

면진주파수가 원통형탱크의 구조응답에 미치는 영향

Effects of Seismic Isolated Frequency in Structural Responses of Cylindrical Tanks

구경회*, 이재한*, 유봉*

Koo, Gyeong-Hoi Lee, Jae-Han Yoo, Bong

ABSTRACT

For design of seismic isolated system the determination of isolated frequency is very important. In this paper the effects of seismic isolated frequency for cylindrical tank are investigated using the 1940 EL Centro earthquake(NS). From the results of analysis the seismic isolated frequencies significantly depend on input acceleration and displacement components in lower frequency regions. Therefore, the seismic isolated frequency should be determined by consideration of input ground motion characteristics. For the seismic analysis the modified hysteretic bi-linear model of seismic isolators which can consider the yield load variation, shape of hysteresis loop variation and hardening effects of isolators is proposed. The analyses using the proposed model give similar displacement responses but higher maximum acceleration responses than those using the simple hysteretic bi-linear model.

1. 서 론

일반적으로 지진하중은 원자력발전소를 비롯하여 각종 구조물설계에 매우 중요하게 고려되어야 할 설계하중으로서 다루어져 왔다. 이러한 지진하중은 특히 원자력발전소의 주요 계통 및 부품설계를 좌우하며 따라서 지진하중으로 인한 설계 및 건설비용은 원자력발전소의 경제성 제고에 크게 영향을 끼치고 있다. 현재 원자력 선진국에서는 이러한 지진하중을 원천적으로 줄여 경제성 및 안전성을 보장할 수 있는 면진시스템 개발에 많은 노력을 하고 있다[1,2].

실제로 면진시스템을 적용하게 되면 비면진구조물에 비하여 지진가속도응답이 크게 줄어들며 따라서 지진설계하중의 감소효과가 현저하게 나타난다[3,4]. 그러나 면진구조물은 장주기 특징을 가지기 때문에 지반에 대한 구조물의 상대변위가 비면진구조물에 비하여 크게 나타난다. 이러한 상대변위의 증가는 장주기로 갈수록 크게 나타나며 또한 입력지진하중의 주파수성분에 따른 변위의 크기에도 크게 좌우된다. 따라서 구조물의 면진시스템 설계를 위해서는 설계지진하중이 결정되면 구조물의 가속도응답 뿐만 아니라 지반에 대한 상대변위를 최소화할 수 있는 면진주파수 결정이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 액체금속로용 원자로용기와 같은 원통형탱크에 대하여 지진해석모델을 설정하고 EL Centro 지진하중에 대하여 면진주파수가 구조응답에 미치는 영향을 분석하였다. 면진베어링의 수학적모델에는 R-O 모델, Rate 모델 그리고 히스테리틱 Bi-linear 모델 등이 많이

* : 한국원자력연구소

사용되고 있다[5,6]. 본연구에서 면진주파수가 구조응답에 미치는 영향분석을 위해서 면진베어링의 수학적모델에 단순 히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용하였다. 그리고 최적 면진주파수에 대한 구조응답해석을 위하여 T.Fujita와 그의 동료들이 사용한 변형률에 따른 항복하중특성의 변동을 고려한 Bi-linear 모델을 수정하여 면진베어링의 대변형시 발생하는 경화현상을 함께 고려할 수 있는 수정 Bi-linear 모델을 제안하였다.

2. 면진시스템 해석을 위한 공식화

지진하중에 대한 운동방정식은 질량, 감쇠 그리고 강성행렬로 부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}_r\} + [C]\{\dot{x}_r\} + [K]\{x_r\} + F_{iso} = -[M]\{\ddot{x}_b\} \quad (1)$$

여기서 x_r 은 지진에 대한 상대응답변위 벡터를 나타낸 것이며 \dot{x}_b 는 입력지진가속도를 나타낸다. 식(1)에서 F_{iso} 는 면진베어링이 작용하는 절점에서의 복원력을 나타낸 것으로 면진베어링에 대한 단순히스테리틱 Bi-linear 모델은 그림 1과 같이 면진베어링의 거동이 K_1 을 따라갈 경우에는 다음과 같이 면진베어링에 작용하는 힘의 평형방정식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$F_{iso} = K_1 x_r + Y \quad (2)$$

그리고 면진베어링의 거동이 K_2 를 따라갈 경우에는 변형률-복원력 좌표의 원점이동을 고려하여 면진베어링의 복원력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{iso} = K_2(x_r - x_{shift}) \quad (3)$$

식(2)와 (3)에서 면진베어링의 강성은 골격곡선에 대한 K_1 또는 이력곡선에 대한 K_2 의 값을 가지며 Y 는 상수로서 \pm 값을 가진다. 실제 면진시스템의 설계를 위해서는 이러한 면진베어링의 스프링계수 및 상수 Y 는 모두 면진베어링 특성시험으로 부터 결정되어야 한다.

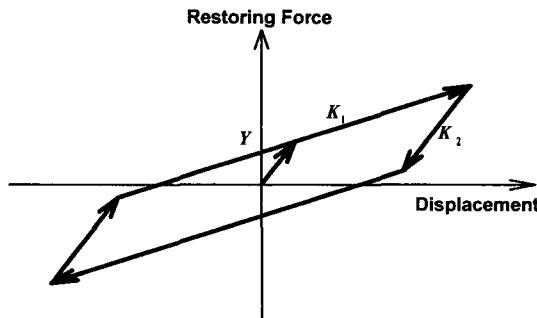


그림 1. 면진베어링의 단순히스테리틱 Bi-linear 모델

본 연구에서는 식 (1)의 해를 구하기 위해 Runge-Kutta 수치해석 알고리즘을 사용하였다. 이를 위하여 위의 2차미분방정식으로 표현된 식(1)을 1차미분방정식의 형태로 표현하기 위하여 다음과 같이 변위벡터를 치환한다.

$$\begin{aligned} z_r &= \begin{Bmatrix} x_r \\ \dot{x}_r \end{Bmatrix}, & \dot{z}_r &= \begin{Bmatrix} \dot{x}_r \\ \ddot{x}_r \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (4), (5)$$

식(2)와 (3)을 식(1)에 적용한 다음, 상수 Y 를 우변으로 이항하여 Runge-Kutta 수치해석 알고리즘

을 적용하기 위한 1차미분방정식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\{\ddot{z}_r\} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{z_r\} + \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ -[M]^{-1}([M]\{\ddot{x}_b\} - \{P\}_{iso}) \end{array} \right\} \quad (6)$$

식(6)에서 벡터 $\{P\}_{iso}$ 는 면진베어링이 위치하는 절점의 자유도에서 Y 또는 $K_2 x_{shift}$ 값을 가지며 이러한 면진베어링의 특성치는 이전 시간의 면진베어링의 상대변위와 현재의 상대변위에 의하여 결정된다.

3. 면진주파수 영향분석을 위한 지진해석

3.1 원통형탱크 지진해석모델

본 연구에서 고려된 원통형탱크에 대한 해석치수와 집중질량 해석모델은 그림 2와 같다. 그림에서와 같이 탱크의 길이는 헤드를 포함하여 19.82 m이며 실린더의 두께는 0.05 m로 박막구조를 하고 있다. 이러한 박막형 원통형탱크는 고온에서 운전되는 액체금속로의 원자로용기와 같은 구조이다. 지진시간이력해석을 위하여 4개의 절점으로 구성된 집중질량모델은 1차 고유진동수가 14.51 Hz, 2차 고유진동수가 52.48 Hz이며 이는 표 1에서와 같이 ANSYS를 이용한 상세 3차원 유한요소해석결과와 매우 잘 일치하고 있다.

표 1. 원통형탱크 집중질량모델에 대한 ANSYS 검증

Models	1st natural frequency	2nd natural frequency
1. Lumped mass model (w/o head mass)	18.37 Hz	58.48 Hz
2. Lumped mass model (with head mass)	14.51 Hz	52.48 Hz
3. ANSYS 3-D model	15.17 Hz	51.03 Hz
Error between 1 and 3	21.09 %	14.60 %
Error between 2 and 3	4.35 %	2.84 %

3.2 면진주파수 영향분석

본 연구에서 사용한 지진가속도하중은 1940 EL Centro(NS)이며 이 지진하중의 장주기성분에 대한 특성을 살펴보면 그림 3과 같다. 그림 3의 가속도 층응답스펙트럼을 살펴보면 주파수가 증가할 수록 가속도가 커짐을 알 수가 있다. 그리고 변위 층응답스펙트럼을 살펴보면 0.15 Hz와 0.4 Hz 근방에서 첨두값이 존재하며 주파수가 증가할 수록 변위가 줄어듬을 알 수 있다. 따라서 최적의 면진주파수를 결정하기 위해서는 이러한 입력지진하중의 주파수성분에 따른 가속도와 변위특성을 고려하여야 한다. 그림 4는 단순 Bi-linear 면진베어링모델을 사용한 원통형탱크 지진해석모델에 대하여 면진주파수에 따른 지진해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 면진주파수에 따른 절점 4에서의 최대 첨두가속도 해석결과를 살펴보면 입력 지진가속도 층응답스펙트럼과 같이 0.4 Hz에서 0.7 Hz 까지는 최대 첨두가속도가 약 0.15g 정도로 유사한 결과를 나타내며 주파수가 증가할 수록 커짐을 알 수 있다. 그리고 면진바닥층의 면진주파수에 따른 최대 변위는 0.4 Hz 근방에서 첨두치가 나타나며 주파수가 증가할 수록 감소한다. 따라서 그림 4의 지진해석 결과로 부터 최대 첨두가속도응답과 면진층의 변위를 고려하면 0.7 Hz가 가장 적절한 면진주파수로 나타남을 알 수 있다.

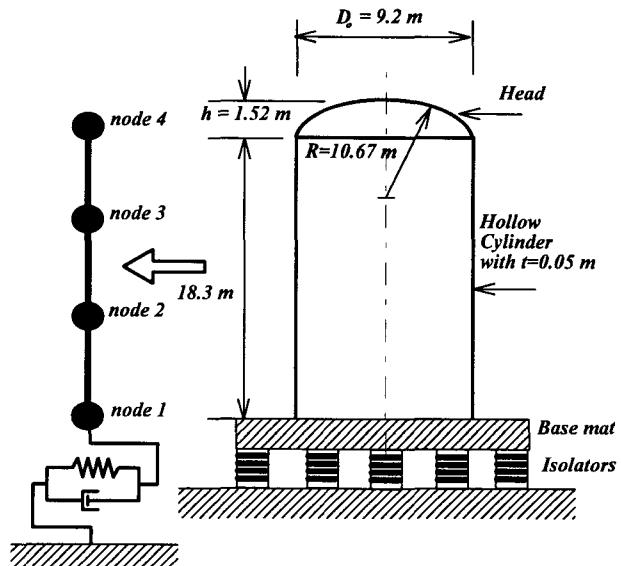


그림 2. 원통형탱크에 대한 지진해석모델

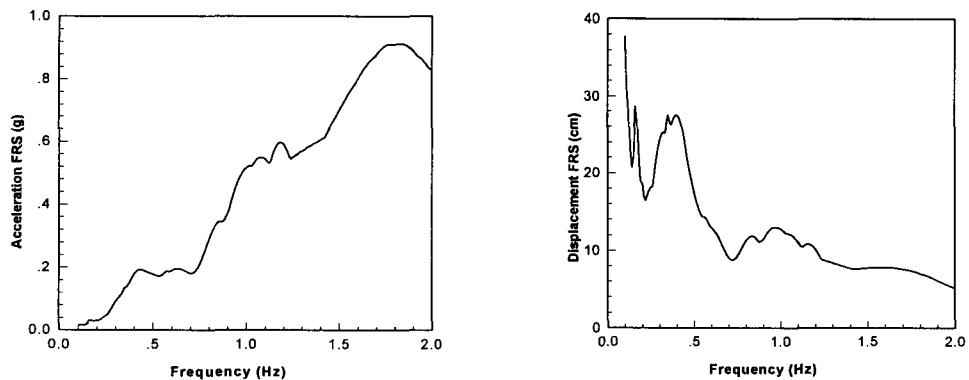


그림 3. 1940 EL Centro(NS) 지진의 장주기 특성

3.3 면진베어링의 수정 히스테리틱 Bi-linear 모델링

그림 5는 실제 직경 15 cm를 갖는 고감쇠 적층고무 면진베어링에 대한 특성시험결과를 나타낸 것으로 전체 적층고무두께(3.48 cm)의 100, 200, 300 % 변형량에 대하여 반복변위를 주었을 때 나타난 복원력-변형량 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림의 복원력-변형량 곡선에서와 같이 고감쇠 면진베어링은 변형량이 증가함에 따라서 항복하중 특성치가 커지며 히스테리시스 루프의 형상도 크게 달라진다. 또한 면진베어링의 변형이 커질 수록 경화현상이 크게 발생함을 알 수가 있다. 따라서 그림 1과 같은 단순히스테리틱 Bi-linear 모델로서는 이러한 고감쇠 면진베어링을 정확하게 표현할 수가 없다. 본 연구에서는 면진베어링의 변형량에 따른 항복하중의 변화

와 히스테리시스 루프의 변화 그리고 대변형시의 경화특성을 고려할 수 있는 그림 6과 같은 수정 히스테리틱 Bi-linear 모델을 제안하였다. 수정 히스테리틱 Bi-linear 모델은 골격곡선, 이력곡선 그리고 항복하중특성치가 모두 면진베어링의 변형량, δ 의 함수이며 대변형시의 경화특성은 골격곡선에 대하여 각 변형구간에서의 복원력식은 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$F_n(\delta) = K_n(\delta) \delta + Y_n(\delta) \quad (7)$$

여기서 각 구간에서의 상수 Y_n 은 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$Y_n(\delta) = \sum_{m=1}^{n-1} S_m [K_m(\delta) - K_{m+1}(\delta)] + Y_1(\delta) \quad (8)$$

식 (8)에서 S_m 은 면진베어링 모델에서 m 번째 경화현상이 발생하는 곳의 변형량을 나타낸다.

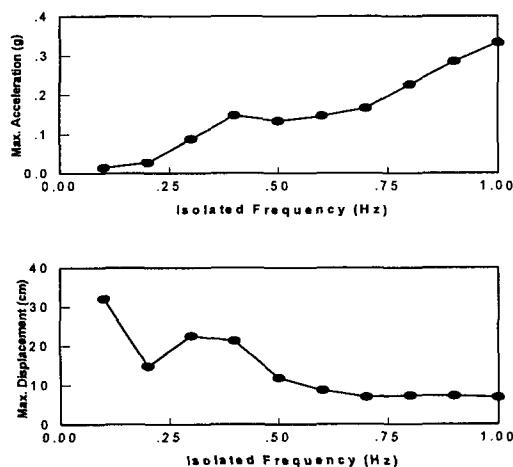


그림 4. 면진주파수에 따른 장주기 응답특성

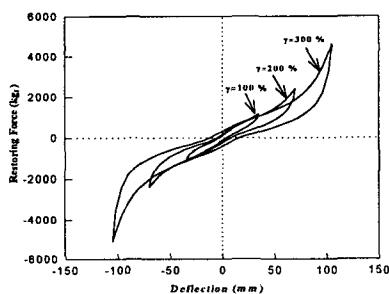


그림 5. 면진베어링 특성시험결과

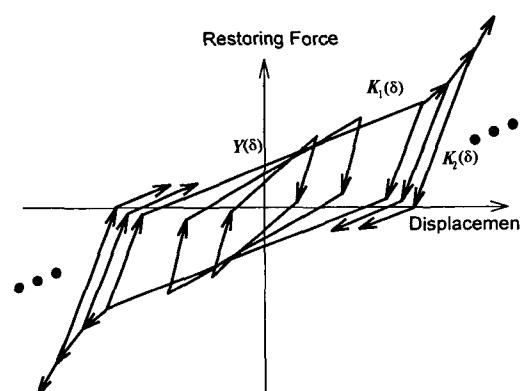


그림 6. 수정히스테리틱 Bi-linear 모델

3.4 최적 면진주파수에서의 지진해석

앞의 3.2에서 구한 최적 면진주파수 0.7 Hz에 대하여 원통형탱크에 대한 지진해석을 면진베어링의 단순 히스테리틱 Bi-linear 모델과 3.3절의 수정 히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용하여 수행하였다. 원통형탱크는 모든 모우드에 대하여 5%의 점성감쇠를 갖는 것으로 가정하였으며 단순 히스테리틱 Bi-linear 모델에 사용된 해석모델자료는 다음과 같다.

$$K_1 = 3.31 \times 10^4 \text{ kgf/cm}, K_2 = 1.33 \times 10^5 \text{ kgf/cm}, Y = 4.32 \times 10^4 \text{ kgf}$$

그리고 수정 히스테리틱 Bi-linear 모델에 사용시 면진베어링의 변형량에 따른 경화현상을 고려하기 위하여 면진베어링은 2번의 경화단계를 갖는 것으로 가정하였으며 이에 대한 해석모델자료는 다음과 같다.

$$K_1 = K_1 : 0.00 \text{ cm} \leq S \leq 4.57 \text{ cm}$$

$$K_1 = 1.2 K_1 : 4.57 \text{ cm} \leq S \leq 6.10 \text{ cm}$$

$$K_1 = 2.5 K_1 : 6.10 \text{ cm} \leq S$$

그림 7은 El Centro 지반가속도 입력에 대한 면진베어링의 단순히스테리틱 모델과 수정히스테리틱 모델에 대한 면진베어링의 복원력-변형량 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 단순히스테리틱 모델과 수정 히스테리틱 면진베어링모델은 작은 변위의 히스테리틱 거동을 많이 갖는 유사한 결과를 나타내지만 수정히스테리틱 모델에서는 대변형에서의 경화현상을 고려하였기 때문에 최대 복원력의 크기가 단순모델에 비하여 크게 나타났다. 그림 8은 절점 4에서의 가속도 시간이력응답을 나타낸 것으로 각 모델의 응답파형은 매우 유사하나 수정 히스테리틱 모델을 사용한 경우에 최대 첨두 가속도의 크기가 조금 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 면진베어링의 경화현상으로 강성이 증가하여 가속도 지진응답이 입력지진 주파수의 영향으로 크게 나타난 것으로 판단된다. 그림 9는 변위 시간이력응답을 나타낸 것으로 전체 응답파형 및 최대 첨두 변위가 유사한 결과를 나타낸다.

그림 10은 원통형탱크의 높이에 따른 최대 첨두 가속도분포를 나타낸 것으로 면진시스템은 비면진시스템에 비하여 지진응답이 크게 줄어들며 면진시스템은 탱크높이에 따른 가속도응답의 증폭이 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 경화현상을 고려한 면진베어링의 수정 히스테리틱 모델은 단순 히스테리틱 모델에 비하여 가속도응답이 크게 나타난다.

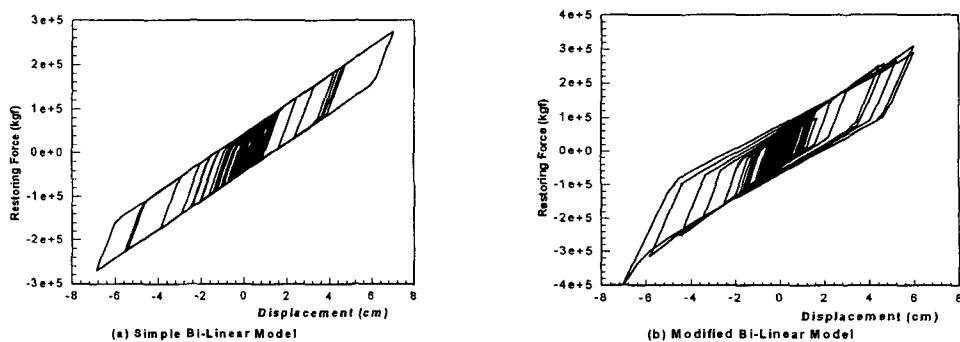
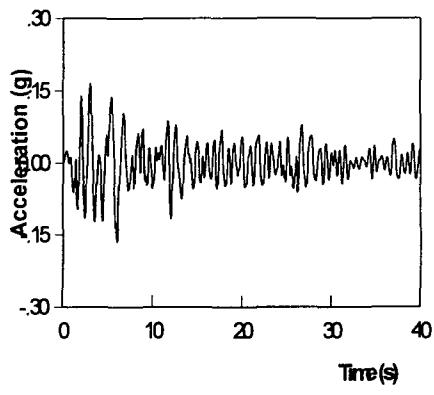
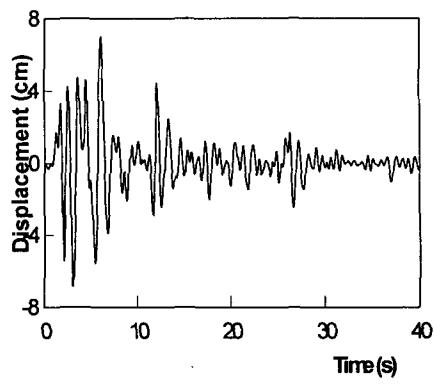


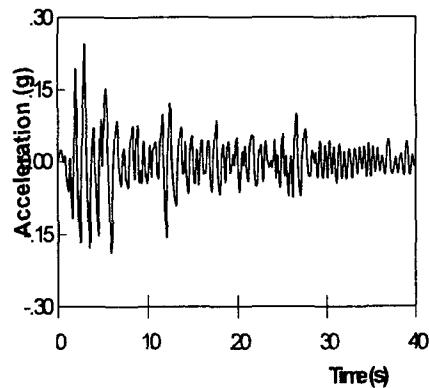
그림 7. 면진베어링 복원력-변형량 응답곡선



(a) Simple Bi-Linear Model



(a) Simple Bi-Linear Model



(b) Modified Bi-Linear Model

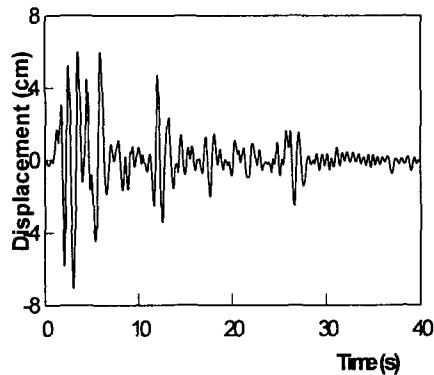


그림 9. 면진층의 변위응답

그림 8. 절점4에서의 가속도응답

4. 결론

면진주파수가 구조응답에 미치는 영향을 평가하기 위하여 1940 El Centro(NS) 입력지진하중이 원통형탱크에 적용되는 경우에 대하여 살펴보았다. 면진시스템의 설계시 면진주파수는 구조응답에 크게 영향을 미치며 이러한 면진주파수는 입력 지진하중의 장주기성분이 갖는 가속도와 변위의 크기를 고려하여 신중히 결정되어야 한다.

본 연구에서 제안한 고감쇠 적층고무베어링에 대한 수정히스테리틱 Bi-linear 모델은 면진베어링의 변형에 따른 항복하중, 히스테리시스 루프형상과 경화현상을 표현할 수 있으며 이러한 수정 히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용한 해석결과는 단순 히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용하여 해석한 결과에 비하여 변위응답은 유사하나 최대 첨두가속도응답이 크게 나타났다.

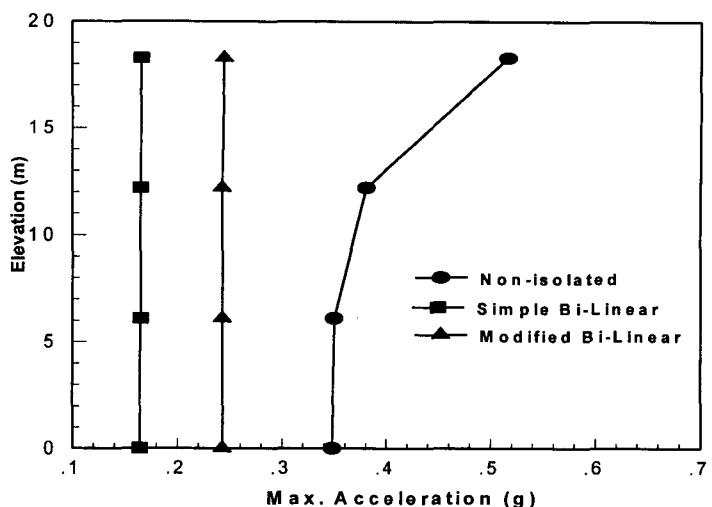


그림 10. 높이에 따른 최대 첨두가속도 분포

참고문헌

- (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) C.M. Harris, 1988. Shock and Vibration Handbook.
 - (4) 구경회등, 1995. 고감쇠 면진베어링을 사용한 지진응답감소. '95 춘계 한국원자력학회 학술 대회 논문집, pp.987-992.
 - (5) T. Fujita, S. Suzuki and S. Fujita, 1989. Hysteretic responding force characteristics of high damping rubber bearings for seismic isolation. Seismic Shock, and Vibration Isolation-1989. pp . 23~28.
 - (6) I. Shimoda and M. Ikenage, 1989. Study on characteristics and effects of seismic isolation of laminated rubber bearing with lead plug. Seismic Shock, and Vibration Isolation-1989. pp. 49~57.