

# 진동수영역해석법을 이용한 캐비닛내부응답스펙트럼 생성 기법

## In-Cabinet Response Spectrum Generation Using Frequency Domain Analysis Method

조성국<sup>1)\*</sup> · 소기환<sup>2)</sup>

Cho, Sung Gook<sup>1)\*</sup> · So, Gihwan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>이노스기술(주) 대표이사, <sup>2)</sup>이노스기술(주) 과장

<sup>1)</sup>CEO, Innose Tech Co. Ltd, <sup>2)</sup>Manager, Innose Tech Co. Ltd

### / A B S T R A C T /

Seismic qualification of instruments and devices mounted on electrical cabinets in a nuclear power plant is performed in this study by means of the in-cabinet response spectrum (ICRS). A simple method and two rigorous methods are proposed in the EPRI NP-7146-SL guidelines for generating the ICRS. The simple method of EPRI can give unrealistic spectra that are excessively conservative in many cases. In the past, the time domain analysis (TDA) methods have been mostly used to analyze a structure. However, the TDA requires the generation of an artificial earthquake input motion compatible to the target response spectrum. The process of generating an artificial earthquake may involve a great deal of uncertainty. In addition, many time history analyses should be performed to increase the accuracy of the results. This study developed a numerical analysis program for generating the ICRS by frequency domain analysis (FDA) method. The developed program was validated by the numerical study. The ICRS calculated by FDA thoroughly matched with those obtained from TDA. This study then confirms that the method it proposes can simply and efficiently generate the ICRS compared to the time domain method.

**Key words:** Seismic qualification, Electrical cabinet, ICRS, Time domain analysis, Frequency domain analysis

## 1. 서론

원자력발전소에는 발전소의 운영과 기능을 수행하기 위해 수많은 설비와 기기들이 설치되어 있다. 이들 중 원전의 안전한 운전을 담당하는 중요설비들은 설계지진과 같은 강력한 외부사건에 대해서도 구조적 건전성을 유지해야 함은 물론이고, 설비 고유의 기능을 오류 없이 수행해야 한다. 중요설비들 중에는 철재 캐비닛 형태의 전기기기(electrical equipment)들이 많이 포함되어 있다. 전기기기는 캐비닛 자체의 건전성 확보뿐만 아니라 내부에 장착되어지는 주요 부품들의 건전성과 기능 유지가 더 필수적으로 확보되어야 한다. 그래서 이 기기들은 설치 전에 내진검증을 통하여 구조성능과 기능 유지 성능이 반드시 입증되어야 한다. 전기기기의 내진검증(seismic qualification)은 미국 전기전자협회의 표준인 IEEE Std. 344 [1]

와 국내의 전력산업기준인 KEPIC END-2000 [2]에 따라 수행한다.

캐비닛의 내부에 수용된 부품 또는 계전기의 기능을 입증하기 위해서 내진검증을 수행하려면 두 가지 방안 중에서 하나를 선택적으로 사용한다. 그 한 가지 방법은 부품이 수용된 캐비닛 본체를 직접 진동시험을 실시하여 캐비닛 구조체와 내부 부품을 동시에 검증하는 것이다. 그리고 다른 한 가지 방법은 내부에 포함된 부품만을 따로 분리하여 진동시험을 실시하고 부품의 성능을 검증하는 방안이다. 그러나 대형 캐비닛이나 운전 중인 발전소에 설치되어 있는 캐비닛을 내진검증하는 경우에는 여러 가지 제약으로 인하여 전체 캐비닛에 대한 진동시험이 제한될 수 있다. 이러한 경우는 부품만을 따로 검증하는 방법이 선호된다.

부품 혹은 계전기의 내진검증시험을 수행하기 위해서는 그 부품이 설치된 위치에서의 입력운동인 캐비닛내부응답스펙트럼(in-cabinet response spectrum, ICRS)이 필요하다. ICRS는 캐비닛 바닥에 작용하는 지진운동이 캐비닛의 동적응답으로 인하여 계전기 위치에서 증폭되어진 운동으로서 계전기에 대한 지진요구력(seismic demand)이다. 미국의 전력연구원

\*Corresponding author: So, Gihwan

E-mail: ghso@innose.co.kr

(Received January 21, 2020; Revised February 11, 2020; Accepted February 12, 2020)

(electric power research institute, EPRI)에서는 캐비닛 밑면(base)의 운동으로부터 부품 위치에서 증폭된 응답인 ICRS를 계산하는 간편법과 정밀 해석법을 모두 제시하고 있다 [3]. 현재 실무는 하나의 증폭계수(amplification factor)만을 고려하여 간편하게 ICRS를 생성하는 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 EPRI에서 제시하는 증폭계수는 저진동수(low frequency) 지반운동에 대한 연구를 토대로 개발된 것이지만, 캐비닛은 고진동수 모드(high frequency mode)에 지배되는 경우가 많다 [4].

캐비닛의 ICRS를 작성하는 방법에 대한 연구는 캐비닛 해석모델의 작성방법에 대한 연구와 해석기법에 대한 연구 분야로 구분할 수 있다. 많은 공학 기술자들은 세밀한 유한요소모델을 사용하여 캐비닛의 해석모델을 정확하게 작성할 수 있다고 생각한다. 하지만 실제로 캐비닛을 구성하는 철판과 프레임 및 내부 랙(rack) 등의 구조요소들은 복잡하고 다양한 연결조건으로 체결되고, 내부 부품들의 질량 배치는 불규칙적이어서 이들을 정확하게 모델로 표현하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 캐비닛의 유한요소모델을 작성할 때는 세심한 동적수정(dynamic modification) 작업이 필요하다. 실무에서는 등가의 보요소와 등가 절점질량을 이용한 단순한 모델로 캐비닛을 표현하는 경우가 대부분이다. 캐비닛의 대표적인 전체 모드(global mode)를 표현하는 질량과 강성 및 필요한 경우에 국부모드(local mode)를 표현할 수 있는 질량과 강성을 조합함으로써 캐비닛의 지진거동을 효율적으로 표현할 수 있다.

단순한 모델을 이용한 방법으로서 Cho et al. (2011) [5]은 충격시험을 통한 실험모드분석기법을 이용하여 정확하게 ICRS를 계산하는 방법을 제안한 바 있다. 이 방법은 캐비닛의 ICRS를 정확하게 계산할 수 있는 방법이지만 충격진동실험으로 구조물의 상태방정식을 정확하게 진단하여야 한다. 캐비닛의 중요 진동모드만을 고려하여 캐비닛의 ICRS를 계산하는 방법으로 Gupta et al. (1999, 2002) [6, 7]은 캐비닛의 전체모드와 국부모드를 리츠벡터(Ritz vector)를 이용하여 표현하는 방법을 제안하였다. 이후 Yang et al. (2003) [8]은 캐비닛의 정착부에서 발생할 수 있는 국부 변형에 의한 전도강성을 고려하여 ICRS를 계산하는 방법을 제시하였다. 이후 Rustogi et al. (2004) [9]은 진동실험과 해석으로 구한 모드를 비교 분석하고, 캐비닛 바닥의 전도강성의 중요성에 대하여 다시 강조하였다. 좀 더 정확한 ICRS를 계산하기 위하여 Kim et al. (2019) [10]은 리츠벡터를 이용하여 정착부의 회전강성과 캐비닛을 구성하는 프레임의 강성을 정식화 하는 연구를 수행하였다.

ICRS의 생성 기법과 관련하여 현재까지 진행된 대부분의 연구에서는 캐비닛의 동적응답을 구하기 위하여 시간영역에서 지진해석을 수행한다. 진동수영역을 이용하여 구조물의 지진응답을 계산하는 방법에 대한 연구는 지반구조물상호작용해석을 제외하고 발표된 사례가 적다. 특히 캐비닛의 거동을 분석하기 위하여 진동수영역해석법을 적용한 사례는 더 드물다. Lin et al. (2014) [11]은 원전에 사용되는 대형 MCC (motor control center) 캐비닛의 ICRS를 계산하는 간편법을 제시하고, 이를 검증하기 위하여 진동대시험과 진동수영역해석 및 유한요소해석을 수행하였으나 진동수영역 해석법에 대한 상세한 설명은 제시하지 않았다. EPRI [3]에서는 진동수영역에서 ICRS를 계산하는 수식을 제공하고 있으나, 수식의 검증과 적용성에 대한 설명은 생략하였다.

일반적으로 캐비닛의 입력운동은 응답스펙트럼의 형태로 정의되므로 캐비닛의 ICRS를 시간영역해석으로 구하기 위해서는 캐비닛 바닥의 층

응답스펙트럼에 부합하는 시간이력 입력운동의 생성 작업을 필요로 한다. 그러나 응답스펙트럼에 부합하는 인공지진을 생성하는 과정에는 많은 불확실성 요소와 오류가 포함될 수 있다. 그리고 현대역스펙트럼(narrow banded spectrum)에 부합하는 인공지진의 생성 작업은 또 다른 불확실성을 생성할 우려가 존재한다. 이처럼 시간영역해석법을 적용하기 위해서는 복잡한 인공지진파의 생성과정을 거쳐야 하고, 해석의 정밀도를 향상하기 위해서는 여러 세트의 인공지진을 생성하여 반복해석을 해야 한다는 단점이 있다. 그러나 진동수 영역에서 해석을 수행한다면, 인공지진파의 생성과 같은 불확실성을 배제할 수 있으며, 캐비닛 바닥 위치의 응답스펙트럼을 직접 입력운동으로 사용하기 때문에 복수의 해석이 필요 없으므로 해석시간을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서는 원전에 설치되는 캐비닛형 기기의 ICRS를 진동수영역에서 계산할 수 있는 식을 전개하고, 이를 토대로 수치해석 프로그램을 작성하였다. 전형적인 실제 전기캐비닛을 선정하여 진동시험을 실시하여 모드 특성을 분석하고, 실험모드를 기반으로 해석모델을 작성하였다. 이후 이 연구를 통하여 개발된 수치해석프로그램을 이용하여 캐비닛의 ICRS를 계산하였다. 수치해석프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석을 위해 응답스펙트럼에 부합하는 여러 세트의 인공지진을 생성하였다. 이 연구는 시간영역과 진동수영역의 방법으로 구한 ICRS를 비교하여 진동수영역 방법의 적용성을 확인하고자 한다.

## 2. 캐비닛의 지진응답해석

### 2.1 지진응답의 진동수합수

캐비닛에 대한 응답해석은 지진하중이 작용할 때, 캐비닛의 동적 평형방정식의 해를 구하는 것으로, 캐비닛의 동적특성과 가해지는 하중을 사용하여 계산한다. 캐비닛의 운동방정식은 다자유도계의 운동방정식으로 표현되고, 이 운동방정식의 해를 효율적으로 계산하기 위하여 모드중첩법을 사용할 수 있다. 캐비닛의 운동방정식을 각 모드좌표계에 대하여 비연계된(uncoupled) 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\mu_{ii} \ddot{q}(t) + 2u_{ii} \xi_i w_i \dot{q}_i(t) + u_{ii} w_i^2 q_i(t) = L_i \ddot{u}_b(t) \quad (1)$$

여기서,  $\mu_{ii} = \{\Psi^{(i)}\}^T [M] \{\Psi^{(i)}\}$

$$2\xi_i \mu_{ii} w_i = \{\Psi^{(i)}\}^T [C] \{\Psi^{(i)}\}$$

$$\kappa_{ii} = \mu_{ii} w_i^2 = \{\Psi^{(i)}\}^T [K] \{\Psi^{(i)}\}$$

$$L_i = \{\Psi^{(i)}\}^T [M] \{1\}$$

$\Psi^{(i)}$ 는  $i$ 번째 자유진동모드이며,  $\mu_{ii}$ ,  $2\xi_i \mu_{ii} w_i$ 와  $\kappa_{ii}$ 은  $i$ 번째 모드에 대한 일반질량, 일반감쇠, 일반강성계수이며,  $L_i$ 는 모드지진입력계수(modal earthquake excitation factor), 그리고  $\ddot{u}_b(t)$ 는 밑면에 작용하는 지진가속도이다.

진동수영역에서 지진응답을 구하기 위해서는 응답스펙트럼과 파워스펙트럼(power spectral density, PSD)의 관계를 정의하여야 한다. 응답스

펙트럼과 PSD의 관계는 랜덤프로세스(random process) 이론에 기초를 두고 유도한다. 어떤 특정 진동수 성분에서의 응답스펙트럼 값은 해당 진동수 성분을 갖는 단자유도계의 최대 절대값이다. 또한 이 최대값들의 분포는 랜덤프로세스와 초과확률에 근거한 에너지 분포를 알아야 구할 수 있다. 즉, 응답스펙트럼과 PSD 함수의 관계는 응답스펙트럼에 초과확률을 추가함으로써 구할 수 있다. 여기서 초과확률이란 어떤 지진의 지속시간 동안 응답스펙트럼 값을 초과할 확률을 의미한다. 지진을 가우시안(Gaussian) 확률 가정으로 가정하면 응답스펙트럼에서 PSD를 계산할 수 있다.

캐비닛 바닥에서 캐비닛 상단  $k$ 번째 자유도에 대한 상대변위를 정의하면 다음 식과 같다.

$$u_k(t) = \sum_i \Psi_k^{(i)} q_i \quad (2)$$

여기서,  $u_k(t)$ 는  $k$ 번째 자유도에서 밑면에 대한 상대변위이며,  $\Psi_k^{(i)}$ 는  $k$ 번째 자유도에서의  $i$ 번째 자유진동모드이다.  $q_i$ 는  $i$ 번째 모드좌표(modal coordinate)이다. 진동수응답함수를 적용하여 진동수 영역에서 상대가속도를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\ddot{U}_k(\omega) = - \sum_i \Psi_k^{(i)} \ddot{H}^{(i)}(\omega) \Gamma_i \ddot{U}_b(\omega) \quad (3)$$

$$\ddot{H}^{(i)}(\omega) = \frac{-\omega^2}{(\omega_i^2 - \omega^2) + 2j\xi_i\omega} \quad (j = \sqrt{-1}) \quad (4)$$

여기서,  $\ddot{U}_k(\omega)$ 와  $\ddot{U}_b(\omega)$ 는 각각  $k$ 번째 자유도의 가속도응답과 밑면 가속도 운동을 푸리에(Fourier) 변환한 값들이며  $\ddot{H}^{(i)}(\omega)$ 는 가속도 진동수응답함수,  $\Gamma_i$ 는 모드참여계수이다. 밑면의 가속도운동을 평균이 0인 정상 가우시안 랜덤프로세스라고 가정함으로써, 입력운동과  $k$ 번째 자유도사이의 관계를 가속도 PSD로 나타낼 수 있다. 즉, 앙상블평균(ensemble average)을 사용하여 PSD함수를 나타내고, 여기에 진동수영역에서 상대가속도에 관한 식을 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_{u,k}(\omega) &= 2E\{\ddot{U}_k(\omega) \ddot{U}_k^*(\omega)\} \\ &= \sum_i \sum_j \Psi_k^{(i)} \Psi_k^{(j)} \ddot{H}^{(i)}(\omega) \ddot{H}^{(j)*}(\omega) \Gamma_i \Gamma_j 2E\{\ddot{U}_b(\omega) \ddot{U}_b^*(\omega)\} \\ &= \sum_i \sum_j \Psi_k^{(i)} \Psi_k^{(j)} \ddot{H}^{(i)}(\omega) \ddot{H}^{(j)*}(\omega) \Gamma_i \Gamma_j G_{u,b}(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $E\{\}$ 는 앙상블평균, \*는 공액복소수,  $G_{u,k}(\omega)$ 와  $G_{u,b}(\omega)$ 는 각각  $k$ 번째 자유도와 밑면에서의 가속도 PSD 함수이다. 이로부터 절대가속도 PSD 함수는 다음과 같이 얻어진다.

$$G_{\ddot{u}(abs),k}(\omega) = G_{u,k}(\omega) + \left[1 + 2 \sum_i \Gamma_i \Psi_k^{(i)} \operatorname{Re}\{\ddot{H}^{(i)}(\omega)\}\right] G_{u,b}(\omega) \quad (6)$$

$k$ 번째 자유도의 PSD로부터 응답스펙트럼은 다음의 식으로 계산한다.

$$S(\omega_0, \xi) = \sqrt{-2m_0 \ln \left\{ -\frac{\pi}{T} \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \ln(1-r) \right\}} \quad (7)$$

여기서,

$$m_n(\omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^n |H_0(\omega)|^2 G(\omega) d\omega, \quad n = 0, 2, 4, \dots \quad (8)$$

$$|H_0(\omega)|^2 = \frac{\omega_0^4 + 4\omega_0^2 \xi_c^2 \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega_0^2 \xi_c^2 \omega^2} \quad (9)$$

## 2.2 캐비닛의 응답 증폭비

ICRS란 지진시 기기가 설치된 층의 가속도 층응답스펙트럼에 기기 내부에서 응답 증폭을 고려하여 산정한 캐비닛 내부 응답스펙트럼을 의미한다. EPRI [3]에서는 해석적 방법을 이용하여 전기캐비닛의 ICRS를 산출하는 방법으로 단순계산법과 정밀해석법을 모두 제시하고 있다. 정밀해석법은 다시 시간영역방법과 진동수영역방법으로 구분한다.

단순계산법은 경험자료에 기반하여 캐비닛을 고유진동수별로 그룹화하고 캐비닛의 밑면 응답스펙트럼에 대한 캐비닛 상단의 응답증폭비( $AF_g$ )를 산정하는 방법이다.

$$AF_g = \frac{S_{a1}(f_{x1}, 5\%)}{S_{a0}(f_{x0}, 5\%)} \quad (10)$$

여기서,  $S_{a1}(f_{x1}, 5\%)$ 는 기기의 5%감쇠 ICRS의 최대값,  $S_{a0}(f_{x0}, 5\%)$ 는 기기 밑면 응답스펙트럼의 5%감쇠 곡선의 최대값이다.

단순계산법으로 간편하게 응답의 증폭비를 계산할 수 있지만, 이는 지나치게 보수적인 결과를 산출하는 경향이 있으며, 캐비닛의 특성에 따라 증폭이 일어나지 않는 경우도 있어서 방법에 대한 신뢰도가 낮다는 문제가 있다 [4]. EPRI [3]가 제안하고 있는 증폭계수는 단지 45개 캐비닛의 현장진동 시험을 토대로 개발된 것으로 그 적용성에 제한을 받게 된다. 그러므로 더 많은 실험과 데이터베이스를 구축하여 현재의 증폭계수를 개선하기 이전에는 정밀한 방법의 사용이 추천된다.

## 2.3 수치해석 절차

캐비닛의 밑면 응답스펙트럼으로부터  $k$ -자유도에서의 ICRS를 구하는 절차는 Fig. 1과 같이 요약할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 첫 번째 단계에서는 밑면 응답스펙트럼을 밑면 PSD 함수로 변환한다. 그리고 두 번째 단계에서 캐비닛의 모드특성 자료를 반영하여  $k$ -번째 자유도의 PSD를 계산하고, 마지막으로 세 번째 단계에서  $k$ -번째 자유도의 PSD를 응답스펙트럼으로 변환한다.

이 연구에서는 가속도응답스펙트럼을 PSD함수로 변환하기 위하여 반복법을 사용하였다. 가속도응답스펙트럼으로부터 초기(0)단계에서의 PSD 함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

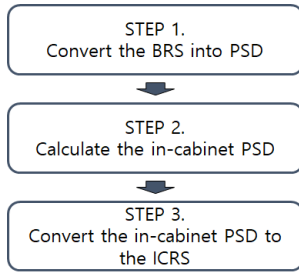


Fig. 1. Procedure for calculation of the ICRS using PSD

$$G^{(0)}(\omega) = \frac{2\xi_e}{\pi\omega} \frac{\{S(\omega, \xi)\}^2}{-2\ln\left\{-\frac{\pi}{\omega T} \ln(1-r)\right\}} \quad (11)$$

$$\xi_e = \xi + \frac{2}{\omega T} \quad (12)$$

여기서,  $\xi_e$ 는 유효감쇠비이고,  $r$ 은 초과확률 그리고  $T$ 는 지속시간이다. Kaul (1978) [12]의 추천에 의하면, 초과확률과 지속시간에 대하여 각각 0.15와 15를 사용할 수 있다.  $i$ -번째 단계의 PSD 함수로부터  $i+1$  단계의 PSD는 다음의 관계식으로 구한다.

$$G^{(i+1)}(\omega) = G^{(i)}(\omega) \left\{ \frac{S(\omega, \xi)}{S^{(i)}(\omega, \xi)} \right\}^2 \quad (13)$$

$i$ -번째 단계의 수렴오차( $\epsilon^{(i)}$ )는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon^{(i)} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{nrs} \{S(\omega_j, \xi) - S^{(i)}(\omega_j, \xi)\}^2}{\sum_{j=1}^{nrs} \{S(\omega_j, \xi)\}^2}} \quad (14)$$

여기서,  $nrs$ 는 응답스펙트럼을 나타내기 위해 사용한 진동수 값들의 개수이다. 수렴오차가 어떤 기준값을 만족할 때까지 반복 계산한다. 이 연구에서는 수렴오차의 값을 1%로 설정하였다.

### 3. 해석기법의 검증

#### 3.1 개요

이 연구에서는 앞서 전개된 수치해석 절차를 MATLAB [13]을 이용하여 수치해석프로그램으로 작성하였다. 해석절차와 프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 실제 원전에 사용되는 캐비닛을 대상으로 시간영역기법과 진동수영역기법으로 ICRS를 계산하고 결과를 비교하였다. 대상 캐비닛은 단순화된 2절점 집중질량-보요소 모델로 이상화하였다. 해석모델의 고유진동수 특성은 진동대시험을 통하여 규명된 모드특성과 일치하도록 보요소의 강성을 조정하였다.

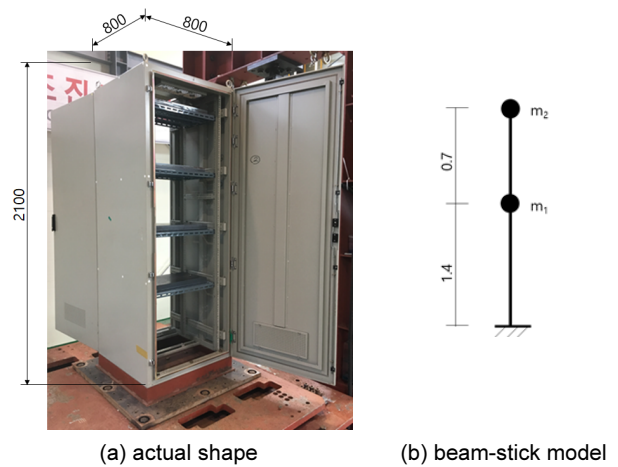


Fig. 2. Analytical model of cabinet

Table 1. Mass and stiffness of beam-stick model

Node	Mass	Equivalent beam stiffness
1	31.6 kg	1.73 × 10 <sup>5</sup> kN/m
2	17.3 kg	

Table 2. Natural frequency of analytical model

	Natural frequency	Mode shape
Analysis	8.39 Hz	
Experimental	8.42 Hz	

#### 3.2 해석모델

대상 캐비닛은 Fig. 2(a)에 보인 형태로서 그의 크기(H×W×D)는 2,100 × 800 × 800(mm)이다. 이는 강재 철판과 프레임(frame)으로 구성되고, 전면과 후면에 문짝이 부착된 전형적인 전기캐비닛의 하나이다. 캐비닛을 구성하는 철판의 두께는 약 5 mm이고, 내부에는 여러 가지 프레임이 보강되어 있다. 실제의 캐비닛 내부에는 각종 전기 전자 부품들이 탑재되어 있으나, 이 연구에서는 불필요한 비선형 거동을 배제하기 위하여 내부의 부품은 모두 제거하였다. 그리고 캐비닛의 실제 중량을 구현하기 위하여 부품의 중량에 해당하는 철판을 각 층의 랙(rack)에 탑재하였다. 캐비닛 자체의 중량은 287 kg이며 각 층에 부가된 40 kg의 질량을 합하여 캐비닛 전체 중량은 480 kg이다.

캐비닛의 전면과 후면에는 문이 설치되어 있으므로 개방된 벽체로 간주되기 때문에 강성의 기여 효과가 없다. 캐비닛은 2차원 모델로 X-Z 평면내

의 수평자유도를 갖는 등가 보요소 모델로 이상화하였다. 이 연구에서는 캐비닛의 측면방향의 거동만을 분석하였다. 캐비닛의 형상과 해석모델은 Fig. 2에 나타내었으며 해석모델에 적용한 절점질량과 강성은 다음 Table 1에 나타내었다.

Table 2에 보인 강성과 질량은 실험모드분석을 통하여 규명된 캐비닛의 동특성에 근거하여 결정하였다. 이 연구에서는 실물 캐비닛에 대한 동특성 값을 추출하기 위하여 충격해머시험을 수행하고 가속도응답신호로부터 전달함수를 작성하였다. 캐비닛은 다중모드시스템으로서 여러 개의 모드가 존재하지만, 이 연구에서는 모델을 단순화하고, 해석기법의 검증에 집중하기 위하여 1차 기본모드만으로 캐비닛의 특성을 표현하였다. Fig. 3은 진동

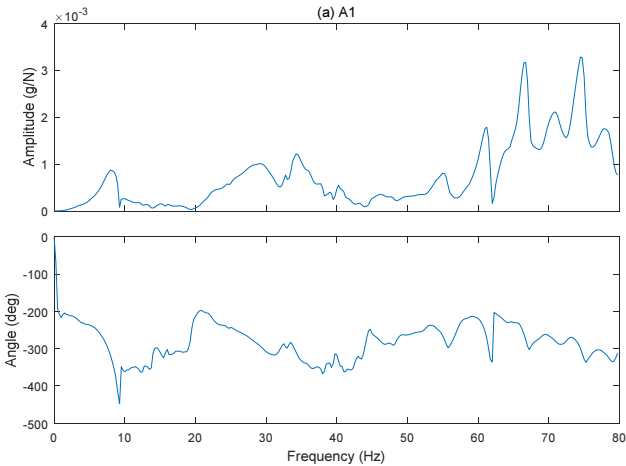


Fig. 3. Transfer function at the top of cabinet

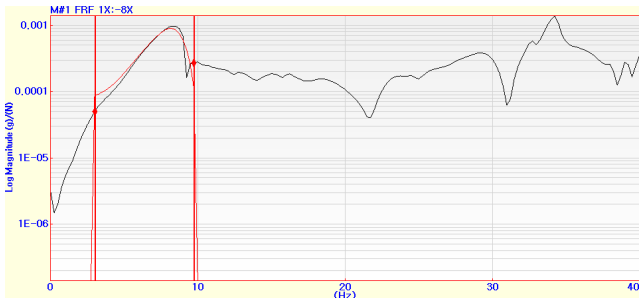


Fig. 4. Curve fitted transfer function by polynomial equation

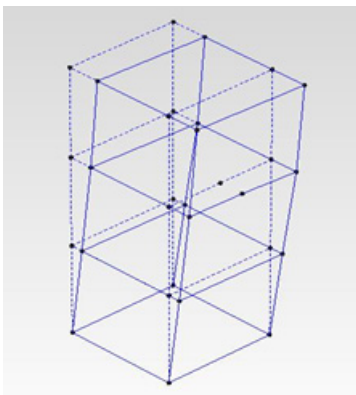


Fig. 5. 1<sup>st</sup> mode shape - 8.42 Hz

시험으로 얻어진 캐비닛의 최상단 중앙(A1)에서의 전달함수를 대표적으로 보인 것이다. 동특성 분석을 위해 Fig. 3에 보인 전달함수는 다항식의 함수로 표현한다. 실험 데이터로부터 모드특성을 추출하기 위하여 다항식 곡선적합(polynomial curve fitting)기법 [14, 15]이 적용될 수 있다. Fig. 4는 전달함수의 수치 곡선을 다항식 함수로 적합시킨 형상이다.

실험모드분석을 통하여 규명된 캐비닛의 1차 고유진동수는 8.42 Hz이고, 이때의 모드형상은 Fig. 5에 보인 바와 같다.

해석모델의 고유치해석을 수행한 후, 해석모델의 고유진동수와 모드형상이 진동실험 결과와 일치하도록 보요소 강성을 조정하였다. Table 2는 해석과 실험으로 구한 해석모델의 기본 고유진동수와 모드형상을 비교한 것이다.

### 3.3 입력운동

수치해석을 위하여 실제 국내의 한 원자력발전소에 속한 독립건물의 임의의 층에서의 층응답스펙트럼(Fig. 6)을 입력운동으로 선택하였다. 진동

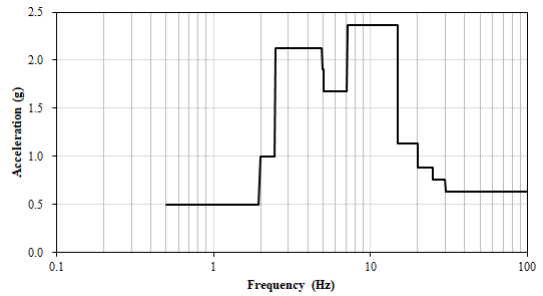


Fig. 6. Target floor response spectrum

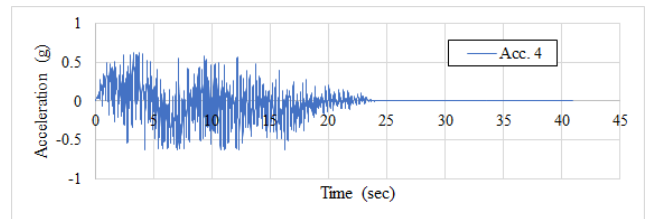


Fig. 7. Time history acceleration of representative artificial earthquake

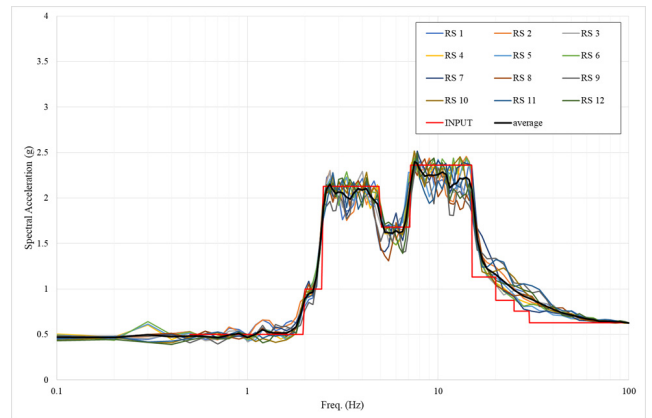


Fig. 8. Response spectra of artificial earthquakes



수영역해석법에서는 Fig. 6에 보인 응답스펙트럼이 직접 입력운동으로 사용된다. 반면에 시간영역해석을 위해서는 가속도 시간이력이 필요하므로 이 연구에서는 Fig. 6에 부합하는 총 12개의 인공지진파를 생성하였다. 인공지진을 생성하기 위하여 관련 문헌 [16]에 제시된 랜덤 진동이론을 적용하고, 충격응답함수를 사용하여 응답스펙트럼을 보정하였다.

인공지진파의 통계적 독립성이 보장되어야 하므로, IEEE [1]의 규정에 따라, 상관값(coherence value)은 0.5보다 작도록 제어하였다. 총 12개의 인공지진 중에서 대표적인 한 개의 인공지진의 형상을 Fig. 7에 나타내었다. 작성된 인공지진의 지속시간은 총 24초로서 0.005초 간격을 갖는다. 모든 인공지진파의 응답스펙트럼과 목표FRS를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 생성된 12개 인공지진의 평균응답스펙트럼은 목표FRS에 근접하여 포락하고 있음을 알 수 있다. 한편, 생성된 인공지진의 평균응답스펙트럼은 목표 응답스펙트럼에 비하여 피크 부근에서 약간 낮게 생성되었음을 알 수 있다. 이는 인공지진의 생성과정에서 더 많은 보정 과정을 생략하였기에 파생된 결과이다. 이를 감안하여 진동수영역해석에서는 목표 응답스펙트럼이 아닌 인공지진의 평균 스펙트럼을 입력으로 사용하였다.

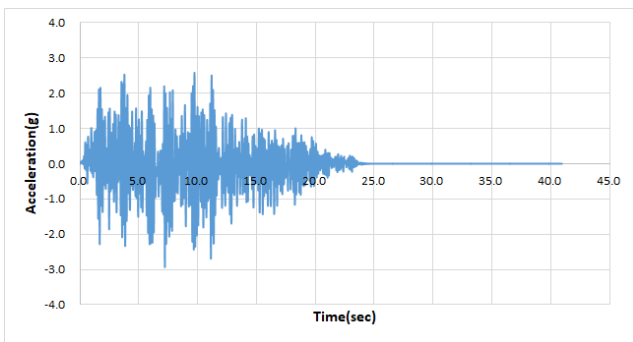


Fig. 9. Acceleration response at the top of cabinet

### 3.4 ICRS의 비교 검토

FRS를 기반으로 생성한 12세트의 인공지진파에 대하여 시간이력해석을 수행하였다. 해석은 모드중첩법을 이용한 시간이력해석법을 적용하여 수행하였다. 내진검증에서 캐비닛의 감쇠비는 주로 5%의 감쇠를 적용 [1] 하므로 이 연구에서 캐비닛의 모드감쇠비는 5%로 가정하였다. 해석을 위하여 전문 프로그램인 SAP2000 [17]이 사용되었다. 대표적으로 한 개의 인공지진파에 대한 시간이력해석결과를 Fig. 9에 나타내었으며, 이를 응답스펙트럼으로 변환하여 Fig. 10에 나타내었다. 이 응답은 캐비닛의 상단에서 계산된 것이다. 해석결과, 입력운동에 대한 캐비닛 상단의 응답 증폭비는 7.06~9.12로 나타났으며 이들의 평균 증폭비는 7.86이다.

진동수영역해석에서 입력운동으로 정의한 응답스펙트럼은 인공지진파의 평균응답스펙트럼이다. Fig. 11에 이 연구의 수치해석 프로그램을 이용하여 진동수영역 방법으로 ICRS를 계산하는 과정을 나타내고 있으며 Fig. 12에 ICRS 계산 결과를 나타내었다. 진동수영역으로 구한 캐비닛 상단의 응답 증폭비는 7.24이다.

시간영역방법과 진동수영역방법으로 구한ICRS를 Fig. 13에 비교하였

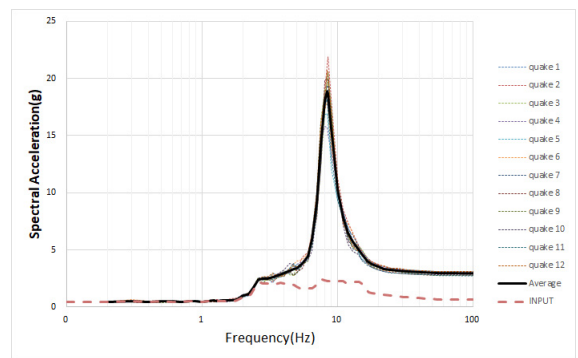


Fig. 10. Average ICRS obtained from time domain analysis

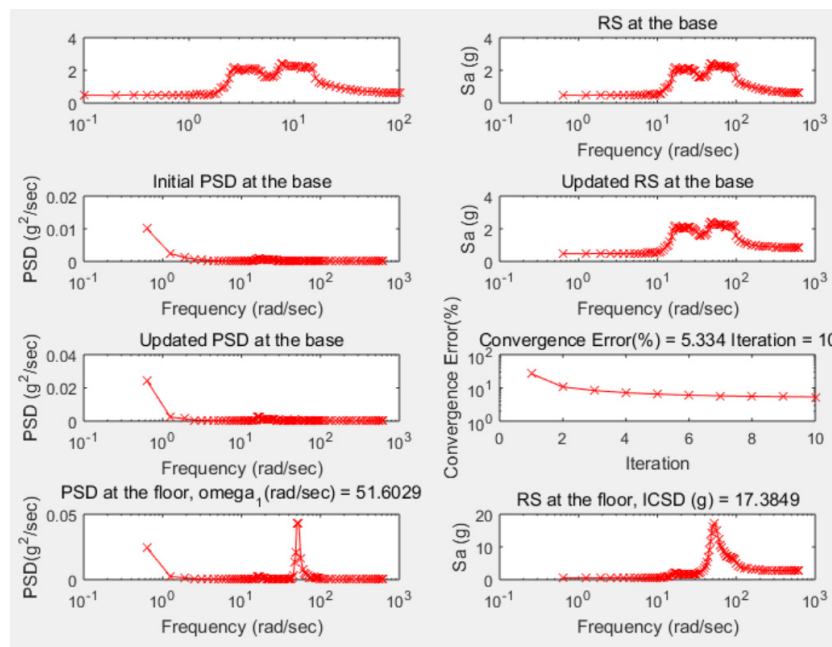


Fig. 11. Process of frequency domain analysis

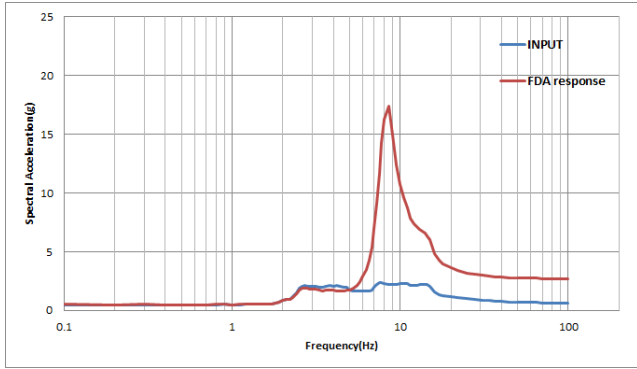


Fig. 12. Frequency domain analysis result

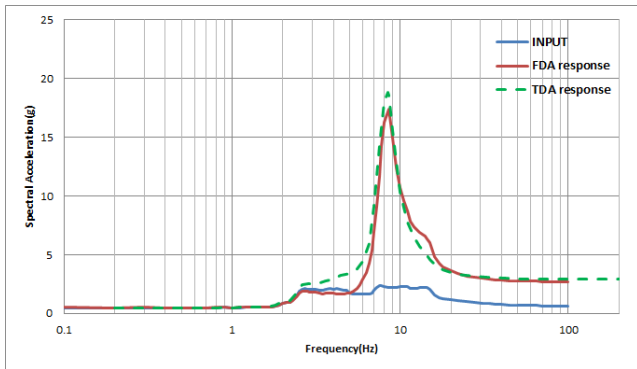


Fig. 13. Comparison of ICRS computed by TDA and FDA

다. 그래프를 통해 두 가지 방법의 해석결과는 매우 잘 일치한다는 것을 알 수 있다. 이로써 이 연구를 통하여 작성된 수치해석 절차의 유효성이 검증되었다. 앞서 밝힌 바와 같이, 캐비닛 상단의 응답증폭비는 시간영역법의 경우에 7.86, 진동수영역법인 경우에 7.24로 계산되었다. 진동수영역법으로 구한 응답의 증폭비는 시간영역법으로 구한 값의 평균보다 약 8.5% 낮게 계산되었다. 그러나 더 많은 시간이력해석을 수행하거나, 보다 정밀한 모델을 사용하는 경우에 그 차이는 달라질 수 있다.

## 4. 결론

이 연구에서는 진동수영역해석법으로 원전 캐비닛의 ICRS를 계산하는 수치해석 절차를 정립하고 수치해석 프로그램을 개발하였다. 이 연구에서 개발된 프로그램의 유효성을 검증하기 위하여 대표적인 캐비닛을 대상으로 예제분석을 수행하였다. 수치해석의 해석 결과를 분석한 후, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) EPRI에서 제공하는 진동수영역해석법을 적용하여 계산한 ICRS는 협대역 응답스펙트럼에 부합하는 12개의 인공지진에 대한 시간이력해석 결과와 비교적 잘 일치한다.
- 2) 시간영역법으로 계산한 ICRS의 증폭비는 7.06-9.12로 인공지진파에 따라 다소의 차이가 발생하므로, 하나의 인공지진을 사용하여 ICRS를 계산하는 경우에는 오차가 발생할 수 있다.
- 3) 12개의 인공지진을 사용하여 시간이력해석법으로 구한 ICRS의 응답

증폭비의 평균은 7.86으로서 단 한 번의 진동수영역해석으로 구한 7.24에 근접한다.

- 4) 진동수영역법을 이용하면, 별도의 시간이력 생성과정을 거치지 않고 직접 ICRS의 계산이 가능하다. 따라서 인공지진파의 생성과정에서도 도입되는 불확실성을 감소시키고, 해석에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.

## / 감사의 글 /

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지기술개발사업의 지원(No. 20161520101270)을 받아 수행한 연구과제입니다.

## / REFERENCES /

1. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE). IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, IEEE Std 344-2013, c2013.
2. Korea Electric Power Industry Code (KEPIC). Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, KEPIC END-2000, c2010.
3. Electric Power Research Institute (EPRI). Guidelines for Development of In-Cabinet Seismic Demand for Devices Mounted in Electrical Cabinets, EPRI NP-7146-SL, c1995.
4. Gupta A, Cho SG, Hong KJ, Han M. Current State of in-cabinet Response Spectra for Seismic Qualification of Equipment in Nuclear Power Plants. Nuclear Engineering and Design. 2019;343:269-275.
5. Cho SG, Cui J, Kim D. A Procedure for Generating In-cabinet Response Spectra Based on State-space Model Identification by Impact Testing. Journal of Nuclear Engineering Technology. An International Journal of the Korean Nuclear Society. Korean Nuclear Society. 2011;43(6):573-582.
6. Gupta A, Rustogi SK, Gupta AK. Ritz Vector Approach for Evaluation Incabinet Response Spectra. Nuclear Engineering and Design. 1999; 190:255-272.
7. Gupta A, Yang J. Modified Ritz Vector Approach for Dynamic Properties of Electrical Cabinets and Control Panels. Nuclear Engineering and Design. 2002;217:49-62.
8. Yang J, Rustogi SK, Gupta A. Rocking Stiffness of Mounting Arrangements in Electrical Cabinets and Control Panels. Nuclear Engineering and Design. 2003;219(2):127-141.
9. Rustogi S, Gupta A. Modeling the Dynamic Behavior of Electrical Cabinets and Control Panels: Experimental and Analytical Results. J. Structural Engineering. ASCE. 2004;130(3):511-519.
10. Kim KH, Hong KJ, Cho SG, Park WK. Formulation and Verification on Ritz Method for In-Cabinet Response Spectrum. EESK, J. Earthquake Engineering. 2019;23(5):279-288.
11. Lin FR, Chai JF, Lai ZY, Chen MY, Chou PF, Huang YN and Liao WI. Seismic Evaluation of Relays in Motor-control-center type Cabinets

- in Taiwan Nuclear Power Plants, 10th U.S. National conference on Earthquake Engineering, Frontiers of Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, 2014 Jul;21-25.
12. Kaul MK, Stochastic Characterization of Earthquake Through Their Response Spectrum, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978;6:497-509.
  13. MATLAB Reference Guide, MathWorks, Inc. 1994, Pressure Vessels and Piping Conference, c1990, p. 301-306.
  14. Cho SG, Joe YH, So GH, Seismic Response Prediction of a Structure Using Experimental Modal Parameters from Impact Tests, Earthquake Engineering Society of Korea, 2000;14(2):75-84.
  15. STAR User's Guide, Spectral Dynamics, Inc. c1996.
  16. Kim D, Dynamics of Structures, 4th Ed, ISBN:9788982254581, Goomi Book Store, c2017.
  17. CSI Analysis Reference Manual, Computers & Structures, Inc. c2017.