납-고무받침에 의해 면진된 원전 격납구조물의 다중단계 해석

Multi-Step Analysis of Seismically Isolated NPP Containment Structures with Lead-Rubber Bearings

이진희¹⁾ · 송종걸^{1)*} · 이은행²⁾

Lee, Jin Hi¹⁾ · Song, Jong-Keol^{1)*} · Lee, Eun-Haeng²⁾

¹⁾강원대학교 토목공학과, ²⁾전남대학교 대학원 건설 환경공학과

¹⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University, ²⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University

/ A B S T R A C T /

In order to increase the seismic safety of nuclear power plant (NPP) structures in high seismicity regions, seismic isolation techniques can be adapted to NPP structures. In this paper, the applicability of multi-step analysis of seismically isolated NPP containment structures with lead-rubber bearings (LRB) is evaluated. The floor response spectrum of NPP containment structures with equivalent linear LRB and nonlinear LRB are compared. In addition, the force-displacement relationships for equivalent linear LRB and nonlinear LRB are compared.

Key words: Nuclear power plant, seismic isolation, multi-step analysis, soil-structure interaction, frequency domain analysis

1. 서 론

원자력발전소에 지진과 같은 재해가 발생할 경우, 발전기능을 안전하게 유지하기 위해서는 원자로의 냉각에 필요한 전기가 지속적으로 보급되어야 한다. 냉각시스템이 작동하지 않으면 후쿠시마에서 발생한 원전사고와 같은 재앙이 발생할 수 있다. 원전구조물과 같은 국가주요기반 시설물이 파괴될 경우, 전력공급에 차질을 빚을 뿐만 아니라 방사능의 유출로 인한 인명피해를 가져올 수 있기 때문에 원전 구조물의 지진안전성 확보는 대단히 중요하다.

현재 우리나라는 2009년 아랍에미리트(UAE) 정부가 발주한 200억 달러 규모의 원자력 발전소 건설 사업을 수주하였으며, 이 이외에도 중동지역을 비롯한 여러 나라에 우리의 원전 고유모델인 Advanced Power Reactor (APR)-1400을 수출하기 위하여 노력하고 있다. APR-1400은 최대지반가속도(PGA) 0.3 g 수준의 지진에 견디도록 설계되었기 때문에 국내보다 강진발생 확률이 높은 강진지역 외국에 수출하기 위해서는 그 나라의 최대지반가속도 수준(예, PGA=0.5 g 수준)에 맞춰 내진설계를 상향조정하여야 한다. 그러나 이를 위해서는 APR-1400 모델의 내진설계를 전면적으로 상향하여 설계하여야 하기 때문에 많은 노력과 시간이 소요되는 어려움이 있

다. 따라서 이에 대한 대안으로 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 원전에 면진장치를 적용하여 강진을 면진장치가 소산시키도록 하여 원전에 전달되는 지진력을 현저하게 감소시킴으로써 내진안전성을 확보하여 수출경쟁력을 확보하고자 하는 연구가 국내에 활발히 진행되고 있다. 원전에 설치된 면진장치에 의해 강진지역의 최대지반가속도 수준을 국내 원전내진설계 수준인 0.3 g 이하로 낮춘다면 국내 원전고유모델 APR-1400의 내진성능이 충분히 확보된다는 것을 의미하므로 때문에 수출경쟁력이 향상될 수 있다.

원전구조물은 일반적으로 지반-구조물 상호작용효과를 반영하여 내진설계를 수행한다. 원전구조물은 지진에 대한 안전성을 충분히 확보하도록 설계하기 때문에 일반적으로 설계지진 하중 하에서 탄성거동을 하도록 설계한다. 그러므로 선형해석만 가능한 진동수영역해석방법(frequency domain analysis)을 적용하여 지반-구조물 상호작용해석을 수행하는 것이 통상적인 원전구조물의 해석방법이다. 그러나 비선형 거동특성이 강한 면진장치가 원전에 설치된다면 통상적인 진동수영역해석에 의한 지반-구조물 상호작용해석은 실제 거동을 적절히 예측하기가 어렵다. 이러한 이유 때문에 U.S. NRC의 NUREG draft report [1]에서 이에 대한 대안으로 제안한 방법이 다중단계해석법(multi-step analysis)이다. 다중단계해석법은 진동수영역해석법을 이용한 지반-구조물 상호작용해석과 면진장치의 비선형 거동특성을 반영하는 응답이력해석(response history analysis)을 조합하여 해석을 수행하는 방법이다[1]. 본 연구에서는 면진된 원전구조물에

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received 24 April 2014; Revised 3 July 2014; Accepted 11 September 2014)

Fig. 1. Seismically isolated nuclear power plants

대하여 다중단계해석방법을 적용하여 해석을 수행하고 이 결과를 진동수 영역해석 결과와 비교하여 분석하였다. 다중단계해석의 첫 번째 단계는 지반-구조물 상호작용효과를 반영하는 주파수영역해석으로 비선형성이 강한 면진장치를 등가선형모델로 치환하여 적용하는 과정을 포함한다. 두 번째 단계에서는 면진장치 비선형거동의 반영이 용이한 응답이력해석을 수행하는 과정이다. 일반적으로 등가선형모델을 적용하여 면진장치를 모델링 한 경우의 응답을 비선형모델에 의한 응답과 비교한 연구가 교량구조물에 대하여는 수행된 사례[2, 3]가 다수 있지만 원전구조물에는 사례가 드물다. 다중단계해석의 첫 번째 단계에서는 비선형성이 강한 면진장치를 등가선형 모델로 지진응답을 반영하기 때문에 본 논문에서 면진장치를 등가선형모델과 비선형모델로 모델링 하였을 경우에 대하여 지진응답을 비교하여 평가하였다. 이를 통하여 다중단계해석에서 첫 번째 단계에서 필수적으로 포함되어야 하는 면진장치에 대한 등가선형모델의 정확성을 비교, 평가하였다.

2. 면진된 원전구조물의 지반-구조물 상호작용해석

면진된 원전구조물의 동적 해석방법으로는 응답이력해석, 진동수영역해석, 다중단계해석의 3가지 방법을 적용할 수 있다. 여기서 각 방법은 지반-구조물 상호작용해석을 포함하여야 한다.

2.1 진동수영역해석

진동수영역해석은 지반-면진장치-구조물의 상호작용해석을 포함하며 비선형 특성을 가진 면진장치는 등가선형으로 전환하여 반영하여야 한다. 이 방법은 선형 점탄성 모델에 의해 정확하게 거동이 예측 가능한 저감쇠 고무받침(low damping rubber bearings)을 이용한 면진된 원전구조물의 설계에 주로 사용된다. 또한 이 방법은 비선형 면진장치가 사용된 경우, 다중단계해석의 첫 번째 단계에 사용된다.

2.2 응답이력해석

응답이력해석은 구조물의 비선형 응답이력을 얻기 위해 수행하는 방법이다. 기존의 비선형 시간이력해석과 동일한 방법으로 용어만 최근의 경향을 반영하여 수정한 방법이다. 이 방법은 지반과 면진장치를 비선형모델로

모델링하고 상부구조물을 비선형 유한요소모델로 모델링하여 해석을 수행할 수 있다. 일반적으로 면진장치는 선 요소로 모델링하여 지반과 밑면기초를 연결하며, 또한 응답이력해석은 유한요소모델의 가장자리에 가속도응답이력을 적용하여 해석한다.

2.3 다중단계해석

면진된 원전구조물의 지진응답 평가를 위한 다중단계해석은 두 가지 해석단계로 구분되어 이루어진다. 첫 단계는 지반-면진장치-구조물 상호작용 효과를 고려한 진동수영역해석을 수행하여 면진된 원전구조물 기초하부 위치에 대한 면진설계 응답스펙트럼(seismic isolation design response spectrum, SIDRS)을 생성하는 것이다. 두 번째 단계는 면진설계 응답스펙트럼(SIDRS)에 대응하는 인공지진을 생성하여 이를 입력지진으로 사용하여 비선형 면진장치를 포함하는 상부구조물의 비선형 응답이력해석을 수행하여 지진응답을 평가하는 것이다[1]. 이와 같은 두 단계를 거쳐 다중단계해석이 수행되는데, 다중단계해석은 일반적으로 저감쇠고무받침, 납-고무받침(lead-rubber bearing)과 마찰진자시스템(friction pendulum system)에 적용할 수 있다[1]. 다중단계해석에서 첫 단계인 면진 설계응답스펙트럼을 생성하기 위해서 비선형 응답특성을 가진 면진장치를 등가선형모델(equivalent linear model)로 변환하는 과정을 포함하여야 한다. 그러므로 본 연구에서는 다중단계해석의 정확성을 평가함에 있어서 등가선형모델이 적용된 경우에 대하여 진동수영역해석과 다중단계해석의 지진응답을 비교하였으며, 또한 면진장치를 등가선형모델 응답과 비선형 모델로 비교하여 등가선형모델의 정확성에 대하여도 평가하였다.

등가선형모델은 면진장치의 비선형 거동특성을 동일한 변위응답을 가지는 등가선형모델을 변화시켜 주는 것으로써 Fig. 2에 나타난 것과 같다. 등가선형모델의 유효강성(K_{eff}) 및 유효 감쇠비(β_{eff})를 구하는 식은 식 (1)과 (2)와 같이 정의할 수 있다[1, 4-6].

$$K_{eff} = \frac{|F_{max}| + |F_{min}|}{|\Delta_{max}| + |\Delta_{min}|} \quad (1)$$

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{EDC}{K_{eff}(|\Delta_{max}| + |\Delta_{min}|)^2} \quad (2)$$

Fig. 2. Equivalent linear model and nonlinear model of LRB

(a) Earthquake record LA01 corresponding to standard design spectrum

(b) Comparison of standard design spectrum and response spectrum of LA01 record generated by RspMatch Program

Fig. 3. Input ground motion and standard design spectrum for NPP

여기서, F_{max} 와 F_{min} 은 각각 면진장치의 최대, 최소전단강도를 의미하고, Δ_{max} 와 Δ_{min} 는 각각 면진장치의 최대변위와 최소변위, EDC는 하중의 한 사이클 당 소산되는 에너지로서 면진장치의 힘-변위 곡선이 이루는 면적을 의미한다.

3. 원전 설계스펙트럼에 대응하는 입력지진

본 연구에 사용한 입력지진은 원전의 설계스펙트럼에 대응하는 인공지진을 생성하여 사용하였다. 인공지진은 실제지진기록을 RspMatch 프로그램[7]을 적용하여 설계스펙트럼에 대응하도록 생성하였다. 실제지진기록은 SAC Steel Project[8]에서 사용한 지진기록 중 LA01 지진기록(Imperial Valley, 1940, El Centro, PGA=0.46 g)을 사용하였으며 RspMatch 프로그램을 이용하여 원전의 표준스펙트럼에 대응되도록 지진가속도 기록을 Fig. 3에 나타난 바와 같이 인공지진을 생성하여 사용하였다. 원전의 설계스펙트럼은 KEPIC-STB 2010[9]에 나타난 표준설계스펙트럼을 사용하였으며 최대지반가속도가 0.5 g가 되도록 스케일 조정하여 사용하였다. Fig. 3(a)에는 LA01 지진가속도 기록의 원본기록과 이를 이용하여 RspMatch 프로그램에 의해 수정된 인공지진기록을 함께 비교하여 나타내었다. 이를 통하여 원래지진기록이 가진 지진파형의 형태를 인공지진이 유사하게 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3(b)에는 생성된 인공지진에 대한 응답스펙트럼과 설계스펙트럼을 비교하여 나타내었는데, 30 Hz 이상의 진동수 구간을 제외하고는 두 스펙트럼이 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 지반-면진장치-구조물 상호작용효과를 반영한 진동수영역해석

지반-면진장치-구조물 상호작용효과를 반영한 진동수영역해석은 SASSI 프로그램[10]을 이용하였으며 면진된 원전구조물의 수치해석모델은 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같다. 해석모델에서 매트 반지름은 19.81 m 이고, 면진 장치 상부매트와 하부매트의 두께는 3.048 m(10 ft)로 동일하다. 면진장치 요소의 길이는 60 cm로 모델링 하였다. 면진장치 하부매트는 무질량 강체로 가정하였으며 면진장치는 남-고무받침으로 모델링 하였다. 면진장치는 고유진동주기가 약 2초가 되도록 설계하여 총 5개를 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 배치하였다.

지반의 종류에 따른 지반-면진장치-구조물 상호작용효과를 평가하기 위하여 지반은 전단파속도 ($V_s = 360, 750, 1000, 1500, 2000$ m/sec)에 따라서 5가지 지반으로 구분하여 적용하였다. SASSI를 이용한 진동수영역 해석으로부터 5가지 지반종류에 따른 면진된 원전구조물의 격납 구조물 상층부에서의 가속도응답을 구하고, 이를 이용하여 층응답스펙트럼(floor response spectrum)을 작성하여 Fig. 5에 나타내었다. 면진된 원전구조물

(a) Soil properties and beam-stick model of NPP Structure

(b) Modeling of mat

(c) Position of LRB

Fig. 4. Numerical model of seismically isolated NPP Structures using SASSI program

Fig. 5. Comparison of floor response spectra at top of containment structure using frequency domain soil-structure interaction analysis (SASSI program)

의 고유주기가 2초가 되도록 면진장치를 설계하여 모델링 하였으므로 0.5 Hz에서 첫번째 피크가 나타나고, 두 번째 피크는 지반종류에 따른 전단파 속도에 따라서 각각 약 4, 4.6, 5.5, 6, 6.3 Hz에서 피크가 나타남을 알 수 있다. 즉, 지반의 전단파 속도가 증가할수록 층응답스펙트럼도 이에 대응하여 두 번째 피크에 대응하는 진동수가 증가함을 알 수 있다.

5. 지반-면진장치-구조물 상호작용효과를 반영한 다중단계해석

5.1 비선형 면진장치를 반영한 해석모델

비선형성이 큰 면진장치를 포함한 원전구조물에 대해서 지반-구조물 상호작용해석을 수행하기 위하여 추천하는 방법이 다중단계해석법이다. 이는 진동수영역해석과 시간영역해석법의 장점을 조합한 방법으로서 진동수영역에서의 지반-구조물 상호작용해석이 비선형거동을 적절히 반영하지 못한다는 단점을 보완하기 위하여 NUREG 보고서[1]에 제안된 방법이다. 이 방법은 두 단계로 나누어 해석을 수행하게 되는데, 첫 번째 단계에서는 진동수영역해석을 통하여 지반-구조물 상호작용효과를 반영한 면진장치 아래 기초부분의 면진설계 응답스펙트럼(seismic isolation design response spectrum, SIDRS)을 구하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구한 면진설계 응답스펙트럼(SIDRS)에 대응하는 인공지진을 생성하고 이를 입력지진으로 사용하여 비선형모델로 모델링한 면진장치를 가진 원전구조물의 응답이력해석을 수행한 결과로 면진된 원전구조물의 지진응답을 얻게 된다.

비선형 면진장치를 포함한 원전구조물의 다중단계해석의 두 번째 단계는 OpenSEES 프로그램[11]을 이용하여 수행하였다. 지진에 의한 비선형 거동은 면진장치에 국한적으로 발생할 것이므로 상부구조물은 탄성거동을 하게 되므로 상부구조는 탄성 보요소를 사용하여 집중질량 빔-스틱 (beam-stick)모델로 모델링 하였다. 등가선형모델의 정확성을 평가하기 위하여, 면진장치의 해석모델은 등가선형모델과 비선형모델을 적용하여 비교하였으며 면진장치는 상부매트구조물 아래에 위치하는 것으로 모델링 하였다. 여기서 면진된 원전구조물의 모델링은 상부구조물의 경우 위에서 SASSI 프로그램을 이용하여 해석을 수행한 구조물과 동일하며 매트와 매트와 매트 사이에 적용한 면진장치는 동일한 고유주기가 가지도록 Fig. 6에 나타난 바와 같이 25개 면진장치를 적용하여 해석하였다.

총 25개의 면진장치를 가로방향 5개, 세로방향 5개로 균등한 간격으로 정사각형 분포가 되도록 Fig. 6에 나타난 바와 같이 배치하여 모델링 하였다. 고유진동주기가 2초, 설계변위가 8 cm가 되도록 설계된 면진장치의 비선형모델 및 등가선형모델의 설계변수는 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타난 면진장치의 물성치는 면진장치가 한 개일 경우를 기준으로 작성된 것이며 수치해석모델에서 여러 개의 면진장치를 적용할 경우의 개별 면진장치의 강성 및 강도는 Table 1에 나타난 값을 면진장치의 개수만큼 나누어 준 값을 적용하면 된다. 등가선형모델의 유효강성과 유효감쇠비와 같은 물성치는 일반적으로 반복과정을 거쳐서 계산하여야 하지만[5, 6], 본 연구에서는 면진된 원전구조물에 대하여 다중단계해석의 적용성을 평가하는 것이 주된 목적이므로 SASSI 프로그램을 이용한 진동수영역해석과 OpenSEES 프로그램을 이용한 응답이력해석을 이용한 다중단계해석의 정확성을 동일한 등가선형모델의 면진장치에 대하여 비교하기 위하여 Table 1에 나타난 설계시에 정해진 면진장치의 초기 물성치를 반영하였다.

Fig. 6. Structural modeling of seismically isolated NPP with equivalent linear- and nonlinear-LRB using OpenSEES program

Table 1. Mechanical properties of equivalent linear- and nonlinear-LRB in horizontal direction

Parameter	Equivalent linear LRB		Nonlinear LRB		
	Effective horizontal stiffness, K_{eff} (kN/m)	Effective Damping Ratio, β_{eff} (%)	Elastic Stiffness, K_u (kN/m)	Second-Slope Stiffness, K_d (kN/m)	Characteristic Strength, Q_d (kN)
Value	3.754×10^5	10%	1.126×10^6	1.877×10^5	1.502×10^4

5.2 다중단계해석의 첫 번째 단계

SASSI 프로그램을 이용하여 등가선형모델을 적용한 면진장치를 가진 원전구조물의 지반-면진장치-구조물 상호작용해석을 수행하여 면진장치 하부의 기초부분에서의 면진설계 응답스펙트럼(SIDRS)을 지반의 전단파 속도에 따라서 구하여 Fig. 7에 나타내었다. 지반의 전단파 속도가 증가할수록 최대 응답스펙트럼이 발생하는 진동수가 증가함을 알 수 있으며 최대 응답스펙트럼의 크기는 전단파 속도가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 이는 지반종류에 따른 면진장치부에 전달되는 지진파가 지반-구조물 상호작용의 영향이 받고 있음을 의미한다. 전단파 속도가 작을수록 연약지반이므로 연약지반일수록 면진설계 응답스펙트럼의 최대치는 증가하고 최대치에 대응하는 진동수는 감소하는 경향을 나타낸다.

5.3 다중단계해석의 두 번째 단계

다중단계해석의 두 번째 단계에서 구한 원전 격납구조물 최상부의 가속도 응답을 납-고무받침을 등가선형모델로 적용한 경우(Fig. 8(a) 참조)와 비선형모델로 적용한 경우(Fig. 8(b) 참조)로 구분하여 5가지 전단파속도의 지반종류에 따라서 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. Fig. 8(a)에 나타난 등가선형모델의 납-고무받침이 적용된 원전 격납구조물 최상층의 지반종류에 따른 가속도 최대값은 대략 0.15~0.2 g의 분포를 나타낸다. 반면에 Fig. 8(b)에 나타난 비선형모델의 납-고무받침이 적용된 원전 격납구조물 최상층의 가속도의 최대값은 대략 0.08~0.09 g의 분포를 나타내므로 등가선형모델을 적용한 결과에 비하여 가속도응답의 최대치가 대략 50% 작게 나타난다.

Fig. 8(c)와 8(d)에서는 등가선형모델을 적용한 진동수영역해석(SASSI 프로그램 사용)에 의한 가속도응답이력을 등가선형모델과 비선형모델을 적용한 다중단계해석에 의한 원전 격납구조물 상층부의 가속도 응답이력과 비교하여 나타내었다. 지반종류별 가속도응답이력의 결과가 유사하기 때문에 지반종류는 전단파속도가 360 m/sec인 경우(Fig. 8(c))와 2000 m/sec인 경우(Fig. 8(d))에 대하여만 비교하여 나타내었다. 등가선형모델의 면진장치를 적용한 다중단계해석의 가속도 응답이력의 최대값이 SASSI

Fig. 7. Seismic isolation design response spectrum (SIDRS) corresponding to shear wave velocity of grounds ($V_s = 360, 750, 1000, 1500, 2000$ m/sec)

프로그램을 사용한 진동수영역해석에 의한 가속도응답에 비하여 대략 2배 정도로 크게 나타남을 알 수 있다. 등가선형모델과 비선형모델을 적용한 다중단계해석에 의한 원전 격납구조물 상층부의 변위응답이력을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. SASSI 프로그램을 이용한 경우에는 변위응답이력이 출력이 안 되기 때문에 OpenSEES 프로그램을 이용한 다중단계해석의 경우만 비교하여 나타내었다. 등가선형모델을 적용한 경우와 비선형모델을 적용한 경우 보다 변위응답을 대략 2~3배 정도 크게 평가함을 알 수 있다.

각 지반종류별 등가선형모델과 비선형모델로 다중단계해석 결과와 등가선형모델을 적용한 진동수영역해석 결과를 이용하여 격납 구조물 최상층부의 층응답스펙트럼(floor response spectrum)을 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 층응답스펙트럼의 비교에서 납-고무받침에 의한 면진효과도 비교하기 위하여 면진장치가 적용되지 않은 경우도 포함하여 비교하였다. 고유주기 2초로 설계된 납-고무받침의 적용으로 1 Hz 이상 고진동수 성분의 가속도응답이 현저하게 감소하였음을 알 수 있다. 또한 원전 격납구조물 내부에 있을 여러 설비의 안전성은 고진동수의 가속도성분에 영향을 받을 가능성이 높으므로 면진장치의 적용으로 원전 격납구조물 뿐만 아니라 내부설비의 내진안전성 또한 현저히 높아졌다고 할 수 있다. 대부분의 설비는

(a) Equivalent linear LRB model

(b) Nonlinear LRB model

(c) $V_s = 360$ m/sec

(d) $V_s = 2000$ m/sec

Fig. 8. Comparison of acceleration response at top of containment structure

Fig. 9. Comparison of displacement response at top of containment structure

고유진동수가 10 Hz 이상이기 때문에 고진동수 성분의 감소가 안전성 향상에 기여하기 때문이다. 납-고무받침의 주기가 2초가 되도록 설계되었기 때문에 등가선형모델을 적용한 경우에는 이에 대응하는 0.5 Hz의 가속도 응답이 최대치를 나타내는 것을 알 수 있으며, 다중단계해석에 의한 가속도 응답의 최대치가 진동수영역해석의 경우에 비하여 2배정도 크게 평가함을 알 수 있다. 이론적으로는 등가선형모델 또한 선형해석이므로 다중단계해석과 진동수영역해석결과가 일치하여야 하는 것이 다중단계해석의 정확성을 입증하는 것이라고 할 수 있다. 그러나 층응답스펙트럼의 형상은 등가선형모델을 적용한 다중단계해석과 진동수영역해석이 유사하지만 최대치의 크기가 차이가 나는 모습을 보인다. 이러한 원인은 다중단계해석의 방법적인 특성상 진동수영역해석과 시간영역해석의 조합에 의한 차이일 수도 있다고 판단된다. 또 다른 원인은 동일한 조건의 해석이라도 해석프로그램의 차이에 의해서도 결과치가 달라질 수 있기 때문인데, 진동수영역은 SASSI 프로그램을 적용하고 다중단계해석은 OpenSEES 프로그램을 적용하였으므로 해석프로그램의 차이에 기인하였을 수도 있다.

면진장치에 비선형모델을 적용한 경우의 가속도 층응답스펙트럼이 진동수가 0.6~2 Hz 범위에서는 등가선형모델을 적용한 경우 보다 최대 2배 정도까지 크게 평가함을 알 수 있고, 0.6 Hz 이하의 진동수에서는 반대의 경향으로 가속도층응답스펙트럼이 현저히 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8(b)와 (d)에서 전단파 속도가 2000 m/sec인 경우 비선형모델의 가속도 이력이 시간이 경과에 따라 감소하지 않는 경향을 보이고 있다. 이는 Fig. 10(e)에 나타낸 전단파속도 2000 m/sec인 경우를 살펴보면 면진이 적용되지 않은 경우의 층응답스펙트럼(초록색 점선)과 비선형모델의 면진장치에 대한 층응답스펙트럼이 약 0.85 Hz 부근의 진동수에서 다른 전단파속도의 지반보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, 면진이 적용되지 않은 경우의 층응답스펙트럼(초록색 점선)이 약 0.85 Hz 부근에서 다른 전단파속도의 지반보다 2배이상으로 크게 나타남을 볼 때, 지반의 전단파속도가 2000 m/sec인 경우에 약 0.85 Hz 부근의 응답이 다른 전단파속도의 지반보다 크게 증폭되게 나타나며 이는 진동수가 비선형 면진장치의 초기강성에 해당하는 진동수와 일치하기 때문에 초기강성에 해당하는 주기(0.85

Hz)에서 공진현상이 발생하여 가속도 이력이 감소하지 않고 지속되는 응답으로 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 10. Comparison of floor response spectra at top of containment structure with equivalent linear- and nonlinear LRB (Continued)

Fig. 10. Comparison of floor response spectra at top of containment structure with equivalent linear- and nonlinear LRB

5.4 납-고무받침의 힘-변위관계의 비교

납-고무받침을 등가선형모델과 비선형모델로 적용한 경우의 힘-변위 관계를 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. 지반 전단파속도가 2000 m/sec 인 경우의 등가선형모델과 비선형모델의 힘-변위관계가 다른 전단파속도의

Fig. 11. Comparison of force-displacement relationships of LRB calculated by using equivalent linear- and nonlinear-model (Continued)

Fig. 11. Comparison of force-displacement relationships of LRB calculated by using equivalent linear- and nonlinear-model

경우보다 큰 힘-변위응답을 나타내는 것을 알 수 있다. 특히 비선형모델에서의 변위가 다른 전단파 속도의 경우 보다 현저하게 증가하는 모습을 보이고 있는데 이는 Fig. 10(e)에 나타난 바와 같이 전단파 속도 2000 m/sec에서의 비선형모델의 층응답가속도 스펙트럼이 0.85 Hz 부근에서 크게 증가되는 현상과 대응되는 것으로 볼 수 있다. 납-고무받침의 힘-변위 관계를 비교하면 등가선형모델이 비선형모델의 경우 보다 힘의 최대값은 약 2.5배, 변위의 최대값은 약 3배정도 크게 평가함을 알 수 있다.

6. 결 론

비선형성이 강한 면진장치를 포함한 원전구조물의 지반-구조물 상호작용해석을 위하여 제안된 다중단계해석법의 정확성을 진동수영역해석법과 비교하여 평가하였다. 진동수영역해석의 지반-구조물 상호작용해석은 SASSI 프로그램을 사용하였으며, 면진장치는 등가선형모델로 전환하여 적용하였다. 다중단계해석은 첫 단계인 면진설계스펙트럼(SIDRS)을 작성하는 부분은 SASSI 프로그램을 적용하여 지반-구조물 상호작용해석을 수행하였으며 다중단계해석의 두번째 단계에서는 OpenSEES 프로그램을 이용하여 면진장치를 등가선형모델과 비선형모델로 적용한 두 경우로 구분하여 면진설계 응답스펙트럼(SIDRS)에 대응되는 인공지진을 입력지진으로 사용하여 응답이력해석을 수행하였다. 이와 같은 과정을 통한 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고유주기 2초로 설계된 납-고무받침의 적용으로 면진장치가 적용되지 않은 원전구조물의 가속도응답과 비교할 때, 1 Hz 이상의 고진동수 성분의 가속도응답이 현저하게 감소하였음을 알 수 있다.
- 2) 등가선형모델을 적용한 다중단계해석법과 진동수영역해석법에 의한 원전 격납구조물 상층부에서의 가속도 층응답스펙트럼(FRS)의 형태가 0.5 Hz 부근에서 최대치를 가지는 형태로 유사하지만 등가선형모델을 적용한 경우가 진동수영역해석보다 가속도스펙트럼의 최대치를 2배정도 크게 평가함을 알 수 있었다. 이는 진동수영역해석법은 SASSI 프로그램을 적용하고 다중단계해석은 OpenSEES 프로그램을 적용하였기 때문에 두 프로그램의 해석알고리즘에 의한 차이의 영향일 수,

다중단계해석과 진동수영역해석법에 의한 해석방법상의 차이가 포함되었을 수도 있고 여러가지 원인이 복합적으로 작용할 수도 있기 때문에 추후 연구를 통하여 그 원인을 분석할 필요가 있다.

- 3) 납-고무받침의 힘-변위 관계를 비교하면 등가선형모델이 비선형모델의 경우 보다 힘의 최대값은 약 2.5배, 변위의 최대값은 약 3배정도의 크게 평가함을 알 수 있다. 이는 등가선형모델의 유효강성이 작게 평가된 것이 주 원인으로 판단되며 등가선형모델의 작성에서 최대변위를 유발하는 하나의 싸이클에 대한 응답에 대하여 근사적으로 등가선형 물성치인 유효강성 및 유효감쇠비를 구하는 과정이므로, 불규칙성이 강한 힘-변위응답을 유발하는 지진하중에 대해서는 정확성이 떨어질 수 있다고 판단된다.
- 4) 전단파 속도에 따른 지반종류의 영향을 분석하면 다중단계해석에서 첫 번째 해석단계에서 구한 면진설계 응답스펙트럼(SIDRS)에서는 지반의 전단파 속도에 따른 면진설계 응답스펙트럼(SIDRS)의 진동수에 따른 차이가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 그러나 다중단계해석의 두 번째 단계인 응답이력해석의 결과로부터 구한 면진된 격납구조물의 상층부에 대한 가속도 층응답스펙트럼은 지반의 전단파속도에 따른 차이가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 면진장치의 고유진동수가 약 0.5 Hz로서 지반의 전단파속도에 대응되는 고진동수 (4~25 Hz)의 면진설계응답스펙트럼은 면진장치의 거동에 의해 상쇄되고 면진장치의 진동수에 해당하는 응답 위주로 상부구조물에 전달되었기 때문으로 판단된다.
- 5) 다중단계해석에서 비선형 특성이 큰 납-고무받침과 같은 면진장치를 등가선형모델로 적용하는 경우에는 변위응답을 2~3배정도 크게 평가할 가능성이 있기 때문에 신중하게 적용할 필요가 있다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2014년 지식경제부 원자력융합핵심 기술개발사업 “원전구조물의 면진구조 설계기준 개발(2014151010170B)” 연구과제에 의해 지원되었기에 이에 감사 드립니다.

/ REFERENCES /

1. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities, c2012.
2. Hwang JS, Chiou JM, An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings, Engineering Structures, 1996;18(7):528-536.
3. Dicleli M, Buddaram S, Equivalent linear analysis of seismic-isolated bridges subjected to near-fault ground motions with forward rupture directivity effect, Engineering Structures, 2007;29:21-32.
4. American Society of Civil Engineers (ASCE), Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI 7-10, ASCE, Reston, VA, c2010.
5. Lee JH, Song JK, Kim GJ, Kim NY, Nonlinear analysis of seismically isolated NPP containment structure considering various seismic characteristics, Conference Proceeding on Earthquake Engineering

- Society of Korea, EESK, c2014.
6. Lee JH, Song JK. Applicability evaluation of equivalent linear model for isolated NPP containment structure, Conference Proceeding on Korea Society of Civil Engineering, KSCE, c2013.
7. Atik LA, Abrahamson N. An improved method for nonstationary spectral matching, *Earthquake Spectra*, 2010;26(3): 601–617.
8. SAC Joint Venture Steel Project Phase 2. Suites of earthquake ground motions for analysis of steel moment frame structures, 1997. (Available from: http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/sacsteel/ground_motions.html).
9. KEPIC-STB 2010. Seismic analysis and seismic capacity evaluation for nuclear facilities, Korea, c2010.
10. Lysmer J, Ostadan F, Chin CC. A system for analysis of soil–structure interaction, SASSI 2000 theoretical manual, UC Berkeley. c1999.
11. Mazzoni, S, McKenna, F, Scott, MH, Fenves, GL, (2007) *OpenSees: Open System of Earthquake Engineering Simulation*, Pacific Earthquake Engineering Center, Univ. of Calif., Berkeley. (Available from: <http://opensees.berkeley.edu>)
12. Kim HU, Evaluation of the Applicability of Existing Design Formula for Seismic Isolation to Nuclear Power Plants, *Journal of Engineering Society of Korea*, 16(6):29–36, 2012.
13. Kim HU, Joo KH, Noh SH, Jung CG. Behavior analysis of a seismically isolated NPP structure by varying seismic input generation method and strong ground motion duration, *Journal of Engineering Society of Korea*, 17(4):187–195, 2013.
14. LEE JH, Kim JK, Hong KJ. Characteristics of earthquake responses of an isolated containment building in nuclear power plants according to natural frequency of soil, *Journal of Engineering Society of Korea*, 17(6):245–255, 2013.