

원전구조물의 내진해석 및 설계

이 용 일*

1. 서 론

최근 세계의 여러 지역에서 발생한 지진에 의한 막대한 인명 및 재산상의 피해가 보도된 바 있다. 이로 인하여 원자력발전소(이하 원전)를 포함한 중요 산업시설의 지진에 대한 안전성 여부가 관심의 초점이 되고 있다. 현재, 우리나라를 포함한 세계 각국에서는 중요 안전관련 시설물에 대해 내진설계 규정을 제정하여 시설물의 설계 및 시공시 이를 적용하고 있다. 특히, 원전의 경우는 만약의 사고시 방사능 물질의 유출로 인해 인근주민과 환경에 심각한 피해를 입힐 수 있으므로 다른 산업시설에 비하여 보다 엄격하고도 정밀한 내진해석 및 설계 요건을 적용하고 있다.

1950년대 말부터 이미 상업용 원전이 설계되기 시작했던 미국의 경우 초창기에는 일반산업시설의 내진설계와 큰 차이가 없는 간단한 방법의 내진설계 절차를 적용했으나, 1971년 발생한 San Fernando 지진에 자극을 받아 1975년에야 비로소 보다 엄격한 별도의 내진설계절차를 설정하게 되었다. 이 절차는 이후 지진의 특성분석 및 해석 기술이 발전함에 따라 계속적으로 개정되어 항상 최신기술을 반영하고 있다. 우리나라의 경우는 원자력법 시행령 및 과기처 고시 등을 통하여 원전 시설물의 내진설계를 요구하고 있으며, 세부적인 내진해석 및 설계절차는 현재 미국에서 적용되고 있는 것과 대동소이하다.

본 고에서는 현재 국내 원전의 설계시 적용하고 있는 내진해석 및 설계절차를 기술하고자 한다.

2. 내진해석 및 설계과정

원전 시설물의 내진해석 및 설계는 발전소를 구성하고 있는 구조물 및 각종 기기의 내진성 확보를 목적으로 수행된다. 이 중 내진해석은 발전소 부지에 발생가능한 설계입력지진을 정의하고 구조물의 동적해석모델을 작성한 후 설계입력지진에 대한 동적응답해석을 수행하여 구조물 및 기기에 작용하는 지진력을 산출하는 단계이며, 내진설계는 내진해설결과로 얻은 지진력에 대해 구조물과 기기가 견디도록 설계하는 단계이다. 이때, 구조물의 경우는 설계지진력에 견딜 수 있도록 단면을 결정하는 내진설계(Seismic Design)과정을 거치며, 대부분의 기기는 기성 제품이 특정 원전의 설계지진력에 견딜 수 있는지를 확인하는 내진검증(Seismic Qualification)과정을 거치게 된다. 또한, 원전의 구조물 및 기기는 지진시 원자로의 안전한 가동중지에 필수적인가의 여부에 따라 크게 내진범주 I급(Seismic Category I)과 비내진범주 I급(Non-Seismic Category I)으로 분류하여 서로 다른 내진설계 기준을 적용하고 있다.

앞에서 설명한 원전의 내진성 확보과정을 요약하면 크게 다음과 같은 다섯단계로 구분할 수 있다.(그림 1 참조)

(1) 설계입력지진의 결정

* 한국전력기술(주) 토목구조기술처 책임기술원

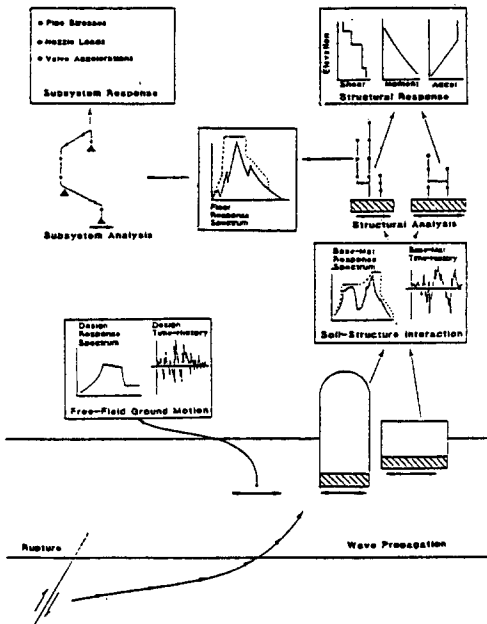


그림 1. 원전 시설물의 내진해석 및 설계과정

- (2) 지반-구조물 상호작용해석
- (3) 동적응답해석
- (4) 구조물의 내진설계
- (5) 안전관련기기의 내진검증

이상과 같은 과정을 거쳐 설계된 원전에 대해서는 준공 후 발전소 건물, 주요 기기, 지표면 등에 각종 지진계측기를 설치하여 실제 지진 발생시 이를 감지, 기록하여 설계 지진준위 이상의 지진발생시에는 발전소의 운전정지 및 안전성평가의 수행이 요구되고 있다. 또한, 최근에는 추가 의무사항으로써 안전관련 시설물을 대상으로 지진에 대한 확률론적 안전성분석(Seismic Probabilistic Safety Assessment)을 수행하여 안전성 정도를 평가하고 취약 부위를 개선하여 발전소 전체의 내진 안전성을 증대시키고 있다.

2.1 설계입력지진의 결정

설계입력지진은 그림 1에서 보는 바와 같이 진원지에서 발생한 지진운동이 전파되어 발전소 부지의 구조물과 무관한 지점(자유장, Free Field)에 도달하였을 때의 운동(통제운동, Control Mo-

tion)을 말한다. 이러한 설계입력지진의 준위 및 형태는 발전소 부지를 중심으로 한 반경 320km (200mile)내의 지반에 대한 모든 지질 및 지진학적 특성과 과거 발생했던 역사지진 또는 지진기록을 통계적으로 분석하여 설계 대상 시설물의 중요도를 고려하여 결정된다.

원전의 설계를 위해서는 그 크기가 다른 두가지 입력지진 즉, 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)과 운전기준지진(Operating Basis Earthquake, OBE)을 정하여 설계입력으로 사용하고 있다. 안전정지지진이란 발전소 부지에서 발생가능한 최대 잠재지진으로서, 그 발생확률이 1,000년~10,000년에 한번 정도로 발생확률이 지극히 낮은 지진이다. 이 때, 발전소의 안전관련 시설물은 안전정지지진의 발생시에도 원자로의 안전한 가동정지를 위하여 구조 및 기능적인 건전성을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 이에 비하여 운전기준지진은 발전소 수명기간 중 1~2회 정도 발생할 가능성이 있는 상대적으로 작은 크기의 지진으로서, 이 지진시에도 발전소의 안전관련 시설물은 계속적으로 정상적인 운전이 가능하도록 설계되어야 한다.

지진입력운동의 형태는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA), 설계지반응답스펙트럼(Design Ground Response Spectrum, DGRS), 인공지진시간이력(Artificial Earthquake Time History)으로 나타낸다. 최대지반가속도는 지진운동의 가장 단순한 형태로서, 보통 중력가속도(g)에 계수를 곱한 값으로 표시한다. 즉, 우리나라 원전의 설계지반가속도값은 안전정지지진의 경우에는 $0.2g$, 운전기준지진의 경우는 $0.1g$ 가 주로 적용되었다. 설계지반응답스펙트럼은 최대지반가속도와 지진파의 진동수 특성(Frequency Characteristics)을 포함하는 좀 더 복잡한 지진입력 형태로서, 부지에서 기록된 다수의 강진기록의 통계적 처리를 통하여 결정되는 것이 원칙이다. 그러나 우리나라의 경우에는 지진다발지역도 아니고 지진계측이 최근에 와서야 시작되어 특정 원전 부지에 고유하게 적용할 수 있는 지반응답스펙트럼의 형태를 결정할 수 없으므로 미국 원자력 규제위원회(U.S. Nuclear Regulatory Com-

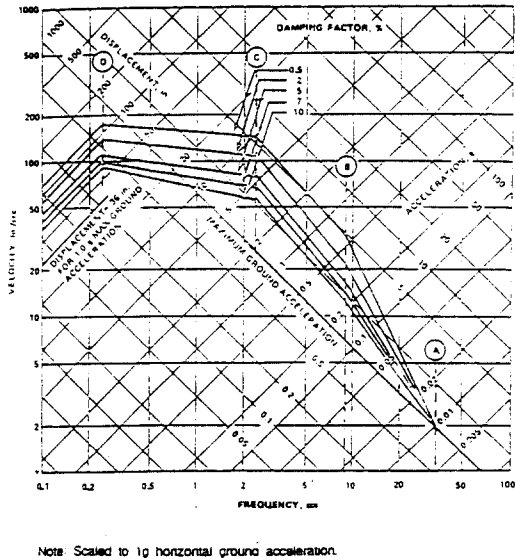


그림 2. 미국원자력규제위원회에서 제시한 표준설계지반응답스펙트럼

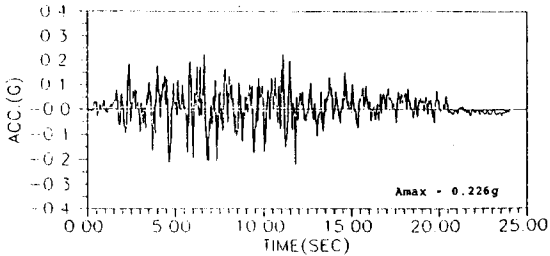


그림 3. 인공지진시간이력

mission)의 규제지침(Regulatory Guide)에 제시된 그림 2와 같은 표준지반응답스펙트럼을 사용하고 있다. 이러한 표준지반응답스펙트럼은 다양한 지반특성을 갖는 부지에서 기록된 다수의 강진기록의 통계적 처리를 통하여 결정된 것이다. 인공지진시간이력은, 그림 3에 보인 것과 같이, 최대지반가속도, 진동수 특성, 지속시간, 위상각(Phase Angle) 등을 포함하는 실제 지진파와 유사한 형태의 인공지진기록이다. 인공지진시간이력의 작성방법에는 임의의 진동수를 갖는 정현파를 합성하여 작성하는 방법과 실제 기록된 지진 시간이력을 수정하여 작성하는 방법이 있으며, 작성된 인

공시간이력은 다음과 같은 요건을 만족하는 것이어야 한다.

(1) 인공시간이력이 보수성을 갖도록 시간이력의 응답스펙트럼이 설계지반응답스펙트럼을 포괄해야 함.

(2) 인공시간이력이 주 관심 진동수 구간에서 충분한 에너지를 갖도록 파워스펙트럼밀도함수(Power Spectral Density Function, PSDF)가 설계 목표 파워스펙트럼밀도함수를 포괄해야 함.

(3) 일반적으로 직교하는 두 수평방향과 수직방향에 대한 3개의 인공시간이력이 작성되는데, 이들 상호간에는 통계학적 독립성이 유지되어야 함.

2.2 지반-구조물 상호작용 해석

앞에서 기술한 바와 같이 작성된 구조물과 무관한 자유장에서의 지진입력운동은 실제 구조물 하부에서는 달라지게 되는데 이는 자유장운동이 해석대상 구조물까지 전달되는 과정에서 에너지의 소산(Scattering), 지진파의 굴절(Refraction) 및 반사(Reflection), 지반 및 구조물 시스템의 진동수 특성 등에 의하여 그 형태 및 크기가 변하기 때문이다. 이러한 현상은 지반 강성이 구조물의 강성에 비하여 상대적으로 유연한 경우에 크게 나타나게 되는데, 이와 같은 현상을 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction)이라고 한다.

지반-구조물 상호작용 해석은 내진해석단계 중에서 가장 복잡하고도 어려운 과정으로서, 그동안 많은 연구가 이루어졌음에도 불구하고 정확한 해석결과를 얻지 못하는 분야이다. 이는 지진운동의 무작위성, 광범위한 지반특성의 변화 및 지진시 지반거동의 불확실성 등에 기인한 것이다.

지반-구조물 상호작용 해석은 그림 4에 보인 바와 같이 지반 및 상부구조물의 동적특성에 영향을 미칠 수 있는 여러가지 요소를 고려한 지반-구조물 시스템 모델을 작성하고, 자유장에서의 지진운동을 입력하여 구조물 기초에서의 지진운동을 계산하는 순서로 수행된다. 일반적으로 상호작용 해석방법은 해석절차 및 모델링 기법 등에 따라 크게 직접적(Direct Method), 부분구조법(Substructure Method) 및 복합법(Hybrid Method)으로 나눌 수 있다. 직접법이란 지반-구조물 시스

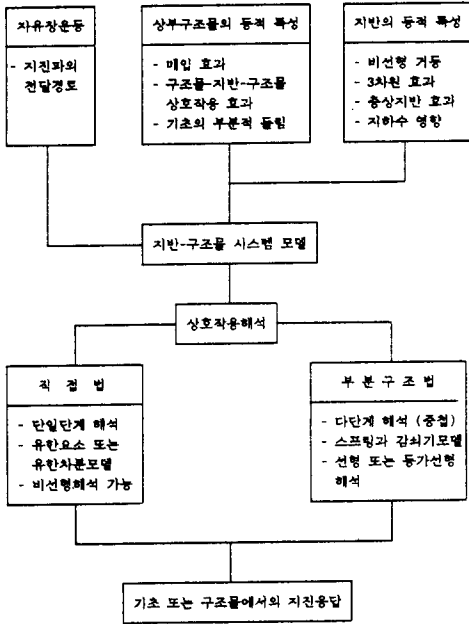


그림 4. 지반-구조물 상호작용 해석과정

템 전체를 수학적 모델로 이상화하여 한 단계로 해석을 수행하는 방법인 반면, 부분구조법은 전체 해석과정을 여러 단계로 구분하여 해석을 수행하는 방법이며, 복합법은 앞의 두 방법의 특징을 적절히 조합한 방법이라 할 수 있다. 이들 방법 중 많은 장점으로 인하여 현재 부분구조법이 널리 사용되고 있는데, 해석과정은 기초위치에서의 입력 운동 계산, 지반의 강성과 감쇠특성을 나타내는 지반 임피던스(Impedance)함수의 결정, 상부구조물 모델 작성 후, 각 단계의 결과를 조합한 상호작용 해석을 수행하는 것이다.

지반-구조물 상호작용 영향은 지반 강성이 구조물의 강성에 비하여 상대적으로 유연한 경우에 나타나는 것으로서 지반이 암반이나 암반과 유사하게 견고한 경우에는 무시할 수 있다. 즉, 지반의 동적특성을 나타내는 전단파속도가 1,070m/sec (3,500ft/sec) 이상인 견고한 지반에서는 지반-구조물 상호작용 영향을 무시하고 지반을 고정기초로 간주하여 상부구조물 만을 해석하는 고정기초 해석(Fixed-Base Analysis)이 수행된다. 국내 원전의 경우에는 극히 일부분을 제외하고는 대부분의 구조물이 견고한 암반상에 건설되었으므로 지

반-구조물 상호작용의 영향을 무시한 고정기초 해석이 수행되었다.

2.3 동적응답해석

동적응답해석은 구조물의 동적해석모델을 작성한 후, 지진입력운동의 결정단계나 지반-구조물 상호작용 해석단계에서 얻은 구조물 기초에서의 지진입력운동을 작용시켜 해석대상 구조물의 각 위치에서의 지진응답을 계산하는 과정을 말한다. 여기서, 구조물의 동적해석 모델링이란 복잡한 구조물의 형태를 수학적으로 이상화시키는 것을 말하며, 구조물의 강성, 질량특성 및 감쇠(Damping)특성을 정확하게 계산하여 실제 구조물과 동일한 동적특성을 구현하는 것이 모델링의 기본이 된다. 해석모델의 종류로는 벽체나 슬래브와 같은 구조요소를 유사한 거동특성을 갖는 유한요소로 정확히 모델링하는 유한요소모델과 전체적인 구조물의 동적특성을 단순한 보요소와 집중질량으로 나타내는 집중질량-보요소모델(Lumped Mass-Stick Model)이 있다. 이 중 극부적인 상세한 해석이 요구되는 등의 특수한 목적이 있는 경우를

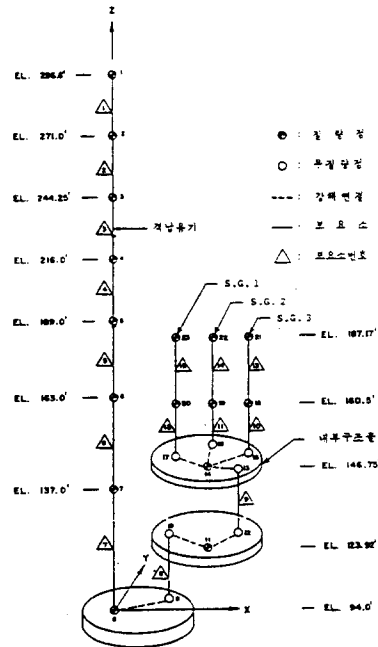


그림 5. 전형적인 집중질량-보요소모델

제외하고는 주로 그림 5에 보인 것과 같은 집중질량-보요소모델이 사용되고 있다. 해석모델 작성시에는 구조물에 의해 지지되고 있는 기기와 같은 부계통(Subsystem)의 모델링 여부, 구조물 내에 있는 유체의 동수역학적인 영향, 층슬래브의 수직방향으로의 유연성 등을 반드시 고려해야 한다.

동적해석방법으로는 등가정적해석법(Equivalent Static Analysis), 응답스펙트럼해석법(Response Spectrum Analysis), 시간이력해석법(Time History Analysis) 등이 있다. 이중 등가정적해석법은 구조물의 형태가 지극히 단순한 경우나 예비설계단계에서 사용되는 방법이며, 복잡한 구조형태를 갖는 원전 구조물의 경우에는 주로 응답스펙트럼해석법과 시간이력해석법을 사용하여 해석하고 있다. 응답스펙트럼해석법은 구조물 모델의 모드해석(고유치해석) 결과 얻은 구조물의 고유진동수 및 모드형태와 지반응답스펙트럼을 이용한 해석법으로서, 주로 구조물 설계를 위한 전단력, 축력, 휨모멘트와 같은 지진 단면력을 계산하기 위하여 사용된다. 반면, 시간이력해석은 복잡한 지진파 형태의 시간이력을 각 시간 단계별로 수치적분하여 해를 구하는 방법으로서, 기기나 배관과 같은 부계통의 내진검증 또는 내진설계를 위한 입력운동으로 사용되는 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum, FRS)을 얻기 위해 주로 사용되고 있다. 여기서, 층응답스펙트럼은 건물의 특정 위치(층)에 놓인 부계통을 1-자유도 계로 단순화 시켰을 때의 최대지진응답을 나타내는데, 그림 6에 보인 것과 같이 주로 고유진동수(또는 고유주기)에 대한 가속도값으로 표시하며, 구조물에서의 위치 및 방향, 기기 감쇠값, 지진종류 등의 정보를 포함하고 있다.

2.4 구조물의 내진설계

구조물의 내진설계는 구조물의 동적 내진해석을 통하여 구한 설계 지진력을 사하중, 활하중, 압력하중, 온도하중 등과 같은 다른 하중과 조합한 조합하중에 대하여 구조물이 견딜수 있도록 단면을 설계하는 것이다. 원전의 안전에 중요한 기기 및 계통을 수용하고 있는 원자로 격납건물, 핵연료건물, 보조건물, 기기냉각수건물, 필수용수 취

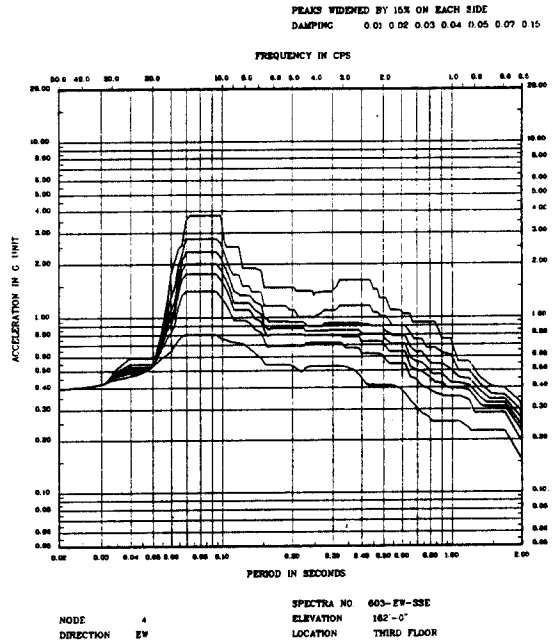


그림 6. 층응답스펙트럼 작성 예

수 및 펌프구조물 등은 내진범주 I 급 구조물로 구분되어 일반 토목구조물과는 다른 별도의 시방서의 요구사항에 따라 설계된다. 예로서, 원자로 격납건물의 경우에는 콘크리트 압력용기로 취급되어 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section III, Division 2의 규정에 따라 설계되며, 기타 내진범주 I 급 콘크리트 구조물은 ACI 349, 강구조물은 ANSI N690의 규정을 적용하여 설계하고 있다. 한편, 비록 비내진범주 I 급으로 구분된 구조물의 경우라도 지진시 붕괴나 파손으로 인하여 내진범주 I 급 구조물이나 시스템의 안전에 영향을 줄 수 있는 경우에는 최소한 안전정지지진에 대한 구조적 건전성이 확보되도록 설계된다.

이와 같이 일반 토목구조물의 설계시 별로 적용되지 않는 압력하중, 온도하중, 지진하중 등을 동시에 고려하고, 하중계수나 안전율을 좀 더 엄격히 적용하는 것 외에는 설계절차가 일반 토목구조물의 경우와 유사하므로 여기서는 자세한 설명을 생략하였다.

2.5 안전관련기기의 내진검증

원전에서는 구조물뿐만 아니라 안전에 관련된 기기 또는 배관과 같은 부계통의 내진 안전성 확보가 필수적이다. 이러한 기기의 내진 안전성 확보과정을 내진검증(Seismic Qualification)이라고 하는데, 지진입력운동으로서는 구조물의 동적 해석단계에서 구한 응답스펙트럼이 사용된다.

내진검증방법으로는 해석에 의한 방법, 시험에 의한 방법, 시험과 해석을 병행한 방법, 경험자료에 의한 방법이 있다.

(1) 해석에 의한 검증방법

형태가 비교적 단순한 기기에 대하여 채택되는 방법으로서, 구조물의 동적해석의 경우와 같이 기기의 수학적 모델의 동적해석을 통하여 이루어진다. 이 방법은 기기의 취약부위 파악, 안전여유도 계산, 설계변경 등이 용이한 반면, 해석과정에 많은 가정사항이 포함되어 정확성이 떨어지며 기기의 운전성 등을 파악하기 어렵다.

(2) 시험에 의한 검증방법

기기의 형태가 복잡하여 수학적 모델링이 곤란한 경우에 채택되는 방법으로서 기기 자체를 진동대에 설치하고 모의지진운동을 가하여 기기의 안전성여부를 판단하는 방법이다. 이 방법은 검증의 불확실성 및 오류를 최소화하고 운전성을 입증할 수 있는 확실한 검증 방법인 반면, 극한시험을 제외하고는 안전 여유도를 알 수 없으며 기기의 크기, 시험비용 등의 제약은 받는다. 시험방법으로는 극한시험(Fragility Test), 입증시험(Proof Test), 포괄시험(Generic Test)이 있다.

(3) 시험과 해석을 병행한 방법

작성된 기기 해석모델의 검증이 필요한 경우, 시험에 의해 검증된 특정 기기의 시험결과를 유사한 형식의 다른 기기에 적용하여 해석하는 경우, 기기 전체적으로는 해석에 의하여 검증한 후 기기에 부착된 특정 부품은 시험에 의하여 검증하는 경우 등 여러가지 특수한 상황에 해석과 시험의 장점을 적절히 병행하여 적용하는 검증방법이다.

(4) 경험자료를 이용한 방법

이 방법은 최근에 자주 사용되는 방법으로서, 기 검증된 기기와 기능 및 물리적 특성이 유사한 기기나 실제 지진을 경험한 기기와 유사한 기기의

검증시 기준에 확보된 풍부한 경험자료(Experience Data)를 이용하여 간접적으로 검증하는 방법이다.

3. 확률론적 지진안전성분석

원전의 확률론적 안전성분석(Probabilistic Safety Assessment, PSA)은 1975년 미국에서 수행한 원자로의 안전성에 관한 연구사업에서 처음으로 도입되었고, 1979년에 발생한 TMI 원전 사고의 평가결과 사전 예측된 사고추이의 하나와 일치되었다는 것이 밝혀짐에 따라 확률론적 안전성분석에 대한 관심이 고조되었다. 최근에는 운전 중이거나 건설 중인 모든 원전에 대하여 확률론적 안전성분석을 의무적으로 요구하고 있다.

확률론적 안전성분석에 평가하는 사상(Event)은 여러가지이나 이 중 외부사상의 하나인 지진은 방사능 누출사고의 최초 원인인 초기사상(Initiating Event)이 될 수 있고, 원전의 안전 및 사고완화에 관련된 기기 및 계통을 동시에 파손시킬 수 있는 관계로 매우 중요하게 취급되고 있다.

확률론적 지진안전성분석 과정은 다음과 같이 크게 3단계로 구성된다.(그림 7 참조)

- (1) 지진재해도분석(Seismic Hazard Analysis) : 대상 부지에서 지진준위에 따른 발생빈도를 계산
- (2) 지진취약도분석(Seismic Fragility Analysis)

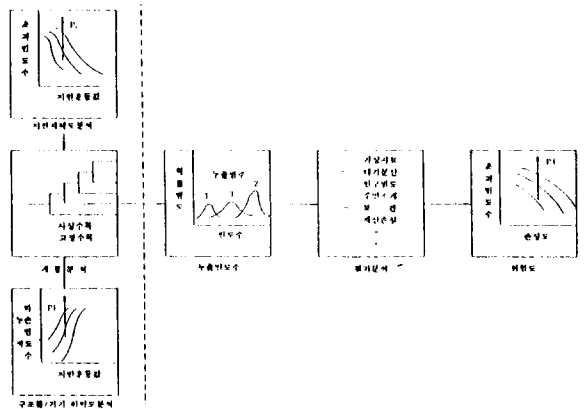


그림 7. 확률론적 지진안전성분석 흐름도

sis) : 선정된 지진준위에 따른 안전관련 구조물 및 기기의 파손확률을 계산

- (3) 지진사고빈도분석 : 지진재해도 및 지진취약도 분석결과를 발전소의 사상수목(Event Tree) 및 고장수목(Fault Tree)과 결합하여 지진으로 인한 원자로 노심의 용융빈도를 계산

따라서, 확률론적 지진안전성분석은 대상 발전소가 건설된 부지에서 지진으로 인한 사고의 빈도를 계산하고, 핵심적인 위험도 기여인자를 밝혀내어 그 인자의 영향을 줄여줌으로써 지진으로 인한 위험도를 감소시키는데 그 목적이 있는 것이다.

4. 결 언

원전 시설물은 만일의 사고시 공공의 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 매우 엄격한 요건

과 설계절차를 적용하여 지진과 같이 막대한 피해를 줄 수 있는 자연재해에 대해서도 안전하도록 설계하고 있다.

현재 우리의 내진해석 및 설계 수준은 그동안 꾸준한 기술개발과 15기 이상의 원전의 내진해석 및 설계를 수행하면서 축적한 경험을 통하여 기술 자립단계를 넘어 기술의 고도화 단계에 있다. 또한 국내의 원전 설계를 위한 규제요건 및 기술기준이 제정되는 중에 있어 멀지 않아 국내 실정에 적합한 독자적인 요건 및 절차가 정립될 수 있을 것이다.

최근 전세계적으로 발생한 지진과 그로 인한 막대한 피해로 인해 국내에서도 지진에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이므로 내진설계에 관한 보다 많은 연구를 통해 일반 시설물에 대한 내진설계요건을 보완 강화 함으로써 자연재해에 대하여 보다 안전한 사회환경을 조성해야 할 것으로 사료된다.