

<연구논문>

# Residual Vector를 이용한 시간이력해석의 잔여모드 응답 고려 방법

변창호<sup>\*,†</sup>·이한걸<sup>\*</sup>·김정용<sup>\*</sup>

## Consideration of residual mode response in time history analysis using residual vector

Chang Ho Byun<sup>\*,†</sup>, Han Geol Lee<sup>\*</sup> and Jung Yong Kim<sup>\*</sup>

(Received 19 November 2021, Revised 9 December 2021, Accepted 20 December 2021)

### ABSTRACT

The mode superposition time history analysis method is commonly used in a seismic analysis. The maximum response in the time history analysis can be derived by combining the responses of individual modes. The residual mode response is the response of the modes which are not considered in the time history analysis. In this paper, the residual vector method to consider the residual mode response in the time history analysis is introduced and evaluated. Seismic analyses for a sample structure model and a reactor vessel model are performed to evaluate the residual vector method. The analysis results show that residual mode response is well calculated when the residual vector method is used. It is confirmed that the residual vector method is useful and acceptable to consider the residual mode response in a seismic analysis of the nuclear power plant equipment.

**Key Words :** Time history analysis (시간이력해석), Residual mode response (잔여모드 응답), Mode superposition method (모드중첩법), Modal acceleration method (모드 가속도 방법), Residual vector (잔여벡터)

### 기호설명

t : Time  
m : Mass  
c : Damping constant  
k : Stiffness  
P : Force  
 $\omega$  : Natural Frequency  
 $\xi$  : Damping ratio  
x : Displacement  
 $\dot{x}$  : Velocity

$\ddot{x}$  : Acceleration  
 $\phi$  : Mode shape  
 $\gamma$  : Participation factor  
y : Modal displacement

### 1. 서 론

미국원자력규제위원회(U.S. NRC)의 안전심사지침 3.7.2<sup>(1)</sup>에서는 원자력발전소의 내진해석 시 응답스펙트럼해석, 등가정적해석, 시간이력해석 3가지 방법이 허용된다. 이중 시간영역의 시간이력해석에는 직접적분법과 모드중첩법이 이용된다. 모드중첩법은 운동방정식을 1자유도 방정식으로 비연계시켜 운동방정식을 풀기 때문에 직접적분법 대비 속도가 빠르다는 장점이 있다. 전산환경이 좋아지고는 있

† 책임저자, 회원, 한국전력기술 원자로설계개발단

E-mail : chbyun@kepc-co-enc.com

TEL : (042)820-4562 FAX : (042)863-4862

\* 한국전력기술 원자로설계개발단

지만 아직도 직접적분법을 이용한 시간이력해석에는 많은 시간이 소요되므로 다양한 해석에서 모드중첩법은 활용가치가 높다고 할 수 있다. 또한, 설계초과지진을 평가하기 위한 내진해석 모델은 상세한 솔리드 모델로 작성되므로 전체 모드를 해석에 고려하기는 어려우며 비효율적이다. 본 논문에서는 모드중첩법을 이용한 시간이력해석을 수행할 때 모든 모드에 대한 해석을 수행하지 않고 관심 범위의 모드만을 고려하여 해석을 수행한 후 잔여모드의 응답을 구할 수 있는 Residual Vector의 개념을 원자력발전소 내진해석에 적용하여 활용법을 살펴보았다. 본 연구의 해석에는 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS가 사용되었으며 Residual Vector를 이용한 원자력발전소 구조물의 내진해석을 통해 본 방법의 적절성 및 효과를 검증하고자 한다.

## 2. 시간이력해석 방법

### 2.1 직접적분법

본 연구에서 살펴볼 원자력발전소 내진해석에서의 시간이력해석 방법에는 직접적분법(Direct Integration Method)과 모드중첩법(Mode Superposition Method)이 있다. 직접적분법은 식 (1)의 동하중 운동방정식을 Implicit 또는 Explicit 방법 등과 같은 수치해석 방법을 이용하여 매시간 증분마다 수치적 적분을 하여 구조물의 응답을 산출하는 방법이다. 이 방법은 운동방정식을 축약하지 않고 해석하기 때문에 계산량이 많아 해석의 안정성을 위해 시간 증분을 작게 하면 해석 시간이 오래걸리는 단점이 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

### 2.2 모드중첩법

모드중첩법은 식 (1)로 표현되는 구조물의 운동방정식을 독립적인 모드별 방정식으로 분해(Decoupling)하여 해를 구하고, 이 해를 각 모드별 기여도(Participation factor)를 고려하여 중첩함으로써 구조물의 거동을 산출하는 방법이다. 모드중첩법은 각 모드별 1 자유도 방정식의 해를 구하여 대수합하므로 해석시간이 빠른 장점이 있다. 또한, ANSYS의 경우 복합모드감쇠값을 적용할 수 있으므로 서로 다른 구조감쇠를 갖는 구조물과 기기들이 연결된 원자력발전소 기기 내진해석에 적용이 용이하다.

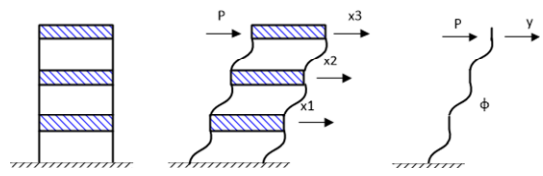


Fig. 1 Concept of Mode Superposition

구조물은 고유한 동적특성으로 각 모드별 고유진동수를 갖는다. 구조물의 각 자유도의 변위는 식 (2)와 같이 각 모드별 형상함수 $\{\phi\}$ 와 모달변위 $y(t)$ 의 곱으로 나타낼 수 있으며 식 (3)과 같이 물리적 좌표계의 변위를 자유도 수 만큼의 일반좌표계의 변위의 합으로 나타낼 수 있다. 식 (3)을 식 (1)에 적용하면 식 (4)와 같이 모드중첩법을 이용한 시간이력해를 구하는 방정식으로 변환할 수 있다<sup>(2)</sup>.

$$\{x(t)\} = \{\phi\}y(t) \quad (2)$$

$$\{x(t)\} = \{\phi_1\}y_1(t) + \dots + \{\phi_n\}y_n(t) = \sum_{i=1}^n \{\phi_i\}y_i(t) \quad (3)$$

$$[M] \sum \phi_i \ddot{y}_i(t) + [C] \sum \phi_i \dot{y}_i(t) + [K] \sum \phi_i y_i(t) = \{P(t)\} \quad (4)$$

식 (4)의 양변에 모드형상을 곱하면 식(5)와 같고,

$$\begin{aligned} \{\phi_j\}^T [M] \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} \ddot{y}_i + \{\phi_j\}^T [C] \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} \dot{y}_i + \\ \{\phi_j\}^T [K] \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} y_i = \{\phi_j\}^T \{P(t)\} \end{aligned} \quad (5)$$

모드형상을 질량행렬로 정규화하면 질량, 감쇠 및 강성행렬의 직교성(Orthogonality, 식 (6))으로 인하여 식 (7)과 같이 모드별 운동방정식으로 표현할 수 있다. 이때 감쇠행렬은 질량행렬과 강성행렬의 선형조합으로 가정한 비례감쇠행렬(Proportional Damping Matrix)이다.

$$\begin{aligned} \{\phi_j\}^T [M] \{\phi_i\} = 0, \{\phi_j\}^T [C] \{\phi_i\} = 0, \\ \{\phi_j\}^T [K] \{\phi_i\} = 0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\ddot{y}_i + c_i \dot{y}_i + k_i y_i = \phi_i^T P = p_i \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \xi_i = \frac{c_i}{c_c}, \quad c_c = 2\sqrt{k_i m_i}, \quad c_i = 2\xi_i \omega_i, \quad \omega_i = \sqrt{\frac{k_i}{m_i}} \\ \ddot{y}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i = -\{\phi_i\}^T [M] \{1\} \ddot{x}_g = -\gamma_i \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (8)$$

식 (7)에서 내진해석의 경우 외력을 지반가속도로 대체하면 식 (8)로 표현할 수 있고,  $\gamma_i = \{\phi_i\}^T [M] \{1\}$  는 기여도로서 각 모드의 가진력의 크기를 스케일링하는 역할을 한다. 각 모드별 응답을 Newmark time integration 방법 등으로 산출한 후 중첩하여 각 자유도별 변위, 속도 및 가속도를 식 (9)과 같이 산출하는 방법이 모드중첩법을 이용한 시간이력해석이다.

$$\{x\} = \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} y_i \quad \{\dot{x}\} = \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} \dot{y}_i \quad \{\ddot{x}\} = \sum_{i=1}^n \{\phi_i\} \ddot{y}_i \quad (9)$$

### 3. 시간이력해석에서의 잔여모드 응답 고려

#### 3.1 모드중첩법에서의 잔여모드 응답

모드중첩법으로 해를 구할 때 모든 모드를 고려하지 않고 k번째 모드까지 고려했을 때는 k+1번째 모드 이후의 응답(식 (10)의 우변 두 번째 항)은 누락되게 된다.

$$\{x\} = \sum_{i=1}^k \{\phi_i\} y_i + \sum_{j=k+1}^n \{\phi_j\} y_j \quad (10)$$

미국원자력규제위원회(U.S.NRC)의 규제지침서 (RG) 1.92<sup>(3)</sup>의 개정2 이후의 최신판에서는 응답스펙트럼해석이나 모드중첩법에 의한 시간이력해석 시 모든 모드의 영향을 고려하도록 요구하고 있다. 내진해석의 경우 차단진동수까지의 모드를 해석에 고려한 후 Missing mass method를 이용한 고진동수 구간의 잔여모드 응답을 산출하도록 추천하고 있다. Missing mass method는 자유도별 잔여질량 fraction 산출 후 영주기가속도를 이용한 정적해석을 통하여 산출한 정적응답을 일부 모드만 고려한 내진해석 결과에 절대합으로 더해주는 방법이다.

#### 3.2 Mode Acceleration Method

만약 Mode Acceleration Method로 식 (1)을 표현하기 위해 가속도와 속도식으로 대체하면 식 (11)와 같이 되며 변위를 구하면 식 (12)과 같이 된다.<sup>(4)</sup> 식 (12)의  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 를 정리하면 식 (13)과 같이 된다.

$$[M] \sum_{i=1}^k \{\phi_i\} \ddot{y}_i + [C] \sum_{i=1}^k \{\phi_i\} \dot{y}_i + [K] \{x\} = \{P\} \quad (11)$$

$$\{x\} = [K]^{-1} \left( \{P\} - [M] \sum_{i=1}^k \{\phi_i\} \ddot{y}_i - [C] \sum_{i=1}^k \{\phi_i\} \dot{y}_i \right) \quad (12)$$

$$\{x\} = [K]^{-1} \{P\} - \sum_{i=1}^k \frac{\{\phi_i\}}{\omega_i^2} \ddot{y}_i - \sum_{i=1}^k \frac{2\xi}{\omega} \{\phi_i\} \dot{y}_i \quad (13)$$

식 (7)에서  $\ddot{y}_i = \phi_i^T \{P\} - 2\xi\omega\dot{y}_i - \omega_i^2 y_i$ 를 식 (13)에 입력하면 식 (14)와 같고, 감쇠항을 소거하면 식 (15)와 같이 정리된 식이 된다.

$$\{x\} = [K]^{-1} \{P\} - \sum_{i=1}^k \frac{\{\phi_i\}}{\omega_i^2} (\phi_i^T \{P\} - 2\xi\omega\dot{y}_i - \omega_i^2 y_i) - \sum_{i=1}^k \frac{2\xi}{\omega} \{\phi_i\} \dot{y}_i \quad (14)$$

$$\{x\} = \sum_{i=1}^k \{\phi_i\} y_i + \left( [K]^{-1} - \sum_{i=1}^k \frac{\{\phi_i\} \{\phi_i\}^T}{\omega_i^2} \right) \{P\} \quad (15)$$

식(10)와 비교했을 때 해석에서 고려하지 않은 k+1번째 모드 이후의 응답을 해석에서 고려한 성분으로 나타낼 수 있다<sup>(4)</sup>.

모드중첩법을 이용한 해석 시 모든 모드를 고려했다면 식 (15)에서 괄호항은 0이 되고 해석에서 고려한 모드와 고려하지 않은 모드로 분리한 식 (16)을 식 (15)에 대입하면 식 (17)과 같이 잔여모드의 응답을 구할 수 있게 된다.

$$[K]^{-1} - \sum_{i=1}^k \frac{\{\phi_i\} \{\phi_i\}^T}{\omega_i^2} = \sum_{i=k+1}^n \frac{\{\phi_i\} \{\phi_i\}^T}{\omega_i^2} \quad (16)$$

$$\{x\} = \sum_{i=1}^k \{\phi_i\} y_i + \widetilde{K}^{-1} \{P\} \quad (17)$$

이때,  $\widetilde{K}^{-1} = K^{-1} - \sum_{i=1}^k \frac{\{\phi_i\} \{\phi_i\}^T}{\omega_i^2}$  이다<sup>(5)</sup>.

식 (17)의  $\widetilde{K}^{-1} \{P\}$ 를 Correction Vector라고 하기도 하고<sup>(5)</sup>, 구조해석 프로그램 ANSYS에서는 Residual Vector라고 표기하고 Residual Vector를 이용하는 방법을 Residual Vector Method라고 한다<sup>(6)</sup>. 산출한 Residual Vector를 질량행렬에 대해 정규화하여 추가되는 모드로 해석에 적용하면 모드중첩법을 이용한 시간이력 해석에서 해석에 고려하지 않은 잔여모드에 대한 응답을 산출할 수 있게 된다.

### 4. Residual Vector를 이용한 시간이력해석

#### 4.1 내진해석에서의 적용성 평가

내진해석에서 적용성 평가를 위해 Fig. 2와 같이 잔여질량에 의한 고진동수 응답의 영향을 많이 받는 고진동수 지지대를 갖는 가상의 구조물을 모델링하여 적용성 평가를 수행하였다.

모델링된 구조물은 5개의 요소와 5개의 질량점으로 구성되어있다. 모델링된 구조물의 모드해석 결과는 Table 1과 같다.

입력 지진파의 가속도시간이력은 Fig. 3(a)와 같이 El Centro NS(1940)<sup>(7)</sup>를 적용하였다. 입력 지진파의 가속도 응답스펙트럼은 Fig. 3(b)와 같이 약 30 Hz 이상에는 가속도값이 영주기가속도로 수렴하여 내진해석 시 차단진동수(Cutoff Frequency)는 30 Hz로 가정하였다.

가진 방법은 내진해석에 주로 이용되는 3가지 가진 방법인 절점에 Force 가진, 가속도 가진, 대질점(Bigmass) 방법을 적용하였고 각 방법에 대해 Residual Vector Method를 적용하여 동일한 결과가 산출되는지 평가하였다.

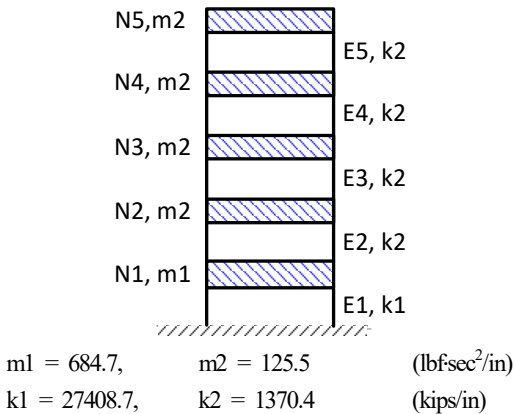
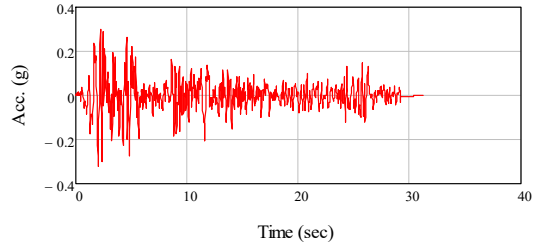


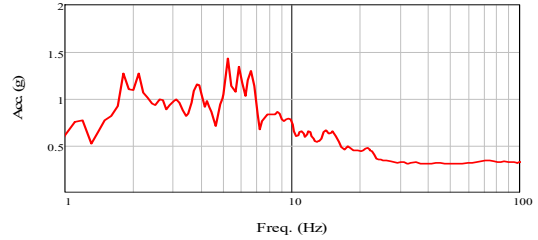
Fig. 2 Sample Structure

Table 1 Modal analysis results of sample structure

Mode	Freq. (Hz)	Effective Mass (lbf)
1	5.7	185976.6
2	16.4	28490.9
3	25.2	20718.1
4	30.9	36700.0
5	33.2	186675.6



(a) Acceleration Time History



(b) Response Spectrum

Fig. 3 Acceleration Time History from El Centro earthquake, May 18, 1940 (NS component)

절점에 Force 가진시 Residual Vector를 산출하기 위한 하중벡터는 절점의 질량비와 동일하게 입력하였다. 해석결과는 Table 2와 같다. 해석 경우에는 모드중첩법으로 5개 모든 모드 고려, 차단진동수 이하 3개 모드 고려, 3개의 모드와 Residual Vector 이렇게 세 가지 경우를 평가하였다. Force로 가진했을 때 모든 모드를 고려한 내진해석과 3개 모드를 모드중첩법에 고려하고 잔여 모드를 Residual Vector로 고려하여 해석을 수행한 결과 하중은 동일한 결과를 보였다. 하지만, 3개의 모드 만 고려한 경우는 지지물 요소(E1)의 하중이 작게 평가 되었다.

가속도 가진 시 ANSYS의 ACCEL 명령어를 이용하여 단위가속도를 가하여 하중벡터를 생성한다. 해석 결과는 Table 3과 같다. 해석 종류는 모드중첩법으로 모든 모드를 고려한 경우와 차단진동수 이하의 3개 모드와 Residual Vector를 고려한 경우 이렇게 두 가지 경우를 평가하였다. 해석결과는 Force 가진과 동일한 결과를 보인다.

대질점 방법으로 가진했을 때 결과는 Table 4와 같다. 대질점 방법에서는 대질점에만 하중벡터를 생성한다. 대질점의 추가로 인해 추가되는 모드는 해석 구조물의 고유진동수와 충분히 격리되도록 충분히 큰 질량을 입력한다. 해석 종류는 모드중첩법으로 5개 모든 모드를 고려한 경우와 차단진동수 이

하의 3개 모드와 Residual Vector를 고려한 경우 이렇게 두 가지 경우를 평가하였다. 해석결과는 Force 가진과 동일한 결과를 보인다.

내진해석에 주로 이용되는 세 가지 가진 방법인 절점에 Force 가진, 가속도 가진, 대질점(Bigmass) 방법 그리고 각 방법에 대해 Residual Vector를 적용하여 동일한 해석 결과가 산출되는 것을 확인하였다. Fig. 4는 모든 모드를 고려한 경우, 차단진동수 이하의 3개 모드만 고려한 경우, 3개 모드와 Residual Vector를 적용한 경우의 노드 N1과 노드 N2의 응답스펙트럼을 산출하여 비교한 결과이다.

Fig. 4(a)는 N1 노드에서 산출한 응답스펙트럼 결과이다. 모든 모드를 고려한 결과와 3개 모드와 Residual Vector를 고려한 결과는 비슷한 응답을 보였지만, 3개의 모드만 고려한 경우의 응답은 고진동수 구간에서 작게 산출된 것을 확인할 수 있다. 이것은 지지물의 응답에 유효 질량이 큰 5차 모드가 큰 영향을 차지하고 있지만, 해석 시 3차 모드까지 고려되어 이후 모드가 누락되어 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

**Table 2** Seismic Analysis Result - Force Excitation

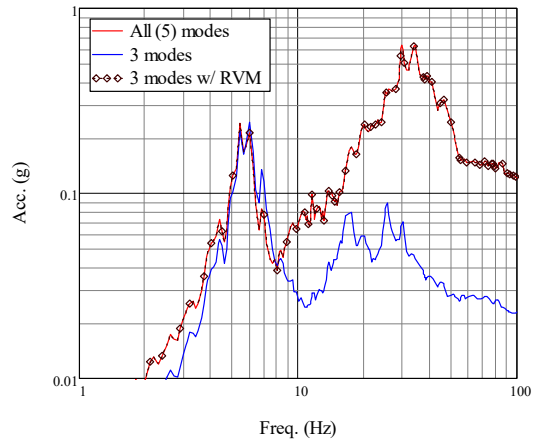
Force (lbf) Case	E1	E2	E3	E4	E5
5 modes (All modes)	192	157	131	93	50
3 modes	166	158	131	93	50
3 modes with Residual Vector	191	157	131	93	50

**Table 3** Seismic Analysis Result - Acceleration Excitation

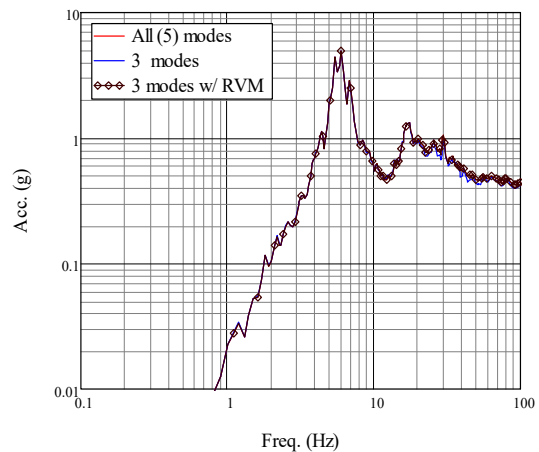
Force (lbf) Case	E1	E2	E3	E4	E5
5 modes (All modes)	192	157	131	93	50
3 modes with Residual Vector	191	157	131	93	50

**Table 4** Seismic Analysis Result - Bigmass Excitation

Force (lbf) Case	E1	E2	E3	E4	E5
5 modes (All modes)	192	157	131	93	50
3 modes with Residual Vector	191	157	131	93	50



(a) Response Spectra at N1



(b) Response Spectra at N2

**Fig. 4** Response Spectra Result

Fig. 4(b)는 N2 노드에서 산출한 응답스펙트럼 결과이다. 세 가지 경우 모두 비슷한 응답스펙트럼을 보였다.

#### 4.2 원자력발전소 기기에 대한 적용성 평가

원자력발전소 기기에 대한 평가를 위해 보요소와 솔리드요소를 함께 적용한 원자로용기 모델을 작성하였다. 원자로용기는 2개의 고온관 노즐과 4개의 저온관 노즐이 측면에 부착되어있고, 저온관 노즐 하부에 부착된 기둥 형태의 지지물이 건물에 연결되어 원자로용기를 지지한다.

일반적인 원자력발전소 기기 내진해석에서는 단순화된 보요소 모델을 이용하여 내진해석을 수행한다<sup>(8)</sup>. 하지만 설계초과지진을 평가하기 위한 내진해

석 모델은 취약부의 응력분포 평가를 위해 솔리드 모델과 보요소 모델을 조합한 복합요소 모델을 사용하여 내진해석을 수행하였다.

원자력발전소 기기 내진해석 적용성 평가를 위해 Fig. 5(b)와 같이 솔리드모델과 보요소 모델을 적용한 복합요소 원자로용기 모델을 작성하였다. 적용성 평가용 원자로용기 모델의 경계조건으로, 원자로용기 기둥지지대 바닥과 상부 수평 지지대를 구속하고 원자로용기 입/출구 노즐 끝단은 자유단으로 설정하였다.

원자로용기 모델 작성을 위해 Fig. 5(a)와 같이 원자로용기 솔리드 모델을 작성하였고 응력 집중이 예상되는 노즐 및 키 구조물과 같은 취약부는 국부적인 변형을 모사할 수 있도록 솔리드 모델을 유지하고 취약부가 아닌 지지물과 원자로용기 셸은 보요소 모델과 집중질량으로 구성하여 솔리드, 보요소 모델로 구성된 복합요소 모델을 작성하였다.

Fig. 5의 솔리드 모델과 복합요소 모델은 고유진동수가 3% 이내의 차이를 보이는 동특성이 잘 일치하는 모델이다.

완성된 복합요소 모델은 Fig. 5 (b)와 같다. 솔리드 요소를 보요소로 대체한 복합요소 모델은 솔리드 모델 대비 요소 수를 약 50% 수준으로 감소시켜 해석 시간이 짧고 취약부의 응력 및 국부적인 변형 형상을 확인할 수 있다.

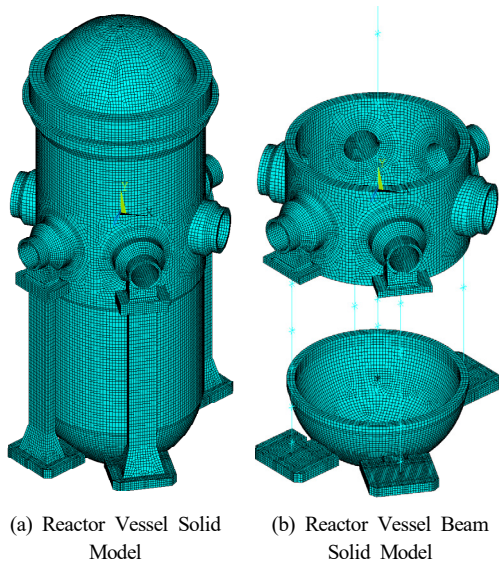


Fig. 5 Reactor Vessel Model

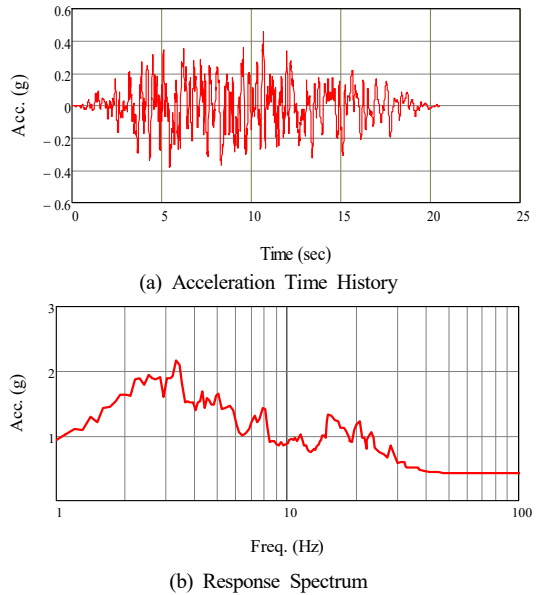


Fig. 6 Acceleration Time History for Reactor Vessel Evaluation (NS dir.)

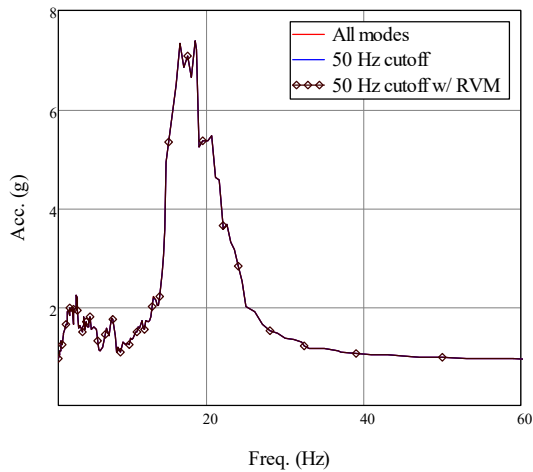
지진하중으로는 설계초과지진 평가용 지진하중으로 지반최대가속도 0.4g 병진 3방향의 가속도시간이력이 사용되었다. Fig. 6은 발전소 남북방향 가속도시간이력과 응답스펙트럼이다. Fig. 6(b)와 같이 차단진동수는 50 Hz이고 영주기가속도는 약 0.4g이다. 가진 방법은 대질점 방법을 적용하였다. 입력된 대질점과 원자로용기의 경계조건에 해당하는 지지물을 강체요소로 연결한 후 대질점에 하중 시간이력을 가하여 해석을 수행하였다.

해석 종류는 전체 유효질량의 97%에 해당하는 충분히 많은 모드를 고려하여 모드중첩법을 적용한 경우와 모드중첩법으로 50 Hz 이하의 모드만을 고려한 경우, 50 Hz 이하의 모드와 Residual Vector를 고려한 경우 세가지 경우를 평가하였다.

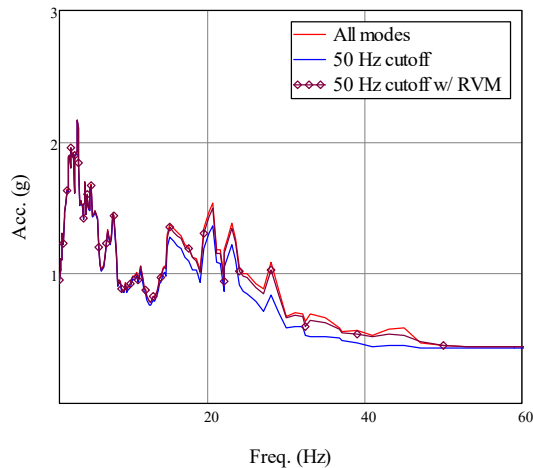
Table 5와 같이 원자로용기 남북방향의 경우 차단진동수 50 Hz 이하 모드들의 유효질량의 합은 전체 질량 대비 약 70%를 차지한다. 50 Hz까지의 모드만 해석에 고려하는 경우, 잔여 유효질량에 해당하는 모드의 응답은 누락되게 된다.

Table 5 Effective Mass Based on the Cutoff Frequency

Frequency	Ratio of sum of effective masses to total mass		
	NS dir.	EW dir.	Vert. dir.
Upto 50 Hz	70.2%	94.5%	91.5%



(a) Reactor Vessel Flange (NS dir.)



(b) Reactor Vessel Snubber (NS dir.)

**Fig. 7** Response Spectra Result

해석 결과는 원자로용기와 원자로용기내부구조물의 연계지점인 원자로용기 상부에 위치한 Flange와 원자로용기 하부에 위치한 CSB Snubber에서 응답스펙트럼을 산출하였다.

응답스펙트럼 결과는 Fig. 7과 같다. 원자로용기 Flange에서 산출한 응답스펙트럼은 세 경우 모두 거의 동일한 응답이 산출되었다. 원자로용기 Flange의 응답은 누락된 잔여모드의 영향이 크지 않고 고려된 50 Hz 이하 모드의 응답이 주요하기 때문에 세 가지 경우에 대해 동일한 응답이 산출된다. 하지만, 원자로용기 Snubber에서 50 Hz 이하의 모드만을 고려하여 산출한 응답스펙트럼은 충분히 많은 모드를 고려한 경우의 응답보다 고진동수 구간에서 차이가

발생하였다.

Residual Vector를 고려한 경우에는 충분히 많은 모드를 고려한 경우와 유사한 결과가 산출되어 Snubber에서의 응답차이는 잔여모드에 의한 차이로 확인할 수 있다. 원자력발전소 기기의 경우 기기가 크고 고유진동수가 낮은 편으로 잔여모드에 의한 영향이 크지는 않으나, 본 논문의 예와 같이 기기 위치에 따라 영향이 다르게 나타나므로 Residual Vector를 이용한 잔여모드의 응답에 대한 고려가 필요하다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 모드중첩법을 이용한 시간이력해석 시 누락된 잔여모드를 고려하는 방법인 Residual Vector를 소개하고, 그 효과를 간단한 구조물과 원자력발전소의 대표적인 주기기인 원자로용기 내진해석을 통해 확인하였다.

간단한 구조물 해석을 통해 고진동수 응답이 있는 구조물에 대해서 Residual Vector는 효과적이고 비교적 정확한 응답이 산출됨을 확인하였다.

대표적인 원자력발전소 기기인 원자로용기에 대해서 적용성 평가를 수행하였다. 원자력발전소 주기기의 경우 고유진동수가 낮은 편으로 잔여모드에 의한 영향이 크지는 않으나, 고진동수 모드의 응답이 큰 위치에서는 영향이 있으므로, Residual Vector를 이용한 잔여모드의 응답에 대한 고려가 필요함을 확인하였다.

모드중첩법을 이용한 시간이력해석 시 Residual Vector를 이용하여 잔여모드 응답을 고려하는 것이 누락될 수 있는 고진동수 모드의 응답을 효과적으로 고려할 수 있는 방법임을 보였다.

## 후 기

본 논문은 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원으로 수행한 연구과제(No.20193110100020)의 결과입니다.

## 참고문헌

- (1) Standard Review Plan 3.7.2, Rev. 4, 2013, "Seismic System Analysis," U.S. Nuclear Regulatory

- Commission, Washington, D.C.
- (2) Lee. D. G. and Yun. C. B, 1993, *Fundamentals of Structural Dynamics and Earthquake Resistant Design*, 8<sup>th</sup> workshop of Computational Structural Engineering Institute of Korea.
  - (3) Reg. Guide 1.92 Rev. 3, 2012, “Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
  - (4) The mode acceleration method revision A, 2013, [https://www.vibrationdata.com/tutorials2/MA\\_method.pdf](https://www.vibrationdata.com/tutorials2/MA_method.pdf)
  - (5) B. Besselink, U. Tabak, A. Lutowska, N. van de Wouw, H. Nijmeijer, D. J. Rixen, M. E. Hochstenbach and W. H. A. Schilders, 2013, “A comparison of model reduction techniques from structural dynamics, numerical mathematics and systems and control,” *J SOUND VIB*, Vol. 332, No. 19, 4403pp – 4422pp, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2013.03.025>
  - (6) ANSYS, Inc., 2016, “ANSYS Manual Release 18.0”.
  - (7) The time history data for north-south component time(s) & acc(g), <https://www.vibrationdata.com/elcentro.dat>
  - (8) Kim. J. Y, Jheon. J. H, Sung. K. K, Kim. H. M, 2016, “An evaluation of Seismic Response of APR1400 Reactor Coolant System due to soil profiles and concrete cracking,” *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Jeongseon-gun, Gangwon-do, Dec. 14-16, pp. 3,234-3,239.