

# 면진구조물 내 응답스펙트럼 작성을 위한 고려사항

## Considerations for the Generation of In-Structure Response Spectra in Seismically Isolated Structures

이승재<sup>1)</sup> · 김정환<sup>2)\*</sup>

Lee, Seung Jae<sup>1)</sup> · Kim, Jung Han<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 토목공학과 박사과정, <sup>2)</sup>부산대학교 토목공학과 부교수

<sup>1)</sup>Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Pusan National University, <sup>2)</sup>Associate Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University

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

In order to evaluate the earthquake safety of equipment in structures, it is essential to analyze the In-Structure Response Spectrum (ISRS). The ISRS has a peak value at the frequency corresponding to the structural vibration mode, but the frequency and amplitude at the peak can vary because of many uncertain parameters. There are several seismic design criteria for ISRS peak-broadening for fixed base structures. However, there are no suggested criteria for constructing the design ISRS of seismically isolated structures. The ISRS of isolated structures may change due to the major uncertainty parameter of the isolator, which is the shear stiffness of the isolator and the several uncertainty parameters caused by the nonlinear behavior of isolators. This study evaluated the effects on the ISRS due to the initial stiffness of the bi-linear curve of isolators and the variation of effective stiffness by the input ground motion intensity and intense motion duration. Analyzing a simplified structural model for isolated base structure confirmed that the ISRS at the frequency of structural mode was amplified and shifted. It was found that the uncertainty of the initial stiffness of isolators significantly affects the shape of ISRS. The variation caused by the intensity and duration of input ground motions was also evaluated. These results suggested several considerations for generating ISRS for seismically isolated structures.

**Key words:** Base isolation, In-structure response spectrum, Initial stiffness of isolator, Effective stiffness of isolator, Ground motion duration

## 1. 서론

원자력발전소나 플랜트시설, 데이터센터 등과 같은 중요한 시설은 구조물뿐만 아니라 구조물 내 설치된 설비 및 기기장치 등의 안전성도 확보되어야 한다. 구조물 내 설치 기기들이 손상 되었을 때 제 기능을 수행하지 못하게 되면 원전의 경우 노심손상과 같은 치명적인 피해나 해당 시설물의 주요기능을 수행하지 못해 발생하는 중대한 사회적 피해를 유발할 수 있기 때문이다. 전체 설치 기기의 지진응답 세기를 줄이기 위해서는 구조물 전체를 면진구조로 하는 것이 효과적이다. 이때 각 층에 설치된 기기에 작용하는 지진응답을 평가하기 위해 구조물내응답스펙트럼(In-Structure Response Spectrum, ISRS) 혹은 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum)을 분

석하는 것이 중요하다.

구조물의 ISRS는 구조물의 해당 고유주기에서 첨두값을 가지지만 지반의 특성, 지반과 구조물과의 상호작용, 구조물 특성 등의 불확실성을 가지기 때문에 첨두값을 가지는 주기가 바뀔 수 있다. 구조물 내 설비 및 기기 설계 시 ISRS 작성 기준은 Reg. Guide 1.122[1] 및 ASCE 4-16[2]에서 다루고 있다. 하지만 이 기준은 고정기초구조물에 대한 기준이며 면진구조물에 대한 정확한 기준은 제시되어 있지 않다.

면진장치는 일반적으로 이선형(Bi-linear) 거동의 비선형 모델로 설계되는데, 비선형성 해석이 어려우므로 적용이 비교적 쉬운 등가선형(Equivalent-linear) 모델로 치환하여 설계하기도 한다. 이는 구조물에 작용하는 하중의 경우 비선형 모델과 등가선형 모델 모두 비슷하게 평가되기 때문이다. 면진장치를 유효강성을 적용하여 선형으로 모델링 할 경우 ISRS는 면진주기에 서 뚜렷한 첨두값을 가지는 형태로 얻어질 것이다. 하지만 ISRS는 비선형 모델과 등가선형 모델에서 큰 차이를 보이기 때문에 설계 ISRS 작성 시 면진장치의 비선형 모델을 사용해야 한다. 또한 비선형에 의한 모델링 변수가

\*Corresponding author: Kim, Jung Han

E-mail: jhankim@pusan.ac.kr

(Received October 15, 2021; Revised January 26, 2022; Accepted February 4, 2022)

추가되고 이에 대해 지반운동에 의한 변동성도 달라질 수 있기 때문에 다양한 조건에 대한 ISRS 평가가 필요하다. 이에 이 연구에서는 기존에 다루지 않았던 면진장치 비선형 거동 특성에 의한 ISRS를 분석하여 면진구조의 ISRS 평가 시 고려해야 할 사항을 도출하였다.

## 2. 면진구조물 ISRS 평가 방법의 필요성

### 2.1 고정기초구조물의 ISRS 기준

구조물 내 설비 및 기기 설계 시 불확실성을 고려하기 위해 Fig. 1과 같이 ISRS를 평활화하고 첨두값 진동수의 폭을 넓히는 설계 방법을 사용하고 있다. Reg.Guide 1.122에서는 SSI, 재료특성 등과 같은 매개변수로 인한 변동성을 평가하여 구조물 진동수의 변동성을 평가한다. 구조 및 지반특성, 감쇠, SSI 기법, 내진해석에 사용되는 모델링 기법 등의 불확실성으로 인한 구조물 진동수 변화를 반영하기 위해 응답스펙트럼을 평활화하고 각 첨두진동수를 식 (1)에 의해  $\pm \Delta f_j$ 만큼 확장할 것을 제안한다.

$$\Delta f_j = \left[ (0.05f_j)^2 + \sum_{n=1}^P (\Delta f_{j,n})^2 \right]^{1/2} \geq 0.1f_j \quad (1)$$

여기서,  $\Delta f_{j,n}$ 은 매개변수 n의 변화로 인한 J번째 모드진동수의 변화량을 나타내며, P는 고려되는 주요 매개변수의 수다.  $\Delta f_j$ 는 J번째 모드진동수  $f_j$ 의 10% 이상이어야 하며, 위 절차를 사용하지 않을 경우  $\Delta f_j$ 는 일반적으로 0.15 $f_j$  즉, 15%를 사용한다.

ASCE4-16에서는 구조물 진동수 및 SSI 해석의 불확실성으로 인한 응답 불확실성을 고려한다. 그중에서도 주로 지반조건에 대한 불확실성을 고려하여 제시하였다. 상한지반조건에 대해 첨두진동수 범위에서 -15%, 하한지반조건에 대해 +15%를 적용하여 설계응답스펙트럼의 첨두진동수는 상한 및 하한 지반조건을 모두 포괄한  $\pm 15\%$ 를 적용할 것을 제안한다. 또한 첨두진동수뿐만 아니라 감쇠비가 10% 미만일 경우 첨두값의 15% 감소를 허용한다.

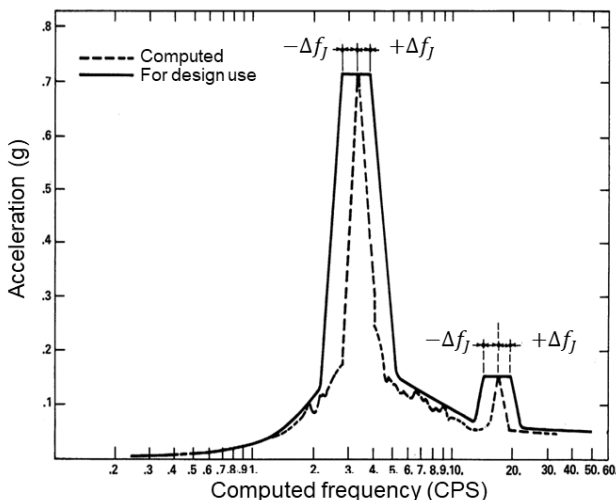


Fig. 1. Response spectrum peak broadening and smoothing

### 2.2 면진구조물의 ISRS에 관한 연구 사례

면진에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으며 그로 인해 면진장치 및 면진구조물의 설계기준과 성능평가 방법에 대해서는 수많은 기준이 제안되었다. 구조물뿐만 아니라 구조물 내의 기기 응답을 분석한 연구도 있었으며, 특히 한국원자력연구원(KAERI)[3-5]에서 면진이 적용된 구조물의 비선형 거동에 의한 ISRS 영향을 해석과 실험을 통하여 분석하고, 이를 통해 기기의 내진성능을 평가한 사례가 있다. 또한 면진구조물 ISRS의 첨두값 확폭을 위해 구조물 강성과 면진장치의 유효강성 등을 달리하며 ISRS 변화를 분석한 사례도 있다[6]. 면진구조물은 면진시스템의 특성 및 비선형성의 불확실성 등으로 인해 고정기초구조물보다 더 많은 불확실성들이 ISRS에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 이를 고려하여 현재 면진장치 설계기준에 명확한 기준이 없는 면진장치 초기강성과 지진세기 및 강진지속시간 등 지반운동의 불확실성을 대상으로 하여 ISRS 변화를 분석하였다.

### 2.3 면진구조물의 ISRS 평가 시 고려사항

기존 ISRS 기준은 고정기초구조물에만 한정된 것이고 면진구조물은 면진장치에 의해 거동이 확연히 달라지기 때문에 면진장치 역학적 거동의 불확실성에 의한 ISRS의 변화를 추가로 고려해야 한다. 면진장치에 대해서는 기본적으로 면진장치 구성재료의 온도 및 노화 효과와 제조 공정 등의 불확실성이 존재한다. 이에 면진장치는 ASCE 4-16의 면진장치 설계 규정에 의해 역학적 특성이 20% 이상 변화하지 않도록 설계하며 이에 대한 변동성을 고려하여 응답을 평가한다. 면진장치의 주요 역학적 특성인 2차강성은 ISRS의 면진주기에 영향을 줄 수 있기 때문에 이 특성이 20% 변한다면 주기는 강성의 제곱근에 비례하여 약 10%의 면진주기 변화가 쉽게 예상된다. 이 변동성 고려 기준은 설계기준에 이미 제시되어 있기 때문에 본 연구에서는 2차강성의 변동성에 의한 ISRS 변화는 따로 분석하지 않았다. 하지만 이외에 초기강성 등 역학적 특성의 변동과 비선형 해석 시 면진장치의 선형 구간 거동 사이클 등으로 인한 ISRS 변화 양상은 보수성 확보 관점에서 확인할 필요가 있으며 본 연구에서는 이러한 사항들에 보다 집중하였다.

면진구조물 비선형 해석을 통해 ISRS 변화를 분석하여 Reg.Guide 1.122 및 ASCE4-16에서 제시된 고정기초구조물에 대한 기준을 면진구조물에도 적용할 수 있는지를 확인해야 한다. 면진구조물의 ISRS에 영향을 미칠 요소는 면진장치의 초기강성과 지반운동의 불확실성 등이 있을 것이다. 면진장치가 정해지면 주요 변수인 2차강성이 결정된다. 그러나 초기강성은 주로 2차강성과의 비율( $k_d/k_u$ )로 산정되기 때문에 연구마다 제각기 다른 값을 쓰고 그 편차가 큰 편이다. 하지만 초기강성이 ISRS에 영향을 미칠 것을 생각하면 초기강성에 따른 ISRS 변화를 분석하고 이를 고려하여 설계 시 적절한  $k_d/k_u$  비율을 결정해야 할 것이다. 지반운동의 불확실성의 경우 작은 지진세기에서 면진장치 이력거동은 설계변위까지 도달하지 못함으로써 유효강성이 커지고, 유효주기 또한 변하게 되므로 이로 인한 ISRS를 확인해 볼 필요가 있다. 또한 강진지속시간에 의해 면진장치의 이력 사이클 횟수가 달라지며 ISRS 역시 변화가 있을 것이다. 본 연구에서는 명확한 기준이 없는 초기강성의 불확실성과 면진장치의 이력거동에 의한 불확실성을 고려하기 위해 면진장치의  $k_d/k_u$  비율과 지진세기 및 강진지

속시간을 달리하여 ISRS 변화를 분석하였고, 이를 통해 면진구조물의 설계 ISRS 첨두값 주기의 확폭이나 세기를 결정하기 위한 근거를 제시하고자 한다.

### 3. 면진구조물 모델링 및 입력지진파

#### 3.1 집중질량 모델

본 연구에서는 여러 불확실성에 따른 ISRS의 변화를 명확히 분석하기 위해 구조물 모델링을 단순화하였다. 연구 목적이므로 특정 시설을 대상으로 할 필요는 없지만, 대표적인 중요 시설인 원전을 목표로 하였으며 이에 원전 보조건물에 해당하는 고유주기를 가진 구조물을 모델링 하였다. 상부 구조물은 탄성거동을 하므로 탄성 보요소로 적용하였다. Fig. 2와 같이 각 절점에 집중질량 20 tons씩 총 100 tons의 질량을 적용하고 절점을 탄성보요소로 연결하여 집중질량 모델로 모델링하였다. 질량과 강성이 다르더라도 고유주기가 동일하다면 ISRS 또한 동일하기 때문에 원전 보조건물의 고유진동수인 8 Hz가 되도록 질량과 강성을 임의로 적용하였다. 고정기초구조물과 면진구조물 모두 층 경계조건은 1 자유도로 거동하도록 x 방향 외의 자유도는 모두 구속하였다. 최하단 절점의 경우 고정기초구조물은 모든 자유도를 구속하였으나, 면진구조물의 경우 각 층의 자유도와 마찬가지로 x 방향 외의 자유도를 모두 구속하여 1 자유도 방향으로만 운동할 수 있게 적용하였다. 실제 면진구조물은 편심효과가 있겠지만 이는 중심과 가장자리 부분의 응답 크기에 다소 영향을 미칠 뿐 첨두값이 발생하는 주기 등 스펙트럼 형상은 크게 변하지 않을 것이다. 또한 KEPIC-STC[7]에서와 같이 편심 효과를 최소화하려는 기준이 제시되어있고, 이는 면진장치 배치로 조절이 가능하기 때문에 편심 효과는 본 연구에서 다루지 않았다. 면진구조물의 최하단 절점을 기초매트로 설정하여 30 tons의 질량을 적용하였고 기초매트

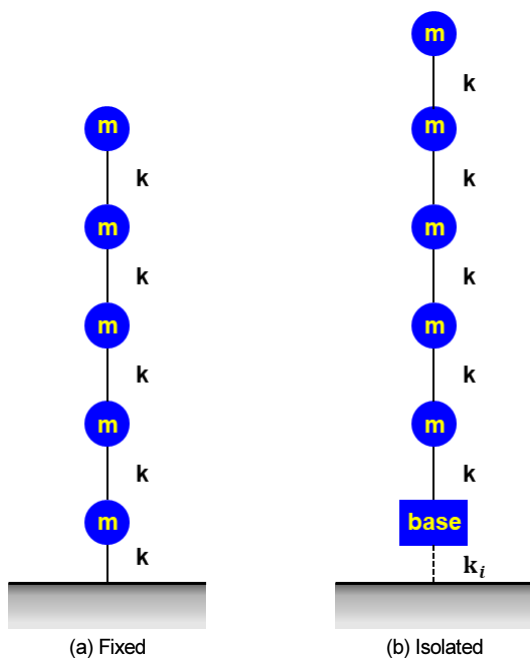


Fig. 2. Lumped-mass beam-stick model

하단에 면진장치를 위치시켰다. 기초매트의 경우 구조물을 집중질량모델로 단순화하였기 때문에 기초 또한 단순화하여 30 tons의 질량을 가진 집중질량으로 적용하였다. 면진장치는 하나의 joint link로 하였고 기초와 면진장치 사이의 거리가 매우 작도록 배치하였다.

#### 3.2 면진장치 이선형(Bi-linear) 모델

면진장치 비선형 거동은 Fig. 3과 같이 이선형 모델로 이상화될 수 있으며 초기강성( $k_u$ ), 2차강성( $k_d$ ), 특성강도( $Q_d$ )에 의해 결정된다. 본 연구에서는 면진 이력거동에 이선형 모델을 사용했으며 면진장치를 특정하지는 않았다. 면진주기는 주로 2차강성에 영향을 받기 때문에 면진장치 설계 시 2차강성에 대한 기준이 여러 수식 및 실험을 통해 제시되었다. 반면 초기강성은 주로 2차강성에 대한 비율( $k_d/k_u$ )에 의해 산출되는데, 초기강성은 면진구조물에 작용하는 하중에는 크게 영향을 미치지 않기 때문에 설계 시 상세검토 되지 않아 명확한 기준이 없는 상황이다. 그러나 초기강성이 ISRS에는 영향을 미칠 수 있기 때문에 ISRS를 구하기 위해 정확한  $k_d/k_u$  비율을 알아야 한다. Skinner[8]은 이 비율을 약 0.06 ~ 0.11, Naeim and Kelly[9]는 약 0.05 ~ 0.1 범위로 제안하였으나 그 편차는 매우 큰 편이다. Ali et al.[10]은 일본 도호쿠 지진의 강진동 지반운동에 따른 면진된 원자력발전소의 확률론적 지진안전성평가 연구를 위해 면진장치의  $k_d/k_u$  비율을 약 0.018로 모델링 하기도 하였다. 또한 마찰형 면진장치들은 이선형으로 거동함에도 LRB와는 다르게 면진장치의 초기강성이 수직으로 무한대에 가까운 거동을 보일 것이다. 따라서 이 연구에서는 초기강성의 범위를 폭넓게 고려하였다. 본 연구에서는 MCEER[11] 보고서를 참조하여 특성강도와 구조물 중량비  $Q_d/W$ 를 0.06으로 하여 특성강도를 구조물 중량의 6%가 되도록 하였다. 목표주기  $T_d$ 는 2초로 하여 목표주기에 대응하는 2차강성  $k_d$ 를 산정하였고, 기본  $k_d/k_u$  비율을 0.01로 하여  $k_u$ 를 결정하였으며 해석에 사용된 면진장치의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

실제 고무계열 면진장치의 극한거동을 평가해 보면 2차강성 이후에 경화(hardening) 현상으로 강성이 급격히 증가하게 된다. 또한 마찰판과 스프링 형식을 가지는 면진장치나 FPS(Friction Pendulum System) 등도 변

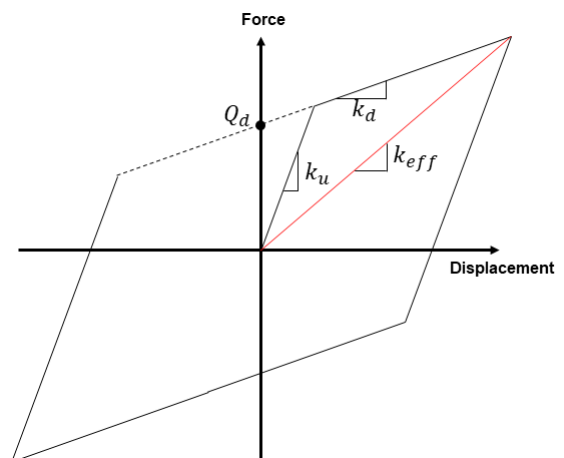


Fig. 3. The mechanical properties of the lead rubber bearing in a horizontal direction

위제한장치가 있어서 충격 등에 의한 2차강성 이후에 강성이 크게 달라지는 구간이 있다. 극한거동 시 면진장치 경화에 의한 ISRS 변화 연구에서는 경화 이후 ISRS의 급격한 증가 현상을 보이기도 하였다[12]. 그러나 이 연

구에서는 설계지진세기 이하를 대상으로 하였으므로 이선형 모델로 한정하였다.

### 3.3 입력지진파

해석에 사용된 입력지진파는 Reg.Guide 1.60[13]에 규정된 감쇠비 5%의 ZPA 0.2 g인 설계스펙트럼 형상에 부합하도록 추계학적 방법으로 생성한[14] 지반운동 시간이력으로 하였다. 지반운동 세기에 의한 영향을 분석하기 위해서 해당 지진파의 스케일을 감소시키면서 지진세기에 따른 ISRS 변화를 분석하였다. 강진지속시간에 따른 ISRS 변화를 보기 위해서는 강진지속시간이 3.5초, 10.5초, 80초로 다르게 설정하였다. 각각에 대해 5개씩 지진파를 생성하고 결과를 평균함으로써 개별 지진파가 설계스펙트럼에 정확히 일치하지 않아서 발생할 수 있는 오차를 줄였다. 설계기준에서 포락함수에 대한 기준이 있지만 본 연구에서는 강진지속시간에 의한 명확한 변화를 보기 위하여 기준에 제시되어 있는 강진구간 보다 상대적으로 길거나 짧은 지진파를 생성하였다. 뚜렷한 변화를 보기 위해 다소 극단적으로 길고 짧은 지진파를 생성하였으며, 생성된 지진파의 지속시간별 대표 시간이력 그래프 및 지속시간별 5개 지진파에 대한 평균응답스펙트럼을 Fig. 4에 나타내었다.

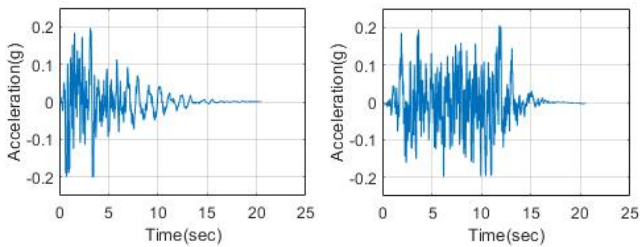
## 4. 면진구조물의 ISRS 분석

### 4.1 구조물 주기 이동

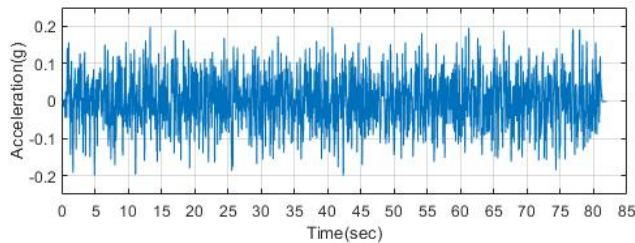
Table 1에 제시된 면진장치의 물성치로 비선형 해석을 하여 최상단 절점의 ISRS를 고정기초구조물의 ISRS와 비교하여 Fig. 5에 나타내었으며 면진효과가 충분함을 알 수 있다. 그러나 침두주기는 면진시스템에 대한 목표주기인 2초에서가 아니라 상부구조물 변형에 대응하는 고유주기인 0.07초에서 발생함을 확인할 수 있다. 이 주기는 면진구조모델의 2차모드주기인데 면진장치의 변형에 의한 것이 아니라 상부구조물의 변형에 기여하는 구조모드주기이며 면진장치가 없는 고정기초구조물의 주기인 0.125초보

**Table 1.** Properties of bi-linear model of the isolator

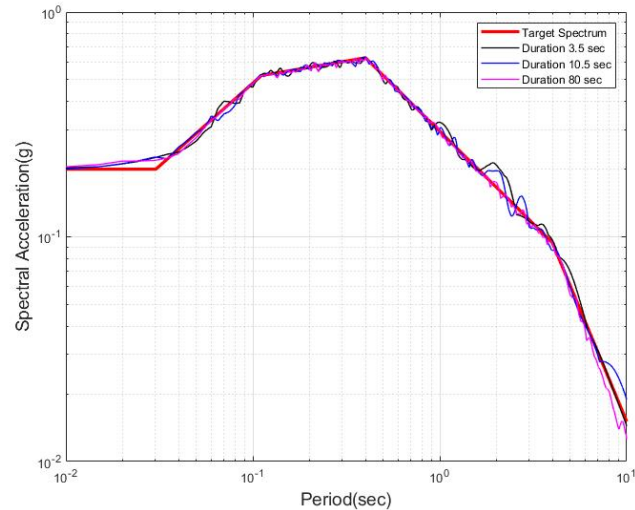
Properties	Value
$Q_d/W$	0.06
$W(kN)$	1,275
$Q_d(kN)$	76.52
$T_d(sec)$	2.0
$k_d(kN/m)$	1,283
$k_d/k_u$	0.01
$k_u(kN/m)$	128,305
$k_{eff}(kN/m)$	2,048



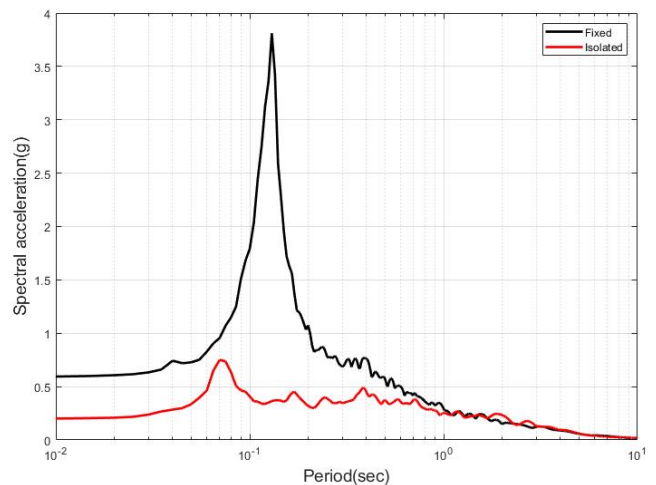
(a) Short strong motion duration (3.5 sec) (b) Moderate strong motion duration (10.5 sec)



(c) Long strong motion duration (80 sec)



(d) Target response spectrum with response spectra of generated input ground motions



**Fig. 5.** ISRS of isolated structure and fixed structure



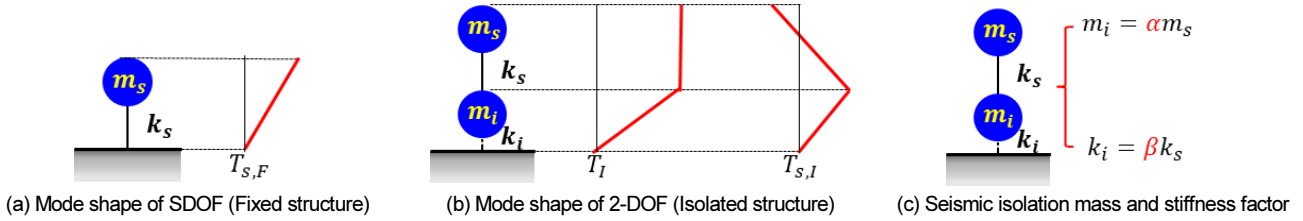
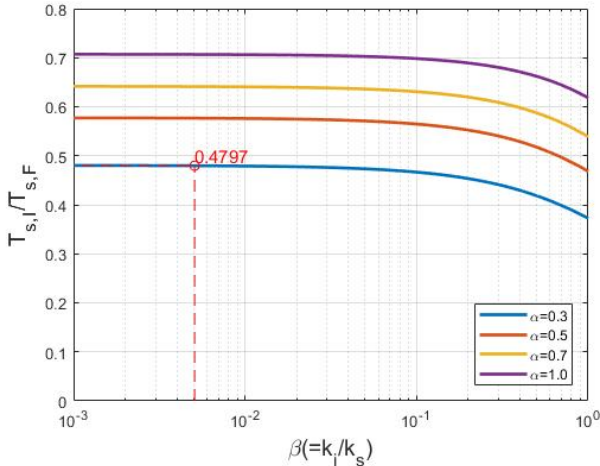


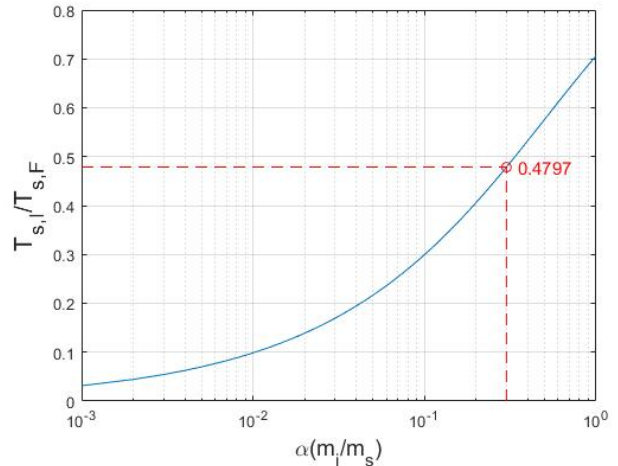
Fig. 6. Mode shape of SDOF and 2-DOF system

Table 2. Definition of terms to the 2-DOF seismic isolation structure

Terms	Definition
Period of fixed structure ( $T_{s,F}$ )	The first mode period of the fixed base structures
Seismic isolation mode period of seismic isolation system ( $T_I$ )	The first mode period (seismic isolation mode) about second stiffness of isolator at the isolated base structures
Structure mode period of seismic isolation system ( $T_{s,I}$ )	The second mode period (structure mode) at the isolated base structures
Seismic isolation mass factor ( $\alpha$ )	The mass ratio of 2 degree of freedom model considering the mass distribution of the structure and basemat
Seismic isolation stiffness factor ( $\beta$ )	The stiffness ratio of the isolator to the stiffness of the structure



(a) Ratio according to the seismic isolation stiffness factor



(b) Ratio according to the seismic isolation mass factor

Fig. 7. Ratio of the super-structure mode period of seismic isolation structure over the structural mode period of fixed base structure

다 더 작은 값으로 이동된 것을 확인하였다. 이는 면진시스템으로 인해 발생한 현상으로 예측되며 다음과 같은 수식으로 확인 가능하다. 계산의 단순화를 위해 2 자유도의 면진시스템으로 치환하였고, 수식 과정의 이해를 돕기 위해 Fig. 6 및 Table 2에 용어들을 정의하였다.

Fig. 6 (c)와 같은 2 자유도 면진구조에서 질량행렬 및 강성행렬은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_i + k_s & -k_i \\ -k_i & k_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

Fig. 6 (c)의 2 자유도 시스템 운동방정식을 계산하면 면진구조의 1차모드(면진모드) 및 2차모드(구조모드)주기를 구할 수 있고 Table 2에 명시된 면진질량계수와 면진강성계수를 사용하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 면진질량계수는 단자유도로 이상화된 구조물의 질량과 면진 기초 매트 질량과의 비이고, 면진강성계수는 구조물의 강성과 면진시스템의 유

효강성과의 비이다.

$$\begin{cases} T_I = 2\pi \sqrt{\frac{2\alpha(T_s/2\pi)^2}{(1+\alpha)+\beta - \sqrt{\{(1+\alpha)+\beta\}^2 - 4\alpha\beta}}} \\ T_{s,I} = 2\pi \sqrt{\frac{2\alpha(T_s/2\pi)^2}{(1+\alpha)+\beta + \sqrt{\{(1+\alpha)+\beta\}^2 - 4\alpha\beta}}} \end{cases} \quad (3)$$

따라서 면진되지 않은 고정기초구조물에 대한 고정구조주기 대비 면진이 적용된 구조물에 대한 구조모드주기는 식 (4)과 같다.

$$\frac{T_{s,I}}{T_{s,F}} = 2\pi \sqrt{\frac{2\alpha}{(1+\alpha)+\beta + \sqrt{\{(1+\alpha)+\beta\}^2 - 4\alpha\beta}}} \quad (4)$$

식(4)에서 볼 수 있듯이 면진구조의 구조모드주기  $T_{s,I}$ 는 구조물과 기초 매트의 질량비 및 구조물과 면진장치의 강성비에 의해 결정된다. Fig. 7 (a)

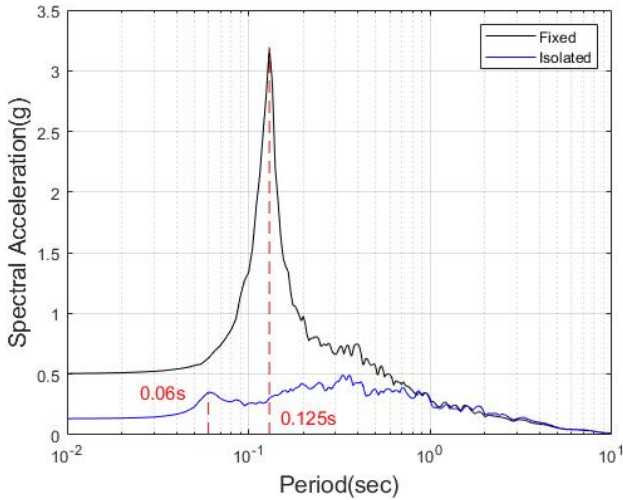


Fig. 8. Comparison of calculation and analysis results of the structure period shifting

은 면진강성계수에 따른  $T_{s,I}$ 를 면진질량계수를 달리하며 나타낸 그래프이다. 해석 모델에 사용된 질량비와 강성비에 해당하는  $T_{s,I}/T_{s,F}$  값은 0.48이며 이 값에 고정구조주기 0.125초를 곱하면  $T_{s,I}$ 는 0.06초가 나온다. 구조물과 면진장치의 현실적인 강성비 범위에서  $\beta$ 가 0.1 이하인 구간은 Fig. 7 (a)에서와 같이  $\beta$  값과 상관없이  $T_{s,I}$  값이 거의 일정한 것을 알 수 있고, 이는  $T_{s,I}$ 가 면진질량계수에 의존한다는 것을 말한다. 따라서 면진장치의 강성 또는 목표주기와 상관없이 구조물과 기초매트의 질량비가 결정되면 Fig. 7 (b)의 그래프에 의해  $T_{s,I}$ 를 계산할 수 있다. 계산된 값은 구조물의 고유주기보다 작은 값을 가지며, 이는 Fig. 8과 같이 해석을 통해 나온 면진구조의 2차모드 주기와 동일한 값을 가진다. 그러므로 설계 ISRS 작성 시 구조모드의 첨두값을 산정할 때 고정기초에 대한 구조물 주기가 아닌 구조물과 기초매트와의 질량비로 인해 이동된 면진구조 구조모드주기의 이동을 고려하여야 한다.

#### 4.2 $k_d/k_u$ 비율에 따른 비선형 해석의 ISRS

고무계열 면진장치에 대해  $k_d/k_u$ 에 대한 비율은 여러 해석 및 실험들에 의해 약 0.1 ~ 0.02의 범위 즉, 초기강성이 2차강성의 약 10배에서 50배로 되어있다[8-10]. 마찰계열 면진장치인 경우는 전단력이 마찰력보다 커지기 전에는 고정기초와 같은 거동을 하기 때문에  $k_d/k_u$  비율이 매우 클 것이다. 이 비율은 면진장치 종류에 따라서 달라져야 하지만 같은 유형의 장치에 대해서도 설계 시 어떤 값으로 해야 하는지 명확한 기준이 없다. 이는 구조물 설계 관점에서 면진장치의 2차강성 혹은 유효강성이 중요한 변수이며 1차강성은 크게 영향을 미치지 않기 때문이다. 그러나 초기강성은 ISRS에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그 영향을 확인하기 위해서  $k_d/k_u$  비율이 0.01이 되는 경우를 기본값으로 하여 0.001 ~ 0.1 사이로 변화시키고 최상단 절점의 ISRS 해석결과를 Table 3 및 Fig. 9에 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 초기강성에 따라서 ISRS는 큰 영향을 받는다. 비율이 증가할수록 즉,  $k_u$ 가 감소할수록 구조모드 응답은 감소하고 유효강성으로 인한 유효주기가 증가하는 경향을 보인다. 하지만 비율이 감소할수록 면

Table 3. Seismic isolation period according to the initial stiffness and the response amplitude at  $T_{s,I}$

Ratio variation	Effective period according to the effective stiffness (sec)	Amplitude at $T_{s,I}$ (g)
0.1	1.361	0.125
0.08	1.319	0.127
0.05	1.263	0.208
0.02	1.234	0.527
0.01	1.197	0.821
0.008	1.177	0.931
0.005	1.182	1.084
0.002	1.172	1.058
0.001	1.160	1.006

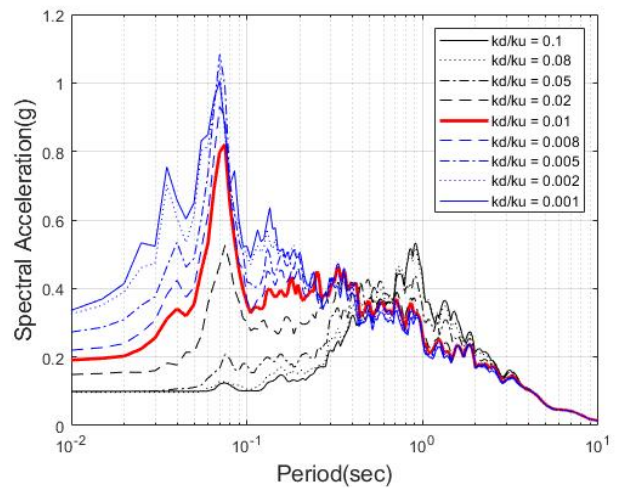


Fig. 9. ISRS changes according to initial stiffness

진주기 부근에서의 ISRS는 감소하지만 구조모드에서의 응답은 증가한다. 면진장치 설계 시 2차강성이 결정되었다더라도 초기강성에 따라 ISRS에 큰 차이가 발생하기 때문에 설계를 위한 ISRS 작성 시 초기강성의 불확실성에 따른 구조모드의 응답 첨두주기 확폭을 고려하여야 한다.

#### 4.3 지진세기에 따른 ISRS 변화

지진세기가 작으면 기존 설계했던 면진장치 이력거동이 설계변위까지 도달하지 못함으로써 유효강성이 커지고, 유효주기도 변하게 된다. 그로 인해 ISRS 또한 영향을 받을 수 있기에 설계지진세기보다 작은 지진세기에 대해서 ISRS를 확인해 보았다. 지진세기는 설계지진세기의 10% ~ 90% 범위로 감소시켰으며 해석결과를 Table 4와 Fig. 10 및 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10의 지진세기별 면진장치의 이력거동을 보면 예상되는 바와 같이 지진세기가 약할수록 이력거동의 최대변위가 작아지면서 유효강성의 기울기가 증가하고, 그로 인해 유효주기가 감소하였다. 각 지진세기별 유효주기를 Fig. 11의 ISRS 그래프에 표시하였다. ISRS 형상 변화를 보면 지진세기가 감소할수록 그래프가 부드러운 형상을 보이며 고정기초구조물의 ISRS 형상과 유사함을 볼 수 있다. 이는 지진세기가 작을수록 면진장치가 비선형

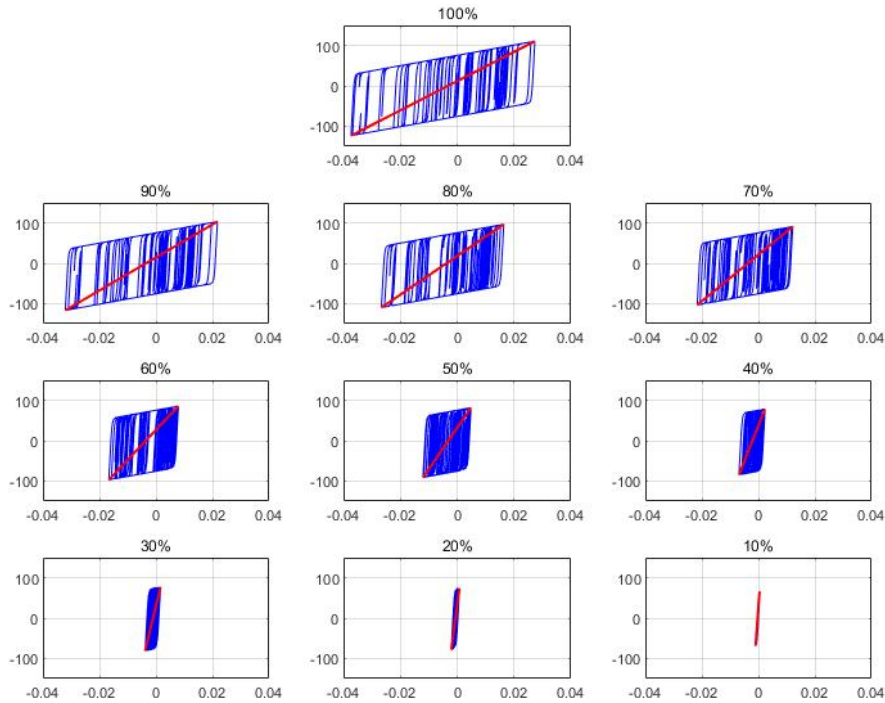


Fig. 10. Force-displacement curve according to earthquake intensity

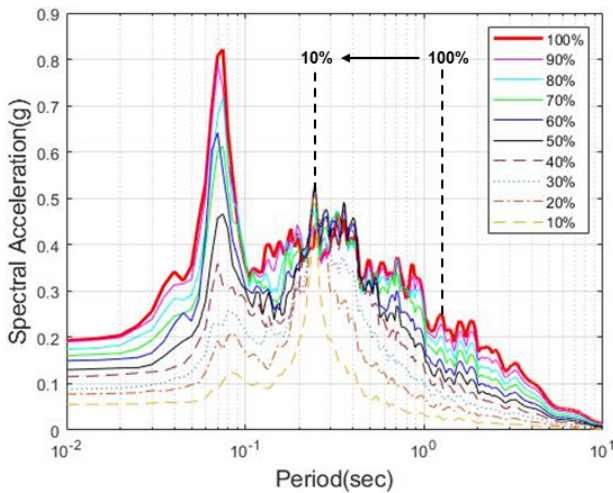


Fig. 11. ISRS changes according to earthquake intensity

Table 4. Effective period according to the earthquake intensity

Earthquake intensity variation	Effective period according to the effective stiffness (sec)
100%	1.197
90%	1.119
80%	1.034
70%	0.943
60%	0.831
50%	0.708
40%	0.539
30%	0.421
20%	0.313
10%	0.233

거동이 아닌 탄성범위에서 거동하기 때문이다. 면진장치의 최대응답에 의해 산출된 유효강성으로 유효주기를 계산한 결과 약 1.19초에서 0.23초까지 감소하였고, 응답 크기도 전체적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만 그래프에서도 확인할 수 있듯이 설계지진보다 더 작은 세기의 지진에서의 ISRS는 설계지진에서의 ISRS 그래프에 의해 거의 포괄된다. 이는 강한 지진세기일 경우 약한 지진세기에 의한 유효주기에 해당하는 이력거동도 포함되기 때문으로 판단된다. 따라서 설계지진 이하의 지진세기에 대해서는 실제 응답의 최댓값에 의한 면진시스템의 유효주기가 작아지더라도 설계지진의 ISRS에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보인다.

#### 4.4 지반운동 강진지속시간에 따른 ISRS 변화

면진장치가 탄성범위에서 주로 거동한 후 잠깐만 이선형으로 거동하는 경우와 이선형으로 주로 거동하는 경우에 대해서도 ISRS의 차이가 있을 수 있다. 만약 강진지속시간이 짧다면 이선형으로 거동하는 사이클 횟수가 적을 것이고, 실제 유효강성에 대한 주기에서만 증폭될 것으로 추정할 수 있다. 반대로 강진지속시간이 길다면 다양한 진폭의 사이클 횟수가 많아져 여러 유효강성에 대한 주기에서 응답이 커지게 될 것이다. 따라서 매우 유사한 응답스펙트럼을 가지는 지반운동이라고 할지라도 강진지속시간에 의해 ISRS가 달라질 수 있기 때문에 이에 따른 ISRS 변화를 확인할 필요가 있다. Fig. 4에 나타난 강진지속시간이 다른 3종의 지진파를 각각 5개씩 입력하였으며, 평균 ISRS를 구하여 강진지속시간에 따른 변화를 확인하였다. Fig. 12는 강진지속시간별 힘-변위 그래프이며 Fig. 13은 최상단 절점의 ISRS이다. Fig. 12 (a)의 면진장치 이력거동을 보면 강진지속시간이 짧은 지진파에 의한 거동은 사이클 횟수가 적고, 강진지속시간이 길어질수록 이력거동의 사이클 횟수가 많은 것을 직접 볼 수 있다. 그로 인해 Fig. 13 (a)의



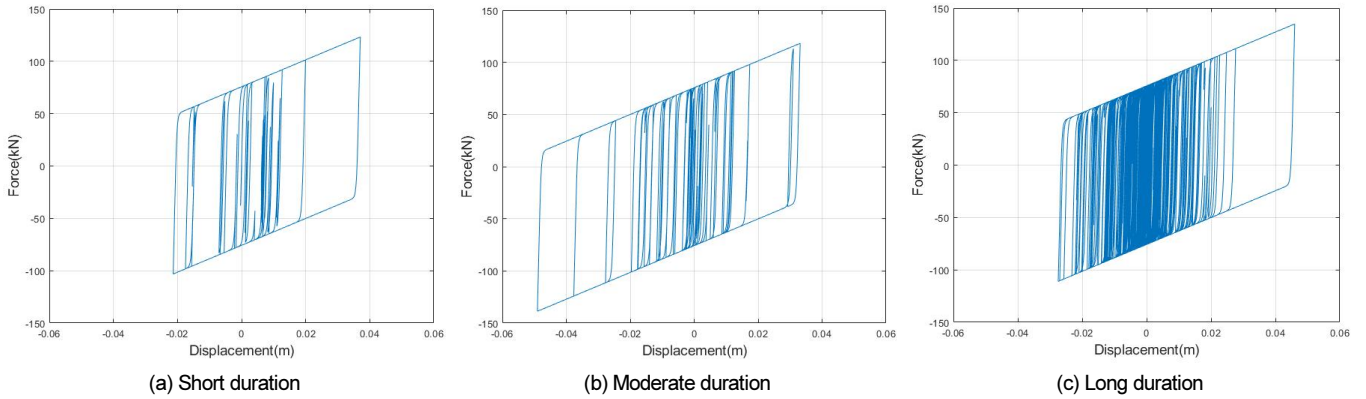


Fig. 12. Force-Displacement curve by different strong motion duration

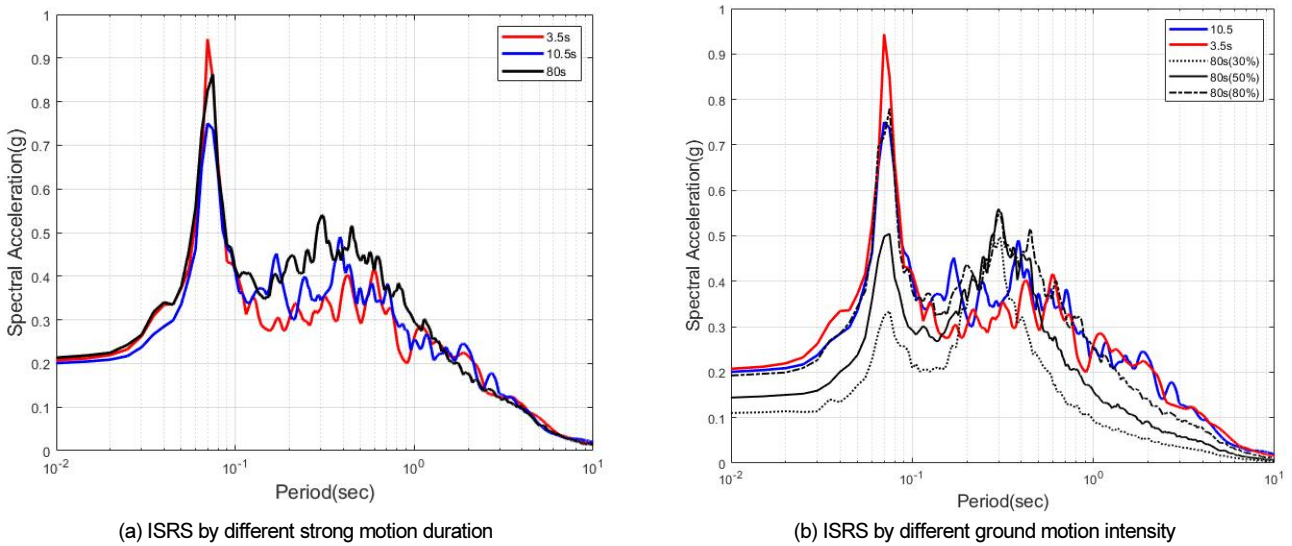


Fig. 13. ISRS analysis results according to the strong duration of the earthquake

ISRS에서 강진지속시간이 짧은 경우는 특정 주기에서만 침투값을 가지고 그 외의 주기에서는 큰 응답을 보이지 않는다. 설계를 위한 ISRS는 전 주기에 대해 보수적으로 평가해야하기 때문에 이와 같은 응답결과를 모두 적절히 반영해야 한다. 강진지속시간이 긴 경우의 ISRS는 여러 주기에 걸쳐 응답을 하여 그래프가 부드럽게 연결되는 경향이 있다. Fig. 13 (b)는 강진지속시간과 지진세기를 동시에 고려한 ISRS이다. 강진지속시간이 80초인 지진파의 세기를 감소시켰으며 그 결과 기존 80초의 설계지진세기 ISRS에 대해서는 포괄되지만, 강진지속시간이 상대적으로 짧은 3.5초 10.5초인 설계지진세기에서의 ISRS보다는 주기 0.22 ~ 0.33초에서 설계지진세기보다 큰 응답을 보인다. 즉, 강진지속시간에 따라 면진주기와 구조모드 주기 사이의 ISRS가 차이를 보이며 이는 면진구조의 ISRS 특성이므로 보수성 확보를 위해 면진구조에 대한 강진지속시간 기준을 따로 제시할 필요도 있다.

### 5. 결론

고정기초구조물의 ISRS 작성시 고려되는 불확실성 변수들과는 달리 면진된 구조물의 ISRS는 면진장치로부터 기인하는 여러 요인에 의해서 불확

실성에 의한 ISRS의 변동성이 발생한다. 그러나 면진구조물의 ISRS 작성 기준에 대한 명확한 기준은 제시되어있지 않다. 본 논문에서는 그동안 고려하지 않았던 면진구조물의 ISRS에 영향을 미치는 불확실성을 요인을 분석하였으며 아래와 같은 고려사항을 도출하였다.

- (1) 비선형 모델의 면진장치를 사용하여 면진구조물을 해석한 결과 면진구조의 2차모드 주기에서 큰 응답을 보였다. 이 주기는 면진구조에서 상부 구조가 변형하는 구조모드주기이다. 상부 구조물 주기에 해당하지만, 기존 고정기초구조물의 주기인 0.125초보다 더 작은 0.07초의 값을 가졌다. 이 구조물 주기의 이동을 확인하기 위해 2 자유도 면진구조의 운동방정식을 수식으로 계산하였으며, 구조모드주기  $T_{s,n}$ 는 구조물과 기초매트의 질량비에 의존한다는 것을 확인하였다. 따라서 구조물과 기초매트의 질량비에 따라 구조물 주기가 얼마나 감소하는지 계산한 후 이동된 구조모드주기에서 ISRS 침투값이 존재함을 고려해야 한다.
- (2) 면진장치 설계 시 초기강성  $k_e$ 에 대한 상세검토는 없기 때문에 초기강성에 대한 ISRS 변화 양상도 확인해보았다. 초기강성을 2차강성의 10배에서 1000배로 변화시켰을 때 구조모드주기에서의 응답 크기가 확연히 변하였다. 따라서 초기강성이 ISRS 영향을 미치기 때문에 면진장



치 설계 시 적합한  $k_u$  또는  $k_u/k_u$  비율의 기준이 필요하고, 이에 대한 명확한 추정값이 없을 경우 구조모드주기에서의 침투값에 미치는 영향을 분석하여 침투값 진폭에 대한 기준을 고려해야 한다.

- (3) 지진세기 및 강진지속시간에 따른 ISRS 변화를 분석한 결과, 설계지진세기 이하의 지진세기에 대한 ISRS는 설계지진세기의 ISRS에 의해 거의 포괄되어 설계 시 고려하지 않아도 될 것으로 보인다.
- (4) 강진지속시간에 따라 ISRS가 변화했으며, 강진지속시간이 짧을수록 면진주기와 구조모드주기 사이에서 ISRS가 비보수적인 값을 가지게 된다. 반면 강진지속시간이 길수록 여러 주기에서 응답하여 ISRS 곡선이 부드럽게 연결되고, 또한 설계지진세기 이하의 ISRS는 포괄하더라도 강진지속시간이 짧다면 설계지진세기보다 더 큰 응답이 생길 수 있기 때문에 강진지속시간이 어느 정도 긴 경우에 대해 해석할 필요가 있다.

일반적으로 원전과 같이 구조물의 지진안전성이 매우 높고 상대적으로 내부 기기가 중요하여 이의 안전성을 ISRS로부터 평가하는 경우 구조물은 선형거동을 한다는 가정 하에 ISRS가 지진세기 증가에 따라 선형적으로 증가한다는 가정을 적용한다. 그러나 면진구조물은 작은 지진세기에서부터 면진장치의 비선형 거동에 의해 지진세기가 증가할수록 ISRS가 비선형적으로 증가하게 된다. 따라서 설계지진세기에서도 이를 고려해야 하며 설계지진세기를 초과하여 기기의 지진취약도를 평가하는 경우에도 더 영향이 클 것이다. 이때 이 연구에서 논의된 지진세기에 따른 ISRS의 특성을 확장하여 적용할 수 있을 것이다.

## / 감사의 글 /

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2019R111A3A01058812) 및 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20181510102410)입니다.

## / REFERENCES /

1. NRC, Development of floor design response spectra for seismic design of floor-supported equipment or components regulatory guide 1.122, US Nuclear Regulatory Commission, c1978.
2. ASCE, Seismic analysis of safety-related nuclear structures ASCE/SEI 4-16, American Society of Civil Engineers, c2017.
3. Kim MK, Choun YS, Choi IK, Seo JM, A shaking table test for the evaluation of floor response spectrum of seismic isolated structure, In Transaction of the 23rd Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-23) Conference, Manchester, United Kingdom, c2015.
4. Park HK, Kim JH, Choi IK, Effects on the floor response spectra by the nonlinear behavior of a seismic base isolation system, In transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea, c2014.
5. Kim MK, Choun YS, Choi IK, Seo JM, A study of seismic capacity of nuclear equipment with seismic isolation system, KAERI/TR-2765/2004, Korea Atomic Energy Research Institute, c2004
6. Ju HK, Choun YS, Kim MK, Peak-Broadening of floor response spectra for base isolated nuclear structures, In Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Gyeongju, Korea, c2015.
7. Korea Electric Power Industry Code, STC Seismic isolation design, Korea Electric Association, forthcoming.
8. Skinner RI, Robinson WH, Mcverry GH, An introduction to seismic isolation, New York; John Wiley & Sons, Inc; c1993, 354 p.
9. Naeim F, Kelly JM, Design of seismic isolated structures from theory to practice, USA; John Wiley & Sons, Inc; c1999, 289 p.
10. Ali A, Hayah NA, Kim DK, Cho SG, Probabilistic seismic assessment of base-isolated NPPs subjected to strong ground motions of Tohoku earthquake, Nuclear Engineering and Technology, 2014 Jun 13;46(5):699-706.
11. Huang Y, Whittaker AS, Kennedy RP, Mayes RL, Assessment of base-isolated nuclear structures for design and beyond-design basis earthquake shaking, Technical Report MCEER-09-0008, Buffalo NY:MCEER, c2009.
12. Jung JW, Jang HW, Kim JH, Hong JW, Effect of second hardening on floor response spectrum of a base-isolated nuclear power plant, Nuclear Engineering and Design, 2017 Oct;322:138-147.
13. NRC, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants regulatory guide 1.60, US Nuclear Regulatory Commission, c1973.
14. P-CARES, Probabilistic computer analysis for rapid evaluation of structures, U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001, NUREG/CR-6922, c2007.