진응답해석은 설계지진이 결정되면 해석모델 작성과 지진응답 계산의 순으로 이루어진다. 여기서 지진응답이란 구조물의 설계지진 단면력과 층에서의 응답을 나타내는 층응답스펙트럼을 말한다. 또한, 시방서에서 제시된 부지에 무관한 설계지진을 사용하는 일반구조물과는 달리 원전에서는 원칙적으로 대상부지의 다양한 지질 및 지진자료를 바탕으로 결정되는 부지고유(Site-dependent)의 설계지진을 결정하여 사용하도록 하고 있다.

본 고에서는 먼저 일반 구조물과의 많은 차이가 있는 원전 구조물의 지진발생시 거동특성을 먼저 기술한 다음 그 응답해석 과정에 대하여 논하고자 한다.

4-1 원전구조물의 지진거동 특성

원전 구조물은 방사능누출을 방지하기 위하여 지진에 대하여 보다 완벽한 안전성을 확보해야 한다. 여기에 덧붙여, 원전구조물의 내진안전성 확보가 더욱 중요한 의미를 갖는 또 다른 이유는 원전 구조물은 아래 표 2와 같은 특유의 동적, 구조적 특성으로 인하여 일반 구조물에 비하여 지진하중이 가장 지배적인 설계하중으로 작용할 가능성이 크기 때문이다.⁽⁸⁾

표 2. 원전 구조물의 지진거동 특성

동적 구조특성/구조물 종류	원전 구조물	일반 구조물
1. 설계지진의 준위	0.20 g	0.12~0.14 g
2. 재래 주기	1000~10,000년	50~500년
3. 공진 가능성이 큼 (지진탁월진동수: 2~10 Hz)	한국 표준원전 고유진동수 · 원자로건물: 4.5 Hz · 보조건물: 7.5 Hz · 핵연료건물: 10.3 Hz	일반 구조물 고유진동수 · 20층 RC 건물: 0.5~1.0 · 지간100 교량: 0.5~1.0
4. 질량에 비하여 낮은 層高	지진하중이 지배적	풍하중이 지배적
5. 구조물 질량이 큼	지진에 불리 · 원자로건물: 5만톤	지진에 불리 · LNG 탱크: 1만톤
6. 감쇠값이 낮음	탄성 범위내 거동	비선형 거동 허용
7. 구조물간의 간격이 좁음	상호 유기적 인접 배치로 구조가 복잡함 · 구조물-구조물 상호작용 고려 필요	구조거동이 복잡하지 않음

4-2 해석모델의 작성

구조물의 해석모델작성이란 구조물의 응답을 수학적으로 표현하기 위하여 구조물의 동적특성을 수학적으로 이상화하는 과정을 말하며, 그 결과물을 해석모델이라고 한다. 해석모델작성과정은 지진응답해석과정 중에서 가장 큰 중요성과 불확실성이 포함될 수 있는 과정으로서 그 결과는 반드시 또다른 해석모델이나 시험 등을 통하여 검증되어야 한다. 수학적 해석모델의 작성을 위한 기본원칙은, 원 구조물의 동적 거동을 충분히 나타내야 하고, 필요한 위치에서 원하는 형태의 응답

을 얻을수 있어야 하며, 지반의 거동특성을 이상적으로 나타낼 수 있어야 하고 최대한 단순화시켜야 한다.

원천 구조물 및 기기의 해석은 기하학적 복잡성, 해석모델의 크기, 여러 가지 설계 및 해석 업무의 일정 그리고 지반 기술자, 구조 해석자, 기기 및 배관 기술자의 책임한계 등의 원인으로 인하여 흔히 다중단계로 수행된다. 제 1단계의 해석은 주로 SSI(Soil-Structure Interaction: 지반-구조물 상호작용) 해석이다. SSI 해석모델은 주로 구조물의 단순화된 모델에 연계시킨 지반모델로 구성된다.

이 단계의 해석결과는 지반을 제외한 전체시스템의 상세 해석을 수행하게 되는 제 2단계 해석의 입력으로 사용된다. 제 1단계 해석에 사용된 구조물모델은 정확한 응력을 예측할 수 있을 만큼 충분히 상세하지 않다. 왜냐하면 연이어 수행될 전체 구조물시스템의 상세 해석을 위해서는 응답가속도와 응답변위만 필요하기 때문이다. 어떤 경우에는 제 1단계로부터 얻어지는 지진응답 하중(모멘트, 전단력, 비틀림 모멘트, 축력 등)을 중요한 건물의 구조요소들에 정적으로 작용시켜서 부재 응력을 계산하는데 사용된다. 이러한 경우 제 1단계 모델은 제 1단계 해석으로부터 계산되는 지진응답 하중을 건물의 여러 가지 구조요소들에 정확히 분배할 수 있도록 작성되어야 한다.

그밖의 경우 제 2단계 해석은 제 1단계 해석에서 얻은 기초 바닥판의 운동을 보다 상세한 건물 모델에 작용시켜서 수행되는 응답스펙트럼해석이나 시간이력해석이 수행된다. 이 제 2단계 해석으로부터 설계지진응력과 층운동을 얻을 수 있으며, 층운동은 기기 및 배관, 2차 구조요소들을 해석하기 위한 입력운동으로 사용된다.

원천구조물은 주로 집중질량모델 혹은 유한요소모델로 이상화된다. 해석의 단순화를 위해서 대부분의 경우 집중질량모델이 선택되며, 상대적으로 복잡한 유한요소모델은 특정한 국부거동의 해석이 필요한 경우나 새로 개발된 고유모델에 대한 동특성 검증 등과 같은 특수한 경우를 제외하고는 잘 선택되지 않는다. 그림 4와 5는 차세대원전의 경우 격납건물 및 보조건물의 유한요소모델과 집중질량모델을 나타낸 것이다.

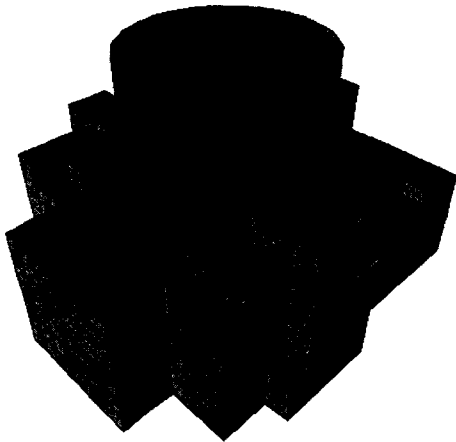


그림 4. 3차원 유한요소모델

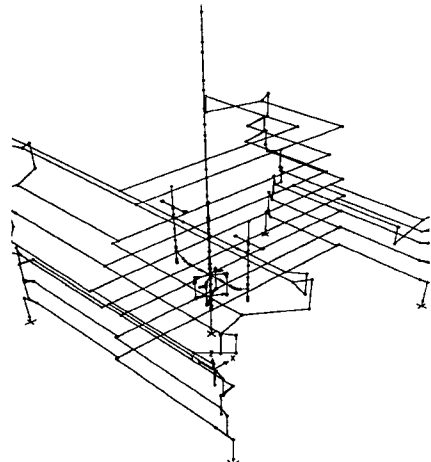


그림 5. 3차원 집중질량모델

4-3 지진응답의 계산

지진응답의 계산방법은 계산결과의 정밀도, 필요한 응답의 종류 및 질량 등에 따라 적합한 형태의 지진응답계산방법을 선택하여 사용하게 된다. 지진응답을 구하는 방법은 크게 정적 해석법에 의한 방법과 동적 해석법에 의한 방법으로 나눌 수 있으며 대상 시설이 매우 단순한 경우를 제외하고는 동적 해석법에 의하여 지진응답을 구한다. 동적 지진응답 해석방법은 응답스펙트럼 해석법

과 시간이력 해석법으로 구분된다. 응답스펙트럼 해석법은 주로 대상시설의 설계를 위한 부재력을 구하기 위하여 사용하며 시간이력 해석법은 직접적분법과 모드중첩법으로 구분된다. 시간이력해석법은 기기의 내진검증이나 부계통 및 기기의 내진설계를 위한 입력으로 사용되는 층응답스펙트럼을 구하기 위하여 사용한다.

동적 지진응답 해석은 대상물을 해석이 가능하도록 이상화시키는 수치해석 모델링과정과 운동방정식의 해를 구하는 해석과정으로 나누어 생각할 수 있다. 수치해석 모델링 과정에서는 동적 모델링에 필요한 이론적인 배경뿐만 아니라 실제의 많은 경험까지 필요로 하며 해석과정에서는 이론적인 배경의 숙지를 통한 다양한 연구결과의 적절한 적용을 필요로 한다.

4-4 SSI 해석

지진 발생시 구조물의 응답은 지반운동의 특성, 구조물 주위 지반의 특성 및 구조물 자체의 특성들에 따라 좌우된다. 연성지반의 경우, 기초의 운동은 지진이 발생하고 있는 동안 구조물 진동에 의한 기초로부터의 파의 분산 및 구조물로부터의 에너지 방사로 인한 지반과 구조물의 연계현상에 의해 자유장 지반운동과 달라지게 된다. 따라서, 연성지반에 의해 지지된 구조물의 동적응답은 매우 견고한 지반 또는 암반에 의해 지지된 동일 구조물의 동적응답과는 그 크기와 진동수 성분에 있어서 근본적으로 달라질 수 있다.

즉, 연계된 SSI 시스템은 견고하게 지지된 동일 구조물의 경우보다 낮은 진동수에서 최대 구조물 응답을 보이게 된다. 또한 구조물 응답의 크기도 지반에서의 방사감쇠와 재료 감쇠로 인하여 구조시스템에 미치는 추가적인 에너지소산 효과에 의해 영향을 받는다.

그러나 지반이 매우 단단한 암반인 경우(전단파 속도가 약 3,500 ft/sec 이상인 경우)는 SSI를 고려했을 때와 지반의 영향을 무시했을 때의 고유진동수를 비교하여 차이가 작으면 SSI 해석단계는 생략될 수도 있다. SSI 해석에서는 지진파의 공간적 변화와 같은 입력운동뿐만 아니라 시스템을 구성하는 지반의 변형을 및 전단응력 등과 같은 공학적 특성에서도 많은 불확실성을 내포하고 있다. 이와 같은 불확실성을 개선하기 위하여, 우리 나라와 미국, 대만, 일본, 프랑스 등 5개국 11개 기관이 공동으로 지진에 대한 구조물의 실제 거동을 정확히 예측하기 위하여 실물의 1/4크기의 원자로 격납건물과 1/2크기의 유체저장탱크를 대만 화련에 건설하여 내진모형실험을 수행하고 있다.

차세대원전의 경우에도 국내 기존호기와는 달리 원전 입지의 유연성을 확보하고 지반의 불확실성을 개선하기 위해 포괄부지조건에 따라 연성지반 및 견고한 지반에 대하여 SSI 해석을 수행하였으며, 포괄부지로서는 지표면에서 암반까지 서로 다른 표층 두께를 갖는 3개의 부지형상을 전단파 속도 1,000~5,000 ft/sec의 분포를 갖는 연성 및 견고한 지반의 다양한 부지를 포괄하기 위해 8개의 부지조건을 선정하여 SSI 해석을 수행하였다. 그림 6~8은 각각 차세대원전의 SSI 시스템 개략도, 포괄부지조건에 따른 부지형상과 부지조건, 지반의 동특성을 반영한 자유지표면에서의 포괄 스펙트럼을 나타낸다.⁽⁹⁾

여기서, CMS1은 미국 NRC의 표준설계지반응답스펙트럼을 나타내며, CMS3는 입력지진동의 통제점을 암반노두에 정의한 NUREG/CR-0098 스펙트럼의 저·고주파수 영역을 확장한 설계지반 응답스펙트럼을 의미한다.

5. 구조물 및 기기계통의 내진설계

내진설계 단계에서는 동적 지진응답 해석으로부터 얻어진 지진응답(변위, 가속도, 부재력 등)을 다른 하중들에 의한 응답과 조합하여 구조물 또는 기기가 고려하는 하중에 대한 저항력을 가지도록 설계한다. 이 과정에서는 다른 하중들과 지진하중을 어떻게 조합하며 설계 저항력을 얼마로 할 것인가에 대한 결정이 중요하다.

원자로 격납건물의 예를 들면, 설계하중으로는 가동전 시험중에 받는 하중, 정상운전 및 정지

시 받는 하중, 안전정지지진과 같은 극한환경 상태에서 받는 하중, 냉각재 상실사고를 포함한 비정상 상태에서 받는 하중 등이 모두 포함되어 조합된다. 특히, 경계조건에 대한 가정, 축대칭 및 비축대칭 하중의 거리, 과도 및 국부 하중처리, 콘크리트의 크리프와 건조수축 및 균열의 영향 처리, 지진으로 야기된 전단력 영향 처리, 재료 특성값 변화가 해석결과에 미치는 영향, 대형 관통부의 처리, 강재 라이너플레이트와 정착부의 처리, 콘크리트 격납건물의 극한능력 분석 등을 철저히 분석하여 설계에 반영한다. 그림 9와 10은 지진응답 계산 결과 구조물 및 기기의 내진설계에 사용되는 차세대원전의 구조물의 주요 위치에서의 지진응답을 나타낸 그림이다.

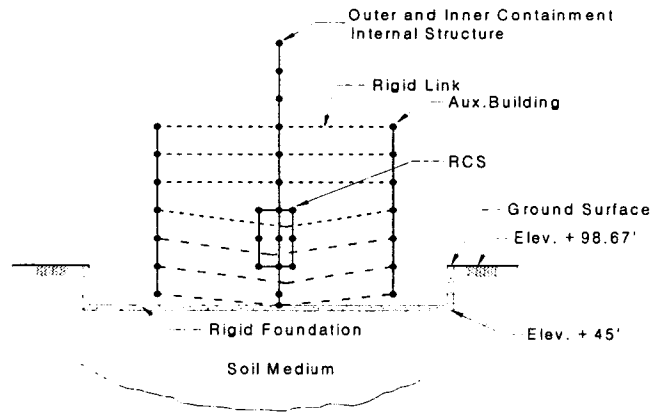


그림 6. 차세대원전의 SSI 시스템 개략도

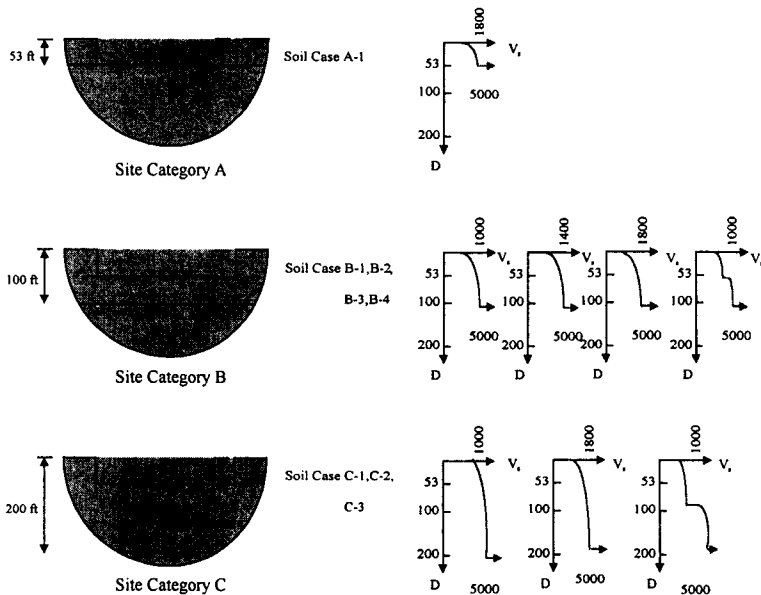


그림 7. 부지형상 및 부지조건

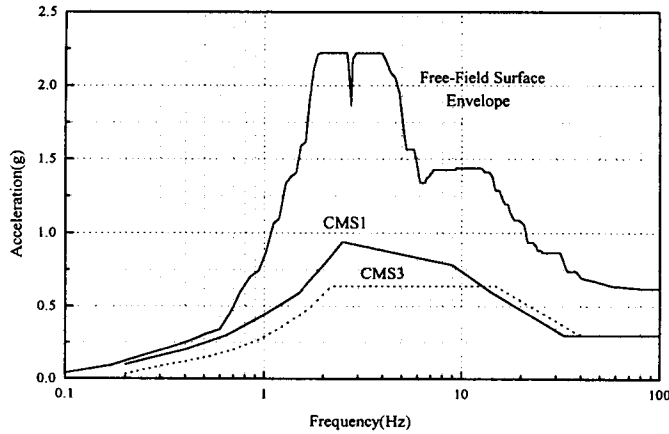


그림 8. 자유지표면의 포괄 스펙트럼(수평방향, 5% Damping)

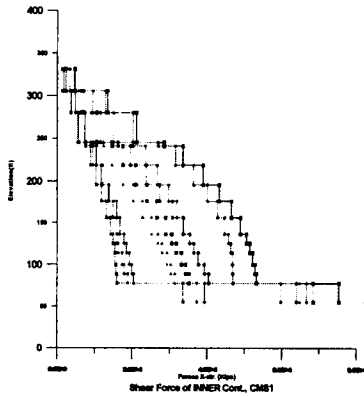


그림 9. 격납건물의 전단력도
CMS1 (E-W)

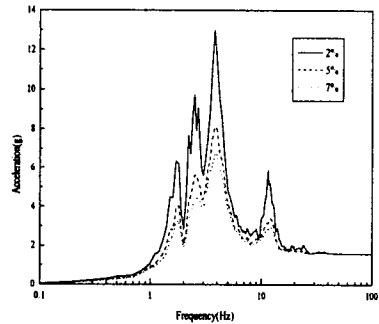


그림 10. 격납건물의 SSE 응답스펙트럼
EL.331.25' (E-W)

6. 기기의 내진검증

상기와 같이 설계기준 지진에 대해 발전소 구조물에 대한 지진응답해석을 수행하여 각 층에서의 층응답스펙트럼을 계산하여 각 층에 위치하게되는 기기계통이 받는 지진하중을 바탕으로 각 기기의 구매시방서에 내진검증 기준이 제시되면 기기 공급자는 내진검증을 통해 지진이 발생중 이거나 그 이후에도 기기가 안전기능을 정상적으로 발휘함을 입증하는 내진검증보고서를 제출하게 된다. 여기서 안전기능이란 기기 자체 뿐만 아니라, 그 기능이 발휘될 계통 및 발전소의 기능에 따라 결정될 수도 있다.

내진검증 방법은 1) 해석에 의한 방법 2) 시험에 의한 방법 3) 시험과 해석의 조합에 의한 방법, 4) 경험자료의 이용에 의한 방법 등 4 가지 방법으로 구분할 수 있다.

해석에 의한 검증은 대상기기를 적정 정확도를 갖도록 수학적으로 모델 구성이 가능한 경우에만 사용될 수 있다. 따라서 구조적 건전성의 확보 만으로도 의도된 기능발휘가 가능한 기기 즉,

구조해석만으로 성능확인이 될 수 있는 기기에 주로 적용된다.

시험에 의한 검증은 진동대에 의해 내진성능을 입증하는 방법으로 기기가 위치할 층의 층응답스펙트럼을 기준으로 요구응답스펙트럼을 작성하여 입력지진으로 OBE 5회, SSE 1회를 시험하여 요구응답스펙트럼이 시험응답스펙트럼을 포괄하여야 한다. 시험에 의한 검증 기술상의 현안사항으로는 검증시험 대상물의 동특성 확인을 위한 감쇠값의 결정, 시험용 입력운동 생성기술, 열화현상이 기기의 기능작동성에 미치는 영향 그리고 지진하중과 여타 하중과의 하중조합으로 인한 영향 등으로서 향후 기술개선의 여지가 많다고 하겠다.

해석과 시험을 혼용한 검증은 기기의 일부가 해석 가능한 부품이나 구조를 포함한 경우에 일부는 해석을 수행하고 나머지는 시험을 수행하여 검증하는 형태로 많이 적용된다. 또 이미 시험이 시행된 기기와 유사기기에 대해 해석을 통해 그 차이점과 특성을 분석하고 보완할 필요가 있는 경우, 시험하기가 곤란한 큰 기기 등에 사용된다.

경험에 의한 검증은 시험이나 해석을 거치지 않고 과거의 경험적인 자료, 즉 이전에 기기검증시 확보된 자료나 지진을 경험한 기기에 대한 자료 등에 의해 동적 특성이 유사성을 확인하여 검증하는 방법으로 시험에 의한 경우보다 경제적인 방법이다. 특히, 미국에서는 가동중인 원전의 기기 교체나 신설시 주로 과거 20년간의 지진경험이나 기기 내진검증보고서를 근간으로 개발한 SQUG(Seismic Qualification Utility Group) 데이터베이스를 이용하여 기기 내진검증을 하고 있다.

7. 지진 PRA(Seismic Probabilistic Risk Assessment: 확률론적 지진위험도 평가)

원전 시설에 대하여는 내진설계 과정과는 별개로 지진 PRA를 통하여 지진에 대한 안전여유도를 재평가한다. 지진 PRA는 설계기준 이상의 초기 사건에 의한 발전소의 중대사고 취약성을 평가하는 방법으로서 현재 통용되는 결정론적 분석방법에서 고려하지 못하는 계통상호작용 및 인적 실수에 의한 계통의 영향을 파악할 수 있는 안전성평가 방법이다. 지진 PRA는 지진발생빈도를 평가하는 재해도 분석, 구조물 및 계통의 지진저항력을 평가하는 취약도 분석 및 지진에 의한 계통의 고장 및 인적 실수에 의한 발전소의 영향을 평가하는 계통분석 등으로 이루어진다.

지진 PRA에서는 설계기준지진에 의해 설계된 주요 계통의 안전여유도를 고신뢰도 저확률파손(High Confidence Low Probability Failure: HCLPF, 지진에 의한 대상 시설의 손상확률이 5% 이하로 유지된다고 95% 확신할 수 있을 때의 지진가속도 값) 개념을 이용하여 평가하며 계통분석을 통해 노심손상확률(Core Damage Frequency: CDF)을 구한다.

7-1 PSHA(Probabilistic Seismic Hazard Analysis: 확률론적 지진재해도 분석)

PSHA는 설계지진값이 결정된 후에는 이에 대한 보수성을 재확인한다는 측면에서 수행될 수도 있지만 원전의 확률론적 안전성 평가를 하기 위해서는 먼저 원전 부지에 대한 PSHA를 수행하여야 한다. PSHA는 원전 부지에서 발생할 수 있는 지반운동 파라미터의 연평균초과발생확률을 제공하며 지진재해도 곡선으로 표시된다. PSHA를 수행하기 위해서는 지진원의 특성 및 지반운동감쇠를 수학적 모델로서 정의하여야 한다. 지진원 특성으로는 지진원의 지리적 형상, 연평균지진발생율, 지진규모-빈도 관계식, 최대지진, 지진원 활동도(probability of activity) 등이 있으며 지반운동감쇠는 지진의 규모와 진앙거리에 따른 지반운동파라미터의 감쇠를 나타내는 수식과 이에 대한 불확실성으로 정의되어야 한다.

일반적으로 PSHA 결과는 일련의 지진재해도 곡선으로 나타나는데 각각의 곡선은 지진전문가의 의견에 따라 각각 다른 곡선으로 나타나는데 우리나라의 경우 많은 편차를 보이고 있다. 이러한 지진재해도 곡선군은 통상 평균 혹은 중앙값 및 85%, 15% 分率 등의 통계적 수치로 표시된다. 국내 지진재해도 곡선군의 큰 편차는 역사지진의 최대 규모 및 진앙 평가, 지진목록의 불완전성, 지진발생 메카니즘의 서로 다른 이해 그리고 강진 기록자료의 부재에 따른 신뢰성이 결여된 지반운동 감쇠식 등의 지진재해도 입력파라미터에 대한 전문가의 상이한 평가결과에 기인한다. 이런

점은 IAEA 전문가에 의해 지적된 바 있는데 이러한 지진재해도 입력파라미터의 불확실성을 개선하기 위하여는 보다 많은 연구개발이 뒤 따라야 할 것으로 판단된다.

7-2 지진취약도 분석절차

발전소 설비의 지진취약도는 일정 지진하중값(응력, 단면력, 혹은 가속도)에 대한 그 설비의 조건부 파손빈도를 의미한다. 지진취약도 분석의 최종결과는 조건부 파손빈도를 구성하는 변수들의 무작위성과 불확실성을 고려하여 계산된 누적분포함수로 나타나며, 이를 지진취약도 곡선이라고 한다. 지진취약도 곡선을 얻기 위한 취약도 분석은 다음과 같은 절차에 따라 수행한다.

- (1) 대상 발전소설비에 대한 설계자료 검토
- (2) 대상 구조물 및 기기의 선정
- (3) 발전소 답사
- (4) 선별채택 및 선별제거
- (5) 파손모드 결정
- (6) 개략적 취약도 계산
- (7) 선별제거
- (8) 취약도 계산 및 취약도 곡선 작성

작성된 취약도 곡선($S(A)$)과 PSHA 결과인 지진재해도 곡선($\Psi(A)$)을 구한 다음 식 (1)과 같은 수치적분을 통하여 최종적으로 지진에 의해 노심이 손상될 확률(F_{cdf})을 계산하게 된다.⁽¹⁰⁾

$$F_{cdf} = \int \left[-\frac{d\Psi(A)}{dA} S(A) dA \right] \quad (1)$$

8. 지진계측시스템 운영

지진계측시스템은 지진발생시 원자로시설의 응답을 측정·기록하여 운전원에게 발전소 가동정지에 대한 판단기준을 제공하고 설계시 사용된 설비의 지진해석용 해석모델, 해석방법 및 그 응답의 타당성을 검증하여 시설물 안전성 평가를 위한 자료를 제공하는 설비이다. 이 지진계측 자료는 지진발생시 원전의 안전성을 평가한 후 재가동 여부를 판단하는 데에도 사용된다. 즉, 내진설계와는 별개로 지진계측설비를 원전시설 주요 부위에 그림 11과 같이 설치함으로써 설계지진보다 훨씬 작은(1/10~1/20 수준) 지진도 계측하여 안전성 검토를 수행하며, 설계지진의 1/2 이상되는 지진 발생시에는 일단 원전 가동을 중지시켜 시설의 안전성을 재평가하고 설계과정에서 예측한 지진응답들과 비교·검토를 수행한다.

따라서 지진계측시스템의 설치 위치는 지진발생시 원자로시설의 응답을 적절히 나타낼 수 있어야 하며 측정응답을 설계응답과 비교평가할 수 있도록 한다. 또한 지진발생시 즉시 운전원에게 전달되어 원자로 가동정지 등 필요한 조치가 취해질 수 있도록 하며 각 계측기기에 대한 주기적인 검·교정 및 성능시험을 실시하여 신뢰성 및 작동성을 확인한다. 과거에는 시간이력가속도계, 최대가속도계, 지진스위치, 응답스펙트럼 기록기 등 여러 가지 지진계측기를 설치하도록 규정하고 있었으나, 계측기 및 계측데이터 처리장치 등의 급속한 발달에 따라 개정된 규제지침(미국 NRC Reg. Guide 1.12)에는 시간이력가속도계만을 설치하도록 규정하고 있다.

특히, 최근에 미국 NRC에서는 지진계측시스템에 의해 기록되는 지진파 및 지진응답 기록의 활용과 관련하여 규제지침(Reg. Guide 1.166 및 1.167)을 추가로 제정하였다. 이 지침에서는 기존에는 최대 지반가속도와 응답스펙트럼으로 OBE 초과 여부를 판정하는 기준으로 삼던 것을, 응답스펙트럼과 아래의 식 (2)와 같은 절대누적속도(Cumulative Absolute Velocity:CAV)를 판정기준에 포함시킴으로써 고진동수 영역에 주로 영향을 주는 작은 규모의 지진에 의한 불필요한 원자로 정지를 줄일 수 있도록 하고 있다. 이러한 지침이 개정된 이유는 기존의 경험자료에 의한 MM 진도나 최대지반가속도(PGA)값으로는 원전 구조

물이나 기기계통의 지진손상도를 평가할 수 없어서 새로운 CAV 값을 제시하고 CAV = 0.16 g·sec인 경우를 OBE 초과지진으로 평가하는 기준으로 정하고, 지진 발생에 따른 원자로 정지 이후 운전 재개를 위한 지침으로 제시하고 있다.⁽¹¹⁾

$$CAV_{TOTAL} = CAV_i + \int_{i-1}^i |a(t)| dt \quad (2)$$

여기서,

a(t) = 1초의 시간간격 중에서 가속도값이 0.025 g를 초과하는 것이 적어도 1개 이상 존재할 때의 가속도

i = 1, n (n = 1초 단위의 지진기록수)

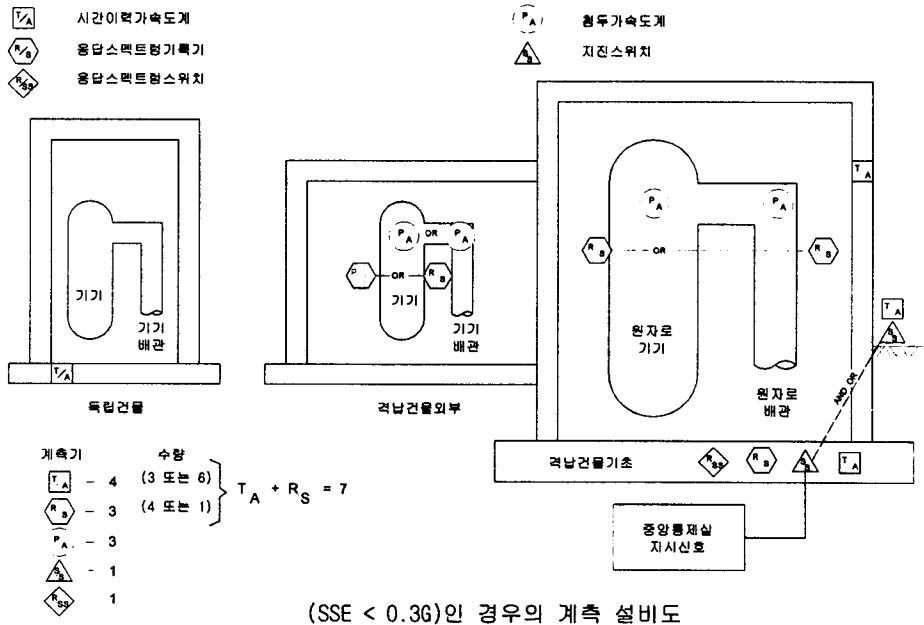


그림 11. 계측기의 설치 위치도

9. 결론

본 고에서는 차세대원전의 내진설계를 예로 하여 원전의 내진안전성 확보과정을 체계적으로 정립하고 향후 기술개선 방향을 제시하였다. 지금까지 가동중인 원전은 국내외를 막론하고 건설 초기부터 대상부지에서 발생가능한 최대의 지진에 대하여 극히 보수적으로 설계, 건설되어 왔다고 할 수 있다.

그러나, 지금까지의 내진성확보 과정은 대부분 결정론적인 이론 및 기술에 근거하고 있는데 비하여 자연재해인 지진현상을 정확하게 예측한다는 것이 아직도 어려운 만큼, 원전 내진성확보 과정에는 다양한 불확실성 인자들이 내재하고 있다는 사실을 감안하여, 이에 대한 추가 연구 및 보완이 지속적으로 필요하다.

우리 나라에서는 단층의 활동성 평가시 미국의 기준을 따르고 있으나, 이 기준은 각 나라마다 지질특성에 따라 상이하므로 우리 나라의 지질특성에 부합하는 기준이 수립되고, 5만년 이상되는 단층의 운동시기에 대한 연대측정 기법이 정립되어야 할 것이다. 보다 개선된 설계지진력을 산정

하기 위하여는 국내의 통일된 지진목록이 작성되어야 하고, 작은 규모의 역사지진이 지진목록에서 누락될 가능성이 많으므로 지진목록의 불완전성을 고려하여 지진활동성을 평가하여 큰 규모의 지진을 과대평가하지 않도록 하여야 한다. 또한, 공학적 실증시험을 통하여 역사지진의 최대 규모를 재평가하고, 일본이나 중국의 지진기록을 비교·분석하여 진앙지를 재평가되어야 할 것이다. 특히, 강진 기록자료를 바탕으로한 지반운동 감쇠식의 개발이 이루어져야 할 것이다.

또한, 지진 PRA 기술 및 내진여유도 분석 등과 같은 확률론적인 내진안전성 평가를 통하여 원전의 절대 안전성 확보를 기대하고 있는 국민의 요구를 정량적으로 충족시킬 필요가 있을 것으로 본다. 또한, 시험에 의한 기기검증의 기술현안으로 동특성 평가, 시험용 입력운동 생성, 지진하중과 여타하중의 조합 영향, 노화에 의한 영향 등에 대한 연구가 필요하다. 그리고, 원전의 내진설계 기술에 비하여 지금까지 상대적으로 부족하였던 지진발생 이후 원전의 구조물 및 기기계통의 후속 성능평가에 대한 기술 보완이 이룩된다면, 보다 완벽한 원전의 내진안전성 확보를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국원자력안전기술원, “국내 원전의 지진안전규제 현황 및 해설”, 1999.
2. U.S. NRC (10 CFR Part 50, Appendix S), “Earthquake Engineering Criteria for Nuclear Power Plants,”, January 1997.
3. Combustion Engineering, Inc., Volume 1(System 80+ Standard Design), “CESSAR-Chapter 2. Geomology, Seismology, and Geotechnical Engineering,”, June 1994.
4. Quaternary Science Reviews Vol. 16, “Dating of Marine Terrace Sediments by ESR, TL and OSL Methods and Their Applicabilities”, 1997
5. U.S. NRC Regulatory Guide 1.60, “Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants,”, December 1973.
6. Newmark, N.M., Hall, W.J.,(NUREG/CR-0098),“Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants”, May 1978.
7. Korea Electric Power Corporation,“Korean Utility Requirements Document”,1999.
8. 한국전력공사,“기술개발 제 34 집”, 1998
9. DE&S(SASSI Version 4.1), “SASSI - A System for Analysis of Soil Structure Interaction”, December 1997.
10. EPRI (TR-103126), “Use of Probabilistic Seismic Hazaed Result”, October 1993
11. EPRI (NP-5930), “A Criterion for Determining Exceedance of the Operating Basis Earthquake”, July 1988