비선형 SSI 해석을 위해 Spring-Damper 에너지 흡수경계조건을 적용한 BRM의 유한요소 모델링 범위에 따른 응답평가

이 은 행¹ · 김 재 민^{2*} · 정 두 리¹ · 주 광 호³

¹전남대학교 건설환경공학과, ²전남대학교 해양토목공학과, ³한국수력원자력 중앙연구원

Evaluation of the Response of BRM Analysis with Spring-Damper Absorbing Boundary Condition according to Modeling Extent of FE Region for the Nonlinear SSI Analysis

Eun-Haeng Lee¹, Jae-Min Kim^{2*}, Du-Ri Jung¹ and Kwang-Ho Joo³

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National Univ., Yeosu, 59626, Korea

²Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National Univ., Yeosu, 59626, Korea

³Central Research Institute of KHNP, Daejeon, 34101, Korea

Abstract

The boundary reaction method(BRM) is a substructure time domain method, it removes global iterations between frequency and time domain analyses commonly required in the hybrid approaches, so that it operates as a two-step uncoupled method. The BRM offers a two-step method as follows: (1) the calculation of boundary reaction forces in the frequency domain on an interface of linear and nonlinear regions, (2) solving the wave radiation problem subjected to the boundary reaction forces in the time domain. In the time domain analysis, the near-field soil is modeled to simulate the wave radiation problem. This paper evaluates the performance of the BRM according to modeling extent of near-field soil for the nonlinear SSI analysis of base-isolated NPP structure. For this purpose, parametric studies are performed using equivalent linear SSI problems. The accuracy of the BRM solution is evaluated by comparing the BRM solution with that of conventional SSI seismic technique. The numerical results show that the soil condition affects the modeling range of near-field soil for the BRM analysis as well as the size of the basemat. Finally, the BRM is applied for the nonlinear SSI analysis of a base-isolated NPP structure to demonstrate the accuracy and effectiveness of the method.

Keywords : nonlinear soil-structure interaction analysis, boundary reaction method, direct method, ANSYS, KIESSI-3D

1. 서 론

후쿠시마 원자력발전소 사고 이후 지진, 쓰나미 등의 자연 재해에 대한 원자력발전소의 안전성에 대한 문제가 큰 사회적 이슈로 제기되고 있다. 또한 원자력발전소가 강진지역에 건설될 가능성이 높아짐에 따라 지속적으로 높아지는 지진력에 대응할 수 있는 원전 건설에 관심이 높아지고 있다. 최근 국내에서는 강진지역에서 원자력발전소의 안전성을 확보하기 위한 방법으로 면진장치를 원전구조물에 적용하기 위한 연구가 국내

연구진을 중심으로 활발하게 진행 중이다(Kim and Lee, 2013; Lee *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2016). 이처럼 면진장치가 설치된 원전구조물의 내진설계를 위해서는 면진장치와 같은 부재의 비선형성뿐만 아니라 지반-구조물의 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 고려하는 것이 매우 중요한 것으로 인식되고 있다(ASCE 4-16 Draft, 2016). SSI 해석법은 FFT 기법을 이용한 진동수 영역해석법이 널리 사용되어 왔다. 이는 SSI 시스템에서 원역지반의 강성이 진동수 종속적인 특성이 매우 강하기 때문

* Corresponding author:

Tel: +82-61-659-7245; E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr
Received August 29 2016; Revised October 12 2016;
Accepted October 13 2016

© 2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이다(Wolf, 1985). 하지만 진동수영역해석법은 비선형성을 정확하게 고려하기가 매우 어렵다. 따라서 보다 정확한 비선형 해석을 수행하기 위해 여러 가지 시간영역해석법이 개발되었다. SSI 해석을 위한 시간영역해석법은 직접법(direct method)과 부구조법(substructure method)으로 구분할 수 있다. 직접법은 구조물과 지반을 직접 모델링하고, 기반암 노두에 지진파를 직접 입력한다. 이때 직접법의 경계조건은 탄성파의 방사효과를 모사하기 위해 인위적인 경계조건(Absorbing Boundary Condition, ABC)을 적용시킨다(Liu and Lu, 1998). 직접법은 지반과 구조물을 직접 모델링하기 때문에 지반의 형상이 복잡하거나, 비선형거동을 해석해야 하는 경우에 장점을 갖는다. 한편 시간영역에서 부구조법은 구조물과 지반의 일부분을 모델링하고, 유효지진하중을 산정하여 시간이력해석을 수행한다. 부구조법의 해석영역 경계조건으로 PML(perfectly matched layer)요소(Basu, 2009), ABC(absorbing boundary condition)요소, PMDL(perfectly matched discrete layers)요소(Lee *et al.*, 2016) 등을 사용할 수 있다. 이러한 시간영역의 부구조 해석법으로는 DRM(domain reduction method)(Bielak *et al.*, 2003), BRM(boundary reaction method)(Kim *et al.* 2016) 등이 있다.

BRM은 실무에서 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석을 수행하기 위한 해석기술의 하나로서 진동수영역에 기반을 둔 선형 SSI 해석과 유한요소해석 프로그램을 이용한 시간영역 비선형해석을 결합하는 방법이다. BRM은 시간영역에서 지반-구조물 상호작용에서 발생하는 방사감쇠의 효율적인 처리를 위하여 일정범위의 근역지반을 모델링하며, 해석영역의 경계에서 일종의 에너지 흡수경계조건인 PML 요소나 감쇠가스프링요소를 설치한다. 이때 BRM의 해석시간은 근역지반의 모델링 범위에 지배적인 영향을 받는다. 한편 면진 원전구조물의 경우 상부구조물로 전달되는 지진하중뿐만 아니라 지반-구조물 상호작용에 의한 지반의 2차 비선형성 또한 감소한다(Lee *et al.*, 2016, Kim *et al.*, 2016). 따라서 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석을 위한 근역지반의 모델링 범위는 비면진 구조물과는 모델링 범위의 차이가 있으며, BRM 해석모델 작성 시 면진 원전구조물의 특성을 고려한 적절한 지반모델링 범위를 정하는 것은 매우 중요하다.

이 연구에서는 면진 원전구조물의 BRM 해석을 위해 적절한 지반모델링 범위를 제안하기 위해 지반조건 및 지반모델링 범위에 따른 매개변수해석을 수행하였다. 매개변수해석 시 해석모델은 면진장치를 등가선형으로 고려한 등가선형 SSI 해석모델을 이용하였으며, BRM을 이용한 구조물의 응답을 재래의 SSI 해석의 응답과 비교하였다. 또한 BRM 해석의 정확성과 효율성을 보이기 위해 BRM 해석과 직접법을 이용한

비선형 SSI 해석을 수행하였다.

2. 비선형 SSI 해석을 위한 BRM 해석법

2.1 BRM 해석법의 개념 및 절차

면진 원전구조물의 비선형 SSI 문제는 Fig. 1(a)와 같이 지반의 외부에서 지진파가 입사되고, 선형으로 가정된 근역지반과 원역지반, 비선형성의 구조물 또는 지반으로 나타낼 수 있다. BRM 개념을 이용하면 Fig. 1(a)의 비선형 SSI 문제는 Fig. 1(b)와 같이 선형영역과 비선형영역의 경계를 고정시킨 부구조 (I)과 Fig. 1(c)와 같은 부구조 (II)의 중첩으로 나타낼 수 있다. Fig. 1의 운동방정식에서 $f_s^{NL}(t)$ 은 비선형영역의 구조물 또는 지반에서의 비선형 복원력과 감쇠력 등의 동적 합력벡터, $r_e^t(t)$ 는 근역지반과 원역지반 경계에서 상호작용력, $u^t(t)$ 는 변위벡터, $\dot{u}^t(t)$ 는 속도벡터, $\ddot{u}^t(t)$ 는 가속도벡터, M 과 K 는 각각 질량행렬과 강성행렬이다. 이때 감쇠행렬은 식의 간략화를 위해 생략하였다.

선형 SSI 문제인 BRM의 부구조 (I)에서는 진동수영역에 기반을 둔 SSI 해석프로그램을 이용하여 비선형 구조물 영역과 선형 지반-구조물 시스템의 경계면에서 경계반력을 계산한다. 그리고 부구조 (II)에서는 계산된 경계반력을 반대방향의 하중으로 작용시켜 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행한다. 이러한 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석을 위한 BRM 해석 절차는 Fig. 2와 같다.

면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석을 위해서는 면진 장치의 비선형성과 SSI 효과를 고려해야 한다. 면진장치의 비선형성은 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하면 비교적 쉽게 고려할 수 있다. 따라서 BRM을 이용한 정확한 비선형 SSI 해석을 위해서는 경계반력의 정확성과 지반-구조물 상호작용에서 발생하는 방사감쇠를 효율적으로 처리할 수 있는 해석모델의 작성이 중요하다. BRM 해석모델 검증방법은 면진장치를 선형 점탄성요소로 모델링한 BRM 해석의 구조물 응답을 재래의 SSI 해석결과와 비교한다. 이때 BRM 응답은 원역의 근사방법의 차이 등으로 참조해와 해석결과의 차이를 보일 수 있으며, BRM 해석법의 정확한 해를 얻기 위한 해석 모델의 보정작업이 필요할 수 있다. BRM 해석모델의 보정 방법은 유효지진하중의 보정, 지반모델링 범위확장, 에너지 흡수요소 계수보정이 있다. 이 연구에서는 에너지흡수요소와 지반모델링 범위에 따른 매개변수해석을 수행하였다. 이때 등가선형 BRM 응답은 재래의 SSI 해석응답과 비교하여 유효 지진하중을 보정하였다. 유효지진하중의 보정계수의 기준은

Fig. 1 Concept of boundary reaction method

Fig. 2 Analysis procedure of the boundary reaction method

면진시스템의 고유진동수로 하였다.

2.2 BRM 해석모델 작성 방법

BRM의 부구조 (I)에서는 진동수영역에 기반을 둔 SSI 해석프로그램을 이용하여 비선형 구조물영역과 선형 지반-구조물 시스템의 경계면에서 경계반력을 계산한다. 이 연구에서 진동수영역해석 프로그램은 선형 SSI 해석프로그램인 KIESSI-3D(Seo and Kim, 2012)를 이용하였다. 그리고 부구조 (II)에서는 계산된 경계반력을 반대방향의 하중으로 작용시켜 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행한다. 비선형 시간이력해석 프로그램은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS(ANSYS Ver.16.0)를 이용하였다. BRM의 부구조 (II)에서는 지반-구조물 상호작용에서 발생하는 방사 감쇠의 효율적인 처리를 위하여 해석영역의 경계에서 일종의 에너지 흡수경계조건인 PML 요소나 감쇠기-스프링으로 경계를 처리할 수 있는 프로그램이 필요하다(Lee *et al.*, 2014). 이 연구에서 에너지 흡수조건은 감쇠기-스프링요소를 이용하였다. 경계면에 스프링요소 및 점성감쇠요소의 계수 값은 Deeks와 Randolph(1994), Kellezi(2000), Liu(2006), Li와 Song (2014) 등이 제안한 방법을 이용할 수 있다. 이때 경계면에서 단위면적당 접선방향 스프링계수 K_T 및 감쇠계수 C_T 는 식 (1), 법선방향 스프링계수 K_N 및 감쇠계수 C_N 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_T = \kappa_T \frac{\rho c_s^2}{2r}, C_T = \rho c_s \quad (\text{접선방향}) \quad (1)$$

$$K_N = \kappa_N \frac{\rho c_p^2}{2r}, C_N = \rho c_p \quad (\text{법선방향}) \quad (2)$$

여기서, r 은 기초 중심으로부터 경계면까지의 거리, ρ 는 원역지반의 질량밀도, c_p 는 원역지반의 압축파속도, c_s 는 원역지반의 전단파속도, κ_N 과 κ_T 는 법선방향과 접선방향의 스프링 무차원 계수이다.

Deeks & Randolph, Kellezi, Liu, Li & Song이 제안한 스프링계수를 식 (1)과 식 (2)로 나타내면, 각 방법에 따른 스프링 무차원 계수 κ_N 과 κ_T 는 Table 1과 같다. 이 연구에서 법선방향과 접선방향의 스프링 무차원 계수로 Kellezi 방법의 $\kappa_N=1$, $\kappa_T=1$ (축대칭 문제의 제안 값)과 $\kappa_N=2$, $\kappa_T=2$ (body wave를 이용한 3차원 문제의 제안 값)의 두 가지 경우에 대해 해석하였다.

3. BRM 해석모델의 매개변수해석

면진 원전구조물의 BRM 해석을 위해 적절한 지반모델링 범위를 제안하기 위해 지반조건 및 지반모델링 범위에 따른 매개변수해석을 수행하였다. BRM의 매개변수 해석모델은 면진 SASSI-NPP 모델과 국내 면진 원전구조물(APR-NPP)을 이용하였으며, 지반조건은 국내 면진 원전구조물의 설계 지반조건 중 S4, S7, S9를 이용하였다.

3.1 해석모델

3.1.1 면진 SASSI-NPP 해석모델

면진 SASSI-NPP 해석모델은 대표적인 지반-구조물 상호 작용 프로그램 SASSI 매뉴얼(Lysmer *et al.*, 1988)의 NPP 예제 해석모델에 Fig. 3과 같이 하부매트를 추가하고, 면진장치 요소를 이용하여 상부매트와 하부매트를 연결한 모델이다. 면진 SASSI-NPP 해석모델의 상부구조물은 격납건물과

Table 1 Dimensionless coefficients for the spring boundary

	Problem Considered	Lateral boundary		Bottom boundary		Proposed equation by each studies	
		κ_{TL}	κ_{NL}	κ_{TB}	κ_{NB}	Tangent directions	Normal direction
Deeks and Randolph (1994)	Axisymmetric	1	$4 \frac{1}{\eta_p}$	1	$4 \frac{1}{\eta_p}$	$\frac{G}{2r}$	$\frac{2G}{r}$
Kellezi (2000)	Axisymmetric	1	1	1	1	$\frac{\rho c_s^2}{2r}$	$\frac{\rho c_p^2}{2r}$
	3D-BB	2	2	2	2	$\frac{\rho c_s^2}{r}$	$\frac{\rho c_p^2}{r}$
	3D-RB	η_R	$s \eta_R$	2	2	$TL = \frac{\rho c_R^2}{2r}, TB = \frac{\rho c_s^2}{r}$	$NL = \frac{\rho s c_R^2}{2r}, NB = \frac{\rho c_p^2}{r}$
Liu <i>et al.</i> (2006)	3D	1.34	$2.66 \frac{1}{\eta_p}$	1.34	$2.66 \frac{1}{\eta_p}$	$0.67 \frac{G}{r}$	$1.33 \frac{G}{r}$
Li and Song (2014)	Axisymmetric	4	$4 \frac{1}{\eta_p}$	4	$4 \frac{1}{\eta_p}$	$\frac{2G}{r}$	$\frac{2G}{r}$

3D-BB: 수평방향 스프링 계산 시 body wave 사용, 3D-RB: 수평방향 스프링 계산 시 R-wave 사용,

$$\eta_p = \frac{\lambda + 2G}{G} = \left(\frac{c_p}{c_s} \right)^2, \eta_R = \left(\frac{c_R}{c_s} \right)^2, c_R : \text{R-wave 속도}, s = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} = \frac{c_p}{c_s}$$

Table 2 Mechanical properties of isolation devices of the base-isolated SASSI-NPP model

	Horizontal direction		Vertical direction
	Equivalent linear analysis	Nonlinear analysis	Equivalent linear & Nonlinear analysis
	$K_{eff} = 48052 \text{ kN/m}$	$K_1 = 144200 \text{ kN/m}$	$K_v = 1.00 E + 10 \text{ kN/m}$
	$C_{eff} = 9560 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$	$K_2 = 24030 \text{ kN/m}$	-
		$Q_d = 7208 \text{ kN}$	

내부구조물이 각각 하나의 집중질량-보요소 모델로 모델링되어 있으며, 상부구조물 밀면매트와 하부구조물 밀면매트는 입체요소로 모델링되어 있다. 상부매트와 하부매트의 반지름은 19.81m이고, 매트의 두께는 3.0m로 동일하다. 면진장치의 특성은 Table 2와 같다.

3.1.2 국내 면진 원전구조물 해석모델

국내 면진 원전구조물 해석모델은 Fig. 4와 같이 상부구조물이 간략화된 모델을 사용하였다. 해석모델은 격납건물, 내부구조물, 보조건물이 각각 하나의 집중질량-보요소로 모델링되어 있으며, 상부구조물 밀면매트와 하부구조물 밀면매트는

Fig. 3 Beam-stick model for a base-isolated SASSI-NPP structure **Fig. 4** Beam-stick model for a base-isolated APR-NPP structure**Table 3** Natural period and frequency for simplified base-isolated APR-NPP model

Mode	Natural Period (sec)	Natural frequency (Hz)	Remarks
1	2.098	0.477	Y direction
2	2.097	0.477	X direction
3	1.409	0.709	Torsional direction

Table 4 Mechanical properties of isolation devices of the base-isolated APR-NPP model

	Horizontal direction		Vertical direction
	Equivalent linear analysis	Nonlinear analysis	Equivalent linear & Nonlinear analysis
	$K_{eff} = 8974 \text{ kN/m}$	$K_1 = 537713 \text{ kN/m}$	$K_v = 12899305 \text{ kN/m}$
	$C_{eff} = 1973 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$	$K_2 = 4205 \text{ kN/m}$	$C_v = 15887 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$
		$Q_d = 1010 \text{ kN}$	

입체요소로 모델링되어 있다. Table 3은 간략화된 면진 원전구조물 모델의 특성을 나타내는 모드해석 결과이다. 면진장치 요소는 총 486개로 되어 있으며, 면진장치의 특성은 Table 4와 같다.

3.1.3 입력지진

입력운동은 Fig. 5(a)와 같은 설계 스펙트럼을 만족하는 PGA 0.5g 지진파를 사용하였다. 이때 설계응답스펙트럼은 RG1.60을 기반으로 고유진동수영역인 25Hz의 가속도 성분을 30% 상향하고, ZPA를 33Hz에서 40Hz로 확장한 설계응답 스펙트럼이다. 입력운동의 통제점은 자유장지반의 지표면이다.

(a) Design response spectrum of the input motion

(b) Acceleration time history (PGA=0.5g)

(c) Displacement time history (PGD=0.696m)

Fig. 5 Input motion at ground surface of free-field soil

3.1.4 지반조건

지반조건은 국내 면진 원전설계 지반조건 중 S4 지반조건, S7 지반조건, S9 지반조건(Han *et al.*, 2015)을 사용하였으며, 각 지반조건의 전단파속도는 Fig. 6과 같다. 해석지반의 깊이는 지표면으로부터 60m까지 고려하였으며, 60m이하는 반무한층으로 가정하였다. 지표면으로부터 60m까지 전단파 속도는 S4 지반에서는 548.8m/s~1260.2m/s, S7 지반에서는 548.9m/s~1848.8m/s, S9 지반에서는 1437.1 m/s~2804.2m/s이다. 그리고 반무한층의 전단파속도는 S4 지반에서는 1862.3m/s, S7 지반에서는 2804.2m/s, S9

Fig. 6 Shear wave velocity of the soil profiles

지반에서는 2804.2m/s이다.

3.2 지반모델링 범위에 따른 매개변수해석

이 연구에서는 면진장치를 등가선형으로 모델링한 Fig. 7과 같은 BRM 해석모델을 이용하여 지반모델링 범위 r_0 에 따른 매개변수해석을 수행하였다. 매개변수해석의 하중조건은 정적 하중조건과 동적 지진하중조건에 대해 수행하였다.

(a) SASSI-NPP

(b) APR-NPP

Fig. 7 ANSYS models for BRM analyses of the base-isolated NPP structure

3.2.1 정적하중에 의한 BRM 모델의 매개변수해석

BRM 해석을 위한 최소 지반모델링 범위를 제안하기 위해 정적하중에 의한 매개변수해석을 수행하였다. 매개변수해석 시 SASSI-NPP 모델의 지반모델링 범위는 기초반경($R=19.8$ m)에 1.25배~8배인 모델을 사용하며, APR-NPP 모델의 지반모델링 범위는 기초반경($R=56.7$ m)에 1.1배~5배인 모델을 사용하였다. 이때 정적하중은 Fig. 8과 같이 구조물 집중질량에 단위 가속도를 곱하여 적용하였으며, 스프링 무차원 계수는 Case 1($\kappa_N=1$, $\kappa_T=1$)과 Case 2($\kappa_N=2$, $\kappa_T=2$)의 두 가지 모델을 이용하였다.

정적해석에 의한 격납건물 상단의 변위를 계산하고, 지반

Fig. 8 Definition of loads for the static analysis

(a) Case 1($\kappa_N=1$, $\kappa_T=1$)

(b) Case 2($\kappa_N=2$, $\kappa_T=2$)

Fig. 9 Convergence curves of the displacement at the top of containment

모델링 반경에 따른 변위수렴 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. 이때 변위수렴 곡선의 기준은 SASSI-NPP 모델의 경우 8R모델의 변위, APR-NPP 모델의 경우 5R모델의 변위를 이용하였다. BRM 모델의 매개변수해석결과 정적하중 조건에서 지반모델링 범위에 따른 구조물 응답의 영향은 작게 나타났으며, 격납건물 상단의 변위는 대체적으로 1.25R 이상의 모델에서 0.5% 이내로 수렴하였다. 이때 스프링 무차원 계수에 따른 차이는 최대 0.4% 이내로 매우 작았다.

3.2.2 지진하중에 의한 BRM 모델의 매개변수해석

지진하중에 의한 BRM 모델의 매개변수해석은 지반모델링 범위에 따른 매개변수해석을 수행하고, 구조물의 응답을 재래적인 지진해석결과와 비교하였다. 매개변수해석 시 SASSI-NPP 모델과 APR-NPP의 지반모델링 범위는 정적하중 해석 조건과 동일하다. BRM의 시간이력해석을 위한 ANSYS 해석모델은 Fig. 7의 모델을 이용하였으며, BRM 해석의 경계반력 계산을 위한 해석모델과 일반적인 경계반력의 시간 이력곡선은 Fig. 10과 같다. 재래의 SSI 해석은 Fig. 11과 같은 KIESSI-3D 해석모델을 이용하였다.

BRM 해석 모델링 범위에 따른 매개변수해석에 의한 격납 건물 상단의 수평응답스펙트럼을 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었으며, BRM 응답과 참조해 응답의 오차(e)를 식 (3)으로 계산하여 BRM 응답을 평가하였다.

$$e = \frac{1}{3} \left[\frac{\int_0^{3f_{iso}} |S_a^{BRM}(f) - S_a^{FD}(f)|^2 df}{\int_0^{3f_{iso}} |S_a^{FD}(f)|^2 df} + \frac{|f_{str}^{BRM} - f_{str}^{FD}|}{f_{str}^{FD}} + \frac{|S_a^{BRM}(f_{str}) - S_a^{FD}(f_{str})|}{S_a^{FD}(f_{str})} \right] \quad (3)$$

여기서, $S_a^{BRM}(f)$ 와 $S_a^{FD}(f)$ 는 BRM과 재래의 SSI 해석의 응답, f_{iso} 는 면진 진동수, f_{str} 은 구조물 진동수이다.

수렴성에 대한 기준을 BRM 응답과 참조해 응답의 오차가 5% 이내일 경우로 하면, SASSI-NPP 모델의 BRM 응답은 S4 지반조건은 4R(79.2m), S7 지반조건은 3R(59.4m), S9 지반조건은 4R(79.2m)에서 참조해와 수렴하였다. 한편 APR-NPP 모델의 BRM 응답은 S4 지반조건은 1.1R(62.4m), S7 지반조건은 1.25R(70.9m), S9 지반조건은 1.5R(85.0m)에서 참조해와 수렴하였다. 이때 BRM 해석의 응답 참조해와 수렴위한 기초 중앙부터 경계면까지의 거리는 두 예제구조물이 각 지반조건에 따라 유사하게 나타났다. 하지만 지반모델링 범위를 나타내기 위해 보편적으로 많이

비선형 SSI 해석을 위해 Spring-Damper 에너지 흡수경계조건을 적용한 BRM의 유한요소 모델링 범위에 따른 응답평가 —

(a) SASSI-NPP

(b) APR-NPP

Fig. 10 Numerical models for calculating reaction forces at fixed supports of base-isolator due to vertically incident SV-waves in x-z plane

Fig. 11 KIESSI-3D models for conventional SSI analyses of the base-isolated NPP structure

사용하는 구조물 기초의 크기에 대한 함수만으로 나타내기 해석모델에 따라 큰 편차를 보였다. 한편, 스프링 무차원 계수

Case1과 Case 2에 따른 BRM응답은 참조해 응답과 수렴하기 위한 BRM 해석의 지반모델링 범위가 유사하였다.

(a) S4 soil profile

(b) S7 soil profile

(c) S9 soil profile

Fig. 12 Comparison of response spectra for horizontal response at the top of containment of the equivalent linear base-isolated SASSI-NPP structure(Frequency Domain SSI analyses vs. BRM analyses, 5% damping)

Fig. 13 Comparison of response spectra for horizontal response at the top of containment of the equivalent linear base-isolated APR-NPP structure(Frequency Domain SSI analyses vs. BRM analyses, 5% damping)

3.3 파전달조건에 따른 BRM 해석모델의 지반모델링 범위 제안

이 연구에서는 BRM 해석의 지반모델링 범위 r_0 를 Fig. 14와 같이 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 과 지반모델링 범위 계수 α 의 함수로 나타내는 방법을 제안하고자 한다. 이때 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 은 지반의 고유진동수 f_{soil} 와 지반의 전단파속도 평균의 비로 나타낼 수 있고, 지반모델링 범위 계수 α 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{r_0 f_{soil}}{\bar{V}_s} \quad (4)$$

여기서, $\bar{V}_s$ 는 지반의 전단파속도 평균으로 전단파속도 1500 m/s 이상의 지반은 고정지반으로 가정하고, 전단파속도 1500 m/s 이하의 지반에 대한 평균값을 사용하였다. 지반의 고유진동수 f_{soil} 은 자유장지반 전달함수에 첫 번째 첨두 진동수를 사용하였다.

Fig. 14 Calculation method of the modeling range of the near-field soil according to wavelength of the soil

지반모델링 범위 계수 α 와 구조물 기초반경에 대한 비율에 따른 평균오차수렴 곡선을 Fig. 15에 나타내었다. 평균 오차수렴 곡선의 결과 BRM 해석의 지반모델링 범위 r_0 를 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 에 함수로 나타내는 방법은 구조물 기초반경에 대한 함수로 나타내는 방법보다 예제구조물에 따른 편차가 작게 나타났다. BRM의 지반모델링 범위를 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 의 0.6배 이상 모델링한 경우의 BRM 응답은 참조해와 5% 오차범위 이내로 수렴하였다.

Fig. 15 Average error (e) of response spectra based on BRM analysis

4. 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석

BRM을 이용하여 국내 면진 원전구조물 해석모델의 비선형 SSI 해석을 수행하고, 직접법을 이용한 비선형 SSI 해석 결과와 비교하였다. 비선형 SSI 해석문제를 위한 직접법의 개념도는 Fig. 16과 같다. 직접법은 지반과 구조물을 직접 모델링하고, 지반의 응답은 유한요소해석에 기반한 수치해로 계산한다. 탄성파를 흡수하기 위해 지반의 경계조건에 ABC (absorbing boundary condition)요소를 사용하였으며, 자유장지반의 지진입력을 모사하기 위해 자유장 지반기동 요소를 모델링하였다. 이때 경계조건의 ABC 요소는 감쇠 요소만을 적용하였으며, 접선방향 및 법선방향의 감쇠계수는 식 (1) 및 식 (2)와 같다. 입력운동은 기반암의 가속도 이력곡선을 이용하였다. 이때 기반암의 가속도 이력곡선은 SHAKE프로그램으로 계산하였다. 지반조건 S4, S7, S9에 대한 기반암의 가속도 이력곡선은 Fig. 17과 같다. 직접법 해석모델은 지반모델링 범위를 기초 반지름의 5R로 충분히 모델링 하였으며, 직접법 해석에 사용된 수치해석모델은 Fig.

Fig. 16 Concept of the direct method

(a) S4 soil profile (PGA=0.50g)

(b) S7 soil profile (PGA=0.43g)

(c) S9 soil profile (PGA=0.50g)

Fig. 17 Acceleration time history of the outcrop input motion

Fig. 18 Numerical model of the direct method for base-isolated APR-NPP structure

(a) S4 soil profile

(b) S7 soil profile

(c) S9 soil profile

Fig. 19 Nonlinear hysteresis curves of the seismic isolator

(a) S4 soil profile

(b) S7 soil profile

(c) S9 soil profile

Fig. 20 Comparison of response spectra for horizontal response at the top of containment of the base-isolated APR-NPP structure (BRM analysis vs. Direct analysis, 5% damping)

18과 같다.

국내 면진 원전구조물 해석모델의 비선형 SSI 해석 시 BRM 해석모델의 지반모델링 범위는 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 에 0.6배를 적용하여 계산하였으며, 세 가지 지반의 평균적인 지반모델링 범위인 기초 반지름의 2R 모델을 해석에 사용하였다. 면진장치를 제외한 BRM 해석모델 및 경계반력은 등가선형 해석모델과 동일하며, 면진장치의 비선형 특성은 Table 4와 같다. 스프링 무차원 계수는 Case 2($\kappa_N=2$,

$\kappa_T=2$)를 사용하였다.

BRM과 직접법을 이용한 APR-NPP 모델의 비선형 SSI 해석에 의한 면진장치의 최대변위 및 격납건물 상단 수평 가속도 응답스펙트럼을 비교하여 Fig. 19와 Fig. 20에 나타내었다. BRM과 직접법에 의한 면진장치의 최대변위는 최대 1.3% 이내의 차이로 매우 유사하였다. 또한 두 해석방법에 의한 격납건물 상단 수평가속도 응답스펙트럼은 전반적으로 매우 유사하였으며, 면진진동수에서 0.9% 이내, 구조물 진동수에서 1.6% 이내의 차이를 보였다.

5. 결 론

이 연구에서는 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석을 위한 BRM 해석법의 적정한 지반모델링 범위를 제안하기 위한 매개변수 해석을 수행하였다. 매개변수 해석을 위한 해석모델은 면진장치를 등가선형으로 고려한 등가선형 SSI 해석모델을 이용하였다. 이때 매개변수는 지반조건, 지반모델링 범위이며, BRM을 이용한 구조물의 응답은 재래의 SSI 해석의 응답과 비교하였다. 또한 BRM을 이용한 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석을 수행하고, 구조물의 응답을 직접법의 응답과 비교하였다. 등가선형 SSI 해석의 매개변수 해석결과와 비선형 SSI 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 매개변수 해석결과와 BRM 해석의 지반모델링 범위는 구조물 기초의 크기는 물론 지반조건에 대한 영향이 크게 나타났다. 정적하중 조건에 의한 BRM 해석의 지반모델링 범위는 구조물 기초의 최소 1.25R 이상 모델링할 것을 추천한다. 그리고 지진해석 시 BRM 해석의 지반모델링 범위는 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 과 지반모델링 범위 계수 α 의 함수로 계산하는 방법을 제안한다. 매개변수 해석 결과, BRM 해석의 지반모델링 범위는 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 에 0.6배 이상을 모델링하는 것을 추천한다.
- 2) 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 에 0.6배로 지반을 모델링한 BRM 해석모델을 이용하여 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석 결과, BRM 응답은 지반을 충분히 모델링한 직접법의 결과와 매우 유사하게 나타났다. BRM 해석의 지반모델링 범위를 결정하기 위해 지반고유진동수의 파장 λ_{soil} 을 사용할 경우 효율적이고 정확한 비선형 BRM 응답을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부 기술혁신사업 중 원자력융합원천기술 과제(2014151010170B)의 연구비 지원으로 수행하였습니다.

References

- ANSYS Version 16.0.** www.ansys.com
- ASCE 4-16 Draft.** (2016) Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary, ASCE.
- Basu, U.** (2009) Explicit Finite Element Perfectly Matched Layer for Transient Three-Dimensional Elastic Waves, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 77, pp.151~176.
- Bielak, J., Loukakis, K., Hisada, Y., Yoshimura, C.** (2003) Domain Reduction Method for Three-Dimensional Earthquake Modeling in Localized Regions, Part I: theory, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93(2), pp.817~824.
- Deeks, A.J., Randolph, M.F.** (1994) Axisymmetric Time Domain Transmitting Boundaries, *J. Eng. Mech., ASCE*, 120(1), pp.25~42.
- EduPro Civil Systems.** ProShake User's Manual : Ground Response Analysis Program, Version 1.1.
- Han, S.R., Nam, M.J., Seo, C.G., Lee, S.H.** (2015) Soil-Structure Interaction Analysis for Base-Isolated Nuclear Power Plants Using an Iterative Approach, *Earthq. Eng. Soc. Korea*, 19(1), pp.21~28.
- Kellezi, L.** (2000) Local Transmitting Boundaries for Transient Elastic Analysis, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 19, pp.533~547.
- Kim, J.M., Lee, E.H.** (2013) Boundary Reaction Method for Nonlinear Soil-Structure Interaction Analysis, Proceeding KSCE Conference.
- Kim, J.M., Lee, E.H., Lee, S.H.** (2016) Boundary Reaction Method for Nonlinear Analysis of Soil-Structure Interaction under Earthquake Loads, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 89, pp.85~90.
- Lee, G.H., Hong, K.Y., Lee, E.H., Kim, J.M.** (2014) Verification of Linear FE Model for Nonlinear SSI Analysis by Boundary Reaction Method, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 27(2), pp.95~102.
- Lee, J.H., Kim, J.H., Kim, J.K.** (2016) Perfectly Matched Discrete Layers for Three-Dimensional Nonlinear Soil-Structure Interaction Analysis, *Comput. & Struct.*, 165, pp.34~47.
- Li, P., Song, E.X.** (2014) A Viscous-Spring Transmitting Boundary for Cylindrical Wave Propagation in Saturated Poroelectric Media, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 65, pp.269~283.
- Liu, J., Gu, Y., Wang, Y., Li, B.** (2006) Efficient Procedure for Seismic Analysis of Soil-Structure Interaction System, *Tsinghua Sci. & Tech.*, 11, pp.625~631.
- Liu, J., Lu, Y.** (1998) A Direct Method for Analysis of Dynamic Soil-Structure Interaction Based on Interface Idea, *Dev. Geotech. Eng.*, 83 - Dynamic Soil-Structure Interaction, pp.261~276.
- Lysmer, J., Tabatabaie-Raissi M., Tajirian, F., Vahdani, S., Ostadan, F.** (1988) SASSI: A System for Analysis of Soil-Structure Interaction-User's Manual. University of California, Berkeley, CA.
- Seo, C.G., Kim, J.M.** (2012) KIESSI Program for 3-D Soil-Structure Interaction Analysis, *Comput. Struct. Eng.*, 25(3), pp.77~83.
- Wolf, J.P.** (1985) Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis, Prentice-Hall.

요 지

경계반력법은 일반적인 복합법에서 필요한 진동수영역과 시간영역의 반복 작업이 필요없는 두 단계의 시간수영역 부구조법이다. 경계반력법은 다음의 두 단계로 나누어진다: (1) 진동수영역에서 선형구간과 비선형구간 경계에서 경계반력계산, (2) 시간영역에서 경계반력을 이용한 파동방사형문제 해석. 이때 시간영역에서는 파동방사형문제를 모사하기 위해 근역지반을 모델링한다. 이 연구에서는 면진원전구조물의 비선형 SSI 해석을 위한 BRM 해석의 근역지반 모델링 범위에 따른 응답을 평가하였다. 이를 위해 등가선형 SSI 문제를 이용하여 매개변수해석을 수행하였다. BRM 응답의 정확성을 평가하기 위해 BRM 응답은 재래의 SSI 해석의 응답과 비교하였다. 수치해석결과 BRM 해석을 위한 근역지반 모델링 범위는 기초의 크기 뿐만 아니라 지반조건의 영향을 받았다. 마지막으로, BRM 해석을 면진원전구조물의 비선형 SSI 해석에 적용하므로 BRM의 정확성과 효율성을 입증하였다.

핵심용어 : 비선형 지반-구조물 상호작용해석, 경계반력법, 직접법, ANSYS, KIESSI-3D