

확률론적 평가법과 결정론적 평가법에 의한 내진성능비교분석 The Comparison of Seismic Capacities by Two Approaches, Probabilistic Approach and Deterministic Approach

송정국, 황규호, 강선구*

J.G. Song, K.H. Hwang, S.K. Kang

서용표, 이종림**

Y.P. Suh, J.R. Lee

ABSTRACT

In evaluating the Individual Plant Examination of Seismic Events, two methodologies, Seismic Probabilistic Risk Assessment(SPRA) and Seismic Margin Assessment(SMA) can be used. SPRA is based on the probabilistic approach and SMA is based on the deterministic approach in evaluating seismic capacities. In this paper, by evaluating the seismic capacities of the same component by these two approaches respectively, the correlation of two methodologies can be shown. In addition, the meaning of HCLPF(High Confidence of Low Probability of Failure) values that are inherent in these two methodologies is recognized by the quantitative comparison analysis.

1. 서론

현행 국내 원자력 발전소의 경우 지진과 같은 중대사고에 대해 안전성 분석을 수행하고 있으며, 그 방법론으로 미국 원자력 규제 위원회(NRC)의 수행지침⁽¹⁾에 따라 지진취약도 평가 방법론

* 정회원·한국전력기술(주) 종합안전성평가연구그룹 내진평가팀

** 정회원·한국전력연구원 원자력연구실 토건그룹

(Seismic Probabilistic Risk Assessment, SPRA)과 내진여유도 평가 방법론(Seismic Margin Assessment, SMA)을 사용하고 있다. 두 방법론의 가장 큰 차이점은 지진취약도 평가 방법론이 구조물 및 기기의 내력을 평가함에 있어 확률론적 접근방법을 사용하는데 반해 내진여유도 평가 방법론에서는 결정론적 방법을 사용하고 있는데 있다. 국내 원전의 경우 과거 표준원전(영광, 울진) 등에서는 지진취약도 분석방법론(확률론적 방법론)이 주류를 이루었으나 최근 가동원전(고리, 월성)과 차세대원전 등에 있어서 내진여유도 평가 방법론(결정론적 방법론)을 채택하고 있다. 본 논문에서는 상기 두 가지 방법론을 이용하여 동일 기기에 대한 내진성능을 평가, 비교함으로써 두 방법론 사이의 정량적 관계를 파악하고자 하였다. 평가 대상 요소로 기기를 선택한 것은 원전의 경우 구조물의 내진성능은 기기의 내진성능을 훨씬 초과하므로 지진발생시 해당설비의 내진성능은 결국 기기에 의해 좌우되기 때문이다.

2. 평가모델

상기 비교분석을 위해 사용한 모델은 다음과 같으며, 평가대상기기는 구조물 최상부 슬래브에 위치하는 것으로 가정하였다.

2.1. 구조물 모델

가로 192ft, 세로 96ft, 높이 144ft인 6층의 철근 콘크리트 구조물을 인위적으로 구축하여 본 평가에 사용하였다. 벽체의 간격과 층간 높이는 각각 24ft로 형상화 하였으며, 전단벽의 두께는 4ft, 슬래브의 두께는 1ft로 하였고, 지반으로부터 3층까지는 가로(X):세로(Y) 비율이 2:1인 L형 구조로, 4층부터 6층까지는 가로(X):세로(Y) 비율이 1:1인 정사각형 구조로 하였다. 본 구조물의 내진 해석모델은 층 슬래브의 유연성을 고려하기 위하여 각 구조물을 5개의 구역으로 나눈 뒤 각 구역에 대하여 집중질량모델을 제작한 후 수평보요소를 이용하여 각각의 모델을 연결하여 전체 내진 해석 모델을 작성하였다. 대상 구조물은 암반부지위에 있는 것으로 가정하여 지반 구조물 상호영향은 없는 것으로 가정하였다. 그림 1은 구조물의 내진해석모델을 나타내고 있으며, 고유치 해석 결과 구조물의 기본 진동수는 약 7.2Hz 로 나타났다.

2.2. 기기모델

취약도 및 내진여유도 평가를 위해서 사용한 기기 모델은 표준원전 보조건물 165ft에 위치하고 있는 CCW Surge Tank로서 높이 29.5 ft, 직경 8 ft인 수직 탱크이다. 기기의 중량은 93.7 kips이며 고유치 해석 결과 기본 진동수는 약 14.5Hz 로 나타났다. 그림 2는 CCW Surge Tank의 내진

해석모델을 나타내고 있다.

3. 방법론

3.1 지진취약도 평가 방법론에 의한 내진성능평가

(1) 지진취약도 유도

$$A = F \cdot A_{SSE}$$

$$F = F_C \cdot F_{RE} \cdot F_{RS}$$

$$HCLPF = A \cdot \text{Exp}(-1.65(\beta_R + \beta_U))$$

여기서 A = 기기 가속도 내력

F = 안전계수

A_{SSE} = 최대지반가속도

$HCLPF$ = 고신뢰도저파손확률 가속도내력

β_R = 무작위성 로그표준편차

β_U = 불확실성 로그표준편차

(2) 기기내력계수(F_C)

■ 강도계수(F_S), 비탄성에너지흡수계수(F_μ)

■ $F_C = F_S \cdot F_\mu$

(3) 기기응답계수(F_{RE})

■ $F_{RE} = F_{QM} \cdot F_{SS} \cdot F_D \cdot F_M \cdot F_{MC} \cdot F_{ECC}$

(4) 구조응답계수(F_{RS})

■ $F_{RS} = F_{SS} \cdot F_D \cdot F_M \cdot F_{MC} \cdot F_{ED} \cdot F_{ECC} \cdot F_{SSI} \cdot F_{GM} \cdot F_{IR}$

3.2 내진여유도 평가 방법론에 의한 내진성능평가

(1) 내진여유도 유도

내진여유도평가법에서 평가대상 설비의 내진성능은 고신뢰도저파손확률 가속도내력 (A_{HCLPF} , High Confidence of Low Probability of Failure)으로 표현되며 다음과 같은 공식으로 얻어진다.

$$A_{HCLPF} = F_S \times F_\mu \times RLE$$

여기서 A_{HCLPF} : 최대지반가속도 내력(g)

F_S : 내진강도계수

F_μ : 비탄성에너지흡수계수

RLE : 평가수준지진 (Review Level Earthquake)

(2) 평가지진(RLE)

평가지진은 84% 초과확률의 지반응답스펙트럼으로 정의되며, 본 연구에서는 0.3g NUREC/CR-0098 메디안 응답스펙트럼⁽²⁾을 사용하였다. 그림 3은 설계지진과 평가지진을 비교 도시한 것이다.

(3) 구조내력

해석의 결과로서 도출된 잠재 파손모드에 대한 구조내력의 평가를 위해서는, 재료 강도, 정적 내력, 그리고 비탄성에너지 흡수 능력에 대한 평가가 수행되어야 하며, 재료 강도와 정적 내력은 다음과 같이 정의된다.

■ 재료 강도

실제 강도가 내진여유도평가에서 사용된 강도보다 작을 가능성이 거의 없을 만큼 충분히 보수적으로 평가되어야 하며 시험 데이터가 주어질 경우, 대략 95% 초과확률의 재료강도가 사용되어야 한다. 시험 데이터가 없는 경우, 해당 규준에서 지정한 최소값을 사용할 수 있다.

■ 정적 내력

일반적으로 구조 부재는 해당 규준에서 제시한 공식에 의해 구해진 하중보다 낮은 하중에서 파손될 가능성은 거의 없으므로 구조부재의 정적 내력 평가는 규준에서 정한 극한내력 접근법에 근거하여야 한다.

■ 비탄성에너지 흡수계수

구조물을 비롯한 거의 모든 공학적 설비들은 파손 전에 어느 정도의 연성거동을 보이는 것이 일반적이다. 지진동의 총 에너지 함량은 제한적이고 지진동 고유의 진동 특성 때문에 구조물의 연성거동은 구조물의 파손에 대한 내진여유도를 확보하는 데 필수적으로 고려되어야 할 사항이다.

4. 평가내용

기기평가를 위해서는 먼저 기기의 파손모드(failure mode)를 결정해야 하는데 본 논문에서는 그동안의 평가 경험을 바탕으로 기기 정착단에서의 앵커볼트 파손(anchor bolt failure)과 콘크리트 콘 파손(concrete cone failure)을 지배파손모드로 가정하였다. 하중조합은 하중계수 1을 사용한 지진하중(seismic load)과 정상운전하중(normal operating load)을 사용하였으며, 정상운전하중은 기기의 자중(dead load)만을 고려하여 노즐하중(nozzle load)은 본 평가에서 제외하였다. 지진하중계산을 위한 모드조합은 CQC (Complete Quadratic Combination Method) 방법을, 세 방향 지진성분 조합은 Newmark 가 제안한 100-40-40 방법을 사용하였다.

4.1 지진취약도 평가

기기에 작용하는 지진하중을 얻기 위해서는 해당기기위치에서의 층응답스펙트럼(floor response spectrum)이 필요하며 이를 위해서 현행 표준원전 등에서 사용하고 있는 인공시간이력(artificial time history)을 사용하여 해당기기위치에서의 층응답스펙트럼을 작성하였다. 작성된 층응답을 입력운동으로 하여 평가대상기기에 대하여 내진해석을 수행함으로써 기기에 작용하는 소요 지진력을 계산하였다. 사용한 감쇠비는 현행 설계 지침에 따라 구조물의 경우 7%, 기기의 경우 3%를 사용하였으며, 내진해석결과 앵커볼트에 작용하는 하중은 표 1 에 수록하였다.

4.2 내진여유도 평가

내진여유도 평가에 있어서 내진성능평가를 위해 필요한 소요지진력은 평가지진(RLE)에 의한 구조물 및 기기의 응답을 재생산하는 것이 가장 정확한 해를 도출 할 수 있으나 많은 시간과 비용 등의 이유로 암반부지와 같은 지반 구조물 상호영향이 없는 경우 기존 설계 응답에 대한 확대계수법(Scaling Approach)의 사용을 허용하고 있다. 본 논문의 경우 최적의 소요지진력을 계산하기 위하여 구조물 및 기기연계모델을 별도로 구축한 후 평가지진을 입력운동으로 하는 내진해석을 수행하였다. 여기서 사용한 감쇠비는 미국 전력연구원(EPRI) 등에서 추천하고 있는 평가 감쇠비(철근 콘크리트 구조물의 경우 10%)를 사용하였으며, 기기에 의한 복합감쇠는 무시하였다. 해석결과 앵커볼트에 작용하는 소요하중은 표 1 에 수록하였다.

5. 평가결과

방법론별 상세계산과정은 별도로 작성하였으며 본 논문에서는 그 결과만을 수록하였다.(표 2)

5.1 소요지진력

표 1 에서 알 수 있듯이 소요지진력의 경우 내진여유도 평가결과가 취약도 값보다 다소 크게 나타나고 있는데 이는 설계 감쇠비를 사용한 설계지진보다 평가 감쇠비를 사용한 평가지진이 더 크기 때문으로 지진입력운동의 차이로 설명될 수 있다.

5.2 기기내력

기기내력은 강도계수와 비탄성에너지 흡수계수로 이루어지는데 비탄성에너지 흡수계수의 경우 두 방법론 모두 지배파손모드가 콘크리트 콘 파손인 취성 파괴로서 파손모드에 내재되어있는 연성 값은 존재하지 않는다. 결국 기기내력은 강도계수로 결정되며 이는 강도내력과 소요지진력의 비로 계산될 수 있다. 지진취약도의 경우 소요지진력은 상기에서 설명한 것과 같이 내진여유도에 비해 보다 작은 값이 사용된 반면, 강도내력은 보다 큰 값을 사용하게 되는데 이는 지진취약도에서 사용한 강도내력은 메디안(50% 중앙)값인데 반해, 내진여유도평가에서는 규준에서 정한 극한내력(95%)값을 사용하기 때문이다. 이런 이유로 지진취약도 값이 내진여유도에 비해 약 두 배 ($2.31/1.13 = 2.04$) 이상 큰 값을 갖게 되었다.

5.3 고신뢰도저파손확률 가속도내력(HCLPF)

지진취약도 평가에 있어서 고신뢰도저파손확률 가속도내력은 메디안 가속도내력에 대한 무작위성과 불확실성의 로그표준편차함수로서 신뢰도 95%인 5% 파손확률 값을 사용하고 있다. 이에 반해 내진여유도 평가에서는 신뢰도 84%인 16% 파손확률값을 고신뢰도저파손확률 가속도내력으로 사용하고 있다. 표 2에서 알 수 있듯이 동일 기기에 대한 HCLPF 평가 결과 내진여유도방법론이 지진취약도 방법보다 약 1.36배($0.34g/0.25g = 1.36$) 크게 나타나고 있으며, 이는 결국 두 방법론의 신뢰도의 차이에 의해 발생한다.

6. 결론

지금까지 각 방법론별 평가방법을 고찰하고 동일 기기에 대한 내진성능을 평가하기 위하여 고신뢰도저파손확률 가속도내력(HCLPF)을 비교 분석하였다. 여기서 한 가지 주지할 사실은 두 방법론에 존재하는 상관관계를 정확히 도출하기 위해서는 각 평가 방법론 별 지배인자 평가 시 보다 엄격한 평가가 필요하지만 지진취약도 평가 등에 있어 불확실성 및 무작위성요소들에 대한 평가는 자료의 한계 등으로 인하여 다소 포괄적인 값(generic value)을 사용하고 있는 것이 현실이다. 이런 이유로 상기 지배인자(1.36)에 대해 어느 정도의 불확실성이 존재 되었을 것으로 판단된

다. 그러나 이러한 연구를 통하여 향후 개별요소별 내진성능평가 시 각 방법론에 내재되어 있는 내진성능의 개념을 정확히 파악하고 그 상관관계를 정량적으로 도출하는데 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 가동원전 주기적 안전성평가 사업의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

1. "Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events(IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities" NUREG-1407, April 1991
2. N.M. Hall and W.J. Hall, "Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants", NUREG/CR-0098, May 1978.
3. J.W. Reed, R.P. Kennedy, et. al., "A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin" Revision 1, EPRI NP-6041, August 1991.
4. "Design Report for C.C.W Surge Tank," Yong Gwang Nuclear Power Plant 5&6, HANJUNG
5. J.W. Reed, R.P. Kennedy, et. al, "Methodology for Developing Seismic fragilities" EPRI TR-103959, June1994

표 1. 소요 하중(지진하중+정상운전하중) 비교

	지진취약도 평가	내진여유도 평가	비 고
Ft_{NOL}	1852 psi	1852 psi	정상운전하중에 의한 최대인장응력
Ft_{EQ}	34703 psi	37367 psi	지진하중에 의한 최대인장응력
Fv_{NOL}	0	0	정상운전하중에 의한 최대전단응력
Fv_{EQ}	3428 psi	4201 psi	지진하중에 의한 최대전단응력

표 2. 지진취약도 및 내진여유도 성능평가결과 비교

Methodology		SPRA			SMA
Strength Factor		F_s	β_R	β_U	F_s
Failure Mode	Shear Tension Interaction failure	3.54	-	-	2.05
	Concrete Cone Failure (govern)	2.31	0	0.34	1.13
Inelastic Energy Absorption Factor		1	0	0	1
F_{EC}		2.31	0	0.34	1.13

Equipment Response Factor	F_s	β_R	β_U	-
Qualification Method Factor	1	0	0	-
Spectral Shape Factor	1.25	0	0.01	-
Damping Factor	1.23	0	0.15	-
Modeling Factor	1.04	0	0.1	-
Modal Combination Factor	1	0.1	0	-
Earthquake Component Combination Factor	1	0.05	0	-
F_{RE}	1.59	0.11	0.18	-

Structural Response Factor	F_s	β_R	β_U	-
Spectral Shape Factor	1	0.19	0.06	-
Damping Factor	1.15	0.04	0.14	-
Modeling Factor	1	0	0.22	-
Modal Combination Factor	1	0.05	0	-
Earthquake Component Combination Factor	1	0.05	0	-
Horizontal Earthquake Direction Factor	1	0.15	0	-
Soil Structure Interaction Factor	1	0	0	-
Ground Motion Incoherence Factor	1.02	0.03	0.04	-
Structural Inelastic Response Factor	1	0	0	-
F_{RS}	1.18	0.26	0.27	-

PGA	0.2g (SSE)	0.3g (RLE)
HCLPF	0.25g	0.34g

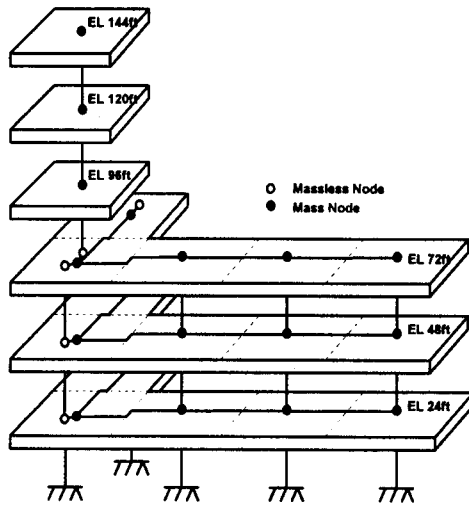


그림 1. 구조물 내진해석모델

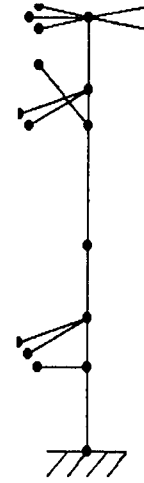


그림 2. 기기(CCW Surge Tank) 내진해석모델

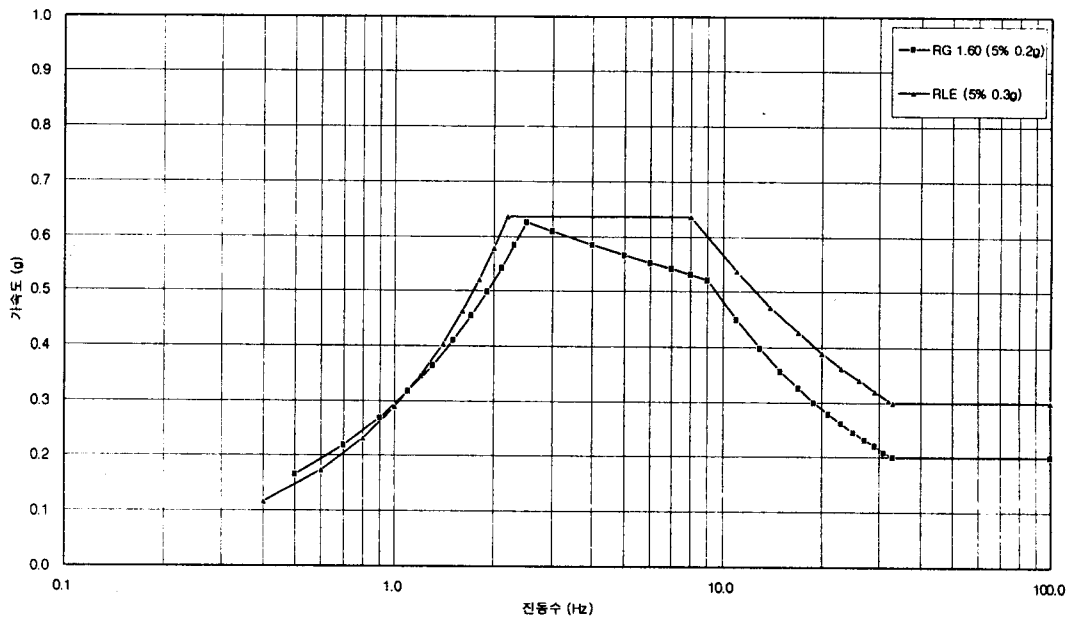


그림 3. 설계지진과 평가지진 (5%,수평방향)