

# 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 지진격리시스템이 적용된 원전 격납건물의 지진 취약도 평가

## Seismic Fragility Evaluation of Isolated NPP Containment Structure Considering Soil-Structure Interaction Effect

임승현<sup>1)</sup> · 정형조<sup>1)\*</sup> · 김민규<sup>2)</sup> · 최인길<sup>2)</sup>

Eem, Seung Hyun<sup>1)</sup> · Jung, Hyung Jo<sup>1)\*</sup> · Kim, Min Kyu<sup>2)</sup> · Choi, In Kil<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국과학기술원 건설및환경공학과, <sup>2)</sup>한국원자력연구원 종합안전평가부

<sup>1)</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, <sup>2)</sup>Integrated Safety Assessment Division, KAERI

### / A B S T R A C T /

Several researches have been studied to enhance the seismic performance of nuclear power plants (NPPs) by application of seismic isolation. If a seismic base isolation system is applied to NPPs, seismic performance of nuclear power plants should be reevaluated considering the soil-structure interaction effect. The seismic fragility analysis method has been used as a quantitative seismic safety evaluation method for the NPP structures and equipment. In this study, the seismic performance of an isolated NPP is evaluated by seismic fragility curves considering the soil-structure interaction effect. The designed seismic isolation is introduced to a containment building of Shin-Kori NPP which is KSNP (Korean Standard Nuclear Power Plant), to improve its seismic performance. The seismic analysis is performed considering the soil-structure interaction effect by using the linearized model of seismic isolation with SASSI (System for Analysis of Soil-Structure Interaction) program. Finally, the seismic fragility is evaluated based on soil-isolation-structure interaction analysis results.

**Key words:** Soil-Structure Interaction, Seismic Isolation System, Seismic Performance, Seismic Fragility, Nuclear Power Plants

## 1. 서 론

최근 들어 원자력발전소가 강진지역에 건설될 가능성이 높아지고 있어, 큰 지진하중에 대응 할 수 있는 원자력발전소 건설에 관한 연구가 활성화되고 있다[1]. 현재 원자력발전소의 내진성능을 향상시키는 방안으로 원자력 발전소에 지진격리시스템의 적용이 효과적인 방법으로 거론되고 있다. 실제로 지진격리시스템이 적용된 원자력 발전소로는 900MWe 급 Koeberg Nuclear Power Station 과 Cruus Nuclear Power Station이 있다[1]. 지진 격리장치는 구조물과 지반을 격리시킴으로써 구조물의 고유주기를 길게 하여 구조물의 진동을 저감하여 내진성능을 향상시키는 장치이다[2]. 지진 격리시스템은 1980년대 초부터 건물 및 교량 등에 주로 적용되어 왔으며 특히 1994년 미국 노스리지지진(Northridge earthquake)과 1995년 일본 고베지진(Kobe earthquake) 등에서 그 지진력 저감 효과가 입증됨으로써

현재까지 가장 확실한 지진대응 시스템으로 인식되어 왔으나[3], 안전과 관련된 높은 검증 기술이 요구되는 원자력발전소 분야에서는 근래에 들어서 연구가 진행되고 있다.

미국NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는 지진격리시스템에 대한 기술기준을 작성하기 위하여 연구팀을 구성하여 연구를 하고 있으며[4], 이탈리아ENEA에서는MSE(Economic Development Ministry)와 공동으로 원자력 발전소에 지진격리시스템을 적용하기 위하여 연구를 수행하고 있다[5]. 일본에서는 1987년부터 2000년 까지 일본원자력연구원(JAERI)에서 기기 지진격리에 대해 연구했으며, 일본원자력안전기반 기구(JNES)에서 원자력 발전소에 지진격리시스템을 적용하기 위한 연구를 수행 하였다[6]. 주요 원전 선진국은 이미 상업용 원전에 지진격리시스템 채택을 위하여 다양한 활동을 수행하고 있으며, 우리나라에서는 표준원전을 중심으로 지진격리시스템 적용을 위한 다양한 형태의 연구를 수행하고 있다.

원자력 발전소의 확률론적 지진안전성 분석 및 평가를 위해 지진취약도가 사용되어 왔다. 원전 구조물의 내진 안전성 평가에는 SPRA(Seismic

\*Corresponding author: Jung, Hyung Jo

E-mail: hjung@kaist.ac.kr

(Received 30 October 2012; Accepted 23 January 2013)

probabilistic risk assessment) 및 SMA (Seismic margin assessment) 방법이 많이 사용되어지고 있으며, 우리나라의 경우 대부분의 발전소에 대하여 SPRA를 수행하였다[7]. 원자력 발전소에 적용하는 지진력리시스템은 지진력을 감소시키는데 크게 기여하지만, 원자력 발전소에 새로운 시스템이 추가되는 것이므로 원자력 발전소의 지진 안전성 평가가 지진력리시스템에 맞게 재평가 되어야 한다.

구조물의 동적거동은 구조물 자체의 동특성 이외에도 구조물을 지지하는 지반의 영향으로 변한다. 이와 같이 구조물을 지지하는 지반의 영향으로 구조물의 동적 거동이 변하는 효과를 지반-구조물 상호작용 (SSI, Soil-Structure Interaction) 이라 한다. 원전내진설계 심사지침인 SRP기준에서 [8] 지반의 영향을 무시할 수 있는 지반조건을 전단파 속도 1,100 m/s (약 3,500 ft/s) 이상에서 2400 m/s (약 8,000 ft/s) 이상으로 상향 조정함에 따라, 대부분의 원전에서 지반의 영향을 고려한 원자력 발전소의 내진성능 평가가 이루어져야 하므로, 지진력리시스템이 적용된 원자력 발전소 또한 지반-구조물 상호작용의 영향이 고려되어야 한다.

따라서 본 저자[9]에 의해 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진력리 시스템이 적용된 원자력 발전소의 격납건물의 지진해석이 수행되어졌다. 그 결과, 지진력리시스템이 적용된 격납건물과 적용되지 않은 격납건물의 지진해석 결과를 비교하여 지진력리시스템을 격납건물에 적용하면 내진성능이 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용 해석 전용 툴인 SASSI (A System

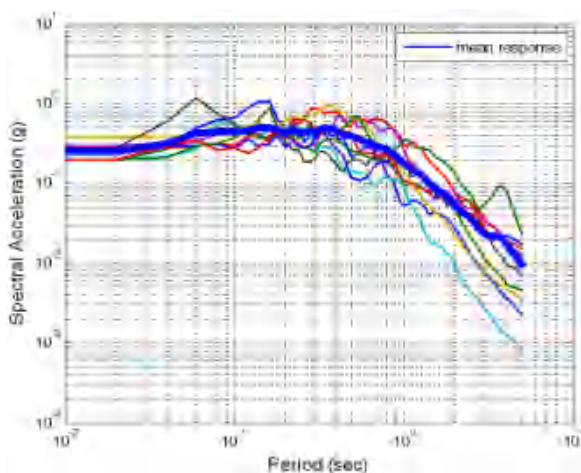
for analysis of Soil-Structure Interaction) 프로그램을 이용하여 지진력리시스템이 적용된 격납건물의 지진 해석을 수행하였다. 지진력리장치의 비선형성을 고려하기 위하여 지진력리장치를 선형화 하여 해석을 하였으며, 그 결과를 활용 하여 격납건물의 내진성능을 평가할 수 있는 지진취약도 곡선을 작성 하였다.

## 2. 입력 지진

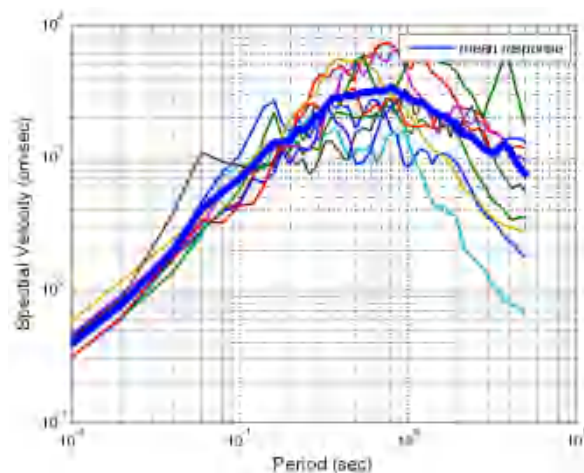
NRC Regulatory Guide (RG) 1.208 (NRC, 2007) “A Performance-Based Approach to define the Site-Specific Earthquake Ground Motion” [10]에서 원전 부지에서 발생 가능한 지진을 선정하도록 하고 있다. 하지만 본 연구에서는 원전 부지가 선정되어 있지 않으므로 지진력리시스템이 적용된 원전 격납건물의 지진해석을 수행하기 위하여 일반적인 지진으로 대표할 수 있는 지진입력 10개를 입력지진으로 선정하였다. 선정된 지진기록 10개는 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center)의 데이터베이스로부터 지진의 세기, 거리, 지속시간, 주기 특성 등을 고려하여 선정하였다. 선정된 지진은 Table 1에 정리 하였으며 각 지진과 그 평균의 응답스펙트럼 그래프를 감쇠비 5 %에 대하여 Fig. 1에 나타내었다. 선정된 입력지진은 최대지반가속도 (PGA, Peak Ground Acceleration)를 0.2 g에서 2.0 g까지 0.2 g의 간격으로 증가시키며 총 100개의 입력지진을 생성 하였다.

Table 1. Input Earthquakes

| Earthquake      | Year | Station       | Magnitude | PGA (g) | PGV (cm/s) | PGD (cm) |
|-----------------|------|---------------|-----------|---------|------------|----------|
| Chi-Chi         | 1999 | CHY006        | 7.62      | 0.34    | 52.52      | 18.79    |
| Duzce           | 1999 | Bolu          | 7.14      | 0.78    | 58.50      | 17.52    |
| Imperial Valley | 1979 | Agrarias      | 6.53      | 0.28    | 32.37      | 7.47     |
| Kobe            | 1995 | KJMA          | 6.90      | 0.68    | 71.50      | 15.88    |
| Livemore        | 1980 | Del Valle Dam | 5.42      | 0.04    | 2.17       | 0.21     |
| Loma Prieta     | 1989 | Alameda       | 6.93      | 0.23    | 33.45      | 10.62    |
| Northridge      | 1994 | Sylmar        | 5.13      | 0.06    | 4.35       | 0.41     |
| Parkfield       | 1966 | Cholame       | 6.19      | 0.26    | 10.70      | 3.38     |
| San Fernando    | 1971 | Pacoima       | 6.61      | 1.10    | 64.17      | 23.42    |
| Victoria        | 1980 | Chihuahua     | 6.33      | 0.12    | 21.49      | 9.18     |



(a) Spectral Acceleration



(b) Spectral Velocity

Fig. 1. Response Spectrums

### 3. 해석 모델

#### 3.1 격납건물

본 절에서는 지진취약도 작성을 위한 대상 격납건물을 고유주기가 약 3.85 Hz, 지름이 약 47.85 m 그리고 높이는 약 77.45 m 인 신고리 원자력 발전소 3, 4 호기 격납건물을 대상으로 하였다. SHIN-KORI Nuclear Power Plant 3&4 Preliminary Safety Analysis Report를 참조 하여 격납 건물 모델을 작성 하였으며 작성된 모델은 효율적인 지반-구조물 상호작용 해석을 위하여 원자력 발전소의 격납건물에 대응하는 절점 질량, 단면적, 유효전단면적, 단면 2차 모멘트 등을 고려하여 집중질량 모델을 작성 하였다. 집중질량 모델은 Containment Shell, Reactor Containment Internal Structure, Reactor Coolents System으로 구성 되어져 있다. Containment Shell은 프리스트레스 콘크리트이며 Internal Structure은 철근 콘크리트 이다. Primary Shield Shell과 Secondary Shield Shell은 콘크리트 슬래브와 벽체로 일부 연결되어 있다.

#### 3.2 지반선정

신고리 원자력 발전소 3, 4호기는 표준원전 (APR1400)으로 참고설계 인 System80+ 지반의 깊이에 따른 지반의 범주는 4가지이다. APR1400의 경우는 포괄부지 범위를 다소 줄여서 과다설계를 방지하기 위하여 암반까지의 깊이가 300 ft (약 90 m)인 System80+의 범주 D를 제외 시켰다. 범주 A는 암반까지의 깊이가 NI 기초가 묻힌 깊이와 동일한 53 ft이며, A1 하나의 지반의 범주만 가진다. 범주 B는 암반까지의 깊이가 100 ft이며, B1부터 B4까지 4개의 지반의 범주를 가진다. 범주 C는 암반까지의 깊이가 200 ft이며, C1부터 C3까지 3개의 지반의 범주를 가진다[11].

본 연구에서는 포괄부지중 범주 A1과 범주 C1을 선정하였다. 지반 범주 A1은 경질 지반이며 경암지반이 기초 바닥면인 53 ft 지하에 위치하였으며, 지표면에서의 전단파 속도는 1800 ft/s이다. 지반 범주 C1은 연질지반이며 경암지반이 200 ft (약 60 m) 지하에 위치하였으며, 지표면에서의 전단파 속도는 1000 ft/s (약 300 m/s)이다. Fig. 2는 범주 A1과 C1 지반의 깊이별

전단파 속도를 나타내었다.

#### 3.3 지진격리장치의 설계

NUREG에서 원자력 발전소에 적합한 지진격리장치 종류는 RB (Rubber bearing), LRB (Lead rubber bearing), Friction Type의 지진격리장치가 적합하다고 하고 있다[11]. 본 연구에서는 LRB Type의 지진격리장치를 원자력 발전소의 격납건물에 설치하여 지진해석을 수행 하였다.

현재 원자력 발전소의 지진격리장치 설계기준 및 방법이 정립되어 있지 않다. 따라서 ASCE7[13]과 FEMA 451[14]을 참고하여 지진격리장치를 설계하였다. ASCE/SEI 7-10 (2010), NEHRP Recommended Provisions : Design Examples (2006) 및 AASHTO Guide Spec. for Seismic Isolation Design 3rd Edition에[15] 의하면, 예비설계 단계에서는 지진격리시스템의 유효주기 ( $T$ )와 등가 감쇠비 ( $\beta$ )를 가정하여 식 (1)에 의해 발생변위를 산정하게 된다.

$$D = \frac{g}{4\pi^2} \frac{S_1 T}{B} \quad (1)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $S_1$ 은 고려지진에 대한 1초 주기 5% 감쇠비조건을 갖는 스펙트럴 가속도 ( $S.A.$ , Spectral Acceleration) 계수,  $T$ 는 지진격리시스템의 유효주기,  $B$ 는 감쇠비 ( $\beta$ )에 대한 감쇠계수이다. 감쇠계수( $B$ )는 식 (2)에 의해 구한다.

$$B = \left( \frac{\beta}{0.05} \right)^3 \quad (2)$$

표준원전 (APR1400)의 설계응답스펙트럼은 US NRC의 RG 1.60 스펙트럼 기반으로 고진동수 영역을 보강한 형태로 ZPA (PGA)는 0.3 g이며, 응답 스펙트럼상 1초 주기 스펙트럴 가속도 수준은 0.44g이다[16]. 지진격리장치의 유효주기는 2 ~ 3초가 바람직한 것으로 알려져 있다[17]. 따라서 본 연구에서는 지진격리장치의 유효주기 ( $T$ )를 2.5초 감쇠비 ( $\beta$ )는 0.15로 가정하여 지진격리장치를 설계 하였다. 설계된 LRB 지진격리장치의 하중-

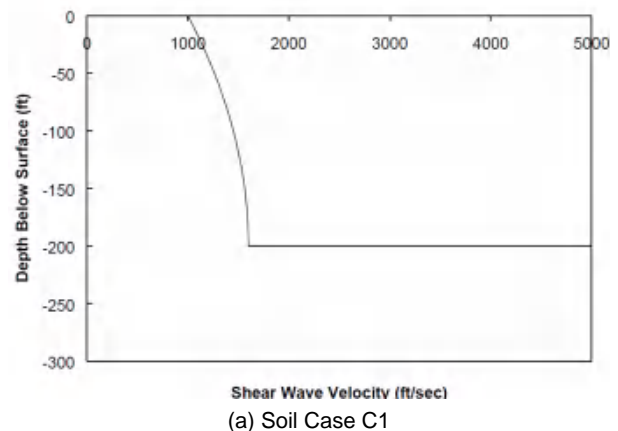
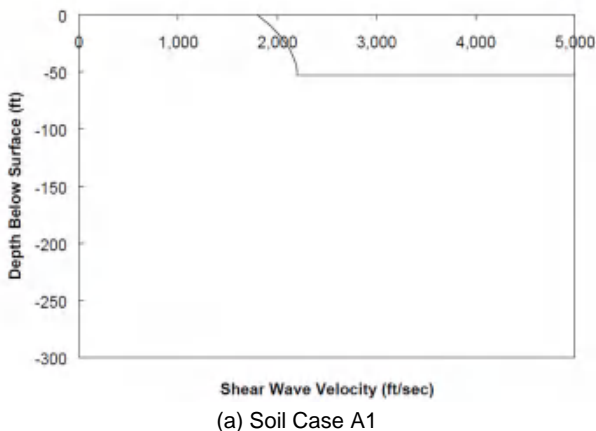
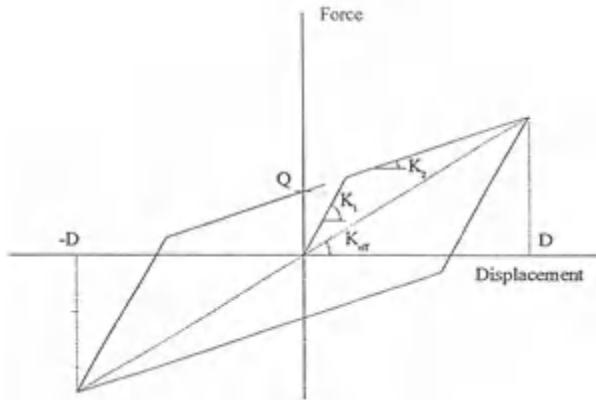


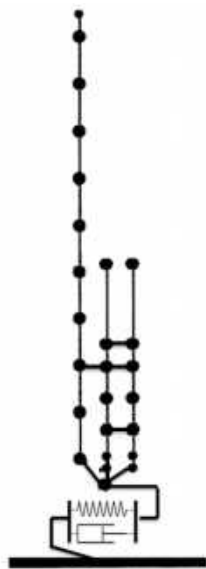
Fig. 2. Soil Cases

**Table 2.** Properties of Seismic Isolation

| Parameter | Value     |         |                 |
|-----------|-----------|---------|-----------------|
| K1        | 22731.83  | kips/ft | (331746 kN/m)   |
| K2        | 227318.37 | kips/ft | (3317463 kN/m)  |
| Keff      | 30084.61  | kips/ft | (439051.9 kN/m) |
| Q         | 4886.60   | kips    | (21736.6 kN)    |



**Fig. 3.** Force-Displacement Curve of Seismic Isolation



**Fig. 4.** Soil-Isolator-Structure Interaction Analysis Model

변위 곡선 및 특성을 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다.

설계된 지진격리장치는 원자력 발전소의 격납건물과 Fig. 4와 같이

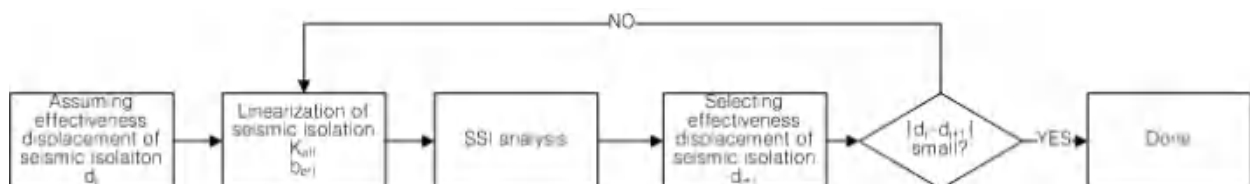
SASSI의 SPRING 요소를 이용하여 삽입되었다.

#### 4. 지반-지진격리장치-구조물 상호작용 해석

지반-구조물 상호작용 해석을 수행함에 있어 3차원 비선형 해석을 수행할 경우 많은 시간이 소요되며 비경제적이 될 수 있다. 따라서 지반-구조물 상호작용 해석은 약간의 정확도를 희생하더라도 주어진 해석 시간 내에 합리적인 근삿값을 얻을 수 있는 방법으로 연구가 진행 되었으며 대표적인 방법으로 비선형 시스템을 등가 선형화하여 해석 하고 있다[18].

본 연구에서는 지반-지진격리장치-구조물 상호작용 해석은 선형 해석 프로그램인 SASSI 프로그램을 이용하여 지진격리시스템이 적용된 원자력 발전소의 격납건물 지진해석을 수행하였다. SASSI(a System for Analysis of Soil-Structure Interaction)는 부분구조법을 채택한 SSI 해석 전용 프로그램으로 1980년대 Berkerly의 Lysmer 교수 연구팀에서 SSI 해석을 목적으로 유한요소 모델링 기법과 복소 진동수 영역 해석 개념을 잘 조합시켜 개발한 SSI 해석 전용 프로그램이다[18]. SASSI 프로그램은 기본적으로 선형해석을 수행하므로, 본 연구에서 지진격리장치의 비선형성을 고려하기 위하여 지진격리장치를 등가선형화 하여 반복적으로 해석을 수행하였다[9]. 비선형 시스템을 등가선형화 하여 해석을 수행 할 때, 시스템의 거동이 진폭과 주파수 변화가 느릴 경우 비교적 정확한 해를 가지며, 진폭과 주파수의 변화가 빠른 경우 오차는 커지게 된다[19]. 일반적으로 지진 격리된 구조물의 경우 거동은 진폭과 주파수의 변화가 느린 형태를 보이므로 지진격리장치를 등가선형화 하여 수행한 해석 결과는 비선형 해석 결과와 유사한 거동을 보일 것으로 사료된다.

본 연구에서 사용한 지진격리장치의 등가선형화 방법은 먼저, 자유장을동을 정하기 위하여 ProShake을 이용하여 지반의 특성과 입력 지진으로부터 1차원 파전달 해석을 통하여 자유장 해석을 한다. 다음 지반-구조물 상호작용 해석 전용 툴인 SASSI를 이용하여 지진 해석을 수행 한다. 이때, 선형 해석을 수행하는 SASSI 프로그램으로 비선형 거동을 하는 지진격리장치를 표현하기 위하여 지진격리장치의 유효강성과 유효감쇠비를 구한 후 지진격리장치를 선형화 하여 모델링 한 다음 지반-지진격리장치-구조물 해석을 수행한다. 구해진 지반-지진격리장치-구조물 상호작용 해석의 결과에서 지진격리장치의 유효변위를 구한 후 다시 유효강성과 유효감쇠비를 선택한 후 처음 가정한 지진격리장치의 유효강성과 유효감쇠비를 비교하여 그 차이가 크면 새로 구한 지진격리장치의 특성 즉, 유효강성과 유효감쇠비를 고려하여 다시 지반-지진격리장치-구조물 상호작용해석을 수행하고, 그 차이가 적으면 지반-지진격리장치-구조물 상호작용 해석을 종료한다. 일련의 해석과정을 Fig. 5에 나타내었다.



**Fig. 5.** Flowchart of Soil-Isolator-Structure Interaction Analysis[9]



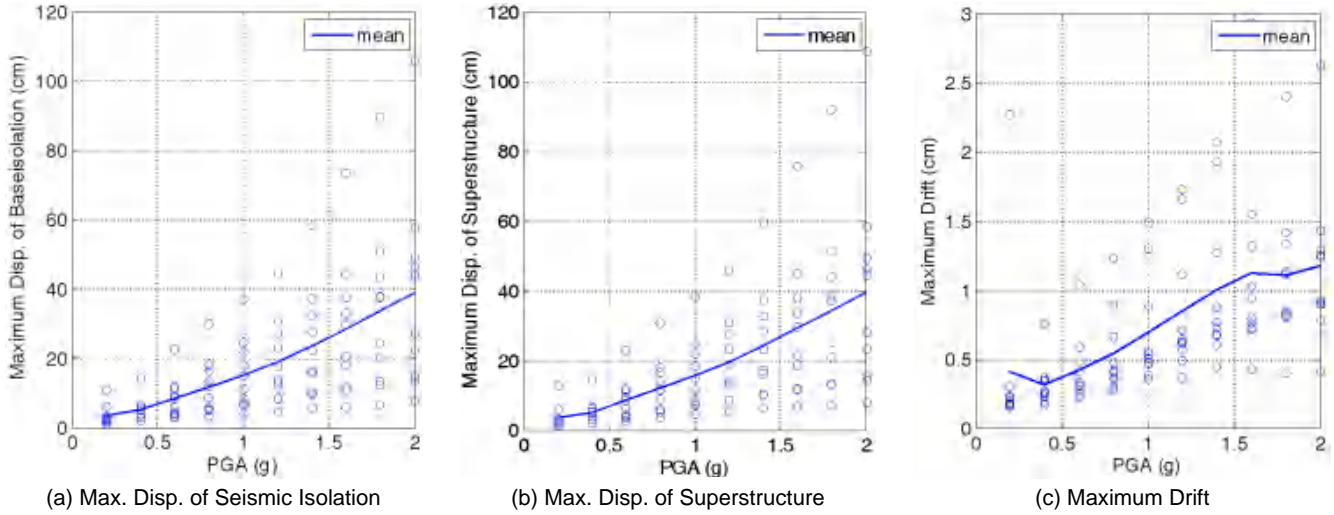


Fig. 6. Soil-Isolator-Structure Interaction Analysis Results

#### 4.1 지진해석 수행 결과

본 연구에서는 입력지진의 PGA를 0.2 g에서 2.0 g까지 변화 시키며 지반-지진격리장치-구조물 상호작용 해석을 수행하여 격납건물의 응답을 구하였다. Fig. 6은 지반-지진격리장치-구조물 상호작용 해석 결과를 PGA에 따른 최대응답과 최대응답의 평균을 나타내었다. 해석 결과를 나타내었다. 지반을 기준으로 (a)는 지진격리장치의 변형을 (b)는 격납건물의 Containment Shell의 상부의 변위를 나타내었으며, (c)는 Containment Shell의 상부와 하부의 층간 변위를 나타내었다. 지진격리장치의 변형에 비해 구조물의 층간 변위는 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 지진격리장치가 비선형 거동을 하면서 PGA가 커짐에 따라 지진격리장치 변형의 증가율이 커지는 것을 알 수 있다.

### 5. 지진 취약도 곡선

#### 5.1 지진취약도 작성

여러 가지 지진취약도 분석방법이 제안되고 있으나 본 연구에서는 Shinozuka 등[20]의 지진취약도 분석 기법을 이용하였다. Shinozuka 등은 취약도 곡선을 대수정규분포함수(log-normal distribution function)의 누적 확률분포로 식 (3)과 같이 표현 하였으며, 대수정규분포의 두가지 주요 계수인 중앙값 (median)과 대수 표준편차 (log-standard deviation)는 최우도 추정법 (MLE, Maximum Likelihood Estimate)으로 구하였다 [21].

$$F_k(a) = \Phi\left[\frac{\ln(a/c_k)}{\zeta_k}\right] \quad (3)$$

여기서  $a$ 는 지진의 PGA를 나타내며,  $c_k$ ,  $\zeta_k$ 는 각각 손상상태  $k$ 를 나타내는 대수정규분포함수의 중앙값과 대수 표준편차이고,  $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포

함수의 누적확률 분포이다. 식 (3)과 같이 가정된 확률분포에 대한 계수 중앙값과 대수 표준편차는 최우도 추정법을 이용하여 산정한다. 이때, 쓰일 우도 함수 (Likelihood)는 각각 지진에 대해 적용시켜, 손상이 발생 했을 때에는  $F(a)$ 를 증가 시키고, 손상이 발생하지 않았을 때에는 손상 발생하지 않은 확률 ( $1-F(a)$ )를 증가 시키도록 식 (4)와 같이 정의 할 수 있다. 식 (5)와 같이 정의된 우도함수를 최대화 하는 계수 중앙값과 대수 표준편차를 찾는다.

$$L = \prod_{i=1}^{N_e} [F_k(a_i)]^{x_i} [1 - F_k(a_i)]^{1-x_i} \quad (4)$$

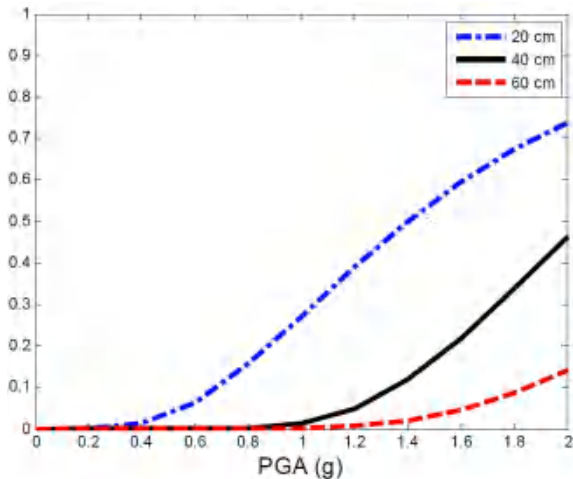
$$\frac{\partial L}{\partial c_k} = \frac{\partial L}{\partial \zeta_k} = 0, \quad k = 1, \dots, N \quad (5)$$

여기서,  $N$ 은 총 지진의 개수이며,  $F(a)$ 는 손상상태  $k$ 에 대한 취약도이고,  $a_i$ 는 구조물에 가해지는 지진하중의 최대지반가속도이며,  $x_i$ 는 구조물의 손상상태에 대한 해당여부를 나타내는 Bernoulli 확률변수로 손상이 없으면 0, 손상이 있으면 1의 값을 갖는다.

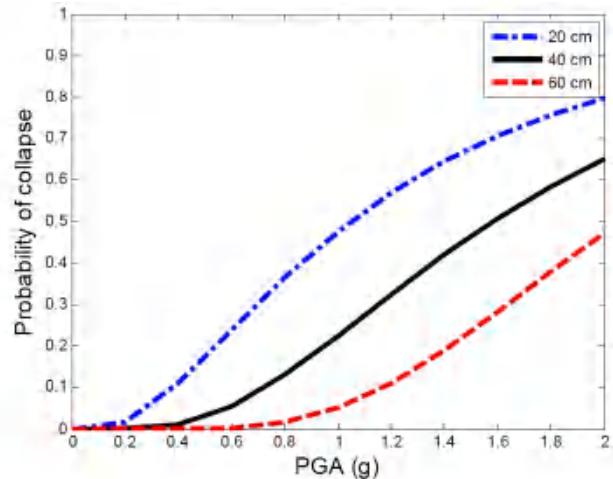
#### 5.2 파괴기준

취약도 해석에 있어서 파괴모드 및 기준을 선정하는 것은 매우 중요하다. 지진격리시스템이 적용된 격납건물의 경우 지진에 의해 Seismic Gap이 발생하여 구조적 파괴가 발생할 것이라 예상 된다. 지진격리구조와 비지진격리구조의 상대변위에 의해 지진격리구조와 비지진격리구조의 주요기기들 (고압력 배관, 냉각수 배관, 능동기기, 필수 계통) 즉, 인터페이스의 파손이 예상된다. 따라서 파괴모드를 지진격리시스템과 Hard Stop의 충돌을 주요 파괴모드로 가정했다.

본 연구에서 지진격리시스템의 설계변위가 20 cm 정도이다. 그래서 본 연구에서 파괴기준은 Seismic gap 즉, 지진격리장치의 설계변위인 20 cm 와 그 2배와 3배인 40 cm, 60 cm로 가정을 하였다.



(a) Soil Case A1



(b) Soil Case C1

Fig. 7. Seismic Fragility Evaluation based on Soil-Isolator-Structure Interaction Analysis

Table 4. Median &amp; Logarithmic Standard Deviation

|              |            | 20cm | 40cm | 60cm |
|--------------|------------|------|------|------|
| Soil Type A1 | Median (g) | 1.40 | 2.06 | 2.93 |
|              | Log. S.D.  | 0.55 | 0.32 | 0.35 |
| Soil Type C1 | Median (g) | 1.04 | 1.58 | 2.05 |
|              | Log. S.D.  | 0.78 | 0.60 | 0.43 |

### 5.3 지진 취약도 평가

지반-지진격리장치-구조물 상호작용해석 결과를 바탕으로 지진 취약도 평가를 수행 하였으며 그 결과를 Fig. 7과 Table 4에 정리 하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 입력지진에 의한 격납건물의 파괴확률이 PGA가 증가함에 따라 같이 증가하는 것을 확인 할 수 있으며, 같은 지반을 고려하였을 경우 파괴기준의 Seismic Gap이 커질수록 파괴확률이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 지반 A1과 C1의 결과를 비교하면 지반의 영향으로 지반 C1의 파괴확률이 지반 A1보다 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 4에서는 파괴기준의 Seismic Gap이 커짐에 따라 PGA 중앙값이 커짐을 알 수 있다. 또한 지반의 영향으로 지진 취약도 곡선에 변화가 생기는 것을 알 수 있다. 지반 A1과 C1의 결과를 비교하면 지반의 영향으로 상대적으로 연약지반인 C1의 PGA 중앙값이 작으며 대수 표준편차는 큰 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 지진격리시스템이 적용된 원자력 발전소 격납건물에 대해 지진 해석을 수행하여 지진 취약도를 평가하였다. 지진 해석은 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램인 SASSI를 이용하여 지반-지진격리장치-구조물 상호작용 효과를 고려하였다. 해석 대상은 원자력 발전소 격납 건물에 대상으로 하였으며, 지진격리장치는 ASCE7[13]과 FEMA 451[14]을 참

고하여 설계 되었다. 지진격리장치의 비선형성을 고려하기 위하여 지진격리장치의 유효강성과 유효감쇠를 구한 후 선형화 하여 반복 해석을 하였다. 지진격리시스템이 적용된 원전 격납건물은 지진 발생 시 지진격리/비지진격리 구조물의 인터페이스 파괴가 발생할 수 있으므로 파괴모드를 지진격리시스템과 Hard Stop의 충돌을 주요 파괴모드로 가정 하였다. 따라서 Seismic Gap에 의한 파괴기준을 가정하고 각 지반 범주 A1과 C1에 대하여 지진 취약도 평가를 수행하였다. 또한 지진격리시스템은 상대적으로 지반 C1 보다 견고한 지반인 A1에서 그 성능이 향상 된 것을 확인할 수 있었다.

### / 감사의 글 /

본 논문은 2010년도 및 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010T100101085 & 2011T100200080) 또한 부분적으로 2011년도 연구재단의 “Global Ph.D. Fellowship” 지원을 받았습니다.

### / REFERENCES /

1. Lee SH, Lee YS. Application Plan of Seismic Isolation System for APR 1400. Proceedings of the earthquake engineering workshop, EESK, 2010.
2. R Ivan Skinner, William H Robinson, Fraeme H McVerry. *An Introduction to Seismic Isolation*. New York: John Wiley & Sons, INC; c1993.
3. Jun YS. Technical Review of Seismic Isolation Systems for NPP Application. Proceedings of the earthquake engineering Workshop, EESK; 2010.
4. Bozidar Stojadinovic. *Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facility Structure*. UC Berkeley. 2011.
5. Alessandro Martelli, Paolo Masoni, Massimo Forni, Maurizio Indirli, Bruno Spadoni, Giacomo Di Pasquale, Vittorio Lucarelli, Tito Sano,

- Giuseppe Bonacina, Aldo Castoldi, ENEA activities on seismic isolation of nuclear and non-nuclear structures, *Nuclear Engineering and Design*, 1991;127:265-272.
6. Japan Electric Association, *Technical Design Guide for Seismic Isolation of Nuclear Power Facilities*, JEAG4614-2000;2000.
7. Choi IK, Seo JM, Inelastic Energy Absorption Factor for the Seismic Probabilistic Risk Assessment of NPP Containment Structure, *EESK J. Earthquake Eng.* 2001;5(5):47-56.
8. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan 3,7,2 Revisoion 3, NUREG-0800;2007.
9. Eem SH, Jung HJ, Seismic Analysis of Base-Isolated Nuclear Containment Building Considering Soil-Structure Interaction Effect Conference on earthquake engineering, *EESK*, 2012;189-192.
10. U.S. Nuclear Regulatory Commission 1,208, *A Performance-Based Approach to Define The Site-Specific Earthquake Ground Motion*; 2007.
11. Combustion Engineering, *System80+ Standard Design*, U.S. Department of Energy;1990.
12. A. M. Kammerer, A. S. Whittaker, M. C. Constantinou,., *Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities*, NUREG; 2012.
13. ASCE/SEI, ASCE/SEI 7-10 : Minimum DDesign Loads for Buildings and Other Structures;2010.
14. National Institute of Building Sciences, NEHRP Recommended Provisions (FEMA451);2006.
15. AASHTO, Guide Specifications for Seismic Isolation Design 3rd Editions;2010.
16. Kim HU, Park DH, A Parametric Study on Preliminary Design of the Seismic Isolation System for NPP. Conference on earthquake engineering, *EESK*;c2012.
17. Farzad Naeim, James M. Kelly, *Design of Seismic Isolated Structures*, New York: John Wiley & Sons, INC;c1999.
18. Lysmer J, Ostadan F, Tabatabaie M, Vahdani S, Tajirian F, A System for Analysis of Soil-Structure Interaction, Theoretical Manual, Berkeley: University of California;c1988.
19. Caughey TK, Equivalent Linearization Techniques, *Journal of the Acoustical Society of America*, 1963;35(11):1706-1711.
20. Shinozuka M, Feng MQ, Kim HK, Ueda T, Statistical Analysis of Fragility Curves, Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, New York;2002.
21. Yi JH, Youn JY, Yun CB, Seismic Risk Assessment of Bridges Using Fragility Analysis, *EESK J. Earthquake Eng.* 2004;8(6):31-43.