2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

쌍일차 모델과 격리모드 계측가속도를 이용한 지진격리장치의 이력거동 추정

Estimation of Hysteretic Behaviors of a Seismic Isolator by Using the Bilinear Model and Measured-Isolation-Mode-Accelerations

박현우, 전영선, 서정문
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 유성우체국 사서함 105 호

요 약

지진시 지진격리장치의 이력거동을 쌍일차모델과 격리모드 계측가속도를 이용하여 추정한다. 지진격리구조물의 동적거동을 격리모드공간에서 유도된 단자유도 상미분 방정식을 이용하여 근사화한다. 지진격리장치의 이력거동추정을 위해 쌍일차 모델과 단자유도 상미분 방정식에 근거한 시간영역 SI 을 사용한다. 시간영역 SI 에서는 격리모드 계측가속도와 상미분 방정식에서 계산된 격리모드 계산가속도의 차이를 최적화시키는 정규화된 output error estimator 를 사용한다. 제안된 방법을 6 자유도 지진격리구조물문제에 적용시켜 타당성을 검증한다.

Abstract

Hysteretic behaviors of a seismic isolator under earthquakes are estimated by using the bilinear model and measured-isolation-mode-accelerations. Dynamic responses of a seismically isolated structure are approximated from the SDOF ordinary differential equation in the isolation mode space. A time domain system identification (TDSI) method is employed to identify the hysteretic behaviors based on the bilinear model and SDOF ordinary differential equation. A regularized output error estimator is adopted in the TDSI, in which the differences between measured-isolation-mode-accelerations and calculated-isolation-mode-accelerations are minimized. The validity of the proposed method is demonstrated through the numerical examples of a 6-DOF seismically isolated structure.

1. 서론

지진격리장치는 기본적으로 대상구조물의 고유진동수를 감소시킴으로써 지진발생시 구조물에 발생하게 되는 지진력과 진동을 감소시킬 뿐만 아니라 대부분의 지진에너지를 지진격리장치내에서 소산시킴으로써 대상구조물에 전파될 고주파영역의 지진에너지를 감쇠시키는 역할을 하게 된다.

지진격리장치가 설치되어 있는 지진격리구조물은 탄성거동을 하는 일반구조물과는 달

리 면진장치의 큰 에너지 소산능력 때문에 매우 심한 비선형 거동을 하게 된다. 따라서, 합리적인 지진격리장치설계와 지진후의 지진격리장치 손상 평가를 위해서는 지진시 지진격리장치에 의해 소산된 에너지의 크기와 최대 변위 등을 추정해야 한다. 이를 위해서 지진격리장치의 비선형거동을 모사할 수 있는 구성모델에 근거한 지진격리구조물의 동적해석이 필요하다.

수학적 관점에서 지진격리장치는 이력모델(hysteretic model)로 표현할 수 있다 [1]. 현재까지 다양한 종류의 이력모델들이 제안되어 왔고, 지진격리장치에 대한 구성모델들도 이러한 이력모델들에 근거해 있다. 지진격리에 널리 사용되고 있는 적층고무 베어링이나 납-고무 베어링의 구성모델을 위해서 쌍일차모델(bilinear model)또는 Bouc-Wen 모델이 사용되어 왔다 [2]. 이 두 모델은 적은 수의 형상계수를 이용해서 지진격리장치의 거동을 효과적으로 표현할 수 있는 장점을 가지고 있다.

일반적으로 적절히 설계된 지진격리구조물의 동적거동은 격리모드(isolation mode)에 의해 지배받는다 [2]. 지진격리장치의 강성이 상부구조물의 강성에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 발생하는 격리 모드에서는 강성이 강한 상부구조물은 강체에 가깝게 거동하고 지진격리장치는 변위와 속도에 따라 이력거동을 하게 된다. 지진격리장치의 설계시 상부구조물을 강체로 가정하는 것이 타당성을 갖는 것은 이러한 격리모드의 특성때문이다.

이 연구에서는 지진시 지진격리구조물에 설치되어 있는 가속도계로부터 측정된 가속도를 이용하여 실제 지진격리장치에 발생한 이력거동을 추정하는 기법을 제안한다. 지진격리구조물의 동적거동은 지진격리장치의 이력거동에 의해 발생되는 격리모드에 의해 지배적으로 영향을 받기 때문에, 지진격리구조물의 다자유도 동적방정식을 격리모드공간상의 단자유도 상미분 방정식으로 근사화할 수 있다. 이 근사화과정을 통해서 실제 지진격리장치의 이력거동은 격리모드공간으로 그대로 투영된다. 격리모드공간에서 지진격리장치의 이력거동추정을 위해 쌍일차 모델과 단자유도 상미분 방정식에 근거한 시간영역 SI 을 도입한다 [3-5]. 시간영역 SI 에서는 격리모드로 투영시킨 계측가속도인 격리모드 계측가속도와 상미분 방정식에서 구해진 격리모드 계산가속도의 차이를 최적화시키는 정규화된 output error estimator [5]을 사용한다. 격리모드 가속도를 구할 때, 쌍일차 모델로 인해 발생되는 비선형문제는 Newton-Raphson 방법으로 풀고 가속도 시간적분은 Newmark-β방법을 사용한다. 최적화에 사용되는 시스템 변수는 쌍일차모델의 탄성강성, 항복변위, 항복후 강성이다. 최적화에 필요한 시스템 변수에 대한 응답의 민감도 행렬은 직접미분법을 사용해서 계산한다 [3]. 제안된 방법을 지진하중하의 다자유도 격리구조물문제에 적용시켜 타당성을 검증한다.

2. 지배방정식과 쌍일차 모델

지진격리구조물은 그림 1 과 같이 지진격리장치의 역학적 특성에 의해서 탄성거동을 하는 상부 구조물과 비선형 이력거동을 하는 지진격리장치로 구분할 수 있다. 지진격리구조물의 거동을 나타내는 지배방정식은 지반운동하의 다자유도 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{Ma}+\mathbf{Cv}+[\mathbf{K}_s+\mathbf{K}_b]\mathbf{u}=-\mathbf{M1}a_g \tag{1}$$

여기서, $\mathbf{M}(n\times n)$, $\mathbf{C}(n\times n)$, $\mathbf{K}_s(n\times n)$, $\mathbf{K}_b(n\times n)$, $\mathbf{a}(n\times 1)$, $\mathbf{v}(n\times 1)$, $\mathbf{u}(n\times 1)$, 그리고 a_g는 각각, 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 상부구조물의 강성행렬, 지진격리장치의 강성행렬, 지반에 대한 상대가속도 벡터, 속도벡터, 변위벡터, 그리고 지반의 입력가속도를 나타낸다.

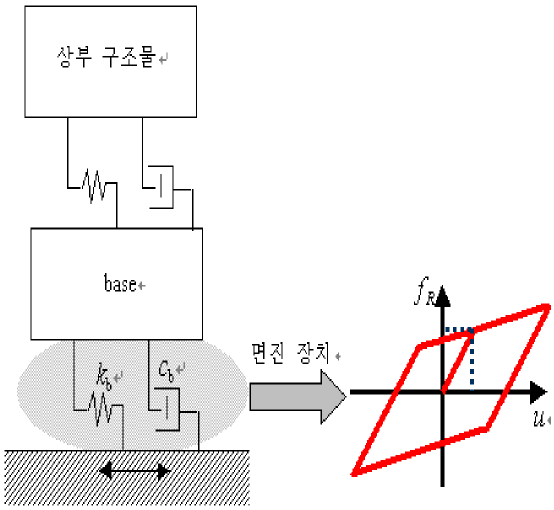

그림 1. 지진격리구조물의 개념도

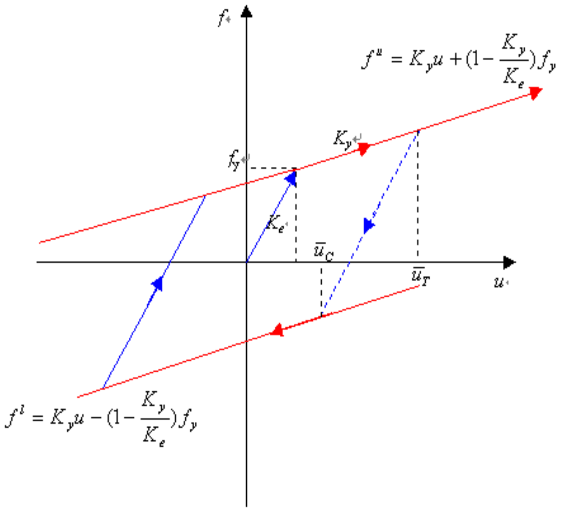

그림 2. 쌍일차 모델

그림 1 의 지진격리장치의 기본 요소 구성모델은 다음과 같은 변위-힘 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{df_b}{du_b}=k_b(v_b,u_b)\ ,\quad f_b=0\,(u{=}0,\ v{=}0) \tag{2}$$

여기서, v_b, u_b, f_b, 그리고 k_b 는 각각 지진격리구조물의 하부 base 의 속도, 변위, 지진격리장치 의한 복원력, 그리고 속도와 변위에 의해 달라지는 지진격리장치의 강성이다.

그림 2 의 쌍일차 모델은 지진격리장치 모델링에 가장 많이 쓰이는 구성 모델로서 모델링이 직관적이고 간편하다. 특히 적층고무 베어링이나 납 고무 베어링의 거동을 평균적으로 모사하는데 적합하다. 쌍일차 모델은 그림 2 와 같이 K_e, K_y, u_y (또는 f_y)의 3 개 물리량에 의해서 결정된다. 크게 탄성 상태, 인장 항복 상태, 압축 항복 상태로 나뉘는데 각각의 복원력은 다음과 같다 [3].

$$f_b=\begin{cases} f_y+K_y(\bar{u}_T-f_y/K_e)-K_e(\bar{u}_T-u_b) & :\text{탄성} \\ f_y+K_y(\bar{u}_T-f_y/K_e) & :\text{인장항복} \\ -f_y+K_y(\bar{u}_C+f_y/K_e) & :\text{압축항복} \end{cases} \tag{3}$$

이 3 개의 물리량은 이력 곡선의 형상을 결정한다고 해서 형상계수라고 불리기도 한다.

쌍일차 모델을 소성역학의 관점에서 보면 K_e 를 탄성 강성, K_y 를 항복후 강성, u_y 는 초기 항복 변위라고 부를 수 있다. 지진격리구조물에서 지진격리장치에 의한 지진격리 효과는 구조물의 특성과 지진 특성을 잘 고려한 후 3 가지 물리량을 적절히 결정함으로써 극대화 시킬 수 있다.

3. 격리모드공간상의 지배방정식

지진격리장치의 강성이 상부구조물의 강성에 비해 상대적으로 매우 작게 설계되기 때문에 발생하는 격리 모드에서는 강성이 강한 상부구조물은 강체에 가깝게 거동하고 지진격리장치는 변위와 속도에 따라 이력거동을 하게 된다. 이러한 지진격리구조물의 동특성을 이용하면 식(1)의 지진격리 구조물의 다자유도 동적방정식을 격리모드공간상의 단자유도 상미분 방정식으로 근사화할 수 있다. 질량행렬에 대해 기준화된 격리모드의 고유벡터를 $\hat{\boldsymbol{\phi}}$ 라고 할 때 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{a} + \hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{C} \hat{\boldsymbol{\phi}} \hat{v} + \omega^2 \hat{u} = -\hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{M1} a_g \tag{4}$$

여기서 $\hat{a}, \hat{v}$,그리고 $\hat{u}$ 는 격리모드에서의 모달 가속도 $(\hat{\boldsymbol{\phi}}\mathbf{a})$, 속도 $(\hat{\boldsymbol{\phi}}\mathbf{v})$, 변위 $(\hat{\boldsymbol{\phi}}\mathbf{u})$ 이고, ω는 격리모드에서 각진동수를 나타낸다.

격리모드의 유효질량 m^* [$\equiv (\hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{M1})^2$]은 구조물의 동적 거동시 전체 질량중 격리모드에 기여하는 질량의 크기를 나타낸다. 가장 이상적인 지진격리가 이루어질 때 격리모드에서 상부구조물은 강체모드를 갖게 되고 유효질량 m^* 은 전체질량의 크기와 같다고 가정할 수 있다 [2].

$$m^* \approx \sum_{j=1}^{n} m_j \tag{5}$$

식 (4)의 양변에 격리모드 유효질량(m^*)을 곱한 다음 $\hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{M1}$ 으로 나누면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m^* \tilde{a} + c^* \tilde{v} + k^* \tilde{u} = -m^* a_g \tag{6}$$

여기서 $c^*, k^*, \tilde{a}, \tilde{v}$ 그리고 $\tilde{u}$ 는 각각, 격리모드 유효감쇠, 격리모드 유효강성, 격리모드 가속도, 격리모드 속도, 그리고 격리모드 변위를 나타낸다.

$$\begin{gathered} m^* \equiv (\hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{M1})^2, c^* \equiv (\hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{C} \hat{\boldsymbol{\phi}}) m^*, k^* \equiv m^* \omega^2, \\ \tilde{a} \equiv \frac{\hat{a}}{\hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{M1}}, \tilde{v} \equiv \frac{\hat{v}}{\hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{M1}}, \tilde{u} \equiv \frac{\hat{u}}{\hat{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{M1}} \end{gathered} \tag{7}$$

격리모드 유효강성은 식(2)에서 주어지는 지진격리장치의 강성과 밀접한 관계를 가지게 된다. 특히 격리모드에서 상부구조물의 거동이 강체운동에 가까워질수록 식(6)의 유효강성은 식(2)의 지진격리장치의 강성에 가까워지게 된다. 따라서 식(6)의 유효강성은 식(2)의 관계식을 따르게 된다. 지반가속도 운동에 의해 구조물에 발생하는 힘이 모두 격리모드에서 발생되기 때문에 실제 지진격리장치의 이력 거동시에 발생하는 복원력도 격리모드에서 발생하는 복원력으로 나타낼 수 있다.

4. 시간영역 SI 와 민감도

쌍일차 모델을 사용하여 TDSI 에서 지진격리장치의 이력거동을 추정하는 기법을 소개한다. 쌍일차 모델은 지진격리장치에 널리 사용되는 적층고무 베어링(layered rubber bearing)과 납고무 베어링(lead rubber bearing)의 시간이력 해석시 구성모델로 채용되어 왔다. 쌍일차 모델을 결정하기 위해서는 그림 2 에서 볼 수 있듯이 탄성강성(K_e), 항복변위(u_y), 항복후 강성(K_y)의 세개의 독립적인 계수를 결정하게 되는데, 이들 세개의 계수를 각각 지진격리장치의 이력거동 추정을 위한 시스템 변수로 정의한다. 이들 세개의 시스템 변수는 TDSI 에서 시간상 바뀌지 않는 시간 불변치들(time-invariant properties)이므로 이들 물성치를 추정하는 TDSI 를 시간불변 TDSI 라고 일컫는다 [3].

지진격리구조물에서 측정된 가속도 응답을 격리모드공간으로 투영한 격리모드 측정가속도를 이용해서 쌍일차 모델상의 세개의 시스템 변수를 구하는 정규화된 TDSI 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underset{\mathbf{x}}{\text{Minimize}}\ \pi = \frac{1}{2}\sum_{t=0}^{n_t}\left\|\tilde{a}^t(\mathbf{x}) - \bar{a}^t\right\|_2^2 + \frac{1}{2}\lambda^2\left\|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0\right\|_2^2 \qquad \mathbf{R}(\mathbf{x}) \le \mathbf{0} \tag{8}$$

여기서, $\tilde{a}^t, \bar{a}^t$, λ, 그리고 n_t는 각각 t 시간 단계에서 격리모드 계산가속도와 격리모드 측정가속도, 정규화 계수, 그리고 시간에 대한 총 계측회수를 나타낸다. 계측 시간 간격은 수치해석에 사용되는 시간 간격과 같은 것으로 간주한다. 또, $\mathbf{x}=(K_e, K_y, u_y)^{\mathrm{T}}$ 는 추정하고자 하는 쌍일차 모델의 세개의 계수로 이루어진 시스템 변수 벡터이고, $\mathbf{x}_0 = (K_e^0, K_y^0, u_y^0)^{\mathrm{T}}$ 은 쌍일차 모델의 세개의 계수에 대한 기지 어림값이다. $\mathbf{R}$ 은 세개의 계수가 물리적 의미를 가질 수 있도록 설정된 부등식형 구속 조건이다.

격리모드 계산가속도 $\tilde{a}^t$는 식(6)으로부터 구할 수 있고, 격리모드 측정가속도 $\bar{a}^t$는 실제 구조물의 계측가속도를 다음과 같이 격리모드공간 사상을 통해서 얻을 수 있다.

$$\bar{a} \equiv \frac{\hat{\boldsymbol{\phi}}^{-T}\bar{\mathbf{a}}}{\hat{\boldsymbol{\phi}}^{T}\mathbf{M}\mathbf{1}} \tag{9}$$

여기서, $\hat{\boldsymbol{\phi}}^{-T}$ 와 $\bar{\mathbf{a}}$ 는 각각, 질량행렬에 대해 기준화된 고유행렬의 역행렬에서 격리모드에 해당하는 열벡터의 전치항과 측정가속도 벡터를 나타낸다.

$\lambda(>0)$는 정규화 계수라 하고, 오차함수와 정규화함수의 비중을 조정하는 역할을 한다.

정규화 계수를 너무 크게 설정하면 정규조건이 과장되어 추정된 해가 실제와 많이 다를 수 있고 반대로 너무 작게 설정하면 수치적인 불안정성이 발생하게 된다 [3-6]. 적절하게 결정된 정규화 계수는 계측오차로부터 파생되는 해의 진동성분을 제거하고 정의된 정규조건을 추정된 해에 부과함으로써, 수치적인 안정성을 가지는 동시에 물리적으로 의미있는 해를 도출할 수 있다. 이를 위해서, 최적의 정규화 계수를 결정해야 하는데, 여기서는 기하평균법(geometric mean scheme; GMS)을 이용하여 결정한다 [6].

식(8)은 시스템 변수 **x** 에 대한 비선형 최적화 문제이다. 따라서 이차 종속 문제형태로 치환한 후 반복적으로 계산해야 한다. 이차 종속 문제에서 필요한 민감도 행렬은 식(6)의 시간에 대한 증분식을 직접 미분함으로써 유도할 수 있다.

$$m^*\frac{\partial\Delta\tilde{a}}{\partial x_p}+c^*\frac{\partial\Delta\tilde{v}}{\partial x_p}+\frac{\partial(k^*\Delta\tilde{u})}{\partial x_p}=0 \tag{9}$$

여기서 편의상 $p(=1, 2, 3)$은 시스템 변수 벡터의 각각의 성분을 나타내는 아래 첨자이고, $x_1 \equiv K_e$, $x_2 \equiv K_y$, $x_3 \equiv \sigma_y$ 이다. $\Delta\tilde{a}$, $\Delta\tilde{v}$, $\Delta\tilde{u}$ 는 각각 시간단계 t-1 에서 t 단계로 넘어갈 때 발생하는 격리모드 가속도, 격리모드 속도, 격리모드 변위의 증분이다. 주목할 것은 각각의 증분값들이 수치해석 과정을 거쳐서 각각의 시간단계에서 수렴된 값이라는 점이다. 매 시간단계에서 민감도를 계산하기 전에 비선형 해석을 위한 수치해석을 수행하기 때문에 수치해석에서 수렴된 결과값들을 이용해서 매 시간단계에서 민감도를 구할 수 있다. 쌍일차 모델에서 사용되는 시스템 변수에 대한 민감도를 구하는 과정은 참고문헌[3]에 자세히 소개되어 있다.

5. 예제 – 6 자유도 지진격리구조물의 이력 거동 추정

제안된 방법을 이용하여 그림 3 의 6 자유도 지진격리구조물에서 측정된 가속도 응답을 이용해서 지진격리장치에 발생한 이력거동을 추정하는 예제를 수행한다 [3]. 표 1 은 상부구조물과 지진격리장치의 사양을 나타내었다. 여기서 항복변위는 지진격리장치의 항복력 대 지진격리구조물의 총 중량의 비가 5%가 되도록 설정하였다. 지진하중은 1940 년 El-centro 지반가속도(PGA=0.308g)를 사용하였다. 측정 가속도 응답은 표 1 에 나온 물성치를 가지는 전단빌딩 모델을 식(1)을 Newton-Raphson 방법과 Newmark-β방법을 이용하여 수치적으로 계산된 가속도로 설정하였다. 총 측정시간은 40 초이고 시간간격은 0.02 초이다.

식(6)과 식(8)에 근거한 시간영역 SI 를 이용하여 지진격리장치의 이력거동을 추정하기 위해서는 격리모드벡터와 격리모드상에서의 유효질량, 유효감쇠, 유효강성의 초기값을 적절히 가정하고 이를 이용해서 격리모드 측정가속도를 구해야 한다. 이를 위해 지진격리구조물에서 쌍일차 모델에 근거한 지진격리장치 설계에 널리 쓰이고 있는 단자유도 방법[2-3]을 사용하여 표 1 의 주기와 감쇠비를 가질 수 있도록 지진격리장치의 탄성강성(6785.4 KN/m)과 항복후 강성(1085.7KN/m)을 가정하였다. 상부구조물의 강성은 지진격리장치의 강성에 비해 매우 크다고 가정(지진격리장치 탄성강성의 10^4 배)하여 격리모드가 강체모드에 가깝도록 설정하였다. 질량의 초기치는 강성에 비해 정확하게 추정할 수 있

다고 가정하고 표 2 의 질량을 사용하였다. 가정된 물성의 초기치로부터 구조물의 고유치 해석을 통해서 계산된 격리모드벡터와 격리모드에서의 유효질량, 유효감쇠, 유효강성은 표 3 와 같다. 각각의 유효질량, 유효감쇠, 유효강성은 단자유도계법에서 계산된 질량, 감쇠, 강성의 초기값과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

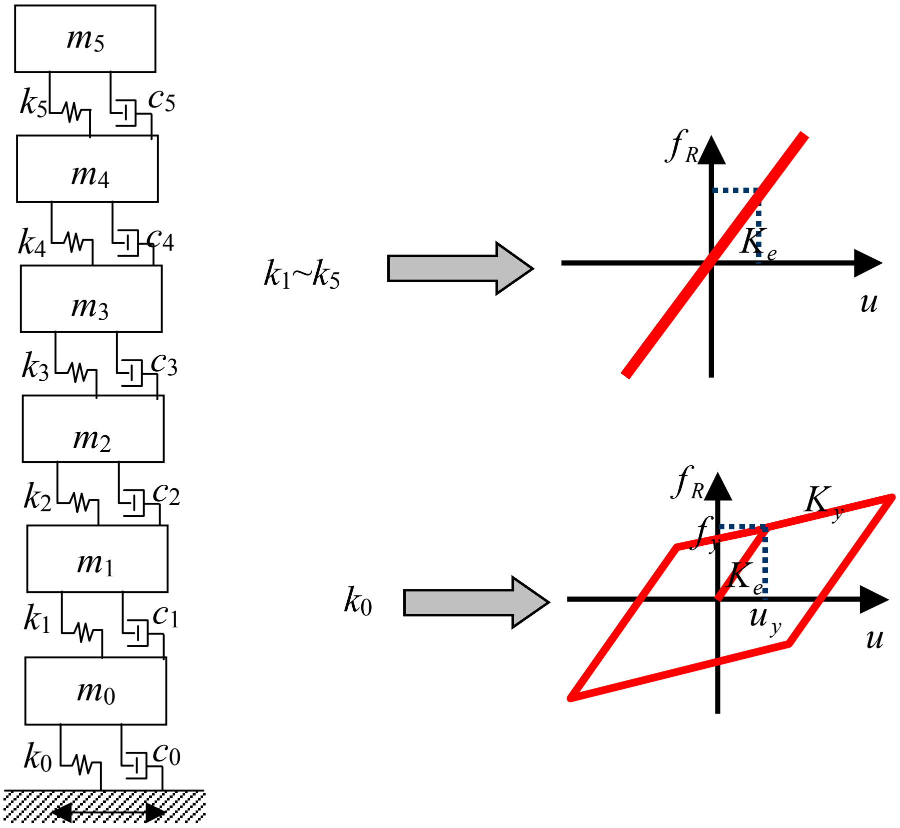

그림 3 지진격리구조물의 계측가속도 모사를 위한 6자유도 전단빌딩모델

표 1. 계측 가속도 수치 모사를 위한 지진격리구조물의 사양

(a) 지진격리구조물의 주기 및 감쇠비

	격리전(고정단)	격리후(쌍일차 모델)	
1차 모드 주기	0.5 초	탄성상태	0.8 초
		소성상태	2.0 초
1차 모드 감쇠비	5%	상부구조물	5%
		면진장치	2%

(b) 지진격리구조물의 질량, 강성, 감쇠 계수, 항복 변위

	격리전(고정단)	격리후(쌍일차 모델)
상부 구조물 질량 (m_1~m_5)	20 ton	20 ton

BASE 질량 (m_0)	NA	10 ton	
스프링 강성 (k_1~ k_5)	38991 KN/m	38991 KN/m	
스프링 강성 (k_0)	NA	탄성상태	3207.0 KN/m
		소성상태	1144.0 KN/m
감쇠기 감쇠 계수(c_1~ c_5)	310.3077 KN·sec/m	310.31 KN·sec /m	
감쇠기 감쇠 계수(c_0)	NA	18.19 KN·sec /m	
항복변위 (u_y)	NA	1.68 cm	

표 2 에서 구한 격리모드의 물성치를 식(6)과 식(8)에 대입하여 지진격리장치의 이력을 추정한다. 이력거동 추정을 위한 쌍일차 모델의 탄성 강성과 항복후 강성은 각각 탄성상태의 유효강성, 소성상태의 유효강성을 사용한다. 식(8)에서 필요한 격리모드 측정가속도는 각층에서 계측된 가속도를 표 2 의 격리역모드벡터와 식(9)로부터 변환하여 구한다.

표 2. 격리모드벡터 및 격리모드상에서 초기 물성치

격리모드벡터($\hat{\phi}^T$)	[0.0954,0.0954,0.0953,0.0953,0.0953,0.0953]	
격리역모드벡터($\hat{\phi}^{-T}$)	[1.9071,1.9071,1.9070,1.9069,1.9068,0.9533]	
유효질량(m^*)	110.0 ton	
유효감쇠(c^*)	13.8205KN/m·sec	
유효강성(k^*)	탄성상태:6784.1 KN/m	소성상태:1085.5KN/m
초기항복변위(u_y)	0.80cm	

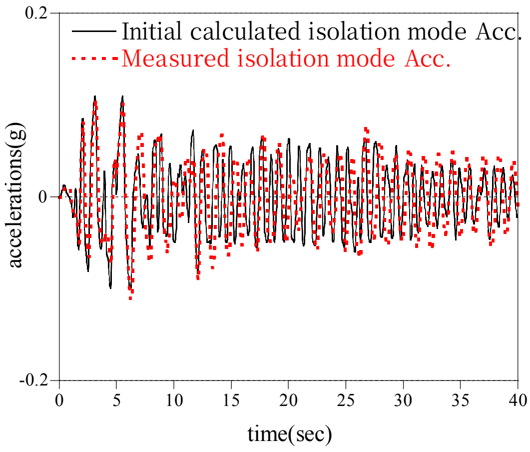

그림 4. 초기 물성치을 이용한 격리모드계산가속도와 격리모드계측가속도 비교

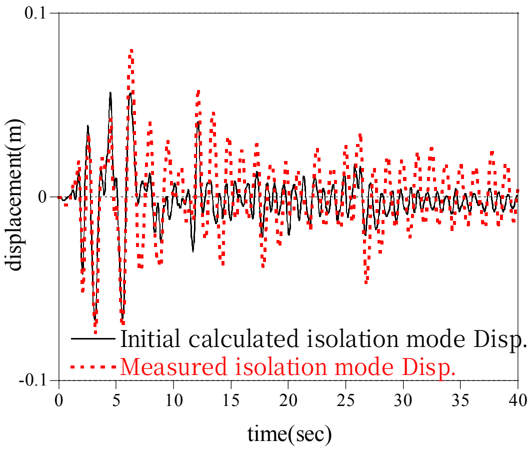

그림 5. 초기 물성치를 이용한 격리모드계산변위와 격리모드계측변위 비교

그림 4 와 그림 5 는 표 2 에서 주어진 초기 물성치를 이용해서 식(6)을 풀었을 때 격리모드공간상에서 구한 각각의 계산가속도와 측정가속도, 그리고 계산변위와 측정변위를 비교한 것이다. 그림 4 에서 초기 물성치가 단자유도 방법에 의해서 격리주기만을 맞추도록 결정되었기 때문에 실제 지진격리구조물의 동적응답과 비교했을 때 상당한 괴리를 보이고 있습을 알 수 있다 [3]. 그림 6 과 그림 7 에서는 표 2 에 주어진 초기 물성치를 이용해

서 지진격리모드에서 환산된 지진격리장치의 이력곡선, 소산에너지를 실제 지진격리구조물의 지진격리장치에서 발생한 이력곡선, 소산에너지와 각각 비교하였다. 동적응답과 마찬가지로 단자유도법에 의해 결정된 초기 물성치에 의해 식(6)으로부터 얻어진 이력곡선, 소산에너지가 실제 격리구조물의 경우와 많은 차이가 있습니을 알 수 있다.

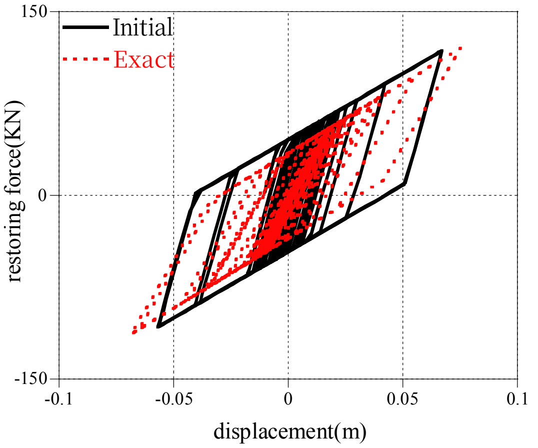

그림 6. 초기 물성치로부터 계산된 이력곡선과 실제지진격리장치의 이력곡선 비교

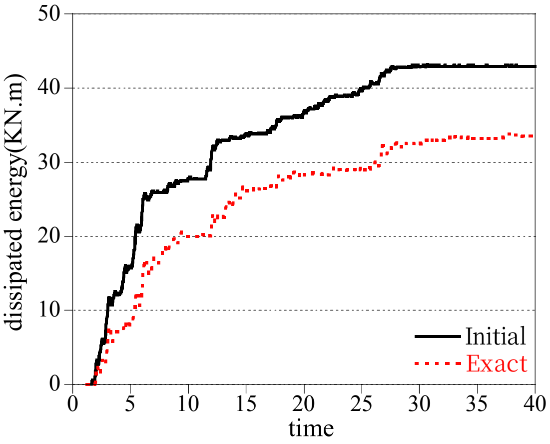

그림 7. 초기 물성치로부터 계산된 소산에너지와 실제지진격리장치의 소산에너지 비교

그림 8 과 그림 9 는 식(8)의 시간영역 SI 에서 추정된 시스템변수로부터 계산된 격리모드 가속도와 격리모드 측정가속도, 그리고 격리모드 변위와 격리모드 측정변위를 각각 비교한 것이다. SI 에 의해 추정된 시스템변수로부터 계산된 동적거동이 실제 지진격리구조물의 동적거동을 정확하게 일치함을 알 수 있다. 그림 10 과 그림 11 에서는 SI 로부터 추정된 물성치로부터 환산된 지진격리장치의 이력거동, 소산에너지를 실제 지진격리장치에서 발생한 이력거동, 소산에너지와 각각 비교하였다. 실제 지진격리장치의 이력거동과 소산에너지를 매우 정확하게 추정하고 있음을 확인할 수 있다.

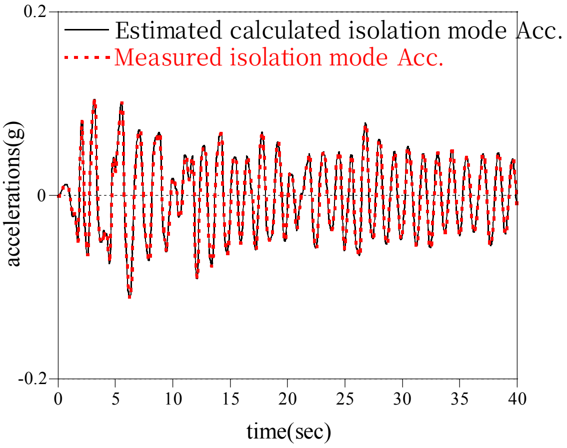

그림 8. 시간영역 SI 에서 추정된 격리모드 가속도와 격리모드계측가속도 비교

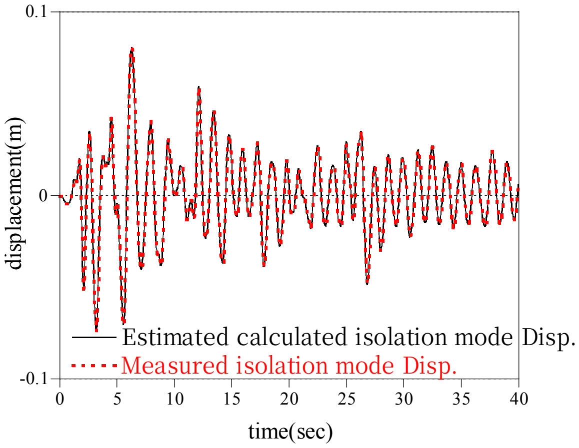

그림 9. 시간영역 SI 에서 추정된 격리모드 변위와 격리모드계측변위 비교

표 3 은 식(8)의 시간영역 SI 에 의해 추정된 시스템 변수와 실제 지진격리장치의 물성

치를 비교하였다. 그림 6 에서 초기 물성치에 의해 계산된 이력곡선, 소산에너지와 실제 이력곡선, 소산에너지의 차이는 표 3 와 같이 탄성강성과 초기항복변위의 큰 상대오차에 의해 발생한다. 그림 10 과 그림 11 에서 실제 이력곡선과 소산에너지를 정확하게 추정할 수 있는 것은 바로 표 3 과 같이 시간 영역 TDSI 에서 탄성계수와 초기항복변위가 실제 물성치와 10%내외로 근사하게 추정되었기 때문이다. 특히 이력거동시 손상평가에 중요한 역할을 하는 총소산에너지의 크기에서 추정된 물성치로부터 계산된 총소산에너지가 실제 총소산에너지와 일치하는 것은 주목할만 하다.

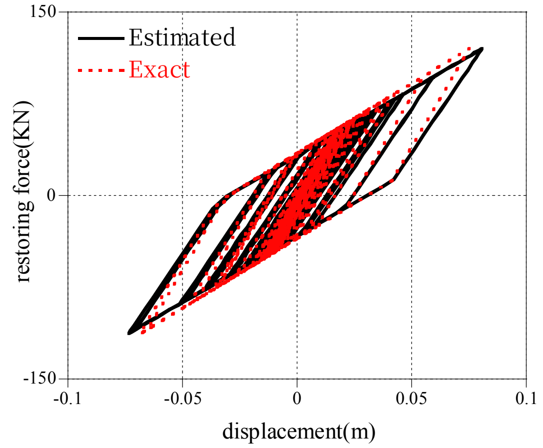

그림 10. 시간영역 SI 에서 추정된 이력곡선과 실제지진격리장치의 이력곡선 비교

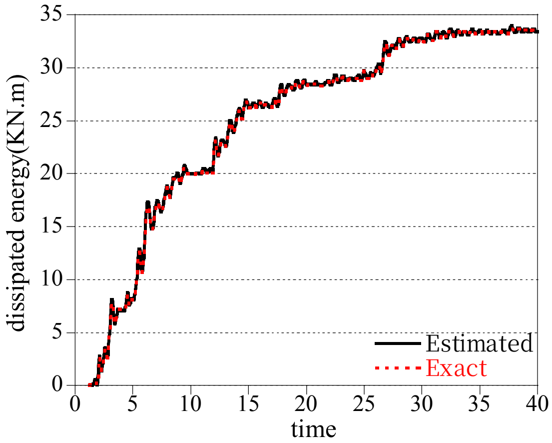

그림 11. 시간영역 SI 에서 추정된 소산에너지와 실제지진격리장치의 소산에너지 비교

표 3.시간영역 SI 로부터 추정된 물성치와 그 결과 계산된 최대변위와 총소산에너지

	초기 물성치	추정된 물성치	실제 물성치(정해)
K_e (KN/m)	6785.4 (+112%)	2780.0 (-13%)	3207.0
K_y (KN/m)	1085.7 (-5%)	1086.0 (-5%)	1144.0
u_y (cm)	0.80 (-52%)	1.94 (+13%)	1.68
최대변위(cm)	6.7 (-11%)	8.1 (+8%)	7.5
총소산에너지(KN·m)	43.2 (+28%)	34.0 (+1%)	33.8

( )은 실제 물성치와의 상대오차

6. 결론

지진시 지진격리구조물에 설치되어 있는 가속도계로부터 측정된 가속도를 이용하여 실제 지진격리장치에 발생한 이력거동을 추정하는 기법을 제안하였다. 지진격리구조물의 다자유도 동적방정식을 격리모드공간상의 단자유도 상미분 방정식으로 근사화하였다. 격리모드공간에서 지진격리장치의 이력거동추정을 위해 쌍일차 모델과 단자유도 상미분 방정식에 근거한 시간영역 SI 을 도입하였다. 시간영역 SI 에서는 격리모드로 투영시킨 계측가속도인 격리모드 계측가속도와 상미분 방정식에서 구해진 격리모드 계산가속도의 차이를 최적화시키는 정규화된 output error estimator 을 사용하였다. 격리모드 가속도를 구할 때, 쌍일차 모델로 인해 발생되는 비선형문제는 Newton-Raphson 방법으로 풀고 가속도 시간

적분은 Newmark-β방법을 사용하였다. 최적화에 필요한 시스템 변수에 대한 응답의 민감도 행렬은 직접미분법을 사용해서 계산하였다. 제안된 방법을 6 자유도 지진격리구조물의 지진격리장치의 이력거동 추정문제에 적용시켰다. 그 결과 지진격리구조물상에서 측정된 가속도만을 이용해서 지진격리구조물의 동적거동과 지진격리장치의 이력거동을 동시에 정확하게 추정할 수 있었다. 제안된 방법은 향후 지진 발생직후 구조물에 설치된 지진격리장치의 정량적인 손상진단에 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계 당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. Macki, J.W., Nistri, P., and Zecca, P., “Mathematical models for hysteresis,” *SIAM Review*, **35**, 94-123 (1993)

2. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H., *An Introduction to Seismic Isolation,* John Wiley and Sons: Chichester (1993)

3. 박현우, 전영선, 서정문, “면진 장치의 손상 진단을 위한 시간 영역 시스템 확인 기법 개발”, 한국원자력연구소 기술보고서, KAERI/TR-2439/2003 (2003)

4. Park, H.W. and Choun, Y.S., “Time domain system identification for nonlinear behaviors of a seismic isolator using the secant stiffness model,” *presented at the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Yongpyong, Korea, 24-25 Oct (2002)

5. Park, H.W., Choun, Y.S., and Seo, J.M., “Estimation of hysteretic behaviors of a seismic isolator using a regularized output error estimator,” Proceedings of EESK Conference-Spring 2003, 14 Mar., Seoul, 85-92 (2003)

6. Park, H.W., Shin, S.B., and Lee, H.S., “Determination of an optimal regularization factor in system identification with Tikhonov function for linear elastic continua” *International Journal for Numerical Methods in Engineering,* **51**(10), 1211-1230 (2001)