

# 원자력시설의 지진안전성 평가 및 증진

## Seismic Safety Evaluation and Enhancement of Nuclear Facilities



최인길\*



전영선\*



김민규\*\*

\*한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원

\*\*한국원자력연구원 종합안전평가부 선임연구원

### 1. 서론

우리나라 국민은 일반적으로 우리나라는 지진 안전지대에 속해 있어 강진에 의한 피해를 입을 위험이 크지 않다고 생각하는 한편 규모 5이상의 중규모 지진이 발생하여 지반 진동을 느끼게 되면 막연한 공포심을 가지게 된다. 그러나 최근 들어 국내에서도 중소 규모 지진의 발생빈도가 증가되는 것으로 보고되고 있으며, 세계적으로 대규모 지진이 빈발하고 그 피해가 매스컴을 통해 상세히 보도되면서 국내 시설물의 지진안전성에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 특히 주변국인 일본과 중국의 대규모 지진발생 사례와 최근에 논란이 계속되고 있는 원전 부근에서 발견된 단층의 활성여부 논란을 접하면서 두 나라 사이에 위치한 우리나라의 지진 안전성에 대한 우려와 관심이 증폭되고 있다.

우리나라에서 산업시설, 사회기반 시설을 포함하여 처음으로 내진설계 개념이 도입된 것은 우리나라 최초의 원자력발전소인 고리 원자력발전소를 설계하던 1970년대 초반이라고 할 수 있다. 그 후 경제 발전과 더불어 국내 주요 시설에 대한 지진 안전성 확보 차원에서 주요 시설에 대한 내진설계 규정이 제정되어 왔다.

여기에서는 국내 원자력 시설의 내진설계에 대한 기본적인 사항과 지진환경 변화에 따른 원자력발전소 시설의 지진안전성을 확보하기 위해 수행하고 있는 다양한 활동

과 관련 연구현황 등을 간략히 소개하고자 한다.

### 2. 원자력 시설의 내진설계/해석 및 검증

원자력 시설의 내진설계는 구조물 및 시스템의 중요도에 따라 안전등급(Safety Class) 및 내진등급(Seismic Category)을 부여하고 각각의 등급에 따라 내진설계를 수행한다. 원자력발전소의 안전에 지대한 영향을 미칠 가능성이 있는 구조물 등에 대해서는 상세하고 보수적인 설계를 수행하게 된다. 일반적으로 원자력 시설의 경우 일반구조물 설계 시에 반영하지 않는 다양한 극한하중을 반영하여 설계한다. 그 예로 지진하중, 항공기 충돌, 쓰나미, 중대사고에 의한 내압 등을 들 수 있다.

원전 시설은 운전기준지진(Operating Basis Earthquake; OBE)과 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake; SSE)의 두 가지 수준의 지진에 대해 설계한다. 우리나라 원전 설계지진 수준은 SSE가 0.2g, OBE는 SSE의 1/2 수준을 적용하여 왔으며, 설계지진은 원전에 따라 일부 서로 다른 설계응답 스펙트럼을 사용하여 왔다. 중수로형인 월성 원전의 경우 캐나다의 내진설계기준(CSA)에서 제시하고 있는 설계응답 스펙트럼을 사용하였으며, 나머지 일부 초기 원전을 제외하고는 한국형 표준원전을 비롯한 대부분의 원전은 미국 원자력규제위원회 (US Nuclear Regulatory Commission)

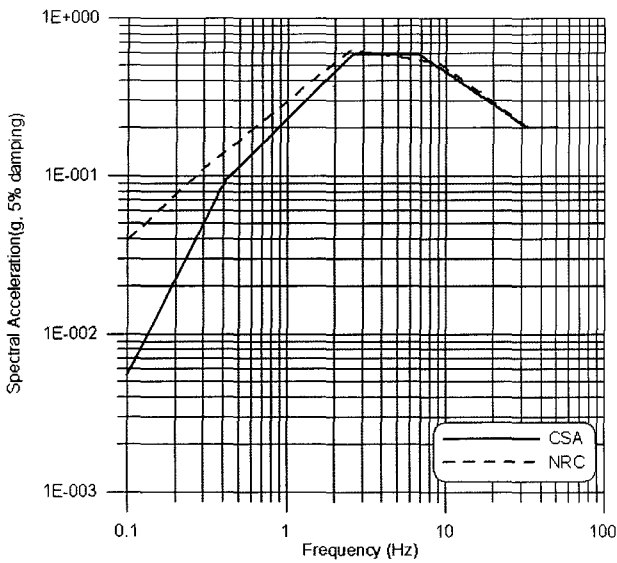


그림 1 설계응답 스펙트럼의 비교

에서 제시하고 있는 표준 설계응답 스펙트럼을 사용하여 설계하여 왔다.<sup>1)</sup> 그림 1은 두 설계응답 스펙트럼을 비교하여 보여주고 있다.

US NRC에서 제시한 표준 설계응답 스펙트럼은 미국 서부 지역에서 발생한 강진 기록을 이용하여 작성한 것으로 지반의 특성이 상이한 미국 중동부 지역에 동일한 스펙트럼을 사용하는 것은 문제가 있다고 할 수 있다. 즉, 비교적 암반지반을 가진 동부 지역의 경우 고진동수 특성을 나타내는 지진특성을 저평가 하고 있는 반면 저진동수 성분에서는 과도한 설계가 이루어지고 있으며, 충적지반의 서부 지역에서는 저진동수 특성이 저평가 되어 있다는 것이다. 이에 따라 최근 미국에서도 표준 설계응답 스펙트럼에 대한 타당성에 의문이 제기되면서 새로운 설계지진 설정 방법이 제시되고 있으며 관련규정을 개정 중에 있다.

최근 들어 이러한 표준응답 스펙트럼 사용의 문제점을 인식하고 확률론적 지진재해도 분석에 근거한 설계지진 설정방법을 제시하고 있으며, 일본의 경우에도 과거 결정론적 방법의 보완책으로 확률론적 방법을 추가한 설계지진 설정방법으로 내진설계 기준을 개정 중에 있다.

원전 구조물의 설계 시에는 응답스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법이 사용되고 있다. 일본의 경우 우리나라 OBE에 해당하는 S1 지진에 대해서는 응답스펙트럼 해석법을 사용하고 SSE에 해당하는 S2 지진에 대해서는 비선형 시간이력 해석법을 사용한다. 그러나 우리나라의 경우 구조물의 설계에는 응답스펙트럼 해석법을 사용하며 선형 시간이력 해석을 통해 구한 구조물 내부의 시간이력을 이용하여 구조물 내부에 설치되는 주요 기기의 내진해석이나 검증에 사용되는 응답 스펙트럼을 작성한다.

원전의 안전에 중대한 영향을 미치는 주요 기기들은 응답 스펙트럼을 이용하여 내진해석을 수행하거나 진동대 시험 등을 통하여 내진성능을 확인하게 된다. 이 때 기기의 구조적인 파괴 뿐 아니라 기능적인 파괴 즉, 기기의 오작동 등에 대해서도 검증을 수행함으로써 기기의 오작동이나 작동정지로 인해 원전의 안전이 위협받을 가능성을 최대한으로 줄이게 된다. 아래 그림 2에서 원전의 내진해석 및 설계 절차를 보여주고 있다.

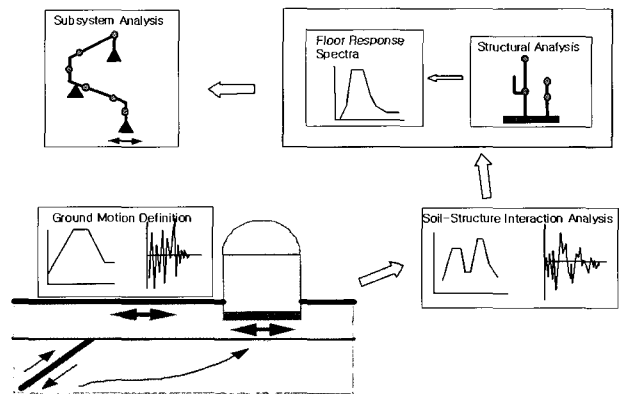


그림 2 원전 시설의 내진해석 및 설계 절차

### 3. 원전시설의 내진안전성 평가

원전 시설에 대한 내진안전성은 설계 단계에서부터 시작하여 주기적으로 평가하게 된다. 내진안전성 평가의 목적은 설계단계에서 고려한 하중을 초과하는 지진하중이 발생하였을 때의 안전성을 확인하고, 주기적으로 원전 시설의 상태를 반영한 평가를 통하여 열화 등으로 인한 취약 부위의 확인과 보수보강, 교체 등을 통해 지진에 대한 안전성을 확보하기 위한 것이다.

일반적으로 원전의 내진안전성 평가에는 확률론적 지진 안전성 평가법(Probabilistic Seismic Risk Analysis; SPRA)과 내진여유도 평가법(Seismic Margin Assessment; SMA)의 두 가지 방법이 사용되고 있다. 본 절에서는 이들 두 가지 방법에 대해 간략히 기술하기로 한다.

#### 3.1 확률론적 지진안전성 평가

원자력 발전소 시설의 내진설계 및 해석은 정해진 기준 및 규준에 따라 수행된다. 예를 들면 격납건물, 핵연료 건물 등과 같은 원전 구조물의 경우 ASME, ACI, AISC 및 Standard Review Plan(SRP) 등의 기준에 따라 설계를 수행하고 있다. 이들 기준은 모두 결정론적인 형태로 기술되어 있으며

로 원전의 내진안전성을 확보하기 위해서는 각 설계단계에 추가적인 여유나 보수성을 부여하게 된다. 즉, SSE나 OBE와 같은 설계기준지진의 설정, 지반, 구조물 및 파이프의 모델링, 응답해석 방법 뿐만 아니라 각종 정적 및 동적 하중의 조합에 보수성이 포함된다. 이들 보수성은 원전의 운전에서 발생하는 랜덤성이나 불확실성을 포괄하기 위한 것이다.

지진하중 뿐만 아니라 기타 정적 및 동적하중은 본질적으로 랜덤성을 가지고 있다는 것은 기지의 사실이다. 지진학이 크게 발전하였다고 해도 지진의 발생을 정확히 예측하는 것은 대단히 어려운 일이며, 특히 지진의 규모, 강진 지속시간 및 진동수 성분 등의 지진 특성을 예측하는 것은 거의 불가능하다. 마찬가지로 구조물의 저항능력을 정확히 평가하는 것 역시 매우 어려운 일이다. 구조물의 저항능력은 많은 기본 변수의 함수로 이루어져 있다. 재료강도, 구조물의 기하학적 형상 등과 같은 변수들은 통계적인 변동성을 보여주고 있다. 그러므로 위험도 평가에서 하중 및 구조물 저항능력의 랜덤성이나 불확실성을 고려하기 위해서는 확률론적 방법을 사용하는 것이 합리적이라고 할 수 있다.

확률론적 지진안전성 평가의 수행목적은 지진으로 인한 노심용융 및 방사성 물질이 외부로 유출되는 확률을 평가하는 것이다. SPRA는 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 방법으로 원전의 안전성을 체계적으로 평가할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 3에서 SPRA의 절차를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 SPRA는 다음과 같은 4단계로 구성되어 있다

- 지진재해도 분석(Seismic Hazard Analysis)
- 지진취약도 분석(Component Fragility Analysis)
- 사고추이 분석(Plant System and Accident Sequence Analysis)
- 위험도 평가(Consequence(Risk) Analysis)

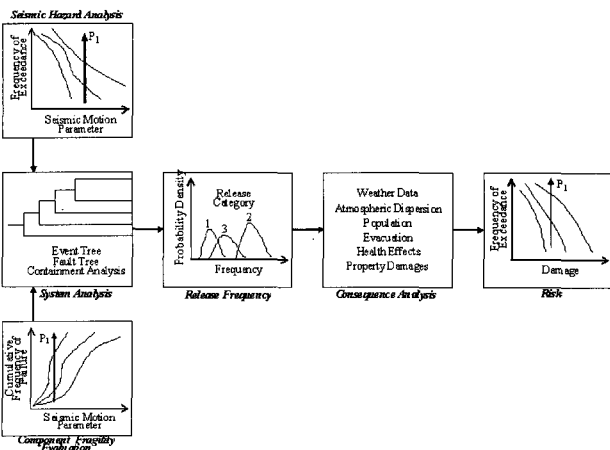


그림 3 확률론적 지진안전성 평가 절차

원전 부지에서의 지진재해도도 일련의 재해도곡선으로 나타낸다. 지진재해도 곡선은 초과확률과 침투지반가속도와 같은 지반운동 파라메타의 관계를 그린 것이다. 지진재해도 해석에서는 역사지진 자료, 계기지진 자료 뿐 아니라 활성 단층 및 기타 지진원 자료 등을 이용하여 발생가능한 지진의 규모 등을 추정하고, 거리 및 지반특성에 따른 지진파의 전달특성을 평가하여 최종적으로 임의 부지에서의 지진재해도도를 평가한다.

지진재해도 분석에서는 큰 불확실성으로 인해 일련의 재해도곡선을 작성하고 각각의 곡선에는 규정된 가중치를 부여한다. 완전한 지진재해도 분석에서는 지진재해도 곡선 뿐 아니라 지반운동 특성도 평가한다. 지반운동은 응답스펙트럼, 파워 스펙트럼 또는 일련의 시간이력도로 나타낼 수 있다. 또한 강진지속시간 역시 규정하여야 한다. 우리나라나 미국 동부와 같이 강진의 발생 기록이 거의 없는 지역에서는 지반운동 특성을 설정하는 것이 주요 문제가 된다.

아래 그림 4는 지진재해도 분석 시 국내의 지역별 지진

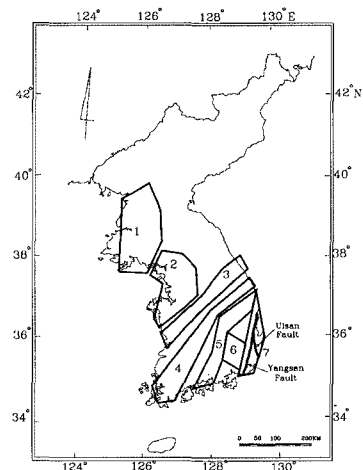


그림 4 지진원 모델 예

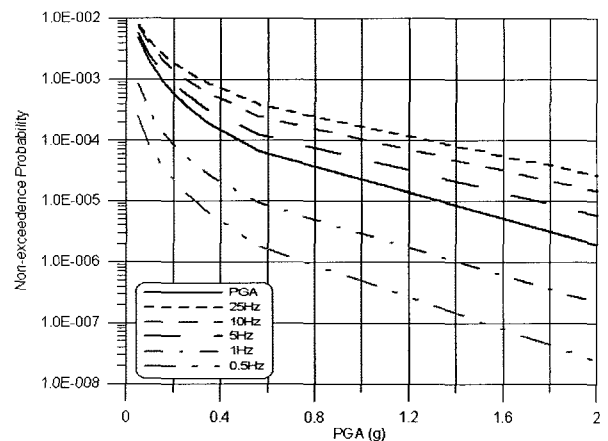


그림 5 지진재해도 곡선 예

활동도를 반영한 지진원 모델을 보여주고 있으며 이러한 모델과 국내 지반의 지진파 전파특성이 반영된 지반운동 감쇄식을 이용하여 산정한 임의 부지에서의 지진재해도 곡선의 예를 그림 5에서 보여주고 있다.

원전 구조물 및 기기의 지진취약도는 주어진 지반운동 파라메타에 대한 구조물 및 기기의 조건부 파괴확률로 정의한다. 현재까지 우리나라에서 수행한 대부분의 SPRA에서는 파라메타로 첨두지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 사용하여 왔다. 그러나 일본이나 미국 등지에서는 첨두지반속도(Peak Ground Velocity; PGV)나 스펙트럼 가속도(Spectral Acceleration; SA) 등이 사용되기도 한다. 이는 PGA에 비해 PGV나 SA가 구조물 등의 피해를 잘 대변해 줄 수 있는 지반운동 파라메타라는 판단에 따른 것이다.

원전 구조물 및 기기의 지진 취약도분석은 다음과 같은 자료들을 이용하여 수행한다.

- 실제 지진경험 자료
- 취약도 또는 성능검증 실험 자료
- 상세 해석 모델
- 간략한 해석 모델
- 설계자료 및 공학적 판단

가장 바람직한 취약도분석은 실제 지진 경험자료나 실험에 의한 자료를 이용하는 방법으로, 이들 자료는 파괴여부에 대한 신뢰성 있는 정보를 제공해 준다. 지진 경험자료나 실험 자료가 충분한 정보를 제공해 주지 못할 경우에는 간략한 또는 상세한 해석모델을 이용하여 파괴를 예측한다. 해석 모델에는 물리적 특성치, 파괴기준 및 모델 자체에 내재된 랜덤성 및 불확실성을 포함시킬 수 있다.

설계자료 및 공학적 판단을 이용하는 방법은 취약도분석에서 가장 경제적인 방법이다. 그러나 그 결과는 주관적인 판단에 매우 민감하며, 특히 그 결과가 일부 기술자에 의한 의견을 기본으로 하여 결정된 경우 매우 민감하게 된다. 현재까지 취약도분석을 위한 여러 가지 방법이 제안되어 왔으며, 이들 방법은 주관적인 판단 및 설계도면을 기본으로 하는 것에서부터 확률론적 구조역학적인 방법을 기본으로 하는 방법까지 다양하다.

취약도 분석에 사용되는 대표적인 방법인 Zion 방법은 미국 Zion 원전 및 Indian Point 원전 PRA 등 많은 원전에 적용된 방법이다.<sup>2)</sup> 이 방법에서는 부품의 취약도를 주어진 첨두지반가속도에 대한 조건부 파괴확률로 정의하고 있다. 이 방법의 주요 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- 부품의 취약도는 성능, 연성도 및 구조응답량을 나타내는 여러 계수들의 곱으로 가정한다.

- 각각의 계수는 대수정규분포로 가정한다. 안전율로 나타내는 메디안 값과 랜덤성 및 불확실성에 대한 두 대수표준편차는 주로 주관적인 판단에 의해 결정한다.
- 부품 취약도 자체는 대수정규분포를 갖는다. 메디안 값은 적절한 계수의 메디안 값의 곱으로 구하며, 대수표준편차는 계수들에 대한 값의 SRSS(Square Root Sum of Squares)로 구한다.

현재 우리나라에서 수행한 거의 대부분의 취약도 평가는 이 방법을 사용하였는데 이는 취약도 데이터를 산정하는데 가장 경제적인 방법이기 때문이다. 아래 그림 6에 취약도 곡선의 예를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 취약도 곡선은 지반운동 파라메타의 크기에 따른 구조물 및 기기의 파괴확률로 나타나며 일반적으로 그림과 같이 5%, 50%, 95% 신뢰도 및 평균 곡선으로 나타내며 SPRA에서는 평균 취약도 곡선이 최종적으로 사용된다.

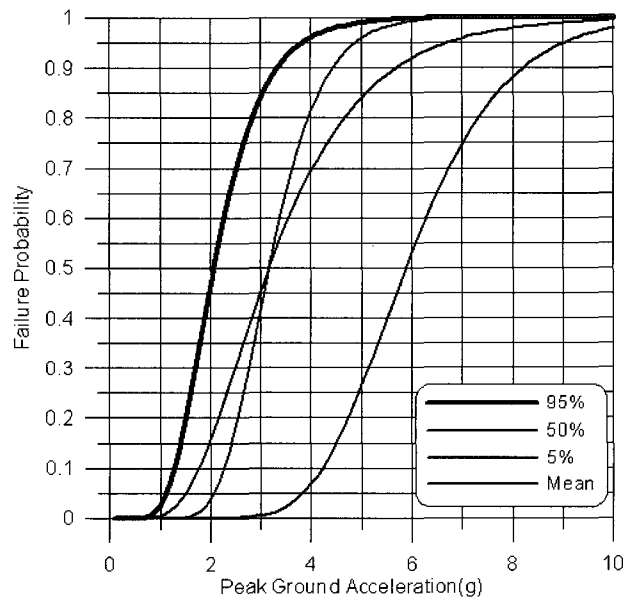


그림 6 지진취약도 곡선 예

SPRA의 최종적인 결과는 노심손상빈도(Core Damage Frequency)로 나타나게 된다. 즉, 지진이 발생할 경우 지진에 의해서 노심이 손상될 확률을 산정하는 것으로 이를 위해서는 먼저 지진재해도와 지진취약도를 이용하여 주요 구조물 및 기기의 손상확률을 산정하고 사고수목과 고장수목을 이용하여 각각의 구조물 및 기기의 고장이 원전 시스템에 미치는 영향을 Boolean 식에 의해 평가하여 최종적으로 CDF를 산정하게 된다. 아래 그림 7은 주요 구조물 및 기기의 CDF 기여도를 파이차트로 나타낸 것이다. 이러한 결과를 이용하여 CDF에 중대한 영향을 미치는 구조물

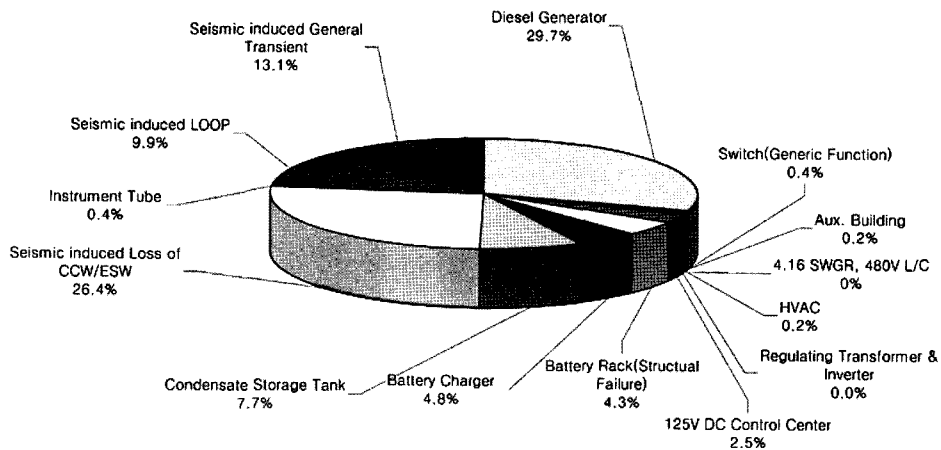


그림 7 주요 설비별 CDF 기여도 예<sup>3)</sup>

및 기기를 확인하고 이들의 내진성능을 증가시킴으로써 CDF를 줄일 수 있으며 최종적으로는 원전의 지진안전성을 확보할 수 있게 된다.

### 3.2 내진여유도 평가

내진여유도 평가의 목적은 지진에 취약한 기기를 확인하는 것이다. SSE가 0.12~0.25g인 비교적 낮은 지진구역에 위치한 원전의 SPRA 결과 지진에 의해 발생하는 주요 위험요소는 SSE보다 2~5배 큰 지진에 의해 발생됨을 보여주고 있다. 이는 SSE수준에 대해 큰 여유를 가지고 있는 것을 암시한다. 그러나 SPRA는 지진재해도 분석과 취약도 분석에 많은 불확실성을 내포하고 있어 원전의 지진에 대한 여유도를 평가할 수 있는 보다 직접적이고 간단하며 논쟁의 소지가 적은 방법의 개발에 관심을 가지게 되었다. 이러한 이유로 미국에서는 내진여유도 평가법을 개발하게 되었다.<sup>4)</sup>

내진여유도 평가는 SPRA의 한 부분으로 수행할 수 있다. 기존에 SPRA를 수행한 원전의 경우 이들 결과를 이용하면 매우 경제적으로 SMA를 수행할 수 있다. NRC에서 개발한 SMA 방법에서는 사고수목 및 고장수목을 이용하며, 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발한 방법에서는 Hot 또는 Cold Shutdown 상태에서 72시

간을 유지할 수 있도록 하는데 필요한 부품들에 대한 평가를 수행한다. 이들 일련의 부품을 성공경로(Success Path)라고 한다. 실제 성공경로는 여러 개가 존재하나 이들 중 내진여유도를 나타내기 쉬운 주경로 및 하나의 별도 경로를 선정하여 이들 경로에 포함된 기기 및 부품에 대해서만 SMA를 수행한다. 성공경로의 선정은 운전원, 계통기술자 및 내진성능 평가기술자가 공동으로 수행한다.

SMA의 수행절차는 다음과 같다.<sup>5)</sup>

- SME(Seismic Margin Earthquake) 결정
- 평가팀의 구성
- 현장조사 준비
- “성공경로” 선정을 위한 현장조사
- 내진성능 평가를 위한 현장조사
- 후속 현장조사 (필요시)
- 여유도 평가
- 보고서 작성

구조물 및 기기의 내진여유도를 평가하는 방법에는 SPRA에서 사용되는 취약도분석을 사용하는 방법과 EPRI에서 제시한 결정론적 방법을 사용하는 CDFM(Conservative Deterministic Failure Margin) 방법이 있다.

아래 표 1에서 SPRA와 SMA를 주요 부분에 대해 비교하였다. 표에서 HCLPF(High Confidence Low Probability

표 1 SPRA와 SMA의 비교

Area	SPRA	SMA
Purpose	Estimate seismic risk	Estimate seismic capacity beyond SSE
Seismic Hazard	Important part of PRA	Excluded
Seismic Hazard Uncertainty	Has a major effect on results	Excluded from consideration
Output	Gives seismic risk, frequency of core melt Identifies lowest capacity element	Plant seismic capacity in terms of HCLPF Identifies lowest HCLPF element
Earthquake Input	Needs seismic hazard curves	Needs earthquake review level

of Failure)는 고신뢰도 저과과확률의 내진성능을 나타내는 것으로 취약도 평가에서는 95% 신뢰도 곡선에서 5% 파괴 확률을 가지는 메디안 값( $HCLPF_{50}$ )을 나타내며 CDFM 방법에서의 HCLPF는  $HCLPF_{84}$ 로 이는 84% 비초과확률 (Non-exceedance Probability; NEP)을 갖는 지반진동에 대해 정의된 것이다. 이 두 HCLPF 값에 대한 관계는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$HCLPF_{84} = e^{\beta_s} \cdot HCLPF_{50}$$

여기서  $\beta_s$ 는 수평성분 응답스펙트럼 형상에 대한 조합된 대수표준편차이다.

#### 4. 원전 시설의 내진 안전성 향상방안

원전시설은 이미 충분한 내진안전성을 갖도록 설계, 시공되어 운영되고 있는 시설물이므로 추가적인 내진안전성 향상방안이 필요 없는 것으로 생각할 수도 있다. 그러나 최근 국내의 경우도 신형원전의 설계지진을 0.3g로 상향 적용하고 있으며 국내 지진환경 변화에 따라 원전부지에서의 지진동 수준이 상향 평가될 경우 기존 원전시설에 대한 재평가 및 필요할 경우 내진성능 향상방안이 필요하다. 실제 2005년에 일본에서는 8월 15일 발생한 규모 7.2의 미야기 지진시 관측된 지진스펙트럼이 설계지진력을 상회하는 것으로 나타나서 3기의 원전이 가동 중단된 바 있다.

뿐만 아니라 계기지진의 관측이래 한반도의 주변에서 대규모 지진이 빈번히 발생하고 있는 것도 원전의 내진안전성 향상에 대한 요구를 증가시키고 있다. 일본에서는 최근들어 규모 7이상의 지진이 매년 발생하고 있으며, 2005년 발생한 후쿠오카 지진으로 국내에서도 많은 사람들이 느낄 수 있는 정도의 흔들림이 발생하기도 했다.

지진에 대비하여 구조물의 내진안전성을 향상시키는 방법으로는 여러 가지가 있다. 교량 교각의 경우 횡철근 배치를 늘려서 소성힌지가 발생하도록 하는 방법이나 강판 보강을 통해서 연성을 증가시키는 방법들을 사용하기도 한다. 그러나 내진안전성을 향상시키기 위한 가장 용이한 방법은 면진장치를 적용하여 지반으로부터 전달되는 지진력을 감소시키는 방법이다. 원전 시설에서도 면진장치를 적용하는 많은 연구들이 수행되고 있으며 일부 국가에서는 원전 시설에 실제로 면진장치를 적용하여 운영하고 있다. 본 절에서는 원전에 대한 면진장치 적용기술에 대하여

살펴보고자 한다.

#### 4.1 면진기술 도입 배경

원전에 면진장치를 도입하는 것은 교량이나 건축물과 같은 일반 구조물에 비하여 일반적인 일은 아니다. 그러나 원자로를 하나 설계해서 운영할 수 있도록 하는 일은 많은 시간적 경제적인 노력을 들여야 하는 일로서 이렇게 설계된 원자로를 설계지진에 맞추어서 재설계하여야 한다면 소요되는 노력이 막대할 것이라는 것을 예상할 수 있다. 반면 설계지진의 변화에 따라서 면진장치를 도입함으로써 원자로에 전달되는 지진력을 동일하게 유지시켜 준다면 별도의 설계변경없이 기존의 원자로를 시공할 수 있게 된다. 따라서 새로운 원자로를 설계하기 위한 노력을 현저하게 감소시킬 수 있는 것이다.

또한 원전의 주요 안전관련 기기들에 면진장치를 설치하여 내진성능을 향상시켰을 경우 원전의 노심손상빈도를 상당부분 감소시킬 수 있다는 연구결과가 발표된 바 있다.<sup>3)</sup> 따라서 원전의 기기에 면진기술을 도입함으로써 기기 자체의 지진안전성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 원전전체의 노심손상빈도를 낮추는데도 기여하여 원전전체의 지진안정성을 증가시킬 수 있는 것이다.

#### 4.2 원전의 면진기술 적용 및 연구동향

##### 4.2.1 면진기술 적용 사례

지금까지 전 세계적으로 6기의 가압경수로에 면진기술이 적용되었다. 그중에 4기는 프랑스에, 그리고 2기는 남아프리카 공화국에 있다. 프랑스의 크루아스 원전은 안전정지지진이 0.2g로서 4기의 원전에 면진장치가 설치되어 운영중에 있다. 크기 50cm×50cm×6.5cm의 고무받침 1,916개를 설치하여 0.9Hz의 고유진동수를 갖도록 설계되었다. 남아프리카공화국의 Koeberg 원전의 경우는 안전정지지진의 최대가속도가 0.3g로서 2기의 원전에 면진장치가 설치되어 운영되고 있다. 상부구조물의 총무게는 382,000톤으로서 크기 70cm×70cm×13cm의 탄성받침과 마찰판을 1,829개 설치하여 0.9Hz의 고유진동수를 갖도록 설계되었다.

##### 4.2.2 연구동향

일본의 경우 일본전력중앙연구소에서는 1987년부터 10년간 고속증식로(Fast Breeder Reactor; FBR)의 면진을 위한 연구를 수행하였다. 이에 대한 설계기준이 1997년에

발표되었으며, 이후 경수로에 적용할 수 있도록 개정된 바 있다. 최근에는 국제핵융합실험로에 면진장치를 적용시키고자 하는 노력이 진행중에 있는 상황이다.

미국에서는 제4세대 원자로(Gen-IV)중에 여러형태의 원자로에 면진장치를 적용하였다. 미국 DOE에서는 차세대 액체금속로에 면진장치를 적용하여 설계를 단순화하고 안전성을 향상시키며 원자로 설계의 표준화를 위하여 노력하고 있다. 또한 나트륨냉각 소형고속로(Sodium Advanced Fast Reactor; SAFR)에 대해서도 면진장치를 적용하기 위한 연구를 지원하고 있으며, 전체 원자로의 무게는 31,000톤이고 100개의 탄성받침을 이용하여 면진시켰다. 설계 수평주파수는 0.5Hz이고 연직주파수는 3Hz이다.

국내의 경우 Korea Advanced Liquid Metal Reactor (KALIMER)는 면진시스템을 적용하도록 설계되었다. 전체 면진중량은 약 51,000톤이며 182개의 납삽입고무베어링과 고감쇠고무베어링을 사용하여 면진시키도록 하였다. 각각의 HDRB는 1.2m의 높이에 1.9m의 직경을 가지고 있는 형태로 설계하였고, 설계수평주파수는 0.5Hz로 하였다.

웨스팅하우스에서도 AP600 원자로를 대상으로 수평방향 면진에 대한 연구를 수행하고 있다. 이러한 연구는 AP600의 설계사양인 0.3g를 초과하는 지반운동의 발생이 가능한 일본지역에서의 적용이 가능하도록 하기 위해서 수행하고 있다. 최근에 아이다호 국립연구소와 벅텔은 미국 원전에 면진장치를 적용하는 연구를 수행한 바 있다.

원자로에 대한 면진과 더불어 원전 개별 기기의 면진에 대한 연구도 수행되어 왔고 또한 현재 수행하고 있다. 개별기기에 대한 면진은 기존의 원전에 대하여 상향조정된 내진기준을 만족시키는 데에 매우 유용한 방법으로서 면진장치를 적용함으로써 보다 경제적으로 내진보강을 수행할 수 있도록 한다.

일본의 경우 일본원자력연구소는 1991년부터 10년간의 연구과제를 통해서 원전 기기의 면진에 관한 연구를 수행하였다. 기기면진에 대한 방법론과 전산프로그램들을 개발하였으며 실제 지진파와 진동대를 이용한 실증시험을 수행하였다.<sup>6)</sup>

한국 원자력연구소에서는 주요 안전관련기기중에서 비상디젤발전기를 선택하여 3차원 면진장치를 적용하여 기기진동과 지진력저감을 위한 장치로 사용하기 위하여 그림 13과 같은 실험모델을 제작하여 진동대 실험연구를 수행한 바 있다.<sup>7)</sup> 또한 한전 전력연구원에서는 원전의 주체어실의 floor 전체를 면진하여 지진안전성을 향상시킬 수 있는 층면진기법에 대한 실험적 및 해석적 연구를 최근 수행하였다.

## 5. 결 론

본 고에서는 지진으로부터 국내 원자력 시설을 보호하고 국민의 건강을 지킴과 동시에 안정적인 전력 수급을 위한 여러 가지 사항에 대해 기술하였다. 지진학 및 지질학의 발달로 인해 국내 지진환경이 변화하고 있으며 경제가 발달하고 국민의 생활수준이 향상됨에 따라 산업시설에 대한 안전성에 관심이 크게 증대되고 있는 시점에서 국내 원전의 내진안전성 확보를 위한 노력이 연구기관, 사업자 그리고 규제기관이 중심이 되어 활발히 전개되고 있다.

구조물의 내진해석 및 설계 분야에서 선도적 역할을 수행해온 원자력 분야의 기술이 일반 산업시설의 내진안전성 확보에도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단되며 앞으로 더욱더 발전된 기술로 자연재해를 극복하고 안정적인 국가 발전에 기여하기 위한 노력이 계속되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
2. Commonwealth Edition Co., Zion Probabilistic Safety Study, Docket 50295, 1981.
3. 전영선, 최인길, 원전기기의 지진력 저감이 노심손상 빈도에 미치는 영향 평가, 한국원자력학회 추계학술발표회, 2002.
4. Newton R. Anderson, "Seismic Unresolved Safety Issues," Nuclear Engineering and Design, 107, pp. 3-11, 1988.
5. 최인길, 서정문, 원전구조물의 내진여유도 평가기법 분석, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1799/2001, 2001.
6. K. Ebisawa, K. Ado and K. Shibata, Progress of a Research Program on Seismic Base Isolation of Nuclear Components, Nuclear Engineering and Design, Vol 198, pp. 61-74, 2000.
7. 김민규, 전영선, 면진된 모형 디젤발전기의 지진응답 실험, 2006 한국지진공학회 춘계 학술발표회, 대전, 2006. 