

인공지능파를 활용한 시간이력 입력 생성에 따른 기기 내진 응답에 관한 연구

Study on Seismic Responses of Components According to Input Generation Methods Using Artificial Earthquake

라 치 웅* · 노 현 규* · 김 정 현* · 박 노 철†

Chi Woong Ra*, Hyungyu Roh*, Jeonghyun Kim* and No-cheol Park†

(Received Januray 23, 2024 ; Revised February 5, 2024 ; Accepted February 8, 2024)

Key Words : Components in Nuclear Power Plants(원전 기기), Seismic Analysis(내진해석), Time History Analysis(시간이력해석), Artificial Earthquake(인공지능) Independent Support Motion(독립적 지지대 가진)

ABSTRACT

In this study, our objective was to examine a time-history analysis method for simultaneously extracting the dynamic and static seismic responses of nuclear power plant (NPP) equipment. A finite element model of the reactor containment building (RCB) was constructed based on previous research to establish reference structural analysis responses. Additionally, we studied an alternative approach to the methodology presented in the previous regulatory guide, with a focus on time-historical input analysis. To generate a time-history seismic input, we specifically concentrated on creating time histories based on the spectrum-shaped inputs commonly used in the industry. To achieve this, we assessed the compliance of a self-developed MATLAB algorithm for artificial seismic wave generation with regulatory requirements. Subsequently, a seismic analysis was conducted in the time domain using uniform support motion and independent support motion. Furthermore, we proposed a method for generating inputs that reflected these features, and compared and evaluated it against other methods for generating structural analysis responses.

기 호 설 명

- A_n : n 번째 정현파의 크기
- $I(t)$: 가속도 형상 함수
- m_x, m_y : 전체 시간에 대한 x, y 의 평균값
- r : 시간이력 가속도 성분의 상관관계
- S_a : 중단 주파수에 대응하는 유사 가속도
- ω : 부착 구조물 주요 모드의 고유진동수
- ω_n : n 번째 정현파의 가진 주파수
- $x(i), y(i)$: 시간 i 일 때의 가속도 x, y

- $x(t)$: 인공지능파 변위
- $\ddot{x}(t)$: 인공지능파 가속도
- z_s : 유사 정적 변위
- ϕ_n : n 번째 정현파의 위상

1. 서 론

원자력발전소의 내진설계는 정해진 지진동을 초과하는 지진이 발생했을 때 지진동의 크기에 따라 발전

† Corresponding Author ; Member, Yonsei University, Professor
E-mail : pnch@yonsei.ac.kr

* Member, School of Mechanical Engineering, Yonsei University,
Student

‡ Recommended by Editor Do-Hyung Kim
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

소의 가동을 중지하거나 대응조치를 취하게 된다. 원자력 시설의 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기(structures, systems and components, SSCs)는 안전 등급으로 구분되며, 유한요소해석을 활용한 안전 해석을 통해 안전 등급의 재분류에 관한 연구가 현재까지도 진행되고 있다. 안전 기준을 설정 및 검증하기 위한 안전해석 방법론으로는 결정론적 방법론을 채택하며, 정해진 지진동 입력에 대한 SSCs의 안전 위험의 수준이 낮은 수준임을 입증하기 위해 보수적인 지진 입력을 생성하게 된다⁽¹⁾. 구체적으로 입력 지진동은 지반 특성을 고려하여 설계응답스펙트럼(design response spectrum, DRS)을 포괄하도록 생성한다. 더불어 계통 및 기기의 내진해석의 입력으로 활용되는 층응답스펙트럼(floor response spectra, FRS)은 스펙트럼 국부 최대값의 평활화를 통해 입력이 생성된다. 따라서 기기 단독에 대한 내진 해석은 입력 생성과정에서 보수성을 지니게 된다.

그 중에서도 다중 지지점을 지닌 기기의 실제 응답은 지지대간 상대변위가 발생함과 동시에 지진 자체의 관성 하중이 작용하게 된다. 지진하중에 의한 기기의 건전성 분석은 두 응답을 포함하여 분석되어야 하며, 입력 지진의 형태는 구조물에 대한 동적 해석으로부터 생성되는 FRS를 기반으로 구조해석이 수행된다⁽²⁾. 구조해석의 한 방법으로 기기에 가해지는 관성 응답을 독립적으로 분석하고자 지지점을 갖는 모든 FRS를 포괄하는 포괄응답스펙트럼으로 가진을 수행하는 USM(uniform support motion) 방법에 대해서 제안하며, 정적 응답에 해당하는 지지대간 상대변위인 SAM(seismic anchor motion)은 가장 불리한 경우로 조합한다. 이처럼 가장 불리한 조건으로 계산되는 정적 응답과 앞선 관성 응답 간의 조합으로 인해 보수적인 평가 결과를 가져올 수 있음을 미국 원자력 규제위원회 Standard Review Plan 3.7.1.에서도 제시하고 있다⁽³⁾. 나아가 과도한 보수적 가진 방법에 대한 대안으로, 지지대 간 독립적인 입력을 수행함으로써 관성 응답과 정적 응답이 동시적으로 연산되는 ISM(independent support motion)방법으로 가진하는 방법을 제시하고 있다.

이 논문에서는 미국 원자력 규제위원회에서 제시한 응답스펙트럼 해석으로 제시된 방법론에 대하여, 시간이력해석을 통해 분석하는 방안에 대한 고찰을 수행하였다. 구체적으로 기존의 산업계에서 주로 활

용되는 스펙트럼 형태의 입력을 기반으로 시간이력을 생성하기 위하여 알고리즘을 활용한 인공지진과 생성을 검토하였다. 더불어 건물 시간이력해석의 결과에 해당하는 기기에 입력하는 가진 데이터의 생성 방법에 대하여 분류하였으며, 각 가진 방법에 대한 기기 응답의 차이를 분석하고자 한다. 더불어 1차 급힘 모드로 거동하는 대상 건물의 특징을 반영하여 입력을 생성하는 방법을 제안하였으며, 이를 기존의 가진 방법과 비교 및 검토를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 유한요소 모델 구축 및 지진입력의 생성

지진 입력 생성의 방법은 응답스펙트럼을 기반으로 생성된 인공지진과, 그리고 격납건물 구조해석으로부터 도출되는 시간 이력으로 구분하였다. 대상 기기는 높이 차이를 지니는 지지대를 지니며, 안전 등급이 높은 밀폐관으로 선정하였다.

(1) 인공지진과 생성

이 논문에서는 정현과 주기함수의 합을 통해 지진 입력 $\ddot{x}(t)$ 를 식 (1)과 같이 생성하였다⁽⁴⁾.

$$\ddot{x}(t) = \sum I(t) A_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \quad (1)$$

여기서 ω_n 과 ϕ_n 은 개별 정현과 함수의 진동수와 위상을 나타내며 A_n 은 개별 정현과 함수의 크기, 그리고 $I(t)$ 는 정현과 신호의 형상을 결정하는 형상 함수를 나타낸다. 신호 생성의 목적은 기존에 주어진 응답스펙트럼인 참조 응답 스펙트럼(reference response spectrum, RRS)에 대해 실시간으로 생성되는 인공지진과의 응답 스펙트럼(current response spectrum, CRS)과의 일치 여부를 비교한다. 이 논문에서는 A_n 의 크기, 그리고 ϕ_n 의 크기를 $-\pi$ 부터 π rad 사이의 무작위로 위상을 갖는 알고리즘을 통해 인공지진과 생성된 응답스펙트럼을 일치시켰다. 구체적으로 모든 주파수 대역에서 RRS에 대한 CRS의 비율이 0.9와 1.3 이내로 유효함을 확인하였으며, 더불어 생성된 시간이력의 비보수성을 회피하도록 RRS에 대한 CRS의 비율이 0.9와 1.0 이내에 있는 주파수가 규제에 제시된 5개보다 작은 3개 이내로 도출되도록 알고리즘을 생성하였다.

Table 1은 미국 원자력 규제 위원회 Regulatory Guide 1.60에⁽⁵⁾ 제시된 설계응답스펙트럼에 대하여 규제 조건의 만족 여부를 비교한 표에 해당하며, Fig. 1은 생성된 인공지진파의 시간이력과 응답스펙트럼에 해당한다. Table 1과 같이, 방향별로 생성된 각 인공지진에 대하여, arias intensity로 제시되는 에너지 기반의 강진 지속시간에 대하여 규제에서 제시된 6초를 초과함을 통해 작성된 알고리즘이 비보수성을 회피함을 검토하였다. 더불어 건물에 인가되는 입력은 7개 지진파 set 중에서 평균값에 가장 근접하는 지진파인 첫 번째와 두 번째의 수평 성분의 입력과 첫 번째의 수직 성분으로 건물에 대한 입력을 수행하였다. 구체적으로 첫 번째의 수평 방향은 EW(east-west), 두 번째의 수평 방향은 NS(north-west) 그리고 수직 방향

성분은 VT(vertical)방향으로 선정하였다. 또한 생성된 인공지진파는 각 축 방향에 대한 상관계수에 대한 검증이 요구되며, 비교하고자 하는 두 방향 성분인 x, y 에 대한 상관계수 r 은 식 (2)와 같다.

$$r = \frac{\sum_i [(x(i) - mx)(y(i) - my)]}{\sqrt{\left[\sum_i (x(i) - mx)^2\right] \left[\sum_i (y(i) - my)^2\right]}} \quad (2)$$

VT 방향에 대하여 EW 방향과 NS 방향의 상관계수의 절대값, 그리고 EW 및 NS 방향 간의 상관계수의 절대값은 순서대로 0.115, 0.017, 0.109이다. 이와 같이 규제 기준으로 제시된 0.16보다 모두 작은 값을 지니므로, 생성된 인공지진파의 적절성을 이 절을 통하여 검토하였다.

Table 1 Requirements of artificial seismic waves

Artificial seismic wave set	Strong motion duration [sec]	
	Horizontal	Vertical
ver. 1	10.050	10.285
ver. 2	9.820	10.000
ver. 3	10.240	10.150
ver. 4	10.100	10.225
ver. 5	8.830	10.205
ver. 6	10.465	9.430
ver. 7	10.215	9.830

(2) 격납건물 및 대상 기기의 유한요소 모델의 구축 건물해석을 통해 도출되는 시간이력을 기기에 입력하고자 이 논문에서는 건물해석에 대한 유한요소 모델을 확보하고자 한다. 건물에 대한 유한요소 모델의 구축은 선행 연구에서 제시된 모델을 기반으로 Fig. 2(a)와 같이 3차원 요소로 생성하였다⁽⁶⁾. 재료 물성의 입력은 탄성계수 30 GPa, 푸아송비 0.17, 그리고 밀도는 24.0 kN/m³을 입력하였다. 더불어 Table 2와 같이, 선행 연구에서 제시한 모드들을 기준으로 최대 3.57% 차이를 지니는 유한요소 모델을 구축하였다.

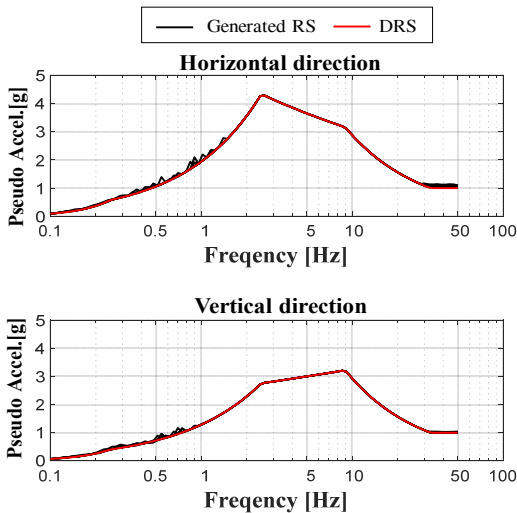


Fig. 1 Generated seismic wave sets with respect to design response spectrum

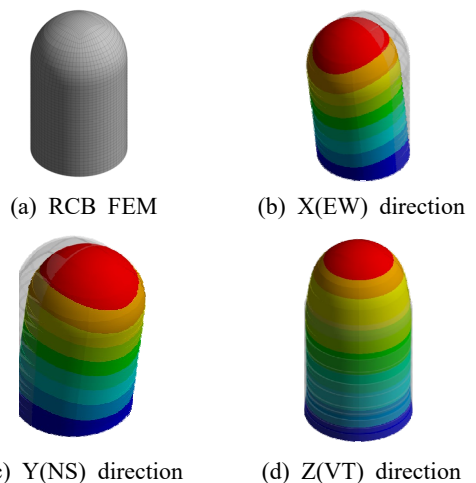


Fig. 2 Reactor containment building FE model and each directional main mode

이 연구에서 격납건물에 부착된 기기는 밀림관으로 가정하였다. 밀림관은 외경 330.2 mm 그리고 두께는 33 mm의 비교적 두꺼운 배관에 해당하는 것이 특징적이다. 이 분석에서는 상용 유한요소해석인 ANSYS Workbench 2022R2의 과도해석을 적용하였다. 더불어 대상 기기의 취약 지점으로 예상되는 곡관과 연결되는 직관 일부에 해당하는 천이 구간을 3차원 요소로 적용한 복합 요소 기반으로 유한요소 모델을

을 구축하였다. 대상 기기의 재료는 SA312 TP316의 스테인리스강 시편으로 구성된다. 이 분석에서는 입력 생성에 따른 응답 차이를 고찰하는 것을 목적으로 하기에, 양단의 6 자유도 구속조건 이외의 지지대에 대해서는 생략하였다. 양단 지지대의 높이 차이는 4.84 m (≈ 15.9 ft)이며, 입력한 재료 물성에 대하여 밀도는 7800 kg/m³이며, 영률과 푸아송비는 각각 175.4 GPa과 0.31에 해당한다.

2.2 기기 구조해석의 조건

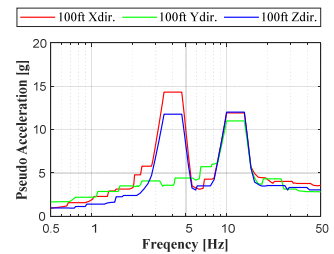
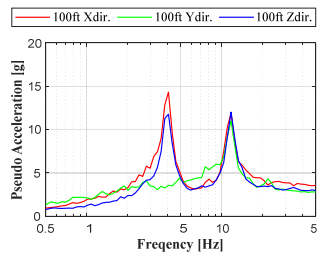
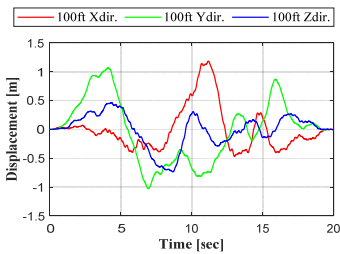
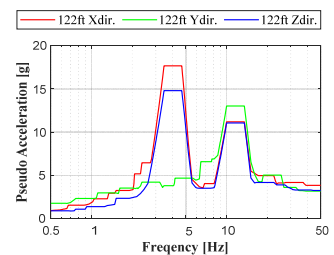
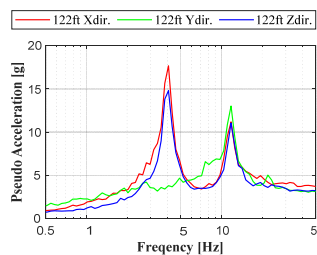
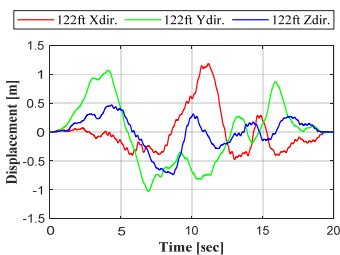
이 논문에서는 가진 방법 자체가 지나는 응답의 보수성을 검토하고자 입력 생성의 방법을 기준으로 비교군을 생성하였으며, 이때 모든 구조해석의 입력은 시간이력해석으로 수행되었다.

(1) 참조 구조해석 조건

기기가 부착되는 건물인 격납건물의 과도해석으로부터 생성되는 시간이력 데이터를 직접 입력하는 구조해석 케이스를 이 논문에서는 참조 구조해석 케이스로 선정하였다. 선행 연구를 통해 지점마다 다른 파형을 인가하는 다지점 가진 방법론에 대하여 응답의 정합성을 검토하였으며⁽⁷⁾, 이 분석에서는 ISM 분석 수행을 위해 Fig. 3(a)에 해당하는 변위 입력을 수행하였다. 구체적으로 37.2 m(122 ft)에 해당하는 건물 높이의 응답

Table 2 Natural frequencies of constructed reactor containment building finite element model

Model Mode	Previous research [Hz]	Constructed FEM [Hz]	Diff.
1st	3.97	3.97	-0.0126 %
2nd	3.97	3.97	-0.0151 %
3rd	5.39	5.24	2.80 %
4th	5.39	5.24	2.79 %
5th	6.35	6.22	1.98 %
6th	6.35	6.22	1.98 %
7th	6.82	6.58	3.57 %
8th	6.82	6.58	3.56 %
9th	8.5	8.5	0.0176 %
17th	11.9	11.8	0.743 %



(a) Time history displacement

(b) Response spectra

(c) Generated floor response spectra

Fig. 3 Floor response spectra from seismic analysis of reactor containment building

을 배관 구조물 상단에 입력하였으며, 30.5 m(100 ft) 높이에 해당하는 건물 응답을 배관 구조물 하단에 입력하였다.

Fig. 4는 참조 구조해석 조건에 대한 최대응력 결과에 해당한다. 특징적으로 6 자유도를 모두 구속한 경

계조건 인근의 곡관에서 그 응답이 두드러짐을 확인하였으며, 등가 응력 기반 최대 약 243 MPa의 응답이 도출됨을 검토하였다. 더불어 등가 응력을 기반으로 가장 취약한 상위 지점 4개 지점을 선정하였으며, 다른 가진 방법에 따른 응답 비교는 해당 4개 지점에 대한 응력 결과를 비교하고자 한다.

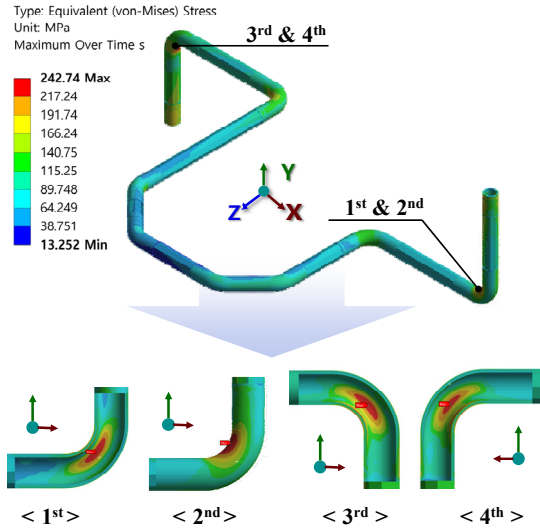
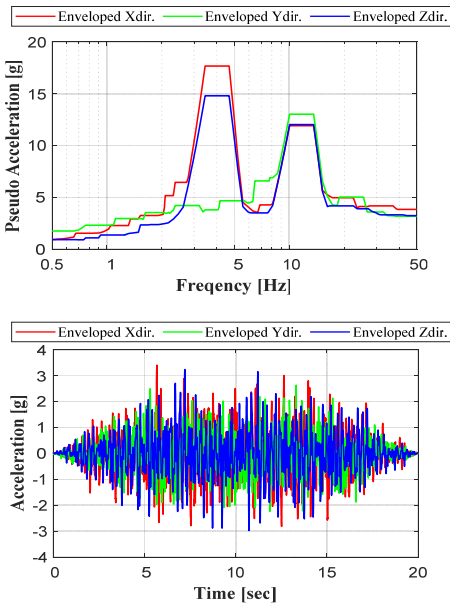


Fig. 4 Results of the reference analysis case based on equivalent stress and vulnerable locations

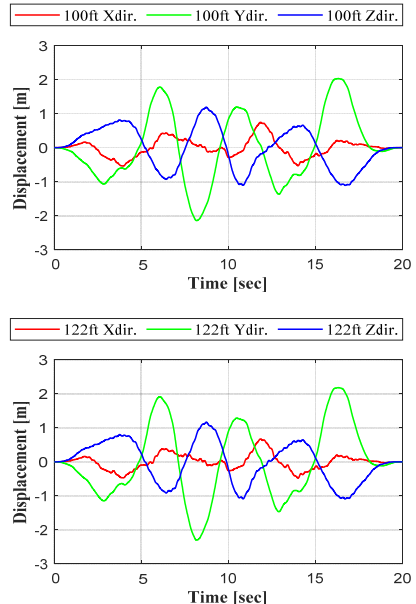
(2) USM 가진 방법을 통한 구조해석

이 절에서는 USM 가진 방법에 대한 기기 응답을 분석하고자 한다. 건물해석으로부터 도출되는 가속도 이력을 활용하였으며, Fig. 3(b)와 같이 30.5 m와 37.2 m 두 개의 높이의 가속도 응답으로부터, 미국 원자력 규제 위원회 regulatory guide 1.122에서⁽⁸⁾ 제시된 peak broadening 및 smoothing 과정을 수행하여 Fig. 3(c)와 같이 FRS를 생성하였다. 그 이후, 각 주파수 성분에 대하여 더 큰 값을 취하도록 응답스펙트럼을 포괄하여 동하중에 의한 입력을 생성하였다. 최종적으로 USM 분석을 위한 포괄스펙트럼을 기반으로 생성한 시간이력은 Fig. 5(a)와 같다.

더불어 실제 지진이 발생했을 때의 기기의 응답은 지지대 간의 상대 변위가 발생하는 정적 응답을 포함한다. 따라서 해당 정적 하중인 SAM 하중이 USM 분석



(a) USM analysis



(b) Proposed ISM analysis

Fig. 5 Seismic input for USM and proposed ISM analysis

에 조합되어야 한다. 이 연구에서는 층높이에 해당하는 FRS를 기반으로 각 방향 지시대 간의 절대 변위 z_s 를 도출하였다. 이때 절대 변위는 Wang과⁹⁾ Subudhi and Bezler가¹⁰⁾ 언급한 식 (3)을 통해 도출하였다.

$$z_s = S_a / \omega^2 \tag{3}$$

여기서 S_a 는 중단 주파수에 해당하는 가속도로 이 분석에서는 50 Hz에 대응하는 가속도 값을 적용하였다. 또한 ω 는 기기가 부착된 구조물의 기본 고유진동수에 해당한다. 이 분석에서는 Fig. 2(b)~ Fig. 2(d)에 해당하는 방향별 주요 모드에 대한 고유진동수를 적용하였으며, 해당 모드의 고유진동수는 X, Y, Z 방향으로 각각 3.97 Hz, 11.67 Hz, 3.97 Hz에 해당한다. 따라서 식 (3)을 적용하여 계산된 준정적 변위는 Table 3과 같으며 X, Y, Z 방향별로 발생할 수 있는 지시대 간의 상대 변위 크기는 각각 0.186 m~4.585 m, 0.027 m~0.431 m, 0.143 m~3.895 m에 해당한다. USM 하중과 SAM 하중에 의한 조합은 이 분석에서는 적분점에서 연산되는 응력 성분의 합으로 연산하였다. 이 연구에서 SAM 분석은 단일 방향에 대하여 특정 상대 변위를 갖도록 기기가 인장·압축되는 정해석을 수

행하여 응답을 도출하였으며, 각 방향에 대한 응력의 선형 조합을 통해 세 방향을 모두 고려한 정적 응답을 도출하였다. 이 과정에서 각 절점에 대하여 USM 하중과 조합했을 때 가장 보수적인 응답이 나타나도록 세 방향에 대한 인장·압축 여부를 결정하였다.

(3) 제안된 FRS 기반 ISM 구조해석 방법

지시대 간 상대 변위인 SAM 분석 과정에서, 부착 건물의 주요 모드에 대한 고유진동수를 활용한다. 실제로 방향별 주요 모드는 Fig. 2(b)~ Fig. 2(d)와 같이 높이 차이가 달라도 동일한 위상의 모드 형상을 지닌다. 이 논문에서는 이러한 특징에 착안하여, 인공지진과 생성과정에서 동일한 위상을 활용함을 제안하고자 한다. 구체적으로 30.5 m 높이에 상응하는 인공지진파를 생성할 때, n 번째 정현파 생성 시의 위상 ϕ_n 을 37.2 m에 대응하는 인공지진파 생성 시 활용하는 방안을 제안한다. 세 방향에 대하여 위의 과정을 동일하게 수행하였으며, 생성된 지진 이력은 Fig. 5(b)와 같다.

2.3 기기 구조해석 결과 및 고찰

참조 구조해석, USM 가진을 통한 구조해석, 그리고 제안하는 ISM 가진을 통한 4개 취약 위치에 대한 결과는 Table 4와 같다. 이때 각 등가응력의 비교 결과는 참조 구조해석 케이스 결과 대비의 차이를 나타낸다.

USM 방법으로 가진한 구조해석 결과 값은 1st 그리고 2nd 취약 위치에서의 응답보다 큰 응력을 나타내지만, 이외 취약 위치에서는 비보수적인 응답을 도출한다. 이는 참조 구조해석과는 달리 SAM 응답이 조합되지 않았기에 나타나는 것으로 분석되며, 구체적으로 1st 그리고 2nd 위치는 오직 동하중에 의한 응답이 지배적인 것으로 판단한다. 다시 말해 USM

Table 3 Pseudo-static displacement for SAM analysis

Direction	Pseudo-static displacement	
	100 ft	122 ft
X	2.199 m	2.386 m
Y	0.202 m	0.229 m
Z	1.876 m	2.019 m

Table 4 Structural analysis results of the target nuclear component

Vulnerable location rank	Reference	USM		USM + SAM(1)		USM + SAM(2)		Proposed ISM	
	Equiv. stress [MPa]	Equiv. stress [MPa]	Diff.	Equiv. stress [MPa]	Diff.	Equiv. stress [MPa]	Diff.	Equiv. stress [MPa]	Diff.
1st	242.7	258.5	6.510 %	4751(+ + +)	1857 %	397.8(+ + +)	63.88 %	326.7	34.58 %
2nd	235.5	255.1	8.323 %	4661(+ + +)	1879 %	351.4(+ + +)	49.22 %	302.1	28.30 %
3rd	231.8	152.9	-34.05 %	3333(- + +)	1338 %	263.5(- + +)	13.68 %	261.2	12.68 %
4th	231.3	172.2	-25.59 %	3215(- - +)	1290 %	262.7(- - +)	13.56 %	271.2	17.23 %

Tensile/compressive loading is denoted by +/- and(***) represents each directional component(X, Y, Z)

가진 방법의 관성 응답만으로 취약 위치에 대한 보수적인 응답을 도출할 수 있음을 검토하였으며, 추가적으로 지지대 간 상대 변위인 SAM의 크기를 달리하여 아래의 두 케이스에 대한 추가적인 분석을 수행하였다.

(1) FRS를 통해 계산되는 준정적 절대 변위로 계산되는 최대 상대 변위의 크기 $\rightarrow (X, Y, Z) = (4.585 \text{ m}, 0.431 \text{ m}, 3.895 \text{ m})$

(2) FRS를 통해 계산되는 준정적 절대 변위로 계산되는 최소 상대 변위의 크기 $\rightarrow (X, Y, Z) = (0.187 \text{ m}, 0.027 \text{ m}, 0.143 \text{ m})$

USM+SAM(1) 구조해석 케이스의 결과는 참조 구조해석 결과 대비 최대 18배 수준에 해당하는 과도한 응답이 도출된다. 이러한 결과는 대상 기기 자체가 상대 변위에 의한 정적 응답이 지배적인 특징을 지니기에 나타나는 특징으로 판단하며, 실제로 가장 취약 위치에 대하여 SAM 단일 하중에 의한 응력의 크기는 조합된 응력의 약 97%에 해당하는 4595 MPa로 대부분의 응답을 차지한다.

다시 말해, 최대 상대 변위 값을 활용한 USM + SAM 분석의 경우는 참조 구조해석 케이스 대비 매우 큰 응답을 예측하는 분석 방법으로 판단한다. USM + SAM 분석 방법의 보수성을 정성적으로 판단하기 위하여 가장 작은 상대 변위 크기를 활용한 USM + SAM(2) 분석 방법의 경우에는 참조 구조해석 케이스 대비 응력 결과가 보수적이면서도 그 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 앞선 USM + SAM 분석 방법 두 번의 해석을 통해 응답 조합을 위한 후처리 과정이 필수적인 다른 구조해석 방법과는 달리, 취약 위치에 대한 결과를 바로 도출할 수 있다는 장점을 지닌다. 하지만 분석하는 대상 기기 및 구조물과 같이, 단일 건물에 부착되는 경우에 적용이 가능하다는 한계를 지닌다. 더불어 SAM에 대한 적용은 부착 건물뿐 아니라 연결된 기기 및 연결 분기관 헤드에 대한 상대 변위도 고려되어야 한다⁽¹¹⁾. 다양한 건물 또는 기기에 대한 SAM 응답의 조합에는 추가적인 검토가 필요하다.

3. 결 론

이 연구에서는 원전 기기의 동적 및 정적 내진응답을 동시에 도출하고자, 인공지진파를 활용한 시간이력 분석 방법에 대한 검토를 수행하였다. 참조가 되

는 구조해석 응답을 도출하고자 선행 연구를 기반으로 건물 유한요소 모델을 구축하였으며, 건물 구조해석 결과를 통해 원전 기기에 인가하는 하중의 형태를 다양한 방법으로 도출하였다. 이 연구를 통하여 분석된 내용은 다음과 같다.

(1) 시간이력으로 입력을 생성하고자 규제 조건을 만족하는 인공지진파 생성 방법을 검토하였다. 이를 통해 설계응답스펙트럼을 기반으로 격납건물에 인가하는 20 sec의 시간이력 하중을 생성하였다.

(2) 참조 구조해석의 입력은 선행 연구를 기반으로 격납건물의 3차원 유한요소 모델을 구축했으며, 이를 통해 원전 기기에 대한 하중 인가 지점인 두 높이의 시간이력 하중을 생성하였다. 나아가 피크 넓어짐 (peak broadening)을 통해 두 높이에 대한 FRS를 생성하였다.

(3) FRS를 인공지진파를 통해 높이에 대한 시간이력 하중으로 변환하였다. 이를 기반으로 시간 도메인에서의 USM 가진 시의 응답의 보수성을 검토하였다. 또한 계산된 상대 변위를 기반으로 SAM 분석을 수행하였다. 이를 통해 동적 및 정적 하중을 조합한 응답과 참조 구조해석 응답을 비교함으로써 USM 가진 방법의 보수성을 검토하였다.

(4) 준정적 절대 변위의 계산식에 착안하여, 각 높이에 대하여 동일한 위상을 적용한 ISM 가진 생성을 검토하였다. 이를 통해 USM 가진 방법 대비 참조 구조해석모델과 유사한 구조 응답이 도출됨을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20193110100020, 해외 내진 분석 기술기준을 적용한 표준형 원전 설계초과지진 대응 기술개발).

References

- (1) Korea Institute of Nuclear Safety, 2014, Safety Review Guidelines for Light Water Reactors, KINS/GEN001, Revision 4.
- (2) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1984, Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping

Review Committee, NUREG-1061, Vol. 4.

(3) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007, Seismic Design Parameters, NUREG-0800, Chapter 3, Section 3.7.1, Revision 3.

(4) Shin, G. and Song, O., 2016, A Time-domain Method to Generate Artificial Time History from a Given Reference Response Spectrum, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 48, No. 3, pp. 831~839.

(5) U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, 2014, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.60, Revision 2.

(6) Nguyen, D.-D., Thusa, B., Park, H., Azad, M. S. and Lee, T.-H., 2021, Efficiency of Various Structural Modeling Schemes on Evaluating Seismic Performance and Fragility of APR1400 Containment Building, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 53, No. 8, pp. 2696~2707.

(7) Ra, C. W., Lee, E.-H., Lee, C. K., Im, J. W. and Park, N.-C., 2021, A Study on Time History Analysis of Multi-support Excitement by Input Methods, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 31, No. 5, pp. 543~550.

(8) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1978, Development of Floor Design Response Spectra for Seismic Design of Floor-supported Equipment or Components, Regulatory Guide 1.122, Revision 1.

(9) Wang, Y. K., Subudhi, M. and Bezler, P., 1983, Comparison Study of Time History and Response Spectrum - Responses for Multiply Supported Piping Systems, BNL-NUREG-32628.

(10) Subudhi, M. and Bezler, P., 1985, Alternate Procedures for the Seismic Analysis of Multiply Supported Piping Systems, BNL-NUREG-36470.

(11) Korea Electric Power Corporation and Korea

Hydro & Nuclear Power, 2014, Design of Structures Systems Components and Equipment, APR1400 Design Control Document Tier 2, Chapter 3.



Chi Woong Ra is a graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include structural vibration, non-linear finite element analysis especially in NPP piping systems.



Hyungyu Roh is a graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include impact analysis, non-linear finite element analysis especially in canister which contains spent nuclear fuel.



Junghyun Kim is a graduate school student in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include structural vibration, fluid-structure interaction under seismic loads using finite element analysis especially in nuclear reactor assembly.



No-cheol Park serves as a professor in mechanical engineering at Yonsei University. His research interests include vibration, optics.