재료비선형 특성을 고려한 PSC 격납건물의 확률론적 내진안전성 평가

Probabilistic Seismic Safety Assessment of PSC Containment Building Considering Nonlinear Material Properties

안성문* 최인길** 전영선***

Ahn, Seong Moon Choi, In Kil Chun, Young Sun

ABSTRACT

The seismic safety of the prestressed concrete containment building was evaluated by the seismic fragility analysis based on the nonlinear dynamic time-history analyses. Four kinds of earthquake ground motions were used for the seismic fragility analysis of the containment building to consider the potential earthquake hazard. The conventional seismic fragility analysis of the safety related structures in nuclear power plant have been performed by using the linear elastic analysis results for the seismic design. In this study, the displacement based seismic fragility analysis method was proposed.

1. 서 론

최근 들어 원전의 안전성에 대한 관심이 커짐에 따라 원전의 안전성을 확보하고 정량화하기 위한 방편의 하나로 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment) 방법을 이용하여 신규로 건설되는 원전 및 가동 중인 원전에 대하여 안전성을 평가하고 있으며 이를 통하여 체계적이고 신뢰성 있는 안전성의 확보 및 유지, 보수, 보강에 적극적으로 활용하고 있다. 또한 PSA의 결과를 활용한 위험도기반 규제 기술(Risk Informed Regulation) 및 성능기반 설계 기술(Performance Based Design) 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

한편 우리나라 원전 구조물의 내진설계에는 US NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 제시하고 있는 Regulatory Guide 1.60의 표준응답 스펙트럼이 사용되고 있다. 그러나 원전 부지의 지진학 및 지질학적 특성, 주변 환경 등을 충분히 고려하지 않은 상황에서 설계지진만으로 원전 구조물의 지진 안전성을 확보하기는 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 비선형 지진해석 결과를 이용한 지진취약도 평가방법을 개발하고 원전

* 비회원 · 한국원자력연구소
** 정회원 · 한국원자력연구소, 책임연구원
*** 정회원 · 한국원자력연구소, 책임기술원

구조물의 지진에 대한 안전성을 평가하기 위하여 근거리지진, 원거리지진, 설계지진, 확률론적 시나리오지진에 대한 PSC(Prestress Concrete) 격납건물의 지진취약도 분석을 수행하였다.

2. PSC 격납건물의 모델링

2.1 해석모델

PSC 격납건물의 비선형 시간이력해석을 수행하기 위한 일련의 과정으로 고유치해석을 수행하기 위한 3차원 유한요소 모델과 시간이력해석을 위한 집중질량 모델을 작성하였다. 3차원 유한요소 모델은 돔, 벽체, 기초슬래브, 내·외부 철근, 텐던, 라이너의 여섯 부분으로 크게 구분하여 작성하였다. 돔, 벽체, 기초슬래브는 8절점 Solid 요소로 모델링하였으며, 내·외부 철근은 Rebar 요소로 라이너는 Membrane 요소로 텐던은 Embeded Truss 요소로 모델링하였다.

지진에 대한 비선형 시간이력해석을 함에 있어 3차원 유한요소 모델을 이용할 경우 많은 시간과 컴퓨터의 용량을 필요로 한다. 이는 비경제적이 될 경우가 많다. 이러한 이유로 보다 효율적인 지진해석을 수행하기 위해 PSC 격납건물에 대응하는 절점질량, 단면적, 유효전단면적, 단면 2차 모멘트, 절점간의 등가부재 등을 구하여 집중질량 모델을 작성하였다.

2.2 고유치 해석

격납건물의 비선형 지진해석에 활용하기 위한 집중질량 모델의 타당성을 검증하기 위하여 3차원 유한요소 모델과 집중질량 모델에 대한 고유치 해석을 각각 수행하여 그 결과를 비교하였다. 이때 3차원 유한요소 모델의 고유치 해석에는 상용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였고 집중질량 모델에 대한 고유치 해석에는 TDAPⅢ를 이용하였다. 해석결과 3차원 유한요소 모델과 집중질량 모델 각각에 대한 1차 고유진동수는 4.481Hz와 4.563Hz로 나타났으며 모드 형상 또한 아주 유사하게 나타났다. 두 모델의 고차 모드에서의 고유진동수와 모드형상에 대한 결과도 비슷한 양상을 보인다. 그림 1에는 두 모델의 첫 번째 고유진동수와 모드형상을 보여주고 있다.

이와 같은 결과들은 PSC 격납건물의 비선형 시간이력해석에 있어 3차원 유한요소 모델을 대신하여 집중질량 모델을 사용할 수 있는 충분한 타당성을 보여준다.

3. 비선형 지진응답 해석

3.1 비선형 모델

격납건물과 같은 전단벽 구조물의 일반적인 변형은 전단, 휨, 회전 성분들의 조합으로 나타낼 수 있다. 이들에 대한 기여도는 벽체의 두께, 높이 등의 여러 조건에 따라 조금씩 달라지지만 대개의 경우 전단 성분의 기여도가 매우 크게 나타난다. 본 연구에서는 PSC 격납건물의 집중질량 모델에 적용할 재료의 비선형 특성으로 전단 성분과 휨 성분을 고려하였으며, JEAG에서 제시한 방법을 이용하여 각각의 성분에 대한 Tri-Linear 골격곡선을 작성하였다. 이때 전단벽 구조물이 아닌 돔 부분은 선형 탄성으로 고려하였다. 한편, 비선형 재료에 대하여 재하(Loading)와 제하(Unloading)의 과정을 반복하여 작성한 이력 모델로는 최대점지향 모델과 Degrading 모델을 전단 성분과 휨 성분 각각에 사용하였다.

3.2 격납건물의 지진응답

현재 국내 원전 격납건물의 설계에는 탄성 응답스펙트럼법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 PSC 격납건물을 대상으로 입력지진동의 특성에 따른 비탄성 거동특성을 평가하기 위하여 TDAP Ⅲ를 이용하여 비선형 비탄성 시간이력해석을 수행하였다. TDAPⅢ를 이용한 시간이력해석은 각각의 입력지진동 PGA를 0.2g에서 4.0g까지 0.2g의 간격으로 증가시키면서 수행하였다. 이때 입력지진동에 대한 응답을 얻기 위한 수치해석은 단계적 적분법 중에서도 전 적분 구간에서 안정성을 만족시키는 Newmark β법(평균 가속도법)을 사용하였다.

그림 2는 PGA에 따른 최대 응답의 평균값을 입력지진동 특성에 따라 보여주는 것으로 격납건물이 비선형 거동을 하면서 밑면전단력의 증가율은 작아지지만 상부변위와 하부의 층간변위 증가율은 커짐을 알 수 있다. 이는 탄성한계 내에서는 충분한 내진여유도를 가지는 구조물일지라도 비선형 거동을 고려하면 변위에 기반을 둔 내진여유도의 재평가가 필요함을 의미한다. 한편 근거리 지진의 경우 일반적인 특성인 장주기의 속도 펄스 성분으로 인해 큰 변위 발생이 예상되었으나 그림에서 보는 바와 같이 격납건물이 입력지진동의 탁월 진동수를 벗어나 고진동수 특성을 가질 경우 격납건물의 변위응답에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

4. 취약도 계산

4.1 취약도 계산 방법

격납건물에 대한 지진취약도 분석은 내진성능을 평가하고 이를 이용하여 취약도 곡선을 작성하는 것으로 확률론적 특성을 가지고 있으며 지진동 파라메타의 크기에 따른 파괴확률로 나타내게 된다. 어떤 비초과확률수준 Q 에서의 격납건물의 파괴확률 P_f는 아래의 식을 이용하여 산정 할 수 있다.

$$P_f(a) = \phi\left[\frac{\ln(S_m(a)/C_m + \beta_U \cdot \phi^{-1}(Q)}{\beta_R}\right] \tag{1}$$

여기서,

$\phi(\cdot)$; 정규변수의 누적분포함수

$\phi^{-1}(\cdot)$; 정규 누적분포함수의 역변환

a ; 입력지진동의 Peak Ground Acceleration

$S_m(a)$; PGA에 따른 메디안 응답 값

C_m ; 메디안 성능 값

β_R ; 랜덤성에 대한 대수표준편차

β_U ; 불확실성에 대한 대수표준편차

또한 주어진 가속도 크기 a에 대하여 각각의 메디안 응답 S_m과 대수표준편차 β_a는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$S_{an} = \frac{\mu_a}{\sqrt{1+\delta_a^2}} \tag{2}$$

$$\beta_a^2 = \ln(1+\delta_a^2) \tag{3}$$

여기서, μ_a와 δ_a는 각각 PGA에서의 응답 값의 평균 및 각 PGA에서의 변동계수(COV)를 나타낸다. 일반적으로 분산이나 표준편차만으로 그 분포정도가 크다 작다 말하기는 어렵다. 이러한 이유로 중앙값에서의 상대적인 분포정도를 나타내는 변동계수(Coefficient of Variation : COV)가 유용한 값으로 사용된다. 변동계수는 아래의 식으로 구해지며 무차원양으로 정의된다.

$$\delta_a = \frac{\sigma_a}{\mu_a} \tag{4}$$

여기서, σ_a는 각 PGA에서의 응답 값들의 표준편차를 나타낸다.

4.2 파괴기준

취약도 해석에 있어서 파괴모드 및 기준을 선정하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 격납건물의 지진하중에 대한 주요 파괴모드는 벽체와 바닥 연결부에서의 접선전단 파괴(Tangential Shear Failure) 및 벽체에서의 휨 파괴이며 가장 지배적인 파괴모드는 바닥-벽체 연결부에서의 전단파괴로서 정의되어왔다. 이와 같은 파괴모드 산정은 주로 탄성해석에 기반을 둔 방법으로 격납건물의 비선형거동 특성은 단지 비탄성 에너지 흡수계수를 사용함으로서 고려되었다. 비탄성 에너지 흡수계수란 비탄성영역에서의 에너지 흡수를 연성도 계수(Ductility Factor)를 사용하여 편리하게 취급하는 것으로 일반적으로 구조물이 비탄성영역으로 약간 진입하는 경우, 특히 비탄성을 탄소성으로 이상화한 경우 설계응답스펙트럼을 간단히 연성도 계수와 관련된 계수를 이용하여 감소시키는 것을 말한다. 본 논문에서는 기존의 방법을 개선하여 격납건물의 비선형 특성을 보다 정확히 고려하기 위하여 Push-over 해석을 수행하였다. 이때 하중은 질량에 비례하는 측방향 하중을 가하였다. 그 결과 최대 층간변위는 바닥에 근접할수록 크다는 사실을 알 수 있었으며 이는 층간변위 산정에 있어 바닥부에 가장 근접한 높이를 기준으로 함이 타당함을 보여준다. 따라서 본 논문에서는 극한과 항복에 대한 최대 층간변위를 산정함에 있어 집중질량 모델의 바닥에서부터 첫 번째 점인 높이 5.18m에서의 값을 정하였다.

각각의 매개변수인 밑면전단력, 상부변위, 층간변위에 대한 항복과 극한 성능을 결정하기 위하여 앞에서 설명한 집중질량 모델의 전단성분 골격곡선과 Push-over 해석 결과를 이용하였다. 먼저 항복에 대한 성능은 전단성분 골격곡선의 첫 번째 변환점에서의 전단응력을 구하고 이를 이용하여 밑면전단력을 산정한 후 Push-over 해석결과를 이용하여 상부와 층간변위를 구한다. 극한성능은 전단성분 골격곡선에서 변형률이 0.005 일 때의 전단응력을 구하여 밑면전단력을 산정한 후 항복 성능을 구할 때와 같은 방법으로 상부와 층간변위를 구한다. 이렇게 구한 PSC 격납건물의 항복과 극한에 대한 성능이 표 1에 나타나있다.

4.3 지진취약도 평가

4.3.1 중앙값 응답의 산정

식 (2)를 이용하여 PGA별 메디안 응답을 결정하기 위하여 밑면전단력, 상부변위, 층간변위에 대한 회귀분석을 수행하여 각각의 회귀곡선을 일차와 이차함수의 형태로 표현하였다.

4.3.2 대수표준편차 산정

밑면전단력, 상부변위, 층간변위의 랜덤성과 불확실성에 대한 대수표준편차를 표 2에 보여주고 있다. 이때 밑면전단력 성능의 불확실성에 대한 대수표준편차 값은 2001년 영광 5,6호기에 대해 수행된 PSA에 제시된 값 0.211을 사용하였으며, 상부변위와 층간변위 성능의 불확실성에 대한 대수표준편차 값은 Ozaki 등에 의해 제시된 값 0.32를 사용하였다. 또한 밑면전단력, 상부변위, 층간변위 각각에 대한 랜덤성에 대한 대수표준편차는 변동계수를 이용하는 식 (3)을 이용하여 구하였다. 표에 보여주고 있는 랜덤성에 대한 대수표준편차는 각 입력지진동별 PGA에 대한 평균값을 나타내고 있다.

4.3.3 취약도 곡선

본 절에서는 앞서 구한 메디안 응답과 대수표준편차, 그리고 식 (1)을 이용하여 PSC 격납건물의 지진취약도 곡선을 작성하였다. 작성된 취약도 곡선을 보면 설계지진에 의한 격납건물의 파괴확률이 PGA가 증가함에 따라 급격하게 증가하는 것으로 나타나 우리나라 원전 격납건물의 경우 비교적 보수적으로 설계되어 있음을 알 수 있다. 한편 지진취약도 곡선상의 수평축에 해당하는 지반운동 변수는 지진재해도 분석에서와 동일한 변수를 사용하며 일련의 취약도 곡선 중 평균을 나타내는 평균 취약도 곡선이 SPRA에 사용된다. 따라서 그림 3과 4에서는 파괴기준과 입력지진동에 따른 격납건물의 극한성능에 대한 평균 취약도 곡선을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 설계지진에 의한 파괴확률이 가장 크게 나타났으며 작은 지진에서는 근거리지진 보다는 원거리지진에 의한 파괴확률이 크게 나타났으나 지진동 강도가 커짐에 따라 근거리지진에 의한 파괴확률이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 또한 파괴기준에 따른 파괴확률은 구조물 상부 응답을 기준으로 한 경우가 가장 크게 나타났으며 하부 전단력 및 하부 변위에 의한 결과는 유사한 것으로 나타났다. 그러나 하부 전단력을 기준으로 평가한 경우 지진동 강도가 작은 경우 파괴확률을 보수적으로 평가하는 것으로 나타났으며 지진동 강도가 커짐에 따라 격납건물의 비선형 거동으로 인한 변위응답이 급격히 증가함에 따른 영향을 반영하지 못하고 있음을 알 수 있다. SPRA에서 구조물 및 기기의 실질적인 지진성능은 취약도 곡선 외에 HCLPF(High Confidence of Low Probability of Failure) 성능에 의해서 표현될 수 있다. SPRA에서의 HCLPF 성능은 95% 신뢰도 취약도 곡선에서 5%의 파괴확률로 정의되며 일반적으로 원자력발전소에서의 구조물 및 기기의 내진성능을 표현하는 지수로 사용된다. 표 3은 각각의 매개변수의 항복과 극한성능에 대한 입력지진동별 HCLPF 및 메디안 성능값을 보여주고 있다. 표에서 확률론적 시나리오지진의 경우 메디안 성능이 해석범위보다 크게 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서는 비선형 지진해석에 의한 구조물의 지진취약도 분석 기법을 제시하고 원전부지에서 발생 가능한 시나리오지진으로 근거리지진, 원거리지진, 설계지진, 확률론적 시나리오지진을 선정하여 PSC 격납건물에 대한 지진취약도 분석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 과거 격납건물에 대한 확률론적 지진 안전성 평가를 위한 지진취약도 분석은 응력에 기반을 두고 수행되었지만 격납건물의 비선형 지진해석결과 강지진동 하에서 비선형 거동을 하면 변위 응답이 급격히 증가함을 알 수 있다.
- 지진취약도 분석결과 밑면전단력에 대한 파괴확률이 가장 작게 나타났으며 상부 변위에 대한 파괴확률이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 강지진동 하에서 급격히 증가하는 변위에 기인하는 것으로 격납건물의 비선형 동적 거동을 고려한 내진여유도의 평가에서는 변위에 기반한 지진취약도 분석이 필수적이라 하겠다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Korea Power Engineering Company, Inc. and Sargent & Lundy, Design Report : Containment Shell and Dome, Report No. 9-310-C409-003, Rev. 0, July 16, 1990.
2. Y. J. Park, C. H. Hofmayer, Technical Guidelines for Aseismic Design of Nuclear Power Plants, Translation of JEAG 4601-1987, NUREG/CR-6241, 1994.
3. Japan Electric Association, Technical Guideliness for a Seismic Design of Nuclear Power Plants, JEAG 4601-1991 Supplement, 1991.
4. Ang ZH-s, W. H. Tang, Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Basic Principles, Vol. 1, Wiley, New York, 1975.
5. Nam-Ho Lee, Ki-Bum Song, Seismic Capacity Evaluation of the Prestressed/Reinforced Concrete Containment, Young-gwang Nuclear Power Plant Unit 5 & 6, Nuclear Engineering and Design, 192, pp.189-203, 1999.
6. M. Ozaki, A. Okazaki, K. Tomomoto, T. Iba, R. Satoh, H. Nanba, H. Seya, K. Moriyama, and T. Ugata, Improved Response Factor Methods for Seismic Fragility of Reactor Building, Nuclear Engineering and Design, 185, 1998.

표 1. 파괴기준 설정

	Base Shear(tonf)	Top Displ.(cm)	Story Drift(cm)	Remarks
Crack	35.514	2.13	0.179	Story Height 518.16cm
Failure	85.874	14.39	2.64	

표 2. 불확실성 및 랜덤성에 대한 대수표준편차

		Near-Fault	Far-Fault	NRC	PBSE
Base Shear	Randomness	0.122	0.181	0.049	0.100
	Uncertainty	0.211	0.211	0.211	0.211
Top Displ.	Randomness	0.276	0.332	0.109	0.100
	Uncertainty	0.32	0.32	0.32	0.32
Story Drift	Randomness	0.226	0.329	0.099	0.100
	Uncertainty	0.32	0.32	0.32	0.32

표 3. 입력지진동별 HCLPF와 메디안 성능값

		Crack		Failure	
		HCLPF(g)	Median(g)	HCLPF(g)	Median(g)
Shear	Near	0.521	0.943	1.521	3.060
	Far	0.410	0.925	1.382	3.415
	NRC	0.466	0.765	1.423	2.681
	PBSE	0.571	0.953	2.547	-
Top Disp.	Near	0.274	0.730	1.551	2.716
	Far	0.203	0.567	1.430	2.709
	NRC	0.259	0.528	1.391	2.190
	PBSE	0.463	0.925	2.869	-
Bottom Disp.	Near	0.357	0.825	1.860	3.164
	Far	0.258	0.700	1.838	3.488
	NRC	0.345	0.655	1.648	2.647
	PBSE	0.478	0.955	3.690	-

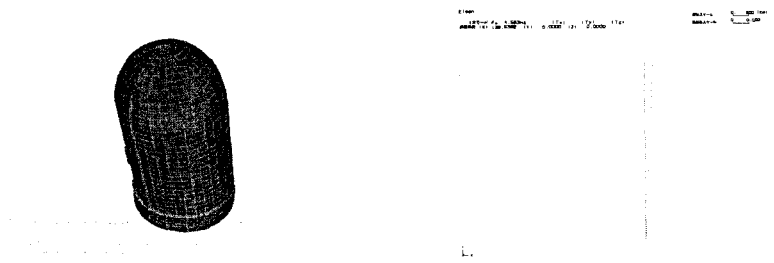
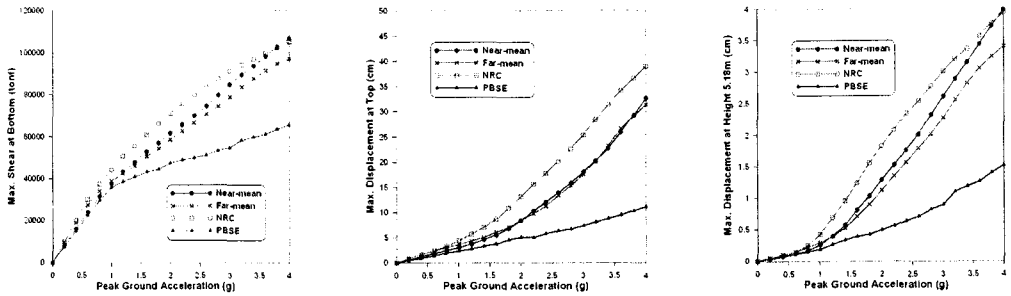


그림 1. 첫 번째 모드의 모드형상 및 고유진동수 (3D : 4.481Hz , Stick : 4.563Hz)



(a) 밑면전단력 (b) 상부변위 (c) 층간변위

그림 2. PGA에 따른 입력지진동별 최대 응답의 평균

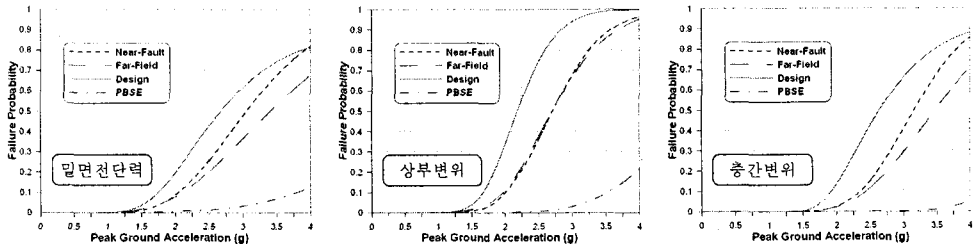


그림 3. 파괴기준에 따른 평균취약도 곡선의 비교

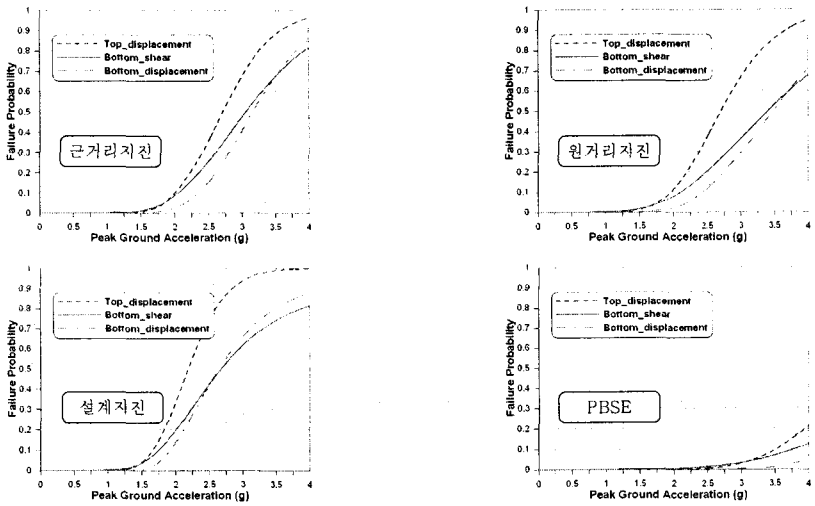


그림 4. 입력지진동에 따른 평균취약도 곡선의 비교