

# 지반 임피던스 함수를 고려한 원전 구조물기반 질량집중모델에 대한 시간영역 지진응답해석

## Time-domain Seismic Analysis of Lumped-mass Model Based on Nuclear Power Plant Considering Soil Impedance Function

최 유리\* · 주 희 건\* · 정 형 조†

Yuree Choi\*, Heekun Ju\* and Hyung-Jo Jung†

(Received September 7, 2022 ; Revised September 26, 2022 ; Accepted September 27, 2022)

**Key Words :** Seismic Analysis(지진해석), Soil-structure Interaction(지반-구조물 상호작용), Structural Nonlinearity(구조물비선형성), In-structure Response Spectrum(층응답스펙트럼), Nuclear Reactor Containment Building(원전 격납건물)

### ABSTRACT

In this paper, a seismic analysis method of nuclear reactor containment buildings (RCBs), considering both soil-structure interaction (SSI) and structural nonlinearity, is proposed and verified. To consider the SSI effect, a frequency-dependent soil impedance function is calculated and transformed into an impulse response in the time domain, which is applied to the structure in sway-rocking model form. Seismic analysis of the structure considering structural nonlinearity is then conducted in the time domain. As a structural model, a beam-stick model based on OPR1000, an in-service RCB in Korea, is used. The IMK hysteretic model is adopted for seismic analysis to consider the structural nonlinearity of the RCB, which is mainly composed of concrete shear wall. Three different soil profiles are used for the comparison, and a series of analyses are performed with PGA = 0.3 g and 2 g. The seismic responses of the structure are represented as in-structure response spectra and compared.

### 1. 서 론

최근 우리나라에 포항 지진을 비롯하여 비교적 규모가 큰 지진이 발생함에 따라, 원전 구조물과 같은 중요 구조물의 내진 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 원전구조물의 경우, 일반적으로 단단한 암반위에 건설해 지반의 영향을 받지 않지만 원전 부지 선정의 제약으로 암반이 아닌 부지에 원전을 건설해야 하는

경우가 증가함에 따라 지반-구조물 상호작용의 영향을 고려하는 것이 거의 필수적으로 요구되고 있다. 이에 따라, 지반-구조물 상호작용에 대한 구조물의 내진 설계기준이 강화되어 지반의 전단파 속도가 2439 m/s 보다 낮을 경우 내진 설계 시 지반-구조물 상호작용 고려가 필수적이다<sup>(1)</sup>. 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석하는 방법은 크게 시간 영역 해석과 진동수 영역 해석으로 구분할 수 있다. 먼저 시간영역 해석 방법으로는 지반을 유한요소로 모델링하여 직접법을 통해

† Corresponding Author ; Member, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Professor  
E-mail : hjung@kaist.ac.kr

\* Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School, KAIST, Student

# A part of this paper is present at the KSNVE 2022 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jun Yun Chung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

지진응답 해석을 수행하는 방법이 있다<sup>(2-3)</sup>. 이 방법은 가장 정확도가 높은 해석 방법이나, 구조물과 지반을 유한요소로 상세하게 모델링해야 하며, 시간 증분마다 단계적으로 수치적분하기 때문에 해석 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다<sup>(4)</sup>. 진동수 영역에서 해석을 수행하는 방법은 시간영역 해석방법에 비해 지반을 1차원으로 간단하게 모델링하여 해석 시간을 효과적으로 단축시킬 수 있다. 또한, 지반을 스프링과 댐핑 등의 상수로 표현하여 고려하는 방법이 있는데, 이 경우는 해석이 간단하지만 진동수 의존적인 지반의 특성을 효과적으로 고려하지 못한다는 한계가 있다<sup>(5-7)</sup>. 콘크리트 전단벽으로 구성된 원전 구조물의 경우, 강진이 발생시 큰 비선형 거동을 보인다. 이러한 구조물의 비선형 거동을 설계 초과지진에 대한 지진응답해석 수행 시 고려해야 하며, 이러한 비선형 거동을 고려한 구조물의 지진응답해석은 시간영역에서 수행되어야 한다. 전단벽의 비선형 거동을 모사할 수 있는 이력모델을 사용해 해석을 수행해야 한다. Gulec and Whittaker는<sup>(8)</sup> IMK pinching 모델을 사용하여 전단벽 부재의 반복하중시 거동을 계산한바 있다. 확률론적 지반-구조물 상호작용 해석 시 설계 지진뿐만 아니라 설계 초과 지진에 대한 지반-구조물 상호작용 해석을 수행해야 한다<sup>(9)</sup>. 설계 초과 지진에 대한 해석 수행 시 구조물의 비선형거동을 고려해야 하는데, 이를 지반-구조물 상호작용과 함께 고려하기 위한 방법이 필요하다. 시간영역 해석의 경우, 구조물의 비선형성을 고려할 수 있으나 해석 시간이 길어 많은 횟수의 해석을 필요로 하는 확률론적 해석에 적합하지 않다. 반면, 진동수 영역 해석은 해석시간이 짧으며 진동수 의존적 특징을 갖는 지반을 효과적으로 고려할 수 있으나, 구조물의 비선형성을 고려할 수 없다. 시간 영역 해석 방법과 진동수 영역 해석방법의 한계점을 보완하여 진동수 의존적 지반 특성을 고려한 시간영역 지진응답 해석방법을 Nakamura가 제안했다<sup>(10)</sup>. 이 방법은 지반 임피던스 함수를 통해 지반을 효과적으로 고려하고 구조물의 지진응답 해석을 시간영역에서 수행하여 해석 시간이 짧고 구조물의 비선형성을 동시에 고려할 수 있는 다중단계방법이다. 이 방법에 대한 검증은 단순한 예제해석으로만 수행되었기 때문에 복잡한 지반과 실제 구조물에 대한 해석을 통한 검증이 필요하다. 이 논문에서는 다중단계방법을 실제 우리나라에서 가동중인 원전 격납

건물인 OPR1000에 적용하여 지반-구조물 상호작용과 구조물의 비선형성을 동시에 고려한 지진응답 해석을 수행하여 제안된 방법을 검증하고자 한다. 구조물 모델의 경우, 구조물의 비선형 거동을 모사하기 위해 상세한 유한요소 모델을 활용할 수 있지만, 해석시간의 단축을 위해 집중질량 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 이를 위해서는 구조물의 동적 특성을 등가의 보요소와 집중질량으로 이상화하는 과정이 필요하다. 원전 격납건물은 전단벽 구조물로, 반복하중 하에서 구조물의 변형이 발생할 경우 전단 성분이 지배적으로 나타나게 된다. 따라서, 구조물을 단순화된 전단 건물로 가정하고 모델링하였으며, 전단벽의 거동을 모사할 수 있는 이력모델 중 하나인 IMK모델을 사용하였다<sup>(11)</sup>. 지반 임피던스 함수를 얻기 위해 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램인 ACS SASSI를 사용하였다. 지반-구조물 상호작용 효과를 확인하기 위해 전단파 속도가 다른 3개의 지반에 대한 해석을 수행하였으며 구조물의 층응답스펙트럼을 통해 결과를 비교하였다.

## 2. 비선형 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석을 위한 다중단계방법

이 장에서는 지반-구조물 상호작용 효과와 구조물의 비선형성을 동시에 고려할 수 있는 지진 응답 해석방법인 다중단계방법을 소개하고자 한다. 지반-구조물 상호작용 효과 고려를 위한 임피던스를 임펄스 응답으로 변환하는 과정은 Nakamura가 제안한 방법을 기반으로 모델링하였다<sup>(10)</sup>.

### 2.1 다중단계방법

이 논문에서는 지반-구조물 상호작용과 구조물 비선형성을 효과적으로 고려할 수 있는 방법을 제안했다. 일반적으로 지반은 강한 진동수 의존적 특징을 보이는데, 이를 효과적으로 고려하기 위해서는 진동수영역에서 해석을 수행해야 한다. 반면, 구조물의 비선형성을 고려한 지진 응답해석은 시간영역에서 수행되어야 한다. 따라서, 이를 동시에 고려하기 위해 진동수 영역 해석을 통해 얻은 임피던스 함수를 시간영역의 임펄스 응답으로 변환하여 시간영역 지진응답 해석에 sway-rocking 모델의 형태로 적용하여 해석을 수행할 수 있다.

임피던스 함수는 동적 강성이라 불리며, 기초를 무질량의 강체로 가정하고 기초의 변위에 대한 정상상태의 하중 크기의 비로 정의된다<sup>(12)</sup>. 임피던스 함수는 복소 함수로 표현되며, 실수부와 허수부는 각각 동적 강성계수와 동적 감쇠계수를 나타낸다. 이 논문에서 임피던스 함수 계산을 위해 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램인 ACS SASSI를 사용하였다<sup>(13)</sup>.

진동수 영역의 임피던스 함수를 시간영역의 임펄스 응답으로 변환하기 위해 Nakamura가 제안한 변환 방법을 사용하였다<sup>(10)</sup>. 이 방법은 변위와 속도이력만을 고려하는 기존의 방법들과 달리, 가속도를 추가적으로 고려해 더 정확한 변환이 가능하다. 임피던스 함수  $\{D(\omega_i)\}$ 와 계수행렬  $[[\{\bar{C}_k\} [\bar{C}_c] \{\bar{C}_M\}]]$ 을 통해 임펄스 응답  $G_K, G_C, G_M$ 을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} D(\omega_1) \\ \vdots \\ D(\omega_N) \end{Bmatrix} = [[\{\bar{C}_K\} [\bar{C}_c] \{\bar{C}_M\}]] \cdot \begin{Bmatrix} G_K \\ G_C \\ G_M \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $\{D(\omega_i)\} = \begin{Bmatrix} Re[D(\omega_i)] \\ Im[D(\omega_i)] \end{Bmatrix}$ ,  $\{G_K\} = \begin{Bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ \vdots \\ k_{N-1} \end{Bmatrix}$ ,

$\{G_C\} = \begin{Bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_{N-2} \end{Bmatrix}$ ,  $G_M = m_0$ 이며, 계수행렬은 다음과 같다.

$$[\bar{C}_K] = \begin{Bmatrix} \{\bar{C}_{K_{1,0}}\} & \dots & \{\bar{C}_{K_{1,N-1}}\} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \{\bar{C}_{K_{N,0}}\} & \dots & \{\bar{C}_{K_{N,N-1}}\} \end{Bmatrix}, \{\bar{C}_{K_{i,j}}\} = \begin{Bmatrix} \cos\theta_{ij} \\ -\sin\theta_{ij} \end{Bmatrix} \quad (2a)$$

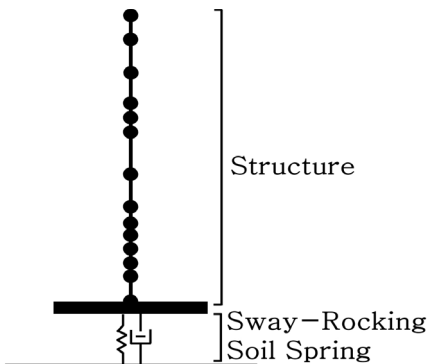


Fig. 1 Sway-rocking structure model

$$\begin{aligned} [\bar{C}_c] &= \begin{Bmatrix} \{\bar{C}_{C_{1,0}}\} & \dots & \{\bar{C}_{C_{1,N-2}}\} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \{\bar{C}_{C_{N,0}}\} & \dots & \{\bar{C}_{C_{N,N-2}}\} \end{Bmatrix}, \{\bar{C}_{C_{i,j}}\} \\ &= \begin{Bmatrix} \omega_i \cdot \sin\theta_{ij} \\ \omega_i \cdot \cos\theta_{ij} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2b)$$

$$[\bar{C}_M] = \begin{Bmatrix} \{\bar{C}_{M_1}\} \\ \vdots \\ \{\bar{C}_{M_N}\} \end{Bmatrix}, \{\bar{C}_{M_j}\} = \begin{Bmatrix} -\omega_j^2 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2c)$$

여기서,  $\theta_{ij} = \omega_i \cdot t_j$ 이다.

식 (1), (2)를 통해 얻은 시간영역의 임펄스 응답을 구조물에 적용하여 시간영역에서 구조물의 지진 응답 해석을 수행할 수 있다. 구조물의 운동방정식에 임펄스 응답을 Fig. 1과 같이 sway-rocking 스프링과 외력 벡터  $\{R_f(t)\}$ 로 적용한 식 (3), (4)를 통해 구조물의 응답을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s(t) \\ \ddot{u}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{ss} & C_{sb} \\ C_{bs} & C_{bb} + [c_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s(t) \\ \dot{u}_b(t) \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sb} \\ K_{bs} & K_{bb} + [k_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s(t) \\ u_b(t) \end{Bmatrix} = -\ddot{y}_0(t) \begin{Bmatrix} M_s \\ M_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ R_f(t) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\{R_f(t)\} = \sum_{j=1}^{n'} \{ [c_j] \cdot \dot{u}_b(t-t_j) + [k_j] \cdot u_b(t-t_j) \} \quad (4)$$

여기서, 아래 첨자  $s$ 와  $b$ 는 각각 구조물과 기초를 의미하며,  $M, C, K$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성 행렬을 나타낸다. 그리고  $\ddot{y}_0(t)$ 는 입력지반운동으로 기반암의 in-layer motion을 나타내며,  $t_j = j \cdot \Delta t, n' \leq N-1$ 이다.

### 2.2 구조물 비선형 모델

이 논문에서는 Ibarra 등<sup>(11)</sup>이 제안한 전단벽의 거동을 모사할 수 있는 이력모델 중 하나인 Ibarra-Medina-Krawinkler(IMK)모델을 사용하여 구조물의 비선형성을 고려한 지진 응답 해석을 수행하였다. IMK이력모델은 에너지 소산량에 기반하여 계산되는 강도 및 강성 저감 현상을 고려할 수 있다. 해당 이력 모델은 부재의 항복 지점, 캐핑 지점, 극한 지점 및 잔류 지점으로 나타나는 Fig. 2와<sup>(11)</sup> 같은 골격 곡선을 가지며, 반복 하중에 의한 강도, 재하 강성 및 재

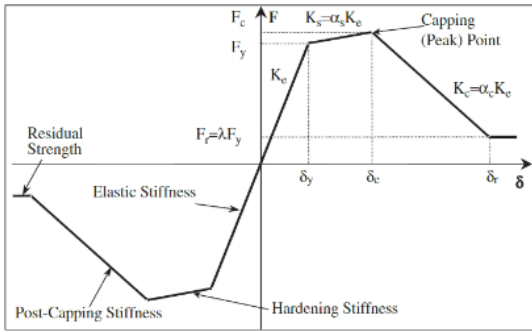


Fig. 2 Backbone curve of IMK hysteretic model

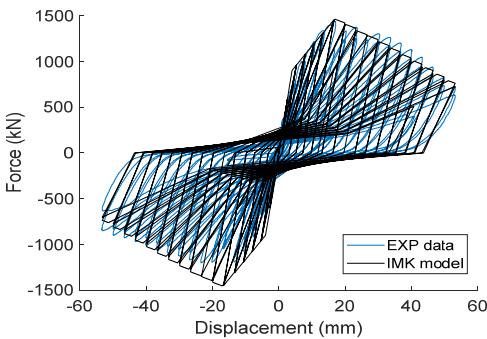


Fig. 3 IMK model vs. shear wall experimental data

하 강성의 특성 저하 및 핀칭 효과를 에너지 기반의 파라미터를 사용하여 묘사할 수 있다.

이 논문에서는 이력곡선 계산을 위해 Fig. 3과<sup>(14)</sup> 같이 전단벽 실험 결과를 이용하여 모델의 파라미터를 조정하였다. 비선형 모델 작성을 위한 전단벽 이력모델 결정을 위해 부재의 재료 및 단면 정보 등을 활용하여 JEAG4601에서<sup>(15)</sup> 제시한 방법대로 골격곡선을 계산하고 이력모델 파라미터 최적화를 통해 모델을 작성하였다.

### 3. 제안 방법 검증을 위한 수치해석

이 장에서는 실제 원전 격납건물 기반 질량집중 모델에 다중단계 방법을 적용하여 제안 방법을 검증하고 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 비선형 구조물의 지진 응답 해석을 수행하였다.

#### 3.1 해석 조건

##### (1) 구조물 모델

구조물 모델은 현재 우리나라에서 가동중인 원전 격납건물인 OPR1000을 기반으로 질량 집중 모델을 사용하였다. 원전 격납건물의 내부 기기들을 제외한 외벽만을 Fig. 4와<sup>(16)</sup> 같이 14개의 집중질량으로 구성

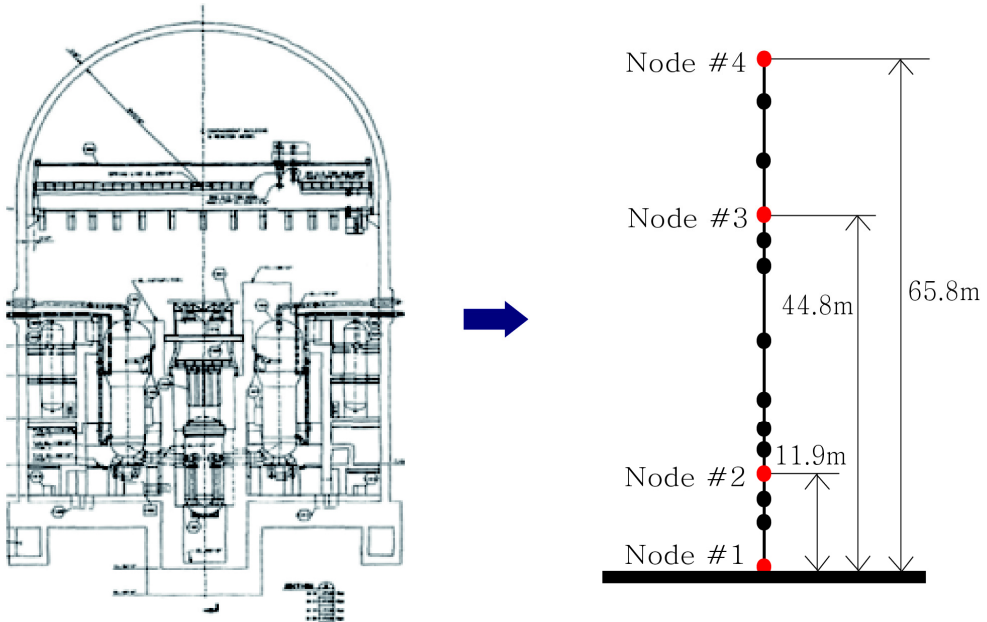
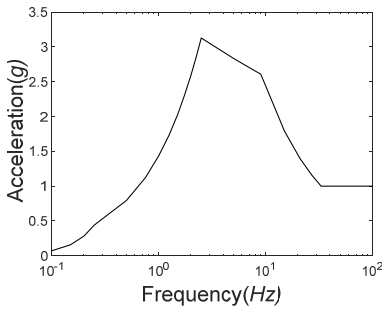


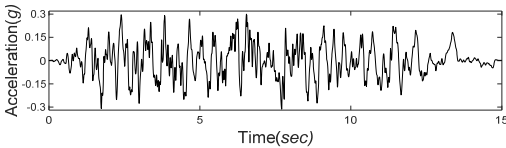
Fig. 4 Structural model

**Table 1** Soil profiles

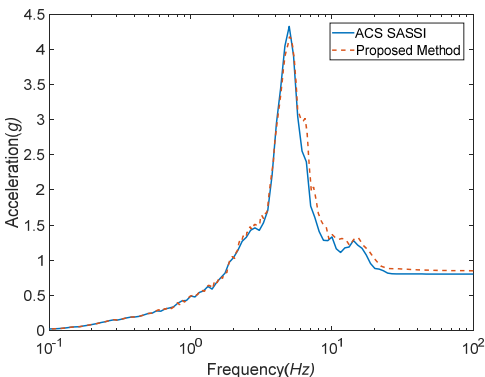
Depth	Soft rock		Medium rock		Hard rock	
	Vs (m/s)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )
0~15 m	610	20.42	1219	21.21	1829	22.78
15~45 m	1219	21.21	1829	22.78	2804	24.35
45~135 m	1829	22.78	1829	22.78	2804	24.35
135~290 m	2804	24.35	2804	24.35	2804	24.35
≥ 290 m	2804	24.35	2804	24.35	2804	24.35



**Fig. 5** Design response spectrum (R.G. 1.60)



**Fig. 6** Input acceleration time history (PGA = 0.3 g)



**Fig. 7** In-structure response spectrum (ACS SASSI vs. Proposed method)

된 65.8 m의 beam-stick 모델로 모델링하였으며, 구조물의 고유진동수는 6.039 Hz이다. 해석 결과 비교를 위해 각각 높이가 다른 4개의 절점을 임의로 지정하였다. Rayleigh 감쇠를 사용하였으며, 원전 격납건물의 감쇠비  $\xi$ 는 0.05를 사용했다<sup>(17)</sup>.

(2) 지반 모델

지반-구조물 상호작용 해석을 위한 지반 프로파일은 한국전력공사(KEPCO)에서 신형 원전인 APR1400의 내진 설계를 위해 제안한 포괄부지 조건을<sup>(18)</sup> 사용했다. 포괄부지조건 중 평균 전단파 속도 약 2214 m/s와 2311 m/s에 해당하는 Table 1의 지반케이스를 통해 지반-구조물 상호작용 효과를 고려한 해석을 수행하였으며 평균 전단파 속도 2753 m/s에 해당하는 가장 단단한 지반케이스를 비교했다.

(3) 입력지진

구조물의 지진 응답 해석 수행을 위해 설계지진 응답 스펙트럼인 R.G. 1.60을<sup>(19)</sup> 통해 인공지진파를 작성하여 해석했다. Fig. 5는 해석에 사용한 수평방향 설계응답 스펙트럼이다. ACS SASSI의 US NRC SRP 3.7.1기반 모듈 EQuAKE<sup>(13)</sup>를 통해 작성한 Fig. 6의 인공지진파는 지속시간이 약 15초, 시간간격은 0.005초이다. 지반-구조물 상호작용 해석 시 통제점을 지표면에서 정의하였고, 수평방향 지진만 고려했다. 구조물 비선형성을 확인하기 위해 최대지반가속도가 0.3 g와 2.0 g인 경우에 대한 해석을 수행하였다.

3.2 해석 방법 검증

이 연구에서는 다중단계 방법을 검증하기 위해 구조물의 지진응답해석 결과를 ACS SASSI를 통한 해석 결과와 구조물 최상단절점에서 비교하였다. 지반-구조물 상호작용 효과를 확인하기 위해 soft rock 지반을 통한 해석을 수행하였으며 구조물을 선형으로 가정하고 해석하였다. Fig. 7은 구조물의 최상단 절점에서의 층응답스펙트럼으로, ACS SASSI를 통한 층응답스펙트럼과 거의 일치하는 것을 확인하였다.

3.3 해석 결과

지반의 동특성을 고려한 등가선형 부지응답 해석을 ACS SASSI를 통해 수행하고 Fig. 8의 임피던스 함수를 얻었다. Fig. 8(a)는 연약한 지반으로 허수부와

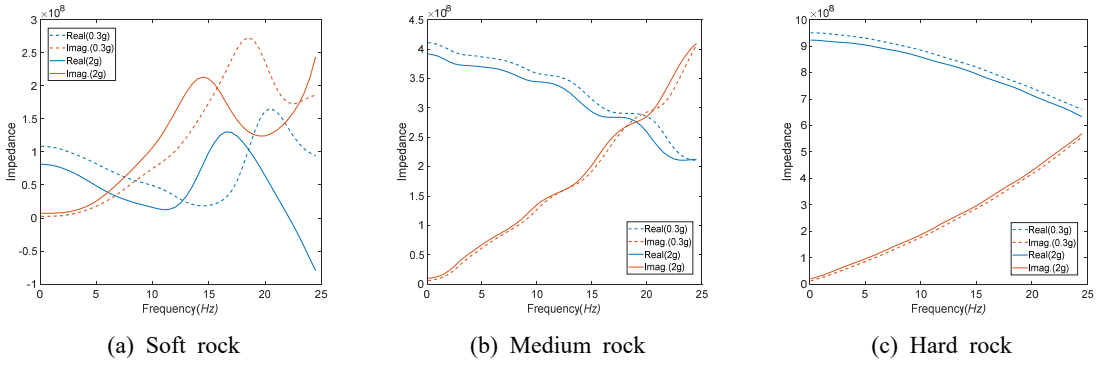


Fig. 8 Impedance function (PGA 0.3 g vs. 2.0 g)

실수부에 해당하는 두 그래프가 교차하며 진동수가 증가할수록 허수부가 실수부보다 커지는 모습을 보이며 단단한 지반인 Fig. 8(c)는 두 그래프가 교차하지 않고 모든 진동수에 대해 강성에 해당하는 실수부가 허수부보다 큰 값을 나타냈다.

연약한 지반일수록 지진세기에 따라 임피던스 함수가 크게 달라졌는데, 이는 변형률 의존적인 지반의 특성을 고려한 등가선형 부지응답해석을 수행했기 때문이다. 연약한 지반의 임피던스 함수인 Fig. 8(a)는 실수부와 허수부 모두 지진 세기에 따라 크게 달라졌으나, 단단한 지반인 Fig. 8(c)의 경우 실수부에서 약간의 차이는 있으나 거의 동일한 임피던스 함수를 얻을 수 있었다.

Fig. 8의 진동수 영역 임피던스 함수를 변환하여 Fig. 9의 시간 영역의 임펄스 응답으로 나타낼 수 있다. 지반이 단단할수록 강성, 감쇠, 질량 임펄스 응답이 모두 커졌으며, 가장 단단한 지반인 Fig. 9(c)의 경우  $t=0$ 에서의 임펄스 응답을 제외하고 거의 0에 가까운 값으로 해석 시 무시할 수 있다. 반면, 연약한 지반인 Fig. 9(a)의 경우  $t=0.1$  sec에서도 비교적 큰 임펄스 응답을 나타냈다. 따라서, 지반이 연약할수록  $t > 0$ 에서의 임펄스 응답을 고려한 지진응답해석을 수행하여야 정확한 결과를 얻을 수 있다.

임피던스 함수와 동일하게 Fig. 9(a)의 경우 지진 세기에 따라 임펄스 응답이 달라졌으나, Fig. 9(c)의 경우 지진 세기에 상관없이 거의 동일한 임펄스 응답을 보였다. 모든 지반 케이스에서  $t=0$ 일 때의 임펄스 응답이 지진 세기에 따라 달라졌으며  $t > 0$ 인 경우 연약한 지반케이스에 해당하는 Fig. 9(a)에서는 약간

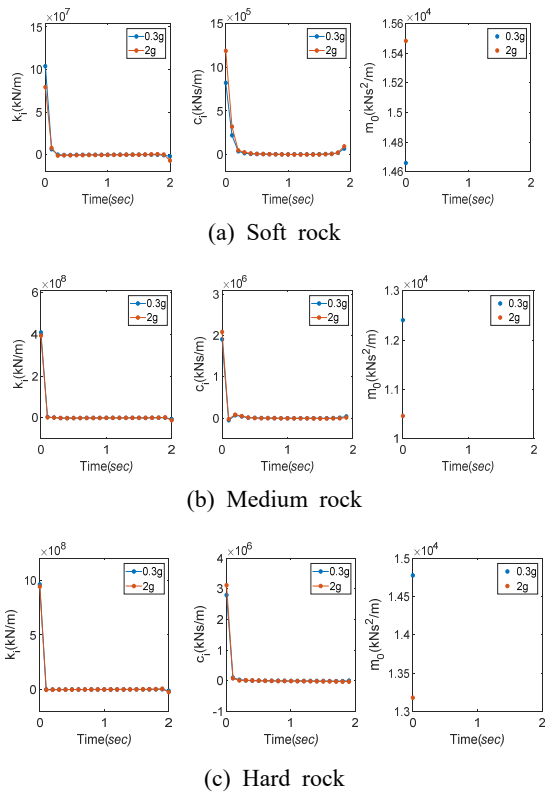


Fig. 9 Impulse response (PGA = 0.3 g vs. 2.0 g)

의 차이를 보였으나 나머지 지반케이스의 경우 거의 동일하게 나타났다.

Fig. 9의 임펄스 응답을 적용하여 원전 격납건물에 대한 지진 응답 해석을 수행하고 각각 높이가 다른 네 개의 절점에서의 층응답스펙트럼을 통해 비교하였

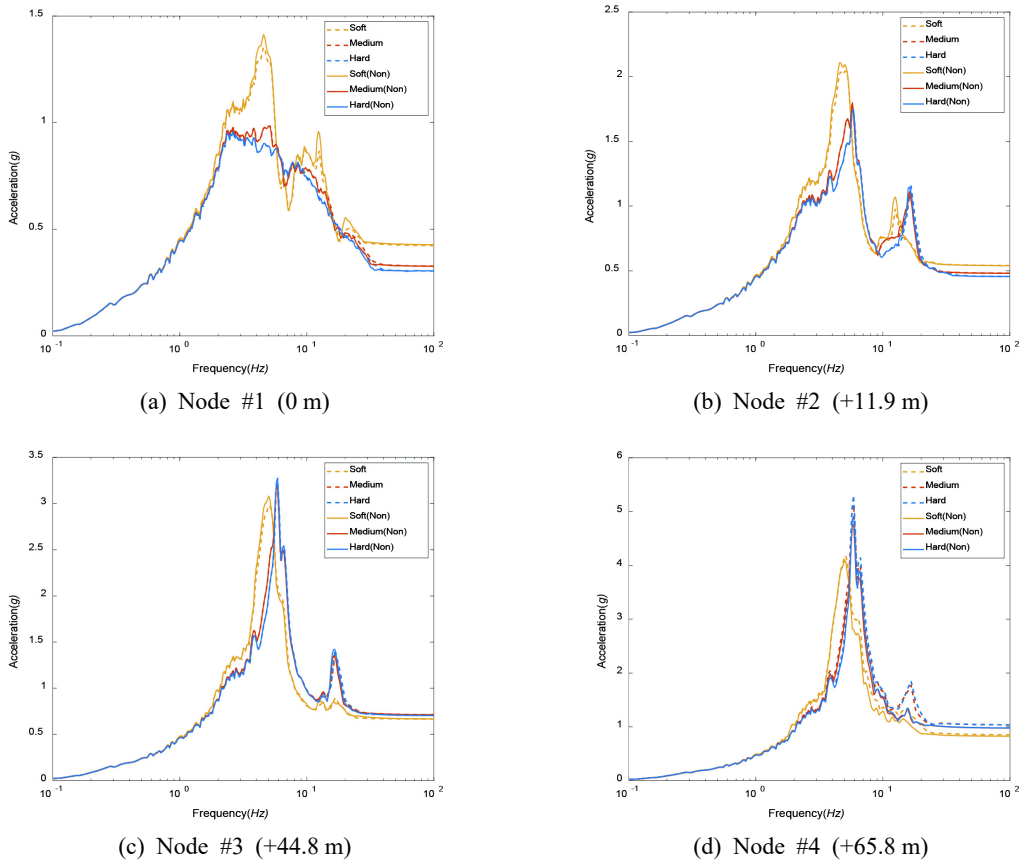


Fig. 10 In-structure response spectrum (PGA = 0.3g)

다. 층응답스펙트럼은 원자력 발전소의 격납건물 내에 설치된 내부 주요 설비들의 안전성을 평가하기 위해 많이 사용되는 스펙트럼이다.

지반 케이스별로 PGA = 0.3 g와 2.0 g인 케이스에 대한 층응답스펙트럼을 Fig. 10과 Fig. 11과 같이 비교하였다. Fig. 10과 Fig. 11에서는 구조물을 선형으로 고려한 경우와 비선형으로 고려한 경우를 각각 나타냈으며 비선형 결과의 경우를 ‘Non’이라 표기하였다.

Fig. 10은 PGA가 0.3 g일 때 구조물의 네 절점에서의 층응답스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 지표면에서의 응답으로 연약한 지반케이스가 지반의 영향으로 크게 증폭되었다. 구조물의 낮은 층인 Fig. 10(a)와 (b)에서는 지반-구조물 상호작용 효과로 연약한 지반에서 최대응답진동수가 이동했지만, 지반의 영향으로 단단한 지반케이스보다 응답이 크게 나타났다. 반면, 구조물의 높은 층인 Fig. 10(c)와 (d)에서는 연약한 지반의

최대응답진동수와 최대응답크기가 감소했다. 이 경우, 구조물이 선형으로 거동하여 선형 모델과 비선형 모델에서 층응답스펙트럼이 큰 차이를 보이지 않았다.

설계초과지진에 해당하는 PGA = 2.0 g인 케이스에 대한 구조물의 층응답스펙트럼은 Fig. 11과 같다. 구조물을 선형으로 모델링한 경우에는 층응답스펙트럼이 PGA = 0.3 g인 케이스와 동일한 형태로 선형응답의 크기가 증가했다.

반면, 비선형 구조물 모델로 해석한 경우, 구조물의 낮은 층에 해당하는 Fig. 11(b)에서 층응답스펙트럼이 크게 달라졌다. 저진동수 대역에서는 진동수 이동 및 응답 감소가 나타났으며, 고진동수 대역에서는 응답의 크기가 크게 증폭되었다. 이는 Fig. 12에서 확인할 수 있듯이 구조물이 낮은 층에서 크게 비선형으로 거동하여 구조물의 강성 저하가 일어나기 때문이다. 반면, 구조물의 높은 절점인 Fig. 11(d)에서는 구조물이 선형으

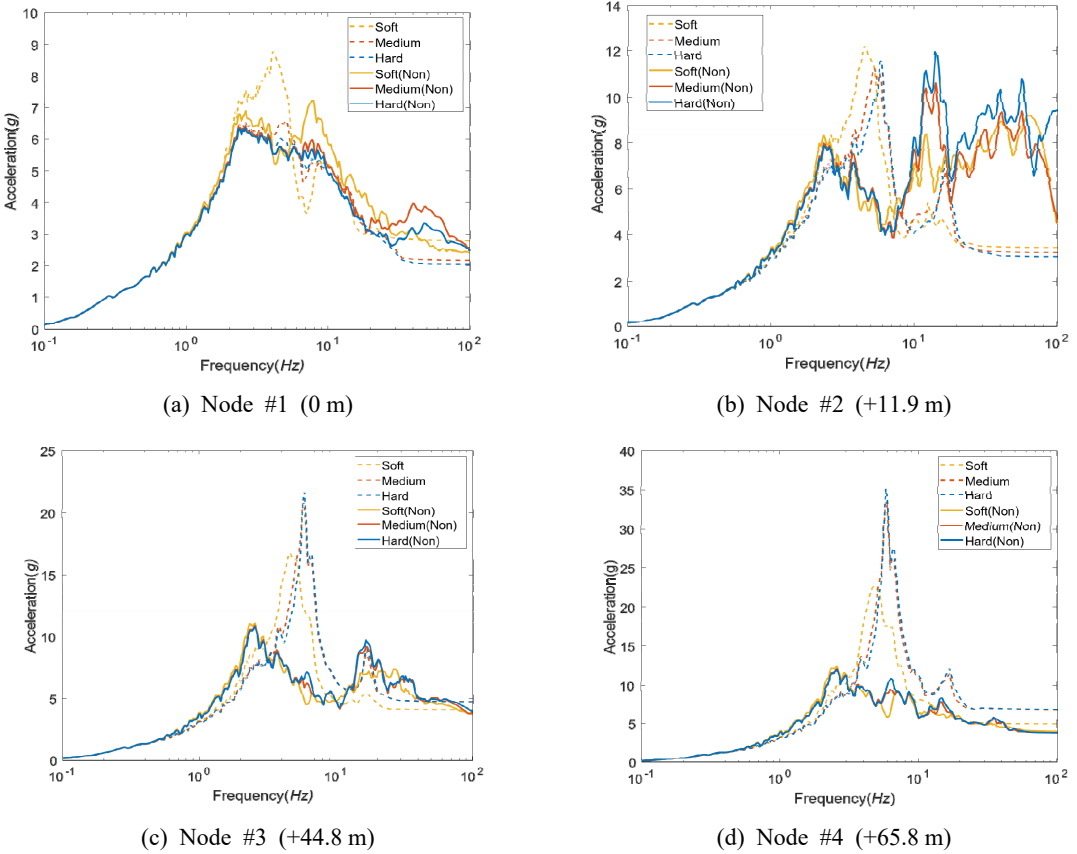


Fig. 11 In-structure response spectrum (PGA = 2.0 g)

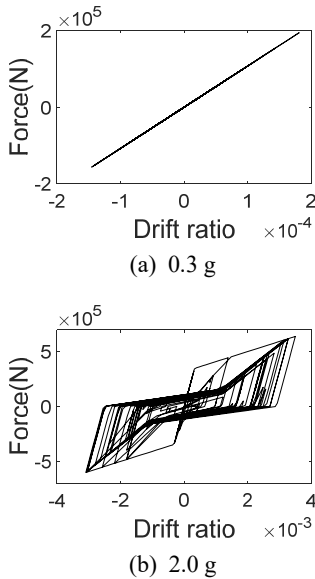


Fig. 12 Force-drift ratio curve (bottom element)

로 거동해 고진동수 대역에서의 응답 증폭은 나타나지 않았다. 구조물의 모든 절점에서 지반 종류에 따른 약간의 응답 차이는 보였으나, 지반-구조물 상호작용에 의한 진동수 이동 등의 효과는 거의 나타나지 않았다.

Fig. 12는 지진 세기 별로 구조물의 하단부 요소의 force-drift ratio 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)의 경우 PGA = 0.3 g에 대한 결과로 구조물이 선형 범위 내에서 거동하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, PGA = 2.0 g인 Fig. 12(b)의 경우 해당 요소의 이력곡선에서 특성 저하 및 핀칭 현상을 확인할 수 있으며, 이를 통해 구조물이 크게 비선형으로 거동한 것으로 판단하였다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 지반-구조물 상호작용과 구조물 비선형성을 동시에 고려한 원전 격납건물의 지진 응답 해석 방법을 제안하였다. 진동수 의존적 특징을 갖는



지반을 효과적으로 고려하기 위해 진동수 영역의 임피던스 함수를 시간 영역의 임펄스 응답으로 변환하여 지진응답해석에 적용하였다. 전단벽으로 구성된 원전 격납건물의 비선형성을 고려하기 위해 IMK 이력모델을 통해 시간영역 지진응답해석을 수행하였다. 제안한 다중단계 방법을 통해 원전 격납건물의 취약도 평가를 위한 확률론적 지진응답해석을 단시간에 비교적 정확하게 수행할 수 있다.

이 논문에서는 제안 방법 검증을 위해 실제 원전 격납건물을 통한 지진응답해석을 수행하였다. 등가선형 부지응답 해석을 수행한 결과, 지반이 연약할수록 지진세기에 따라 지반의 임피던스가 변화하고 그에 따라 임펄스 응답도 변화하였다. 구조물의 층응답스펙트럼을 비교한 결과는 다음과 같다.

- 0.3 g의 지진세기 하에서는 구조물이 선형 범위 내에서 거동하였다. 이에 따라 선형 구조물모델과 비선형 구조물 모델에 대한 층응답스펙트럼 결과가 거의 동일하게 나타나는 것을 확인하였다. 지반이 연약함에 따라 지반-구조물 상호작용 효과가 최대응답진동수 이동 및 진폭 감소로 나타났다.

- 높은 PGA에서 구조물 하단부터 비선형 거동이 나타났다. 구조물의 강한 비선형 거동에 따라 선형/비선형 구조물 모델 사이의 결과가 크게 달라졌다. 비선형 모델 결과에서는 1차 고유진동수에서 최대 층응답을 나타내며 형성되던 피크가 나타나지 않고 2 Hz ~ 3 Hz에서 피크가 형성됐다. 구조물의 비선형 거동에 따른 강성 저하의 영향인 것으로 추론된다. 진폭 또한 현저히 감소하였으나 고진동수 대역에서는 응답이 선형 구조물 모델에 비해 증가했다. 선형 구조물 모델과 달리 지반에 따른 응답 차이는 크게 나타나지 않았다. 이 예제해석에서는 비선형모델의 비선형 거동이 지배적으로 나타남에 따라 지반에 따른 지반-구조물 상호작용 효과가 상쇄된 것으로 추정되며 관련하여 추후 연구가 요구된다.

따라서, 구조물의 비선형성과 지반-구조물 상호작용은 각각 구조물의 지진응답에 큰 영향을 미치는데, 이 두 영향이 완전히 독립적으로 나타난다고 볼 수 없으므로 구조물 비선형성과 지반-구조물 상호작용을 모두 고려해 지진 응답 해석을 수행하는 것이 필요하다.

또한, 이 연구에서 입력 하중으로 고려한 R.G. 1.60과 달리 고주파 성분의 크기가 큰 우리나라의 UHS(uniform hazard spectrum)를 고려한 해석 케이스에 다중단계방법

적용가능성에 대한 추후 연구가 요구된다.

## 후 기

이 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)(No. 20181510102410)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2022-00144425)을 받아 수행되었습니다.

## References

- (1) Kim, D., 2013, Dynamics of Structures, Goomi Book, Seoul, p. 779.
- (2) Wang, X., Zhou, Q., Zhu, K., Shi, L., Li, X. and Wang, H., 2017, Analysis of Seismic Soil-structure Interaction for a Nuclear Power Plant (HTR-10), Science and Technology of Nuclear Installations.
- (3) Lee, J. H., Kim, J. K. and Kim, J. H., 2016, Nonlinear Earthquake Response Analysis of a Soil-structure Interaction System Subjected to a Three-directional Ground Motion, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 29, No. 4, pp. 317~325.
- (4) Ho, C. U., Lee, J.-S. and Lee, J. Y., 2018, Response Analysis of Shear Structure Subjected to Ground Vibration using the Transfer Matrix Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 5, pp. 567~573.
- (5) Hashimoto, P. S., Jimenez-Chong, J. M., Nakaki, D. K. and Kennedy, R. P., 2019, Nonlinear Response of a Structure with Significant Soil-structure Interaction Effects for Application to Seismic Fragility Evaluation.
- (6) Gil, M., 2011, Development of SSI Model for Verification of Earthquake Response of Reactor Building Subjected to a Strong Earthquake, M.S. Thesis, Chungnam National University, Chungnam, p. 85.
- (7) Chen, S. S. and Shi, J. Y., 2013, Simple Models of Foundation-soil Interactions, International Journal of Engineering and Technology, Vol. 5, No. 5, p. 573.
- (8) Gulec, C. K. and Whittaker, A. S., 2009, Performance-based Assessment and Design of Squat Reinforced Concrete Shear Walls. Technical Report MCEER-09-0010.

(9) Ghiocel, D. M., 2018, ASCE 4-16 Standard-based Probabilistic Seismic SSI Analysis for Design-basis and Fragility Analysis.

(10) Nakamura, N., 2006, Improved Methods to Transform Frequency-dependent Complex Stiffness to Time Domain, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 8, pp. 1037~1050.

(11) Ibarra, L. F., Medina, R. A. and Krawinkler, H., 2005, Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 34, No. 12, pp. 1489~1511.

(12) KINS, 1994, Development of Soil-structure Interaction Analysis Method (II), Vol. 1, p. 486.

(13) Ghiocel, D. M., 2006, ACS SASSI Version 2.2- An Advanced Computational Software for System Analysis for Soil-structure Interaction; User Manuals, Technical Report, Rochester, New York.

(14) Kim, K. S. and Park, J., 2019, Effect of Bi-directional Loading on the Shear Strength of RC Shear Wall: Finite Element Analysis, In Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting.

(15) The Japan Electric Association (JEA), 1991, JEAG 4601-1991, Technical Guidelines for Aseismic Design of Nuclear Power Plants, Supplement (in Japanese).

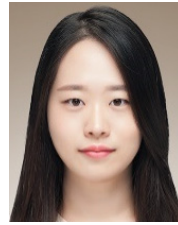
(16) Lee, J. I., Lee, J. Y., Hong, S. J., Park, J. Y., Ryu, Y. H. and Kim, M., 2011, Evaluation of Recirculation Sump Performance for OPR1000 Plant: Part I Debris Transport during the Blow-down Phase of LOCA.

*Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, No. 2-3, pp. 681~693.

(17) Jacekorea, 2015, Seismic Fragility and Analysis of Hanul Nuclear Power Plant, Report, Korea, c2015.

(18) KHNP, 2017, SSI Analysis Methodology and Results of NI Buildings, APR1400-E-S-NR-14003-P.

(19) USNRC, 2007, SRP 3.7.2 Seismic System Analysis, US Nuclear Regulatory Commission.



**Yuree Choi** received the M.S. degree in Civil and Environmental Engineering from KAIST with the topic related Soil-Structure Interaction Analysis of Nuclear Power Plant Structure. She is currently a Ph.D. student at the Department of Civil and Environmental Engineering of KAIST.



**Hyung-Jo Jung** received the B.S. degree in Mechanical Engineering from KAIST in 1993, M.S. and Ph.D. degrees in Civil Engineering from KAIST in 1995 and 1999, respectively. He is currently Professor of Department of Civil

Engineering and Environmental Engineering in KAIST. His research interests are structural control using smart materials, structural health monitoring, energy harvesting and bridge inspection using UAV.