



기초의 묻힘이 면진 원전구조물의 지진응답에 미치는 효과

이 은 행¹ · 김 재 민^{2*} · 이 상 훈³ · 김 재 희³

¹전남대학교 대학원 건설·환경공학과, ²전남대학교 해양토목공학과, ³한국전력기술(주)

Embedment Effect of Foundation on the Response of Base-Isolated NPP Structure

Eun-Haeng Lee¹, Jae-Min Kim^{2*}, Sang-Hoon Lee³ and Jae-Hee Kim³

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

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

³KEPCO E&C, Gimcheon, 39660, Korea

Abstract

This study is aimed to evaluate the embedment effect of foundation as compared to the surface foundation on the response of a base-isolated nuclear power plant structure. For this purpose, the boundary reaction method (BRM), which is a two-step frequency domain and time domain technique, is used for the nonlinear SSI analysis considering nonlinear behavior of base isolators. The numerical model of the BRM is verified by comparing the numerical results obtained by the BRM and the conventional frequency-domain SSI analysis for an equivalent linear SSI system. Finally, the displacement response of the base isolation and the horizontal response of the structure obtained by the nonlinear SSI analysis using the moat foundation model are compared with those using the surface foundation model. The comparison showed that the displacement response of the base isolation can be reduced by considering the embedment effect of foundation.

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

1. 서 론

최근 들어 원자력발전소가 강진지역에 건설될 가능성이 높아지고 있으며, 이에 따라 지속적으로 높아지는 지진력에 대응할 수 있는 원전 건설에 관심이 높아지고 있다(Lee and Lee, 2010). 국내에서는 강진지역에서 원자력발전소의 내진 성능을 확보하기 위해 면진시스템을 원전구조물에 적용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다(Kim and Lee, 2013; Lee *et al.*, 2014a; 2014b; 2015; Han *et al.*). 이러한 면진시스템이 원전시설물에 사용된 사례로는 프랑스 Cruas 원자력발전소와 남아공의 Koeberg 원자력발전소가 있으며, 프랑스 Cadarache 원자력발전소가 건설되고 있다(Forni *et al.*, 2012). 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 4-12 draft, 2012). 또한 원전 심사지침인 U.S. NRC SRP 3.7.2 "Seismic System Analysis"(NUREC-0800, 2007)에서는 SSI 해석 시 구조물의 기초가 지반에 묻힌 효과를 고려하도록 하고 있다. 기초 묻힘 효과를 고려할 경우 구조물 기초에 대한 지반의 회전강성과 감쇠의 증가로 인해 구조물의 응답이 감소할 수 있다(Apsel and Luco, 1987; Mita and Luco, 1987; Gazetas, 1991; Jaya and Meher Prasad, 2004). 최근 들어 면진시스템 구조물에서 SSI 효과에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다(Spyrakos *et al.*, 2009; Alavi and Alidoost, 2012; Jarernprasert *et al.*, 2013;

* Corresponding author:

Tel: +82-61-659-7245; E-mail: jm4kim@jnu.ac.kr

Received March 17 2016; Revised July 27 2016;

Accepted September 29 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.

Karabork *et al.*, 2014; Luco, 2014). 하지만 대부분의 기존연구에서는 지표기초 모델을 이용하였으며, 면진 원전 구조물과 같이 매우 복잡하고 대형인 구조물에서 기초 문힘 효과가 구조물의 응답에 미치는 영향에 대해서는 좀 더 정밀한 분석이 필요하다.

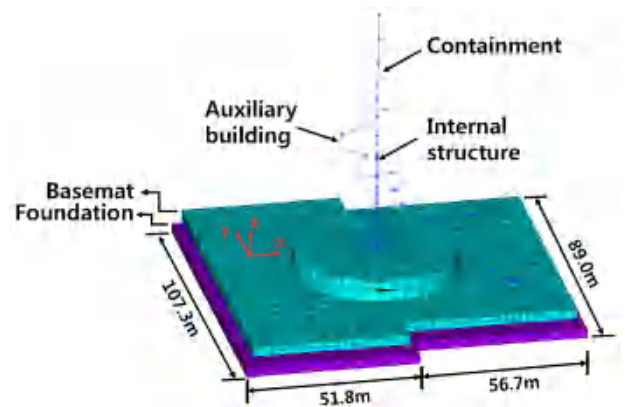
비선형 SSI 문제의 해를 구하기 위한 전통적인 방법으로는 주파수영역해석과 시간영역해석을 복합적으로 사용하는 Hybrid 진동수-시간 영역해석(Kawamoto, 1983; Bernal and Youssef, 1998) 등이 사용되어 왔다. 최근에는 DRM(domain reduction method)(Bielak *et al.*, 2003) 및 PML(perfectly matched layer)(Basu, 2009)을 동시에 사용한 방법이 개발되고 있으며(Solberg *et al.*, 2013), LS-DYNA 프로그램(LSTC, 2010)에는 이 같은 기능이 제공되고 있다. 또한 3차원 시간영역 PMDL(perfectly matched discrete layers)(Lee *et al.*, 2016)의 연구도 수행된 바 있다. 실무에서 비선형 SSI 효과를 고려하기 위한 해석기술의 하나로써 반복기법이 필요 없는 경계반력법(boundary reaction method, BRM)이 제안되었다(Kim and Lee, 2013; Lee *et al.*, 2014a; 2015; Kim *et al.* 2016). BRM 방법은 진동수 영역에 기반을 둔 선형 SSI 해석과 비선형해석을 수행할 수 있는 시간영역해석을 결합하여 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석을 수행하는 방법이다.

이 연구에서는 기초 문힘 효과가 면진 원전구조물의 지진 응답에 미치는 영향을 분석하였다. 면진장치의 비선형성이 고려된 SSI 해석은 BRM 해석법을 이용하여 수행하였다. BRM을 이용한 정확한 비선형 SSI 해석을 위해서는 선형해석 모델에 대한 신뢰성이 확보되어야 한다. 면진장치를 등가선형으로 모델링한 선형해석문제에 대한 BRM의 응답을 일반적인 지진해석의 응답과 비교 검토하였다. 선형모델에 대한 검증 후 지표 기초모델과 기초 문힘 효과가 고려된 Moat 기초모델의 비선형 SSI 해석을 수행하였다.

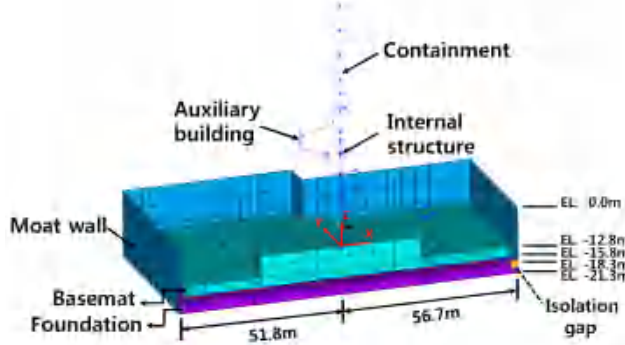
2. 비선형 SSI 해석

2.1 해석모델

비선형 SSI 해석을 위한 구조물은 국내 면진 원전구조물(Han *et al.*, 2015)의 상부구조물이 간략화된 모델을 이용하였다. 간략화된 면진 원전구조물은 Fig. 1과 같이 원자로 건물, 내부구조물, 보조건물이 하나의 집중질량 보요소로 모델링되어 있으며, 상부구조물 밑면매트와 하부구조물 밑면매트는 입체요소로 모델링되어 있다. Table 1은 간략화된 면진 원전구조물 모델의 특성을 보이기 위한 모드해석 결과이다.



(a) Surface mat foundation NPP model



(b) Moat foundation NPP model

Fig. 1 Beam-stick models for the base-isolated NPP

Table 1 Natural period and frequency for simplified base-isolated 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

해석모델의 기초형식은 지표기초와 Moat 기초로 두 가지이다. 면진 원전구조물의 Moat 기초는 지진발생 시 면진된 상부 구조물이 일정거리를 제한없이 움직일 수 있도록 하는 정지 거리(isolation gap)를 포함하고 있으며, 면진시스템의 과도한 변위를 방지하기 위하여 설계된 정지체(moat wall)를 포함하고 있다. Moat 기초는 지표면으로부터 21.3m(70ft) 묻혀 있으며, Moat 기초모델의 정지체는 Fig. 1(b)와 같이 쉘요소로 모델링하였다. 면진장치의 요소는 총 486개로 되어 있으며, 면진장치 요소는 Bilinear 모델로 모사하였다. 면진장치의 물성치는 Table 2와 같다.

지반조건은 국내 원전설계 지반조건 중 유연한 지반에 속하는 S2 지반조건과 일반적인 암반조건인 S7 지반조건(Han *et al.*, 2015)을 사용하였으며, S2와 S7의 지반 물성치는 Table 3과 같다. S2 지반조건의 전단파속도는

Table 2 Mechanical properties of isolation devices and load-displacement curve

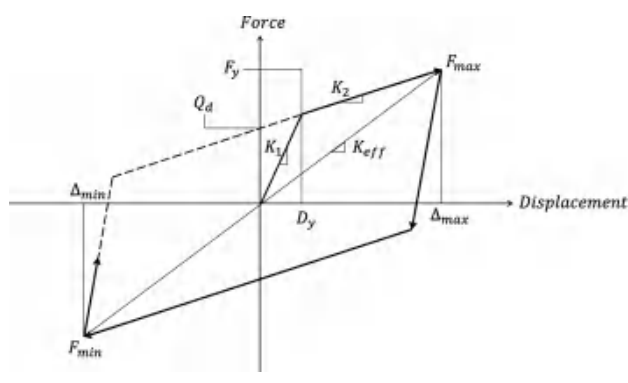
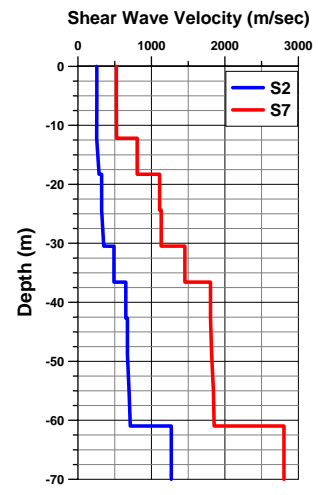
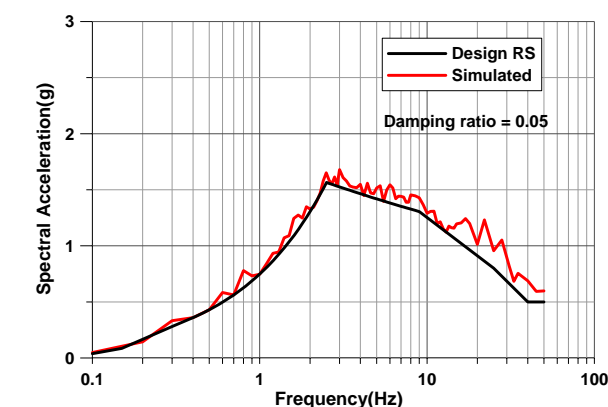
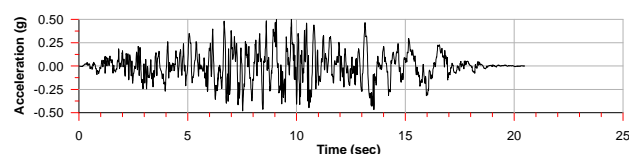
	Parameters	Values
	K_1 : Initial stiffness	537713kN/m
	K_2 : Second stiffness	4205kN/m
	F_y : Yield strength	1010kN
	D_y : Yield displacement	0.0019m
	F_{max} : Maximum strength	1886kN
	Δ_{max} : Maximum displacement	0.2103m
	Q_d : Zero displacement force	1001kN
	K_{eff} : Effective stiffness	8974kN/m
	C_{eff} : Effective damping	1973kN·s/m
	K_v : Vertical direction effective stiffness	12899305kN/m
	C_v : Vertical direction effective damping	15887kN·s/m

Table 3 Soil properties of the S2 and S7 soil profiles

	Soil Layer	Thickness (m)	Poisson's ratio		Share wave velocity (m/sec)		Mass density (kg/m ³)		Damping ratio	
			S2	S7	S2	S7	S2	S7	S2	S7
	Layer 1	6	0.48	0.42	289.0	548.9	2001	2081	0.042	0.023
	Layer 2	6	0.48	0.42	289.3	554.6	2001	2081	0.056	0.029
	Layer 3	6	0.48	0.36	308.7	1010.6	2001	2145	0.054	0.032
	Layer 4	6	0.47	0.35	322.9	1152.0	2001	2161	0.055	0.032
	Layer 5	6	0.47	0.35	336.6	1173.3	2001	2161	0.058	0.033
	Layer 6	6	0.40	0.34	627.7	1781.9	2081	2321	0.030	0.010
	Layer 7	6	0.40	0.34	656.5	1798.5	2081	2321	0.025	0.010
	Layer 8	6	0.40	0.34	673.2	1815.2	2081	2321	0.026	0.010
	Layer 9	6	0.40	0.34	689.2	1832.1	2081	2321	0.027	0.011
	Layer 10	6	0.40	0.34	704.9	1848.8	2081	2321	0.028	0.011
	Half space	-	0.35	0.33	1286.0	2804.2	2161	2481	0.035	0.010



(a) Design response spectrum of the input motion



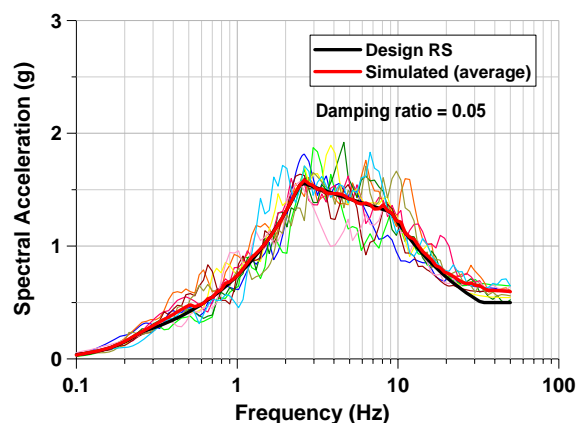
(b) Acceleration time history

Fig. 2 Input motion of single set at ground surface of free-field soil

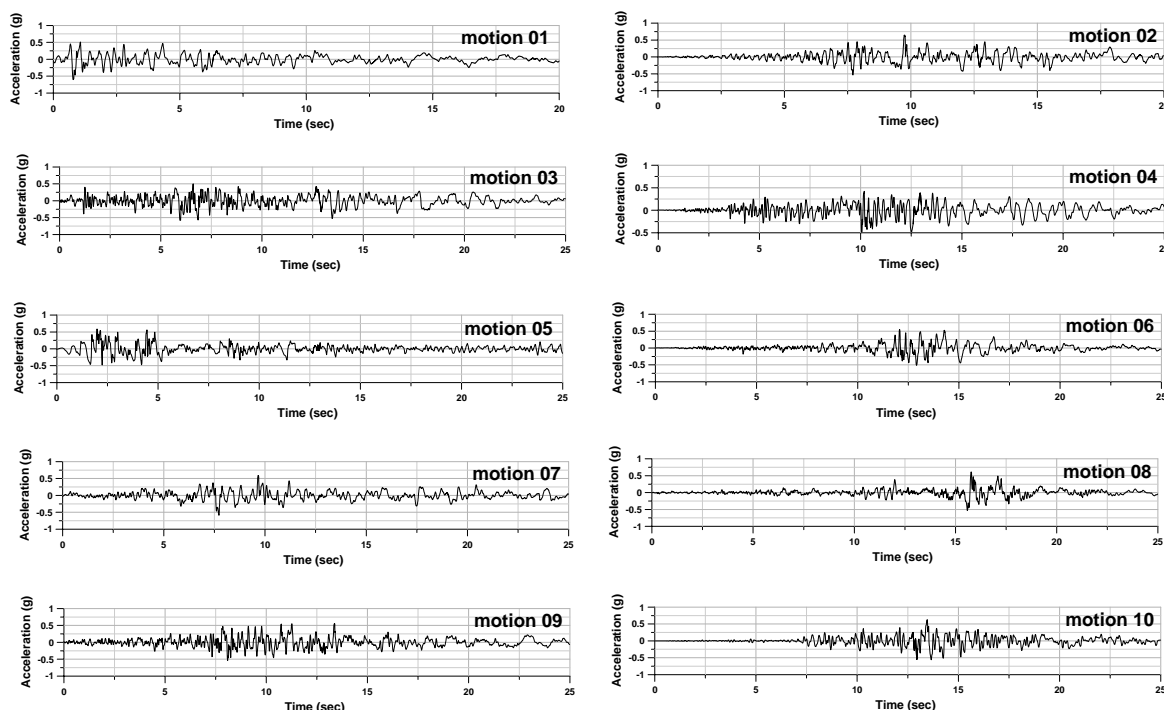
256m/sec~1269m/sec이며, S7 지반조건은 523m/sec~2804m/sec이다. 입력운동은 RG1.60 설계 스펙트럼을 만족하는 Fig. 2와 같은 단일세트 입력운동과 Fig. 3과 같은 다중세트 입력운동을 사용하였다. 단일세트 입력운동은 PSD (power spectral density) 함수에 기반하여 작성된 인공 지진파이며, 다중세트 입력운동은 실측지진파를 수정하여 작성된 인공지진파이다. 입력운동의 통제점은 자유장지반의 지표면이며, 지진입력 방향은 수평방향 중 X축이다.

2.2 BRM 해석모델의 작성 및 검증

면진 원전구조물의 비선형 SSI 문제는 Fig. 4(a)와 같이 지반의 외부에서 지진파가 입사되고, 선형으로 가정된 근역 지반과 원역지반, 비선형성의 구조물 또는 지반으로 나타낼 수 있다. BRM개념을 이용하면 Fig. 4(a)의 비선형 SSI 문제는 Fig. 4(b)와 같이 선형영역과 비선형영역의 경계를 고정시킨



(a) Design response spectrum of the input motion

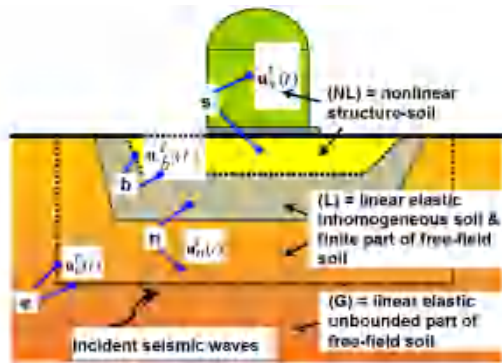


(b) Acceleration time history

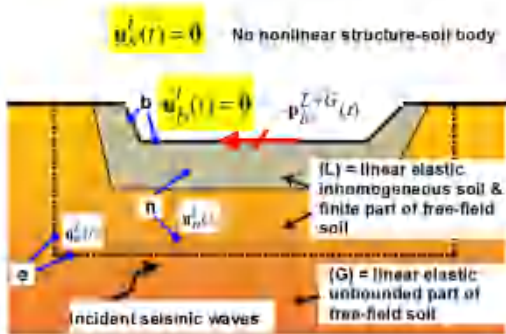
Fig. 3 Input motions of multiple sets at ground surface of free-field soil

부구조(I)과 Fig. 4(c)와 같은 부구조(II)의 중첩으로 나타낼 수 있다. 이 때 부구조(I)은 선형 SSI 문제인 반면 부구조(II)는 비선형문제이다. 선형 SSI 문제인 BRM의 부구조(I)에서는 진동수영역에 기반을 둔 SSI 해석프로그램을 이용하여 비선형 구조물 영역과 선형 지반-구조물 시스템의 경계면에서 경계반력을 계산한다. 이때 해석프로그램은 진동수영역 선형 SSI 해석프로그램인 KIESSI-3D(Seo and Kim, 2012)를 이용하였다. 그리고 부구조(II)에서는 계산된 경계반력을 반대 방향의 하중으로 작용시켜 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행한다. 비선형 시간이력 해석 프로그램은 먼진장치의 비선형성을 고려할 수 있는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS(ANSYS Ver.16.0)를

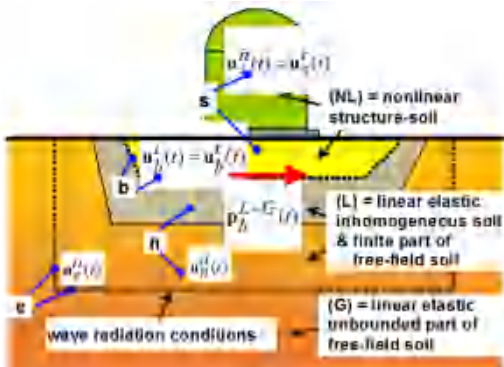
이용하였다. ANSYS 해석모델 작성시 입체요소는 SOLID185 요소, 쉘 요소는 SHELL181, 보요소는 BEAM44, 지반 및 먼진장치의 스프링 요소는 COMBIN14와 COMBIN40을 이용하였다. BRM의 부구조(II)에서는 지반-구조물 상호작용에서 발생하는 방사감쇠의 효율적인 처리를 위하여 해석 영역의 경계에서 일종의 에너지흡수경계조건인 PML 요소나 감쇠기-스프링으로 경계를 처리할 수 있는 프로그램이 필요하다(Lee *et al.*, 2014a). 이 연구에서는 감쇠기-스프링으로 경계면을 모델링하였다. 경계면에 스프링요소 및 점성감쇠 요소의 계수 값은 Deeks와 Randolph(1994), Kellezi (2000), Liu(2006), Li와 Song(2014) 등이 제안한 방법을 이용할 수 있다. 이때 경계면에서 단위면적당 접선방향 스프링



(a) Nonlinear SSI problem considered in this study



(b) BRM substructure (I) : linear scattering problem to calculate reaction forces



(c) BRM substructure (II) : Wave radiation problem to obtain nonlinear responses

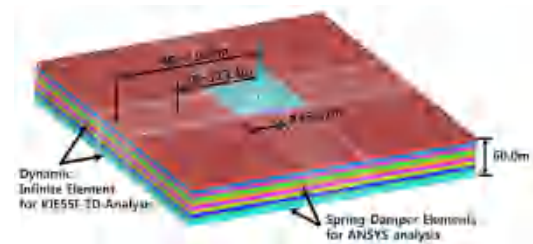
Fig. 4 Concept of boundary reaction method (Kim *et al.* 2016)

계수 K_T 및 감쇠계수 C_T 는 식 (1), 법선방향 스프링계수 K_N 및 감쇠계수 C_N 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

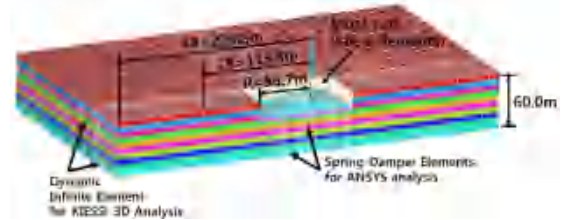
$$K_T = \kappa_T \frac{\rho c_s^2}{2r}, \quad C_T = \rho c_s \quad (\text{접선방향}) \quad (1)$$

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

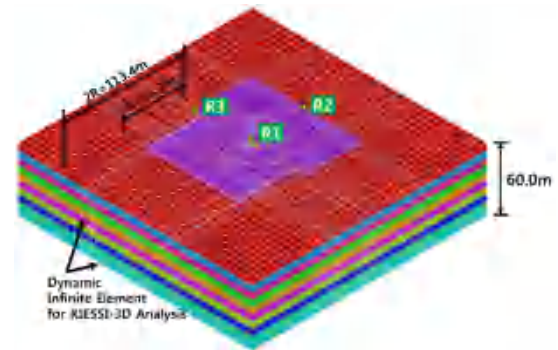
여기서, r 은 기초 중심으로부터 경계면까지의 거리, ρ 는 원역지반의 질량밀도, c_p 는 원역지반의 압축파속도, c_s 는 원역지반의 전단파속도, κ_N 과 κ_T 는 법선방향과 접선방향의 스프링



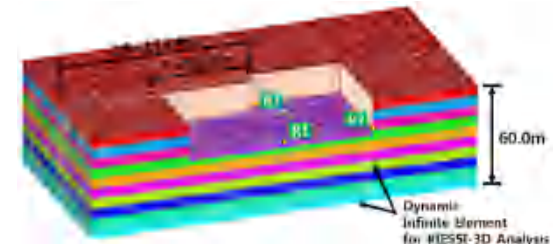
(a) Surface mat foundation NPP model



(b) Moat foundation NPP model

Fig. 5 Numerical models for the base-isolated NPP

(a) Surface mat foundation NPP model



(b) Moat foundation NPP model

Fig. 6 KIESSI-3D models for calculating reaction forces at the fixed supports of base-isolator due to vertically incident SV-waves in x-z plane

무차원 계수이다.

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 상호 작용에서 발생하는 방사감쇠를 효율적으로 처리할 수 있는 해석모델의 작성이 중요하다. 이 연구에서는 BRM 해석모델 및 계산된 경계반력을 검증하기 위해 등가선형 시간이력

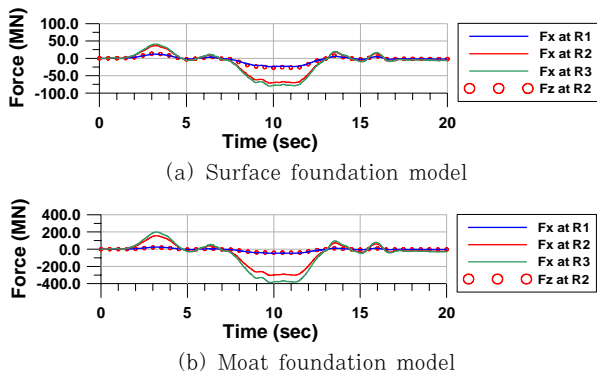


Fig. 7 Reaction forces of the S2 soil case with input motion of single set at the fixed support of base-isolator

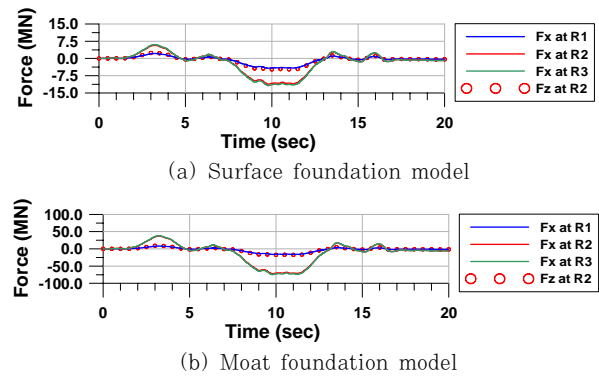
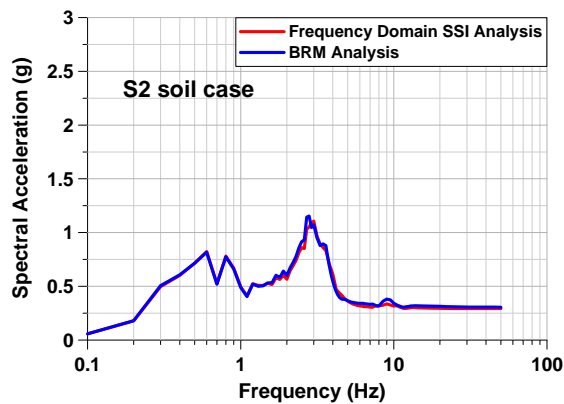
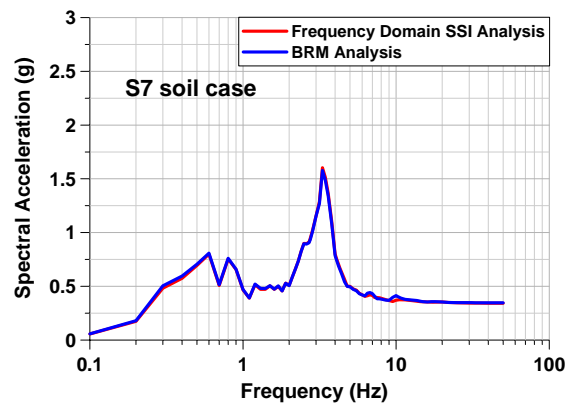


Fig. 8 Reaction forces of the S7 soil case with input motion of single set at the fixed support of base-isolator



(a) Surface mat foundation NPP mode



(b) Moat foundation NPP model

Fig. 9 Comparison of response spectra for horizontal response with input motion of single set at the top of containment of the equivalent linear base-isolated NPP building(Frequency Domain SSI analysis vs. BRM analysis, 5% damping)

해석을 수행하고, 구조물응답을 KIESSI-3D를 이용한 일반적인 지진해석결과와 비교하였다. 해석에 사용된 KIESSI-3D와 ANSYS의 해석모델은 Fig. 5와 같다. 이때 ANSYS 해석 모델의 경우 S2 지반모델은 지반의 모델링범위가 기초반경에 4R, S7 지반모델은 지반의 모델링범위가 기초반경에 2R인 모델을 사용하였다. S2 지반과 S7 지반 모델의 유한요소 최대크기는 동일하게 적용하였다. 유한요소 최대크기 h_{max} 를

표층지반의 전단파속도 $V_{s,min}$ 와 최대진동수 f_{max} 를 이용하여 $h_{max} = \frac{1}{5} \frac{V_{s,min}}{f_{max}}$ (Lysmer *et al.* 1988)으로 나타내면, S2 지반과 S7 지반의 모델의 최대진동수 f_{max} 는 각각 9.6Hz와 18.3Hz이다. 등가선형해석에서 먼진장치의 강성은 Table 1의 K_{eff} 값을 적용하였으며, 먼진장치의 감쇠는 점성감쇠계수로 모델링 하여 C_{eff} 를 적용하였다.

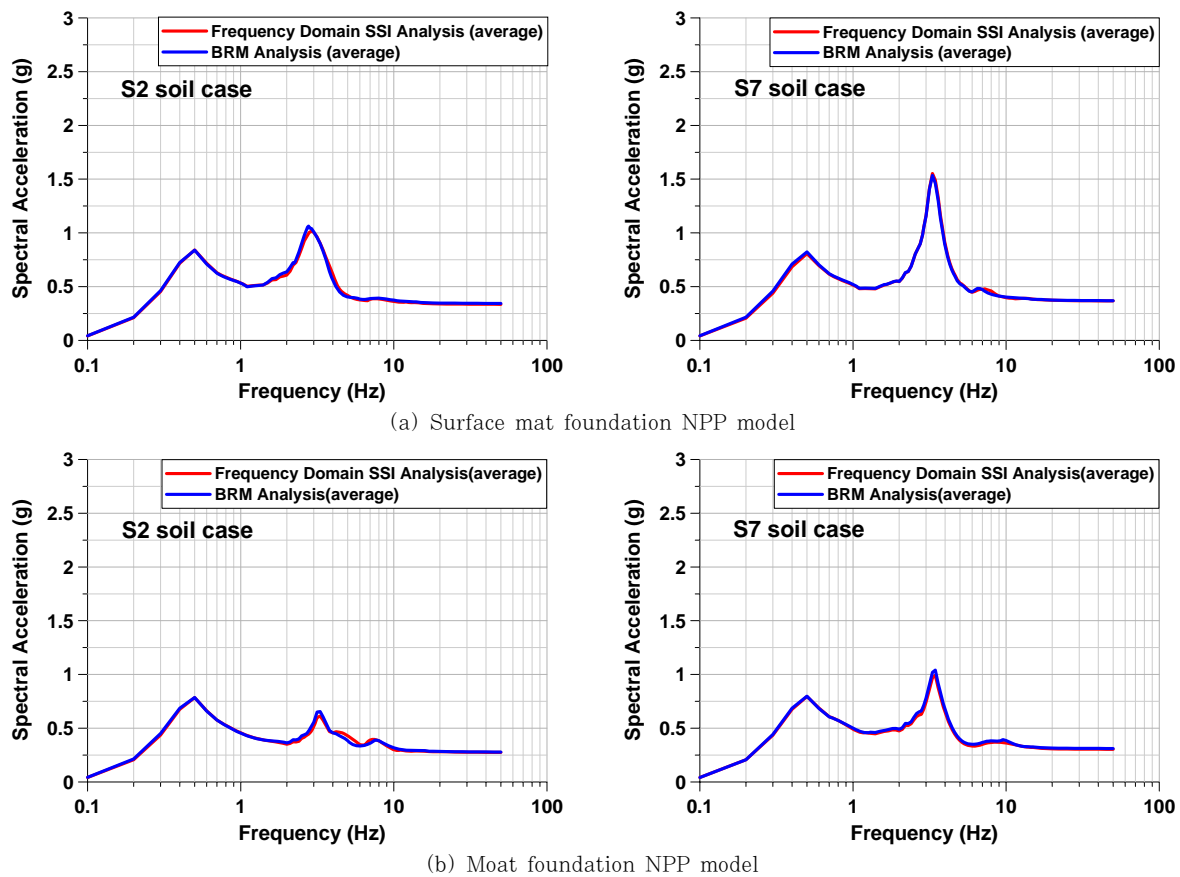


Fig. 10 Comparison of response spectra for horizontal response with input motions of multiple sets at the top of containment of the equivalent linear base-isolated NPP building(Frequency Domain SSI analysis vs. BRM analysis, 5% damping)

BRM 해석의 부구조(II) 유효하중인 경계면의 반력은 KIESSI-3D를 이용하여 선형영역과 비선형영역의 경계면인 면진장치 하단부 486개 지점에서 계산하였다. 경계반력은 면진장치 하단부를 고정 한 상태에서 일반적인 지진해석을 통하여 계산하였으며, KIESSI-3D 해석모델은 Fig. 6과 같다. KIESSI-3D 프로그램에서는 경계반력을 시간영역의 하중형태로 출력해 주며, Fig. 7과 Fig. 8은 S2와 S7 지반 조건의 단일세트 입력운동에 의한 R1, R2, R3지점에서 반력을 도시한 것이다. R1 지점은 격납건물의 중앙점이고, R2 지점은 회전성분(rocking)의 반력이 포함된 지점이며, R3 지점은 Y축의 외곽지점이다.

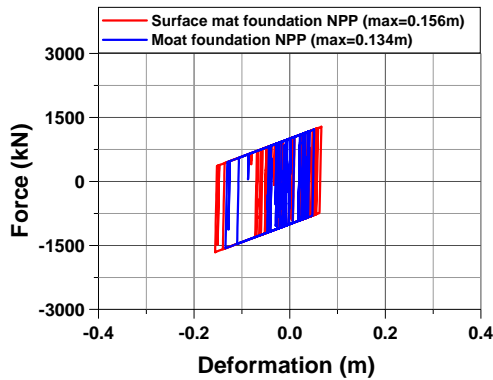
면진장치를 등가선형으로 모델링한 BRM 해석에 의한 격납건물상단의 수평응답스펙트럼을 진동수영역 등가선형 SSI 해석에 의한 응답과 비교하였다. Fig. 9는 단일세트 입력 운동에 의한 응답이며, Fig. 10은 다중세트 입력운동에 의한 응답이다. 각 입력운동과 지반조건에 따른 BRM에 의한 응답이 진동수영역 등가선형 SSI 해석결과와 매우 잘 일치하여 비선형해석을 위한 BRM 해석모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

2.3 BRM을 이용한 비선형 SSI 해석

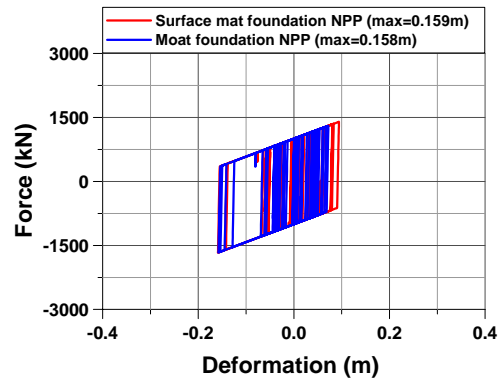
BRM을 이용하여 지표기초 구조물과 문힘효과를 고려한 Moat 기초 구조물의 비선형 SSI 해석을 수행하고, 문힘효과에 따른 비선형 SSI 해석의 응답을 평가하였다. 면진장치의 비선형요소를 제외한 BRM 해석모델 및 경계반력은 등가선형 해석모델과 동일하며, 면진장치의 비선형 특성은 Table 2와 같다.

일반적으로 면진 구조물의 경우 구조물에 작용하는 지진력은 감소하는 반면, 상부구조물의 변위는 커지게 된다. 따라서 면진 구조물에서 변위는 중요한 설계변수이다(Hahm *et al.*, 2014). 이 연구에서는 비선형 SSI 해석에 의한 지표기초와 Moat 기초 구조물에 면진장치의 변위를 비교하였다. Fig. 11은 단일세트 입력운동 의한 면진장치의 비선형 이력곡선이며, Fig. 12는 다중세트 입력운동 의한 면진장치의 비선형 이력 곡선이다. 또한 다중세트 입력운동에 의한 면진장치 최대변위 도수분포를 Fig. 13에 정리하였다. 또한 면진장치의 최대 변위를 Table 4에 정리하였다.

단일세트 입력운동과 다중세트 입력운동에 의한 해석결과와

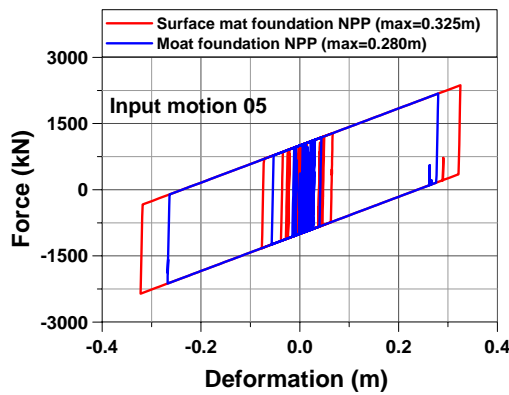


(a) S2 soil case

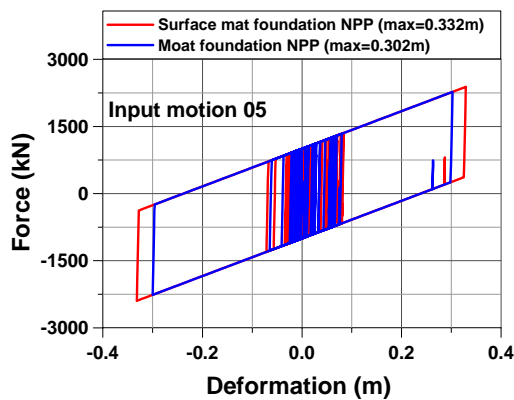
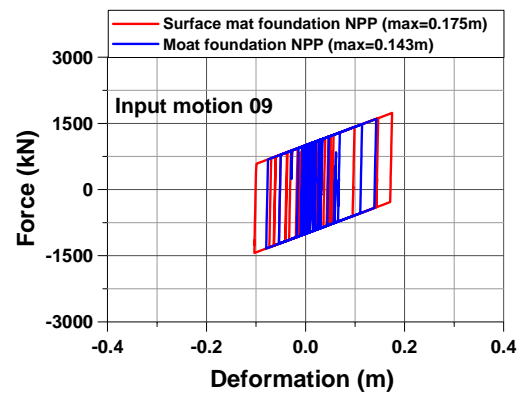


(b) S7 soil case

Fig. 11 Nonlinear hysteresis curves of the seismic isolator with input motion of single set



(a) S2 soil case



(b) S7 soil case

Fig. 12 Nonlinear hysteresis curves of the seismic isolator with input motions of multiple sets

경향은 유사하였으며, Moat 기초 모델의 먼진장치 최대변위는 지표기초 모델에 비해 단일세트 입력운동의 경우 S2 지반조건 약 14%, S7 지반조건 약 1%, 다중세트 입력운동의 경우 S2 지반조건 약 18%, S7 지반조건 약 7% 감소하였다. Moat 기초 모델의 먼진장치 최대변위는 지표기초에 비해 감소하였으며, 기초가 문힘에 따른 먼진장치 변위의 감소효과는 유연한 지반에서 더욱 크게 나타났다. 이러한 원인은 Fig. 14와 같은 매트하단 전달함수 결과에서 나타난 것처럼 유연한

지반의 Moat 기초 모델이 먼진진동수(약 0.4Hz~약 1.0Hz)에서 SSI 효과와 입력운동의 감소효과가 크게 나타났기 때문이다. Fig. 14에서 C 지점의 전달함수는 Moat 기초 모델의 입력운동에 대한 감소효과이며, C 지점과 D 지점의 차이는 SSI 효과에 의한 감소효과이다.

비선형 SSI 해석에 의한 격납건물 상단의 수평가속도 응답스펙트럼은 Fig. 15와 같다. 전반적인 Moat 기초 모델의 수평가속도응답은 지표기초 모델에 비해 감소하였다. 이는

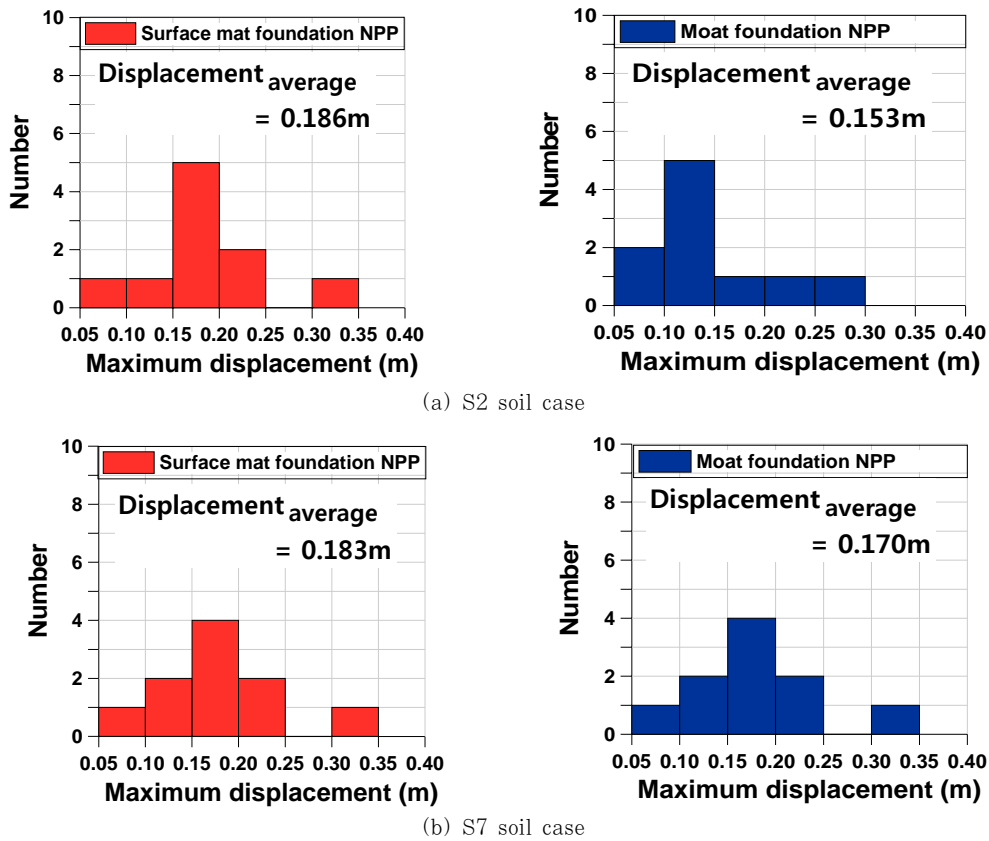


Fig. 13 Frequency distribution of maximum displacement of the seismic isolator with input motions of multiple sets

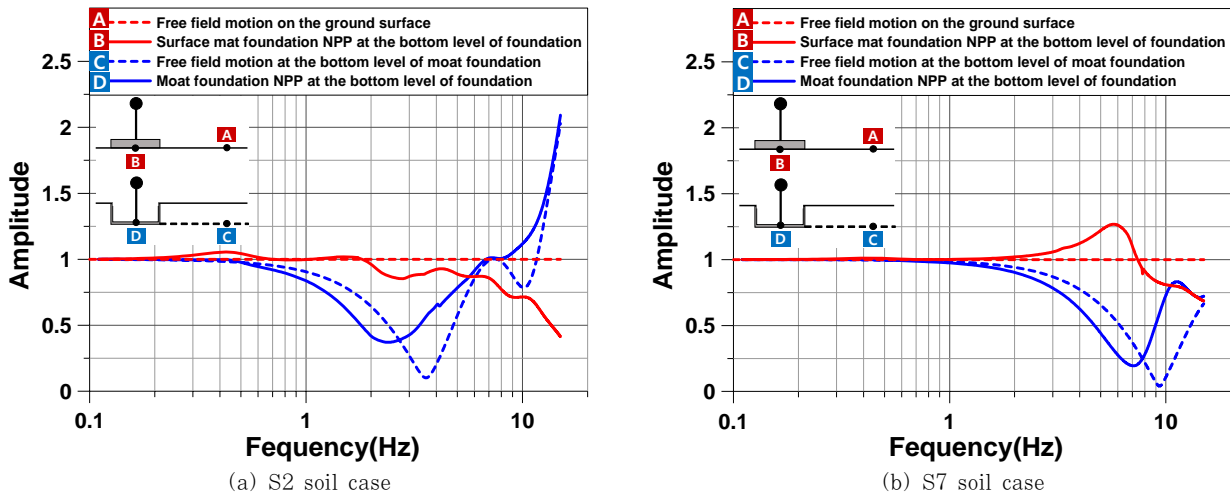


Fig. 14 Comparison of transfer functions for horizontal responses

Table 4 Peak displacement of seismic isolator(mm)

Input motion	Single set		Multiple sets (average)	
Soil condition	S2	S7	S2	S7
Surface mat foundation	156 (1.00)	159 (1.00)	186 (1.00)	183 (1.00)
Moat foundation	134 (0.86)	158 (0.99)	153 (0.82)	170 (0.93)

Note: values in parenthesis = ratios to surface mat foundation result.

Fig. 14의 매트하단 전달함수와 같이 구조물 고유진동수에서 Moat 기초에 의한 SSI 효과와 입력운동의 감소효과가 구조물의 응답에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

Moat 기초에 의한 면진장치 변위와 구조물응답의 감소 효과는 PSD함수에 기반하여 작성된 단일세트 입력운동을 사용한 경우와 실측지진파를 수정한 다중세트 입력운동을 사용한 경우 모두 유사한 경향을 보였다.

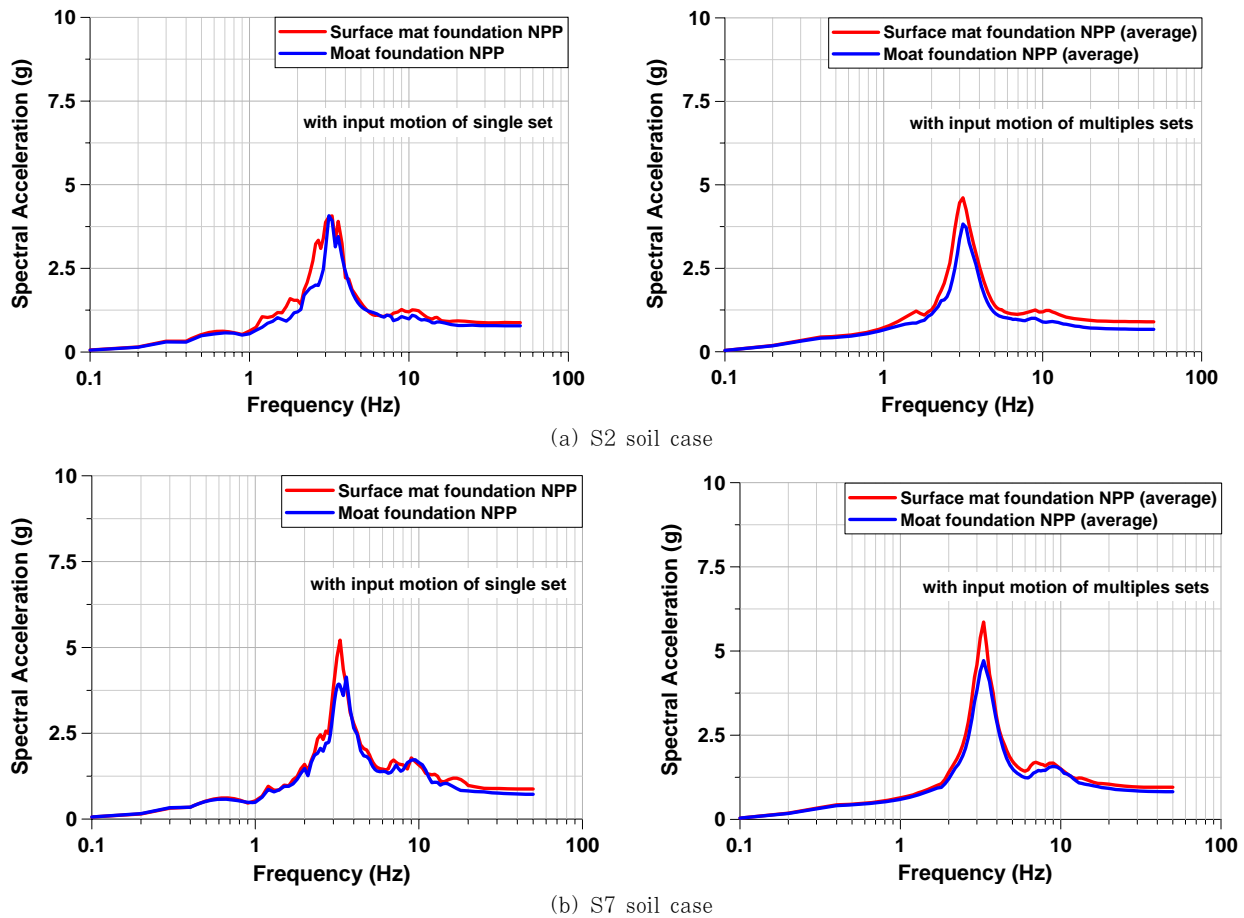


Fig. 15 Response spectra for horizontal response at the top of containment of the nonlinear base-isolated NPP building(5% damping)

3. 결 론

본 연구에서는 문힘기초 효과를 고려한 면진 원전구조물의 지진응답에 대한 영향을 분석하였다. 면진 원전구조물의 비선형 SSI 해석은 BRM 해석법을 이용하였다. 입력운동은 설계 스펙트럼을 만족하는 단일세트 입력운동과 다중세트 입력운동을 사용하였으며, 비선형 SSI 해석결과로 지표기초와 Moat 기초 모델에 대한 면진장치의 변위 및 구조물의 응답을 비교 분석하였다. 이들 해석결과를 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Moat 기초 모델의 면진장치 최대변위는 지표기초에 비해 최대 18% 감소하였다. 이러한 원인은 Moat 기초 모델의 경우 면진진동수에서 SSI 효과와 입력운동의 감소효과가 크게 나타났기 때문이다. 배관 및 유체저장 탱크와 같이 저진동수 영역의 응답이 민감한 시설물은 문힘기초의 영향이 크게 나타날 것으로 판단된다.
- 2) 전반적으로 Moat 기초 모델에 의한 구조물의 응답은 지표기초 모델에 비해 감소하였다. 이는 Moat 기초에

의한 SSI 효과와 입력운동의 감소효과가 구조물의 응답에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

- 3) Moat 기초에 의한 응답의 감소효과는 PSD함수에 기반하여 작성된 단일세트 입력운동을 사용한 경우와 실측 지진파를 수정한 다중세트 입력운동을 사용한 경우 모두 유사하게 나타났다.

감사의 글

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

References

- Alavi, E., Alidoost, M. (2012) Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Behavior of Base-Isolated Buildings, *15th WCEE*.
- ANSYS Version 16.0 www.ansys.com
- Apsel, R.J., Luco, J.E. (1987) Impedance Functions

- for Foundations Embedded in a Layered Medium: An Integral Equation Approach, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 15, pp.213~231.
- ASCE 4-12** (2012) *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary*, Draft Revision 16, 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.
- Bernal, D., Youssef, A.** (1998) A Hybrid Time Frequency Domain Formulation for Non-Linear Soil-Structure Interaction, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 27, pp.673~685.
- 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.
- Deek, A.J., Randolph, M.F.** (1994) Axisymmetric Time Domain Transmitting Boundaries, *J. Eng. Mech.*, ASCE, 120(1), pp.25~42.
- Forni, M., Poggianti, A., Dusi, A.** (2012) Seismic Isolation of Nuclear Power Plant, *15th WCEE*, pp.24~28.
- Gazetas, G.** (1991) Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations, *J. Geotech. Eng.*, 117(9), pp.1363~1381.
- 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.
- Jarernprasert, S.E., Bazan-Zurita, E., Bielak, J.** (2013) Seismic Soil-Structure Interaction Response of Inelastic Structures, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 47, pp.132~143.
- Jaya, K.P., Meher Prasad, A.** (2004) Embedded Foundation with Different Parameters under Dynamic Excitations, *13th World Conf. Earthq. Eng.*, pp.1~6.
- Karabork, T., Deneme, I.O., Bilgehan, R.P.** (2014) A Comparison of the Effect of SSI on Base Isolation Systems and Fixed-Base Structures for Soft Soil, *Geomech. & Eng.*, 7(1), pp.87~103.
- Kawamoto, J.D.** (1983) *Solution of Nonlinear Dynamic Structural System Based on a Hybrid Frequency-Time Domain Approach*, Research Report R83-5, MIT, Dept. of Civil Eng, Cambridge, MA.
- 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, *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, E.H., Kim, J.M., Lee, S.H.** (2015) Nonlinear Soil-Structure Interaction Analysis of a Seismically Isolated Nuclear Power Plant Structure using the Boundary Reaction Method, *Earthq. Eng. Soc. Korea*, 19(1), pp.37~43.
- Lee, G.H., Hong, K.Y., Lee, E.H., Kim, J.M.** (2014a) 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., Song, J.K., Lee, E.H.** (2014b) Multi-Step Analysis of Seismically Isolated NPP Containment Structures with Lead-Rubber Bearings, *Earthq. Eng. Soc. Korea*, 18(6), pp.261~269.
- 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.
- Lee, S.H., Lee, Y.S.** (2010) Application Plan of Seismic Isolation System for APR1400, Proceeding of the Earthquake Engineering Workshop, *Earthq. Eng. Soc. Korea*.
- Li, P., Song, E.X.** (2014) A Viscous-Spring Transmitting Boundary for Cylindrical Wave Propagation in Saturated Poroelastic 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.
- LSTC** (2010) *LS-DYNA User's Manual*, Vols. 1 & 2, Version 971 R5.
- Luco, J.E.** (2014) Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Base Isolation, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 66, pp.67~177.
- 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.
- Mita, A., Luco, J.E.** (1987) Dynamic Response of Embedded Foundations: A Hybrid Approach, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 63, pp.233~259.
- Seo, C.G., Kim, J.M.** (2012) KIESSI Program for 3-D Soil-Structure Interaction Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25(3), pp.77~83.
- Solberg, J.M., Hossain, Q., Blink, J.A., Bohlen, S.R., Mseis, G., Greenberg, H.** (2013) Development of a Generalized Methodology for Soil-Structure Interaction Analysis Using Nonlinear Time-Domain Techniques, Report # LLNL-TR-635762, Lawrence Livermore National Laboratory.
- Spyrakos, C.C., Koutromanos, I.A., Maniatakis, C.A.** (2009) Seismic Response of Base-Isolated Buildings Including Soil-Structure Interaction, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.*, 29, pp.658~668.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission** (2007) Standard Review Plan(NUREC-0800), 3.7.2 Seismic System Analysis, Revision 3.

요 지

이 연구는 기초의 문함이 면진 원전구조물의 응답에 미치는 효과를 지표기초와 비교하여 평가하였다. 면진장치의 비선형성을 고려한 비선형 SSI 해석은 진동수영역해석과 시간영역해석의 복합법인 경계반력법(BRM)을 이용하여 수행하였다. BRM 해석모델은 BRM을 이용한 등가선형 SSI 해석결과를 재래의 주파수영역 SSI 해석결과와 비교함으로써 검증하였다. 마지막으로 비선형 SSI해석에 의한 문함기초 모델의 면진장치의 변위 및 구조물 응답을 지표기초의 해석결과와 비교하였다. 비교결과, 면진장치의 변위응답은 문함기초효과를 고려할 경우 감소할 수 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 비선형 지반-구조물 상호작용, 경계반력법, 점탄성 경계, ANSYS, KIESSI-3D