

납심의 온도상승효과를 고려한 납-고무받침(LRB)의 비탄성응답 평가

Inelastic Response Evaluation of Lead-Rubber Bearing Considering Heating Effect of Lead Core

양광규¹⁾ · 송종걸^{1)*}

Yang, Kwang-Kyu¹⁾ · Song, Jong-Keol^{1)*}

¹⁾강원대학교 토목공학과

¹⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

The lead-rubber bearing (LRB) dissipates seismic energy through plastic deformation of lead core. Under large-displacement cyclic motion, the temperature increases in the lead core. The shear strength of a lead-rubber bearing is reduced due to the heating effect of the lead core. In this study, the seismic responses such as displacement increasing, shear strength and vertical stiffness degradations of LRB due to the heating effect are evaluated for design basis earthquake (DBE) and beyond design basis earthquake (150% DBE, 167% DBE, 200% DBE).

Key words: Lead-rubber bearing (LRB), Heating effect, Shear strength degradation, Design basis earthquake, Beyond design basis earthquake

1. 서론

납-고무받침(lead rubber bearings, LRB)은 교량, 원전구조물 등의 대형 구조물에 적용되는 대표적인 면진받침 중 하나이다. 납-고무받침은 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 중심부에 납이 들어가 있고 그 주위로 고무와 철판을 겹쳐서 여러개의 층으로 쌓아 올린 형태를 갖는다. 고무사이에 철판을 넣는 이유는 철판을 삽입하지 않았을 경우 구조물의 자중에 의해 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 수직방향으로 변위가 크게 발생하여 구조물의 안정성이 저하되기 때문이다. 납-고무받침 중심에 납심을 넣는 이유는 고무받침에 사용하는 고무는 감쇠성능이 작기 때문에 지진 시에 변위가 크게 발생하게 되는데 이 때 변위가 과도하면 문제가 될 수 있으므로 변위를 적절한 수준에서 제어하기 위하여 납심을 중심부에 삽입한다. 고무층이 횡방향으로 유연성을 제공하는 반면에 납심은 주로 에너지를 흡수하여 구조물에 전달되는 에너지를 소산시키는 기능을 한다. 여기서 납을 사용하는 이유는 변형이 중지되면 본래의 결정구조로 즉시 회복하고, 비교적 낮은 응력에서 전단거동에

항복하며 이력거동을 통하여 지진의 큰 에너지를 소산시키기 때문이다.

최근에는 지진에 의한 반복거동으로 인하여 납심의 온도가 상승하는 정도와 온도 상승으로 인한 수직강성의 변화율, 전단강성의 변화율 등에 대한 연구[1, 2]가 진행되었다. 반복거동으로 인한 납-고무 받침의 내부 온도 상승은 납-고무받침의 특성에 영향을 줄 수 있으며 이러한 면진장치의 특성변화로 인하여 면진된 구조물의 지진응답에도 영향을 줄 수 있다. 그러므로 구조물의 면진을 위한 납-고무받침을 설계 할 경우에 내부온도 상승에 따른 면진장치의 특성변화와 이로 인한 면진구조물의 지진응답의 영향을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 원전 구조물의 면진설계에 사용하는 실제 크기의 납-고무받침을 사용하여, 지진하중에 의한 비탄성 반복거동에 의한 납-고무받침 내부의 온도상승 영향과 이에 따른 면진장치의 거동특성을 분석하였다. 먼저 반복하중으로 인한 면진장치내의 온도상승 정도와 그에 따른 전단강도의 감소와 변위증가를 비교하였다. 또한 전단강도의 감소로 인한 면진장치의 횡변위의 증가는 수직강성의 감소로 이어짐을 알 수 있었다. 결과 비교에는 면진장치의 온도상승정도, 힘-변위관계, 변위이력, 설계지진과 설계초과지진에서의 변위증가율, 전단강도비, 수직강성비 등을 사용하였다.

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received May 18, 2016; Revised July 19, 2016; Accepted July 20, 2016)

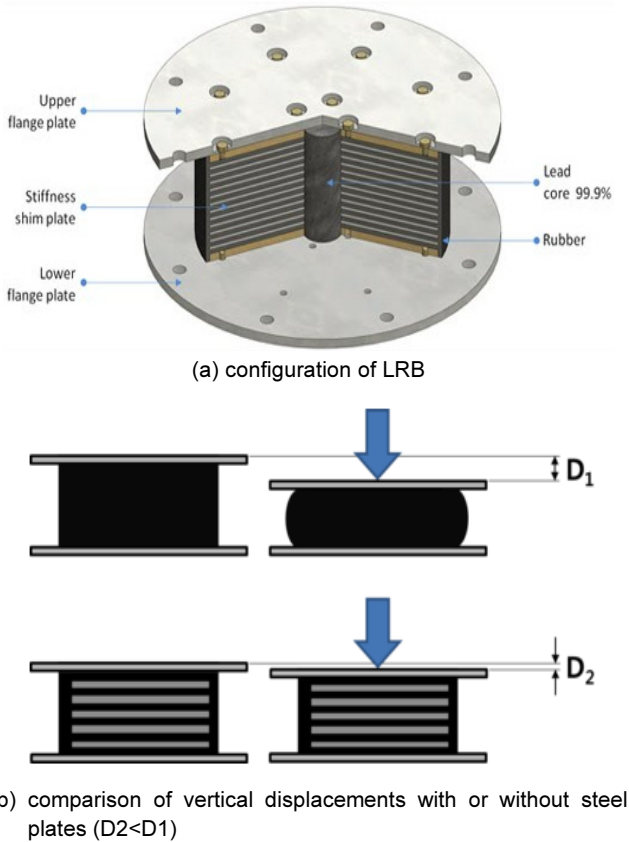


Fig. 1. Lead-Rubber Bearing (LRB)

2. 납-고무 받침(LRB)의 제원 및 면진 구조물의 해석 모델링

2.1 면진장치의 적용개념

지진하중에 의해 발생하는 구조물의 손상을 저감시키기 위한 방법으로 구조물에 전달되는 지진하중을 저감시키는 방법이 면진의 개념이며 이는 구조물에 전달되는 가속도 응답을 감소시켜서 달성할 수 있다. 납-고무받침은 내부에 납을 삽입하여 납의 비선형성을 이용한 댐퍼의 특성과 고무의 전단변형으로 인한 수평방향의 유연성의 증가로 면진구조물의 고유주기를 장주기화는 특성을 가진다[3]. 지진에 의한 구조물의 가속도 응답을 저감시키기 위해서는 수평강성이 작은 면진장치를 구조물 하부에 설치하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 고유주기를 길게 하는 방법이 있다. 면진장치에 의해 고유주기를 길게 하면 가속도 응답은 감소되지만 변위 응답은 증가한다. 하지만 대부분의 변위응답은 면진장치가 부담하고 손상과 직접적인 연관성이 있는 구조물의 상대변위는 오히려 감소하기 때문에 구조물의 지진에 대한 안전성은 향상된다.

2.2 내부온도 상승효과를 고려한 납-고무받침의 해석모델

내부온도 상승효과를 평가하기 위한 면진시스템의 해석모델로는 Fig. 3

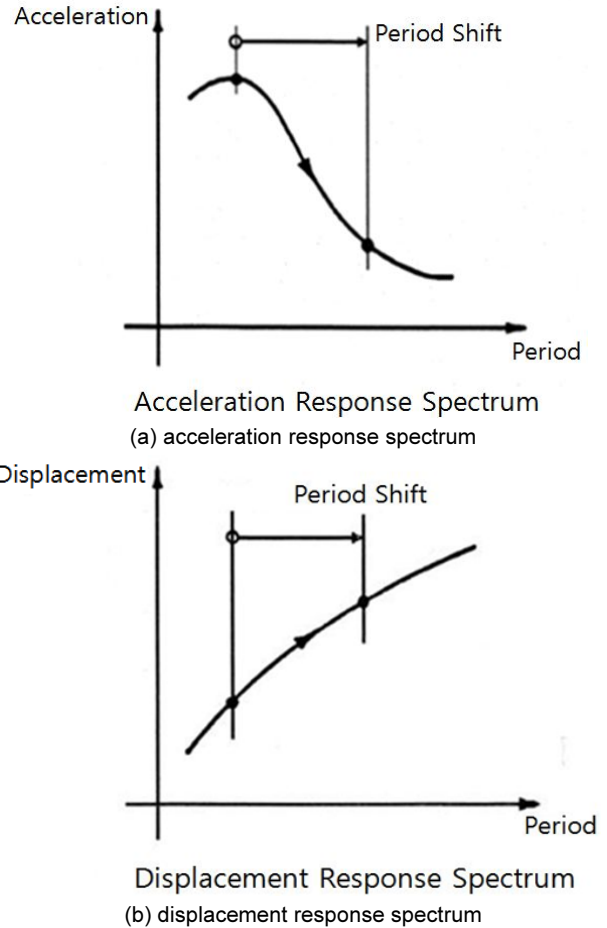


Fig. 2. Structural response characteristics by seismic isolation system

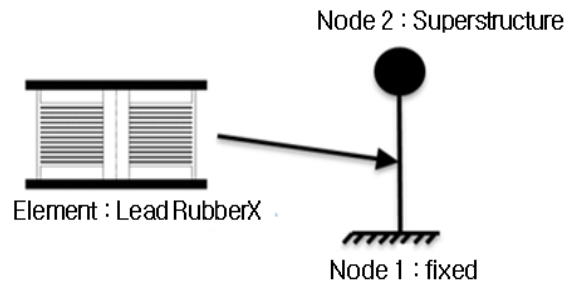


Fig. 3. 2 Node model for Lead-Rubber Bearing

에 나타난 바와 같이 2개의 절점과 1개의 부재를 이용한 2절점 모델을 사용하였다. 많은 개수의 면진장치가 구조물 면진에 적용된 경우에 많은 개수의 면진장치와 상부구조물을 동시에 모델링하여 해석하는 것 보다 2절점 모델은 단순하지만 지진하중에 대한 면진장치의 상세한 응답특성을 분석하는데 간단하면서 효과적인 모델이다. 특히, 면진장치 해석모델이 다양한 비선형응답특성을 고려한 상세모델인 경우에 해석에 사용되는 면진장치의 개수가 많아지면 해석 시간이 증가되는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 하나의 면진장치만 분리하여 실제 면진구조물의 주기와 동일한 고유주기를 가지도록 2절점 모델을 작성하여 면진장치의 특성을 분석하는

것이 효과적이다. 상부구조물의 총 질량에 의한 지진하중의 영향과 자중에 의한 면압의 영향이 2절점 모델에서도 실제 면진구조물과 동일하게 나타나도록 면진장치의 수 만큼 질량과 자중을 분할하여 동일한 고유주기를 가지도록 2절점 해석모델을 구성하였다. 2절점 해석모델은 OpenSEES 프로그램[4]을 이용하여 작성하였으며, 면진장치의 모델링은 온도에 의한 항복강도 저감특성을 반영할 수 있는 Lead Rubber-X 모델을 적용하였다. Lead Rubber-X는 이전의 해석모델들과 달리 인장에서의 공동현상과 횡변위에 의한 좌굴하중, 횡변위에 의한 수직강성, 수평전단강성의 변화, 납심의 온도상승으로 인한 전단강성의 변화를 반영할 수 있는 장점이 있다.

납심의 온도상승(heating effect)은 다음과 같은 식으로 계산된다 [1,5,6].

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

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

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

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

위의 식에서 h_L 는 납심의 높이, ρ_L 는 납의 밀도, c_L 는 납의 비열, a 는 납심의 반지름, α_s 는 철판의 열확산율, k_s 는 철판의 열전도율, t_s 는 철판의 총 높이, 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 LRB의 상대속도, Z 는 복원력에 관한 변수, E_2 는 온도와 항복응력에 관한 상수이다[1,5,6].

2.3 납-고무발침(LRB)의 제원

납-고무발침의 비선형 해석모델은 일반적으로 이선형(bilinear)으로 모델링되고 이선형 모델은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 1차강성(K_u), 2차강성(K_d)과 항복강도(Q_d)로 정의된다[3]. 본 연구에서 사용한 납-고무발침의 제원 및 특성치는 Table 2에 나타내었다. 외경은 1500 mm, 내경(납의 지름)은 400 mm, 고무층과 철판의 개별 두께는 7 mm, 납-고무발침에 작용하는 수직하중은 10,000 kN이다. Fig. 4에 나타난 1차강성을 구하는 식에서 F_y 는 항복강도, D_y 는 항복변위를 의미한다. 2차강성을 구하는 식에서 G 는 고무전단계수, A 는 고무의 단면적, T_r 는 고무층 총 두께를 의미한다. 또한 납의 밀도는 $11,200 \text{ kg/m}^3$, 납의 비열은 $130 \text{ J/kg} \cdot \text{C}$, 철판의 열전도율은 $50 \text{ W/m} \cdot \text{C}$ 으로 Kalpakidis 등의 연구[2]에서의 값을 참고하여 사용하였다.

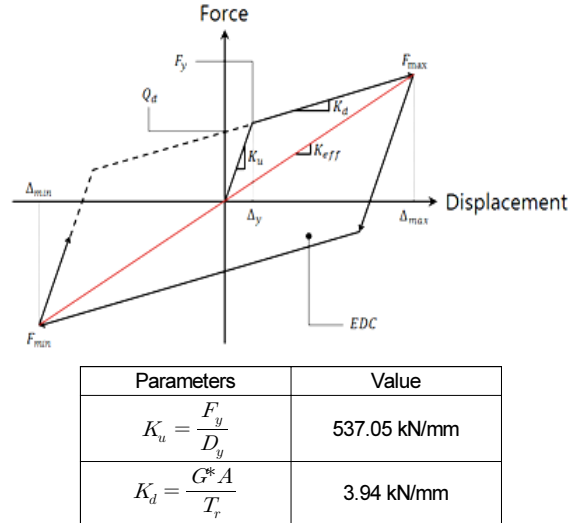


Fig. 4. Analytical model of LRB

Table 2. Size and properties of LRB used in this study

Size and Properties	Value
Inner Diameter (Lead Core)	400 mm
Outer Diameter	1500 mm
Rubber Thickness	7 mm
No. of Rubber Layer	30
Vertical Load	10,000 kN
Yield Displacement	1.88 mm
Yield Strength	1046.78 kN
Shear Modulus of Rubber	0.5 Mpa
Shear Modulus of Lead	8.33 Mpa

2.4 사용 지진

사용된 지진은 면진원전 성능검증 기준을 검토하기 위해 RspMatch 프로그램[7, 8]을 이용하여 RG 1.60 설계 응답 스펙트럼[9, 10]에 포함된 ZPA 0.5 g의 X, Y, Z 방향의 입력지진 중 수평 X방향 30개를 사용하였다. 사용된 지진에 대한 자세한 특성은 Table 3에 나타내었다. 또한 입력지진 30개에 대한 응답스펙트럼을 작성하여 RG 1.60 설계 응답스펙트럼과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다.

원전구조물은 Fig. 5에 나타난 설계기준지진(design basis earthquake, DBE)에 대하여 해석하고 설계를 수행하지만 설계초과지진(beyond design basis earthquake, BDBE)에 대하여도 해석을 수행하여 안전성을 평가한다. 그러므로 본 연구에서는 설계초과지진으로 설계기준지진의 150%와 167% 크기의 지진을 사용하였다. 설계초과지진으로 150% DBE는 NUREG 보고서[11]에 167% DBE는 ASCE/SEI 4-16 보고서[12]에 언급이 되어 있다. 아직 설계초과지진으로 150% DBE가 적절한지 167% DBE가 적절한지 최종적으로 연구결과가 나오지 않았기 때문에 본 논문에서는 두 경우를 모두 사용하여 비교하였다. 추가적으로 200% DBE 지진에 대해서도 추가하여 분석하였다.

Table 3. Characteristics of seed earthquakes used in artificially generating process

NO.	Year	Magnitude	Component	Earthquake	PGA(g)
1	1980	5.80	A-KOD180	Livermore-01	0.1066
2	1987	6.54	B-ICC000	Superstition Hills-02	0.2933
3	1999	7.14	BOL000	Duzce, Turkey	0.7662
4	1989	6.93	BRN000	Loma Prieta	0.5263
5	1994	6.69	CHL070	Northridge-01	0.2148
6	1989	6.93	CLS000	Loma Prieta	0.4975
7	1984	6.19	CLS220	Morgan Hill	0.0983
8	1980	6.33	CPE045	Victoria, Maxico	0.5722
9	1992	7.01	CPM000	Cape Mendocino	1.3455
10	1988	5.90	DKYA	Saguenay, Canada	0.1000
11	1992	6.69	ERZ-EW	Erzican, Turkey	0.4886
12	1984	6.19	G06000	Morgan Hill	0.2814
13	1976	6.8	GAZ000	Gazli, USSR	0.6438
14	1988	6.77	GUK000	Spitak, Armenia	0.2071
15	1999	7.51	GYN000	Kocaeli, Turkey	0.1387
16	1979	6.53	H-E05140	Imperial Valley-06	0.4481
17	1979	6.53	H-SUP045	Imperial Valley-06	0.1598
18	1982	5.70	IB20A	Miramich, Canada	0.3410
19	1999	7.51	IZT090	Kocaeli, Turkey	0.2037
20	1995	6.90	KJM000	Kobe	0.7105
21	1989	6.93	LGP000	Loma Prieta	0.7835
22	1994	6.69	PAC175	Northridge	0.4085
23	1994	6.69	PKC090	Northridge	0.3482
24	1971	6.61	PUL164	San Fernando	1.1644
25	1994	6.69	RRS228	Northridge-01	0.6336
26	1985	6.76	S1010	Nahanni	1.0556
27	1985	6.76	S3270	Nahanni	0.1512
28	1999	7.62	TCU072-E	Chi-Chi, Taiwan	0.4033
29	1999	7.62	TCU089-E	Chi-Chi, Taiwan	0.2878
30	1966	6.19	TMB205	Parkfield	0.2934

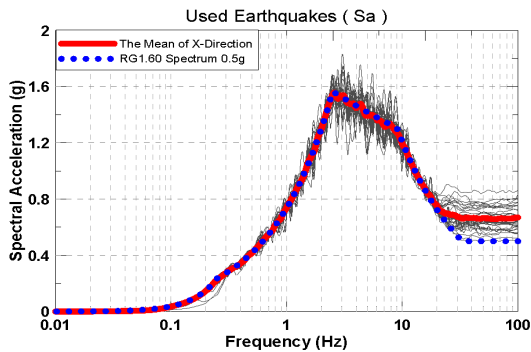
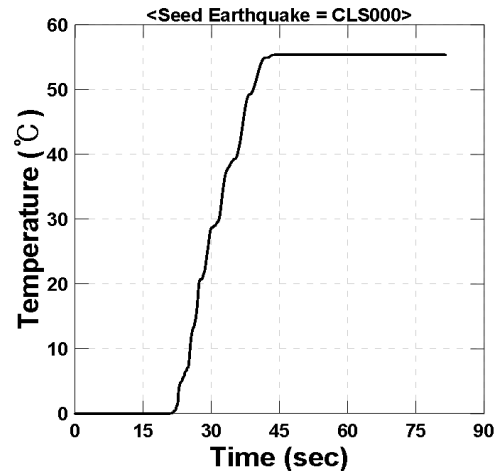


Fig. 5. Comparison of acceleration response spectrum of 30 set artificially generated records by RspMatch according to RG 1.60 Spectrum (horizontal X-direction)

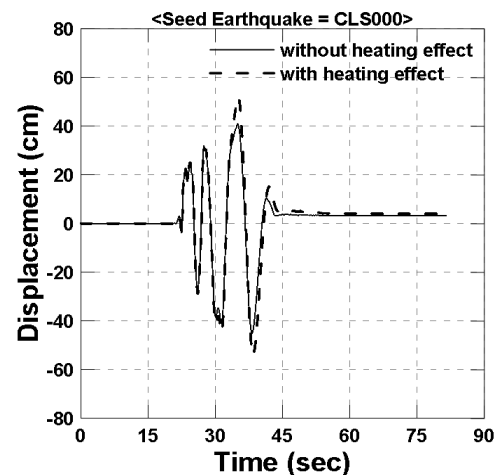
3. 내부온도 상승효과를 고려한 납-고무 받침의 지진응답 비교

3.1 내부온도 상승효과 반영유무에 따른 온도상승 정도와 거동 특성 비교

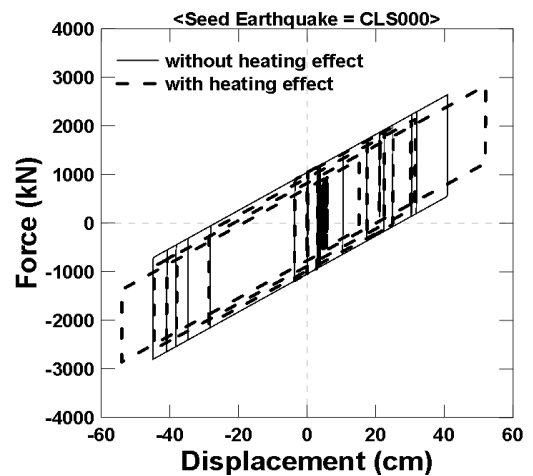
지진에 의한 납-고무 받침의 반복거동에 의한 내부온도상승을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 내부온도 상승효과와 반영 유무에 따른 납-고무 받침의 변



(a) temperature of lead core



(b) displacement response history



(c) force-displacement relationship

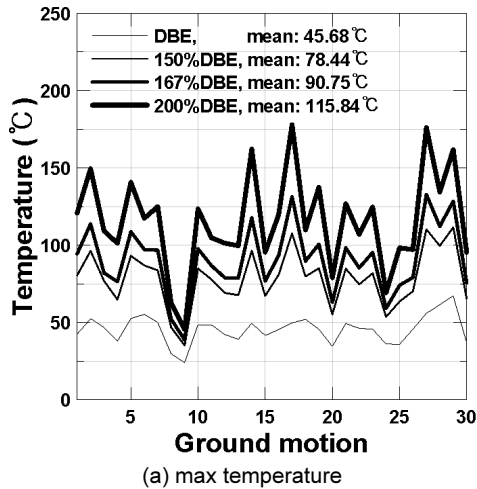
Fig. 6. Comparison of temperature, force, and displacement responses of LRB due to heating effect of lead core

위응답과 힘-변위 관계를 각각 Fig. 6(b)와 6(c)에 비교하여 나타내었다. 납-고무 받침이 강진에 의해 큰 변위응답을 유발하는 비선형 거동을 할 경우에 내부의 납심의 반복적인 소성거동에 의하여 내부온도가 상승하게 됨을 Fig. 6(a)와 6(b)의 비교로부터 알 수 있다. 이러한 납-고무받침의 내부온도 상승은 Fig. 6(c)에 나타낸 바와 같이 납-고무받침의 전단강도 저하를 유발

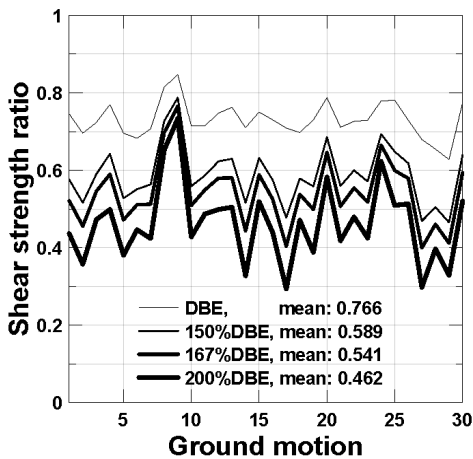
한다. 일반적으로 전단강도 저하가 커질수록 힘-변위 관계가 이루는 면적이 작아지므로 지진에너지를 소산시킬 수 있는 능력이 감소하게 되고 동일한 지진에너지를 소산시키기 위해서는 Fig. 6(b)에 나타난 것처럼 변위응답이 증가한다. 다시 말하면 납-고무 받침의 내부온도상승효과를 고려한 경우에는 강도 저하특성이 나타나며 이에 비례하여 변위응답이 증가하는 특성을 나타낸다.

3.2 납-고무받침 내부 최대온도와 전단강도비

지진하중의 크기에 따른 온도상승의 정도를 비교하기 위하여 Table 3과 Fig. 5에 나타난 30개의 설계기준지진에 대하여 각각 150%, 167%, 200% 크기를 가지도록 가속도이력을 스케일 조정하여 증가시킨 설계초과지진을 사용하였다. 설계기준지진과 설계초과지진에 대한 납-고무받침 내부의 최고온도를 구하여 Fig. 7(a)에 나타내었다. Fig. 7의 가로축은 해석에 사용한 인공지진 30개를 Table 3과 동일한 순서대로 나열한 것이다. 설계기준지진에서 설계초과지진으로 크기가 증가할수록 납-고무받침의 내부온도는 상승하며 100% DBE의 30개 지진의 평균최고온도는 45.68°C 이고, 150% DBE에서는 78.44°C, 167% DBE에서는 90.75°C, 200% DBE에서는 115.84°C이다.



(a) max temperature



(b) shear strength ratio

Fig. 7. Comparison of max temperature and shear strength ratio of LRB corresponding to DBE, 150% DBE, 167% DBE, 200% DBE.

115.84°C이다. 지진가속도의 크기의 비례보다 내부온도의 상승정도가 14~27% 정도 크게 나타남을 알 수 있다.

납-고무받침의 내부온도 상승은 Fig. 6(c)에 나타난 바와 같이 납-고무 받침의 전단강도 저하를 유발한다. 전단강도저하는 반복거동에 의한 힘-변위 거동의 횡수가 진행될수록 지속적으로 나타난다. 전단강도저하 정도를 나타내기 위하여 Fig. 4에 나타난 변위가 0인 경우의 전단강도(Q_d)를 이용하여 전단강도비($Q_{d,ratio}$)를 다음과 같이 정의하였다.

$$Q_{d,ratio} = \frac{Q_{d, reduced}}{Q_{d, initial}} \quad (5)$$

여기서, $Q_{d, initial}$ 는 초기 항복시의 전단강도이고, $Q_{d, reduced}$ 는 납-고무받침 내부온도 상승에 의해 저하된 전단강도의 최소값(힘-변위응답의 마지막 응답에서의 저하된 Q_d)을 나타낸다.

전단강도비($Q_{d,ratio}$)는 초기의 전단강도에 비하여 온도상승에 의하여 저하된 전단강도가 어느 정도인지를 나타내는 지표이다. 전단강도비가 1이면 전단강도의 저하가 발생하지 않았음을 의미하며, 1 보다 작을수록 전단강도가 비탄성응답에 의한 내부 납심의 온도상승에 의해 많이 저하되었음을 의미한다. 전단강도비($Q_{d,ratio}$)를 30개 지진에 대하여 구한 후 Fig. 7(b)에 지진하중의 크기별로 비교하여 나타내었다. 전단강도비($Q_{d,ratio}$)가 100% DBE에서는 평균적으로 0.766으로 나타나고, 150% DBE에서는 0.589, 167% DBE에서는 0.541, 200% DBE에서는 0.462로 나타난다. 지진하중의 크기가 증가할수록 내부온도 상승에 의한 전단강도의 감소가 증가하는 경향을 나타낸다.

3.3 온도상승에 의한 납-고무받침의 횡변위의 증가

납-고무 받침의 온도상승효과 반영유무에 따른 횡방향 변위응답의 차이를 30개 지진에 대하여 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)에 나타난 설계기준지진(DBE)의 결과로부터 내부온도효과를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여 최소 0.1 cm, 최대 9 cm, 평균 2.1 cm의 변위응답이 크게 나타남을 알 수 있다. 150% DBE에서는 최소 0.28 cm, 최대 15 cm, 평균 3.83 cm 변위응답이 크게 나타나며, 167% DBE에서는 최소 0.3 cm, 최대 17.4 cm, 평균 4.93 cm 변위응답이 크게 나타나며, 200% DBE에서는 최소 0.37 cm, 최대 25 cm, 평균 7.04 cm 변위응답이 크게 나타난다. 이는 내부온도효과를 고려하지 않을 경우에 변위응답을 실제의 변위응답보다 과소평가할 수 있음을 의미하며 과소평가로 인한 면진장치 설계 시 예측하지 못한 과대변위에 의한 면진장치의 손상이 과소평가 될 수 있음을 의미하기도 한다.

납-고무 받침의 내부온도 상승효과를 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비하여 횡방향 변위가 어느 정도 증가하는지를 평가하기 위하여 다음과 같이 변위비(D_{ratio})를 정의하였다.

$$D_{ratio} = \frac{D_{heat}}{D} \quad (6)$$

여기서 D 는 내부온도 상승효과를 고려하지 않은 경우의 납-고무받침의 횡

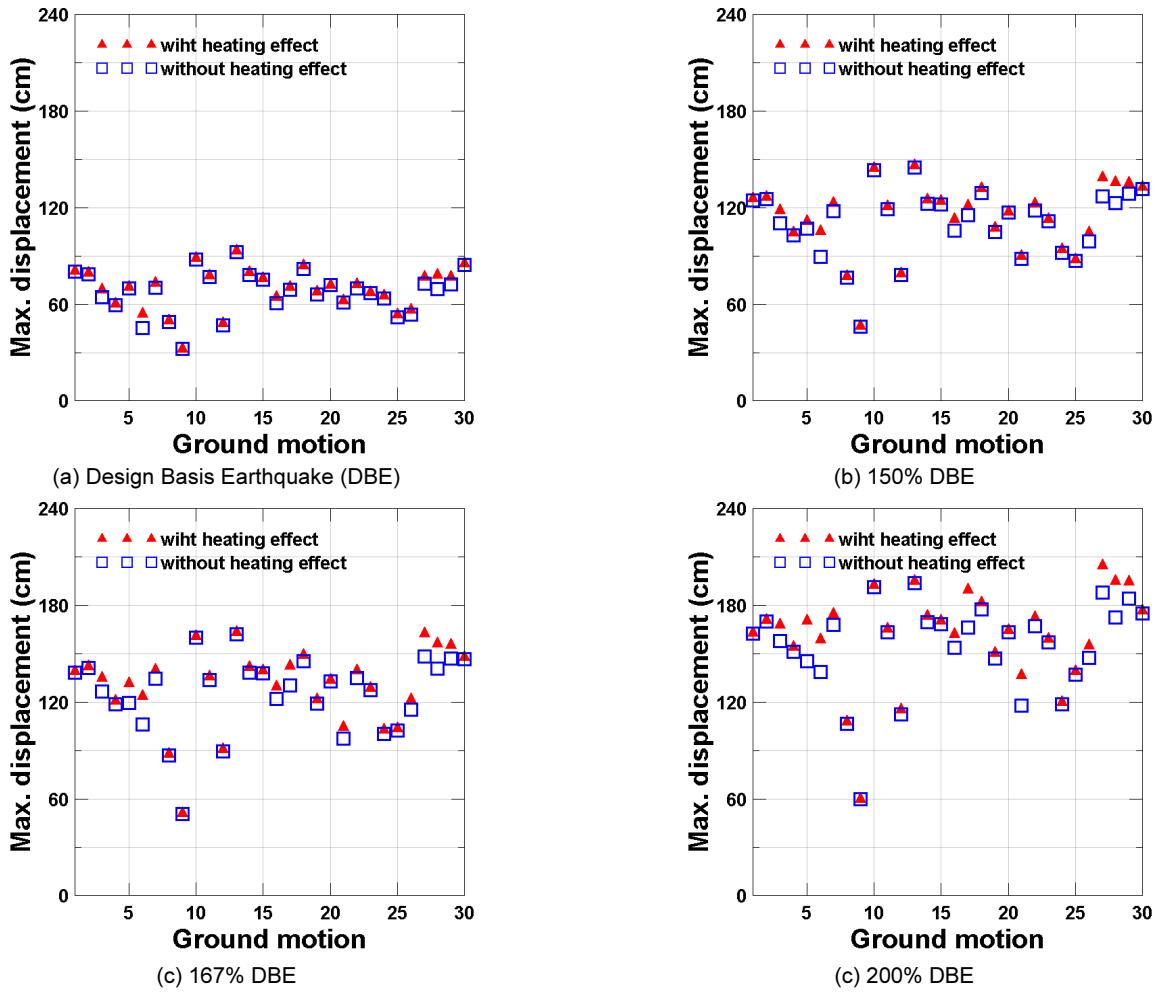


Fig. 8. Comparison of maximum lateral displacements of LRB due to heating effect

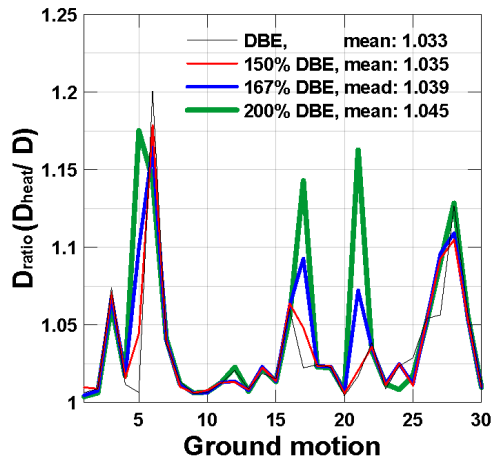


Fig. 9. Increasing ratio of lateral displacement of LRB due to heating effect

방향 최대변위를 나타내며, D_{heat} 는 내부온도 상승효과를 고려한 경우의 납-고무 받침의 횡방향 최대변위를 나타낸다.

Fig. 8에 나타난 내부온도 상승효과 반영유무에 따른 납-고무 받침의 횡방향 최대변위 응답의 결과로부터 식 (6)에 정의한 변위비를 구하여 Fig. 9

에 나타내었다. 변위비(D_{ratio})는 1.01~1.2의 범위를 가지며 평균적으로는 1.04의 값을 가진다. 즉 내부온도 상승효과에 의한 납-고무 받침의 횡방향 변위의 추가적인 증가율은 평균 약 4% 정도임을 알 수 있으며 이는 온도상승에 의한 전단강도 감소율(대략 23%~54%)에 비하여 변위응답의 증가율(대략 4%)은 상대적으로 작은 영향을 주는 것을 의미한다.

3.4 납-고무받침의 횡변위 증가로 인한 수직강성 변화

납-고무받침의 횡방향 변위의 증가는 수직강성에 영향을 준다[2]. 납-고무 받침의 횡방향 변위응답이 증가하면 수직강성이 저하되며, 내부온도 상승으로 인한 횡변위의 추가적인 증가로 인하여 수직강성이 추가적으로 저하될 수 있음을 의미한다. 초기의 수직강성에 대하여 횡방향 변위의 증가에 따라 저하된 수직강성의 비를 수직강성비($S_{ratio}(t)$)로 다음과 같이 정의한다.

$$S_{ratio}(t) = \frac{K_v(t)}{K_{vo}} \quad (7)$$

여기서 K_{vo} 는 횡변위가 0일 때의 수직강성(초기수직강성)을 나타내며,

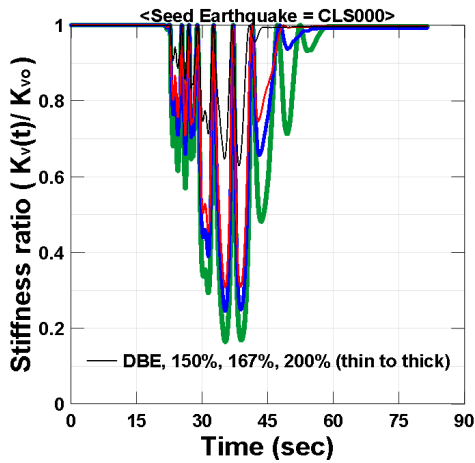
$K_v(t)$ 는 횡방향 변위응답의 증가에 따라 감소되는 수직강성을 나타낸다. $K_v(t)$ 는 다음과 같은 식으로 정의한다[1, 2].

$$K_v(t) = \frac{AE_c}{T_r} \left[1 + \frac{3}{\pi^2} \left(\frac{u_h}{r} \right)^2 \right]^{-1} \quad (8)$$

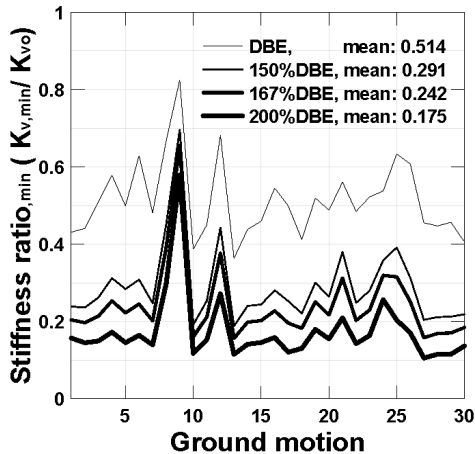
여기서, A 는 고무의 단면적, E_c 는 압축탄성계수, T_r 는 고무층의 총두께, r 은 고무접합면적의 관성반경, u_h 는 횡변위를 의미한다. Fig. 6(b)에 나타난 변위응답이력과 강성비의 이력관계를 비교하기 위하여 동일한 지진기록(Table 3의 CLS000)에 대한 수직강성비의 이력($S_{ratio}(t)$)을 구하여 Fig. 10(a)에 나타내었다. 변위응답이 크게 증가하는 구간에서 수직강성이 크게 감소하고, 변위응답이 작아지는 구간에서는 수직강성이 원래의 강성으로 회복됨을 알 수 있다.

초기수직강성(K_{vo})에 대한 변위응답 증가에 따른 수직강성의 최소값($K_{v,min}$)의 비를 최소수직강성비($S_{ratio,min}$)로 정의하여 나타내면 다음과 같다.

$$S_{ratio,min} = \frac{K_{v,min}}{K_{vo}} \quad (9)$$



(a) instantaneous axial stiffness



(b) minimum axial stiffness

Fig. 10. Degradation of vertical stiffness of LRB due to increasing of lateral displacement

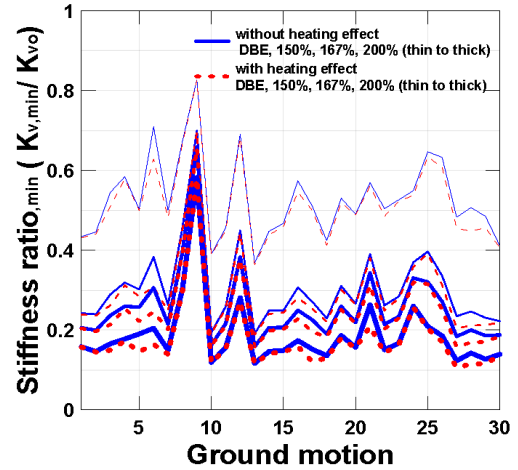


Fig. 11. Comparison of minimum vertical stiffness ratio ($S_{ratio,min}$) of LRB corresponding to heating effect.

30개의 지진에 대한 납-고무받침의 최소수직강성비($S_{ratio,min}$)를 구하여 Fig. 10(b)에 나타내었고, 온도상승효과 반영 유무에 따른 최소수직강성비를 Fig. 11에 나타내었다. 최소수직강성비가 1에 가까울수록 수직강성 저하가 작게 발생함을 의미하고 0에 가까울수록 수직강성 저하가 크게 발생함을 의미한다. 지진하중의 크기가 증가할수록 내부온도 상승으로 인한 횡변위의 증가로 수직강성의 감소가 증가하는 경향을 나타낸다. 수직강성의 감소는 상부구조물을 지지하는 능력이 저하됨을 의미하므로 면진설계에 충분히 설계에 고려되어야 할 것이다. 설계기준지진에서 비탄성응답이 최대인 구간의 수직강성은 초기수직강성의 약 50% 정도로 저하될 수 있고 설계초과지진(150% DBE 또는 167% DBE)에 대해서는 초기수직강성의 약 25~30% 정도로 감소됨을 알 수 있다. Fig. 11에 나타낸 바와 같이 온도상승효과를 반영한 경우가 반영하지 않은 경우에 비하여 수직강성이 대략 1~6% 정도 더 감소하는 경향을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 지진에 의한 반복거동에 의한 납-고무받침의 내부온도 상승효과에 대한 면진장치의 변위응답, 전단강도 저하정도, 수직강성의 저하특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지진에 의한 납-고무받침의 비탄성 반복거동은 내부온도 상승을 유발하며 이러한 온도상승효과는 지진하중의 크기가 증가할수록 크게 나타내는데, 최대내부온도가 설계기준지진(DBE)에서 평균적으로 45.68℃, 150% DBE에서는 78.44℃, 167% DBE에서는 90.75℃, 그리고 200% DBE에서는 115.84℃까지 상승한다.
- 2) 납-고무받침의 내부온도 상승은 전단강도 저하를 유발한다. 전단강도 저하는 반복거동에 의한 힘-변위 거동의 횡수가 진행될수록 지속적으로 나타난다. 초기 전단강도에 대한 최소전단강도의 비로서 정의하는 전단강도비($Q_{d,ratio}$)는 설계기준지진(DBE)에서는 평균적으로 0.766으로 나타나고, 150% DBE에서는 0.589, 167% DBE에서는 0.541, 200% DBE에서는 0.462로 나타난다. 지진하중의 크기가 증가할수록

내부온도 상승에 의한 전단강도의 감소가 증가하는 경향이 나타난다.

- 3) 설계기준지진(DBE)에서의 최대변위의 평균값은 온도효과를 고려하였을 때 69.52 cm이고 고려하지 않았을 때 67.42 cm로서 온도효과를 고려할 경우의 변위응답이 3.36% 증가하였다. 온도효과를 고려할 경우의 변위응답이 150% DBE에서는 3.49% 증가하였고, 167% DBE에서는 3.95%증가, 200% DBE에서는 4.58% 증가하였다. 이는 온도효과를 고려할 경우에 설계기준지진과 설계초과지진에 대하여 평균 약 3~5% 변위응답이 증가할 수 있음을 의미하며 납-고무 받침의 설계시에 온도효과를 고려하지 않은 경우는 변위의 과소평가로 인해 안전에 문제를 줄 수 있으므로 내부온도효과의 고려가 필요하다고 판단된다.
- 4) 온도상승을 고려한 모델은 전단강도의 감소로 인하여 횡변위가 추가적으로 발생하여 수직강성의 저하도 추가적으로 발생하지만, 추가적인 수직강성의 저하정도는 초기수직강성의 약4% 미만 정도로 나타난다. 과도한 횡방향 변위에 의한 면진장치의 손상에 대한 평가와 함께 수직강성에 대한 자중지지 능력의 상실에 대해서도 면진설계 시 꼭 평가되어야 할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

이 연구는 2014년 지식경제부 원전융합 원천기술개발사업 “원전구조물의 면진구조 설계기준 개발(2014151010170B)” 연구과제의 지원되었기에 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Kumar M, Whittaker A, Constantinou M, An advanced numerical model of elastomeric seismic isolation bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014;43:1955-1974.
2. Kumar M, Whittaker A, Constantinou M, Response of base-isolated nuclear structures to extreme earthquake shaking, *Nuclear Engineering and Design*, 2015;295:860-874.

3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities(Draft), c2012.
4. Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL, OpenSEES: Open System of Earthquake Engineering Simulation[Internet], Pacific Earthquake Engineering Center, Univ. of Calif., Berkeley, Available from: <http://opensees.berkeley.edu>.
5. Kalpakidis IV, Constantinou MC, Whittacker AS, Modeling strength degradation in lead-rubber bearing under earthquake shaking, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2010;39:1533-1549.
6. Kalpakidis IV, 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.
7. Abrahamson, NA, 1992. Non-stationary spectral matching, *Seismol. Res. Lett.*, 63, 30, c1992.
8. Atik LA, Abrahamson N, An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching, *Earthquake Spectra*, 2010;26(3):601-617.
9. U.S. Nuclear Regulatory Commission, A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion, *Regulatory Guide(RG) 1,208*, c2007.
10. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Design response spectra for seismic design of nuclear power plants, *Regulatory Guide(RG) 1,60*, c1973.
11. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facilities(Draft), c2012.
12. ASCE, forthcoming, ASCE/SEI 4-16, Seismic analysis of safety-related nuclear structures, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
13. Kalpakidis IV, Constantinou MC, Whittaker AS, Kalpakidis Y, Fenz DM, Warn GP. Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading, MCEER-07-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York, Buffalo, NY, c2007.