

강진 시 납-고무 면진장치의 비탄성 변위응답에 대한 온도상승 및 좌굴효과의 분석

Evaluation of Heating and Buckling Effects on Inelastic Displacement Responses of Lead-Rubber Bearing Subject to Strong Ground Motions

윤수정¹⁾ · 홍지영²⁾ · 문지호³⁾ · 송종걸^{4)*}

Yun, Su-Jeong¹⁾ · Hong, Ji-Yeong²⁾ · Moon, Jiho³⁾ · Song, Jong-Keol^{4)*}

¹⁾강원대학교 건축·토목·환경공학부 토목공학과 석사졸업, ²⁾강원대학교 건축·토목·환경공학부 토목공학과 석사과정, ³⁾강원대학교 건축·토목·환경공학부 토목공학과 조교수, ⁴⁾강원대학교 건축·토목·환경공학부 토목공학과 교수

¹⁾Master of Science, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, ²⁾Graduate Student, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, ³⁾Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, ⁴⁾Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

The tendency to use a probabilistic design method rather than a deterministic design method for the design of nuclear power plants (NPPs) will increase because their safety should be considered and strictly controlled in relation to various causes of damage. The distance between a seismically isolated NPP structure and a moat wall is called the clearance to stop. The clearance to stop is obtained from the 90th percentile displacement response of a seismically isolated NPP subject to a beyond design basis earthquake (BDBE) in the probabilistic design method. The purpose of this study is to analyze the effects of heating and buckling effects on the 90th percentile displacement response of a lead-rubber bearing (LRB) subject to a BDBE. The analysis results show that considering the heating and buckling effects to estimate the clearance to stop is conservative in the evaluation of the 90th percentile displacement response. If these two effects are not taken into account in the calculation of the clearance to stop, the underestimation of the clearance to stop causes unexpected damage because of an increase in the collision probability between the moat wall and the seismically isolated NPP.

Key words: Lead-Rubber bearing, Heating effect, Buckling effect, Beyond design basis earthquake, Nuclear power plant

1. 서론

최근에 경주와 포항에서 발생한 지진으로 인해 지진의 진앙지에서 가까운 원자력발전소(이하 원전)의 지진 안전성에 대하여 국민적인 관심과 우려가 증대하고 있다. 현재 강진에 대비하여 원전구조물의 안전성을 향상시키기 위한 방편으로 면진장치를 적용한 원전의 면진설계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 면진장치에 의한 내진보강은 구조물 자체의 내진성능 향상만으로는 강진에 대한 내진성능의 확보가 어려운 경우에 적용할 수 있는 가장 보편적인 방법이다. 면진장치로는 고무계열인 납-고무 면진장치(Lead Rubber Bearing, LRB)와 마찰계열인 마찰진자(Friction

Pendulum)시스템 등이 실무에 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 원전의 면진장치로는 납-고무 면진장치를 선택하였다. 납-고무면진장치는 고무와 강판을 겹겹이 쌓아 올린 층상형태로 고무는 수평강성을 유연하게 하여 고유주기의 증가로 인한 상부구조에 전달되는 지진하중의 저감효과를 유발하며, 강판은 수직방향으로 큰 강성을 유지하게 하고 상부구조물의 자중을 지지하는 역할을 하면서 고무층의 과도한 팽창을 막는다. 또한 납-고무 면진장치의 중심부에 납이 삽입되는데 이는 지진에너지를 흡수하여 지진의 피해를 감소시키고 탄성반침에서 문제가 되었던 과도한 변위가 발생하였을 때 제어를 하는 기능을 가지고 있다.

원전의 면진설계는 결정론적 방법 보다는 확률론적 방법이 보편적으로 적용될 가능성이 앞으로 증대되리라 예상된다. 이는 원전의 안전성을 다양한 손상요인에 대하여 복합적으로 고려하여야 하고 엄밀하게 관리하여야 되기 때문에 확률론적 설계방법을 따르는 것이 보다 합리적인 설계가 가능하기 때문이다. 확률론적 방법에서 설계기준지진(Design Basis Earth-

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received February 8, 2019; Revised August 12, 2019; Accepted October 2, 2019)

quake, DBE)에 대한 80 백분위수(%-ile) 응답을 사용하여 원전의 면진설계를 수행한다. 80 백분위수 응답은 평균응답에 1배의 표준편차를 더한 값과 유사하다. 원전은 설계기준지진 이외에 이보다 큰 설계초과지진(Beyond Design Basis Earthquake, BDBE)에 대해서도 안전성을 확보하도록 설계를 한다. 원전 구조물에 면진장치가 적용되면 면진장치의 횡방향 유연성으로 인하여 과도한 횡방향 변위가 발생할 수 있다. 면진된 구조물의 과도한 횡변위는 면진되지 않은 구조물과 사이에 연결된 배관 등에 손상을 줄 수 있으므로 면진된 원전구조물의 주변으로 과도한 횡변위를 제어하기 위한 정지체(moat wall) 구조물을 설치하게 된다. 면진된 원전구조물과 정지체 사이의 거리를 정지거리(clearance to stop)라고 한다. 설계에 반영된 정지거리가 적절한 수준보다 짧으면 설계기준지진 수준이거나 이보다 약한 지진 하중에 대하여 면진된 원전구조물이 정지체와 충돌하여 충돌에 의한 가속도 응답의 순간적인 증가로 가속도에 민감한 설비에 기능적인 손상을 주어서 원전의 안전성에 위험을 초래할 수 있으며, 정지거리가 너무 길게 되면 설계초과지진과 같은 강진 시에 면진된 원전구조물의 횡방향 변위가 과도하게 발생하는 것을 제어할 수 없으므로 연결 배관에 심각한 손상을 줄 수 있다. 그러므로 확률론적 설계법에서 정지거리는 설계초과지진에 대한 면진 원전구조물의 90 백분위수 변위응답으로 정하는 것이 일반적이다[1]. 본 연구에서는 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위응답에 대한 면진장치의 특성인자에 대한 영향을 분석하는 것이 목적이다. 납-고무 면진장치의 여러 특성인자 중에서 횡방향 변위응답에 대한 주된 영향인자로 납심의 온도상승과 좌굴효과를 고려하였다. 이는 두 영향인자 외에 수직방향 인장하중에 의해 고무와 강판의 접착부분이 분리되는 공동(cavitation) 현상, 수직강성의 변화 등은 횡방향 변위응답에 영향을 거의 주지 않으므로 고려하지 않았다. 설계기준지진은 원전구조물의 설계스펙트럼에 대응되는 30개 세트의 인공지진을 생성하여 사용하였고, 설계초과지진으로는 설계기준지진에 150%, 167%, 200% 스케일 상향조정된 지진을 사용하였다. 원전구

조물에 사용되는 설계초과지진으로는 150% 또는 167% 상향된 지진을 사용하는 것이 일반적이지만 좌굴응답은 횡방향 변위응답이 과도한 경우에 발생가능성이 높아지므로 200% 상향조정된 지진도 설계초과지진에 포함하여 분석하였다. 원전 표준설계스펙트럼에 대응되는 설계기준지진과 설계초과지진 이외에 이를 토대로 지진의 구조물에 입사각의 변동성을 반영한 최대-최소 스펙트럼에 대응하는 지진을 사용하여 비교하였다.

2. 납-고무 면진장치의 모델링 및 입력지진

2.1 납-고무 면진장치의 특성을 이용한 면진 개념

납-고무 면진장치(LRB)은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 고무와 보강용 강판을 여러겹으로 쌓아 올린 적층 형태로 중심부에는 납심이 들어가 있다. 납-고무면진장치는 탄성반침에서 문제가 되었던 큰 수평변위를 억제할 목적으로 탄성반침의 내부에 납심을 삽입하여 납의 비선형성을 이용한 감쇠증가 특성과 구조물 고유주기의 장기기화 및 충격전달 기능을 한 개의 장치로 합쳐지도록 하여 면진성능을 향상시킨 것이다. 납-고무 면진장치가 Fig. 2와 같이 탄성과 소성이력거동을 반복하게 되면 고무의 유연성에 의해 구조물의 고유주기를 장기기화시켜 지진하중의 크기를 감소시키고, 납의 소성이력거동으로 지진에너지를 소산시킨다[2]. 납심의 온도 증가는 이력에너지의 소산 정도와 관련이 있으며 비탄성 거동을 많이 할수록 납심의 소성거동으로 온도 증가가 발생한다[3]. 구조물에 면진장치를 사용하면 Fig. 3에서와 같이 구조물의 고유주기가 인위적으로 길어져 가속도 응답은 감소시키고 변위응답은 증가한다. 증가된 고유주기에 의해 가속도 응답이 작아지는 것은 구조물에 전달되는 지진하중이 감소됨을 의미하며, 변위가 증가하는 것은 대부분 면진장치가 부담하기 때문에 구조물의 상대변위 응답은 감

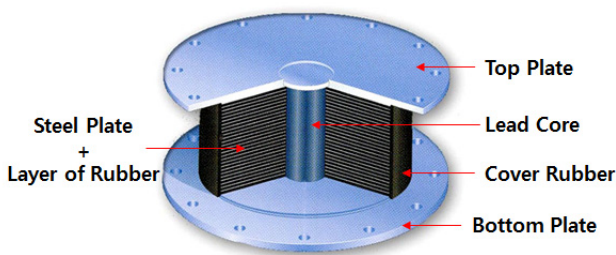


Fig. 1. Configuration of lead rubber bearing

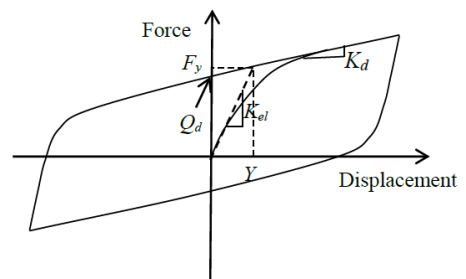


Fig. 2. Hysteresis model for lead rubber bearing [2]

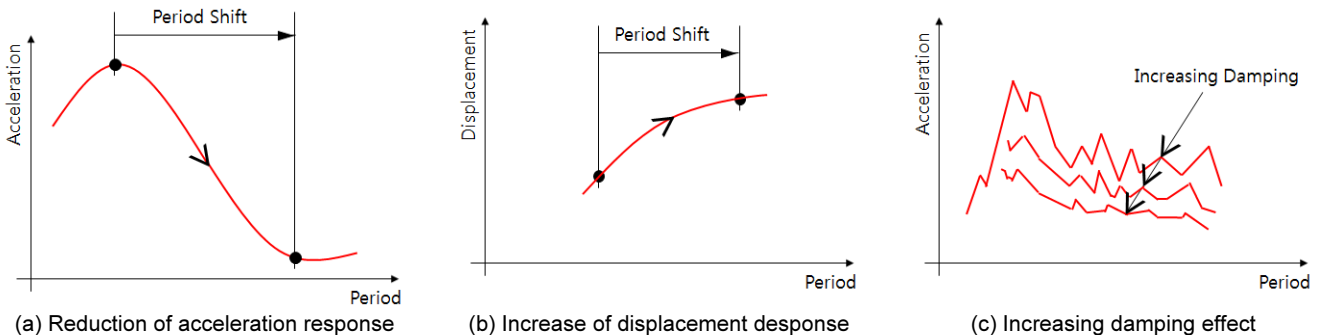


Fig. 3. Increase of period of structure and reduction of seismic design load by application of seismic isolation device

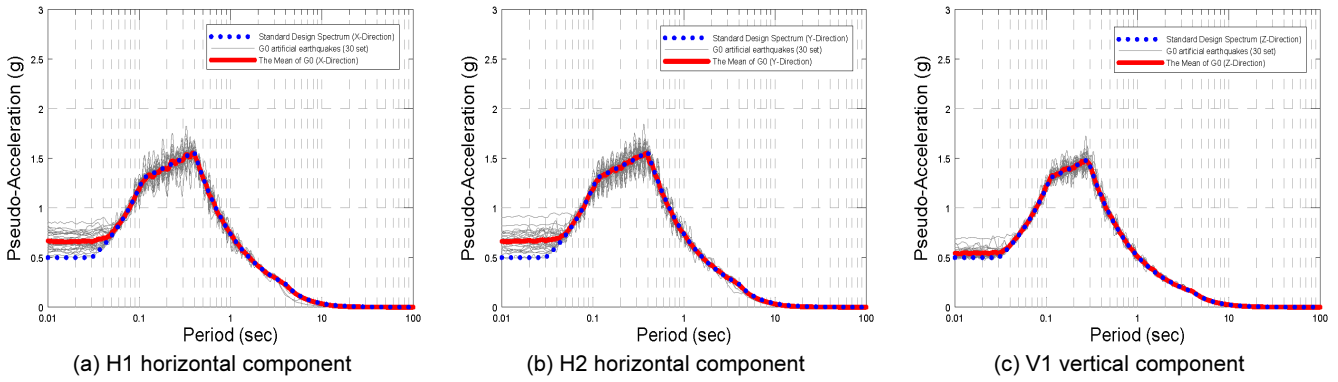


Fig. 4. Comparison of response spectrum for G0 group of 30 set artificial earthquakes corresponding to standard design spectrum

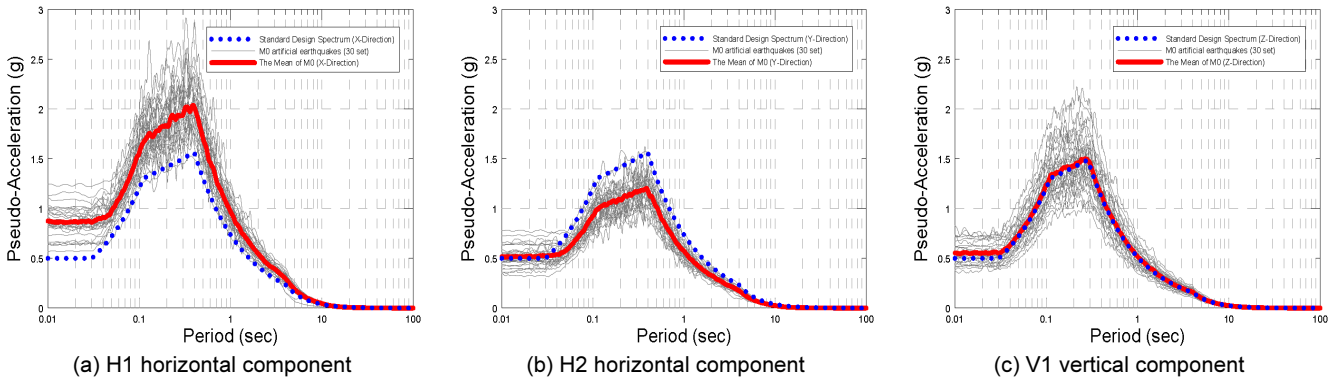


Fig. 5. Comparison of maximum-minimum response spectrum for M0 group

소하는 경향을 나타내므로 구조물의 지진손상의 위험성을 저감시킬 수 있다. 납심의 삽입으로 인한 감쇠의 증가효과는 지진하중을 낮춰주는 역할을 한다.

2.2 입력 지진

입력지진은 한국원자력연구원에서 면진된 원전구조물의 성능검증을 위해 RspMatch 프로그램[4]을 이용하여 R.G. 1.60 설계 응답스펙트럼에 부합되도록 작성한 최대지반가속도(PGA)가 0.5 g인 30개 세트 인공지진 [4]을 G0 지진그룹으로 분류하여 사용하였다. 설계 응답스펙트럼에 지진의 방향성과 변동성을 고려하여 최대-최소 응답 스펙트럼에 대응하는 30개 인공지진을 작성하여 이를 M0 지진그룹으로 분류하였다. 즉, G0는 지진하중이 구조물에 작용하는 방향성과 변동성을 거의 고려하지 않은 인공지진 30개 세트이고 M0는 G0 지진그룹에 방향성과 변동성을 고려하여 작성한 최대-최소 응답스펙트럼에 대응하는 지진 30개 세트를 말한다. 본 연구에서 사용한 G0 지진그룹 30개와 M0 지진그룹 30개에 대한 응답스펙트럼을 작성하여 Fig. 4와 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. M0 지진을 작성하는 방법은 기하평균 $Geomean = \sqrt{S_{amax} \times S_{amin}}$ (S_{amax} : 강축방향의 가속도 값, S_{amin} : 약축방향의 가속도 값) 식을 사용하여 지진응답크기를 나타내고 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin hypercube sampling) 기법을 이용하여 F_h 와 F_v 를 구하여 강축방향의 가속도 값은 기존 수평방향 성분 F_h 를 곱하고 약축방향의 가속도 값은 기존 수평방향 성분 F_h 를 곱하여 작성하

였다[5, 6]. 즉, 강축 방향의 가속도 값($S_{a,max}$)은 기존 수평방향(h1) 성분 F_h 를 곱하고 약축방향의 가속도 값($S_{a,min}$)은 기존 수평방향(h2) 성분 F_h 를 곱하면 기하평균의 값은 변화시키지 않으면서 최대-최소 응답스펙트럼을 작성할 수 있다[5, 6].

2.3 납-고무 면진장치(LRB)의 물성치

원전용 실제 크기의 납-고무 면진장치의 제원과 물성치는 Table 1[3]에 나타내었다. 외경(D_o)은 1500 mm, 내경(D_i)은 400 mm, 고무 층과 철판의 두께(t)는 각 층당 7 mm, 고무층 수는 30개이고, 납-고무 면진장치가 받고 있는 수직하중은 원전용 면진장치가 분담하여야 하는 평균값을 적용하여 10,000 kN이다. 납-고무면진장치의 해석모델은 이선형(Bi-Linear)으로 Fig. 2에서와 같이 1차 강성 K_{e1} , 2차 강성 K_{e2} , 항복강도 Q_d 로 정의한다. 1차 강성 K_u 는 537.05 kN/mm, 2차 강성 K_d 는 3.94 kN/mm, 항복강도 Q_d 는 1,046.78 kN이다.

2.4 납-고무 면진장치의 상세해석을 위한 수치모델

본 연구에서 사용한 납-고무 면진장치로 면진된 구조물의 해석모델은 Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 2 절점 모델로 두 개의 절점과 한 개의 요소로 구성되며, 지반에 위치한 한 개의 절점은 고정시키고 상부 절점은 면진장치가 부담하는 상부구조물의 질량으로 모델링한다. 두 절점을 연결하는 요소

Table 1. Properties of LRB used in this study [3]

Properties	Value
K_u (elastic stiffness)	537.05 kN/mm
K_d (second-slope stiffness)	3.94 kN/mm
Q_d (yield strength)	1,046.78 kN
F_y (yield displacement)	1.88 mm
V_L (vertical load)	10,000 kN
D_o (outer diameter)	1,500 mm
D_i (internal diameter)	400 mm
t (rubber thickness)	7 mm
n (number of rubber layers)	30
Density of Lead	11,200 kg/m ³
Specific heat of Lead	130 J/kg°C

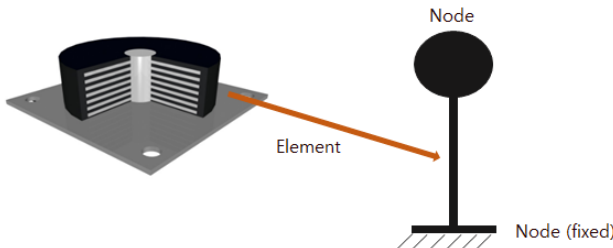
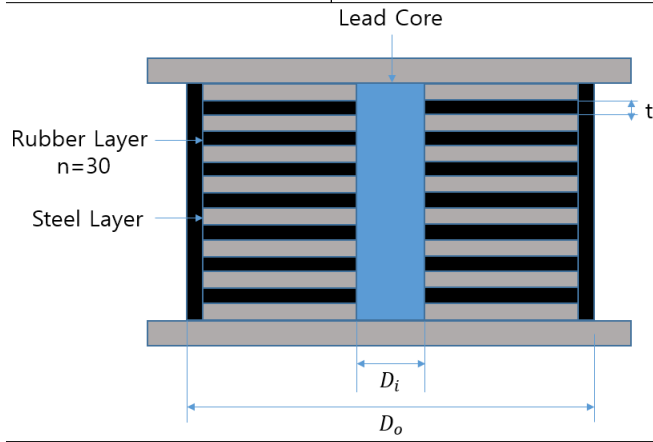


Fig. 6. 2 node model for seismic isolation system

에는 면진장치 모델을 적용하였다. 2 절점 모델은 면진장치의 개수가 많은 경우에 해석시간이 많이 소요되는 어려움을 제거하는 장점이 있으며, 동일한 종류와 크기의 많은 수의 면진장치가 설치된 경우에 이 중에서 하나만 분리하고, 면진장치의 개수만큼 상부구조물에서 작용하는 질량을 나누어 실제 면진 구조물의 주기와 같은 고유주기를 가지도록 작성하여 정교하고 복잡한 지진거동의 분석을 위한 모델이다. 2 절점 모델은 해석시간이 단축될 뿐만 아니라 지진하중에 대한 면진장치의 온도상승효과, 좌굴현상, 축하중 효과, 공동현상과 같은 정밀한 응답특성을 다양한 해석조건을 적용하여 분석하는데 효과적이다. 2 절점 모델에서 납-고무 면진장치의 정교한 해석을 위해서는 OpenSEES 프로그램의 Lead Rubber-X 모듈[6]을 사용하였다. Lead Rubber-X 모듈은 반복하중에 의한 납심의 온도상승의 효과, 항복강도의 저하 특성, 전단강성의 저하특성, 좌굴 효과 등을 정밀하게 분석할 수 있는 모델이다[7].

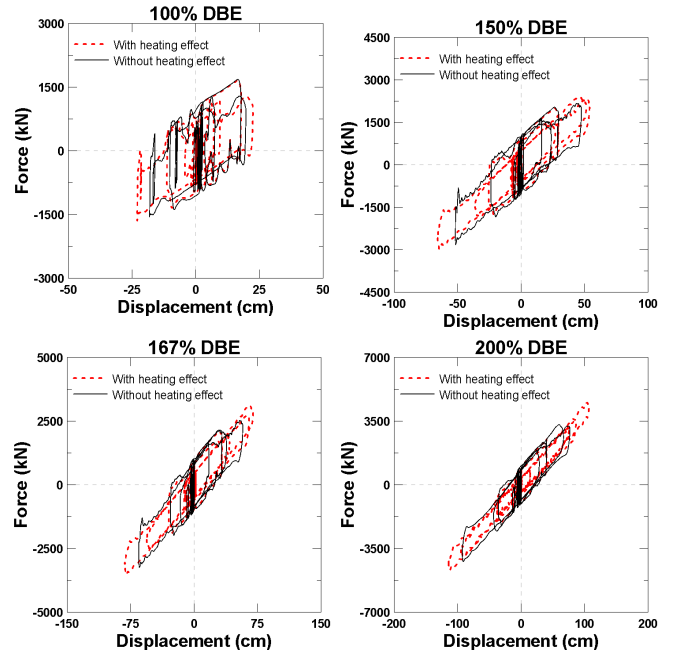


Fig. 7. Comparison of force-displacement relationships of lead rubber bearing with or without heating effect

Lead Rubber-X 모듈을 이용한 납심의 온도상승 영향의 반영 유무에 따른 면진장치의 힘-변위 응답 이력특성을 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 지진하중은 설계기준지진(DBE)과 설계초과지진(150%, 167%, 200% DBE)을 사용하였다. 반복하중에 의한 납심의 온도상승효과를 고려하였을 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여, 지진하중의 크기가 증가할수록 면진장치의 전단강도가 저하되고, 저하된 전단강도로 인해 동일한 지진에너지를 소산시키기 위하여 동일한 비탄성 힘-변위응답이 이루는 면적이 필요하므로 변위응답은 증가하는 경향을 나타낸다. 다시 말하면, 온도상승효과를 고려할 경우에는 반복하중에 의해 온도상승으로 인한 납심의 강도가 저하되므로 전반적인 면진장치의 전단강도는 저하되는 특성을 나타내고, 전단강도의 저하는 지진에너지를 소산시킬 수 있는 능력인 힘-변위 면적을 감소시키므로 동일한 지진에너지 소산을 위해서는 더 많은 변위응답의 증가가 요구되는 것이다. 좌굴효과의 반영 유무에 따른 면진장치의 힘-변위 응답을 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 좌굴효과의 고려유무는 변위응답의 최대값에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타나지만 비탄성 변위응답이 큰 경우에 좌굴의 영향으로 항복후 전단력의 변화가 크지는 않지만 발생함을 알 수 있다.

납심의 온도상승은 다음과 같은 식으로 계산된다[2], [8-10].

$$\dot{T}_L = \frac{\sigma_{YL}(T_L)|Z \cdot \dot{D}|}{\rho_L c_L h_L} - \frac{k_s T_L}{a \cdot \rho_L c_L h_L} \left(\frac{1}{F} + 1.274 \cdot \left(\frac{t_s}{a} \right) \cdot (\tau)^{-1/3} \right) \quad (1)$$

$$F = \begin{cases} 2 \left(\frac{\tau}{\pi} \right)^{1/2} - \left(\frac{\tau}{\pi} \right) \left[2 - \left(\frac{\tau}{4} \right) - \left(\frac{\tau}{4} \right)^2 - \frac{15}{4} \left(\frac{\tau}{4} \right)^3 \right], & \tau < 0.6 \\ \frac{8}{3\pi} - \frac{1}{2(\pi \cdot \tau)^{1/2}} \left[1 - \frac{1}{3 \cdot (4\tau)} + \frac{1}{6 \cdot (4\tau)^2} - \frac{1}{12 \cdot (4\tau)^3} \right], & \tau \geq 0.6 \end{cases} \quad (2)$$

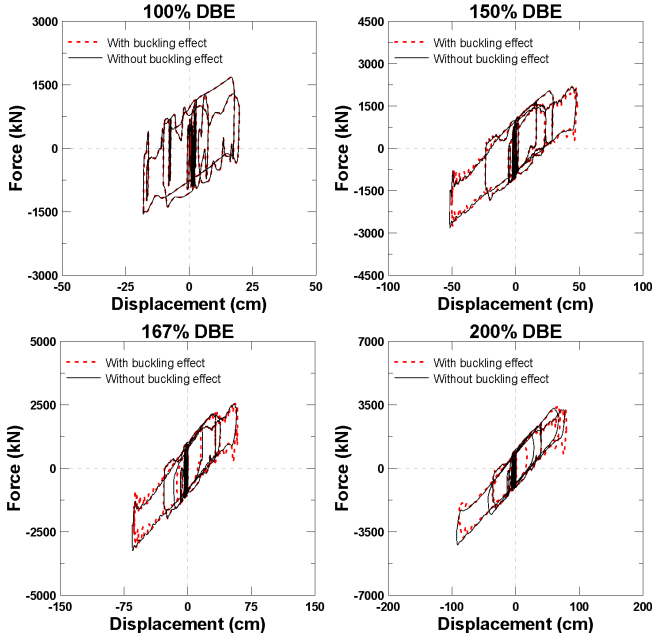


Fig. 8. Comparison of force-displacement relationships of lead rubber bearing with or without buckling effect

$$\tau = \frac{\alpha_s t}{a^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{YL}(T_L) = \sigma_{YL0} \cdot e^{-E_2 T_L} \quad (4)$$

위의 식에서 h_L 은 납심의 높이, ρ_L 은 납의 밀도, c_L 은 납의 비열, a 는 납심의 반지름, α_s 는 철판의 열확산율, k_s 는 철판의 열전도율, t_s 는 강판의 총높이, σ_{YL0} 은 온도가 올라갈 때 납의 유효항복강도, τ 은 무차원 시간, t 는 거동시작부터의 시간, $\sigma_{YL}(T_L)$ 은 납의 순간온도에 기초한 항복응력, T_L 은 납의 온도, \dot{D} 는 납-고무 면진장치의 상대속도, Z 는 복원력에 관한 변수, E_2 는 온도와 항복응력에 관한 상수이다[2], [8, 9].

전형적으로 면진에 적용되는 고무계열 면진장치의 형상계수(S)는 10보다 크다. 압축으로 인한 전단응력을 최소화하고 면진장치의 좌굴하중 성능을 증가시키기 위해서는 큰 형상계수가 요구된다. 원형 형상의 고무계열 면진장치의 형상계수는 다음의 식에 의해 평가할 수 있다[11].

$$S = \frac{D_o - D_i}{4t} \quad (5)$$

Table 1에 나타난 납-고무 면진장치의 형상계수는 39.2이다. 고무계열 면진장치의 좌굴하중(P_{cr})을 계산하기 위해 전단 유연성이 있는 세장한 기둥처럼 고려한다. Timoshenko와 Gere는 전단 변형을 고려한 기둥의 좌굴 이론[11]을 제시하였다. 원형 형상의 납-고무 면진장치의 횡방향 변위응답에 따른 상하면의 접촉면적의 변화로 인한 수직하중 분담면적의 감소를 고려한 좌굴하중 P'_{cr} 은 다음과 같은 식으로 계산된다[2], [8, 9], [11].

$$P'_{cr} = \begin{cases} P_{cr} \frac{A_r}{A} & \text{for } \frac{A_r}{A} \geq 0.2 \\ 0.2P_{cr} & \text{for } \frac{A_r}{A} < 0.2 \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{cr} = \sqrt{P_E G A_s} = \frac{\pi \sqrt{E_r G I A}}{T_r}, \quad \text{여기서, } A_s = A \frac{h}{T_r} \quad (7)$$

여기서, A_r 은 횡방향 변위로 인한 단면적 겹침부의 감소된 면적이며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A_r = \left(\frac{B^2}{4}\right)(\delta - \sin\delta), \quad \text{여기서, } \delta = 2\cos^{-1}\left(\frac{D}{B}\right) \quad (8)$$

식(7)에서 P_{cr} 은 변위가 0인 경우의 좌굴하중이고 식(6)의 P'_{cr} 은 납-고무면진장치의 상하면이 수직으로 직립한 초기면적 A 에서 횡방향 변위로 인해 상하면 단면의 겹침부의 감소된 면적이 A_r 로 되었을 경우의 좌굴하중이다. P_E 는 납-고무 면진장치의 오일러좌굴하중, E_r 은 면진장치의 회전탄성계수, A 와 I 는 접착된 고무면적에 대한 단면적과 관성모멘트, T_r 은 고무층의 총두께, h 는 고무와 강철판을 포함하는 면진장치의 높이로서 단부의 판은 제외한다. B 는 원형 면진장치의 접착된 고무면적에 대한 직경, D 는 면진장치의 횡방향 변위이다. 좌굴하중은 횡방향 변위가 수직방향의 축하중을 지지하는 면진장치의 면적이 감소함에 따라 이에 비례하여 좌굴하중은 감소한다. 횡방향 변위에 따른 감소된 면적과 감소된 면적에 따른 좌굴하중과의 관계를 Fig. 9에 나타내었다.

3. 납-고무 면진장치의 변위응답에 대한 확률론적 분석

납-고무 면진장치의 온도상승효과와 좌굴효과 반영 유무에 따른 변위응답의 확률론적 분석을 위하여 30개의 입력지진 하중에 대한 최대변위들을 구하고 이로부터 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)와 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 구하였다. 확률밀도함수로는 정규분포와 대수정규분포를 사용하여 비교하였으며 일반적으로 면진장치의 변위응답은 대수정규분포를 나타낸다고 알려져 있다. 100% DBE에서의 면진장치의 변위응답의 중앙값을 구하는 과정을 설명하기 위한 누적분포함수와 확률밀도함수는 Fig. 10(a)에 나타내었으며, 150% DBE에 대한 90백분위수 변위응답을 구하는 과정을 설명하기 위한 누적분포함수와 확률밀도함수는 Fig. 10(b)에 나타내었다.

3.1 면진장치의 비탄성 변위응답에 대한 납심 온도상승효과 영향 분석

Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 G0 그룹의 30개 지진과 M0 그룹의 30개 지진에 대한 면진장치의 최대변위응답을 설계기준지진(100% DBE)과 설계초과지진(150%, 167%, 200% DBE)로 각각 구분하여 변위응답의 누적분포함수와 확률밀도함수를 온도상승효과의 고려 유무에 따라 비교하여 Fig.

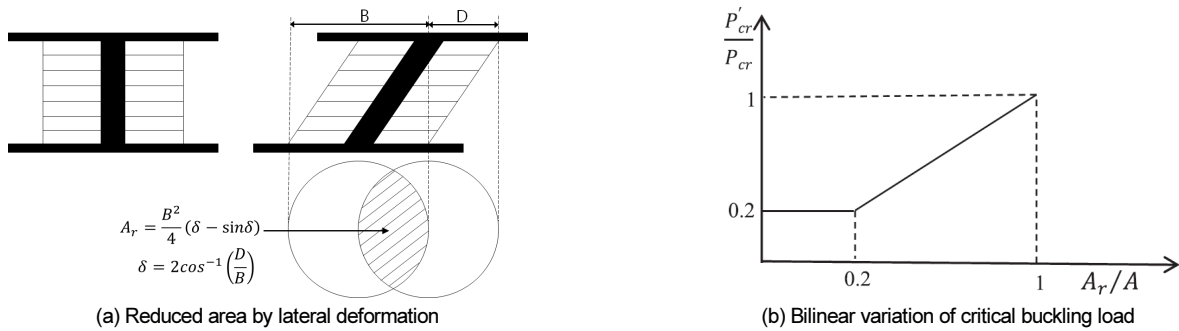
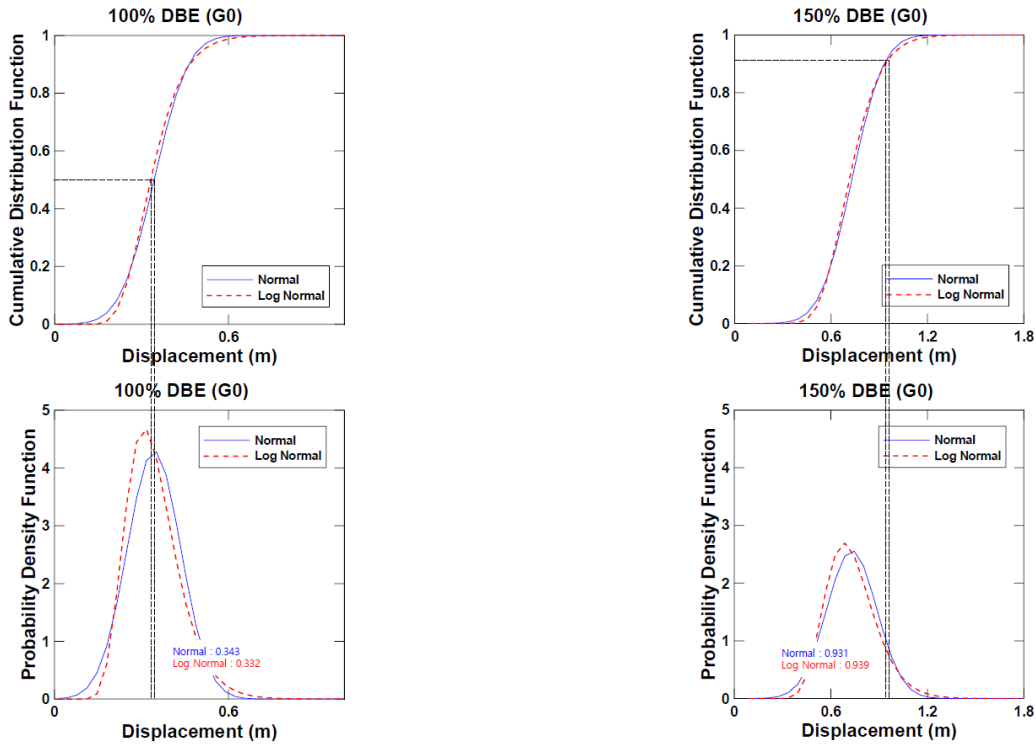


Fig. 9. Bilinear variation of critical buckling load for circular shape lead-rubber bearing



(a) Calculation procedure of median value of displacement for DBE

(b) Calculation procedure of 90%-ile value of displacement for BDBE

Fig. 10. Calculation procedures of median and 90%-ile displacements of LRB using cumulative distribution function and probability density function

11에 나타내었다. 납-고무 면진장치의 온도상승효과를 고려하는 경우가 고려하지 않는 경우에 비하여 변위응답이 전반적으로 크게 나타나기 때문에 누적분포함수와 확률밀도함수의 경향도 변위응답이 큰 방향(Fig. 11에서 오른쪽 방향)으로 이동하여 나타남을 Fig. 11을 통하여 알 수 있다. 지진하중의 크기가 증가할수록(즉 100% DBE에서 150%, 167%, 200% DBE로 증가) 온도상승효과 고려 유무에 따른 누적분포함수와 확률밀도함수의 차이(Fig. 11에서 점선과 실선의 차이)가 현저히 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 지진하중의 크기가 증가할수록 납-고무 면진장치의 비탄성 거동의 증가가 현저히 증가하고 이로 인한 납심의 소성거동이 증가하여 온도상승에 따른 면진장치의 회복강도가 감소하여 수평변위가 증가하기 때문으로 분석된다. Fig. 11에 나타난 설계기준지진(100% DBE)에 대한 면진장치의 변위응답의 중앙값을 구하여 Table 2에 나타내었다. 온도상승효과를 반영한 변위 중앙값은 $D_{median, w/H}$ 으로 표기하였고 온도상승효과를 반영하지 않은 변위 중앙값은 $D_{median, w/o H}$ 으로 표기하였다. 두 변위 중

양값의 비는 식 (9)과 같이 정의하여 Table 2에 나타내었다.

$$D_{ratio, median} = \frac{D_{median, w/H}}{D_{median, w/o H}} \tag{9}$$

Table 2로부터 G0 지진그룹에 대한 정규분포와 대수정규분포에 따른 $D_{ratio, median}$ 는 1.074와 1.076을 나타내고, M0 지진그룹에 대한 $D_{ratio, median}$ 는 1.089로 동일한 값을 나타낸다. 즉, 온도상승효과를 고려하는 경우가 하지 않는 경우에 비하여 설계기준지진(100% DBE)에 대하여 변위 중앙값이 약 7~9% 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

설계초과지진(150% DBE, 167% DBE, 200% DBE)에 대한 변위응답의 누적분포함수와 확률밀도함수를 나타낸 Fig. 11로부터 90 백분위수 변위응답을 구하여 Fig. 12에 비교하여 나타내었다. Fig. 12으로부터 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위에서 확률밀도함수에 따른 차이를 나타내

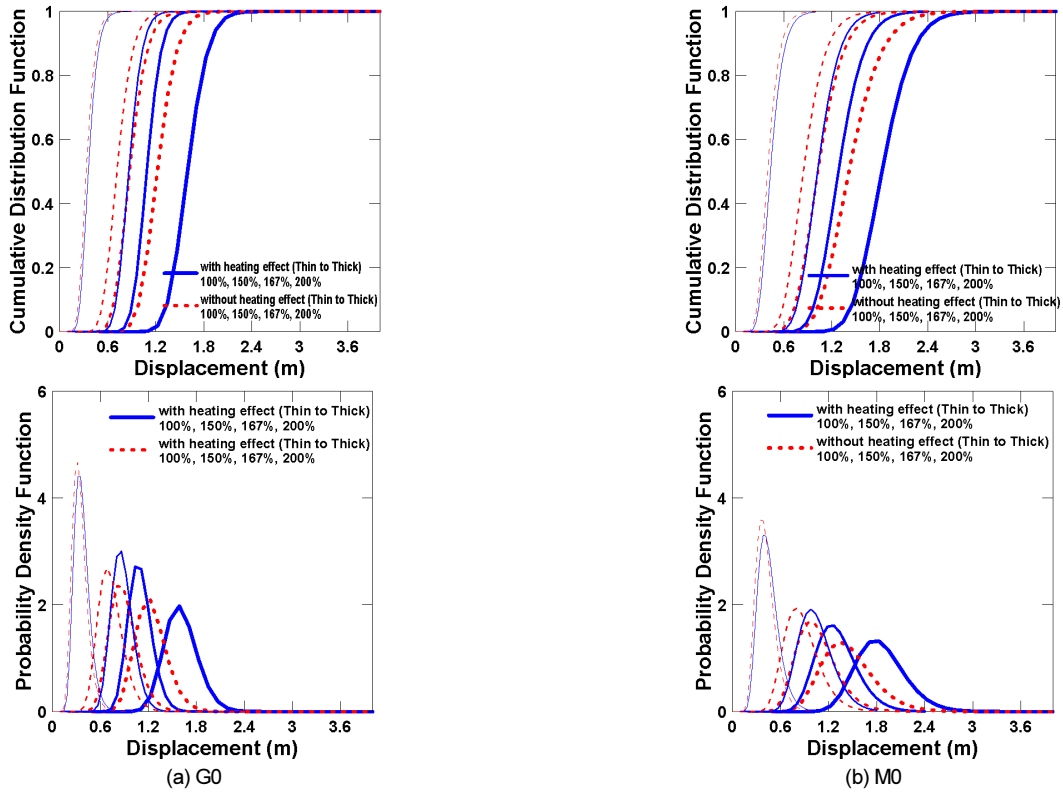


Fig. 11. Comparison of Cumulative Distribution Function and Probability Density Function with and without Consideration of Temperature Effect for Design Basis Earthquake (DBE) and Beyond Design Basis Earthquakes (150%, 167%, 200% DBE)

Table 2. Comparison of median Displacement with and without Consideration of Temperature Effect for Design Basis Earthquake

Probability Distribution Function	Median Displacements (m) and displacement ratio of LRB					
	G0 (100 DBE)			M0 (100 DBE)		
	$D_{median, w/o H}$	$D_{median, w/H}$	$D_{ratio, median}$	$D_{median, w/o H}$	$D_{median, w/H}$	$D_{ratio, median}$
Normal	0.3433	0.3689	1.074	0.4151	0.4519	1.089
Log-Normal	0.3319	0.3570	1.076	0.3985	0.4339	1.089

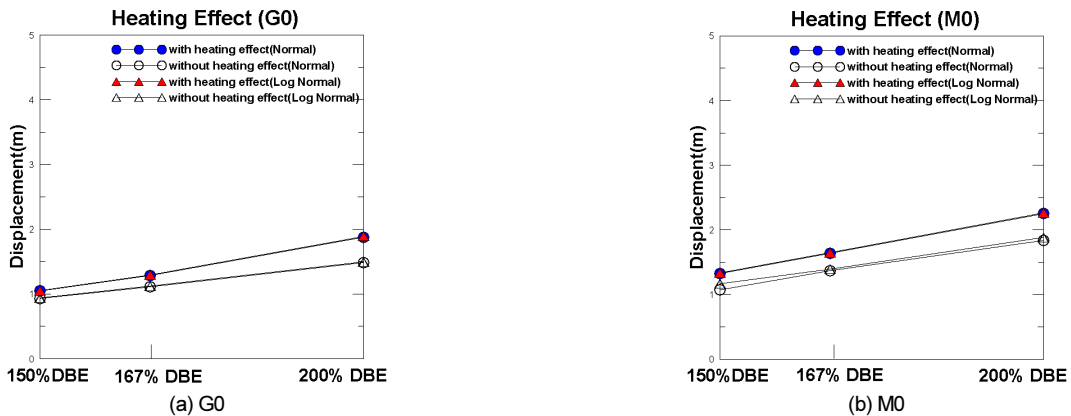


Fig. 12. Comparison of 90%-ile Displacement with and without Consideration of Temperature Effect for Beyond Design Basis Earthquakes (150%, 167%, 200% DBE)

기 위해 정규분포는 “Normal”로 대수정규분포는 “Log-Normal”로 구분하여 비교하였는데 거의 일치한 결과를 나타내므로 확률밀도함수에 따른 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 G0 지진그룹에 대한 온도상승효과의 고려에 따른 90 백분위수 변위응답은 150% DBE인 경우에 약 12%,

167% DBE에서는 약 15%, 200% DBE에서는 약 26% 증가하는 경향을 나타낼 수 있다. M0 지진그룹에 대한 온도상승효과의 고려에 따른 90 백분위수 변위응답은 150% DBE인 경우에 약 14%, 167% DBE에서는 약 18%, 200% DBE에서는 약 20% 증가하는 경향을 나타낼 수 있다. 이

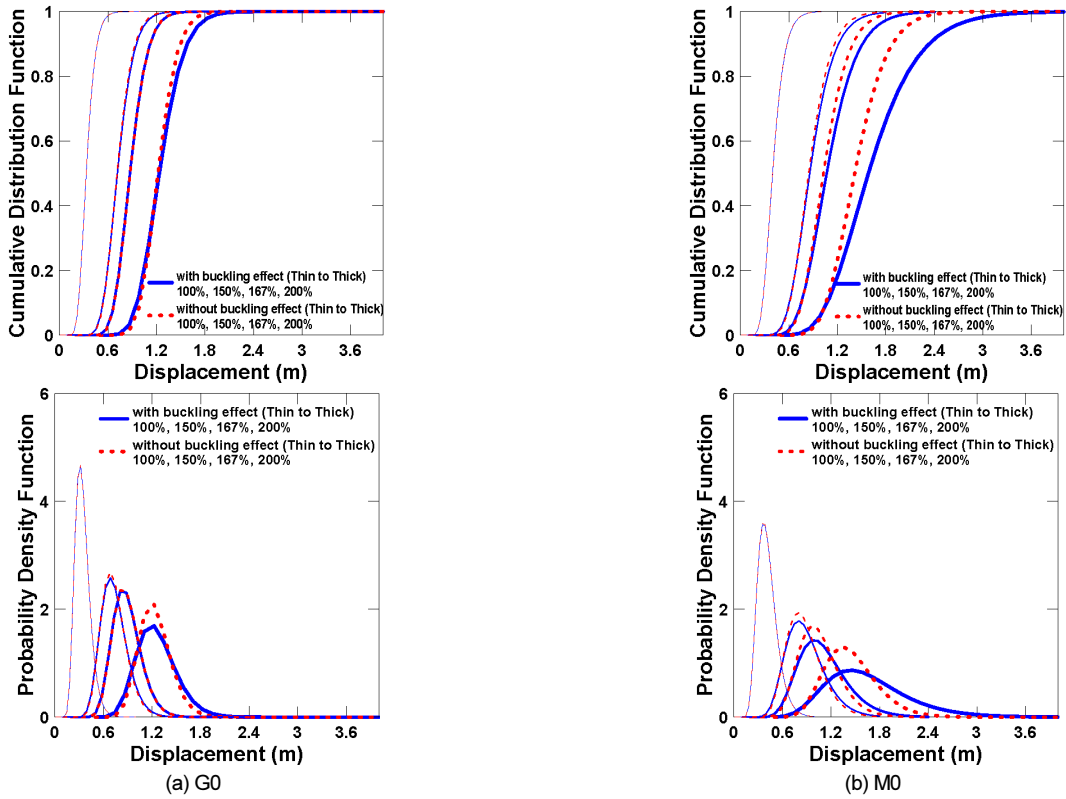


Fig. 13. Comparison of Cumulative Distribution Function and Probability Density Function with and without Consideration of Buckling Effect for Design Basis Earthquake (DBE) and Beyond Design Basis Earthquakes (150%, 167%, 200% DBE)

Table 3. Comparison of median Displacement with and without Consideration of Buckling Effect for Design Basis Earthquake

Probability Distribution Function	Median Displacements (m) and displacement ratio of LRB					
	G0 (100 DBE)			M0 (100 DBE)		
	$D_{median, w/o B}$	$D_{median, w/ B}$	$D_{ratio, median}$	$D_{median, w/o H}$	$D_{median, w/ B}$	$D_{ratio, median}$
Normal	0.3433	0.3438	1.001	0.4151	0.4161	1.002
Log-Normal	0.3319	0.3332	1.004	0.3985	0.3992	1.002

로부터 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위응답을 구할 경우에는 온도 상승효과에 의한 90 백분위수 변위응답의 증가율이 적어도 약 12% 이상 증가함을 알 수 있으므로 남-고무면진장치에서 온도상승효과를 무시하고 면진장치를 설계하는 경우에는 과도한 변위응답으로 면진장치가 심각한 손상을 받을 확률이 높아짐을 알 수 있다.

3.2 면진장치의 좌굴효과에 의한 변위응답의 영향분석

G0 그룹의 30개 지진과 M0 그룹의 30개 지진에 대한 면진장치의 최대 변위응답을 설계기준지진(100% DBE)과 설계초과지진(150% DBE, 167% DBE, 200% DBE)으로 각각 구분하여 변위응답의 누적분포함수와 확률 밀도함수를 좌굴효과에 고려 유무에 따라 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 남-고무 면진장치의 좌굴효과는 식 (6)에 나타낸 바와 같이 면진장치의 횡방향 변위응답의 증가에 따른 A_r 의 감소에 비례하여 좌굴강도가 작아지므로 변위응답이 어느 정도 값 이상이어야 A_r 의 감소로 인해 좌굴이 유발된다. Fig. 13로부터 설계기준지진(100% DBE)에 대해서는 좌굴효과에 반영 유무에 차이가 없는 것으로 나타나므로 좌굴이 발생하지 않음을 의미하

고, 설계초과지진(BDBE) 수준으로 지진하중이 증가하여야 좌굴이 발생함을 알 수 있다. 설계초과지진의 크기가 커질수록 좌굴효과에 영향이 증가하게 되어 변위응답이 증가하는 경향을 나타내기 때문에 누적분포함수와 확률밀도함수의 경향도 변위응답이 증가하는 방향(Fig. 13에서 오른쪽 방향)으로 이동하여 나타남을 Fig. 13을 통하여 알 수 있다. 지진하중의 크기가 증가할수록(특히 200% DBE의 경우) 변위응답의 분포가 좌굴효과를 고려하는 경우가 중앙값을 기준으로 넓게 분포하는 경향을 나타낸다. 200% DBE인 경우에 좌굴효과 고려 유무에 따른 누적분포함수와 확률밀도함수의 차이가 현저히 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 지진하중의 크기가 증가할수록 좌굴의 발생에 의한 면진장치의 좌굴강도가 저하되어 동일한 지진에너지를 소산시키기 위해서는 더 많은 수평변위가 요구되기 때문으로 분석된다.

Fig. 13에 나타낸 설계기준지진(100% DBE)에 대한 면진장치의 변위응답의 중앙값을 구하여 Table 3에 나타내었다. 좌굴효과를 반영한 변위 중앙값은 $D_{median, w/ B}$ 으로 표기하였고 좌굴효과를 반영하지 않은 변위 중앙값은 $D_{median, w/o B}$ 으로 표기하였다. 두 변위 중앙값의 비는 식 (9)와 같은 형태로 정의하여 Table 3에 나타내었다. Table 3으로부터 G0 지진그룹

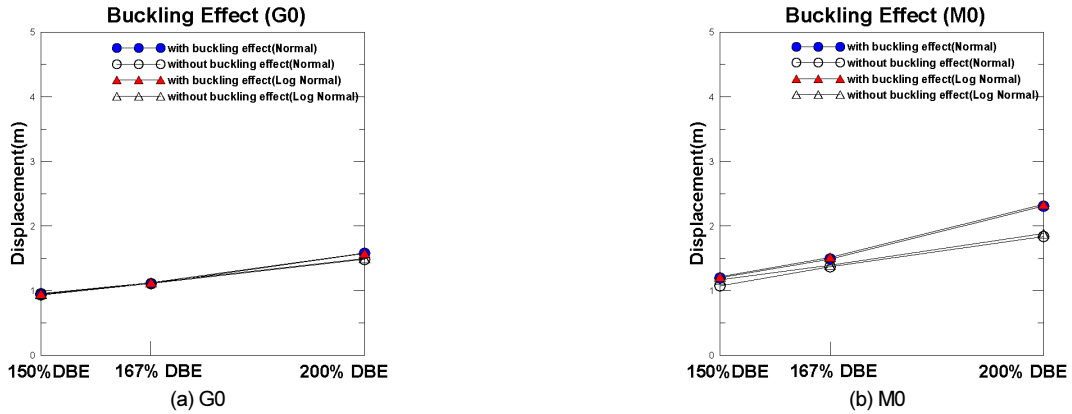


Fig. 14. Comparison of 90%-ile Displacement with and without Consideration of Buckling Effect for Beyond Design Basis Earthquakes (150%, 167% 200% DBE)

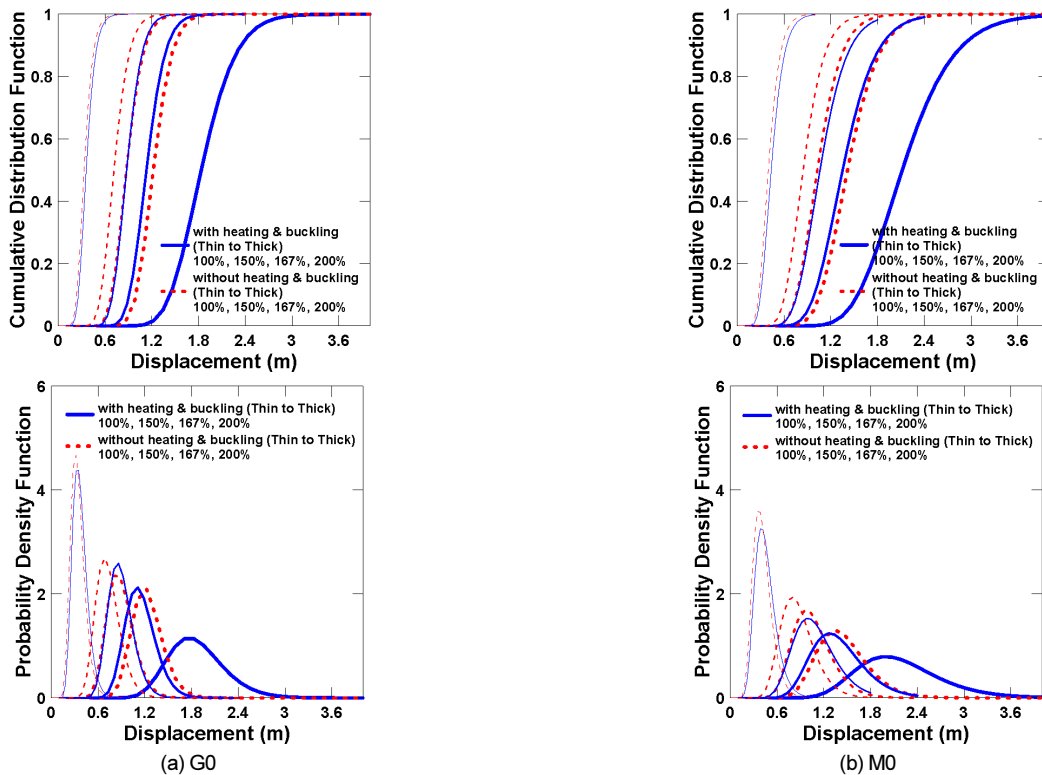


Fig. 15. Comparison of Cumulative Distribution Function and Probability Density Function with and without Consideration of Heating and Buckling Effects for Design Basis Earthquake (DBE) and Beyond Design Basis Earthquakes (150%, 167% 200% DBE)

과 M0 지진그룹에 대한 설계기준지진에 대한 $D_{ratio, median}$ 는 대략 1로 좌굴이 거의 발생하지 않았음을 의미한다.

설계초과지진(150% DBE, 167% DBE, 200% DBE)에 대한 변위응답의 누적분포함수와 확률밀도함수를 나타낸 Fig. 13로부터 90 백분위수 변위응답을 구하여 Fig. 14에 비교하여 나타내었다. G0 지진그룹에 대한 좌굴효과의 고려에 따른 90 백분위수 변위응답은 150% DBE인 경우에 약 2%, 167% DBE에서는 약 0.7%, 200% DBE에서는 약 6% 증가하는 경향을 나타낼 수 있다. M0 지진그룹에 대한 온도상승효과의 고려에 따른 90 백분위수 변위응답은 150% DBE인 경우에 약 4%, 167% DBE에서는 약 9%, 200% DBE에서는 약 24% 증가하는 경향을 나타낼 수 있다. 이로부터 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위응답을 구할 경우에는 좌

굴효과에 의한 변위응답의 증가율이 M0 지진그룹의 200% DBE의 경우에에만 크게 나타나고 나머지 경우에는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

3.3 온도상승효과 및 좌굴효과의 동시 고려시 변위응답의 영향

G0 그룹의 30개 지진과 M0 그룹의 30개 지진에 대한 면진장치의 최대 변위응답을 설계기준지진(100% DBE)와 설계초과지진(150% DBE, 167% DBE, 200% DBE)로 각각 구분하여 변위응답의 누적분포함수와 확률밀도함수를 온도상승효과와 좌굴효과의 동시 고려유무에 따라 비교하여 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15에 나타낸 설계기준지진(100% DBE)에 대한 면진장치의 변위응답의 중앙값을 구하여 Table 4에 나타내었다. 온도상

Table 4. Comparison of median Displacement with and without Consideration of Heating and Buckling Effects for Design Basis Earthquake

Probability Distribution Function	Median Displacements (m) and displacement ratio of LRB					
	G0 (100 DBE)			M0 (100 DBE)		
	$D_{median, w/o HB}$	$D_{median, w/ HB}$	$D_{ratio, median}$	$D_{median, w/o HB}$	$D_{median, w/ HB}$	$D_{ratio, median}$
Normal	0.3443	0.3695	1.076	0.4151	0.4543	1.094
Log-Normal	0.3319	0.3576	1.077	0.3985	0.4356	1.093

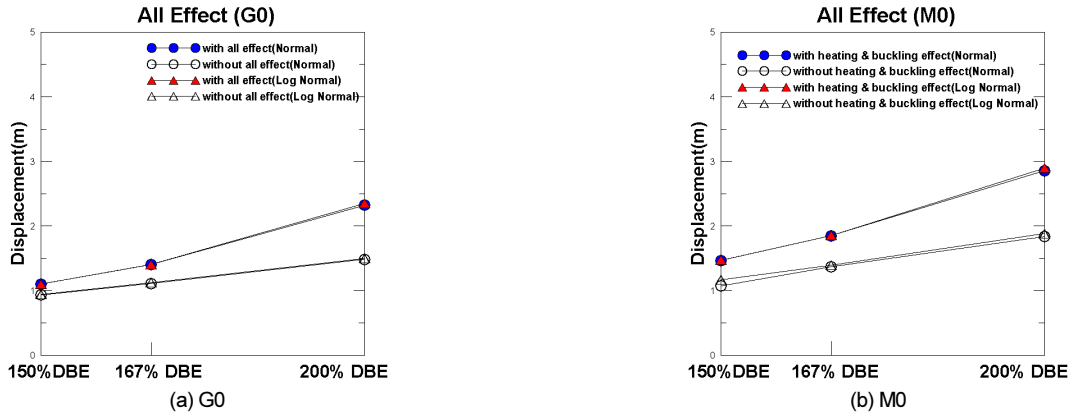


Fig. 16. Comparison of 90%-ile Displacement with and without Consideration of Heating and Buckling Effect for Beyond Design Basis Earthquakes (150%, 167%, 200% DBE)

승효과와 좌굴효과를 동시에 반영한 변위 중앙값은 $D_{median, w/ HB}$ 으로 표기하였고 온도상승효과와 좌굴효과를 동시에 반영하지 않은 변위 중앙값은 $D_{median, w/o HB}$ 으로 표기하였다. 두 변위 중앙값의 비는 식 (9)와 같은 형태로 정의하여 Table 4에 나타내었다. Table 4로부터 G0 지진그룹에 대한 $D_{ratio, median}$ 는 약 1.07이며 M0 지진그룹에 대한 $D_{ratio, median}$ 는 약 1.09를 나타낼 수 있다. Table 2와의 비교로부터 설계기준지진(100% DBE)의 경우는 온도상승효과가 지배적이며 좌굴은 거의 발생하지 않아서 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

설계초과지진(150% DBE, 167% DBE, 200% DBE)에 대한 변위응답의 누적분포함수와 확률밀도함수를 나타낸 Fig. 15으로부터 90 백분위수 변위응답을 구하여 Fig. 16에 비교하여 나타내었다. G0 지진그룹에 대한 온도상승 및 좌굴효과의 고려에 따른 90 백분위수 변위응답은 150% DBE인 경우에 약 17%, 167% DBE에서는 약 25%, 200% DBE에서는 약 57% 증가하는 경향을 나타낼 수 있다. M0 지진그룹에 대한 좌굴 및 온도상승효과의 고려에 따른 90 백분위수 변위응답은 150% DBE인 경우에 약 26%, 167% DBE에서는 약 33%, 200% DBE에서는 약 54% 증가하는 경향을 나타낼 수 있다. 이로부터 설계초과지진에 대한 90 백분위수 변위응답을 구할 경우에는 좌굴효과와 온도상승효과 반영에 의한 변위응답의 증가율이 적어도 약 17% 이상 증가함을 알 수 있으며 비탄성 거동이 일어나면 온도상승효과는 전반적으로 이에 비례하여 영향을 주지만 좌굴효과는 200% DBE 이상의 상당한 큰 지진하중에만 영향이 크게 미침을 알 수 있다. 즉, 온도상승효과와 좌굴효과를 동시에 고려하는 경우는 150%, 167% DBE에서는 온도상승효과가 지배를 하고 200% DBE에서는 좌굴효과가 지배함을 알 수 있다. 이는 면진장치의 좌굴은 횡변위가 과도한 경우에 좌굴강도가 급격히 감소되어 나타나므로 비탄성 변형이 증가함에 따라 급격한 변위응답 증가를 나타내기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 남-고무면진장치의 특성 중에서 횡방향 변위응답에 영향을 줄 수 있는 남십의 온도상승 효과와 좌굴효과의 반영 유무에 따른 변위응답의 증가 정도를 90백분위수 변위로 평가하여 비교하였다. 설계초과지진에 대한 90백분위수 변위는 면진된 원전의 정지거리 설계를 위한 값으로 온도상승효과 및 좌굴효과 반영유무에 따른 정지거리 산정에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 현재까지 면진 원전구조물의 정지거리 산정에 면진장치의 온도상승효과 및 좌굴효과의 영향은 아직 반영되고 있지 못하고 있는 현실이다. 그러므로 본 연구결과가 정지거리 산정에서 온도상승효과와 좌굴효과가 어느 정도 영향을 줄 수 있는지를 제시함으로써 정지거리를 반영한 정지체 설계에 유용하게 적용되는 자료로 활용될 수 있으리라 판단된다.

- 1) 설계기준지진(100% DBE)에 대한 변위응답 중앙값의 비교로부터 온도상승효과를 반영하는 경우에 G0 지진그룹에서는 약 7%, M0 지진그룹에서는 약 9%의 변위응답이 온도상승효과를 고려하지 않는 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다. 설계초과지진(150%, 167%, 200% DBE)에 대한 온도상승효과 고려에 의한 90 백분위수 변위응답의 증가율은 G0 지진그룹에서는 12~26%이며 M0 지진그룹에서는 14~20%로 나타난다. 남-고무면진장치의 온도상승효과를 고려하지 않고 정지거리를 산정하면 실제 정지거리보다 약 12% 이상 작게 평가하게 되어, 설계초과지진에 대한 정지체에 면진 원전구조물이 충돌할 확률을 10% 미만으로 제어하여야 하는 설계기준보다 충돌확률이 증가될 수 있다.
- 2) 설계기준지진(100% DBE)에 대한 변위응답의 중앙값의 비교로부터 좌굴효과의 영향은 0.4% 미만으로 나타나기 때문에 좌굴효과의 반영에 따른 변위응답의 증가는 거의 무시할 정도로 작게 나타남을 알 수 있다. 설

계초과지진(150%, 167%, 200% DBE)에 대한 좌굴효과 고려에 의한 90 백분위수 변위응답의 증가율은 G0 지진그룹에서는 2~6%이며 M0 지진그룹에서는 4~24%로 나타난다. M0 지진그룹 200% DBE에서의 90백분위수 변위응답의 증가율이 24%이고 나머지 설계초과지진에 대한 90백분위수 변위응답의 증가율은 9% 미만으로 온도상승효과 보다는 변위응답에 미치는 영향이 작음을 알 수 있다.

- 3) 설계초과지진(150%, 167%, 200% DBE)에 대한 온도상승효과와 좌굴효과의 동시 고려에 의한 90백분위수 변위응답의 증가율은 G0 지진그룹에서는 17~57%이며 M0 지진그룹에서는 26~54%로 나타난다. 온도상승효과와 좌굴효과에 의한 90백분위수 변위응답의 증가율을 따로 구하여 더한 것보다 동시에 두 효과를 고려한 경우가 변위응답의 증가율이 G0 지진그룹에서는 3~25%, M0 지진그룹에서는 8~10% 더 크게 나타났다.
- 4) 면진원전의 정지거리 산정을 위해 사용되는 설계초과지진에 대한 90백분위수 변위응답의 평가에서 온도상승효과와 좌굴효과를 동시에 고려하는 것이 바람직하다고 판단된다. 원전 구조물은 복잡한 형상이고 면진장치 배치나 상부구조물의 무게중심 등을 종합적으로 고려해서 평가하고 있기 때문에 본 연구에서 반영한 온도상승효과와 좌굴효과를 향후 면진 원전구조물 3차원 상세평가 시 반영하여 평가할 필요가 있다고 판단된다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1D1A3A03000767)에 의해 지원되었기에 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. KEPIC-STC, Seismic Isolation System, Korea Electric Association, c2017.
2. Kumar M, Whittaker AS, Constantinou MC. An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014;43:1955-1974.
3. Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Bommer JJ, Markatis A, McCoy E, Mendis R. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets, *Journal of Earthquake Engineering*, 2006;10(S1):67-89.
4. Kim HJ, Song JK, Moon, JH. A probabilistic study on seismic response of seismically isolated nuclear power plant structures using lead rubber bearing, *EESK J Earthquake Eng.* 2018;22(2):45-54.
5. Huang YN, Whittaker AS, Kennedy RP, Mayes RL. Assessment of base-isolated nuclear structures for design and beyond-design basis earthquake shaking, Technical Report MCEER0-09-0008, c2009.
6. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL. OpenSees: Open System of Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Center, Univ. of Calif., Berkeley, 2007. Available from: <http://opensees.berkeley.edu>.
7. Kalpakidis Y, Constantinou MC, Whittaker AS. Modeling strength degradation in lead-rubber bearing under earthquake shaking, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010;39:1533-1549.
8. Kalpakidis Y, Constantinou MC. Effects of heating and load history on the behavior of lead-rubber bearings, Technical Report MCEER-08-0027, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, c2008.
9. Constantinou MC, Whittaker AS, Kalpakidis Y, Fenz DM, Warn GP. Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading, Technical Report MCEER-07-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY, c2007.
10. Yang KK, Song JK. Inelastic Response Evaluation of Lead-Rubber Bearing Considering Heating Effect of Lead Core, *EESK J, Earthquake Eng.* 2016;20(5):311-318.
11. Timoshenko SP, Gere JM. Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, New York, c1961.