

# 원전 구조물-기기 상호작용이 기기 지진응답에 미치는 영향 연구

곽 신 영<sup>1</sup>·임 승 현<sup>2†</sup>·정 광 섭<sup>3</sup>·정 재 욱<sup>4</sup>·최 인 길<sup>5</sup>

<sup>1</sup>한밭대학교 건설환경공학과 조교수, <sup>2</sup>경북대학교 융복합시스템공학부 조교수,  
<sup>3</sup>한국원자력연구원 수출용신형연구로실증사업단 책임연구원, <sup>4</sup>한국원자력연구원 첨단구조지진안전연구부 선임연구원,  
<sup>5</sup>한국원자력연구원 첨단구조지진안전연구부 책임연구원

## A Study on the Effects of Nuclear Power Plant Structure-Component Interaction in Component Seismic Responses

Shinyoung Kwag<sup>1</sup>, Seunghyun Eem<sup>2†</sup>, Kwangsub Jung<sup>3</sup>, Jaewook Jung<sup>4</sup> and In-Kil Choi<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea  
<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Convergence and Fusion System Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea  
<sup>3</sup>Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea  
<sup>4</sup>Senior Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea  
<sup>5</sup>Principal Researcher, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

### Abstract

Seismic design and analysis of nuclear power plant components are performed based on an decoupled model. However, this decoupled analysis has a limitation in that it generates inaccurate results compared to the coupled analysis because it cannot simulate actual phenomena such as the interaction between structures and components. Thus, this study performed seismic coupled and decoupled analysis on an existing nuclear containment structure and related components, considering the mass and natural frequency ratios. And based on these results, comparative analyses of responses of components were conducted. Consequently, the seismic coupled analysis result generally gave a smaller value than the decoupled analysis result. These results were similar to the analysis results for the simple coupled model, which was an existing study, but the difference in component responses was much more pronounced. Also, this was influenced by the installation location of the component rather than the influence of the input frequency of the input seismic motions. Finally, the difference between the decoupled and coupled seismic analysis occurred in the region where the mass ratio of the components was large, and the natural frequencies were almost similar due to the considerable dynamic interaction between the structure and the component in this realm.

**Keywords** : nuclear power plant, sub-system, structure-component interaction, seismic coupled analysis, seismic decoupled analysis

### 1. 서 론

원자력발전소(원전, NPP: nuclear power plant)는 1차 시스템(주계통 혹은 1차계통)인 구조물과 2차 시스템(부계통)인 기기로 구성되어 있다. 원전에서는 여러 주요 구조물의 각 층에 여러 기기가 설치된다. 이에 따라 기본적으로 부계통의 내진설계 및 지진해석은 주계통-부계통 연계모델을 대상으로 수행해야하지만, 몇 가지 조건에 따라 연계여부를 결정하여 비연계모델을 대상으로도 수행하고 있다(USNRC, 2007b). 이러

한 접근방법의 주된 이유는 원전내 구조물과 부계통이 복잡하게 연결되어 있기 때문에 주계통과 부계통을 분리하여 내진설계 및 지진해석을 수행한다. 구체적으로 주계통인 구조물 각 층에서 층응답스펙트럼을 도출하고, 이렇게 도출된 층응답스펙트럼을 기반으로 부계통의 내진설계 및 지진해석을 수행한다(Park and Choi, 2015). 이에 대한 기술적 타당성은 이러한 지진 비연계해석이 부계통의 응답을 연계해석에 비하여 비교적 크게 평가하기 때문에 부계통의 보수적인 내진설계를 수행할 수 있기 때문이다.

†Corresponding author:

Tel: +82-54-530-1483; E-mail: eemsh@knu.ac.kr  
Received December 13 2021; Revised March 17 2022;  
Accepted April 6 2022

© 2022 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.

그러나 이러한 지진 비연계해석은 부계통의 보수적인 설계를 유도하여 강성을 키우게 되고, 이에 따라 더 많은 힘을 유발하게 된다(Gupta and Gupta 1994; Gupta, 1996). 또한, 큰 강성은 더 잦은 진동을 발생시키기 때문에 구조부재가 피로 파괴에 취약할 수 있게 된다. 무엇보다도 비연계해석은 실제 구조물-기기 간 상호작용 등의 실제 현상을 모사할 수 없기 때문에 연계해석에 비하여 정확하지 못한 결과를 발생시키게 된다는 한계를 가진다(Burdisso and Singh, 1987; Gupta, 1984).

이러한 연계모델을 대상으로 한 내진설계 및 지진해석의 개념 및 중요성은 여러 연구자에 의해 논의된 바 있다(Chaudhuri and Gupta, 2002; Chen and Soong, 1988; Gupta and Bose, 2017; Gupta and Gupta, 1998a; Gupta and Gupta, 1998b; Kwag and Gupta, 2018; Papageorgiou and Gantes 2010; Pardalopoulos and Pantazopoulou, 2015; Singh and Suarez, 1987; Suarez and Singh, 1987; Xu and DeGrassi, 2000). 이러한 배경 아래 이 연구에서는 실제 원전 격납건물 구조물 및 관련 부계통을 대상으로 지진 연계해석과 비연계해석을 수행하고, 이를 바탕으로 부계통에서의 응답을 비교한다. 이는 구조물-부계통의 질량비와 고유진동수비에 따라 상호작용의 효과가 달라지므로, 이를 고려하여 지진 연계/비연계해석을 수행하고 응답을 비교·분석한다.

이러한 연구는 2-자유도 시스템(단자유도 구조물-단자유도 기기)을 대상으로 기 수행된 부계통 지진응답비(비연계모델 응답/연계모델 응답)결과(Jung *et al.*, 2020)를 검증할 수 있다. 또한, 비교적 실제와 더 가까운 원전 다자유도 시스템(다자유도 구조물-단자유도 기기 및 다자유도 구조물-다자유도 기기)을 대상으로 연계해석과 비연계해석으로 인한 부계통 지진응답비 결과를 분석할 수 있다.

결과적으로 이번 연구는 향후 현재 원전 부계통 내진설계의 보수성을 완화시키고 보다 현실적인 내진설계를 수행하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 내진성능평가 및 지진리스크 평가(Kwag *et al.*, 2020)를 보다 정확하고 효율적으로 수행하는데 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 원전 격납건물 해석모델

원전 1차 시스템인 구조물은 Fig. 1의 한국표준형원전(OPR 1000)모델의 격납건물을 대상으로 하였다. 대상모델은 Fig. 2와 같이 각층의 질량과 강성을 고려하여 집중질량모델로 구성하였다. 격납건물 전체질량은 약 46,691ton이다. 콘크리트의 압축강도는 5500psi(37.921MPa)이다. 부재의 특성값 및 집중질량모델의 구체적 정보는 격납건물 지진해석보고서(Korea Electronic Power Corporation, 1992)를 참고하였다. 격납건물에 사용된 재료의 특성값 등의 자세한 기술적 내용은 참고문

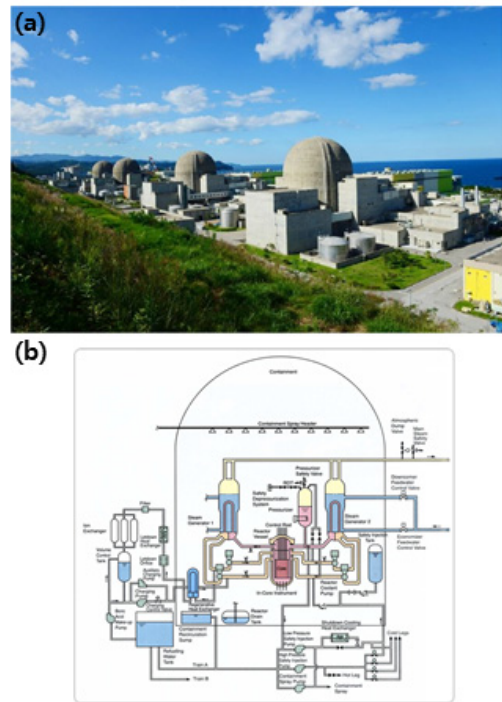


Fig. 1 OPR1000 NPP containment building: (a) NPP site example (picture source: Korea Hydro & Nuclear Power Co. press release), (b) Schematic of the containment section(source: KEPCO E&C; <https://www.kepco-enc.com/portal/contents.do?key=1239>)

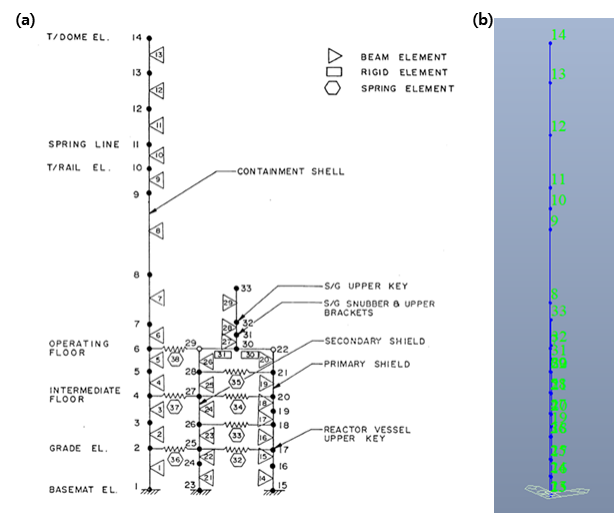


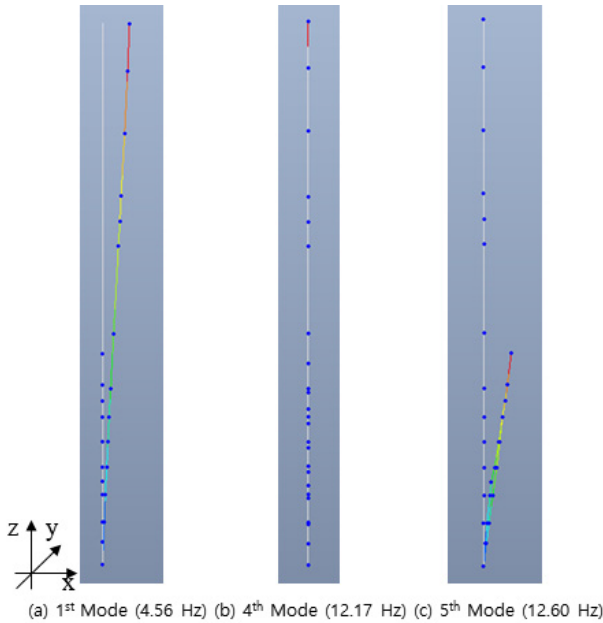
Fig. 2 Lumped-mass stick model of OPR1000 NPP containment building: (a) conceptual model(KAERI, 2019), (b) MIDAS GEN model

헌에 기술되어 있다.

대상 집중질량모델은 MIDAS GEN 프로그램을 사용하여 수립하였다. 격납건물은 외부 벽체와 내부구조물로 구성된다. 내부 벽체는 1차 차폐벽과 2차 차폐벽으로 다시 나누어진다. 해석모델에서 각층의 질량은 구조부재(기둥, 벽체, 보)와 기기들의 무게를 고려하여 산정되었다. 부재는 빔요소를 사용하여 절점을 연결하였으며, 빔요소는 전단성분이 고려된 요소를 사

**Table 1** The first mode natural frequency value of eigenvalue analysis results of the model(unit: Hz)

	Lumped-mass stick model			3D model
	MIDAS GEN (This Study)	OpenSEES (Kim <i>et al.</i> , 2013)	TDAP (KEPCO, 1992)	ABAQUS (Kim <i>et al.</i> , 2013)
Horizontal	4.56	4.56	4.56	4.48
Vertical	12.17	12.18	12.17	12.65



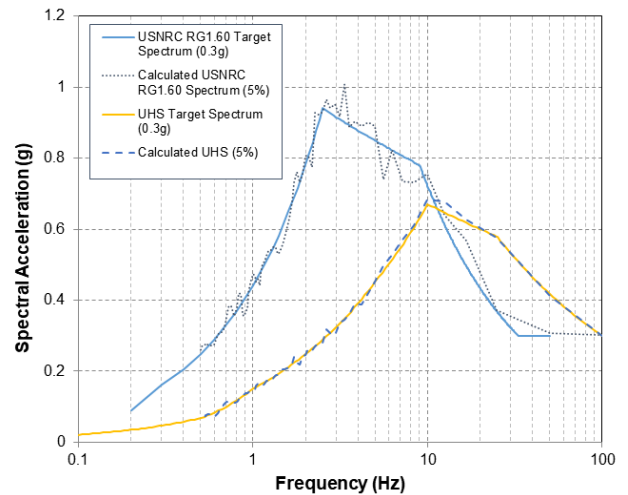
**Fig. 3** Main mode shapes of lumped-mass stick model of OPR1000 NPP containment building(X-Z Plane)

용하였다. 격납건물의 내부는 수많은 벽체들이 슬래브와 연결되고 슬래브는 다시 외부벽체와 연결되어 있다. 외부벽체와 내부벽체가 슬래브로 연결되는 경우 강제요소를 사용하여 수평하중을 전달하도록 모델링하였다. 격납건물의 벽체는 기초 위에 위치한다.

격납건물모델의 고유치해석을 수행한 결과 Table 1과 같이 1차모드 고유진동수는 4.56Hz로 나타났으며, 연직방향 고유진동수는 약 12.17Hz로 나타났다. Fig. 3은 주요모드 형상을 보여주고 있다. 이는 격납건물 지진해석 보고서에 나타난 고유진동수 결과, 기타 다른 소프트웨어로 구현한 집중질량모델 결과 및 3차원 Full 유한요소모델 결과와 유사한 것으로 나타났다. 이에 따라 해당모델은 격납건물의 동특성을 적절히 묘사하는 것으로 보이므로 모델의 유효성이 적절히 검증된 것으로 판단된다.

### 3. 대상 지진파

본 연구에서는 입력지진동의 진동수 특성에 따라 지진 연계



**Fig. 4** Response spectra of input seismic motions

해석과 비연계해석의 차이를 분석하기 위하여 진동수성분이 서로 다른 대표적인 두 가지 입력지진동을 사용하였다. 입력지진동의 가속도스펙트럼은 Fig. 4와 같다. 목표스펙트럼에 해당되는 인공지진은 P-CARES(USNRC, 2007a)를 이용하여 생성하였다. 생성된 인공지진은 합성 지진파를 활용하였고 이러한 인공지진의 목표스펙트럼 만족 요건(USNRC SRP 3.7.2) 충족 여부는 별도로 평가하지 않았다. 사용된 입력스펙트럼은 원전의 설계스펙트럼 USNRC RG 1.60과 국내 지반의 특성을 고려한 등재해도스펙트럼(UHS: Uniform Hazard Spectrum)이다. USNRC RG 1.60 설계스펙트럼의 탁월진동수 구간은 대략 2~9Hz에서 형성되며, 격납건물의 1차모드 고유진동수인 4.5Hz에서 스펙트럼 가속도는 0.82g이다. 반면, UHS의 탁월진동수 구간은 대략 10~25Hz에서 형성되고, 4.5Hz에서 스펙트럼 가속도는 0.42g이다. 해석에서 사용한 입력지진의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)는 0.3g로 가정하였다. 이는 OPR1000 원전 안전정지지진의 PGA 값인 0.2g를 상회하는 값으로 설계기준을 초과하는 지진이다. 또한, 이번 연구에서는 수평방향 지진만을 대상으로 하였다.

### 4. 구조물-기기 지진해석 다자유도-단자유도 사례 연구: (1) 비연계해석, (2) 연계해석

지진응답의 측정위치 및 부계통 설치 위치는 polar crane이 위치하고 있는 절점 12(Fig. 2 참조)와 내부구조물의 최상층 위치의 절점 33을 선정하였고, 응답의 형태는 수평방향(대상 모델 X방향) 절대가속도 응답을 대상으로 하였다. 이러한 선정된 절점 12 및 절점 33의 수평방향 응답에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 주요 고유모드는 고유치 해석 결과로부터 각각 1차모드 4.56Hz 및 5차모드 12.60Hz로 판단된다. 관련 모드 형상과 주

**Table 2** Mass ratio, natural frequency ratio, and related characteristics of secondary system installed at node 12 (targeting for the first mode of the primary system)

Cases	ms/mp	fs/fp	ms(ton)	fs(Hz)	ks(N/m)
C1	0.001	1	20.01	4.564	1.646E7
C2	0.01	1	200.12	4.564	1.646E8
C3	0.1	1	2001.22	4.564	1.646E9
C4	0.001	0.5	20.01	2.282	4.114E6
C5	0.01	0.5	200.12	2.282	4.114E7
C6	0.1	0.5	2001.22	2.282	4.114E8
C7	0.001	2	20.012	9.128	6.582E7
C8	0.01	2	200.12	9.128	6.582E8
C9	0.1	2	2001.22	9.128	6.582E9

**Table 3** Mass ratio, natural frequency ratio, and related characteristics of secondary system installed at node 33 (targeting for the fifth mode of the primary system)

Cases	ms/mp	fs/fp	ms(ton)	fs(Hz)	ks(N/m)
C1	0.001	1	13.33	12.603	8.355E7
C2	0.01	1	133.25	12.603	8.355E8
C3	0.1	1	1332.47	12.603	8.355E9
C4	0.001	0.5	13.33	6.301	2.089E7
C5	0.01	0.5	133.25	6.301	2.089E8
C6	0.1	0.5	1332.47	6.301	2.089E9
C7	0.001	2	13.33	25.205	3.342E8
C8	0.01	2	133.25	25.205	3.342E9
C9	0.1	2	1332.47	25.205	3.342E10

요모드 결과는 Fig. 3에 나타나있다. 상세모드해석 결과를 바탕으로 1차모드 유효질량은 약 20,012ton이고, 5차모드 유효질량은 약 13,325ton으로 산정되었다. 이러한 모드해석 결과에 따라 각각의 절점에 설치될 부계통의 질량비(ms/mp)와 고유진동수비(fs/fp)를 결정하였다. 여기서, ms, mp, fs, fp는 각각 부계통 질량, 1차계통 구조물 대상모드 유효질량, 부계통 고유진동수, 구조물 대상모드 고유진동수를 나타낸다.

구조물-기기 상호작용으로 인한 지진 연계해석과 비연계해석의 차이를 다각도로 분석하기 위하여 부계통인 기기를 단자유도로 모델링하였다. Table 2는 절점 12에 설치되는 부계통의 질량비, 고유진동수비 및 부재 특성을 보여주고 있다. Table 3는 절점 33에 설치되는 부계통의 질량비, 고유진동수비 및 부재 특성을 나타낸다. 기본적으로 부계통의 질량비는 0.001, 0.01, 0.1를 고려하였고, 고유진동수비는 0.5, 1, 2를 대상으로 하였다. 부계통의 질량비 및 고유진동수 산정 시, 구조물(1차계통)의 질량과 고유진동수는 부계통 설치 위치에 따라 관련 절점에 가장 많은 영향을 주는 모드(절점 12는 1차모드, 절점 33은 5차모드)를 기반으로 계산된 각각의 해당모드의 유효질량 및 고

유진동수 값을 대상으로 하였다. 결과적으로 이 연구에서 고려하는 부계통의 고유진동수는 통상적으로 원전에 설치되는 부계통(예: 탱크, 열교환기, 캐비닛, 등)의 고유진동수가 5~30Hz 인 점을 고려하였을 때 합리적인 판단으로 평가할 수 있다.

지진응답해석 시 구조물인 격납건물모델은 PSC 구조형식 이므로 감쇠비를 5%로 가정하였고, 부계통인 기기 모델은 감쇠비를 2%로 설정하였다. 이러한 구조물과 기기의 감쇠비 차이로 인하여 지진 연계모델의 감쇠행렬은 고전적 감쇠행렬이 아닌 비고전적 감쇠행렬로 구성된다. 이러한 지진 연계모델의 비고전적 감쇠행렬이 지진응답에 미치는 영향은 구조물-기기 사이 고유진동수가 유사할 때 고전적 감쇠행렬을 사용한 응답결과와 비교적 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 특히, 주계통-부계통의 질량비가 충분히 작으면서 주계통-부계통의 고유진동수비가 거의 일치하는 영역(Nearly tuned region: 예를 들어 0.95~0.99 혹은 1.01~1.05)에서 결과 차이가 두드러지는 것으로 밝혀졌다(Gupta and Bose, 2017). 이에 따라 본 연구에서는 지진 연계해석 수행 시 비고전적 감쇠행렬 효과를 고려하기 위하여 MIDAS GEN 내의 Group Damping 기능을 활용하였다. 두 가지 서로 다른 감쇠비를 갖는 Group 내의 감쇠행렬은 Rayleigh 감쇠행렬 생성법을 통하여 산출하였다. 이러한 비고전적 감쇠행렬에 대한 이론적 전개는 Kwag과 Gupta(2018) 문헌에 자세히 기술되어 있다.

이 연구의 목적은 지진 연계해석과 비연계해석 응답 사이의 차이가 얼마나 나타나는지를 조사하는 것이 주요 목적이기 때문에 수치해석 결과를 부계통 지진응답비 형태로 도출하였다. 여기서, 부계통 지진응답비는 비연계모델 지진 최대 응답을 연계모델의 지진 최대 응답으로 나누어 나타내었다. 여기서, 비연계모델 지진해석은 현재의 원전 내진설계 및 지진해석 절차대로 먼저 1차 시스템인 구조물을 대상으로 지진해석을 수행한 뒤 부계통 설치 위치의 가속도 응답을 산출한다. 이렇게 산출된 가속도 응답을 부계통의 지진입력 하중으로 넣고 부계통의 지진 응답을 계산한다. 반면에, 연계모델 지진해석은 1차 시스템 구조물과 부계통을 함께 연계하여 모델링하여 지진해석을 수행하고, 이로부터 부계통의 지진응답을 계산한다. 결과적으로 앞서 정의한 대로 이렇게 구해진 두가지 응답을 서로 비율 형태로 살펴보면 두가지 해석의 결과 차이를 명확하게 비교할 수 있게 된다. 예를 들어 부계통 지진응답비가 “1”보다 큰 값을 가지면 지진 비연계해석 결과가 연계해석 결과보다 크다는 것을 의미하고, “1” 보다 작은 값을 가지면 이와 반대의 의미를 가지게 된다.

결과로서 Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 USNRC RG 1.60 스펙트럼 입력 시 절점 12 및 절점 33에 설치된 부계통 지진응답비를 윤곽선 그래프로 보여주고 있다. 비슷한 방식으로 Fig. 7 및 Fig. 8은

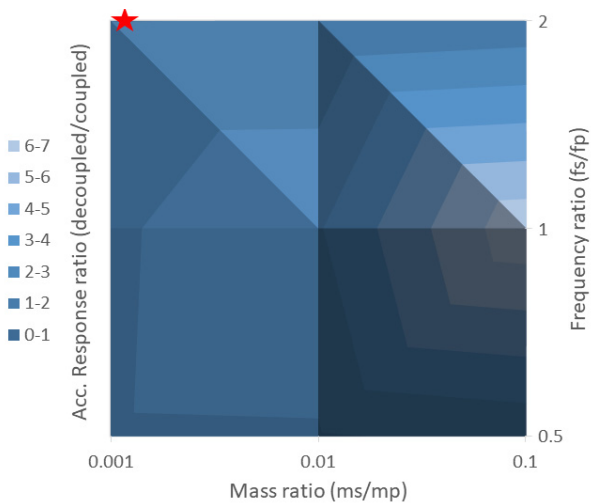


Fig. 5 Seismic response ratios of secondary system installed at node 12(USNRC RG 1.60 spectrum-compatible seismic motions)

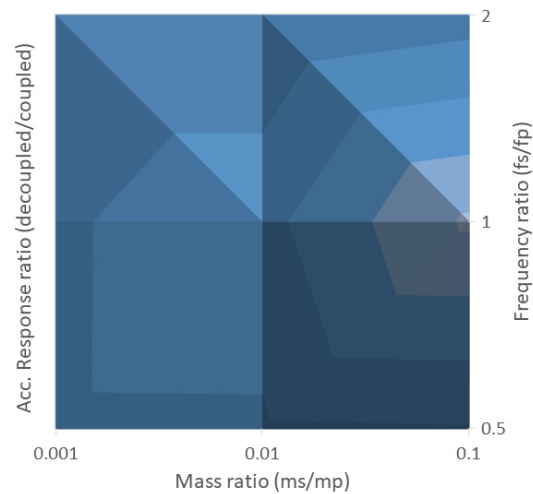


Fig. 7 Seismic response ratios of secondary system installed at node 12(UHS-compatible seismic motions)

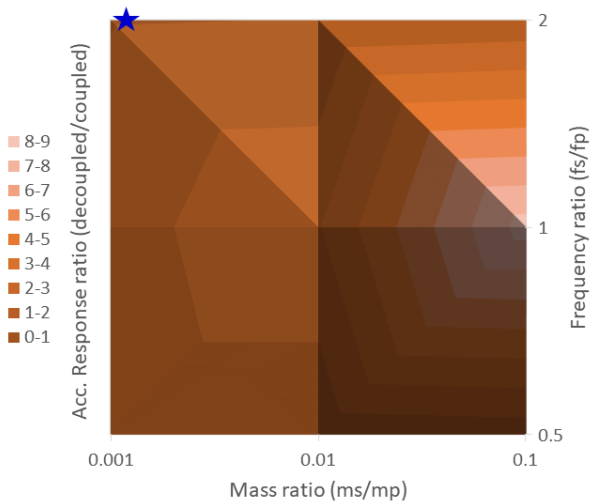


Fig. 6 Seismic response ratios of secondary system installed at node 33(USNRC RG 1.60 spectrum-compatible seismic motions)

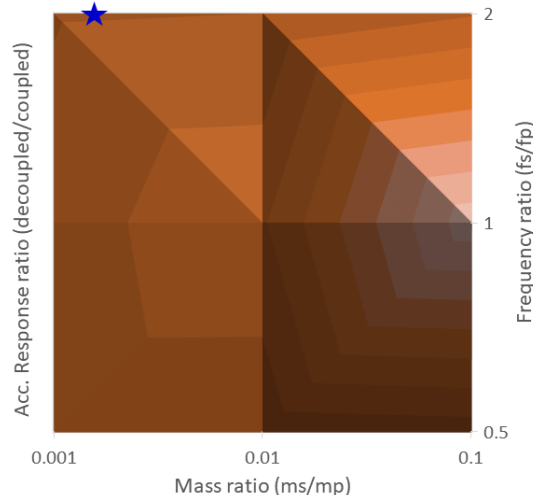


Fig. 8 Seismic response ratios of secondary system installed at node 33(UHS-compatible seismic motions)

각각 UHS 입력 시, 절점 12 및 절점 33에 설치된 부계통 지진 응답비를 윤곽선 그래프로 보여주고 있다. 이러한 결과로부터 얻어진 내용은 다음과 같이 분석할 수 있다.

지진 연계해석 및 비연계해석을 통하여 얻어진 부계통 응답비가 대다수의 사례에서 “1”보다 큰 값을 가지는 것으로 확인되었다. 이는 현재의 원전 부계통 내진설계 및 지진해석 절차인 비연계해석이 연계해석에 비하여 보수적인 결과를 준다는 주장에 대한 근거를 제공한다. 특히, 부계통 응답비가 상대적으로 많이 증폭되는 구간은 부계통의 질량비가 크고, 고유진동수비가 1에 가까워 지는 영역에서 발생하였다. 이러한 영향은 기존 단자유도 구조물-단자유도 부계통 모델의 부계통 지진응답비 결과 연구(Jung *et al.*, 2020)에서도 밝혀진 바 있다. 그러나 본 연구결과는 기존 연구인 단순한 2-자유도 모델에

대한 지진 연계해석 및 비연계해석 결과와 다르게 이러한 부계통 응답비 증폭 현상이 훨씬 더 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Figs. 5~8과 Fig. 9를 비교하여 보면 알 수 있듯이 단순한 모델의 결과는 상대적으로 부계통 응답비 증폭현상을 본 연구의 결과와 비교하여 과소하게 평가함을 볼 수 있다.

본 연구의 부계통 응답비의 두드러진 증폭현상은 이와 유사한 기존 연구 결과(Cho and Gupta, 2020; Gupta, 1996)와 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 특히, Gupta(1996)의 기존 연구에서 주주기배관(Primary: 진동수 1.3~32.5Hz 및 감쇠비 0.05; Secondary: 진동수 10.7~31.9Hz 및 감쇠비 0.02)의 지진 연계해석 및 비연계해석의 여러 응답 형태(부재력, 반력)의 부계통 응답비가 1.7~12.5에 값의 분포를 가짐이 밝혀졌다. 또한, 이 연구에서 급

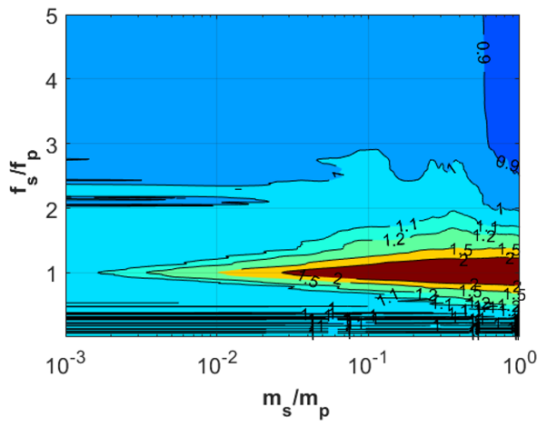


Fig. 9 Seismic response ratio results of the secondary system based on a two-degrees-of-freedom(DOF) model(USNRC RG 1.60 spectrum-compatible seismic motions)(Jung *et al.*, 2020)

수배관(Primary: 2.8~23.9Hz 및 감쇠비 0.03~0.066; Secondary: 진동수 5.9~22.6Hz 및 감쇠비 0.02)의 지진 연계해석 및 비연계해석의 여러 응답 형태(부재력, 반력)의 부계통 응답비가 1.0~7.2에 값의 분포를 가짐이 밝혀졌다.

부계통 응답비의 전반적인 결과 경향은 지진파의 서로 다른 종류(즉, 저주파 지진인 USNRC RG 1.60 스펙트럼과 고주파 지진인 UHS)에 따라 큰 변화가 없었다. Figs. 5~8에서 볼 수 있듯이 같은 위치에서 서로 다른 지진파로 인한 부계통 응답비는 서로 유사한 것을 확인할 수 있었다(예: Fig. 5와 Fig. 7이 유사, 및 Fig. 6과 Fig. 8이 유사함). 그러나 부계통 설치 위치에 따라 부계통 응답비가 유의미한 차이가 있음을 확인할 수 있었다 (Fig. 5와 Fig. 6 비교, 및 Fig. 7과 Fig. 8 비교). 이러한 결과는 부계통 응답비에 영향을 주는 주요한 원인 중 하나가 구조물의 모드형상일 수 있다는 근거를 제공해 주는 것으로 판단된다.

그러나 일부 사례에 있어 부계통 응답비가 “1”보다 작은 값을 가지는 것이 관찰되었다(Figs. 5-8 내 별표 “★” 근처 참조). 이러한 사례는 보통 구조물-부계통 질량비가 작고 고유진동수비가 클 때 발생하였다. 이러한 결과의 의미는 이러한 영역에서는 지진 비연계해석이 연계해석에 비하여 부계통 응답을 과소평가할 수 있기 때문에 현재의 원전 부계통 내진해석 절차가 비보수적인 설계가 될 수 있다는 것이다.

5. 구조물-기기 지진해석 다자유도-다자유도 사례 연구:

(1) 비연계해석, (2) 연계해석

총 질량 250ton의 다자유도 부계통 모델이 절점 33에 설치될 때 부계통 응답비를 분석하였다. 고려하는 다자유도 부계통 모델은 특정 실제 기기를 대상으로 하지 않았고, 이번 연구의 목적을 위하여 적절히 가정한 모델이다. 가정한 부계통 모

Table 4 Eigenvalue analysis results of multi-DOF secondary model

Mode No.	Frequency(Hz)	TRAN-X	
		MASS(%)	SUM(%)
1	12.6252	67.8711	67.8711
2	80.6159	20.6329	88.5039
3	228.4195	7.0093	95.5133
4	441.4251	3.294	98.8072
5	657.3975	1.1928	100

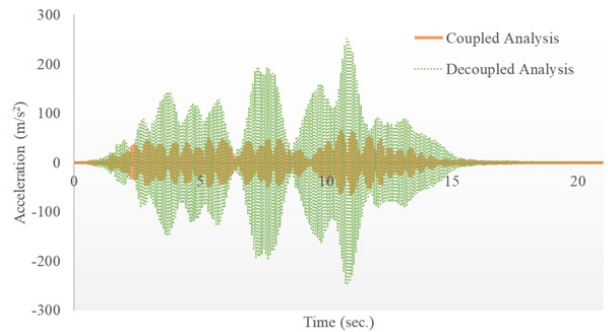


Fig. 10 Secondary system time-series response comparison using seismic coupled and decoupled analyses(USNRC RG 1.60 spectrum-compatible seismic input)

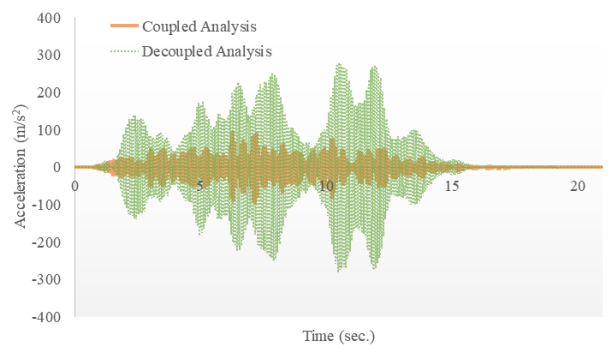


Fig. 11 Secondary system time-series response comparison using seismic coupled and decoupled analyses(UHS-compatible seismic input)

델은 5-자유도 모델로서 최하단 절점만 고정된 집중질량 모델이다. 다자유도 부계통 모델에 대한 자세한 모드해석 결과는 Table 4에 정리하였다. 부계통 모델의 수평방향 주요모드는 1차 모드이므로 1차 모드의 유효질량 및 고유진동수를 1차계통 구조물과의 질량비 및 고유진동수비를 산정하는데 사용하였다. 1차 모드의 유효질량은 약 170ton(총 질량의 67.87%)이고 고유진동수는 약 12.6Hz이다. 이에 따라 1차계통-부계통 질량비는 0.013으로 고유진동수비는 1로 판단된다. Fig. 10 및 Fig. 11은 각각 USNRC RG 1.60 스펙트럼 입력 및 UHS 입력 시, 지진 연계해석과 비연계해석에서 얻어진 부계통의 최상단 절점의 가속도응답 결과를 시계열에서 비교하여 나타내었다. 결과

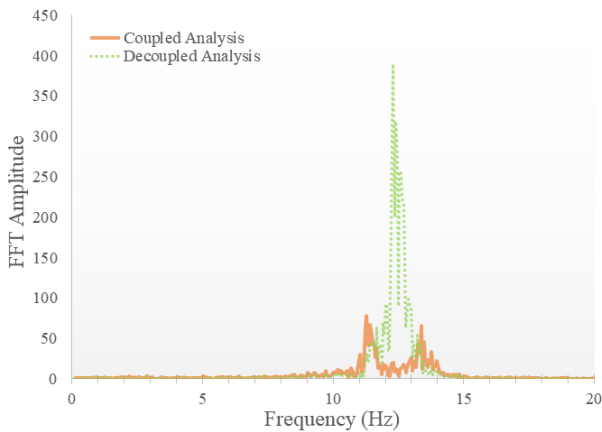


Fig. 12 Secondary system response FFT comparison using seismic coupled and decoupled analyses(USNRC RG 1.60 spectrum-compatible seismic input)

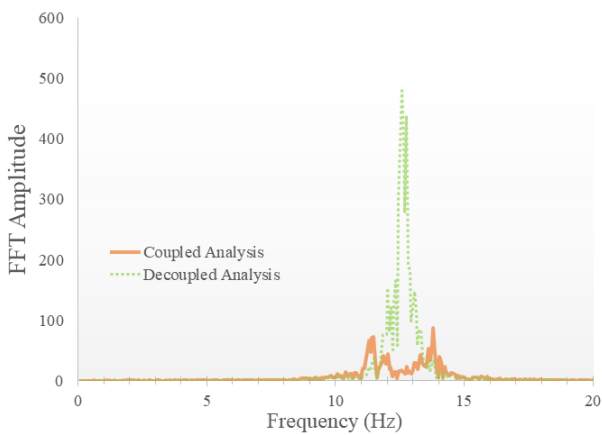


Fig. 13 Secondary system response FFT comparison using seismic coupled and decoupled analyses(UHS-compatible seismic input)

적으로 부계통 지진응답비는 USNRC RG 1.60 스펙트럼 입력 시 “3.95”으로 계산되었고, UHS 입력 시 “2.99”로 산정되었다. 이러한 계산 결과는 4장에서 다자유도 구조물-단자유도 부계통과 관련하여 계산한 결과(특히, C2 사례 및 C3 사례 사이 영역과 유사)와 비슷한 경향을 보이는 것으로 판단된다.

마지막으로 이러한 지진연계해석과 비연계해석의 부계통 응답에서 차이가 발생하는 원인을 분석하기 위하여 두 해석의 시계열 응답결과를 FFT 및 응답스펙트럼으로 변환하여 주파수 영역에서 비교해 보았다. Fig. 12 및 Fig. 13은 각각 USNRC RG 1.60 스펙트럼 입력 및 UHS 입력 시, 지진 연계해석과 비연계해석에서 얻어진 부계통의 최상단 절점 가속도응답의 FFT 변환한 결과를 비교하여 나타내었다. Fig. 14 및 Fig. 15는 각각 USNRC RG 1.60 스펙트럼 입력 및 UHS 입력 시, 지진 연계해석과 비연계해석에서 얻어진 부계통의 최상단 절점 가속도응답의 5%-감쇠 응답스펙트럼 결과를 비교하여 보여준다. Figs. 12~15에서 볼 수 있듯이 12.6Hz 부근의 두 해석의 FFT 진

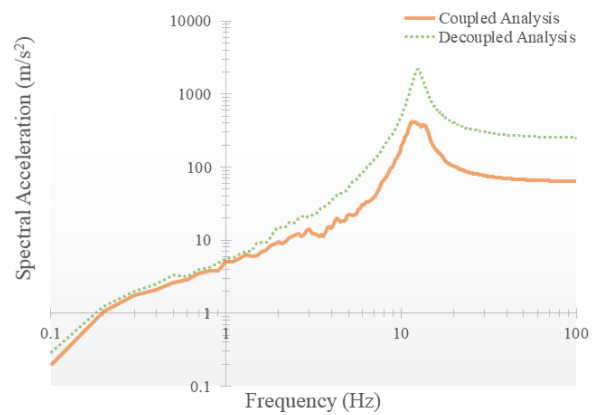


Fig. 14 Secondary system response spectrum comparison using seismic coupled and decoupled analyses(USNRC RG 1.60 spectrum-compatible seismic input)

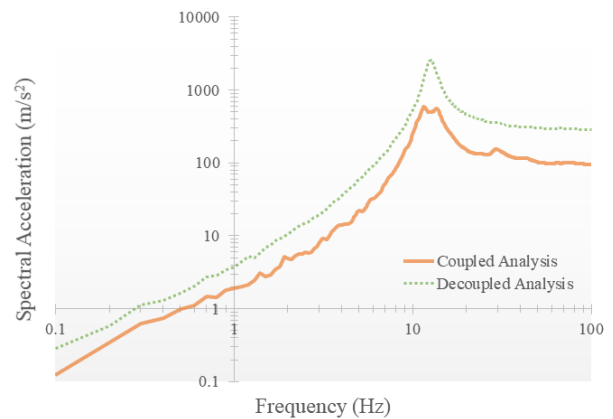


Fig. 15 Secondary system response spectrum comparison using seismic coupled and decoupled analyses(UHS-compatible seismic input)

폭 및 응답스펙트럼의 스펙트럴가속도 결과가 상당한 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과의 원인은 1차 계통인 구조물의 진동수와 부계통의 진동수가 서로 동조되어 서로 상호작용 효과가 커져 1차 계통의 구조물 응답이 부계통 응답에 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 지진 연계해석의 경우는 이러한 상호작용을 반영할 수 있기 때문에 구조물 응답이 부계통 응답을 감소시키는 현상을 반영한 것으로 보인다. 반면에 지진 비연계해석의 경우는 이러한 상호작용을 고려할 수 없기 때문에 부계통 응답이 구조물의 응답의 영향을 반영하지 못하여 더 크게 증폭되는 것으로 판단된다. 다만, 이 연구의 결과는 서로 진동수가 일치하는(혹은 거의 일치하는) 다자유도 주계통-다자유도 부계통 모델 하나의 사례와 관련된 부계통 모델 최상단 절점 시계열응답 또는 이에 따른 FFT 및 응답스펙트럼 결과이다. 따라서, 보다 일반화된 연구 결과 도출은 이와 관련한 다양한 사례에 대한 추가적인 분석 수행에 기반한 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 6. 요약 및 결론

이 연구는 실제 원전 격납건물 구조물 및 관련 부계통을 대상으로 지진 연계해석과 비연계해석을 수행하고, 이를 바탕으로 부계통에서의 응답을 비교하였다. 이는 구조물-부계통의 질량비와 고유진동수비에 따라 상호작용의 효과가 달라지므로, 이를 다각적으로 고려하여 지진 연계/비연계해석을 수행하고 응답을 비교·분석하였다. 기본적으로 부계통의 질량비는 0.001, 0.01, 0.1를 고려하였고, 고유진동수비는 0.5, 1, 2를 대상으로 하였다. 또한, 비교적 실제와 더 가까운 원전 다자유도 시스템(다자유도 구조물-단자유도 기기)을 대상으로 연계해석과 비연계해석으로 인한 부계통 지진응답비 결과를 분석하였다. 분석 결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 1) 지진 연계해석 및 비연계해석을 통하여 얻어진 부계통 응답비가 대다수의 사례에서 “1”보다 큰 값을 가지는 것으로 확인되었다. 특히, 부계통 응답비가 상대적으로 많이 차이가 나는 구간은 부계통의 질량비가 크고, 고유진동수비가 1에 가까워 지는 영역에서 발생하였다. 이러한 연구결과는 기존 연구인 단순한 2-자유도 모델에 대한 지진 연계해석 및 비연계해석 결과와 다르게 이러한 부계통 응답 차이는 훨씬 더 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 부계통 응답비의 전반적인 결과 경향은 지진파의 서로 다른 종류인 저주파 지진과 고주파 지진 입력에 따라 큰 변화가 없었다. 그러나 부계통의 주계통에서의 설치 위치에 따라 부계통 응답비가 유의미한 차이가 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 일부 사례에 있어 부계통 응답비가 “1”보다 작은 값을 가지는 것이 관찰되었다. 이러한 사례는 보통 구조물-부계통 질량비가 작고, 고유진동수비가 클 때 발생하였다. 이는 이러한 조건의 경우 현재의 비연계 지진해석에 기반한 부계통 지진응답이 연계 지진해석에 기반한 부계통 지진응답 보다 작은 값을 줄 수 있다는 것을 의미한다.
- 4) 비연계 및 연계 지진해석의 차이가 부계통의 질량비가 크고, 고유진동수비가 1에 가까워 지는 영역에서 발생하는 이유는 이 영역에서 주계통과 부계통 서로 간의 동적 상호작용이 크게 나타나기 때문이다. 이에 대한 직접적 근거는 고유진동수비가 약 1이고 질량비 약 0.013인 사례의 부계통 시계열 지진응답에 대한 FFT 및 응답스펙트럼 데이터를 주파수 영역에서 비교함을 통하여 수립하였다.

결과적으로, 이러한 연구 결과는 향후 현재 원전 부계통 내 진설계의 보수성을 완화시키고 보다 현실적인 내진설계를 수행하는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 내진성능평가 및 지진리스크 평가를 보다 정확하고 효율적으로 수행하는데 기여를 할 수 있을 것으로 기대한다. 다만, 원전 설계는 SRP 요건에 따라 안전 보수성이 반영되도록 부계통이 연계된 지진해석이 수행되고 있지만, 구조물 내의 모든 기기, 배관계 및 기기를 부계통을 고려하는 것이 현실적으로 어려운 점을 고려하여 이 연구 결과를 활용할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20171510101910)을 받아 수행되었습니다. 또한, 본 연구은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2020R1G1A1005510)을 받아 수행되었습니다.

## References

- Burdisso, R.A., Singh, M.P.** (1987) Seismic Analysis of Multiply Supported Secondary Systems with Dynamic Interaction Effects, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 15(8), pp.1005~1022.
- Chaudhuri, S.R., Gupta, V.K.** (2002) Variability in Seismic Response of Secondary Systems due to Uncertain Soil Properties, *Eng. Struct.*, 24(12), pp.1601~1613.
- Chen, Y., Soong, T.T.** (1988) Seismic Response of Secondary Systems, *Eng. Struct.*, 10(4), pp.218~228.
- Cho, S.G., Gupta, A.** (2020) Generation of Floor Response Spectra Considering Coupling Effect of Primary and Secondary System, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 24(4), pp.179~187.
- Gupta, A.** (1996) Seismic Response of Secondary Systems, PhD Thesis Dissertation, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA.
- Gupta, A., Bose, M.K.** (2017) Significance of Non-classical Damping in Seismic Qualification of Equipment and Piping, *Nucl. Eng. & Des.*, 317, pp.90~99.
- Gupta, A., Gupta, A.K.** (1994) New Developments in Coupled Seismic Analysis of Equipment and Piping, *In: Proceedings of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Porto Alegre, Brazil.
- Gupta, A., Gupta, A.K.** (1998a) Missing Mass Effect in Coupled Analysis. I: Complex Modal Properties, *J. Struct. Eng.*, 124(5), pp.490~495.



- Gupta, A., Gupta, A.K.** (1998b) Missing Mass Effect in Coupled Analysis. II: Residual Response, *J. Struct. Eng.*, 124(5), pp.496-500.
- Gupta, A.K.** (1984) Seismic Response of Multiply Connected MDOF Primary and MDOF Secondary Systems, *Nucl. Eng. & Des.*, 81(3), pp.385-394.
- Jung, K., Kwag, S., Choi, I.K., Eem, S.** (2020) Analysis of Seismic Response due to the Dynamic Coupling between a Primary Structure and Secondary System, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 24(2), pp.87-93.
- KAERI** (2019) Advanced Seismic Margin Assessment Methodology and Earthquake Response System for Beyond Design Basis Earthquakes, TRKO202000001912, Research Report, Korea Atomic Energy Research Institute. (URL: <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202000001912>)
- Kim, J.H., Park, J.H., Choi, I.K.** (2013) Evaluation of the Seismic Response Considering Site Effect and Nonlinear Structural Behavior, KAERI/TR-5369/2013, Korea Atomic Energy Research Institute.
- Korea Electronic Power Corporation** (1992) Seismic Analysis of Containment Building, ULCHIN Nuclear Power Plant Units 3&4, Report Number 9-310-C455-001.
- Kwag, S., Eem, S., Park, J., Choi, I.K.** (2020) Sampling-based Approach for Seismic Probabilistic Risk Assessment, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 33(2), pp.129-136.
- Kwag, S., Gupta, A.** (2018) Computationally Efficient Fragility Assessment using Equivalent Elastic Limit State and Bayesian Updating, *Comput. & Struct.*, 197, pp.1-11.
- Papageorgiou, A.V., Gantes, C.J.** (2010) Decoupling Criteria for Inelastic Irregular Primary/Secondary Structural Systems subject to Seismic Excitation, *J. Eng. Mech.*, 136(10), pp.1234-1247.
- Pardalopoulos, S.I., Pantazopoulou, S.J.** (2015) Seismic Response of Nonstructural Components attached on Multistorey Buildings, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 44(1), pp.139-158.
- Park, J., Choi, I.K.** (2015) Reevaluation of Inelastic Structural Response Factor for Seismic Fragility Evaluation of Equipment, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(3), pp.241-248.
- Singh, M.P., Suarez, L.E.** (1987) Seismic Response Analysis of Structure-Equipment Systems with Non-Classical Damping Effects, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 15(7), pp.871-888.
- Suarez, L.E., Singh, M.P.** (1987) Seismic Response of SDF Equipment-structure System, *J. Eng. Mech.*, 113(1), pp.16-30.
- USNRC** (2007a) P-CARES: Probabilistic Computer Analysis for Rapid Evaluation, NUREG/CR-6922, p.158.
- USNRC** (2007b) Seismic System Analysis, Standard Review Plan 3.7.2, Rev. 3, NUREG-0800, US Nuclear Regulatory Commission.
- Xu, J., DeGrassi, G.** (2000) Benchmark Program for the Evaluation of Methods to Analyze Non-Classically Damped Coupled Systems, Division of Engineering Technology, Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission.

## 요 지

원자력발전소 기기 내진설계 및 지진해석은 비연계모델을 대상으로 수행된다. 그러나 이러한 비연계해석은 실제 구조물-기기 간 상호작용 등의 실제 현상을 모사할 수 없기 때문에 연계해석에 비하여 정확하지 못한 결과를 발생시키게 된다는 한계를 가진다. 이러한 배경 아래 이 연구는 실제 원전 격납건물 구조물 및 관련 부계통을 대상으로 질량비와 고유진동수비를 고려하여 지진 연계해석과 비연계해석을 수행하고, 이를 바탕으로 부계통에서의 응답을 비교 분석하였다. 결과적으로 지진 연계해석 결과가 비연계해석 결과보다 대다수 작은 값을 주는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 기존 연구인 단순한 연계모델에 대한 해석 결과와 유사하지만, 부계통 응답 차이는 훨씬 더 두드러지게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 이는 지진파의 입력 주파수의 영향보다는 부계통의 설치위치에 영향을 받는 것으로 확인되었다. 마지막으로 비연계 및 연계 지진해석의 차이가 부계통의 질량비가 크고, 고유진동수가 거의 일치하는 영역에서 발생하는 이유는 이 영역에서 주계통과 부계통 동적 상호작용이 크게 나타나기 때문인 것으로 보인다.

**핵심용어** : 원자력발전소, 부계통, 구조물-기기 상호작용, 연계 지진해석, 비연계 지진해석