

진동수 영역에서 기기-구조물 상호작용을 고려한 층응답스펙트럼의 작성

Generation of Floor Response Spectra including Equipment-Structure Interaction in Frequency Domain

최 동 호
Choi, Dong-Ho

이 상 훈
Lee, Sang-Hoon

국문요약

원자력발전소의 기기, 배관 시스템과 같은 부속구조물의 동적 응답을 얻기 위해 사용되는 층응답스펙트럼은 일반적으로 주구조물과 부속구조물의 동적 상호작용이 반영되지 않고 만들어진다. 본 연구에서는 기기와 구조물의 동적 상호작용이 고려된 해석을 통해 층응답스펙트럼을 생성시키는 해석법을 기술하였다. 이 방법은 기기를 모사하는 단자유도계와 기기가 놓여있는 구조물의 임피던스로 분할되는 부분구조 해석법을 적용하여 기기의 응답을 구한다. 단자유도계의 진동수, 감쇠비 및 질량 특성을 변화시키면서 최대 동적 응답을 계산함으로써 일련의 층응답스펙트럼을 작성한다. 전형적인 원자력발전소의 원자로 구조물에서 본 방법을 고려한 층응답스펙트럼과 기기를 포함한 전체 해석으로부터 작성된 층응답스펙트럼과 비교함으로써 본 연구의 타당성을 확인하였다. 기기-구조물 상호작용 효과를 확인하기 위하여 구조물 질량의 1% 이내인 기기에 대하여 기술된 방법과 기존 방법을 각각 적용하여 최대 응답값을 비교하였다. 그 결과 지배 진동수 부근에서 기기-구조물 상호작용을 고려한 응답이 그렇지 않은 경우인 기존방법의 응답에 비하여 저감되는 현상을 보였다.

주요어 : 기기-구조물 상호작용, 층응답스펙트럼, 응답스펙트럼, 임피던스

ABSTRACT

Floor response spectra for dynamic response of subsystem such as equipment, or piping in nuclear power plants are usually generated without considering dynamic interaction between main structure and subsystem. This study describes the analytic method in which equipment response spectra can be obtained through dynamic analysis considering equipment-structure interaction(ESI). In this method, dynamic response of the equipment by this method is based on a dynamic substructure method in which the equipment-structure system is partitioned into the single-degree-of-freedom system(SDOF) representing the equipment and the equipment support impedance representing the dynamic characteristics of the structure at the equipment support. A family of equipment response spectra is developed by applying this method to calculate the maximum responses of a family of SDOF equipment systems with wide banded equipment frequency, damping ratio, and mass. The method is validated by comparing the floor response spectrum from this method with the floor response spectrum generated from the rigorous analysis including equipments on the containment building of a prototypical nuclear power plant. In order to investigate ESI effect in the response of equipment, response values from the method and the conventional approach without considering ESI are compared for the equipment having the mass less than 1% of the total structural mass. Response spectra from the method showed lower spectral amplitudes than those of the conventional floor response spectra around controlling frequencies.

Key words : equipment-structure interaction, floor response spectrum, response spectrum, impedance

1. 서 론

현재 원자력발전소의 기기, 배관 시스템과 같은 부속구조물(subsystem)의 지진해석 및 설계에는 해석의 편리함을 위해서 주구조물(primary structure)과 부속구조물의 동적 상호작용이 고려되지 않는 층응답스펙트럼이 사용되고 있다. 일반적으로 구조물의 동적응답은 비교적 좁은 진동수 범위 내에 있기 때문에 구조물 내 여러 위치에서 구한 층응답스펙트럼(floor response spectrum)은 구조물의 고유진동수 근방에서 큰 응답을 보이는 좁은 첨두값을 보이는 경향이 있다. 이러한 층응답스펙트럼을 부속 구조물의 설계에 적용하는 경우 종종 과도한 보수성을 갖는 설계가 될 수도 있다. 특히, 기기와 구조물의 고유진동수가 일치하는 공진현상이 발생할 때는 보수성이 급격히 증

가하게 되며, 기기의 질량이 구조물의 질량에 비하여 상대적으로 가볍더라도 상당한 영향을 줄 수 있다. 기존 층응답스펙트럼에서 과도한 보수성이 발생하는 것은 결국 기기와 구조물간의 동적 상호작용이 적절히 고려되지 않음을 의미하며, 이러한 현상은 기기가 설치된 위치에서의 구조물의 동적 응답이 상당히 국부적인 응답형태에 의해 좌우될 때 더욱 분명하게 나타난다. 따라서 기기의 동적 해석과 설계시 사용되는 층응답스펙트럼에서 기기-구조물 상호작용(Equipment-Structure Interaction)을 고려하여 지나친 보수성을 감소시키는 방안이 검토되었다.

ESI 효과를 고려한 층응답스펙트럼을 계산하기 위하여 과거 많은 수치적인 방법들⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾이 제안되었지만, 이 방법들 대부분은 실용성이 부족하여 제대로 활용되지 않고 있는 실정이다. 그러나 부속구조물의 지진에 대한 설계하중은 지속적으로 증가하는 추세여서 기존 층응답스펙트럼에 포함된 과도한 보수성을 제거하기 위한 노력이 계속되어 왔다. 특히, 지반-구조물 상호작용을 고려한 구조물을 해석하는 경우 대부분 진동수 영역을 통해서 해석 결과를

* 정희원·한양대학교 공과대학 토목공학과, 부교수

** 정희원·한양대학교 토목공학과 박사과정, 한국전력기술(주), 책임기술원

(대표저자: shjrl@kopec.co.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 6. 14 / 심사종료일 : 2005. 10. 11)

언는데, 기기와 구조물의 동적 상호작용을 구조물과 지반의 동적 상호작용과 유사하다는데 착안하여 진동수 영역에서 ESI를 고려한 층응답스펙트럼을 계산하는 방법이 제안되었다.

본 연구는 진동수 영역에서 ESI를 고려한 층응답스펙트럼을 얻기 위해 Tseng⁽⁵⁾이 제안한 방법을 기술하고 독자적으로 개발한 층응답스펙트럼 작성 프로그램⁽⁶⁾을 사용하여 원자력발전소 구조물을 대상으로 적용성을 평가하였다. ESI 효과가 반영된 층응답스펙트럼과 기기를 포함한 전체 구조물 해석을 전산해석 프로그램인 SASSI⁽⁷⁾를 이용하여 얻은 층응답스펙트럼과 비교하여 적용기법 및 개발된 전산프로그램의 타당성을 확인하였다. 또한 구조물 질량의 1%이내인 기기에 대하여 ESI 영향을 파악하기 위하여 기술된 방법과 기존의 방법을 각각 적용하여 최대 응답값을 비교하였다. 마지막 예제 해석에서는 기기 감쇠비에 대한 층응답스펙트럼의 영향을 검토하였다.

2. 적용 이론 및 해석 절차

ESI 효과를 고려한 기기의 응답을 구하는 문제는 우리들이 흔히 접하는 부분구조법을 적용한 지반-구조물 상호작용 해석 문제와 유사해진다. 즉, 기기는 지반-구조물 상호작용 해석 시스템에서 구조물과 같으며, 구조물은 지반과 같다고 할 수 있다. 이러한 유추를 바탕으로 기기와 구조물 사이의 상호작용은 임피던스 함수와 기기에 작용하는 입력운동을 사용하여 표현될 수 있다. 여기서 임피던스 함수는 기기가 위치하는 곳에서 구조물의 동적 힘-변위 관계를 나타낸 함수를 의미하며, 기기에 작용하는 입력운동은 기기가 없는 상태에서 기기 위치의 구조물 응답운동을 의미한다.

그림 1은 기존 방법으로 구조물과 기기간에 동적 상호작용을 고려하지 않고 기기의 응답값을 구하는 과정을 모사한 그림이다. 일반적으로 가속도 시간이력 형태의 입력운동을 받는 구조물을 지진해석을 통하여 층 가속도 시간이력을 구한다. 구조물에 위치한 기기의 응답을 구하기 위해 기기의 동적 특성에 부합하는 단자유도계를 정의한다. 정의된 단자유도계는 구조물과 비연계된 상태이므로 층 가속도 시간이력을 입력운동으로 한 단자유도계의 응답을

일반적인 수치해석 방법⁽⁸⁾을 통해 구할 수 있다. 이때 각 진동수별로 최대 응답값을 연속적으로 구하면 층응답스펙트럼을 얻게 된다. 기기의 동적 응답을 얻는 과정을 수식화 하기 위해 질량 m_e , 강성 k_e , 감쇠 c_e 로 표현되는 기기에 대한 단자유도계의 운동방정식은 임의의 시간 t 에서 층 가속도 시간이력 $\ddot{z}(t)$ 를 이용하여 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$m_e \ddot{x}_e + c_e \dot{x}_e + k_e x_e = -m_e \ddot{z}(t) \quad (1)$$

여기서, \ddot{x}_e , \dot{x}_e 와 x_e 는 각각 기기의 가속도, 속도, 변위이며, 다시 식 (1)은 진동수 영역에서 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$(-\omega^2 m_e + i\omega c_e + k_e) X_e(\omega) = -m_e \ddot{Z}(\omega) \quad (2)$$

또는

$$(-\omega^2 + i2\beta_e \omega_e \omega + \omega_e^2) X_e(\omega) = -\ddot{Z}(\omega) \quad (3)$$

여기서 ω_e 와 β_e 는 각각 기기의 고유진동수와 감쇠비이고, ω 와 ω_e 는 각각 각진동수와 기기진동수이다. 진동수 영역에서 식 (3)의 해는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$X_e(\omega) = \frac{1}{(\omega^2 - \omega_e^2) - i(2\beta_e \omega_e \omega)} \ddot{Z}(\omega) \quad (4)$$

따라서 기기의 가속도 응답은 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\ddot{X}_e(\omega) = \frac{\omega^2}{(\omega_e^2 - \omega^2) + i(2\beta_e \omega_e \omega)} \ddot{Z}(\omega) \quad (5)$$

여기서 ω/ω_e 를 Ω_e 로 나타내면 식 (5)는 다시 식 (6)과 같이 표현될 수 있으며, 입력운동을 포함한 절대 가속도 응답 $\ddot{U}_e(\omega)$ 는 식 (7)과 같다.

$$\ddot{X}_e(\omega) = \frac{\Omega_e^2}{(1 - \Omega_e^2) + i(2\beta_e \Omega_e)} \ddot{Z}(\omega) \quad (6)$$

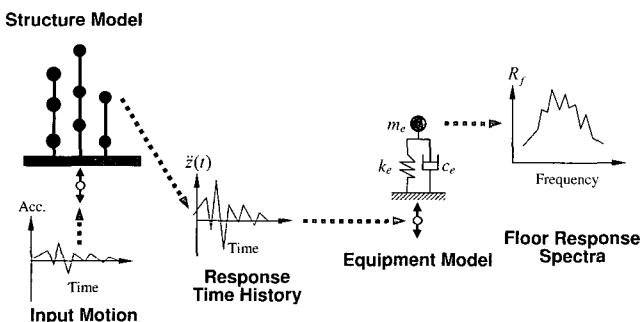


그림 1 기존 방법으로 층응답스펙트럼을 계산하는 과정

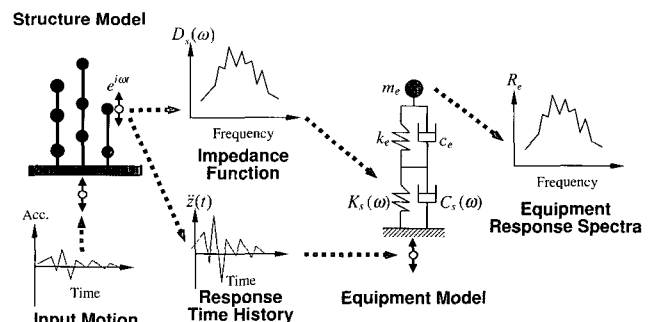


그림 2 ESI를 고려하여 기기응답스펙트럼을 계산하는 과정

$$\ddot{U}_e(\omega) = \ddot{X}_e(\omega) + \ddot{Z}(\omega) = \frac{1 + i(2\beta_e \Omega_e)}{(1 - \Omega_e^2) + i(2\beta_e \Omega_e)} \ddot{Z}(\omega) \quad (7)$$

여기서 $\ddot{U}_e(\omega)$, $\ddot{X}_e(\omega)$, 그리고 $\ddot{Z}(\omega)$ 는 각각 $\ddot{u}_e(t)$, $\ddot{x}_e(t)$, 및 $\ddot{z}(t)$ 의 Fourier 변환이다. 식 (7)의 해를 이용하여 층응답스펙트럼 $R_f(\omega_e, \beta_e)$ 는 다음과 같이 구한다.

$$R_f(\omega_e, \beta_e) = |\ddot{u}_e(t)|_{\max} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} H_e(\omega) \ddot{Z}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right|_{\max} \quad (8)$$

여기서 $H_e(\omega)$ 는 단자유도계의 전달함수이며 식 (9)와 같다.

$$H_e(\omega) = \frac{1 + i(2\beta_e \Omega_e)}{(1 - \Omega_e^2) + i(2\beta_e \Omega_e)} \quad (9)$$

한편, 그림 2는 구조물로부터 ESI 효과를 고려한 기기의 응답스펙트럼을 얻기 위한 과정을 묘사한 그림이다. 그림 1의 구조물에 대한 지진해석은 동일하지만 기기가 설치된 지점에서 기기의 동특성과 연계된 구조물의 임피던스 함수를 얻는 과정이 추가로 필요하다. 그림 1의 기기 모델에 구조물의 임피던스 함수 $D_s(\omega)$ 가 추가로 설치된 단자유도계를 이용하여 기기의 응답값을 계산한다. 기기의 응답을 구하는 과정을 보다 구체적으로 살펴보기 위하여 구조물의 강도와 감쇠를 각각 $K_s(\omega)$ 와 $C_s(\omega)$ 라 하면 구조물의 임피던스 함수 $D_s(\omega)$ 는 식 (10)과 같다.

$$D_s(\omega) = K_s(\omega) + i\omega C_s(\omega) \quad (10)$$

그림 2의 단자유도계에서 구조물의 임피던스 함수를 고려한 등가 기기-구조물 임피던스 함수 $D_e(\omega)$ 는 두 임피던스함수의 직렬개념을 고려하여 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_e(\omega) = \frac{D_s(\omega) \cdot \{k_e + i\omega c_e\}}{D_s(\omega) + \{k_e + i\omega c_e\}} \quad (11)$$

여기서 기기와 구조물의 임피던스비 κ 를 식 (12)와 같이 정의하면 식 (11)은 식 (13)과 같이 정리된다.

$$\kappa = \kappa(\omega) = \frac{k_e + i\omega c_e}{D_s(\omega)} = \frac{m_e \omega_e^2 (1 + 2i\beta_e \Omega_e)}{K_s(\omega) + i\omega C_s(\omega)} \quad (12)$$

$$D_e(\omega) = \frac{k_e + i\omega c_e}{1 + \frac{k_e + i\omega c_e}{D_s(\omega)}} = \frac{k_e + i\omega c_e}{1 + \kappa} \quad (13)$$

구조물에 작용하는 가속도 입력이 $\ddot{z}(t)$ 인 단자유도 시스템의 운동방정식은 진동수 영역에서 식(14)와 같이 나타낼 수 있으며⁽⁵⁾, 식 (14)의 해는 식 (15)와 같이 얻어진다.

$$\left[-\omega^2 m_e + \frac{i\omega c_e + k_e}{1 + \kappa} \right] X_e(\omega) = -m_e \ddot{Z}(\omega) \quad (14)$$

$$X_e(\omega) = \frac{1}{\omega^2 - \frac{\omega_e^2 + i(2\beta_e \omega_e \omega)}{1 + \kappa}} \ddot{Z}(\omega) \quad (15)$$

식 (15)에 대한 기기 가속도 응답은 식 (16)과 같으며, 식 (16)을 Ω_e 를 사용하여 표현하면 식 (17)과 같다.

$$\ddot{X}_e(\omega) = \frac{1}{-1 + \frac{\omega_e^2 + i(2\beta_e \omega_e \omega)}{\omega^2 (1 + \kappa)}} \ddot{Z}(\omega) \quad (16)$$

$$\ddot{X}_e(\omega) = \frac{\Omega_e^2 (1 + \kappa)}{1 - \Omega_e^2 (1 + \kappa) + i(2\beta_e \Omega_e)} \ddot{Z}(\omega) \quad (17)$$

따라서 기기에 대한 절대 가속도 응답 $\ddot{U}_e(\omega)$ 은 식 (18)과 같은 함수로 표현될 수 있다.

$$\ddot{U}_e(\omega) = \ddot{X}_e(\omega) + \ddot{Z}(\omega) = \frac{1 + i(2\beta_e \Omega_e)}{[1 - (1 + \kappa)\Omega_e^2] + i(2\beta_e \Omega_e)} \ddot{Z}(\omega) \quad (18)$$

질량 m_e 인 기기의 응답스펙트럼값 $R_e(\omega_e, \beta_e, m_e)$ 는 식 (8)과 유사한 형태로 표현되고, 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_e(\omega_e, \beta_e, m_e) = |\ddot{u}_e(t)|_{\max} = \left| \int_{-\infty}^{\infty} H'_e(\omega) \ddot{Z}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right|_{\max} \quad (19)$$

여기서 $H'_e(\omega)$ 는 ESI 효과를 포함한 단자유도계의 전달함수로서 식 (20)과 같이 주어진다.

$$H'_e(\omega) = \frac{1 + i(2\beta_e \Omega_e)}{[1 - (1 + \kappa)\Omega_e^2] + i(2\beta_e \Omega_e)} \quad (20)$$

식 (8)과 식 (9)와 유사한 식 (19)와 식 (20)을 비교하면, 기기의 응답스펙트럼 값에서 ESI 효과는 식 (12)에서 정의된 기기와 구조물 사이의 임피던스 비 κ 를 사용한 계수 $(1 + \kappa)$ 에 의하여 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다. 구조물의 임피던스가 기기의 임피던스와 비교하여 상대적으로 상당히 클 때, 즉, κ 가 거의 0과 같다면

($m_e \rightarrow 0$) $H_e(\omega)$ 는 $H'_e(\omega)$ 와 거의 같은 값을 갖게 되며, $R_e(\omega_e, \beta_e, m_e)$ 는 $R_f(\omega_e, \beta_e)$ 와 같게 되어 기기의 응답스펙트럼 값은 ESI 효과 없이 기존의 층응답스펙트럼 값과 같게 된다. 또한, ESI 효과는 기기의 고유 진동수가 구조물의 고유진동수와 일치하는 공진조건에서 식 (9)와 식 (20)의 전달함수는 각각 식 (21)과 식 (22)와 같이 표현된다.

$$|H_e(\omega)|_{\omega=\omega_e} = \frac{\sqrt{1+4\beta_e^2}}{2\beta_e} \quad (21)$$

$$|H'_e(\omega)|_{\omega=\omega_e} = \frac{\sqrt{(\kappa-4\beta_e^2)^2+4\beta_e^2(1+\kappa)^2}}{\kappa^2+4\beta_e^2} \quad (22)$$

이때, 위의 식들로부터 기기의 감쇠비 β_e 가 0인 경우, $|H_e(\omega_e)|$ 는 무한대가 되지만 $|H'_e(\omega_e)|$ 는 κ 가 0이 아니라면 $1/\kappa$ 인 유한한 값을 갖게 되므로, $|H'_e(\omega_e)|$ 는 항상 $|H_e(\omega_e)|$ 보다 작거나 같은 값을 갖는다는 사실을 알 수 있다. 또한, 식 (19)와 식 (20)을 이용하여 유도한 기기의 응답스펙트럼은 다른 연구자들^{(2),(9)}에 의해 제안된 방법으로 계산된 응답스펙트럼과 같은 결과를 나타냈다.

이상과 같이 기술된 내용은 아래의 계산 절차대로 기기의 진동수, 감쇠비 및 질량을 달리한 기기의 최대 응답스펙트럼 값을 연속적으로 계산함으로써 ESI 효과를 고려한

층응답스펙트럼을 작성할 수 있다.

- 절차 1. 구조물에서 층응답스펙트럼의 계산이 필요한 지점에서 SASSI 프로그램을 이용하여 임피던스함수 $D_s(\omega)$ 를 계산한다. 이때 기본적인 진동수영역에서의 동적 해석과정이 이용된다.
- 절차 2. 해석에 필요한 기기의 질량, 감쇠비와 진동수에 대하여 식 (12)를 사용하여 임피던스 비를 계산한다.
- 절차 3. 기기 응답전달함수 $H'_e(\omega)$ 를 식 (20)을 사용하여 계산한다.
- 절차 4. 층응답 가속도의 Fourier 변환인 $\ddot{Z}(\omega)$ 에 대한 응답을 계산한 후 식 (19)를 이용하여 기기 특성에 대한 응답스펙트럼 값인 $R_e(\omega_e, \beta_e, m_e)$ 를 얻기 위해 응답 시간이력의 최대값을 찾는다.
- 절차 5. 기기의 진동수, 감쇠비 및 질량을 달리하여 절차 2에서 절차 4를 반복하여 다양한 형태의 응답스펙트럼 값들을 구할 수 있다.

3. 예제 해석

3.1 ESI를 고려한 층응답스펙트럼의 검증

예제 해석을 위하여 그림 3과 같이 견고한 암반상에 위

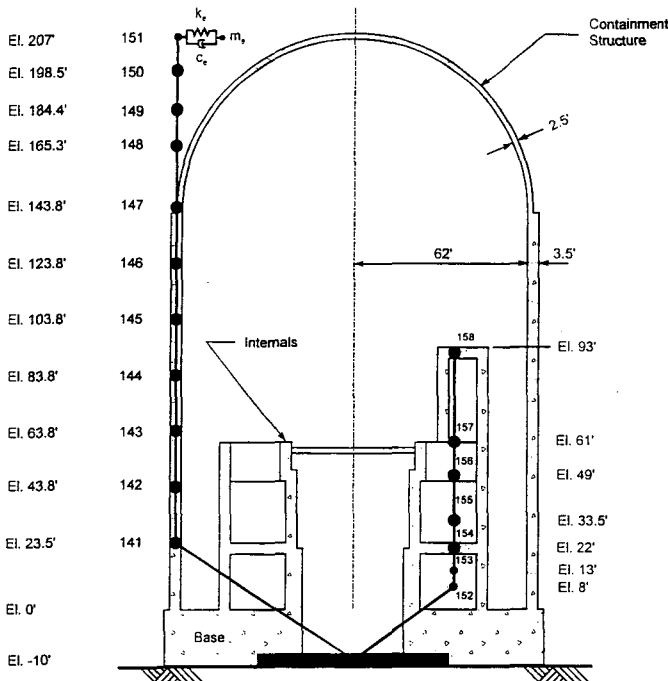


그림 3 예제해석을 위한 원자로건물과 건물 최상부에 설치된 기기 모델

표 1 예제구조물의 제원

Node No.	중량 (kips)	절점간 위치	면적 (ft ²)	전단면적 (ft ²)	관성모멘트 ($\times 10^6$ ft ⁴)
Containment					
141	4,600	Base to 141	4,200	700	2.8
142	4,200	141 to 142	4,200	700	2.8
143	4,200	142 to 143	4,200	700	2.8
144	4,200	143 to 144	4,200	700	2.8
145	4,200	144 to 145	4,200	700	2.8
146	4,200	145 to 146	4,200	700	2.8
147	4,610	146 to 147	4,200	700	2.8
148	3,020	147 to 148	990	500	1.9
149	2,470	148 to 149	990	500	1.5
150	2,120	149 to 150	990	500	0.8
151	190	150 to 151	990	500	0.2
Internal Concrete					
152	2,800	Base to 152	2,000	1,320	1.1
153	2,510	152 to 153	2,560	1,560	1.2
154	6,290	153 to 154	2,210	1,460	1.2
155	3,760	154 to 155	1,960	730	1.3
156	8,540	155 to 156	1,740	600	0.9
157	1,220	156 to 157	780	360	0.2
158	820	157 to 158	190	70	0.004

콘크리트 탄성계수 $E=6.9 \times 10^5$ ksf, $G=2.7 \times 10^5$ ksf

치한 전형적인 원자력발전소 원자로건물을 선택하였다. 원자로건물은 18개의 보요소와 집중질량으로 모델링된 상부 구조물(격납 및 내부구조물)과 88개의 솔리드요소로 모델링된 기초부로 구성되어 있으며, 표 1에 상부구조물의 질량, 보요소를 정의하는 절점 정보 및 요소 단면 특성을 나타내었다. 사용된 콘크리트 입계 감쇠비는 2%이다. 입력운동은 1940년 El Centro지진 남북방향 성분의 최대 가속도값을 0.1g로 조정하고 0.005초 간격과 앞부분의 8.8초만을 발췌한 가속도 시간이력을 사용하였으며, 입력운동의 시간이력과 2% 및 5% 감쇠비에 대한 응답스펙트럼을 그림 4에 나타내었다. 응답스펙트럼의 비교를 위하여 임의로 건물 최상부인 절점번호 151에 수평방향으로 기기를 연결하였다. 기기 질량은 23.1 kips (101.6 kN), 감쇠비는 2%이며, 모든 진동수 영역에 대한 최대 응답값을 계산하였다. 먼저 진동수 영역에서 널리 사용되고 있는 지반-구조물 상호작용 해석프로그램인 SASSI를 사용하여 기기가 포함된 구조물 모델에 대한 지진해석을 수행하고, 응답스펙트럼을 얻어 기준값으로 정하였다. 또한 ESI 효과를 고려한 기기의 단자유도계의 최대 응답 값을 계산하여 앞서 구한 기준 값과 비교하였다. 상호 비교 결과는 본 연구에서 제시된 이론이 타당하고 모두 선형 이론을 기본으로 하고 있기 때문에 같은 결과를 주어야 하고, 그림 5와 같이 비교 진동수 지점에서 응답가속도 값이 서로 잘 일치함을 확인하였다.

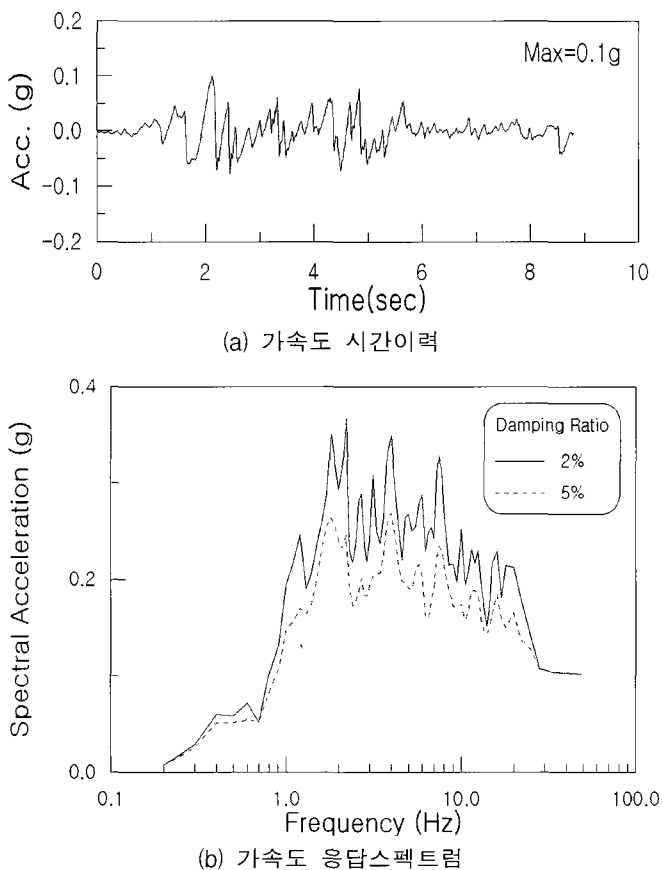


그림 4 예제해석의 입력운동으로 사용된 1940년 El Centro 지진(남북방향)

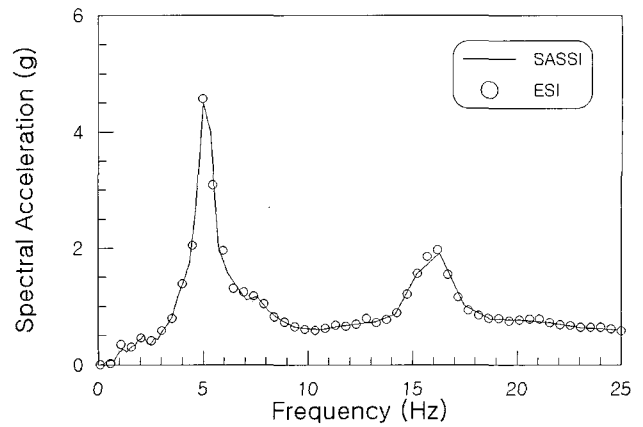


그림 5 기기를 포함한 전체 구조물에 대해 SASSI를 이용한 지진해석과 ESI를 고려한 지진해석으로부터 얻은 기기의 응답가속도 비교(절점 151, 기기 질량 23.1 kips, 감쇠비 2%)

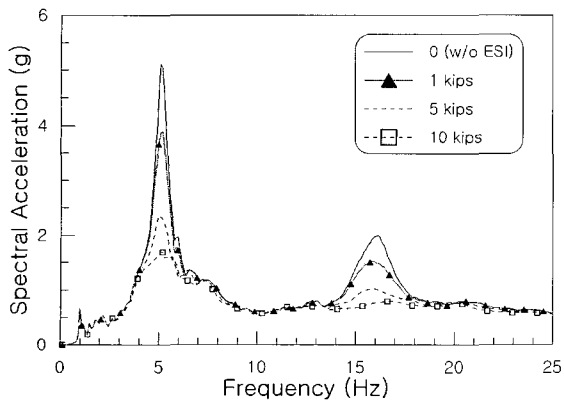
3.2 기기 질량 효과

미국 NRC 규정⁽¹⁰⁾에 의하면 기기의 질량이 기기를 지지하고 있는 구조물 전체 질량의 1%이내인 경우 기기를 구조물과 분리해서 동적 해석을 할 수 있도록 규정하고 있다. 그러나 본 해석에서는 1%미만인 기기 질량을 선정하여 ESI를 고려하여 응답스펙트럼에 기기 질량이 미치는 영향을 살펴보았다. 해석에 사용된 구조물과 입력운동은 검증 문제에 사용된 것과 동일하다. 그림 3의 모델에서 절점 151, 147, 157 및 154를 선택하여 응답스펙트럼 값을 비교하였다. 또한, 구조물 전체 질량인 63,940 kips의 1%이내에 해당되는 0 kips, 1 kips (4.4 kN), 5 kips (22.0 kN) 및 10 kips (44.0 kN)을 기기 질량으로 분류하였다. 여기서 기기 질량이 없는 경우 ESI효과가 없으므로 기존 방식으로 계산되는 응답스펙트럼과 같다. 해석결과를 절점 및 질량 별로 구분해서 기기의 2% 감쇠비에 대한 응답스펙트럼 형태로 그림 6에 나타내었다.

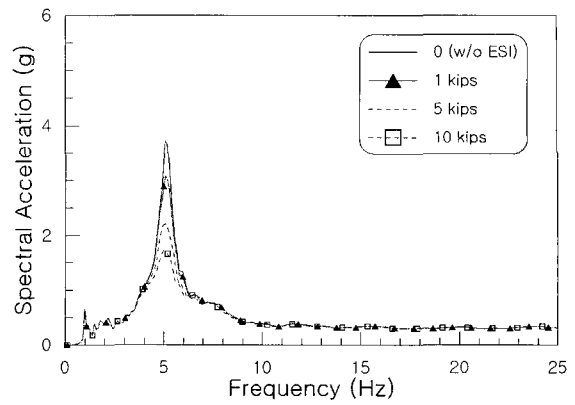
원자로 구조물 외벽에 위치한 절점 147과 151 및 내부 구조물에 위치한 절점 157과 154의 응답스펙트럼은 원자로 구조물의 고유진동수와 일치하는 진동수 지점에서 증폭현상을 보이며, 침두 가속도 부근에서 ESI 효과가 분명히 나타났지만, 기기와 구조물의 공진 구간이 아닌 곳에서는 ESI 효과가 없었다. 또한, ESI 효과는 기기 질량을 클수록 응답스펙트럼의 분명한 저감현상을 보였지만, 저감율은 각 위치 별로 일정하지는 않았으며, 절점 154와 같이 낮은 위치에서는 상대적으로 효과가 적었다.

3.3 기기 감쇠비 효과

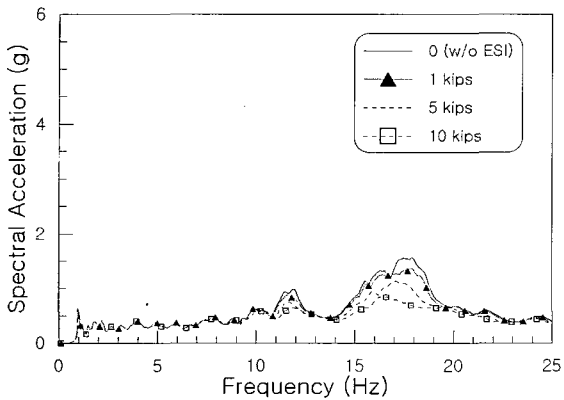
기기의 감쇠비가 ESI 효과에 어떠한 영향을 주는지 확인하기 위하여 1%, 2%, 5% 및 7% 감쇠비에 대해서 그림 3의 구조물 절점 151에 정의한 질량 1 kips의 기기에 대한 응답스펙트럼 값들을 ESI 효과를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우로 비교하여 그림 7에 나타내었다. 기기



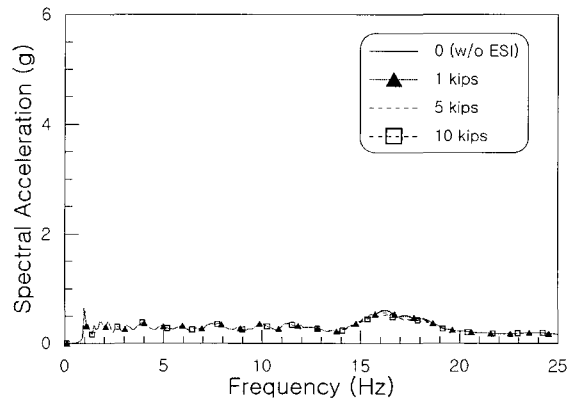
(a) 절점번호 151



(b) 절점번호 147

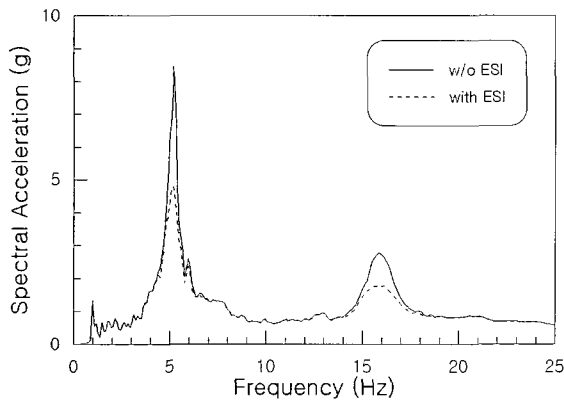


(c) 절점번호 157

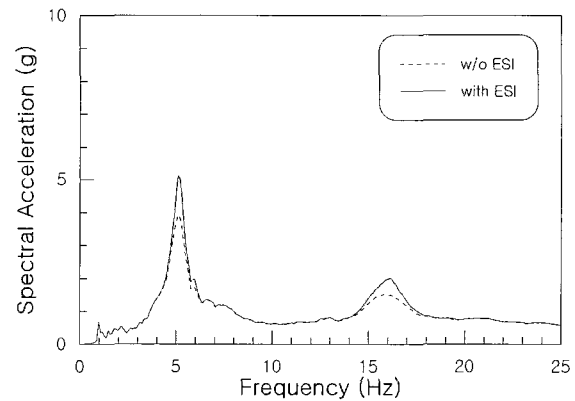


(d) 절점번호 154

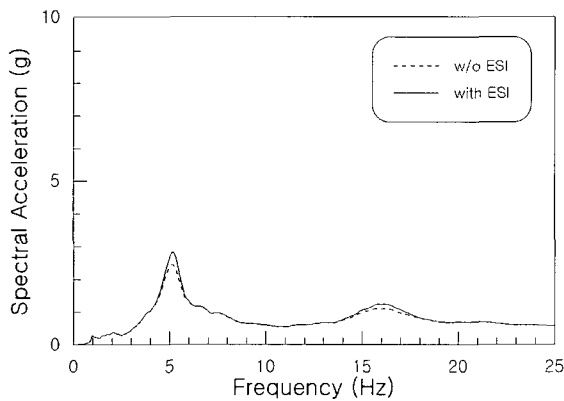
그림 6 ESI를 고려한 경우와 ESI를 고려하지 않는 기존방법을 사용한 경우에 응답 가속도의 비교에서 기기질량의 영향(그림 3의 위치 참조)



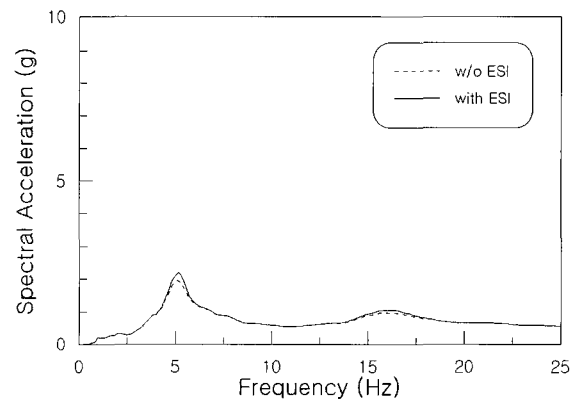
(a) 감쇠비(1%)



(b) 감쇠비(2%)



(c) 감쇠비(5%)



(d) 감쇠비(7%)

그림 7 ESI를 고려한 경우와 ESI를 고려하지 않는 기존방법을 사용한 경우에 기기 응답 가속도 비교에서 감쇠비의 영향(그림 3의 위치 151)

질량을 변화시켰을 때와 마찬가지로 구조물의 지배 진동수 부근에서 ESI 효과에 의하여 첨두부가 낮아졌다. 응답스펙트럼의 지배 진동수에서 ESI를 고려하지 않은 응답값에 대한 ESI를 고려한 응답값의 비율을 저감율이라 한다면, 기기 감쇠비가 작을수록 저감율이 컸고, 기기 감쇠비가 클수록 저감율은 상대적으로 감소하였다. 즉, 감쇠비 1%에서 지배 진동수 대역의 최대 응답 가속도값이 기존 층응답스펙트럼 대비 43.7%까지 저하되는 반면, 감쇠비 7%에서는 11.5%의 저감율을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 ESI 효과를 고려한 층응답스펙트럼을 구하는 방법을 기술하였고, ESI 효과를 확인하기 위한 예제 해석을 수행하였다. ESI를 고려한 응답스펙트럼을 계산하기 위해서는 물론 별도의 노력과 시간이 필요하지만 경제적 또는 기술적 측면에서 다음과 같은 장점을 확인하였다.

- (1) 본 연구에서 기술된 층응답스펙트럼은 이론적으로 구조 동역학의 부분 구조법에 근거 하고 있고, 유도 과정에서 애매 모호한 근사식이나 경험식은 배제되었기 때문에 실용성이 높다.
- (2) 구조물 질량의 1% 미만인 기기들이라 하더라도 층응답스펙트럼의 지배 진동수와 근접한 고유진동수를 갖는 기기의 경우 ESI를 고려하지 않은 응답과 비교하여 응답 값의 저감현상이 두드러지므로 기존 방식보다 저감된 수준의 가속도 응답값을 이용하여 설계가 가능하다. ESI 효과가 층응답스펙트럼에 미치는 영향은 기기 질량이 클수록, 기기 감쇠비는 적을수록 크게 나타났지만, 층응답스펙트럼의 지배 진동수의 위치에 따른 영향은 없었다.
- (3) ESI를 반영한 응답스펙트럼은 기기와 구조물의 동적특성을 반영하기 때문에 구조물과 기기의 동적 상호작용을 무시하고 계산된 기존 응답스펙트럼보다 엄밀한 해석결과를 제공한다.
- (4) ESI를 반영한 응답스펙트럼을 사용하더라도 기존의 층응답스펙트럼과 같은 형식을 취하므로 기존의 설계나 해석절차를 그대로 유지할 수 있다.
- (5) 본 기술은 과도한 첨두 가속도가 발생하는 지점에 설치될 기기들의 내진설계 또는 내진검증 업무를 수행하거나, 유연한 바닥층(즉, 상대적으로 κ 값이 커지는 경우)을 지닌 원전구조물의 지진해석 분야에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2000년 산업자원부에서 시행한 전력산업연구

개발사업인 “원자력발전소의 개선된 내진해석 기술개발”의 기술개발 결과입니다.

참 고 문 헌

1. Nakhata, T., Newmark, N. M. and Hall, W. J., “Approximate Dynamic Response of Light Secondary System,” *Report No. UILU-ENG-73-2004*, University of Illinois, Urbana, Illinois, March 1973.
2. Penzien, J. and Chopra, A. K., “Earthquake Response of Appendage on a Multiple Story Building,” *Proceedings of the Third world Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, Vol. 2, 1965, pp. 476-490.
3. Sackman, J. L. and Kelly, J. M., “Equipment Response Spectra for Nuclear Power Plant Systems,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 57, 1980, pp. 277-294.
4. Igusa, T. and Der Kiureghian, A., “Generation of Floor Response Spectra including Oscillator-Structure Interaction,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 13, No. 5, 1985, pp. 661-676.
5. Tseng, W. S., “Equipment Response Spectra including Equipment-Structure Interaction Effects,” *Proceedings of the 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Honolulu, Hawaii, July 23-27, 1989, ASME, PVP-Vol. 155, pp. 21-29.
6. 한국전력기술, “정밀 내진해석 기술개발에 의한 설계 보수성 감소에 관한 연구”, 한국전력기술 기술개발 최종보고서, 2002년 12월.
7. Lysmer, J., Tabatabaie-Raissi, M., Tajirian, F., Vahdani, S. and Ostadan, F., “SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction,” *Report No. UCB/GT/81-02*, Geotechnical Engineering, University of California, Berkeley, CA, 1981.
8. Humar, J. L., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1990.
9. Atalik, T. S., “An Alternative Definition of Instructure Spectra,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, No. 1, 1978.
10. U.S. Nuclear Regulatory Commission, *SRP3.7.2 Rev. 2: Seismic System Analysis*, U.S. NRC, 1989.

