

구조물과 부계통간의 연계방법에 따른 지진응답 분석

Analysis of Seismic Response due to the Dynamic Coupling Between a Primary Structure and Secondary System

정광섭¹⁾ · 광신영²⁾ · 최인길³⁾ · 임승현^{4)*}

Jung, Kwangsub¹⁾ · Kwag, Shinyoung²⁾ · Choi, In-Kil³⁾ · Eem, Seunghyun^{4)*}

¹⁾한국원자력연구원 연구로공학부 선임연구원, ²⁾한밭대학교 건설환경공학과 조교수, ³⁾한국원자력연구원 기계·구조안전연구부 책임연구원, ⁴⁾경북대학교 융복합시스템공학부 플랜트시스템전공 조교수

¹⁾Senior Researcher, Research Reactor System Design Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ²⁾Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, ³⁾Principal Researcher, Mechanical and Structural Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ⁴⁾Assistant Professor, Major in Plant System Engineering, School of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University

/ A B S T R A C T /

Seismic responses due to the dynamic coupling between a primary structure and secondary system connected to a structure are analyzed in this study. The seismic responses are compared based on dynamic coupling criteria and according to the error level in the natural frequency, with the recent criteria being reliant on the error level in the spectral displacement response. The acceleration responses and relative displacement responses of a primary structure and a secondary system for a coupled model and two different decoupled models of two degrees-of-freedom system are calculated by means of the time integration method. Errors in seismic responses of the uncoupled models are reduced with the recent criteria. As the natural frequency of the secondary system increases, error in the natural frequency decreases, but seismic responses of uncoupled models can be underestimated compared to that of coupled model. Results in this paper can help determine dynamic coupling and predict uncoupled models' response conservatism.

Key words: Dynamic coupling criteria, Seismic analysis, Primary structure and secondary system, Effects of interaction, Mass and frequency ratio

1. 서론

원자력발전소는 많은 구조물과 기기로 구성되어 있다. 원자력발전소의 안전 관련 구조물 및 기기는 지진에 대한 안전성을 확보하기 위하여 많은 경우 지진응답 해석을 통해 내진 성능을 검증한다. 여기서, 지진응답해석은 원자력발전소의 특성 상 다양한 기기, 구조물 및 시스템이 부계통으로서 이를 지지하는 주요 구조물에 설치되게 되므로 정확한 평가를 위하여 주요 구조물-부계통의 연계 모델을 대상으로 수행되어야 한다. 특히, 연계모델을 대상으로 한 지진해석은 구조물과 부계통간 고유진동수 비, 질량 연계 효과, 비고전 감쇠 효과, 등을 종합적으로 고려하여 수행되어야 정확한 결과를 도출할 수 있게 된다. 이러한 연계모델에 대한 지진해석의 개념 및 중요성은

몇몇의 연구자에 논의된 바 있었다[1-5]. 이에 따라, USNRC는 연계 지진 해석의 정확성 검증과 관련하여 다양한 벤치마크 문제를 개발하고 수행한 바 있다[6]. 최근에는 몇몇 연구자에 의하여 지진 연계해석을 부계통의 비선형 지진응답효과까지 고려하여 수행하고, 이를 바탕으로 지진취약도 해석의 영역까지 확장하여 산출 결과를 분석한 바 있다[7, 8].

이러한 배경아래, 원자력 분야 지진 연계해석에 있어, 구조물과 기기 즉, 부계통이 연계가 되어 있는 경우 동적연계 기준에 따라 연계 모델 또는 비연계 모델을 작성하여 지진응답 해석을 수행한다. 일반적으로, 구조물과 부계통간의 상호작용 효과가 큰 경우에는 이들의 해석은 서로 연계하여 지진응답 해석을 수행하며 상호작용 효과가 작은 경우 비연계 모델을 작성하여 지진응답 해석을 수행한다. 구조물과 부계통의 질량과 고유진동수에 따라 상호작용의 효과가 달라지며 이에 따라 구조물과 부계통간의 동적 연계 여부를 결정한다. 이와 같은 동적 연계기준은 2 자유도 시스템을 기반으로 한다. 대표적으로 사용되는 동적 연계기준으로는 U.S. NRC(미국 원자력규제위원회) 규제지침의 기준[9]과 ASCE(미국토목학회) 기준[10]이 있다. 이 동

*Corresponding author: Eem, Seunghyun

E-mail: eem.seunghyun@gmail.com

(Received August 20, 2019; Revised February 4, 2020; Accepted February 6, 2020)

적 연계기준은 구조물의 고유진동수 오차를 고려된 것으로 구조물과 부계통의 응답 오차는 고려하지 않았다. 최근에는 이 기준을 보완하여 스펙트럼 변위 오차를 고려한 방법이 Fouquiau et al.에 의하여 제안되었다[11].

현재 제시된 동적연계 기준은 구조물과 부계통 중 구조물의 고유진동수를 기준으로 제시가 되고 있다. 이러한 기준은 부계통의 지진응답을 과대평가 혹은 과소평가가 될 수 있다. 따라서 연계방법에 따른 지진응답 해석 수행 시 구조물 및 부계통의 지진응답의 영향을 이해하여 한다. 본 논문에서는 비연계 모델과 연계 모델에 따른 구조물과 부계통의 고유진동수와 지진응답을 비교분석을 수행하였다. 분석 결과는 U.S. NRC[9]와 ASCE[10] 및 Fouquiau et al.[11]의 동적 연계기준과 비교하였다. 각 연계기준의 이론적 배경을 설명하고, 비연계 모델과 연계 모델의 구조물과 부계통 가속도 및 상대 변위 지진응답 관점에서 각각의 연계기준을 비교 분석하였다.

2. 본론

2.1 연계 및 비연계 모델

구조물과 부계통간의 동적 연계기준에서 사용되는 2 자유도 시스템 연계 모델은 Fig. 1의 모델 C와 같고, 비연계 모델로는 Fig. 1의 모델 A 또는 B를 사용한다. 모델 A의 구조물 모델은 구조물의 질량과 구조물의 강성으로 이루어져 있으며, 부계통 모델은 부계통의 질량과 부계통의 강성으로 구성된다. 부계통의 지진응답은 구조물 모델의 지진응답을 입력으로 한다.

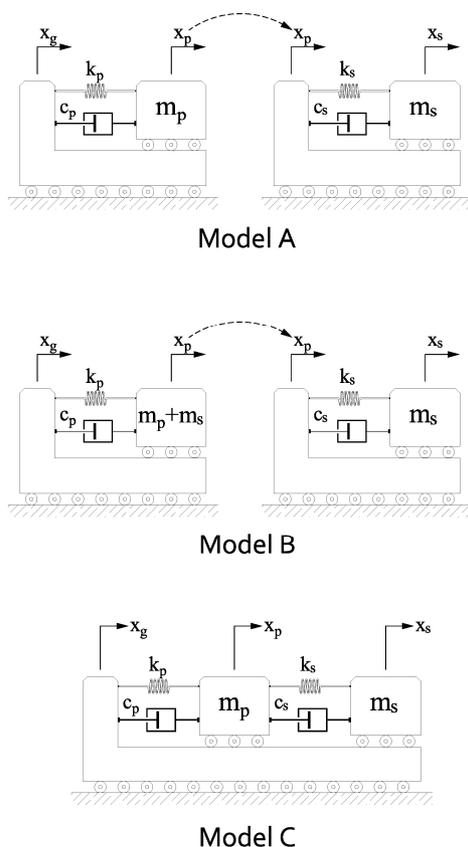


Fig. 1. Models for dynamic coupling: uncoupled model A, uncoupled model B, and coupled model C

모델 B는 구조물 모델을 제외하고 모델 A와 동일하며, 모델 B의 구조물 모델은 구조물 질량과 부계통의 질량을 합한 질량과 구조물의 강성으로 구성된다.

비연계 모델 A의 구조물과 부계통의 고유진동수 f_p, f_s 는 각각 다음과 같다.

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{m_p}}, \quad f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_s}} \quad (1)$$

여기서 m_p, k_p, m_s, k_s 는 각각 구조물과 부계통의 질량과 강성이다. 모델 A와 B의 부계통 고유진동수는 동일하며, 모델 B의 구조물 고유진동수 $f_{p,B}$ 는 다음과 같다.

$$f_{p,B} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{m_p + m_s}} \quad (2)$$

연계 모델 C의 고유진동수는 다음과 같은 비감쇠 자유진동 시스템으로부터 결정된다.

$$\begin{bmatrix} m_p & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_p + k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_p \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서 x_p, x_s 는 각각 구조물과 부계통의 변위이다. 1차 고유진동수 f_1 와 2차 고유진동수 f_2 는 다음 식과 같다.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{m_p} + \frac{k_s}{m_s} + \frac{k_s}{m_p} - \sqrt{\left(\frac{k_p}{m_p} + \frac{k_s}{m_s} + \frac{k_s}{m_p}\right)^2 - \frac{4k_p k_s}{m_p m_s}}} \quad (4a)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_p}{m_p} + \frac{k_s}{m_s} + \frac{k_s}{m_p} + \sqrt{\left(\frac{k_p}{m_p} + \frac{k_s}{m_s} + \frac{k_s}{m_p}\right)^2 - \frac{4k_p k_s}{m_p m_s}}} \quad (4b)$$

2.2 동적 연계기준 비교

구조물과 부계통의 연계해석 여부는 구조물과 부계통의 질량비 R_m 과 고유진동수비 R_f 에 따라 결정된다. 여기서 R_m 과 R_f 는 다음과 같다.

$$R_m = \frac{m_s}{m_p}, \quad R_f = \frac{f_s}{f_p} \quad (5)$$

구조물의 고유진동수는 각각의 모델 A, B, C에 따라 다른 양상을 보이므로, 비연계 모델 A와 B의 구조물 고유진동수의 연계 모델 C에 대한 오차는 R_m 과 R_f 의 함수로 나타낼 수 있다[12-15].

ASCE-4[10]에서는 Fig. 2(a)와 같이 모델 A, B 각각에 대하여 구조물의 고유진동수 오차 10%를 연계해석 여부의 기준으로 하였다. 질량비가 커지고, 고유진동수비가 1에 가까워질수록 구조물의 고유진동수 오차는 커진다.

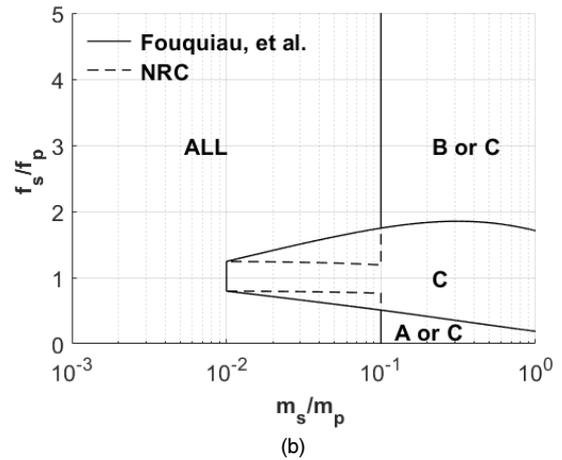
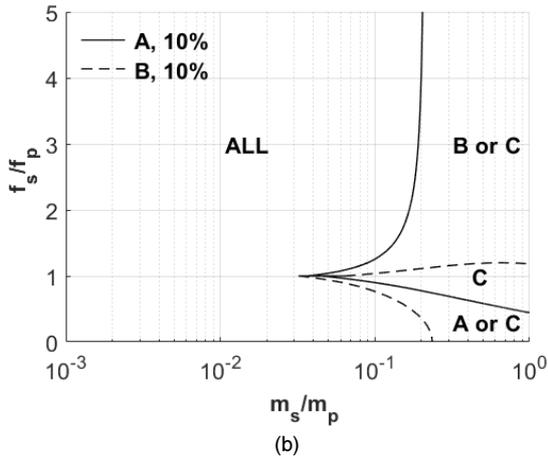
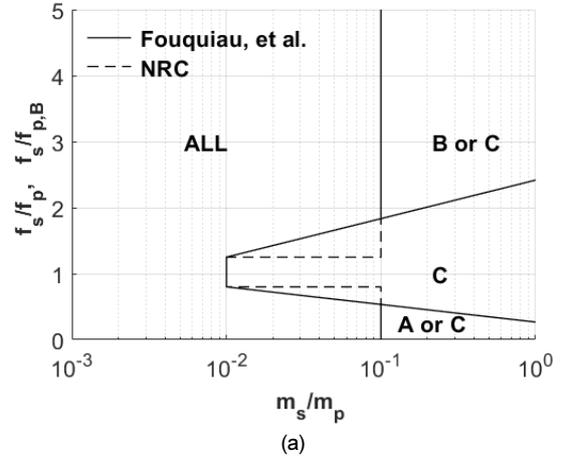
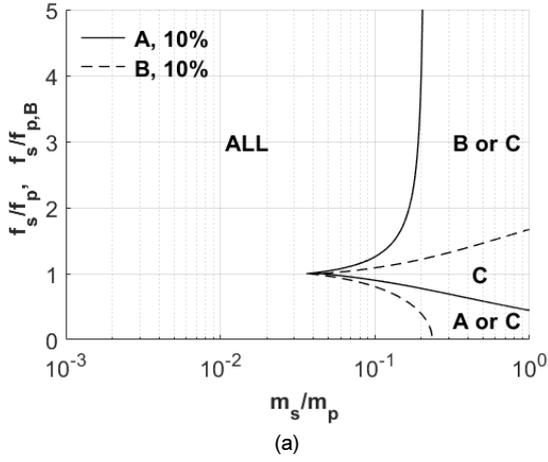


Fig. 2 Dynamic coupling criteria of ASCE-4[10]: (a) frequency ratio f_s/f_p is used for model A, and $f_s/f_{p,B}$ for model B, (b) same frequency ratio f_s/f_p is used for both models

Fig. 3 Dynamic coupling criteria of Fouquiau et al.[11] and U.S. NRC[9]: (a) frequency ratio f_s/f_p is used for model A, $f_s/f_{p,B}$ for model B, (b) frequency ratio f_s/f_p is used for model B

다. 질량비와 고유진동수비가 Fig. 2의 실선에서 좌측에 해당하면 비연계 모델 A와 모델 C를 사용할 수 있고, 그래프의 점선에서 좌측에 해당하면 비연계 모델 B와 모델 C를 사용할 수 있다. 두 비연계 모델 A와 B의 오차가 모두 10%를 넘는 구역에서는 연계 모델 C를 사용하여야 한다. 다만 Fig. 2(a)에서 모델 A와 B의 y축은 동일하지 않다. 모델 A의 경우 y축은 식(5)의 고유진동수비이고, 모델 B는 식(2)와 같이 부계통의 질량을 구조물에 반영하므로 y축인 고유진동수비는 다음과 같다.

$$R_{f,B} = \frac{f_s}{f_{p,B}} = \frac{\sqrt{k_s/m_s}}{\sqrt{k_p/(m_p+m_s)}} = R_f \sqrt{1+R_m} \quad (6)$$

위 식을 이용하여 모델 B에 대하여 오차 그래프의 y축을 모델 A와 동일하게 적용하면 Fig. 2(b)와 같다.

U.S. NRC의 구조물과 부계통의 동적 연계기준은 다음과 같다[9].

- (1) $R_m < 0.01$ 이면, R_f 와 관계없이 비연계 가능,
- (2) $0.01 \leq R_m \leq 0.1$ 이면, $R_f \leq 0.8$ 또는 $R_f \geq 1.25$ 일 때 비연계 가능,
- (3) $R_m > 0.1$ 이면, 연계 모델 사용.

이 기준은 Fig. 3(a)의 점선과 같이 비연계가능 여부로 두 영역으로 나눈다. 이 기준의 비연계가능 영역은 Fig. 2(a)의 ASCE-4 기준[10]의 모든 모델 사용 가능한 영역에 포함된다. 또한, 모델 B의 y축을 모델 A와 동일하게 적용하면 Fig. 3(b)의 점선과 같다.

Fouquiau et al.[11]에 의해 제안된 기준은 Fig. 3(a)의 실선과 같다. 이 기준에서 비연계 모델은 $R_m \geq 0.01$ 에서 구조물의 고유진동수 오차와 스펙트럼 변위 오차[5, 7]가 각각 5%를 넘지 않도록 한다. 이 기준은 ASCE 기준보다 보수적이다. Fig. 3(a)에서 모델 B의 y축은 식(6)과 같으며, 모델 B의 y축을 모델 A와 동일하게 적용하면 Fig. 3(b)의 실선과 같다.

2.3 연계 및 비연계 모델의 지진응답 해석

본 절에서는 연계 및 비연계 모델의 지진응답 해석을 통해 구조물 및 부계통의 지진응답을 계산하였다. 구조물 및 부계통의 지진응답은 동적 연계 기준과 비교를 수행하였다. 연계 및 비연계 모델의 지진응답 해석을 위하여 U.S. NRC 규제지침(Regulatory Guide) 1.60[16]을 기반으로 30개의 지진 시간이력을 생성하여 지진응답을 계산하였다. 모델 A, B, C의 응답을 구하기 위한 운동방정식은 각각 다음의 식(7a), (7b), (7c)와 같다[17].

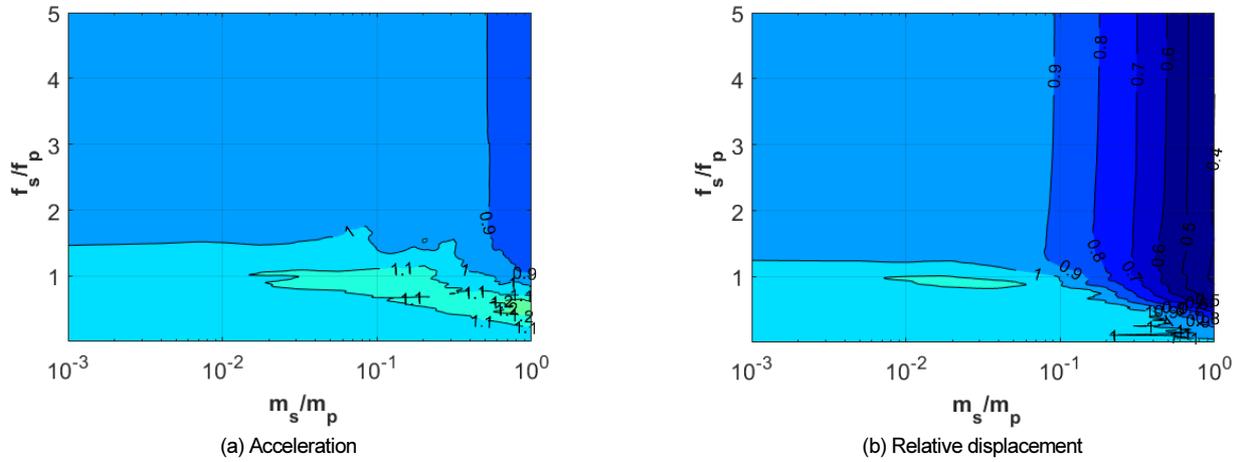


Fig. 4. Seismic response ratios of uncoupled model A to coupled model C for primary structure

Table 1. Maximum and minimum response ratios of acceleration for primary structure of model A in each region of criteria

| Criteria | Region | Response ratio | | m_s/m_p | f_s/f_p |
|-----------------|--------|----------------|------|-----------|-----------|
| ASCE-4 | ALL | max | 1.18 | 0.053 | 0.870 |
| | | min | 0.94 | 0.203 | 5.000 |
| | A or C | max | 1.26 | 0.918 | 0.460 |
| | | min | 1.00 | 0.235 | 0.005 |
| U.S. NRC | ALL | max | 1.14 | 0.100 | 0.750 |
| | | min | 0.98 | 0.100 | 5.000 |
| Fouquiau et al. | ALL | max | 1.09 | 0.009 | 0.990 |
| | | min | 0.98 | 0.100 | 5.000 |
| | A or C | max | 1.12 | 0.930 | 0.275 |
| | | min | 1.00 | 0.101 | 0.005 |

Table 2. Maximum and minimum response ratios of relative displacement for primary structure of model A in each region of criteria

| Criteria | Region | Response ratio | | m_s/m_p | f_s/f_p |
|-----------------|--------|----------------|------|-----------|-----------|
| ASCE-4 | ALL | max | 1.14 | 0.034 | 0.865 |
| | | min | 0.78 | 0.203 | 4.980 |
| | A or C | max | 1.09 | 0.056 | 0.920 |
| | | min | 0.67 | 1.000 | 0.435 |
| U.S. NRC | ALL | max | 1.11 | 0.009 | 0.970 |
| | | min | 0.87 | 0.100 | 1.400 |
| Fouquiau et al. | ALL | max | 1.11 | 0.009 | 0.970 |
| | | min | 0.88 | 0.100 | 1.835 |
| | A or C | max | 1.08 | 0.172 | 0.470 |
| | | min | 0.86 | 1.000 | 0.265 |

$$\begin{aligned}
 m_p \ddot{y}_p + c_p \dot{y}_p + k_p y_p &= -m_p \ddot{x}_g \\
 m_s \ddot{y}_s + c_s \dot{y}_s + k_s y_s &= -m_s (\ddot{x}_g + \ddot{y}_p)
 \end{aligned}
 \tag{7a}$$

$$\begin{aligned}
 (m_p + m_s) \ddot{y}_p + c_p \dot{y}_p + k_p y_p &= -(m_p + m_s) \ddot{x}_g \\
 m_s \ddot{y}_s + c_s \dot{y}_s + k_s y_s &= -m_s (\ddot{x}_g + \ddot{y}_p)
 \end{aligned}
 \tag{7b}$$

$$\begin{aligned}
 m_p \ddot{y}_p + c_p \dot{y}_p + k_p y_p - c_s \dot{y}_s - k_s y_s &= -m_p \ddot{x}_g \\
 m_s (\ddot{y}_p + \ddot{y}_s) + c_s \dot{y}_s + k_s y_s &= -m_s \ddot{x}_g
 \end{aligned}
 \tag{7c}$$

여기서 \ddot{x}_g 는 지진 가속도이고, c_p , c_s 는 각각 구조물과 부계통의 감쇠계수로 계산에 사용한 구조물의 감쇠비는 5%, 부계통의 감쇠비는 3%이다. y_p , y_s 는 각각 구조물과 부계통의 상대변위로 다음과 같다.

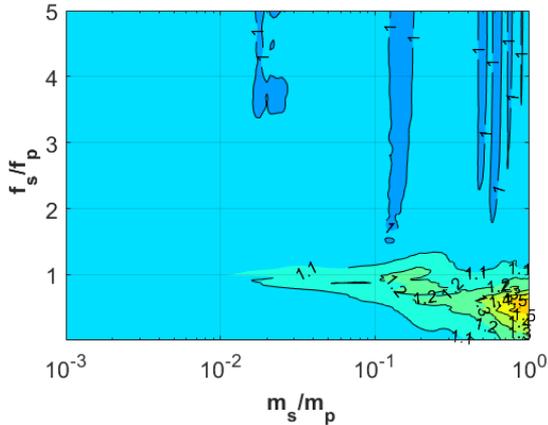
$$y_p = x_p - x_g, \quad y_s = x_s - x_p
 \tag{8}$$

지진 입력에 대한 구조물과 부계통의 가속도와 상대변위를 계산하기 위해 Newmark 수치적분 방법을 이용하였다. 수치적분에 사용된 주요 계수는 $\beta = 1/12$, $\gamma = 1/2$, $\Delta t = 0.005$ 이다.

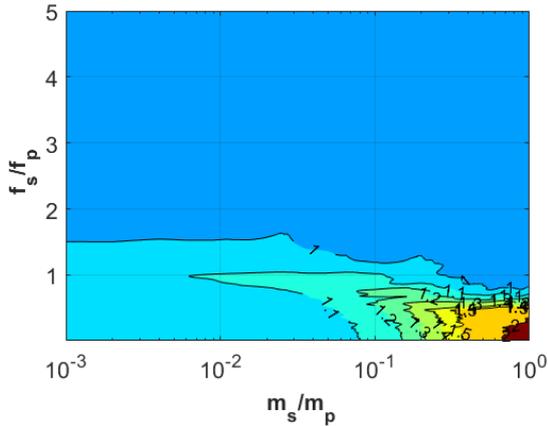
2.3.1 구조물의 지진응답

각각의 모델 A, B, C에 대하여 30개의 지진 입력에 대한 구조물의 가속도와 상대 변위의 최대값을 도출하였다. 비연계 모델 A의 연계 모델 C에 대한 구조물 최대 가속도 비율과 최대 상대 변위 비율의 30개 지진 입력에 대한 평균값을 각각 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 도시하였다. ASCE-4 기준 모델 A 사용 가능 영역(“ALL”과 “A or C”)에서 모델 A의 구조물 가속도 최대 오차는 Table 1과 같이 질량비 0.918과 진동수비 0.46일 때 약 26%이다. U.S. NRC 기준의 “ALL” 영역에서 모델 A의 구조물 가속도 최대 오차는 질량비 0.1과 진동수비 0.75일 때 약 14%이고, Fouquiau et al. 기준의 모델 A 사용 가능 영역에서는 질량비 0.93, 진동수비 0.275일 때 약 12%이다. Table 2에서 모델 A의 구조물 상대 변위 오차를 살펴보면, ASCE-4 기준에서 질량비 0.034, 진동수비 0.865일 때 약 14%, U.S. NRC 기준과 Fouquiau et al. 기준에서는 질량비 0.009, 진동수비 0.97일 때 약 11%이다. 즉, 모델 A의 경우 ASCE-4 기준에서 가속도와 상대 변위의 오차가 가장 크고, Fouquiau et al. 기준에서 오차가 가장 작다.

비연계 모델 B의 연계 모델 C에 대한 구조물 최대 가속도 비율과 최대 상대 변위 비율의 지진 입력에 대한 평균값은 Fig. 5와 Table 3, Table 4에 나



(a) Acceleration



(b) Relative displacement

Fig. 5. Seismic response ratios of uncoupled model B to coupled model C for primary structure

Table 3. Maximum and minimum response ratios of acceleration for primary structure of model B in each region of criteria

| Criteria | Region | Response ratio | | m_s/m_p | f_s/f_p |
|-----------------|--------|----------------|------|-----------|-----------|
| | | max | min | | |
| ASCE-4 | ALL | max | 1.20 | 0.057 | 0.875 |
| | | min | 0.99 | 0.142 | 2.425 |
| | B or C | max | 1.20 | 0.188 | 1.105 |
| | | min | 0.99 | 0.591 | 2.325 |
| U.S. NRC | ALL | max | 1.17 | 0.100 | 0.750 |
| | | min | 1.00 | 0.018 | 3.810 |
| Fouquiau et al. | ALL | max | 1.10 | 0.009 | 0.990 |
| | | min | 1.00 | 0.018 | 3.810 |
| | B or C | max | 1.05 | 0.227 | 1.845 |
| | | min | 0.99 | 0.591 | 2.325 |

타났다. ASCE-4 기준 모델 B 사용 가능 영역(“ALL”과 “B or C”)에서 모델 B의 구조물 가속도 최대 오차는 20%이고, U.S. NRC 기준의 “ALL” 영역에서는 17%, Fouquiau et al. 기준의 모델 B 사용 가능 영역에서는 10%이다. 모델 A와 마찬가지로 ASCE-4 기준에서 가속도 오차가 가장 크고, Fouquiau et al. 기준에서 오차가 가장 작다. 상대 변위 최대 오차 또한 ASCE-4 기준에서 35%, U.S. NRC 기준에서 23%, Fouquiau et al. 기준에서 19%로 같은 경향을 보인다.

Table 4. Maximum and minimum response ratios of relative displacement for primary structure of model B in each region of criteria

| Criteria | Region | Response ratio | | m_s/m_p | f_s/f_p |
|-----------------|--------|----------------|------|-----------|-----------|
| | | max | min | | |
| ASCE-4 | ALL | max | 1.35 | 0.222 | 0.205 |
| | | min | 0.97 | 0.126 | 1.470 |
| | B or C | max | 1.12 | 0.068 | 1.005 |
| | | min | 0.92 | 0.843 | 1.475 |
| U.S. NRC | ALL | max | 1.23 | 0.100 | 0.745 |
| | | min | 0.97 | 0.100 | 1.405 |
| Fouquiau et al. | ALL | max | 1.19 | 0.100 | 0.465 |
| | | min | 0.98 | 0.100 | 1.750 |
| | B or C | max | 1.00 | 0.755 | 3.040 |
| | | min | 0.93 | 0.539 | 1.825 |

질량비와 진동수비에 따라서 비연계 모델의 응답이 연계 모델의 응답보다 과소평가될 수 있다. ASCE-4 기준에서 모델 A와 모델 C의 가속도 비율의 최소값은 질량비 0.203, 진동수비 5에서 약 0.94이고, 상대 변위 비율의 최소값은 질량비 0.203, 진동수비 4.98에서 약 0.67이다. U.S. NRC 기준과 Fouquiau et al. 기준에서 상대 변위 비율의 최소값은 각각 약 0.87과 약 0.86이다. 질량비와 진동수비에 따라 모델 A의 지진응답은 연계 모델 C의 지진응답에 비하여 보수적이지 않을 수도 있다. 또한, 부계통의 고유진동수가 구조물의 고유진동수에 비하여 커질수록 구조물의 응답이 과소평가될 수 있다. 모델 B의 경우에도 상대 변위 비율의 최소값이 ASCE-4 기준에서 약 0.92, U.S. NRC 기준에서 약 0.97, Fouquiau et al. 기준에서 약 0.93으로 연계 모델 C의 응답에 비하여 과소평가될 수 있다.

2.3.2 부계통의 지진응답

비연계 모델 A, B의 연계 모델 C에 대한 부계통 최대 가속도 비율과 최대 상대 변위 비율의 30개 지진 입력에 대한 평균값을 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. 질량비와 진동수비가 1에 가까워질수록 구조물과 부계통의 공진에 의해 비연계 모델의 부계통 응답이 커진다. Table 5와 같이 모델 A의 부계통 가속도 최대 오차는 ASCE-4 기준에서 약 141%, U.S. NRC 기준에서 약 50%, Fouquiau et al. 기준에서 약 46%이다. 모델 A의 상대 변위 최대 오차 또한 ASCE-4 기준에서 약 143%, U.S. NRC 기준에서 약 55%, Fouquiau et al. 기준에서 약 45%로 가속도 최대 오차와 비슷한 경향을 나타낸다. 비연계 모델 B의 부계통 가속도와 상대 변위 또한 Table 6에 나타난 바와 같이 모델 A의 경우와 유사한 오차를 보인다.

비연계 모델 A의 응답은 연계 모델의 응답보다 과소평가될 수 있다. 질량비 0.203, 진동수비 5에서 모델 A와 모델 C의 가속도 비율은 약 0.95, 상대 변위 비율은 약 0.95이다. 이는 부계통의 고유진동수가 구조물의 고유진동수에 비하여 커질수록 비연계 모델 A의 부계통 응답이 연계 모델 C의 응답에 비하여 과소평가될 수 있음을 나타낸다. Table 7과 Table 8에서 모델 B와 모델 C의 부계통 응답 비율의 최소값은 0.99로 모델 B의 경우 부계통 응답은 과소평가되지 않는다고 볼 수 있다.

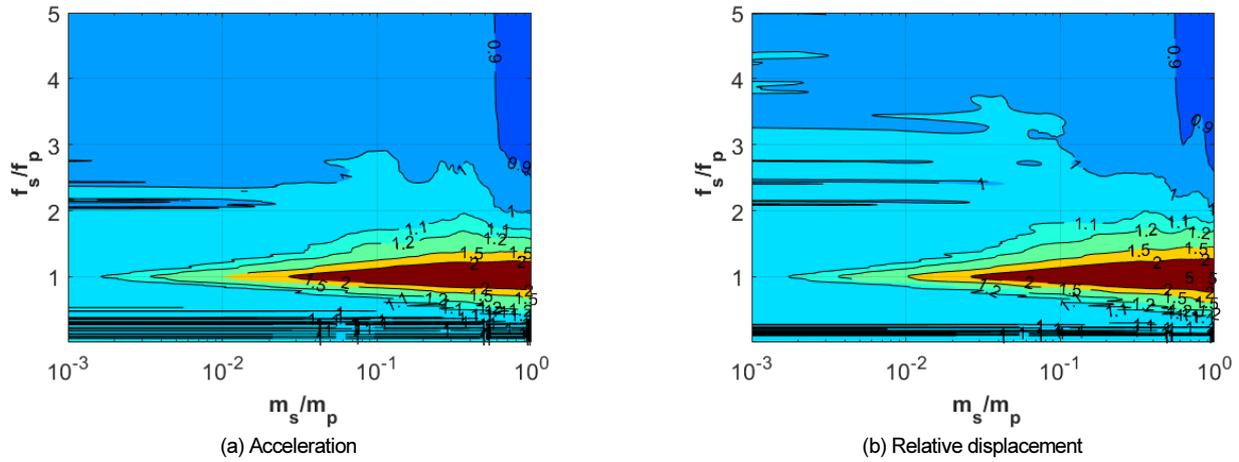


Fig. 6. Seismic response ratios of uncoupled model A to coupled model C for secondary system

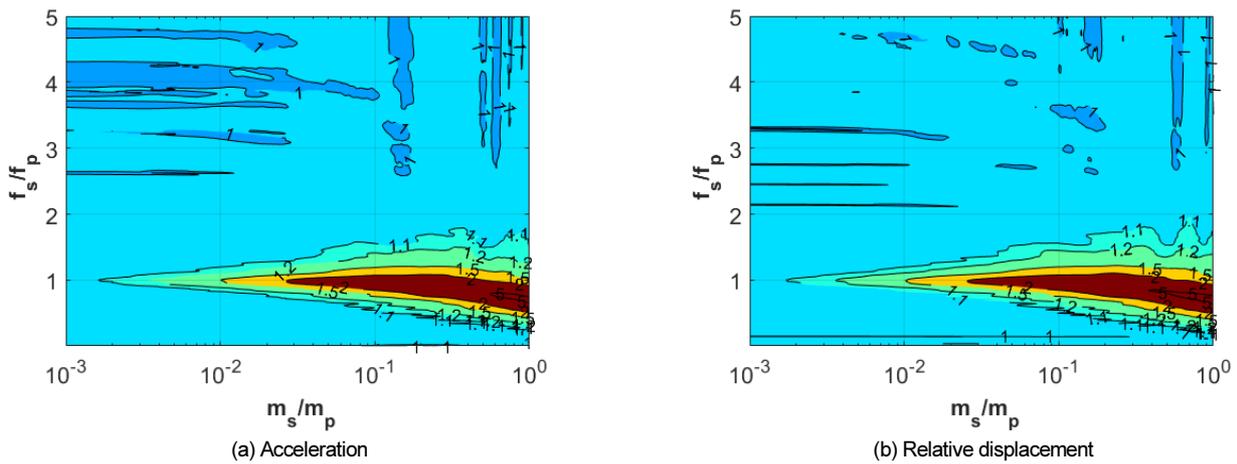


Fig. 7. Seismic response ratios of uncoupled model B to coupled model C for secondary system

Table 5. Maximum and minimum response ratios of acceleration for secondary system of model A in each region of criteria

| Criteria | Region | Response ratio | | m_s/m_p | f_s/f_p |
|-----------------|--------|----------------|------|-----------|-----------|
| | | max | min | | |
| ASCE-4 | ALL | max | 2.27 | 0.043 | 1.020 |
| | | min | 0.95 | 0.203 | 5.000 |
| | A or C | max | 2.41 | 0.059 | 0.970 |
| | | min | 0.99 | 1.000 | 0.220 |
| U.S. NRC | ALL | max | 1.50 | 0.100 | 1.250 |
| | | min | 0.98 | 0.097 | 3.885 |
| Fouquiau et al. | ALL | max | 1.46 | 0.009 | 1.005 |
| | | min | 0.98 | 0.097 | 3.885 |
| | A or C | max | 1.06 | 0.233 | 0.435 |
| | | min | 0.99 | 1.000 | 0.220 |

Table 6. Maximum and minimum response ratios of relative displacement for secondary system of model A in each region of criteria

| Criteria | Region | Response ratio | | m_s/m_p | f_s/f_p |
|-----------------|--------|----------------|------|-----------|-----------|
| | | max | min | | |
| ASCE-4 | ALL | max | 2.28 | 0.043 | 1.020 |
| | | min | 0.95 | 0.203 | 5.000 |
| | A or C | max | 2.43 | 0.059 | 0.970 |
| | | min | 0.99 | 0.763 | 0.235 |
| U.S. NRC | ALL | max | 1.55 | 0.100 | 1.250 |
| | | min | 0.99 | 0.100 | 5.000 |
| Fouquiau et al. | ALL | max | 1.45 | 0.009 | 1.005 |
| | | min | 0.99 | 0.100 | 5.000 |
| | A or C | max | 1.06 | 0.127 | 0.505 |
| | | min | 0.99 | 0.763 | 0.235 |

3. 결론

구조물과부계통이 연계되어 있는 경우, 동적 연계기준에 따라 연계해석 또는 비연계해석을 수행하여 지진응답을 도출하게 된다. 이러한 비연계해석은 실제 연계되어 있는 구조물과 부계통의 지진응답을 과대 혹은 과소평가 하게 된다. 본 연구에서는 비연계해석에 따른 지진응답의 영향을 분석하기 위하여

구조물 및 부계통의 연계 모델과 비연계 모델을 구성하여 지진응답 해석을 수행한 후 기존의 동적 연계기준과 비교분석 수행하였다. 2 자유도 시스템의 연계 모델과 두 가지의 비연계 모델에 대하여 Regulatory Guide 1.60의 설계 응답스펙트럼에 따른 지진 입력 30개에 대한 구조물과 부계통의 응답 기속도와

Table 7. Maximum and minimum response ratios of acceleration for secondary system of model B in each region of criteria

| Criteria | Region | Response ratio | | m_s/m_p | f_s/f_p |
|-----------------|--------|----------------|------|-----------|-----------|
| | | max | min | | |
| ASCE-4 | ALL | max | 2.33 | 0.045 | 0.955 |
| | | min | 1.00 | 0.149 | 3.225 |
| | B or C | max | 2.50 | 0.068 | 1.005 |
| | | min | 0.99 | 0.613 | 3.085 |
| U.S. NRC | ALL | max | 1.54 | 0.100 | 0.760 |
| | | min | 1.00 | 0.096 | 3.800 |
| Fouquiau et al. | ALL | max | 1.46 | 0.009 | 1.005 |
| | | min | 1.00 | 0.096 | 3.800 |
| | B or C | max | 1.09 | 0.350 | 1.910 |
| | | min | 0.99 | 0.613 | 3.085 |

Table 8. Maximum and minimum response ratios of relative displacement for secondary system of model B in each region of criteria

| Criteria | Region | Response ratio | | m_s/m_p | f_s/f_p |
|-----------------|--------|----------------|------|-----------|-----------|
| | | max | min | | |
| ASCE-4 | ALL | max | 2.34 | 0.045 | 0.955 |
| | | min | 1.00 | 0.156 | 3.465 |
| | B or C | max | 2.54 | 0.068 | 1.005 |
| | | min | 0.99 | 0.568 | 4.180 |
| U.S. NRC | ALL | max | 1.54 | 0.100 | 0.760 |
| | | min | 1.00 | 0.059 | 2.710 |
| Fouquiau et al. | ALL | max | 1.45 | 0.009 | 1.005 |
| | | min | 1.00 | 0.059 | 2.710 |
| | B or C | max | 1.12 | 0.697 | 1.785 |
| | | min | 0.99 | 0.568 | 4.180 |

상대 변위를 시간적분법을 이용하여 계산하였다. 비연계 모델의 지진응답과 연계 모델의 지진응답에 따라 여러 가지 동적 연계기준을 비교하였다. ASCE-4의 동적 연계기준은 구조물의 고유진동수 오차 10%를 비연계 모델 적용의 기준으로 하였으며, 비연계 모델의 적용 영역이 가장 넓으며 연계 모델과의 지진응답 차이가 가장 크게 발생할 수 있다. U.S. NRC 기준의 비연계 모델 적용 영역은 ASCE-4 기준의 비연계 모델 적용 영역에 모두 포함되므로 ASCE-4 기준에 비하여 상대적으로 지진응답의 오차가 작다. Fouquiau et al.에 의해 제안된 기준은 구조물의 고유진동수 오차와 스펙트럼 변위 오차를 고려하여, 지진응답의 오차가 세 가지 기준 중 가장 오차가 작다. 또한, 비연계 모델의 지진응답은 부계통의 고유진동수가 커질수록 연계 모델의 지진응답에 비하여 과소 평가될 수 있으나 구조물의 응답에 비하면 오차가 작다. 부계통의 지진응답을 연계 모델과 비연계 모델을 비교할 경우, 비연계 모델이 보수성을 가지지만 최대 2배 이상의 최대가속도 및 최대상대변위가 발생하는 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 구조물과 부계통의 연계 해석 여부를 결정하고, 비연계 모델 응답의 보수성을 대략적으로 예측하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20201510100010).

/ REFERENCES /

- Singh MP, Suarez LE, Seismic Response Analysis of Structure-Equipment Systems with Non-Classical Damping Effects, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1987;15(7):871-888.
- Suarez LE, Singh MP, Seismic Response of SDF Equipment-Structure, System, *Journal of Engineering Mechanics*, 1987;113(1):16-30.
- Burdisso RA, Singh MP, Seismic Analysis of Multiply Supported Secondary Systems with Dynamic Interaction Effects, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1987;15(8):1005-1022.
- Chen Y, Soong TT, Seismic Response of Secondary Systems, *Engineering Structures*, 1988;10(4):218-228.
- Gupta A, Bose MK, Significance of Non-classical Damping in Seismic Qualification of Equipment and Piping, *Nuclear Engineering and Design*, 2017;317:90-99.
- USNRC, Benchmark Program for the Evaluation of Methods to Analyze Non-Classically Damped Coupled Systems, NUREG/CR-6661 (BNL-NUREG52577), Washington DC, US, c2000.
- Tadinada SK, Gupta A, Structural Fragility of T-joint Connections in Large-scale Piping Systems using Equivalent Elastic Time-history Simulations, *Structural Safety*, 2017;65:49-59.
- Kwag S, Gupta A, Computationally Efficient Fragility Assessment using Equivalent Elastic Limit State and Bayesian Updating, *Computers & Structures*, 2018;197:1-11.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants, NUREG-75/087, c1975.
- American Society of Civil Engineers, Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary, ASCE4/98, c2000.
- Fouquiau PV, Barbier F, Chatzigogos C, New Dynamic Decoupling Criteria for Secondary Systems, 16th European Conference on Earthquake Engineering, 2018;1-10.
- Hadjian AH, Ellison B, Decoupling of Secondary Systems for Seismic Analysis, *Transactions of the ASME, J. Pressure Vessel Technology*, 1986;108:78-85.
- Gupta AK, Tembulkar JM, Dynamic Decoupling of Secondary Systems, *Nuclear Engineering and Design*, 1984;81:359-373.
- Gupta AK, Tembulkar JM, Dynamic Decoupling of Multiply Connected MDOF Secondary Systems, *Nuclear Engineering and Design*, 1984;81:375-383.
- Gupta AK, Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures, CRC Press, c1990.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.60 Rev.2, c2014.
- Crandall SH, Mark WD, Random Vibration in Mechanical Systems, Academic Press, c1963.