

고감쇠 면진베어링을 이용한 지진응답 감소

구경희*, 이재한, 유봉

한국원자력연구소

요 약

본 논문에서는 복잡한 Hysteretic 복원력-변형률 특성을 갖는 고감쇠 면진베어링에 대한 Hysteretic bi-linear 모델을 사용하여 비교적 해의 정확성을 보장할 수 있는 Runge-Kutta 방법으로 지진해석을 위한 공식을 유도하였다. 그리고 Hysteretic bi-linear 모델을 사용한 면진베어링의 응답해석결과로부터 등가선형모델을 구하여 각각의 모델에 대한 지진응답 특성들을 비교분석하였다. 고감쇠 면진베어링을 전형적인 경수원자로모델에 적용한 결과, 면진구조물은 비면진 구조물에 비하여 가속도응답이 크게 감소함을 알 수가 있었다. 또한 면진베어링의 Hysteretic bi-linear 모델을 사용한 지진응답해석은 등가선형모델에 비하여 최대 변위응답특성은 유사하나 가속도응답은 크게 나타났다.

1. 서 론

원자력발전소에 대한 주요기기 및 계통설계시에 지진하중은 매우 중요한 설계하중으로 작용하며 대부분의 설계여유도를 좌우하게 된다. 본 논문에서는 지진하중에 대한 주요기기 및 계통설계하중을 원천적으로 줄일 수 있는 고감쇠 면진베어링을 사용한 지진응답 감소방안을 연구하고자 한다. 이러한 면진베어링을 사용한 지진응답 감소연구는 최근까지 활발하게 진행되고 있다.[1, 2]

고감쇠 면진베어링은 복원력과 변형률의 관계가 복잡한 Hysteretic 특성을 나타내며 이러한 면진베어링의 특성을 수학적으로 모델링하는 방법에는 여러가지가 있을 수 있으나 본 논문에서는 Hysteretic bi-linear 모델을 사용하였으며 비교적 해의 정확성을 보장할 수 있는 Runge-Kutta 방법을 적용하여 지진해석에 대한 공식화를 유도하였다. 실제로 Hysteretic bi-linear 모델은 Rheology 이론에서 단자유계로 가정한 등가선형모델에 비하여 최대 변위응답은 유사한 결과를 나타내지만 가속도응답은 크게 나타나는 것으로 알려져 있다.[3] 본 연구에서는 Hysteretic bi-linear 모델을 사용한 면진베어링의 응답해석결과로부터 등가선형모델을 구하여 각각의 모델을 이용한 해석결과로부터 지진응답특성을 비교분석하였다.

2. 본 론

2.1 Runge-Kutta 방법을 이용한 지진해석 공식화

지진하중에 대한 일반적인 운동방정식은 질량, 감쇠 그리고 강성행렬을 이용한 이산화된 형태로 표현할 수가 있으며 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}_b\} + [C]\{\dot{x}_b\} + [K]\{x_b\} = -[M]\{\ddot{x}_g\} \quad (1)$$

여기서 x_b 은 지진에 대한 상대응답변위 벡터를 나타낸 것이며 \ddot{x}_g 는 입력지진가속도를 나타낸다. Runge-Kutta 방법을 적용하기 위하여 위의 2차미분방정식으로 표현된 식(1)은 1차미분방정식의 형태로 변형가능해야 하며 이를 위해 변위벡터를 치환하면

$$y_r = \begin{Bmatrix} x_r \\ \dot{x}_r \end{Bmatrix}, \quad \dot{y}_r = \begin{Bmatrix} \dot{x}_r \\ \ddot{x}_r \end{Bmatrix} \quad \text{----- (2), (3)}$$

로 표현할 수 있다. 그리고 y_r 의 1차미분형태를 구하기 위해 가속도 벡터 \ddot{x}_r 는 식(2)를 식(1)에 대입한 다음 정리하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{\ddot{x}_r\} = -[M]^{-1}[K]\{x_r\} - [M]^{-1}[C]\{\dot{x}_r\} - [M]^{-1}[M]\{\ddot{x}_b\}. \quad \text{----- (4)}$$

따라서 식(1)의 2차미분방정식은 치환된 1차미분방정식의 형태로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\{\dot{y}_r\} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{y_r\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -\{\ddot{x}_b\} \end{Bmatrix}. \quad \text{----- (5)}$$

식(5)로부터 구한 변위와 속도에 대한 해로부터 가속도에 대한 응답은 식(4)로부터 구할 수가 있으며 이는 지진에 대한 상대적인 값이며 절대응답은

$$x_{abs} = x_r + x_b, \quad \dot{x}_{abs} = \dot{x}_r + \dot{x}_b, \quad \ddot{x}_{abs} = \ddot{x}_r + \ddot{x}_b \quad \text{----- (6), (7), (8)}$$

로부터 구할 수가 있다.

이러한 Runge-Kutta 방법은 전반적으로 다른 직접적분법에 비하여 비교적 정확한 해를 구할 수가 있으나 이산방정식이 높은 고유진동수를 포함할 경우에는 매우 많은 해석시간이 요구되는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해서는 불필요한 자유도는 제거하여 전체 이산방정식의 고유진동수를 적절한 수준으로 유지할 필요가 있다. 이를 위하여 강성 및 질량행렬에 대한 응축기법(condensation technique)을 이용할 수가 있다. 먼저 강성행렬에 대한 응축은 고려하고자 하는 강성행렬과 요소의 변위와 힘벡터를 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ac} \\ K_{ca} & K_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_a \\ R_c \end{Bmatrix}. \quad \text{----- (9)}$$

여기서 U_a 와 U_c 는 고려하고자 하는 변위벡터와 제거하고자 하는 변위벡터를 각각 나타낸다. 식(9)에서 제거하고자 하는 변위벡터는

$$U_c = K_{cc}^{-1}(R_c - K_{ca}U_a) \quad \text{----- (10)}$$

이다. 따라서 식(10)을 식(9)에 대입하면 다음과 같이 응축된 방정식을 얻을 수가 있다.

$$(K_{aa} - K_{ac}K_{cc}^{-1}K_{ca})U_a = R_a - K_{ac}K_{cc}^{-1}R_c. \quad \text{----- (11)}$$

질량행렬을 응축하기 위해서는 에너지균형을 이용할 수가 있다. 식(11)에서 제거하고자 하는 자유도 U_c 에 대하여 지진하중이 작용하지 않고 질량행렬에 대각선요소만 존재할 경우에는 다음식과 같이 간단히 응축된 질량행렬을 구할 수가 있다.

$$M_{con} = M_{aa} + K_{ca}^T K_{cc}^{-1} M_{cc} K_{cc}^{-1} K_{ca}. \quad \text{----- (12)}$$

2.2 면진베어링의 Hysteretic bi-linear 모델링

면진베어링에 대한 Hysteretic bi-linear 모델은 면진베어링의 관성을 무시한 경우 다음과 같이 간단히 면진베어링에 작용하는 힘의 평형방정식으로 표현할 수가 있다.

$$F_{iso} = K_{iso} x_r + Q. \text{-----} (13)$$

식(13)에서 면진베어링의 스프링계수 K_{iso} 는 골격곡선에 대한 K_1 또는 이력곡선에 대한 K_2 의 값을 가지며 Q 는 상수로서 \pm 값을 가진다. 이러한 면진베어링의 스프링계수 및 상수 Q 는 모두 실험으로 부터 결정될 수 있다. 면진베어링의 감쇠성능은 먼저 골격곡선인 K_1 과 Q 가 결정되면 이력곡선 K_2 의 크기에 좌우되며 또한 K_{iso} 가 결정되면 상수 Q 값에 좌우된다. 그러나 면진베어링의 감쇠성능면에서 등가감쇠 성능이 동일하도록 면진베어링의 스프링계수와 Q 를 다양하게 결정할 수가 있으나 이들 변수가 달라지면 구조물의 응답가속도가 크게 영향을 받을 수 있다.

식(13)을 식(1)에 적용한 다음 상수 Q 를 우변으로 이항하여 정리한 다음, 1차미분방정식 형태인 식(5)와 같이 표현하면 다음과 같다.

$$\{\dot{y}_r\} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{y_r\} + \left\{ -[M]^{-1}([M]\{\ddot{x}_b\}) - \{Q\}_{iso} \right\}. \text{-----} (14)$$

식(14)에 포함되는 면진베어링의 강성행렬은 이전시간의 면진베어링의 상대변위와 현재의 상대변위에 의하여 결정되며 이때 상수 Q 는 K_{iso} 가 정해지면 자동적으로 결정된다.

2.3 적용 예

면진베어링을 이용한 지진응답 감소의 예로서 그림 1과 같은 집중질량-스프링모델을 선정하였다. 그림 1은 전형적인 경수로 원자력발전소의 해석모델을 나타낸 것으로 절점 1에서 절점 10까지는 원자로격납용기를 모델화한 것이며 절점 11에서 17까지는 원자로 내부구조물을 모델화한 것이다. 절점 18은 원자로격납용기의 하부 Base mat을 나타낸 것이다. 이와 같은 상부구조물 모델에 사용된 감쇠는 모든 모드에 대하여 5% Viscous 감쇠를 갖는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 지진가속도 시간이력은 1940 El Centro(NS)를 사용하였으며 해석에 사용된 시간은 40초이다.

면진베어링에 대한 Hysteretic bi-linear 모델에 사용된 변수들은 다음과 같다.

$$K_1 = 2 \times 10^7 \text{ lb/ft}, K_2 = 8 \times 10^7 \text{ lb/ft}, Q = 4 \times 10^6 \text{ lb}.$$

그림 2는 El Centro 지반가속도 입력에 대하여 면진베어링의 상대응답변위에 대응한 면진베어링 복원력을 나타낸 것으로 모든 변위에 걸쳐 많은 Hysteretic 거동이 나타남을 알 수가 있다. 면진베어링의 최대 변형은 0.442ft로써 이때 최대 복원력은 $1.73 \times 10^7 \text{ lb}$ 로 나타났다.

본 논문에서는 면진베어링의 Hysteretic bi-linear 모델을 사용한 응답특성을 등가선형화법을 사용한 모델과 비교하였다. 그림 2에서 면진베어링의 최대 변형률에 대한 Hysteretic 곡선으로 부터 0.5Hz의 단자유도를 갖는 등가선형모델을 구해보면 다음과 같다.

$$K_{eq} = 4 \times 10^7 \text{ lb/ft}, \xi_{eq} = \frac{W_D}{2\pi K_{eq} S_{max}^2} = 0.124, C_{eq} = \frac{W_D}{\pi \omega S_{max}^2} = 3 \times 10^6 \text{ lb sec/ft}.$$

따라서 등가감쇠치는 약 12 %정도로 고감쇠를 나타내고 있다. 그림 3은 절점 7에서의 가속도 시간이력응답해석결과를 나타낸 것이며 그림 4는 가속도 총응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 면진구조물은 비면진 구조물에 비하여 가속도응답이 현저하게 줄어들며 면진베어링의 Hysteretic bi-linear 모델은 등가선형모델에 비하여 가속도응답이 크게 나타난다. 그림 5는 면진베어링의 상대변위 시간이력응답 해석결과를 나타낸 것으로 가속도응답과는 달리 최대 변위응답이 유사함을 알 수가 있다.

3. 결 론

고감쇠 면진베어링을 사용한 지진응답해석결과 면진구조물은 비면진구조물에 비하여 지진응답이 현저하게 줄어들며 면진베어링의 Hysteretic bi-linear 모델은 등가선형모델에 비하여 최대 변위응답은 유사하나 가속도응답은 크게 나타난다. 이는 등가선형모델에는 임의 변위응답과는 무관하게 일정한 강성 및 감쇠치가 적용되는 반면에 Hysteretic bi-linear 모델은 지반가속도의 방향이 변할 때 강성의 변화가 발생하며 Hysteretic 감쇠가 발생하지 않는 구간이 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 이상에서 면진베어링의 해석모델에는 면진베어링의 실질적인 이력특성을 등가선형모델보다 잘 나타내는 Hysteretic bi-linear 모델이 적합한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] H.C. Tsai and J.M. Kelly, 1993. Seismic response of heavily damped base isolation systems. Earthquake engineering and structural dynamics. Vol.22.633-645.
- [2] J.A. Inaudi and J.M. Kelly, 1993. Optimum damping in linear isolator system. Earthquake engineering and structural dynamics. Vol.22.583-598.
- [3] 전영선등,1993, 사용후핵연료 저장시설의 장기적 건전성연구,제2권 사용후핵연료 저장조의 면진구조해석, 한국원자력연구소.

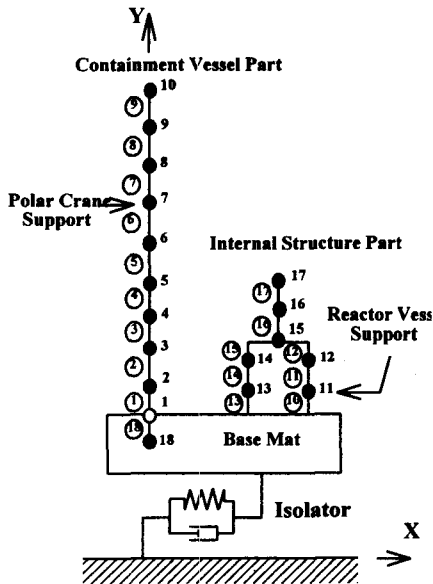


그림 1. 면진구조물 해석모델

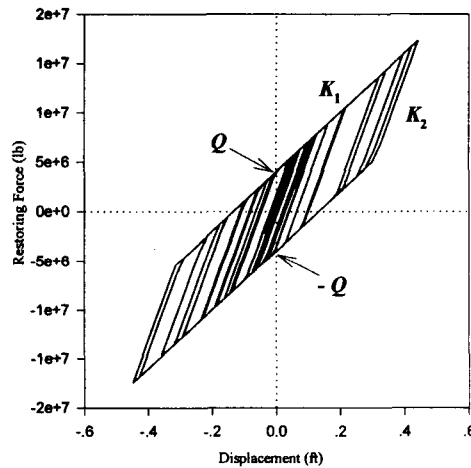
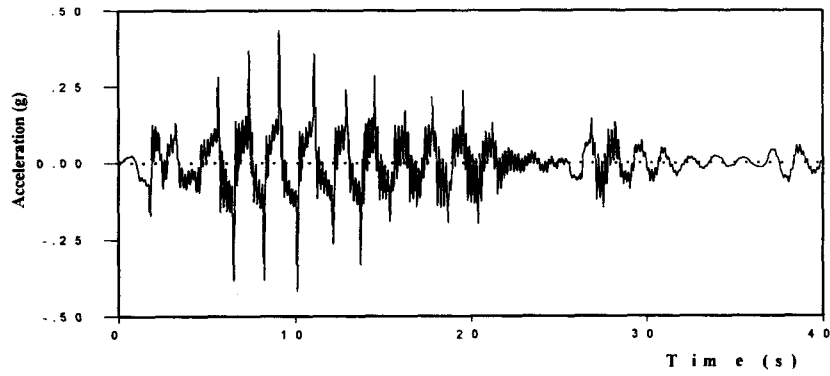
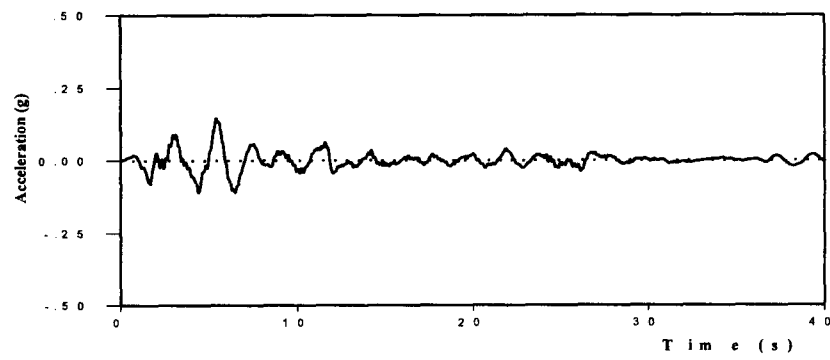


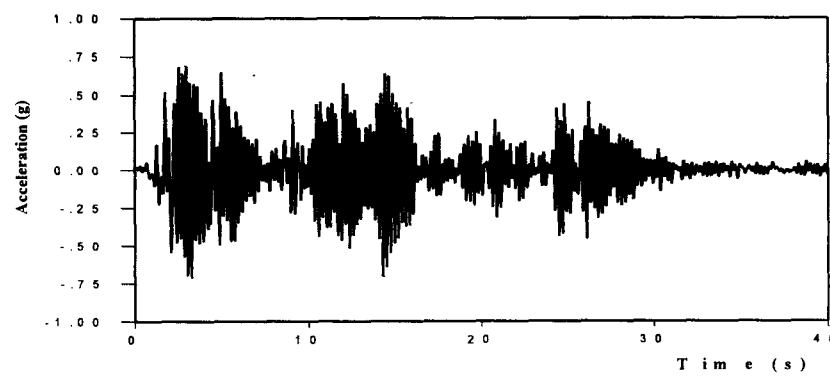
그림 2. 면진베어링 복원력-변형률 응답곡선



(a) Hysteretic bi-linear model



(b) Equivalent model



(c) Non-isolated

그림 3. 절점 7에서의 가속도응답 시간이력

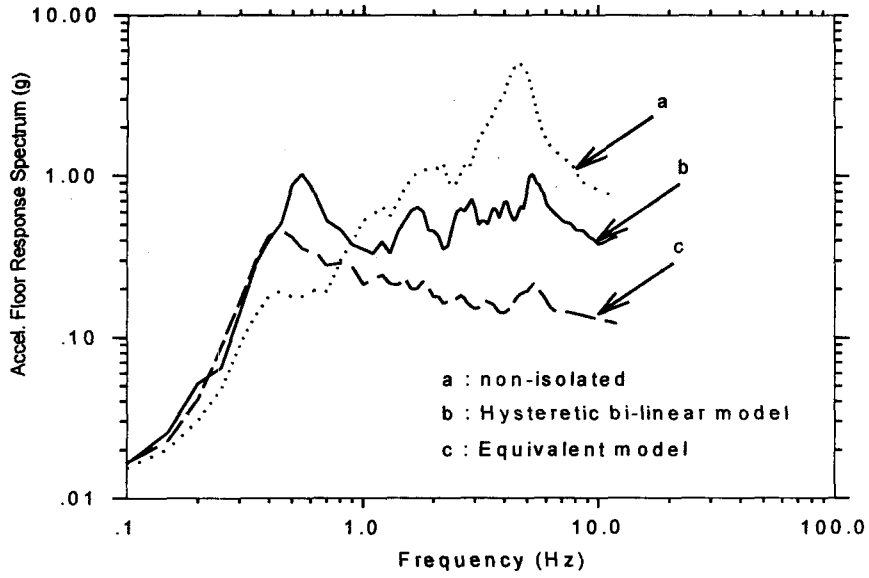


그림 4. 절점 7에서의 가속도 응답스펙트럼

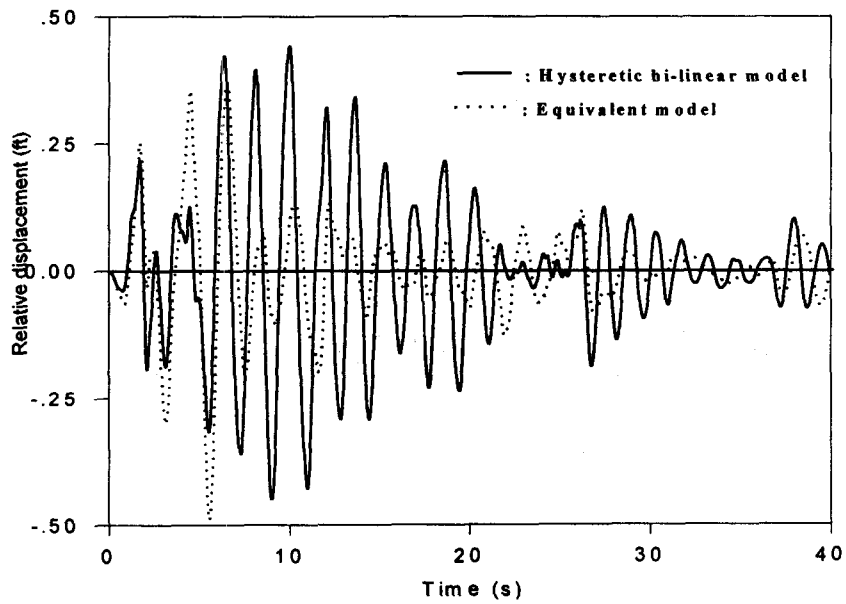


그림 5. 면진베어링의 상대변위응답 시간이력