

## 반복법을 이용한 면진적용 원전구조물의 지반-구조물 상호작용 해석

## Soil-Structure Interaction Analysis for Base-Isolated Nuclear Power Plants Using an Iterative Approach

한승룡<sup>1)\*</sup> · 남민준<sup>1)</sup> · 서춘교<sup>1)</sup> · 이상훈<sup>1)</sup>Han, Seung Ryong<sup>1)\*</sup> · Nam, Min Jun<sup>1)</sup> · Seo, Choon Gyo<sup>1)</sup> · Lee, Sang Hoon<sup>1)</sup><sup>1)</sup>한국전력기술 미래전력기술연구소<sup>1)</sup>KEPCO-E&C, Power Engineering Research Institute

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

The nuclear accident due to the recent earthquake in Japan has triggered awareness of the importance of safety with regard to nuclear power plants (NPPs). An earthquake is one of the most important parameters which governs the safety of NPPs among external events. Application of a base isolation system for NPPs can reduce the risk for earthquakes. At present, a soil-structure interaction (SSI) analysis is essential in the seismic design of NPPs in consideration of the ground structure interaction. In the seismic analysis of the base-isolated NPP, it is restrictive to consider the nonlinear properties of seismic isolation devices due to the linear analysis of the SSI analysis programs, such as SASSI. Thus, in this study, SSI analyses are performed using an iterative approach considering the material nonlinearity of the isolators. By performing the SSI analysis using an iterative approach, the nonlinear properties of isolators can be considered. The difference between the SSI analysis results without iteration and SSI with iteration using SASSI is noticeable. The results of the SSI analysis using an effective linear (non-iterative) approach underestimate the spectral acceleration because the effective linear model cannot consider the nonlinear properties of isolators. The results of the SSI analysis show that the horizontal response of the base-isolated NPP is significantly reduced.

Key words: Base isolation, Soil-Structure Interaction (SSI), Iterative approach, SASSI2010

## 1. 서론

최근 일본의 원자력 발전소(원전) 사고 등으로 원자력 발전소의 지진 안전성에 대한 문제가 꾸준히 제기되고 있다. 중약진 지진지역인 우리나라에서는 지진에 대한 대비가 부족하다는 의견이 많았지만, 현재의 내진설계 기준도 과하다는 의견도 동시에 제기되어 왔다. 하지만, 사고 시 피해로 인한 파급효과를 가늠할 수 없을 정도인 원자력 발전소에 대한 내진설계는 무엇보다 안전성이 최우선이 되어야 한다는 의견에는 반론을 제기하기 힘들다. 따라서, 해외 강진지역의 원자력 발전소 내진설계는 물론, 국내 원자력 발

전소의 내진설계는 안전성을 최우선으로 최악의 경우를 대비하여 이루어져야 한다. 원자력 발전소에 면진시스템 적용은 그 대표적인 해결책이 될 수 있으며, 실제 해외 원자력 발전소 및 연구용 원자로에 면진시스템이 적용된 사례를 찾을 수 있다. 면진시스템은 그 동안 건축물 및 교량 등에 주로 적용되어 왔으며, 해외 여러 지역에서 지진에 대한 구조물 격리 효과는 충분히 입증되어 왔다. 원자력 발전소의 설계에 있어서는 단순 지진가속도의 크기보다는 다양한 진동수 대역의 응답치의 변화를 고려하여야 하기 때문에, 면진시스템을 적용한 원자력 발전소의 지진해석에 대한 심도 깊은 연구는 필수적이다.

현재, 원자력 발전소 내진설계를 위한 지진해석은 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction; SSI)을 고려한 지진해석을 통해 이루어진다. SSI를 고려한 지진해석은 신고리 5, 6호기 이후 원자력 발전소 설계에

\*Corresponding author: Han, Seung Ryong

E-mail: hoanung@kepc0-enc.com

(Received 15 July 2014; Revised 12 September 2014; Accepted 12 September 2014)

서부터 본격적으로 고려되었고, 내진 1등급에 해당하는 주요 원전 시설물을 대상으로 이루어지고 있다. 지금까지 원전의 내진설계분야에서 선형거동으로 가정하여 적용되었던 SSI 해석은 면진장치의 비선형 효과를 고려하는데 있어서 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 반복법을 적용하여, 면진장치의 비선형성과 SSI를 고려한 등가선형 지진해석을 수행하고, 선형 및 비선형(반복법을 적용한 등가선형) 해석 결과를 비교하여, 면진적용 효과와 지진 응답의 변화를 확인하고자 한다. 본 방법은 현재 연구 개발 중인 면진적용 APR1400 원전에 적용되며, 여러 지반조건에 대한 구조물의 지진 응답을 구하는데 사용된다. 과거 본 해석법은 SSI 해석에 널리 사용된 구 SASSI 계열 (a System for Analysis of Soil-Structure Interaction, [1]) 프로그램을 사용하여 이루어졌다. 그러나, 오랜 해석 시간으로 인하여 사용상에 어려움이 많았다. 본 연구에서는 Solver 개선과 병렬처리 기능을 장착한 SASSI2010을 사용하였고, 몇 번의 반복적 SSI 해석으로 인해 많은 시간을 필요로 하는 해석 시간의 단축을 꾀하였다. 또한 본 논문에서 그 적용 방법을 소개하고 향후 중요 구조물 지진해석 분야에 응용을 기대한다.

## 2. 면진적용 원전의 SSI 해석

원자력 발전소의 내진설계는 SSI 해석을 통해 구조물에 작용하는 지진 하중을 산정하고, 위치별 층응답스펙트럼(FRS, Floor Response Spectrum)을 산출하는 지진해석을 통해 이루어진다. 안전을 중요시하는 원자력 발전소의 지진해석은 구조물 자체의 동적 거동을 고려하는 것은 물론, 구조물을 지지하고 있는 지반과의 동적 상호작용으로 인한 동적 응답 증폭 효과를 필수적으로 고려하여야 한다. 이러한 기준은 원전 심사지침인 Standard Review Plan(SRP) 3.7.2[2] “Seismic System Analysis”에 기술되어 있다. SRP 3.7.2에는 지반 조건이 전단파속도 8,000ft/s(2,400m/s) 이상일 경우에는 고정지반 해석으로 수행할 수 있지만, 그 이외의 경우에는 지반 조건을 고려한 SSI 해석이 이루어져야 한다고 기술하고 있다. 따라서, 대부분의 원자력 발전소의 지진해석은 SSI를 고려한 지진해석이 필수적으

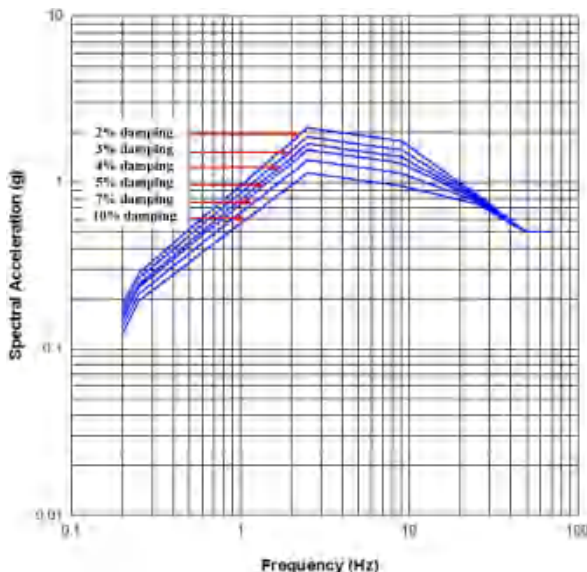
로 수행된다.

이러한 SSI 해석은 SASSI 계열의 프로그램을 통해 이루어진다. 현재 많이 사용되고 있는 SASSI2000은 복잡한 원전 구조물과 지반을 모델링할 경우 하나의 해석 케이스에 대해서도 많은 해석 시간을 필요로 한다. 지진 입력방향, 지반의 불확실성(중간값, 상한치, 하한치), 균열검토 등 다양한 해석 케이스에 대해 이루어지는 원전 지진해석에서 해석 프로그램의 속도는 원전 설계에 있어 많은 시간을 소요하는 하나의 원인이 된다. SASSI2010은 기존 SASSI2000보다 많은 기능이 추가되었으며, 해석 속도에 있어서도 획기적인 개선이 이루어졌다. 아직 국내에 활용된 실적은 없지만 해외 유수 기관에서 프로그램 검증·활용이 이루어지고 있다. 일반 원전 지진해석과 달리, 면진적용 원전의 지진해석은 면진장치의 비선형 거동 특성을 고려해야 한다. 그러나, 기존 국내 관련 연구는 면진장치를 등가선형화하여 지진 해석을 수행하고, 면진적용 효과를 확인한 것이 대부분이다.

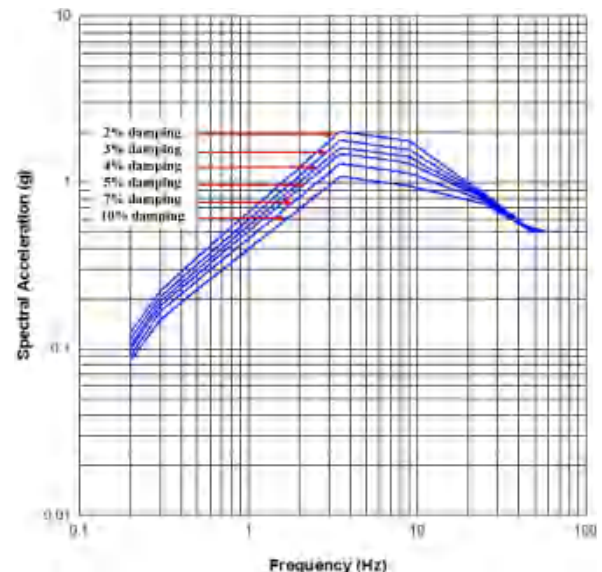
선형 해석 프로그램인 SASSI 계열 프로그램을 이용해 면진장치의 비선형 형성을 고려하는 방법의 하나로서, 반복법을 통한 면진장치의 비선형 거동 응답 계산방법이 제안된다. 기존의 SASSI2000을 사용할 경우, 해석 소요 시간의 제약으로 반복적 해석을 통한 실제 원전의 지진해석은 불가능에 가깝다. 따라서, 본 해석에서는 SASSI2010을 활용하여, 실제 면진적용 원전의 지진해석 수행시간을 대폭 단축하면서 지진응답계산 결과를 얻었다.

### 2.1. 입력지진

면진적용 원전의 지진해석을 수행하기 위한 입력지진 작성은 국내의 규제기준을 만족하여야 한다. 면진적용 원전의 설계응답스펙트럼은 미국 Reg. Guide 1.60[3]을 기반으로 하여, 고진동수 대역(9 Hz~50 Hz)을 강화하여 작성되었다. 작성된 설계응답스펙트럼을 바탕으로 면진적용 원전의 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake; SSE) 및 영주기가속도(Zero Period Acceleration; ZPA)를 0.5g로 설정하고, 각 진동수 대역의 지반가속도값을 스케일링하여 작성하였다. Fig. 1은 감쇠비 2, 3, 4, 5, 7 및



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

Fig. 1. Design ground response spectrum (Damping ratio 2, 3, 4, 5, 7 and 10%)

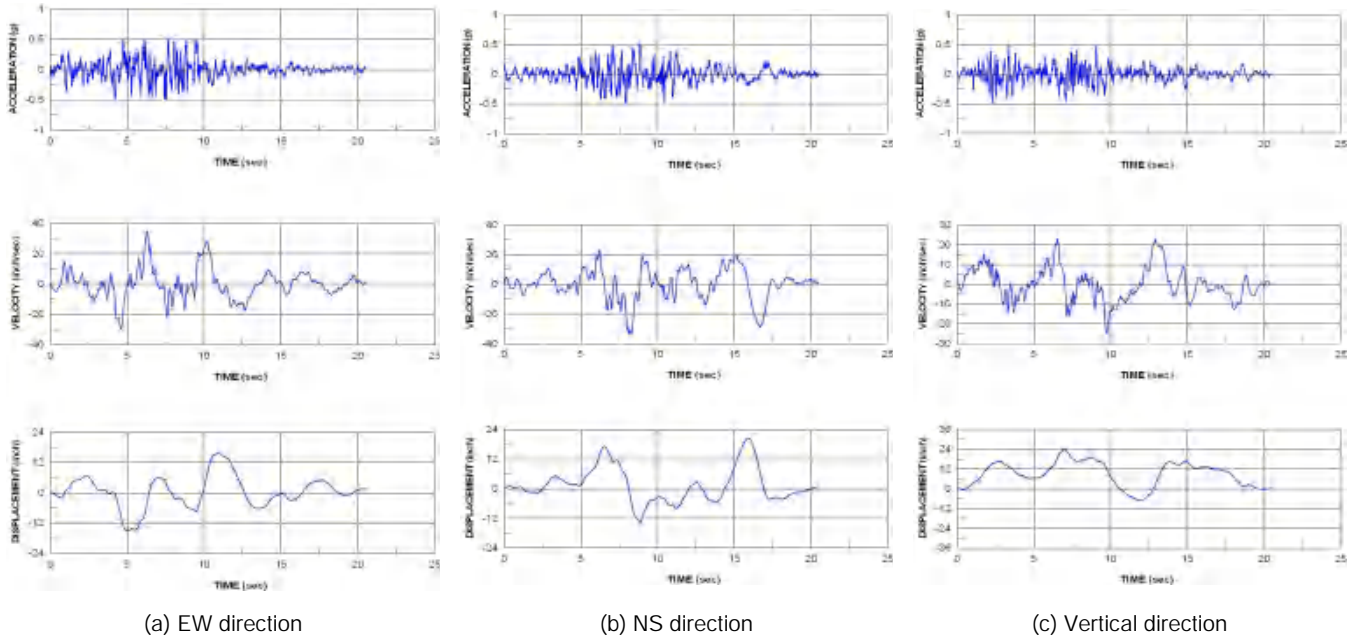


Fig. 2. Design time histories

10 %에 대한 수평 및 수직방향 설계응답스펙트럼을 나타낸다. 미국 기준과 별도로 유럽 지역의 설계 기준에 따른 입력지진도 고려되었지만, 본 연구에는 기록하지 않았다.

지진해석을 위한 지진입력운동은 설계응답스펙트럼에 상응하도록 작성되었다. 동서방향, 남북방향 및 수직방향 성분으로 작성된 시간이력은 U.S. NRC SRP 3.7.1[4] “Seismic Design Parameters” 을 만족하도록 작성되었다. U.S. NRC SRP 3.7.1에 기술된 시간이력 각 방향의 독립성, 강진지속시간, 작성 시간이력의 변동성, 각 감쇠비별 설계응답스펙트럼의 포괄여부, PSD(Power Spectral Density) 등의 요건을 만족한다. 지진입력운동은 원시가속도 시간이력을 바탕으로 Wavelet 함수를 적용시켜 설계응답스펙트럼을 포괄하도록 조정되며 작성되는데, 이러한 조정작업은 (주)한전기술이 독자 개발한 전산프로그램 OPTIME[5]을 사용하여 수행되었다. Fig. 2는 동서방향, 남북방향 및 수직방향 성분으로 작성된 최종 시간이력을 나타낸다.

## 2.2 부지 및 지반 조건

면진적용 원전의 건설 가능성을 고려했을 때, 다양한 지반 조건에 따른 응답 변화를 고려하여야 한다. 미국NRC 규정을 만족하는 포괄부지 조건은 다양한 지반 조건을 규정하고 있어, 면진적용 APR1400의 지진해석을 위한 지반조건에 적당할 것으로 판단된다. 고려된 지반 조건은 총 10개의 지반(9개 지반 조건과 1개 고정지반)으로, 연약한 지반부터 단단한 암석 지반까지 다양한 지반조건을 정의하고 있다. Fig. 3은 9개의 지반 조건(S1~S9)에 따른 깊이별 전단파속도를 나타낸다. 각 지반 분류에 따른 지반 지배진동수는 1.2 Hz부터 12 Hz까지 고르게 분포되어 있다(S1:1.2 Hz, S2:1.6 Hz, S3:2.3 Hz, S4:4.6 Hz, S5:9.6 Hz, S6:12 Hz, S7:6.1 Hz, S8:6.8 Hz, S9:11 Hz). 부지응답해석(Site Response Analysis)은 SHAKE91 프로그램을 이용하여 수행되었으며, 그 결과를 바탕으로 SSI 해석이 수행되었다.

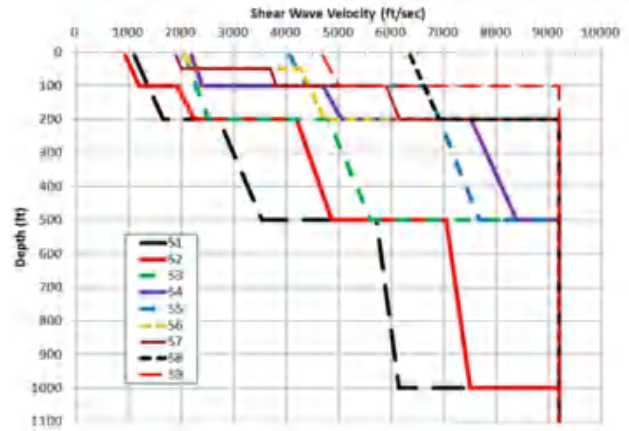


Fig. 3. Shear wave velocity for 9 generic soils

## 2.3 면진장치 및 해석 모델

면진적용 APR1400 개발에는 고무 계열의 면진장치와 마찰 계열의 면진장치가 고려되고 있다. 본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 LRB(Lead Rubber Bearing) 면진장치를 적용한 지진해석 결과를 수록한다. LRB 면진장치는 고무의 비탄성 거동과 납봉의 소성 거동 특성으로 인해 비선형 거동을 따르게 된다. 따라서, LRB 면진장치의 하중-변위 관계에 따른 비선형 이력 거동을 모사하는 것은 면진 적용 구조물의 거동 파악에 큰 영향을 주게 되는데, 해석 프로그램의 기능 및 해석 시간의 제약으로 인해 면진장치를 등가선형화하여 사용하게 된다. 보다 정확한 해석을 위해 Bilinear 모델, 복잡하지만 방향성을 고려할 수 있는 Bouc-Wen 모델[6] 등을 사용하여 면진장치를 모사하기도 한다. 일반 구조물의 구조해석 및 지진 해석에서는 면진장치의 비선형 거동 특성을 등가선형화하여 사용하고 있는데, 특히 SSI 해석에서는 선형 프로그램인 SASSI 계열 프로그램 특성상



Table 1. Specification of isolation devices and load vs. displacement curve

Parameters	Values
$K_1$ : Initial stiffness	4814.19 kip/ft (7164.304 tonf/m)
$K_2$ : Second stiffness	481.419 kip/ft (716.430 tonf/m)
$F_y$ : Maximum Strength	104.575 kip (47.434 tonf)
$Q_d$ : Characteristic strength	94.118 kip (42.691 tonf)
$D$ : Maximum displacement	0.984ft (29.992 cm)
$K_{eff}$ : Effective stiffness	522.418 kip/ft (777.444 tonf/m)
$\xi_{eff}$ : Equivalent damping ratio	0.256

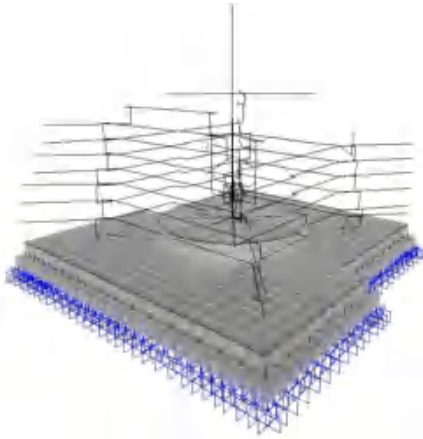
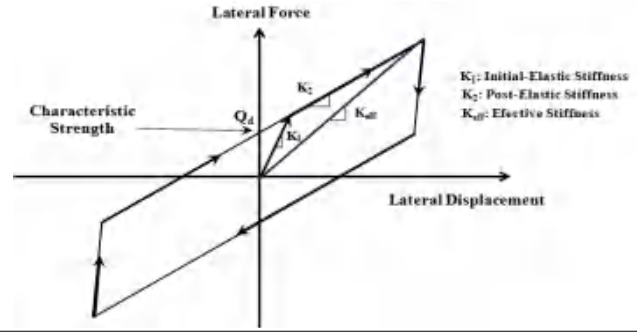


Fig. 4. Beam-stick model for the base-Isolated APR1400

등가선형화하여 사용하여야 하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 반복법을 적용한 SSI 해석을 통해 면진장치의 비선형성을 근사적으로 묘사할 수 있다.

반복법을 이용한 SSI 해석을 수행하기 위한 면진장치 모델은 Bilinear 모델을 사용한다. 해석에 사용된 면진장치의 Bilinear 모델 및 물성치는 Table 1에 나타나 있다. Bilinear 모델을 바탕으로 변위(D)에 상응하는 Bilinear 모델의 강성( $K_{eff}$ )을 산출하고, 반복적 해석을 통해 Bilinear 모델에 상응하는 최종 강성 및 응답을 산출하게 된다. 반복적 해석에 대한 자세한 흐름은 다음 절에 기술한다.

등가선형 SSI 해석은 Bilinear 모델을 바탕으로 등가선형으로 치환하여 해석이 수행되었다. Table 1에 나와 있는  $K_{eff}$  값과 상응하는 물성치를 사용하여 해석이 수행되었다. 이렇게 비선형 거동을 보이는 면진장치를 등가선형으로 묘사하여 면진작용 원전의 지진해석을 수행할 경우, 면진장치의 비선형 거동을 간과하여 전체적인 응답에 있어 큰 차이를 보일 수 있다. 본 연구는 등가선형 SSI 해석 결과와 반복법을 적용했을 때의 응답을 비교하여 등가선형 SSI 해석의 문제점을 파악하고, 반복법을 적용했을 때의 비선형 응답의 특성을 설명한다.

지진해석에 사용된 해석모델은 APR1400을 바탕으로 원자로건물, 보조건물, 면진장치, 페테스탈, 상·하부 기초로 구성되어 있다. 지진응답을 산출하는 본 연구의 특성상 상부구조물은 집중질량 보요소 모델로 이루어졌다. Fig. 4는 지진해석에 사용된 면진작용 APR1400 해석모델을 나타낸

Table 2. Natural period and frequency for the base-isolated APR1400

Mode	Natural Period (sec)	Natural Frequency (Hz)	Dominant Mode
1	2.313	0.432	EW direction
2	2.312	0.432	NS direction
3	2.441	0.446	Torsional

다. 해석모델의 특성을 파악하기 위해 Table 2에 모드해석에 대한 결과를 나타낸다. 전체 구조물의 수평방향 고유주기(Natural Period)는 약 2.3초로 파악되었다.

## 2.4 등가선형 해석

면진작용 원전의 SSI 해석을 수행하는데, 면진장치를 등가선형화하여 단일 해석을 먼저 수행하였다. 일련의 과정은 등가선형화한 물성치를 기반으로 SASSI2010을 이용하여 해석을 수행하였고, 반복법을 적용한 결과와 상호 비교하여 면진장치의 등가선형화를 통한 해석 결과의 한계를 설명한다. SASSI 계열의 프로그램을 사용하여 등가선형 SSI 해석을 수행하기 위해서는 면진장치 단면 물성치를 산출하여야 한다. 등가선형화한 면진받침의 수평방향 및 수직방향 유효강성을 기반으로 단면 2차 모멘트( $I_{33}$ ,  $I_{22}$ ), 비틀림 모멘트( $J$ ), 단면적( $A$ ), 전단면적( $A_s$ )을 산출하였다. 식(1)과(2)는 그 산출식을 나타낸다.

$$K_{eff} = \frac{12EI}{l^3} \Rightarrow I_{33} = I_{22} = \frac{K_{eff} \times l^3}{12E} \quad (J \approx 2I) \quad (1)$$

$$K_v = \frac{EA}{l} \Rightarrow A = \frac{K_v \times l}{E} \quad (A_s \approx 0.9A) \quad (2)$$

## 2.5 SASSI2010을 통한 반복법

기존의 원전 구조물 SSI 해석은 해석 용량 및 해석 시간의 제약으로 반복법을 적용할 엄두를 내지 못하였다. 기존 국내 연구[7]에서 반복법을 적용하여 SSI 해석을 수행한 연구가 있지만, 실제 건설 원전을 위한 지진해석 규 제기준을 적용하지 않거나 일부 원전 건물만을 고려하여 해석을 수행하였

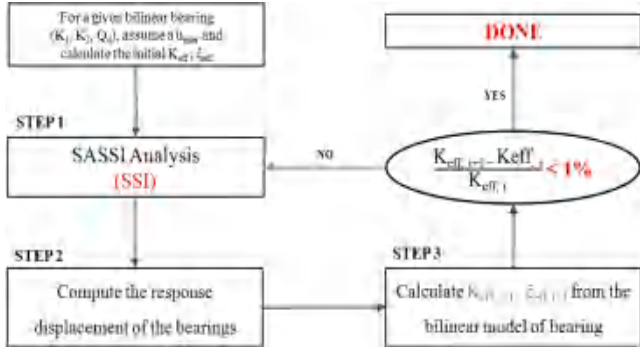


Fig. 5. Procedure for SSI analysis using an iterative approach

다. 원자로건물과 보조건물의 기초가 공통기초(Common basemat)로 구성되어 있는 APR1400 원전의 경우, 원자로건물과 보조건물을 포함한 공통기초 부분에 면진시스템을 적용하므로 기존의 SASSI 계열 프로그램으로는 해석 용량 및 해석 시간에 많은 제약을 받게 된다. 따라서, 해석 기능 및 해석 시간이 비약적으로 개선된 SASSI2010을 사용하여 SSI 해석을 수행하고, 실제 건설 원전에서의 적용 가능성을 확인하였다. 반복법은 대표적으로 부지응답해석에 많이 사용되는 방법으로, 선형해석의 반복 수행을 통해 비선형성을 갖는 구조물에 적용되는 방법이다. 지반모델의 경우, 반복 수행을 통해 지반의 유효특성이 계산된다[8]. 본 연구에서는 이와 같은 접근법을 면진 적용 원전에 적용하여 면진장치의 비선형성을 고려한 SSI 해석을 수행하고자 한다. Fig. 5는 면진 적용 원전의 반복법을 통한 SSI 해석 흐름도를 보여주고 있다. 기존 반복법과 다른 점은 반복적 해석을 통해 구현하고자 하는 대상이 면진 장치가 되고, 수렴성을 확인하는 기준이 변위 대신 유효강성이 되는 것이다. 이는 면진장치의 거동 특성상, 2차 강성( $K_2$ )의 기울기가 비교적 크기 때문에 변위를 통해 수렴성을 확인할 경우, 변위 수렴 범위 내에 포함되어 있다 할지라도 하중의 변이폭이 클 수 있기 때문이다.

SASSI2010을 통한 Iterative approach의 상세한 절차는 아래와 같다.

- 단계 1, 초기해석 : 일반적인 SASSI 해석 수행 절차와 마찬가지로 SITE, POINT, HOUSE, ANALYS, MOTION 모듈을 사용하여 해석 수행 후, STRESS 모듈을 통해 면진장치(LRB)에 작용하는 방향별 작용력  $P_1, P_2, P_3$ 를 산출한다. STRESS 모듈의 입력치는 Fig. 6과 같이 면진장치의 부재력을 산출하기 위해 INPUT과 같이 입력한다. 수평 방향 유효강성을 계산하기 위한 P값은 Fig. 6의 OUTPUT 파일에서  $P_2, P_3$ 를 사용한다.
- 단계 2, 베어링의 최대응답변위( $u_{max}$ ) 계산 : 최대응답변위( $u_{max}$ )는 STRESS 모듈을 통해 구해진 면진장치 작용력( $P_x$ )과 초기강성( $K_{eff}$ )으로 구해진다. 초기응답변위는 첫 단계의 최대응답변위  $u_{max} = P_x / K_{eff}$ 이다.
- 단계 3, 개선된 면진장치의 유효강성( $K_{eff,i+1}$ ) 및 감쇠비( $\xi_{eff,i+1}$ ) 계산 : 개선된 유효강성( $K_{eff,i+1}$ )은 단계 2에서 구해진 초기응답변위( $u_{max}$ )와 면진장치의 해당 강성( $K_2$ ), 강도( $Q_d$ )으로 식 (3)을 통해 구해진다. 유효감쇠비( $\xi_{eff,i+1}$ )는 식 (4)를 통해 구한다.

## INPUT

```

1  STRESS
1  0  0
2  4  1
223 222222222222 0
4096 4096 0.005 0.5 0
0
  
```

## OUTPUT

```

■ STRESS - STRESS

COMPUTED STRESSES / FORCES / MOMENTS

*****
3D BEAM ELEMENT      ELEMENT NO= 223      ELEMENT GROUP= 4

NODE NO= 2956

P1(MAX)= -0.2876E+01
P2(MAX)= -0.3907E+03
P3(MAX)=  0.3507E+01
M1(MAX)=  0.0000E+00
M2(MAX)= -0.1754E+01
M3(MAX)= -0.1953E+03

NODE NO= 3585

P1(MAX)=  0.2876E+01
P2(MAX)=  0.3907E+03
P3(MAX)= -0.3507E+01
M1(MAX)=  0.0000E+00
M2(MAX)= -0.1753E+01
M3(MAX)= -0.1953E+03
  
```

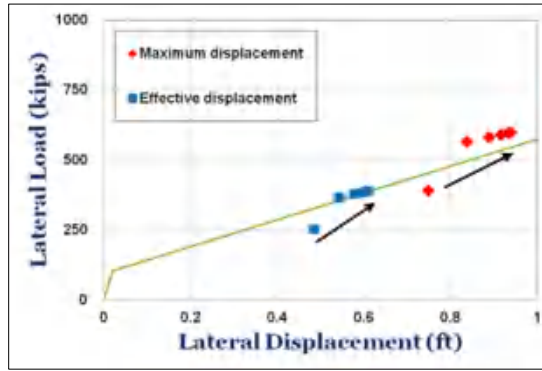
Fig. 6. Input and Output for the STRESS module of SASSI2010

$$K_{eff,i+1} = \frac{Q_d + K_2 u_{eff}}{u_{eff}} \quad (3)$$

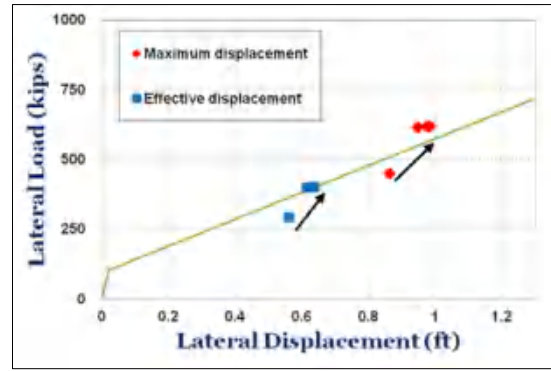
$$\xi_{eff,i+1} = \frac{4(u_{eff} - D_y) Q_d}{2\pi(K_2 u_{max} + Q_d) u_{eff}} \quad (4)$$

여기서,  $D_y$ 는 힘-변위 관계 이력곡선에서 구한  $Q_d/(K_1 - K_2)$ 에 의해 계산이 되고, 유효변위  $u_{eff}$ 는 단계 2에서 구해진  $u_{max}$ 의 0.65배[9]로 정의된다.

- 단계 4, SASSI의 HOUSE 모듈 업데이트(베어링요소 특성) : 단계 3에서 계산된 유효 감쇠비( $\xi_{eff,i+1}$ )와 유효강성( $K_{eff,i+1}$ )을 통해 베어링요소의 단면이차모멘트( $I$ ) 및 비틀림 상수( $J$ )를 재계산하여, HOUSE 모듈의 면진장치 특성을 업데이트한다.
- 단계 5, 업데이트된 면진장치 특성으로 SSI 해석 재수행 : 초기해석에 사용하였던 SITE, POINT, ANALYS, MOTION, STRESS 입력파일과 업데이트된 HOUSE 모듈을 통해 SSI 해석을 재수행한다. 단계 2 ~ 단계 5까지 반복 수행하여, 유효강성  $K_{eff}$  오차(%)가 1% 미만이면 반복 과정을 종료한다.



(a) EW direction



(b) NS direction

Fig. 7. Load vs. displacement convergency pattern of isolation devices through iterative analysis

### 3. 반복법을 적용한 SSI 해석결과

#### 3.1 면진장치의 힘-변위 곡선

면진적용 APR1400에 대해 반복법을 적용하여 SSI 해석을 수행하였다. 전 절에서 기술한 방법으로  $(K_{eff,i+1} - K_{eff,i}) / K_{eff,i}$ 가 1% 미만일 때까지 반복 해석을 수행하였고, 각 방향과 10개의 지반 조건에 대해 해석을 수행하여 각 조건에 따른 응답을 산출하였다. 본 연구에서는 지반조건 S4와 고정 지반 조건의 비교를 통해 SSI 효과를 보이고, 원자로 건물에 대한 수평방향 응답을 수록하여 비교하였다.

Fig. 7은 수평 방향에 대해 면진장치의 힘-변위 수렴 추이를 나타낸다. ◆는 최대응답변위(Maximum displacement)의 변화 추이를 나타내고, ■는 유효 강성에 따른 유효응답변위(Effective displacement)의 변화 추이를 나타낸다. 반복 해석 절차가 진행될수록 면진장치의 Bilinear물성 특성에 수렴하고 있다는 것을 볼 수 있다. 유효응답변위는 최대응답변위의 0.65배로 정의되어 유효응답변위에 상응하는  $K_{eff}$ 를 바탕으로 수렴여부를 확인하였다. 최종 수렴을 마쳤을 때의 최종 변위는 약 0.6ft (0.183m)인 것을 알 수 있다. 실제 등가선형 강성을 사용했을 때, 즉 첫 번째 최대응답변위보다 최종 수렴 상태에서의 유효응답변위가 더 적은 것을 알 수 있다. 이는 면진장치의 비선형성을 고려해 반복법을 적용했을 때, 등가선형화한 결과보다 더 낮은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 반복법을 적용한 최종 시간이력 및 가속도 응답은 다음 절에서 확인할 수 있다.

#### 3.2 지진해석 응답

반복법을 수행하여 최종 수렴 상태에서 지진해석 응답을 산출하였다. 먼저, Fig. 8과 같이, 시간 영역에서 가속도 응답을 확인하고 면진 적용으로 인한 가속도 응답 감소를 확인하였다. 면진장치를 지지하고 있는 페데스탈 하부에서의 지진입력과 원자로 건물(RCB) El.(Elevation) 78' (23.774m) 지점에서 비교하였을 때, 최대 0.5g의 지진가속도가 약 0.2g로 감소한 것을 확인할 수 있다. 면진으로 인한 지진가속도 저감 효과는 반복법을 적용하지 않았을 경우(Non-iteration)와 반복법을 적용했을 경우(Iteration) 모두 확인되었지만, 두 결과는 다음과 같은 점에서 차이를 보였다. 반복법을 적용

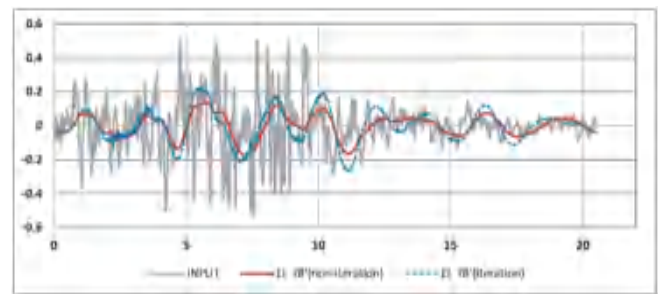
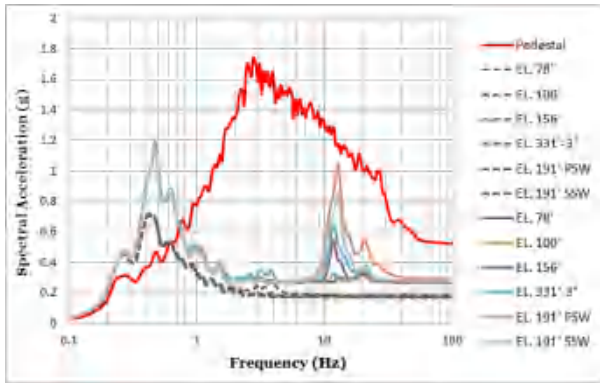


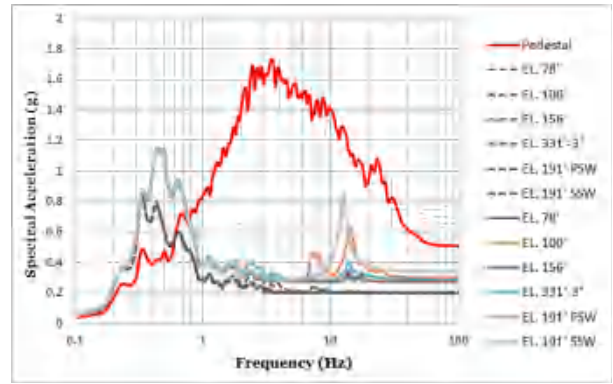
Fig. 8. Comparison between responses with iteration and non-iteration at El. 78' of RCB

했을 경우가 적용하지 않았을 경우보다 최대 가속도가 더 큰 것을 알 수 있다. 이를 더 정확히 확인하기 위해, Fig. 9에서와 같이 진동수 영역에서 가속도 응답을 확인하였다. Fig. 9는 고정지반과 S4 지반에 대해, 페데스탈 하부에서의 응답(실선, 적색), 반복법을 적용하지 않은 SSI 지진해석 El. 별 응답(점선, 회색), 반복법을 적용한 SSI 지진해석 El. 별 응답(실선, 유색)을 나타낸다. 반복법을 적용하는 경우와 적용하지 않았을 경우 모두, 페데스탈 하부에서의 응답에 비해 약 0.8 Hz 이상 진동수 대역에서는 낮은 응답 가속도를 보여 면진적용 효과에 따른 지진가속도 저감 양상을 확연히 보여준다. 전반적인 응답을 비교했을 때, 반복법을 적용하지 않은 경우는 전 진동수 대역에 걸쳐 낮은 응답을 보여주며, 약 0.4 Hz 대역의 1차 증폭은 확인한 반면 2차 증폭이 관찰되지 않았다. 그러나, 반복법을 적용한 경우에는 면진적용 효과는 확실하지만, 반복법을 적용하지 않은 경우보다 전반적으로 응답이 다소 크고, 약 10 Hz 근처에서 2차 증폭을 보이는 양상이 뚜렷하다. 이는 면진장치의 등가선형화를 통해 하나의 강성값( $K_{eff}$ )으로 인해 한 곳에서 응답 증폭이 관찰된 반면, 면진 장치의 Bilinear 모델을 고려한 반복해석에서는 2차 강성( $K_2$ )의 영향으로 두 번째의 응답 증폭이 관찰된 것이다. Fig. 9의 (c), (d)는 S4 지반에 대한 응답가속도 비교를 보여주는데, 고정지반 경우와 달리, SSI 해석에 대한 영향으로 면진장치 하부 페데스탈의 응답이 다른 것을 볼 수 있다. 이렇게 다양한 지반에 대한 SSI 해석으로 인해 가속도 응답 양상이 다른 것을 확인할 수 있었고, 반복법을 적용한 SSI 해석의 경우 일부 지반 조건에서는 2차 증폭의 영향이 무시할 수 없을 정도로 큰 양상을 확인하였다. 이는 면진적용 원전의 지진해석시 등가선형화를 적용한 해석은 반복법을 적용하여 면진장치의 비선형 거동을 고려한 지진해석시보다 낮은

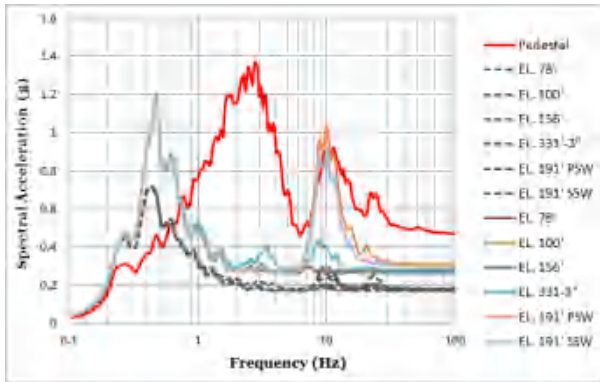




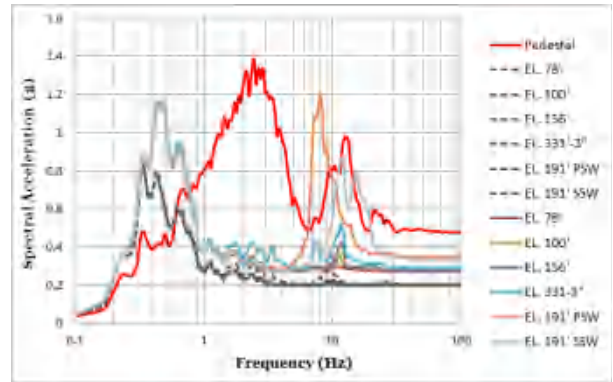
(a) EW direction (Rigid soil)



(b) NS direction (Rigid soil)



(c) EW direction(S4 soil)



(d) NS direction (S4 soil)

Fig. 9. Comparison of spectral acceleration by the SSI analyses at each elevation of RCB

응답을 보여 내진설계를 위한 층응답스펙트럼 산출시 지진응답가속도가 과소평가될 수 있다는 것을 보여준다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 반복법을 사용하여 면진 적용 APR1400의 SSI 지진해석을 수행하였다. 원전 내진설계에서, 기존 SSI 지진해석 분야에 가장 많이 적용되는 SASSI 계열 프로그램을 사용하여 본 연구가 진행되었다. 성능이 향상된 SASSI2010을 사용하여 면진적용 원전에서의 SSI 지진해석 적용 가능성을 확인하였고, 여러 번의 반복 수행이 필요한 반복법을 적용하여 면진장치의 비선형성을 고려한 SSI 해석을 수행하였다.

면진장치의 비선형성으로 인해, 반복법을 적용한 SSI 해석은 기존 등가 선형화를 통한 선형 SSI 해석 결과와 다소 다른 양상을 보였다. 기존 등가 선형화를 통한 선형 SSI 해석은 반복법을 적용한 SSI 해석에 비해 전체 진동수 대역에서 낮은 가속도 응답을 산출하였고, 면진받침의 Bilinear 물성 특징을 반영하지 못해 가속도 응답의 2차 증폭을 나타내지 못했다. 반면에 발생할 수 있는 최대변위는 등가선형화를 통한 선형 SSI 해석 해석결과가 반복법을 적용한 해석 결과보다 더 높은 것을 볼 수 있었다. 이는 구조물내 주요기기의 설계지진가속도를 과소평가할 수 있고, 실제 구조물의 발생변위는 과대평가할 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구에는 수록하지 않았지만, 반복법을 사용할 경우 비선형 SSI 해석의 양상과 비슷하다는 것을 확인하

였다[10]. 결과적으로, 면진 적용시 등가선형화를 통한 SSI 해석은 응답변위를 과대평가하고, 응답가속도는 과소평가할 수 있다는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 면진장치의 비선형성이 구조물의 응답에 큰 영향을 미치는 구조물에 한정한다.

본 연구를 통해 면진적용 원전의 지진해석에서는 비선형 SSI 해석이 필수적이라는 것을 확인하였고, 그 대안으로 반복법을 적용한 SSI 해석이 면진장치의 비선형성을 구현할 수 있다는 것을 확인하였다. 더 나아가 면진적용 APR1400의 층응답스펙트럼 및 설계지진력 산출을 통해 면진적용 원전의 내진설계를 수행할 수 있다.

#### / 감사의 글 /

본 논문은 지식경제부 기술혁신사업 중 원자력융합원천기술과제(2011151010010A)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### / REFERENCES /

1. Lysmer J, Tabatabaie-Raissi M, Tajirain F, Vandahi S, Ostadan F. System for Analysis of Soil-Structure Interaction-User's manual. U.C. Berkeley; c1988.

2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan (NUREG-0800), 3.7.2 Seismic System Analysis, Revision 3, c2007.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Nuclear Power Plants, Revision 1, c1973.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan (NUREG-0800), 3.7.1 Seismic Design Parameters, Revision 3, 2007.
5. KEPCO E&C Computer Program OPTIME, Program No. E-P-CE-1043-1.0, KEPCO; c2004.
6. Casciati F, Stochastic Dynamics of Hysteretic Media, Structural Safety, 1989;6:259-269.
7. Eem SH, Jung HJ, Kim MK, Choi IK, Seismic Fragility Evaluation of Isolated NPP Containment Structure Considering Soil-Structure Interaction Effect, 2013;17(2):53-59.
8. Caughey TK, Stochastic Equivalent Linearization Techniques, Journal of the Acoustical Society of America, 1963;35(11):1706-1711.
9. Kramer SL, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, c1996.
10. Drosos VA, Sitar N, Zhou Z, Mahin S, Investigation of Seismic Isolation Technology Applied to the APR 1400 Nuclear Power Plant, Vol.3; Effects of Soil-Structure Interaction on Isolated NPP, Pacific Earthquake Engineering Research Center; c2014.