

# 비선형 지진해석에 의한 PSC 격납건물의 지진취약도 분석

## Seismic Fragility Analysis of PSC Containment Building by Nonlinear Analysis

최인길\*  
Choi, In-Kil

안성문\*\*  
Ahn, Seong-Moon

전영선\*\*\*  
Choun, Young-Sun

### 국문요약

원전 구조물 및 주요기기의 지진 안전성 평가에서는 내진성능을 정량화하는 방법으로 취약도 분석이 사용되고 있다. 지진취약도 분석은 격납건물의 설계 시 반영된 보수성을 배제한 실질적인 내진성능을 평가하는 것으로 이러한 보수성을 성능 및 응답에 관련된 확률론적 변수로 고려하여 평가하게 된다. 본 연구에서는 비선형 지진 해석으로부터 얻은 구조물의 변위응답을 기초로 한 지진취약도 분석 방법을 제시하였다. 또한 원전부지에서 선정된 발생가능한 근거리지진, 원거리지진, 설계지진 및 확률론적 시나리오지진을 시나리오지진으로 선정하고 이들 지진동에 대한 비선형 지진해석을 통하여 한국 표준형 원전 격납건물의 지진취약도를 평가하였다.

주요어 : 지진취약도, PSC 격납건물, 비선형 지진해석

### ABSTRACT

The seismic fragility analysis method has been used as a quantitative seismic safety evaluation method for the NPP(Nuclear Power Plant) structures and equipments. The seismic fragility analysis gives a realistic seismic capacity excluding the conservatism included in the design stage. The conservatism is considered as the probabilistic parameters related to the response and capacity in the seismic fragility analysis. In this study, the displacement based seismic fragility analysis method was proposed based on the nonlinear dynamic analysis results. In this study, the seismic safety of the prestressed concrete containment building of KSNP(Korean Standard Nuclear Power Plant) was evaluated for the scenario earthquakes, near-fault, far-fault, design earthquake and probability based scenario earthquake, which can be occurred in the NPP sites.

Key words : seismic fragility, containment building, nonlinear seismic analysis

## 1. 서론

최근 들어 원전의 안전성에 대한 관심이 커짐에 따라 원전의 안전성을 확보하고 정량화하기 위한 방법의 하나로 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment : PSA) 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 1.60<sup>(1)</sup>의 표준응답 스펙트럼이 사용되고 있다. 그러나 원전 부지의 지진학 및 지질학적 특성, 주변 환경 등을 충분히 고려하지 않은 상황에서 설계지진만 으로 원전 구조물의 지진 안전성을 확보하기는 어렵다.

최근 대규모 지진에서는 지진을 발생시킨 활성단층과 인접해 있던 지역에서 많은 인명 및 재산상의 피해가 발생하였다. 이들 지역에서는 내진설계기준에 따라 설계된 구조물조차 큰 피해를 입은 것으로 나타났다. 이는 근거리지진이

가지는 지진파의 특성에 기인하는 것으로 과거 설계기준에서 제시하고 있는 입력지반 운동이나 원거리지진과는 다른 특성을 가지고 있기 때문이다. 우리나라의 경우 원전 주변 단층에 대한 활성 논란이 끊이지 않고 있으며 이들 단층에 대한 조사가 진행 중에 있다. 만약 이들 단층이 활성단층으로 판명될 경우 주변에 위치한 원전의 내진안전성 재평가가 반드시 필요하게 된다.

또한 최근에는 확률론적 지진재해도 해석 결과에 근거한 입력지진의 설정이 권장되고 있다. 우리나라 원전 부지에 대한 확률론적 지진재해도 해석이 대부분 완료되어 있어 이를 이용한 설계 및 평가용 지진의 설정이 가능하게 되었다. 따라서 우리나라의 지진학 및 지질학적 특성을 고려한 확률론적 시나리오지진에 대한 내진안전성의 재평가가 필요하게 된다.

본 논문에서는 비선형 지진해석 결과를 이용한 지진취약도 평가방법을 개발하고 원전 구조물의 지진에 대한 안전성을 평가하기 위하여 근거리지진, 원거리지진, 설계지진, 확률론적 시나리오지진에 대한 PSC(Prestress Concrete) 격납건물의 지진취약도 분석을 수행하였다.

## 2. 입력 지진동

원전 부지에서 발생 가능한 지진을 시나리오지진으로 설정하고 각각의 시나리오지진에 대한 입력지진동을 선정하였다. 근거리에 위치한 단층의 활동으로 인해 발생할 수 있는 근거리지진과 일반적인 원거리지진, 원전의 설계에 사용

\* 정회원, 한국원자력연구소 책임연구원

\*\* 비회원, 한국원자력연구소 학연과정

\*\*\* 정회원, 한국원자력연구소 책임기술원

본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2006. 1. 5 / 심사종료일 : 2006. 2. 2)

된 설계지진 그리고 확률론적 지진재해도에 근거한 확률론적 시나리오지진을 원전 부지에서 발생할 수 있는 가상적인 시나리오지진으로 선정하고 각각의 시나리오지진에 해당하는 입력지진을 선정 또는 작성하였다.

## 2.1 근거리지진

근거리지진(Near-Fault)의 특성은 지진과 초기에 나타나는 장주기를 갖는 펄스형태의 매우 큰 속도 성분과 이에 따른 지반의 영구변위로 대변할 수 있다. 이러한 펄스형태의 운동은 큰 에너지를 가지고 있어 구조물에 큰 피해를 발생시킬 수 있으며 특히 펄스의 주기와 근접한 고유주기를 갖는 구조물의 경우 응답이 급격하게 증가하게 된다. 이와 같은 근거리지진의 특성에 영향을 미치는 인자들은 방향성(Directivity), 지반운동 성분, Fling-Step의 영향, 상반(Hanging Wall)의 영향 등이 있다.<sup>(2)</sup>

본 논문에서는 이러한 특성을 잘 반영하며 부지 주변의 활성단층에 의해 발생 가능한 예측된 실제 근거리지진 기록 10개를 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center) 강진기록 데이터베이스로부터 선정하였다.

## 2.2 원거리지진

근거리지진과 다른 특성을 가진 입력지진동으로 격납건물의 응답을 평가하기 위하여 일반적인 지진, 즉 원거리지진 기록 10개를 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) 강진기록 데이터베이스로부터 선정하였다. 선정된 지진기록들은 단층면에서 100km이상 떨어진 위치에서 측정된 기록들로 일반적인 지진동으로 대표할 수 있는 지진입력을 선정하였다.

## 2.3 설계지진

국내의 원전 설계에는 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서 제시하고 있는 부지에 무관한 표준응답 스펙트럼을 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 US NRC Regulatory Guide 1.60의 표준응답 스펙트럼을 포괄하는 인공지진가속도 시간이력을 CARES<sup>(3)</sup>를 이용하여 작성하고 이를 통해 얻어진 많은 시간이력 자료 중 설계스펙트럼 포괄조건을 만족하는 유효한 기록 20개를 선정하여 입력으로 활용하였다.

## 2.4 확률론적 시나리오지진

최근 미국 서부 및 동부 지역에 대한 지진재해도 평가와 이에 근거한 스펙트럼의 개발을 통해 표준응답 스펙트럼의 사용에 문제가 있음이 드러났다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 미국에서는 지진에 대한 확률론적 안전성평가 방법(Seismic Probabilistic Risk Assessment; SPRA)을 구성하는 평가항목의 하나인 확률론적 지진재해도 해석

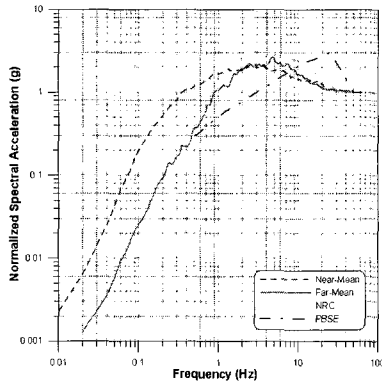
(Probabilistic Seismic Hazard Analysis; PSHA)을 확장하여 장래 부지에 영향을 미칠 가능성이 있는 지진의 제원(규모, 거리) 및 지진동을 평가하는 방법을 제안하였다<sup>(4)</sup>. 이 방법에서는 확률론적 지진위험도 곡선 상에서의 년 초과확률에 대응하는 지진동 크기 이상의 지진동을 발생시키는 지진의 집합으로부터 발생확률이 지배적인 지진의 제원을 설정한다. 여기서 설정된 지진을 확률론적 시나리오지진(Probability Based Scenario Earthquakes : PBSE)이라고 부른다.

본 연구에서는 우리나라의 지진학 및 지질학적 특성을 고려하여 원전부지에서 발생 가능한 지진으로 확률론적 지진재해도 분석 결과를 재분해하여 산정한 시나리오지진에 대한 인공가속도 시간이력을 입력으로 활용하였다.

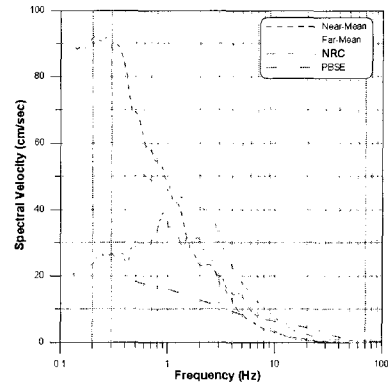
## 2.5 응답스펙트럼을 통한 입력지진동의 분석

그림 1(a)에서 선정된 시나리오 지진을 PGA(Peak Ground Acceleration)로 정규화된 가속도 응답스펙트럼을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 설계지진(NRC) 및 확률론적 시나리오지진(PBSE)은 목표 응답스펙트럼을 나타내며 근거리지진 및 원거리지진은 각각의 지진동의 평균값을 나타낸다. 그림에서 보면 약 1Hz이하의 저진동수 영역에서는 근거리지진에 대한 가속도응답이 가장 크게 나타나며, 10Hz이상의 고진동수 영역에서는 확률론적 시나리오지진에 대한 가속도 응답이 가장 크게 나타내고 있다.

그림 1(b)는 각각의 입력 지진동에 대한 PGA를 0.2g로 정규화한 속도 응답스펙트럼을 나타내고 있다. 한 가지 주목할 것은 근거리지진의 최대 속도응답 값이 저진동수 쪽으로 이동되는 것이다. 이는 근거리지진의 경우 가속도에 민감한 진동수 영역이 넓다는 것을 의미한다.<sup>(5)</sup> 따라서 구조물은 속도 응답스펙트럼 상에서 가속도 민감 영역이 어느 진동수까지 속하느냐에 따라 구조물의 강성 거동과 연성 거동 여부를 추정할 수 있다. 근거리지진의 높은 PGV/PGA 값은 가속도 민감 영역을 저진동수 쪽으로 이동시키는 원인이 되며 보다 많은 구조물들을 스펙트럼 상에서 가속도 민감 영역에 속하게 한다. 일례로 진동수가 약 1Hz인 구조물은 원거리지진 하에서는 속도에 민감한 영역에 속하여 연성거동을 하는 것으로 판단할 수 있지만 근거리지진 하에서는 원거리지진과는 달리 강성 거동을 보일 것이다.<sup>(6),(7)</sup> 따라서 구조물이 원거리지진과 같은 입력 지진동에 대하여 연성 거동을 하도록 강성을 줄여 설계한 구조물이 근거리지진과 같이 큰 PGV/PGA 값을 갖는 입력 지진동에 영향을 받는다면 연성 거동을 유도하기 위한 설계 조건과는 달리 구조물은 강성 거동 특성을 나타내어 단면 또는 강성의 부족으로 예상외의 피해를 받을 수 있을 것이다.



(a) 가속도 응답스펙트럼



(b) 속도 응답스펙트럼

그림 1 입력지진동의 응답스펙트럼 비교

### 3. PSC 격납건물의 모델링

#### 3.1 격납건물의 특성

한국표준원전의 PSC 격납건물은 프리스트레스트 콘크리트로 구성된 반구형의 돔(Dome)과 원형 벽체(Perimeter Wall)를 가지는 셸 구조로서 원형의 철근콘크리트 기초슬래브(Basement)에 의해 지지되어 있다. 격납건물의 내측면은 누설방지를 위해 강재 라이너 플레이트로 피복되었으며 격납건물의 원형 벽체는 수평텐던과 역 U형의 수직텐던으로 포스트텐션 방식에 의해 프리스트레싱 되어 있다. 격납건물에는 세 개의 부벽이 등간격으로 설치되며, 수평텐던은 중간 부벽을 통과하는 외벽의 240° 원호길이를 한 단위로 하여 부벽에 정착되었다. 돔은 직교하는 두 그룹의 역 U형 수직텐던과 스프링라인에서 45° 까지 설치되는 수평텐던으로 프리스트레싱 되어 있다. 역 U형 수직텐던은 외벽을 수직으로 가로질러 설치되며 그 양단이 기초슬래브의 저면 즉, 텐던갤러리 천정에 정착되어 있다. 표 1에는 격납건물의 주요 제원을 나타내고 있다.<sup>(8)</sup>

표 1 격납건물의 주요 제원

기초슬래브 두께	365.76 cm
기초슬래브 직경	4876.80 cm
격납건물의 내부직경	4389.12 cm
격납건물의 벽체두께	121.92 cm
격납건물의 내부높이	6675.12 cm
돔 두께	106.68 cm

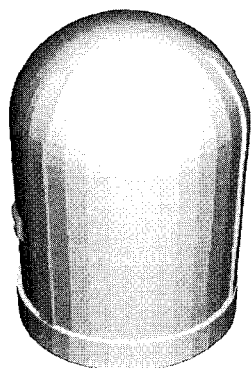
로 프리스트레싱 되어 있다. 역 U형 수직텐던은 외벽을 수직으로 가로질러 설치되며 그 양단이 기초슬래브의 저면 즉, 텐던갤러리 천정에 정착되어 있다. 표 1에는 격납건물의 주요 제원을 나타내고 있다.<sup>(8)</sup>

#### 3.2 해석모델

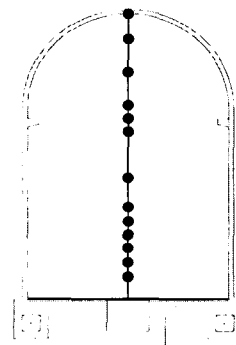
PSC 격납건물의 비선형 시간이력해석을 수행하기 위한 일련의 과정으로 그림 2와 같이 고유치해석을 수행하기 위한 3차원 유한요소 모델과 시간이력해석을 위한 집중질량 모델을 작성하였다.

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 Embedded 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.



(a) 3차원 유한요소 모델



(b) 집중질량 모델

그림 2 PSC 격납건물의 해석모델



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

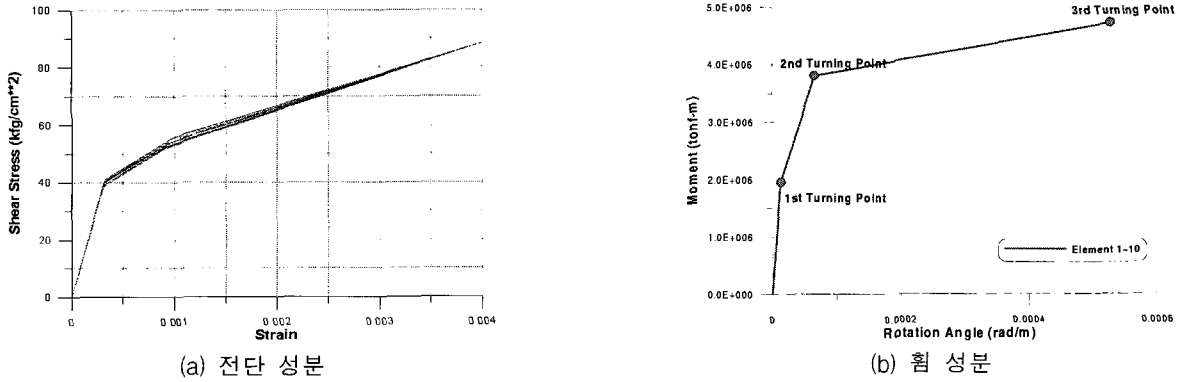


그림 4 집중질량 모델의 Tri-linear 골격곡선

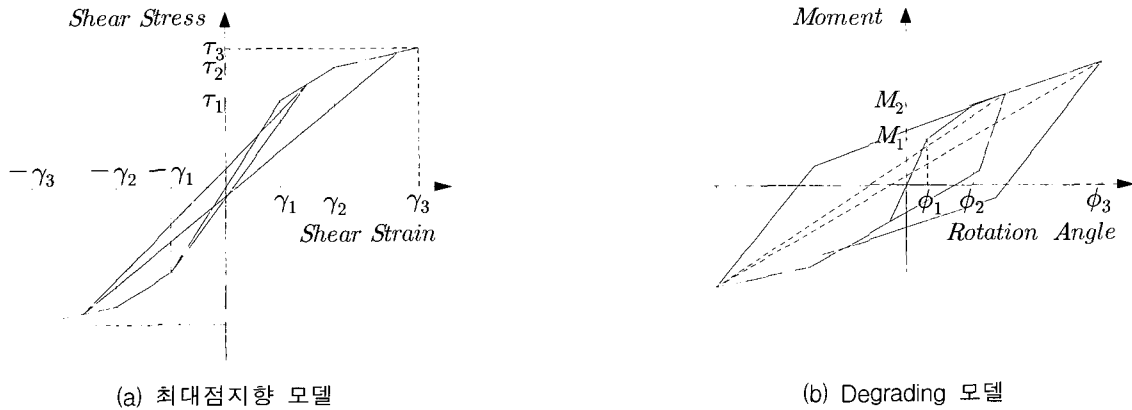


그림 5 집중질량 모델의 이력 모델

### 3.3 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 ABAQUS v.6.4<sup>(9)</sup>를 이용하였고 집중질량 모델에 대한 고유치 해석에는 TDAPIII<sup>(10)</sup>를 이용하였다. 해석결과 3차원 유한요소 모델과 집중질량 모델 각각에 대한 1차 고유진동수는 4.481Hz와 4.563Hz로 나타났으며 두 번째 모드는 12.65Hz 및 12.17Hz로 각각 나타났다. 세 번째 모드의 경우 13.50Hz 및 13.11Hz로 매우 유사하게 나타났으며 모드 형상 또한 아주 유사하게 나타났다. 두 모델의 고차 모드에서의 고유진동수와 모

드형상에 대한 결과도 비슷한 양상을 보인다. 그림 3에는 두 모델의 첫 번째 고유진동수와 모드형상을 보여주고 있다. 또한 첫 번째 모드에서의 모드기여도가 72% 정도로 나타났으며 세 번째 모드까지 약 85% 이상으로 나타났다.

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

## 4. 비선형 지진응답 해석

### 4.1 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, JEAG<sup>(11)(12)</sup>에서 제시한 방법을 이용하여 각각의 성분에 대한 Tri-linear 골격곡선을 작성하였다. 이때 전단벽 구조물이 아닌 돔 부분은 선형 탄성으로 고려하였다. 그림 4는 집중질량 모델의 전단 성분과 휨 성분에 대한 Tri-linear 골격곡선을 보여주고 있다.

한편, 비선형 재료에 대하여 재하(Loading)와 제하(Unloading)의 과정을 반복하여 작성한 이력 모델로는 그림 5와 같은 최대점지향 모델과 Degrading 모델을 전단 성분과 휨 성분 각각에 사용하였다.

#### 4.2 격납건물의 지진응답

현재 국내 원전 격납건물의 설계에는 탄성 응답스펙트럼 법이 사용되고 있다. 하지만 강지진동에 대한 내진설계 시 탄성설계보다는 구조물의 비탄성 변형을 통하여 입력에너지를 소산시키는 비탄성 설계가 유리하며 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 비선형 시간이력해석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 PSC 격납건물을 대상으로 입력지진동의 특성에 따른 비탄성 거동특성을 평가하기 위하여 TDAPⅢ를 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 사용하였고, 구조물에 대한 감쇠는 아래의 식을 이용한 등가행렬을 작성하여 사용하였다.<sup>(10)</sup>

$$[C] = [C_1] + [C_2] + [C_3] + \alpha[M_s] + \beta[K_s] \quad (1)$$

여기서,

$[C]$  : 감쇠행렬

$[C_1]$  : 점성요소에 대한 감쇠행렬

$[C_2]$  : 사용자가 정의한 요소행렬에 따른 감쇠행렬

$[C_3]$  : 요소 강성행렬  $[K_e]$ 에 비례하는 감쇠행렬

$$\frac{h_0}{\pi \cdot f_0} [K_e] \text{ 로부터 조합되어진 감쇠행렬}$$

$h_0$  : 요소 감쇠비

$[M_s]$  : 전체 질량행렬

$[K_s]$  : 전체 강성행렬

$\alpha, \beta$  : 상수

본 연구에서는 입력지진동의 PGA를 0.2g에서 4.0g까지 변화시키며 비선형 시간이력해석을 수행하여 격납건물의 응답을 구하였다. 그림 6은 PGA에 따른 최대 응답의 평균 값을 입력지진동 특성에 따라 보여주는 것으로 격납건물이 비선형 거동을 하면서 밀면전단력의 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 근거리지진의 경우 일반적인 특성인 장주기의 속도 펄스 성분으로 인해 큰 변위 발생이 예상되었으나 그림 6에서 보는 바와 같이 격납건물이 입력지진동의 탁월 진동수를 벗어나 고진동수 특성을 가질 경우 격납건물의 변위응답에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

그림 7은 격납건물 하단부의 응답을 이용한 전단력-변위, 모멘트-회전각 관계의 일례로서 PGA가 2.4g인 설계지진에 대한 응답을 나타내고 있다. 격납건물이 비선형 거동을 하면서 나타나는 재료의 비선형성, 즉 그 이력거동을 보여주는 것으로 전단력-변위 곡선에서는 최대점지향 모델의 이력특성이, 모멘트-회전각 곡선에서는 Degrading 모델의 이력특성이 잘 나타나고 있다.

### 5. 취약도 계산

#### 5.1 취약도 분석 방법

격납건물에 대한 지진취약도 분석은 내진성능을 평가하

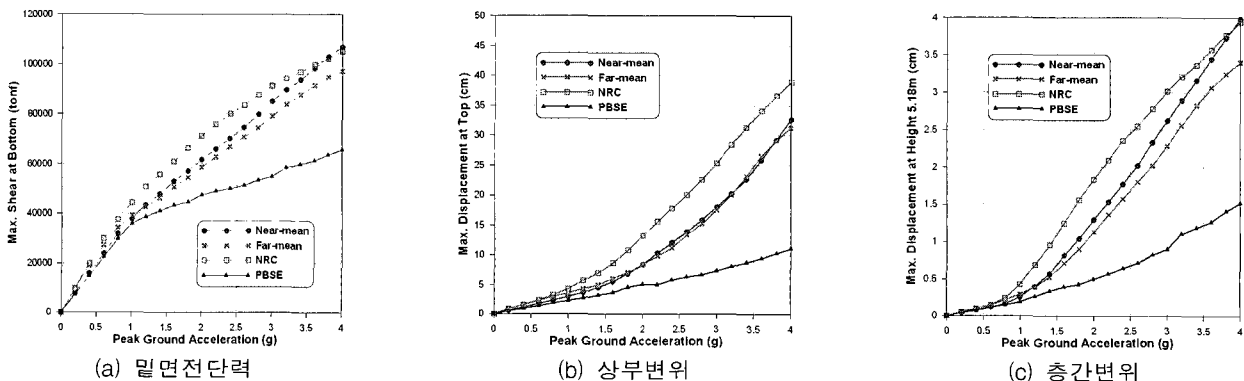


그림 6 PGA에 따른 입력지진동별 최대 응답의 평균

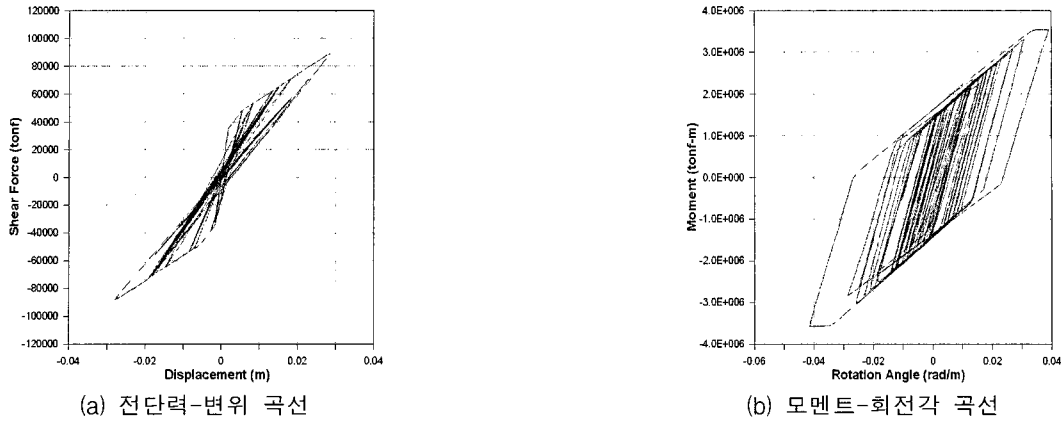


그림 7 격납건물의 이력특성의 일례

고 이를 이용하여 취약도 곡선을 작성하는 것으로 확률론적 특성을 가지고 있으며 지진동 파라메타의 크기에 따른 파괴확률로 나타내게 된다. 취약도 곡선을 나타내기 위해 사용되는 대수정규모델에서 취약도 해석의 최종결과물은 메디안 성능(Median Capacity)과 랜덤성 및 불확실성을 나타내는 대수표준편차( $\beta_r$ ,  $\beta_u$ )이다. 평균 취약도 곡선만을 작성 할 경우에는 메디안 성능과 조합된 대수표준편차  $\beta_c$ 가 사용된다. 이는 Seismic IPE(Individual Plant Examination)의 경우에 해당한다. 그러나  $\beta_c$ 의 계산에는 모든 정보의 변동성이 포함되어야 한다.

5.2 취약도 계산 방법

격납건물의 지진 취약도는 입력지진동의 세기에 따라 격납건물의 손상정도를 확률적으로 나타내는 것으로 어떤 비초과확률수준  $Q$  에서의 격납건물의 파괴확률  $P_f$ 는 아래의 식을 이용하여 산정 할 수 있다.

$$P_f(a) = \phi \left[ \frac{\ln(S_m(a)/C_m + \beta_U \cdot \phi^{-1}(Q))}{\beta_R} \right] \quad (2)$$

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
- $\beta_R$  ; 랜덤성에 대한 대수표준편차
- $\beta_U$  ; 불확실성에 대한 대수표준편차

또한 주어진 가속도 크기  $a$ 에 대하여 각각의 메디안 응답  $S_m$ 과 대수표준편차  $\beta_a$ 는 다음 식으로 구할 수 있다<sup>(13)</sup>.

$$S_m = \frac{\mu_a}{\sqrt{1 + \delta_a^2}} \quad (3)$$

$$\beta_a^2 = \ln(1 + \delta_a^2) \quad (4)$$

여기서,  $\mu_a$ 와  $\delta_a$ 는 각각 PGA에서의 응답 값의 평균 및 각 PGA에서의 변동계수(Coefficient of Variation : COV)를 나타낸다. 일반적으로 분산이나 표준편차만으로 그 분포 정도가 크다 작다 말하기는 어렵다. 이러한 이유로 중앙값에서의 상대적인 분포정도를 나타내는 변동계수가 유용한 값으로 사용된다. 변동계수는 아래의 식으로 구해지며 무차원양으로 정의된다.

$$\delta_a = \frac{\sigma_a}{\mu_a} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_a$ 는 각 PGA에서의 응답 값들의 표준편차를 나타낸다.

5.3 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 전단 파괴로서 정의되어왔다.<sup>(14),(15)</sup> 이와 같은 파괴모드 산정은 주로 탄성해석에 기반을 둔 방법으로 격납건물의 비선형거동 특성은 단지 비탄성 에너지 흡수계수를 사용함으로써 고려되었다.<sup>(16)</sup> 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 그림 8과 같은 Push-over 해석을 수행하였다. 이때 하중은 질량에 비례하는 측방향 하중을 가하였다.

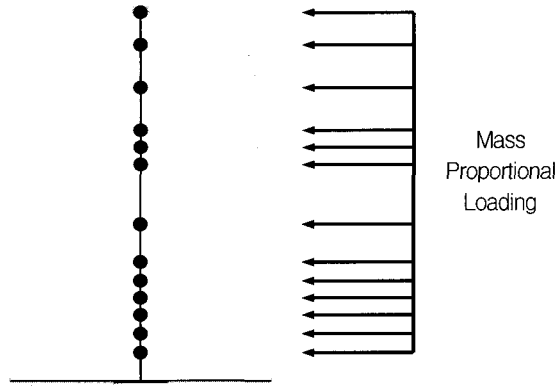


그림 8 Push-over 해석모델

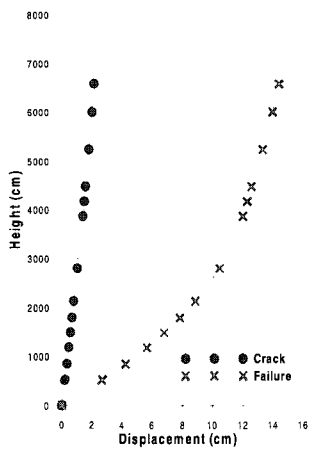


그림 9 높이별 변위양상

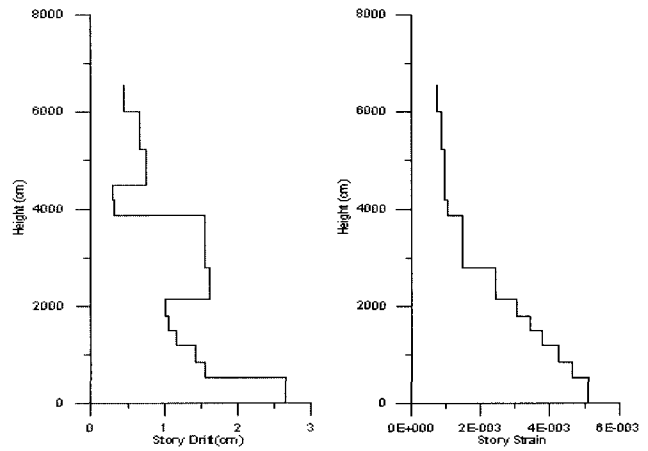
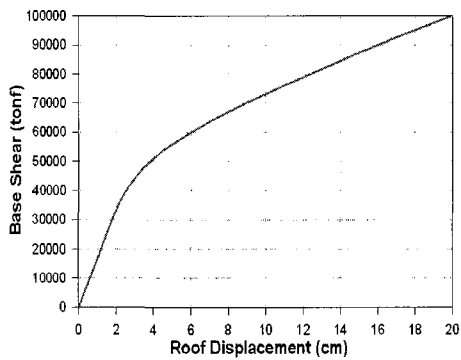
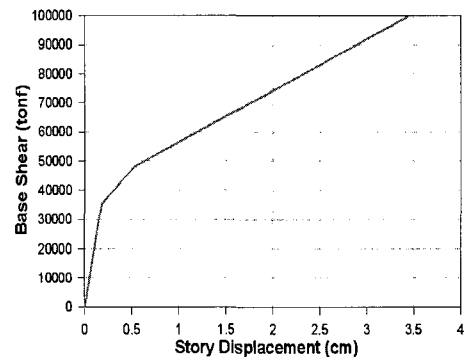


그림 10 층간 변위 · 변형률



(a) 상부변위-밀면전단력 곡선



(b) 층간변위-밀면전단력 곡선

그림 11 Push-over 해석결과

표 2 격납건물의 파괴기준

	Base Shear (ton)	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	

그림 9는 격납건물의 Push-over 해석 결과 중 격납건물의 항복과 극한상태에서의 높이별 변위를 나타내고 있으며 그림 10은 각각의 집중질량점 사이의 층간 변위와 변형율을 나타내고 있다. 그림 9와 10에서 보는 바와 같이 최대 층간변위는 바닥에 근접할수록 크다는 사실을 알 수 있으며 이는 층간변위 산정에 있어 바닥에 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 밀면전단력, 상부변위, 층간변위에 대

한 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 밀면전단력을 산정한 후 그림 11에 나타난 Push-over 해석결과를 이용하여 상부와 층간변위를 구한다. 극한 성능은 전단성분 골격곡선에서 변형률이 0.005 일 때의 전단응력을 구하여 밀면전단력을 산정한 후 항복 성능을 구할 때와 같은 방법으로 상부와 층간변위를 구한다. 이렇게 구한 PSC 격납건물의 항복과 극한에 대한 성능이 표 2에 나타나 있다.

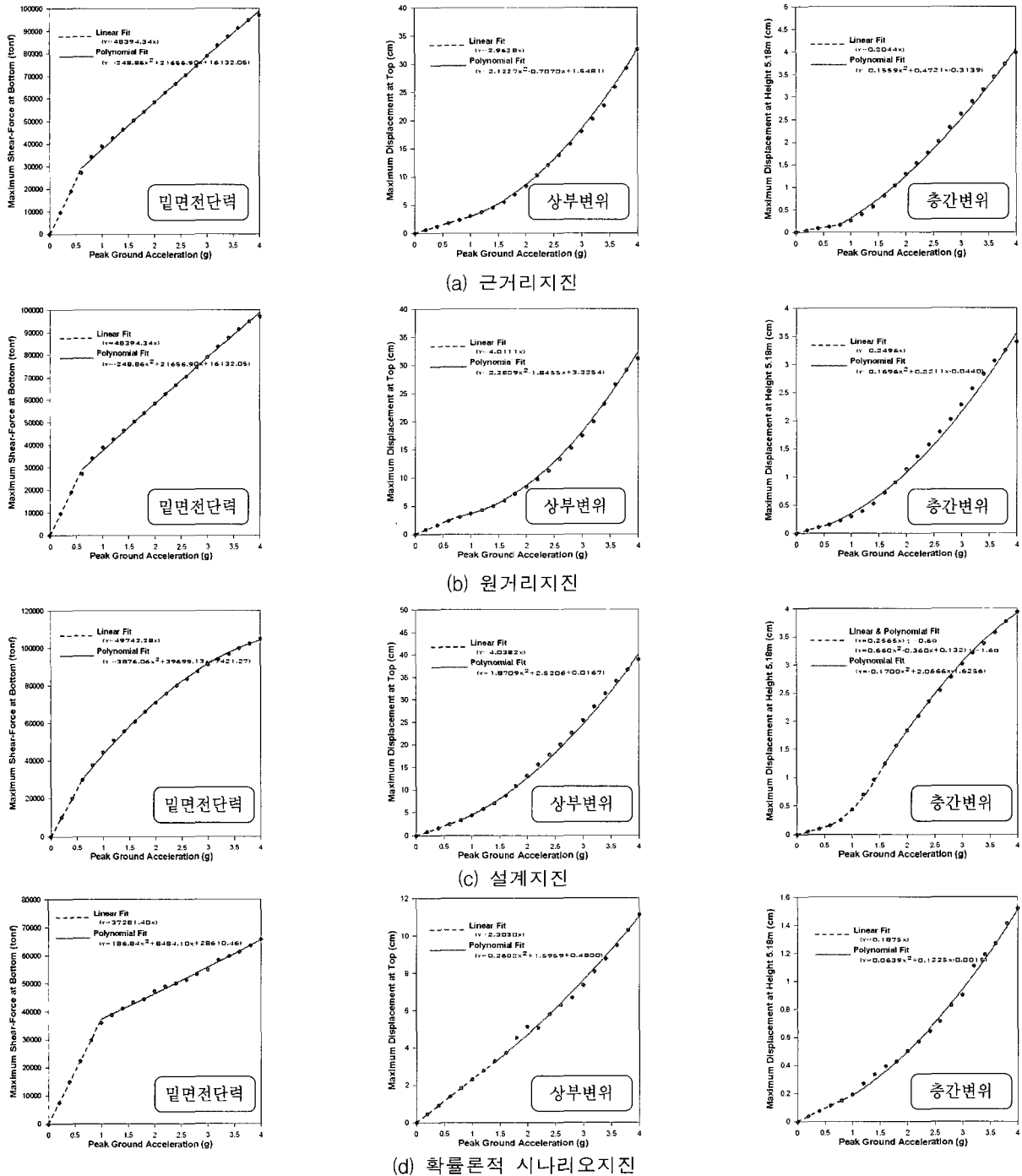


그림 12 회귀곡선



5.4 지진취약도 평가

5.4.1 중앙값 응답의 산정

식 (3)을 이용하여 PGA별 매디안 응답을 결정하기 위하여 밀면전단력, 상부변위, 층간변위에 대한 회귀분석을 수행하였다. 각각의 회귀곡선은 일차와 이차함수의 형태로 표현되며 그림 12에 다양한 입력지진동에 대한 회귀곡선과 곡선식을 보여주고 있다.

표 3 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

5.4.2 대수표준편차 산정

밀면전단력, 상부변위, 층간변위의 랜덤성과 불확실성에 대한 대수표준편차를 표 3에 보여주고 있다. 이때 밀면전단력 성능의 불확실성에 대한 대수표준편차 값은 2001년 영광 5,6호기에 대해 수행된 PSA<sup>(17)</sup>에 제시된 값 0.211을 사용하였으며, 상부변위와 층간변위 성능의 불확실성에 대한 대수표준편차 값은 Ozaki 등에<sup>(18)</sup>의 실험에 의해 제시된 값 0.32를 사용하였다. 또한 밀면전단력, 상부변위, 층간변위 각각에 대한 랜덤성에 대한 대수표준편차는 변동계수를

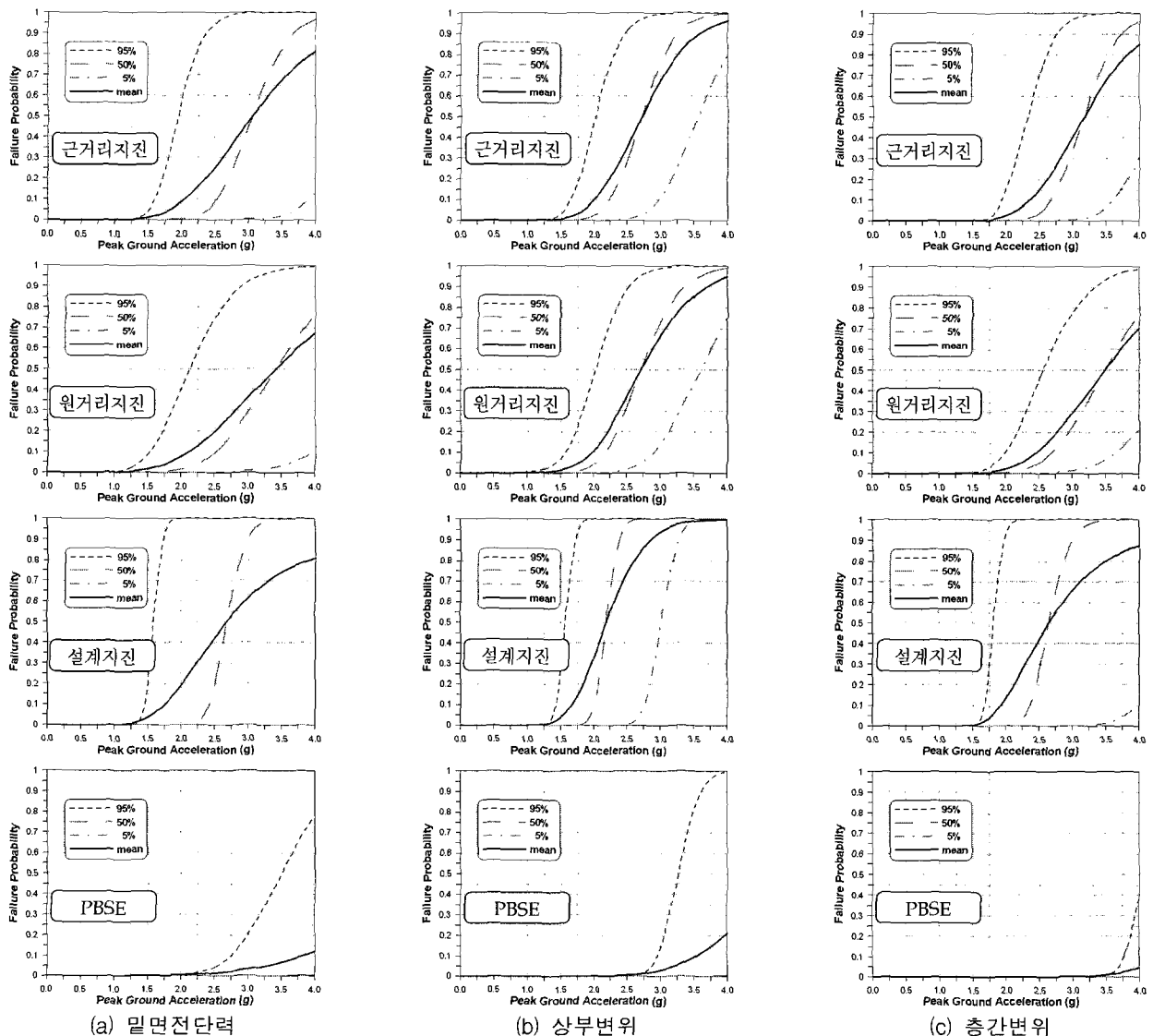


그림 13 극한성능에 대한 지진취약도 곡선

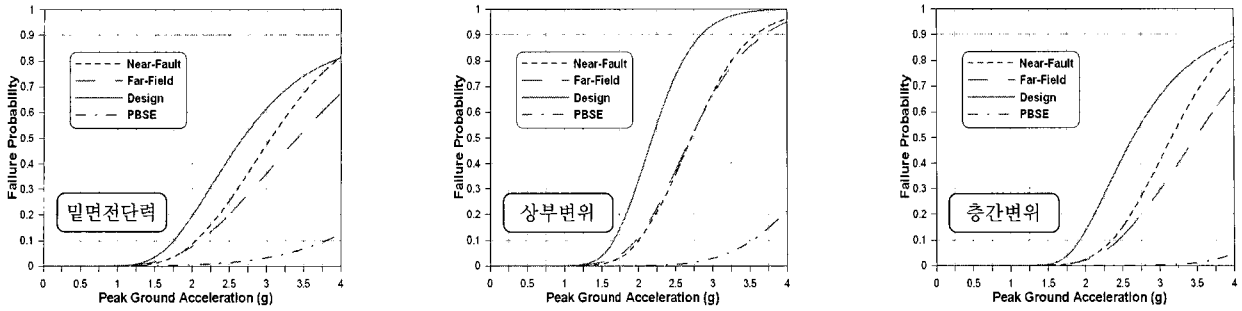


그림 14 파괴기준에 따른 평균취약도 곡선의 비교

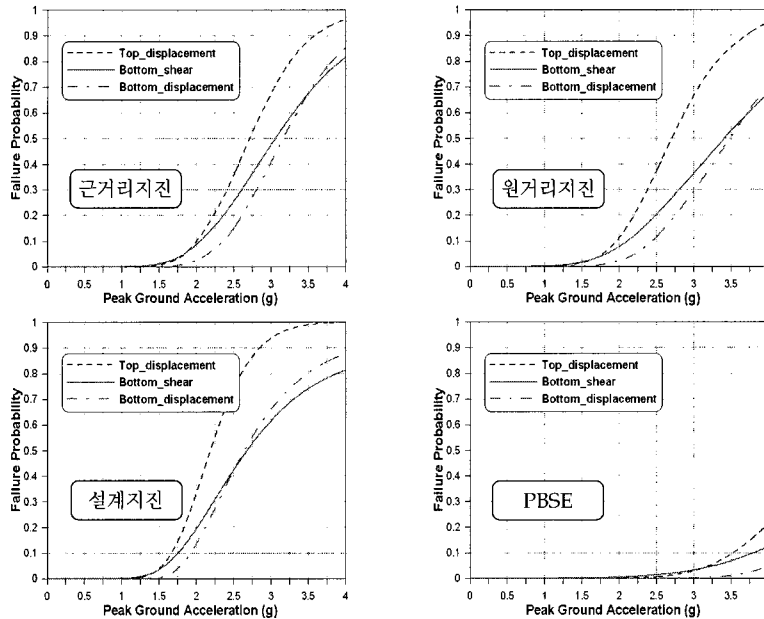


그림 15 입력지진동에 따른 평균취약도 곡선의 비교

이용하는 식 (4)를 이용하여 구하였다. 표 3에 보여주고 있는 랜덤성에 대한 대수표준편차는 각 입력지진동별 PGA에 대한 평균값을 나타내고 있다.

### 5.4.3 취약도 곡선

본 절에서는 앞서 구한 메디안 응답과 대수표준편차, 그리고 식 (2)를 이용하여 PSC 격납건물의 지진취약도 곡선을 작성하였다. 그림 13은 극한성능에 대한 입력지진동별 취약도 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 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 14와 15에서는 파괴기준과 입력지진동에 따른 격납건물의 극한성능에 대한 평균취약도 곡선을 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 설계지진에 의한 파괴확률이 가장 크게 나타났으며 작은 지진

에서는 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 NPP(Nuclear Power Plant)에서의 구조물 및 기기의 내진성능을 표현하는 지수로 사용된다. 표 4는 각각의 매개변수의 항복과 극한성능에 대한 입력지진동별 HCLPF 및 메디안 성능값을 보여주고 있다. 표에서 확률론적 시나리오지진의 경우 메디안 성능이 해석범위보다 크게 나타났다.

표 4 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	>4.0
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	>4.0
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	>4.0

6. 결 론

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

- 탄성한계 내에서는 격납건물의 설계지진에 의한 응답이 다른 입력지진동에 대한 응답보다 크게 나타나 탄성한계 내에서는 비교적 내진여유도가 큼을 알 수 있다.
- 격납건물에 대한 가속도 응답스펙트럼을 살펴보면 1Hz 이하의 저 진동수 영역에서는 근거리지진에 대한 응답증폭이 크게 나타나며, 10Hz 이상의 고 진동수 영역에서는 확률론적 시나리오지진에 대한 응답증폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 확률론적 시나리오지진과 같이 고진동수 특성을 갖는 지진의 경우 구조물 내부에 설치된 기기에 상당히 큰 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단된다.
- 근거리지진은 큰 속도성분으로 인해 그 응답이 클 것으로 예상되었으나 격납건물과 같이 비교적 강성이 큰 구조물에 대해서는 그 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.
- 격납건물이 비선형 거동을 하면서 변위에 대한 응답값이 급격히 증가함을 볼 수 있었다. 이는 탄성한계 내에서는 충분한 내진여유도를 가진다 할지라도 구조물이 비선형 거동을 한다면 변위에 기반을 둔 내진여유도의 재평가가 필요하다 여겨진다.
- 과거 격납건물에 대한 확률론적 지진안전성 평가를 위한 지진취약도 분석은 응력에 기반을 두고 수행되었다. 그러나 격납건물이 비선형 거동을 하면서 급격히 증가하는 변위응답은 격납건물의 지진안전성 평가에 있어

매우 중요한 요소이다. 따라서 격납건물의 비선형 동적 거동을 고려한 내진여유도의 평가에서는 변위에 기반한 지진취약도 분석이 필수적이라 하겠다.

- 보다 합리적인 지진취약도 분석을 위해서는 다양한 실험과 해석결과들을 이용한 변동성의 범의를 결정하는 작업과 극한 변위와 같은 성능을 보다 합리적으로 결정하는 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. US NRC Regulatory Guide 1.60, *Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, 1973.
2. Paul Somerville, "Characterization of Near-Fault Ground Motions," *US-Japan Workshop on the Effects of Near-Field Earthquake Shaking*, San Francisco, California, pp.21-29, 2000.
3. Xu, J., Philippacopoulos, A. J., Miller, C. A. and Costantino, C. J., CARES(Computer Analysis for Rapis Evaluation of Structures), *NUREC/CR-5588*, Vol.2, 1990.
4. US NRC Regulatory Guide 1.165, *Identification and Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motion*, 1997.
5. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice- Hall, Inc, 1995.

6. Malhorta, P. K., "Response of Building to Near-Field Pulse-Like Ground Motions," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp.1309-1326.
7. Malhorta, P. K., Effects of Near-Field Pulse-Like Ground Motions on Tall Buildings, 한국지진공학회 추계학술대회 논문집, 1998.
8. 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.
9. ABAQUS, Inc., ABAQUS Version 6.4, 2003.
10. 株式會社 ARK Information System, TDAP III Ver 2.13, 2005.
11. Park, Y. J., Hofmayer, C. H., *Technical Guidelines for Aseismic Design of Nuclear Power Plants*, Translation of JEAG 4601-1987, NUREG/CR-6241, 1994.
12. Japan Electric Association, *Technical Guideliness for a Seismic Design of Nuclear Power Plants*, JEAG 4601-1991 Supplement, 1991.
13. Ang ZH-s, Tang, W. H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Basic Principles*, Vol. 1, Wiley, New York, 1975.
14. Read, J. W., Kennedy, R. P., Buttemer, D. R., Idriss, I. M., Moore, D. P., Barr, T., Wooten, K. D. and Smith, J. E., *A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1)*, EPRI NP-6041-SL, 1991.
15. Lee, N.H. and Song, K.B. "Seismic Capacity Evaluation of the Prestressed/Reinforced Concrete Containment, Young-gwang Nuclear Power Plant Unit 5 & 6," *Nuclear Engineering and Design*, 192, 1999, pp.189-203.
16. Kennedy, R. P. and Ravindra, M. K., "Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies," *Nuclear Engineering and Design*, 79, 1984.
17. Korea Electric Power Company, *External Event Analysis for Young-gwang Units 5 & 6 PSA*, 2001.
18. Ozaki, M., Okazaki, A., Tomomoto, K., Iba, T., Satoh, R., Nanba, H., Seya, H., Moriyama, K. and Ugata, T. "Improved Response Factor Methods for Seismic Fragility of Reactor Building," *Nuclear Engineering and Design*, 185, 1998.