

등대구조물의 면진시스템 적용방안 연구

Application of Isolation System to the Lighthouse Structure

허 무 원¹⁾ 천 영 수^{2)*} 김 동 영³⁾
Hur, Moo Won Chun, Young Soo Kim, Dong Young

Abstract

In this study, seismic isolation technology to the lighthouse structure is suggested and isolation effects on response reduction are studied for three types of isolation models with the proposed seismic isolation technology. A seismic isolation system is installed on the base of the lighthouse structure in model 1, on the base of the lighthouse lens in model 2, and on the base of both of them in model 3.

The dynamic time history analysis verifies that in case of model 1, the earthquake loading is greatly reduced and the accelerations of superstructure are greatly reduced. Also, the inter-story drifts are very small and can be neglected. The isolated model is in translational state and can be seen as a rigid whole. as a results, model 1 is very effective to mitigate the influence of earthquake on structures. In model 2, isolation effects are valid but special care should be taken to failure of the non-isolated lighthouse sub-structure. In model 3, isolation effects are also valid but the effects are small. model 3 is less effective than model 1.

Keywords : Lighthouse, Seismic isolation, Maximum acceleration, Story shear, Seismic effect

1. 서론

최근에 들어 세계 각국에서 여러 차례의 강진 발생으로 지진대비에 대한 사회적 인식이 변하고 있다. 한반도 역시 규모 3.0 이상의 지진이 계속 증가하는 추세이며, 이를 반영하여 우리나라도 건축물에 대한 내진기준을 점차 강화하여 왔다. 하지만 우리나라의 경우 해안 구조물로서 중요성이 높게 평가되고 있는 등대에 대해서는 특별한 조치 없이 지진에 대해 거의 무방비 상태로 건설되고 있는 실정이다. 우리나라는 내륙지진보다 해안지역에서의 지진 발생 빈도가 높게 나타나고 있는 만큼 해안지역에 위치한 주요 구조물들에 대한 내진안전도 확보는 중요한 사회적 이슈가 될 수 있다.

지진발생 시 주요 간선도로 등이 파괴되어 피해자들에게 보급물자 등의 전달이 불가능해 지는 사태가 발생할

경우 해로는 유일한 통로가 될 것으로 전망되는 바 등대 등 해안구조물의 안전에 대한 인식은 새롭게 바뀌어야 할 것으로 사료된다.

면진기술은 신축 구조물뿐 아니라 기존 구조물에 대해서도 구조물 자체의 기능이나 미관을 손상시키지 않는 조건하에 효과적으로 내진성능을 향상시킬 수 있는 매우 실용적인 방법이며, 지진에 대한 경험이 많은 선진 외국에서 이미 그 효용성이 입증된 방법이다. 국내의 경우 건축토목용 면진에 대해서는 그간 관련 전문가 및 단체들의 노력에 의하여 다수의 실무적용 실적이 있을 만큼 실용화에 한 걸음 다가가는 상태이나 등대의 렌즈 등과 같이 비 건축용 면진으로 사용되고 있는 면진장치는 가이드 형식에 국한되어 있는 상태이며, 각 장치에 대한 명확한 평가기준과 그 설계방법 또한 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 등대 구조물을 대상으로 면진기

1) 정회원, 단국대학교 건축공학과 박사과정
2) 정회원, LH 토지주택연구원 수석연구원, 교신저자
3) 정회원, 삼영엔텍(주) 내면진연구소 연구소장

* Corresponding author : cysoo@lh.or.kr 010-9453-1272

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

술 적용방안을 제시함으로써 지진에 대해 무방비상태에 놓여 있는 등대구조물의 지진 안전도 확보방안을 제시해 보고자 한다. 또한, 제시한 면진기술 적용방안을 활용하여 내진설계 이전에 지어진 등대를 대상으로 등대전체를 면진화 하였을 경우, 등대 렌즈만을 면진화 하였을 경우 및 앞의 두 경우를 모두 적용하였을 경우에 대하여 면진 효과를 분석해 보고자 한다.

2. 등대 구조물의 면진기술 적용 방안

먼저 등대에 적용되는 면진장치의 종류는 일반 건축물에 사용하는 적층고무 타입 보다는 미끄럼계 타입을 사용해야 한다. 적층고무 면진장치는 경량물에 적용이 어렵고 코일 스프링을 이용한 시스템의 경우에도 적재물이 가벼우면 무게가 변화할 때 면진효과가 저하되는 등의 문제가 발생하기 때문이다.

일본의 경우 과거에는 주로 교량 등 토목구조물에 면진과 같은 고성능 내진기술이 적용되어 왔으나, 1995년 고베지진이 발생한 이후 내진설계의 강화만이 최선이 아니라는 판단 하에 “건축물의 내진개수 촉진”에 관한 법률이 시행되어 공공성이 높은 건물에 내진개수를 위한 노력과 의무가 부여되었으며, 이를 바탕으로 등대 면진도 시작되어 그 적용 건수가 5,000건이 넘는 것으로 파악되었다 (Japanese Maritime Security Testing Research Center, 1999).

현재 등대면진에 적용되는 대표적인 장치들은 롤러 받침형 면진장치와 코스인 레일형 면진장치 등이 있다 (Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2005) (Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Maritime Security Headquarters, 2006). Fig. 1은 롤

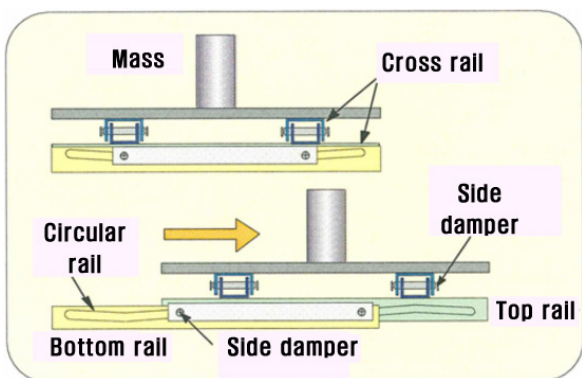


Fig. 1 Roller isolation device

러 받침형 면진시스템을 나타낸 것으로 곡선형레일의 받침기구, 그리고 중력에 의한 복원기구와 마찰저항에 의한 감쇠기구로 구성되어 있다. 이 시스템은 원호형태의 상하 레일을 따라 롤러가 이탈하지 않게 하고 있으며 직교 2방향 독립레일로 장치를 가이드 함으로써 비틀림 진동이 발생하지 않게 되어 있다. 또한, 면진장치의 성능을 검증하기 위해 시간이력해석을 수행한 결과 면진장치는 지진에 의해 입력되는 가속도를 1/10로 감소시켜 상부구조물로 전달할 수 있는 것으로 확인되었다. Fig. 2는 코스인 레일 시스템(Cosine Rail System, CRS) 면진장치의 개념을 도시한 것으로써 금속 롤러 방식의 일종으로 측면 형상이 코스인 커브 모양을 한 레일 롤러를 사이에 두는 구조이다. 지진 시 상부 구조는 수평방향으로 이동하며 진자 모양으로 진동하며 복원력은 롤러와 레일의 구배에 의해 복원특성을 나타낸다. CRS 면진장치는 마찰계수가 작아서 감쇠력을 확보하기 위해 점성댐퍼를 채용하여 고성능화를 실현하였다.

등대는 중량이 가볍고 속이 빈 원통형으로서 이에 적합한 면진장치는 레일의 기하학적 구조에 의한 일종의 진자운동을 채용하고 장주기화를 피하여 적재물의 무게와 관계없이 우수한 면진효과를 발휘할 수 있어야 한다. 또한 중심위치가 높고 불안정한 것에도 대응하기 위해 전도를 방지하는 안전장치 기구를 갖추고 있어야 한다.

두 번째는 등대와 같은 구조물에 면진을 적용할 경우 등대가 위치하고 있는 지반의 종류, 등대의 형상 및 구조 등에 따라 바닥 지진동에 대한 응답은 각각 다르지만 지진 경험이 많은 일본의 사례를 분석해 본 결과 필요 요구 성능은 렌즈 탑 기초부 입력가속도에 대한 응답가속도 감소 1/5, 응답변위 100mm 정도를 확보하도록 하는 것이 바람직하다 (Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Maritime Security Headquarters, 2006) (The Japan Society of Seismic Isolation, 2008).

세 번째는 기존연구에서 제시된 중·저층 구조물의 경우 면진 전 구조물의 주기와 면진 후 주기비로 2.5배 이상, 그리고 2.0초 이상으로 적용하여야만 충분한 면진효과를 발휘할 수 있다 (Chun and Hur, 2010).

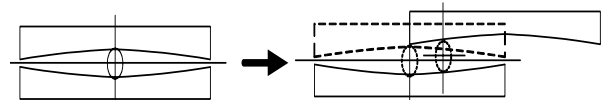


Fig. 2 Cosine rail system isolation device

3. 면진기술 적용효과 분석

본 장에서는 우리나라 내진설계 이전에 지어진 등대구조물을 대상으로 2장에서 제시한 면진기술 적용방안을 활용하여 면진설계를 실시한 후 그 효과를 3가지 케이스로 나누어 검토하였다. ① 케이스 1은 등대 전체를 면진화 하였을 때이고, ② 케이스 2는 등대의 주요 부재인 등대 렌즈만을 면진화 하였을 때이며, ③ 케이스 3은 케이스 1과 케이스 2를 모두 적용한 경우이다.

3.1 연구대상 구조물

연구대상 등대 구조물은 내진설계 이전인 1980년도에 지어진 무인등대로서, 강원도에 위치해 있으며 3단 규모의 철근콘크리트 구조이다. 구조재료의 강도는 콘크리트 압축강도는 18 MPa, 철근의 항복강도는 300 MPa이다. 면진적용 전 등대의 주기는 0.12sec이며, 면진적용 후 주기는 기존의 연구결과를 토대로 2.0sec를 목표로 하여 설계하였다(Chun and Hur, 2010). 기존 등대의 설계조건은 풍하중의 경우 설계 설계기본풍속(V_0) : 35.0m/sec이며, 노풍도는 D이다. 지진하중의 경우 지역계수는 KBC 2009에 따른 내진기준을 적용하여 $A=0.22$, 지반계수는 $S_D(S_{DS} = 0.499, S_{D1} = 0.288)$ 이고, 중요도 계수 (I_W)는 1.2를 채용하여 검토하였다. 다음 Fig. 3은 등대구조물의 단면도와 입면도를 나타낸 것이다.

3.2 설계하중(Architectural Institute of Korea, 2009)

3.2.1 층별 중량

지진에 의해 발생하는 관성력은 고정하중에 의한 것으로

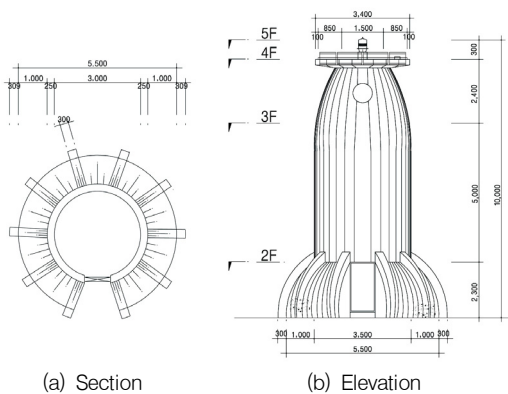


Fig. 3 Section and elevation of the lighthouse

로 간주하며, 연구대상 등대구조물을 Fig. 3(b)와 같이 5개의 층으로 구분할 때 각 층별 중량은 Table 1과 같다.

3.2.2 풍하중 및 지진하중

구조물에 작용하는 횡하중은 크게 풍하중과 지진하중이 있으며, 풍하중 시 면진장치는 항상 탄성에 머물러 있어야 한다. 풍하중 상태에서 면진장치가 작동할 경우 사용성 문제를 야기할 수 있으므로 등대 구조물에 작용하는 풍하중을 파악하여 면진장치 설계에 반영하여야 한다.

또한, 면진시스템을 설계하기 위해서는 면진장치가 설치되기 전 구조물의 동적특성을 파악하여 설치 될 면진장치와의 상호작용을 고려하여야 한다. 이는 면진장치가 상부 구조물의 강성분포나 질량분포에 따라 거동이 달라질 수 있기 때문이다.

Table 3에 등대에 작용하는 지진하중을 나타내었으며, Table 4에 비 면진구조물로서 등대의 기본적인 동적특성을 나타내었다.

3.3 면진장치 설계 및 배치

3.3.1 케이스 1 - 등대 전체를 면진화한 경우

① 목표면진주기

면진구조물의 유효주기는 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되며, 면진시스템의 변형특성을 결정짓는 목표 면진을 달성하기 위해 필연적으로 수반되어야 한다.

Table 1 Story weight

story name	story level (m)	story weight (kN)
5F	10.0	6.0
4F	9.7	68.7
3F	7.4	303.7
2F	2.4	421.3
1F	0.0	-
TOTAL		799.7

Table 2 Wind load

story name	story weight (kN)	story level (m)	story shear (kN)	overturning moment (kN·m)
5F	6.00	10.0	0	0
4F	68.65	9.7	0.3	0
3F	303.73	7.4	6.26	14406.48
2F	421.29	2.4	35.59	192335.39
1F	-	0	75.09	372551.35

Table 3 Earthquake load

story name	story weight (kN)	story level (m)	story shear (kN)	overturning moment (kNm)
5F	6.0	10,000	0	0
4F	68.7	9,700	2.4	0.7
3F	303.7	7,400	29.1	67.6
2F	421.3	2,400	119.0	662.7
1F	-	0	159.5	1000.0

Table 4 Vibration mode shapes

mode no.	angular freq. (rad/sec)	frequency (cycle/sec)	period (sec)
1	53.7776	8.5590	0.1168
2	53.7776	8.5590	0.1168
3	370.8633	59.0247	0.0169

Mode 1	Mode 2	Mode 3

면진주기의 설정은 설계하고자 하는 구조물의 성능을 결정하는 것이므로 설계절차에서 가장 선행되어야 하는 단계이다. 본 등대 예제구조물은 전술된 바와 같이 설계변위에서의 유효 면진주기는 2.0초로, 최대변위에서의 유효 면진주기는 3.0초로 설정하였다.

② 면진시스템의 유효 강성 결정(ASCE/SEI, 2010)

설계변위(D_D)와 최대변위(D_M)에서 면진 구조물의 유효 주기는 다음 식 (1)에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정 한다. 그러므로 기 설정된 목표 면진주

기를 이용하여 역으로 목표 면진주기를 만족시키기 위한 면진시스템의 변형특성을 결정 할 수 있다.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_D(K_M) \times g}} \quad (1)$$

여기서, W : 상부 건물의 유효 중량(=799.7 kN)
 K_D : 설계변위에서 면진시스템의 유효강성
 K_M : 최대변위에서 면진시스템의 유효강성

$$K_D = \frac{4\pi^2 \times 799.7}{4 \times 9800} = 0.81 \text{ kN/mm}$$

$$K_M = \frac{4\pi^2 \times 799.7}{9 \times 9800} = 0.36 \text{ kN/mm}$$

③ 면진장치 설계 및 면진시스템 구성

상기 조건에 따라 본 연구에서는 면진시스템의 구성요소로 납봉삽입적층고무(Lead Rubber Bearing, LRB)와 미끄럼계 베어링(Isolation Roller Bearing, IRB)의 2종류 장치를 사용하였다. 적용개수는 각각 1개와 4개로 총 5개의 장치가 면진시스템의 구성을 위하여 사용되었다. 이러한 면진장치의 조합은 설정된 면진시스템의 주기, 강성 등의 조건을 모두 만족하면서 복원력 특성을 제공하기 위한 것이다. Table 5와 Fig. 4는 설계된 면진장치의 제원과 이력특성을 나타낸 것이다.

④ 면진장치 배치

Fig. 5에서 보듯이 연구대상 등대 구조물의 형상은 속이 빈 원통형 모양으로서 질량(mass)이 작아 면진주기를 장주기로 설정하는데 어려움이 있으며, 면진장치를 설치하기도 어렵다.

Table 5 Details of Isolation bearing

LRB (Lead Rubber Bearing)		IRB (Isolation Roller Bearing)	
Outer diameter(D_o , mm)	600	Roller arrangement (a×b, c×d)	(상) 2×10
Lead bar diameter(D_l , mm)	100		(하) 2×10
Rubber thickness(mm)	5.0	Roller size(mm)	φ 20×50
No of rubber layer	30	Product size(mm)	400×400×140
Total rubber thickness(mm)	150	Using load(kN)	800
1 st Shape factor S1	30	Maximum load(kN)	2,000
2 nd Shape factor S2	4.00	Axial stiffness(kN/mm)	3,000
Steel plate thickness(mm)	4.0	Coefficient of friction	0.002
Lateral stiffness(kN/mm)	0.9	stroke (mm)	± 250

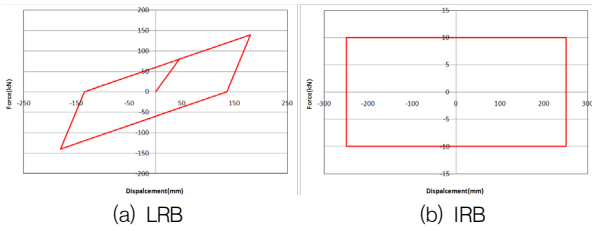


Fig. 4 Hysteretic characteristics of the isolation bearing

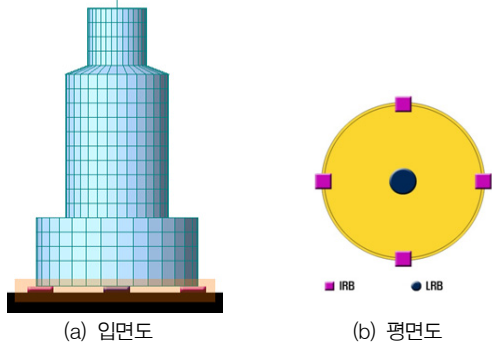


Fig. 5 Section and elevation of Isolation plan

Table 6 Displacement of the isolation layer under the wind loads

	story	level (m)	story height (m)	maximum displacement (mm)
X-dir Y-dir	Roof	10	0	52.6
	5F	9.7	0.3	51.7
	4F	7.4	2.3	45.3
	3F	2.4	5.0	41.2
	2F	0.4	2.0	40.6
	1F	0	0.4	0

따라서 등대하부에 면진장치 설치를 용이하게 하기 위한 기초판을 설치하고, Fig. 5(b)에서와 같이 외곽에는 IRB를 설치하였으며, 가운데는 감쇠력과 수평강성을 지닌 LRB를 설치하여 주기를 조절하였다. 이러한 배치는 등대구조물의 질량중심과 강성중심을 일치시켜 비틀림에 의한 영향을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

⑤ 풍하중 검토

Table 6은 풍하중 적용 시 X방향, Y방향의 변위를 나타낸 것으로 풍하중에 대하여 면진 층이 항복하지 않는 것을 확인할 수 있다.

- 면진층 변위 = $40 \text{ mm} < wD_y = 45 \text{ mm}$ (면진층 항복변위)

Table 7 Damping coefficient, B_D or B_M (ASCE7-10, Table 17.5-1)

Effective Damping, β_D or β_M (percentage of critical)	B_D or B_M Factor
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

⑥ 최소 수평변위 산정

면진시스템은 다음 식 (2)에 따라 구조물의 수평 주축 방향으로 발생하는 최소 수평변위 (D_D)를 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

$$D_D = \frac{g \cdot S_{D1} \cdot T_D}{4\pi^2 B_D} \quad (2)$$

$$= 164.64 \text{ mm} < \frac{D}{2} = \frac{600}{2} = 300 \text{ mm} \rightarrow \text{O.K.}$$

여기서 g : 중력가속도, 설계 변위

S_{D1} : 주기 1초에서 설계 5%감쇠 스펙트럼의 가속도 변수 (= $3.4MA = 0.49742$)

T_D : 고려 방향의 설계 변위에서 면진 구조물의 유효주기 (= 2.0초)

B_D : 면진시스템의 유효 감쇠 (β_D)와 연관된 수치 계수, 본 예제에서는 20%의 유효 감쇠를 가정하여 다음 Table 7로부터 산정한다 (= 1.5).

3.3.2 케이스 2 - 등대 렌즈를 면진화한 경우

① 면진시스템의 유효 강성 결정

설계변위 (D_D)와 최대변위 (D_M)에서 면진건물의 유효 주기는 케이스 1과 동일하게 식 (1)에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정되어야 한다. 목표 면진주기는 3.3.1절에서 설정한 것과 동일한 조건으로 한다. 따라서 설정된 목표 면진주기를 이용하여 역으로 목표 면진주기를 만족시키기 위한 면진시스템의 변형특성을 결정한다.

$$K_D = \frac{4\pi^2 \times 6}{4 \times 9800} = 0.006 \text{ kN/mm}$$

$$K_M = \frac{4\pi^2 \times 6}{9 \times 9800} = 0.0027 \text{ kN/mm}$$

② 면진장치 설계 및 면진시스템 구성

이 경우 면진시스템의 구성요소로 결정된 면진장치는 IRB 1종류이다. IRB는 면진시스템의 주기, 강성 등의 조건을 모두 만족한다. 등대 렌즈를 면진화 할 경우에는 질량중심과 강성중심은 일체화 되어 편심은 발생하지 않는다. Table 8은 설계된 IRB의 장치상세를 나타낸 것이다.

3.3.3 케이스 3 - 등대와 렌즈를 동시에 면진화한 경우

케이스 3의 경우는 전절에서 제시한 케이스 1과 케이스 2를 모두 적용하여 등대 예제구조물을 면진화하였다. 이를 통해 케이스 1과 케이스 2의 효과를 좀더 정확하게 분석해보고자 한다.

4. 비선형 동적 해석

4.1 입력지진동

입력지진동은 ASCE 7-10 17.6.3.4절의 규정에 따라 El Centro NS(1940), TAFT EW(1952), Hachinohn

Table 8 IRB details

Roller arrangement (a×b, c×d)	(상) 2×6 (하) 2×6
Roller Size(mm)	φ 20×50
Product Size(mm)	280×280×140
Using load(kN)	500
Max. Load(kN)	1,200
Axial Stiffness(kN/mm)	3,000
Coefficient of friction	0.002
stroke (mm)	± 150

Table 9 Maximum displacement under DBE (mm)

Story	Level (mm)	STANDARD			CASE 1			CASE 2			CASE 3		
		El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn
5F	10000	3.02	2.24	2.16	100.14	163.12	120.14	102.23	66.45	127.77	153.90	251.03	214.47
4.5F	9800	2.47	1.88	1.83	100.04	162.95	120.02	101.41	65.91	126.74	153.36	250.32	213.56
4F	9700	1.93	1.52	1.51	99.93	162.79	119.90	2.12	1.23	1.33	100.06	163.10	123.25
3F	7400	0.83	0.69	0.72	99.65	162.34	119.58	0.84	0.64	0.68	99.78	162.63	122.89
2F	2400	0.15	0.14	0.15	99.41	161.95	119.30	0.13	0.13	0.15	99.53	162.24	122.60
1.5F	400	0.07	0.07	0.08	99.37	161.88	119.25	0.07	0.07	0.07	99.49	162.17	122.55
1F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

NS(1968)의 3개 지진동을 해당지반 조건에 적합하게 EPA를 조절하여 설계지진레벨(Design Based Earthquake, DBE)과 최대지진레벨(Maximum Credible Earthquake, MCE)을 대상으로 해석을 수행하였고, 해석에 사용된 프로그램은 MIDAS GEN Ver.800을 사용하였다. Fig. 6은 해석에 사용된 3개 지진파의 설계지진레벨 시 응답스펙트럼을 나타낸 것이다.

4.2 최대응답변위 검토

Table 9와 Table 12는 DBE와 MCE 레벨 시 각 지진파에 따른 비 면진과 면진의 최대응답변위의 해석결과를 비교하여 정리한 것이며, Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)는 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 비 면진구조물은 구조물의 높이에 따라 증가하는 변위응답을 보이고 있으며, 렌즈가 위치한 층에서는 층간변위를 초과하는 결과를 나타내었다. 반면, 케이스 1의 경우에는 면진층에서 만 큰 변위가 발생하고 있을 뿐 상부 구조물은 강제거동과 유사하게 층변위에 차이가 거의 발생하고 있지 않는 것으로 나타났다. 이 때 면진층의 최대변위는 허용변위를 넘지 않는 것

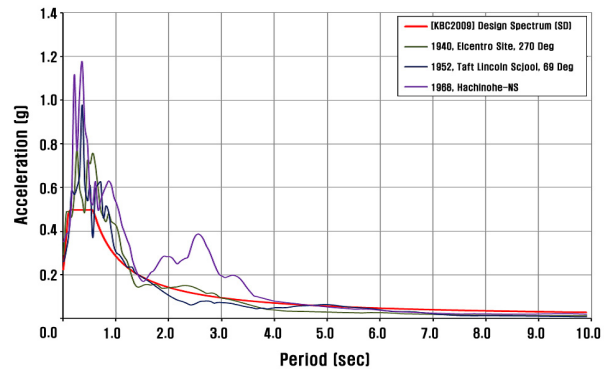


Fig. 6 Frequency contents of used earthquakes(DBE)

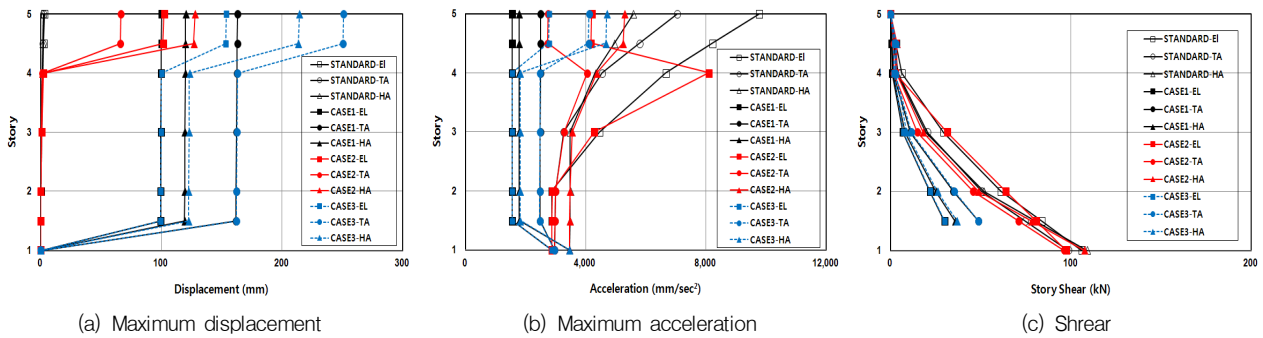


Fig. 7 Design based earthquake

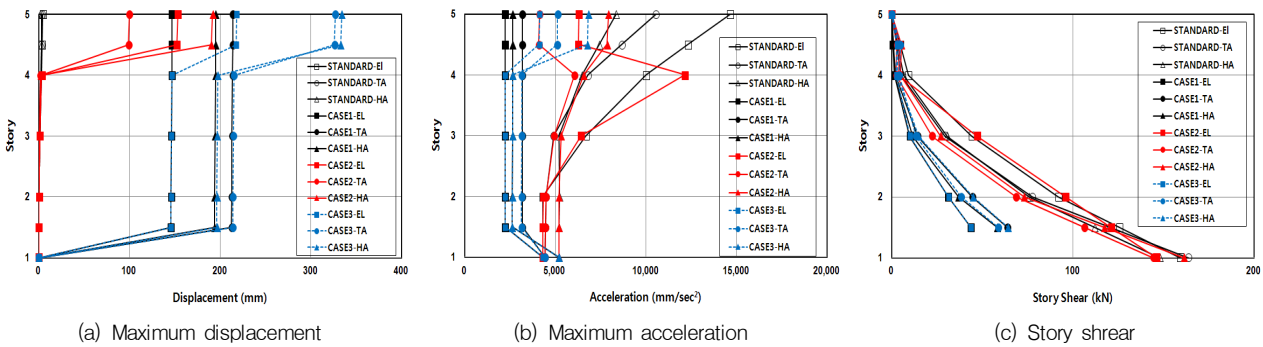


Fig. 8 Maximum credible earthquake

Table 10 Maximum acceleration under DBE (mm/sec²)

Story	Level (mm)	STANDARD			CASE 1			CASE 2			CASE 3		
		El Centro	TAFT	Hachinohe	El Centro	TAFT	Hachinohe	El Centro	TAFT	Hachinohe	El Centro	TAFT	Hachinohe
5F	10000	9765.9	7038.8	5576.7	1559.2	2495.4	1791.8	4200.8	2751.7	5298.0	2788.0	4110.5	4699.2
4.5F	9800	8220.6	5792.6	4951.0	1558.8	2494.5	1790.4	4180.4	2726.5	5242.6	2773.4	4093.8	4673.6
4F	9700	6675.3	4546.5	4325.3	1558.4	2493.5	1789.1	8096.1	4042.5	4375.9	1557.0	2486.4	1820.9
3F	7400	4451.5	3267.0	3478.7	1556.7	2488.3	1786.6	4279.7	3283.0	3551.2	1553.4	2478.0	1819.8
2F	2400	2867.0	2997.1	3487.4	1554.2	2482.8	1784.8	2889.0	2995.7	3476.1	1550.5	2471.4	1818.2
1.5F	400	2868.8	2978.0	3474.4	1553.6	2481.4	1784.5	2879.8	2977.4	3468.8	1549.9	2470.0	1817.8
1F	0	2870.7	2959.0	3461.4	2870.7	2959.0	3461.4	2870.7	2959.0	3461.4	2870.7	2959.0	3461.4

을 확인하였다.

또한 등대의 주요 부재인 렌즈만을 면진화한 케이스 2의 경우도 렌즈는 강제거동으로 면진효과를 충분히 발휘하는 것으로 나타났다. 따라서 등대 전체가 아닌 렌즈 하부에만 면진장치를 설치하여도 충분한 가속도 감소효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 단, 이와 같은 결과는 먼저 등대 전체의 안전이 확보된 경우에만 실효성이 있으므로 이점에 주의할 필요가 있다.

케이스 1과 케이스 2를 모두 적용한 케이스 3의 경우에는 이중면진효과로 인하여 면진층과 렌즈부에서 큰 변위를 보이는 것으로 나타났으나, 면진장치 설치층에서의

최대변위는 허용변위를 넘지 않는 것으로 확인되었다.

4.3 최대응답가속도 검토

각 지진파에 따른 각 층의 최대응답가속도를 Table 10과 Table 13에 나타내었고, Fig. 7(b)와 Fig. 8(b)에 이를 도식화하여 나타내었다. 비 면진건물의 경우 상부층으로 갈수록 응답가속도가 증가하는 양상을 보이고 있으며, 렌즈층에서 최대값을 나타내고 있어 렌즈의 손상 위험이 높은 것을 알 수 있다. 반면, 케이스 1의 경우에는 각 층의 응답가속도가 거의 일정한 분포를 나타내고 있는

Table 11 Story shear under DBE (kN)

Story	Level (mm)	STANDARD			CASE 1			CASE 2			CASE 3		
		El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn
5F	10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5F	9800	3.1	1.7	2.1	0.5	0.5	0.8	2.9	3.6	1.9	1.9	3.2	2.8
4F	9700	6.1	3.4	4.3	1.0	1.1	1.5	2.6	3.2	1.7	1.7	2.8	2.5
3F	7400	29.5	19.5	20.4	6.9	7.9	11.1	31.4	18.1	14.9	7.0	8.9	11.7
2F	2400	61.3	51.6	50.5	21.8	25.1	34.8	64.0	48.8	45.8	21.8	26.0	35.3
1.5F	400	83.7	80.4	74.6	29.8	35.8	48.6	80.7	78.2	71.0	29.8	36.8	48.7
1F	0	106.1	109.1	98.7	-	-	-	97.5	107.6	96.2	-	-	-

Table 12 Maximum displacement under MCE (mm)

Story	Level (mm)	STANDARD			CASE 1			CASE 2			CASE 3		
		El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn
5F	10000	4.52	3.36	3.24	146.87	213.96	195.08	153.34	99.67	191.64	218.11	326.93	334.00
4.5F	9800	3.71	2.81	2.75	146.72	213.75	194.90	152.11	98.87	190.09	217.35	325.99	332.85
4F	9700	2.89	2.27	2.26	146.57	213.55	194.72	3.18	1.85	2.00	146.56	215.01	197.34
3F	7400	1.24	1.04	1.08	146.17	213.00	194.25	1.27	0.95	1.03	146.15	214.42	196.81
2F	2400	0.22	0.21	0.23	145.82	212.52	193.84	0.20	0.20	0.22	145.81	213.94	196.38
1.5F	400	0.11	0.10	0.11	145.76	212.43	193.76	0.10	0.10	0.11	145.75	213.86	196.30
1F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 13 Maximum acceleration under MCE (mm/sec²)

Story	Level (mm)	STANDARD			CASE 1			CASE 2			CASE 3		
		El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn
5F	10000	14648.9	10558.0	8364.6	2234.8	3191.6	2656.5	6301.0	4127.4	7946.5	4138.4	5129.7	6820.3
4.5F	9800	12330.9	8688.8	7426.2	2235.2	3188.8	2651.8	6270.5	4089.7	7863.4	4116.6	5108.5	6783.0
4F	9700	10012.9	6819.6	6487.7	2235.5	3186.0	2647.2	12144.1	6063.7	6563.5	2233.8	3156.5	2646.8
3F	7400	6677.3	4900.4	5217.8	2233.4	3179.7	2637.6	6419.5	4924.3	5326.5	2228.4	3146.4	2638.5
2F	2400	4300.4	4495.6	5230.9	2230.2	3172.9	2630.6	4333.4	4493.5	5214.0	2223.9	3138.4	2631.7
1.5F	400	4303.2	4467.0	5211.4	2229.3	3171.0	2629.1	4319.7	4466.0	5202.9	2223.0	3136.3	2630.2
1F	0	4306.0	4438.4	5191.9	4306.0	4438.4	5191.9	4306.0	4438.4	5191.9	4306.0	4438.4	5191.9

Table 14 Story shear under MCE (kN)

Story	Level (mm)	STANDARD			CASE 1			CASE 2			CASE 3		
		El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn	El Centro	TAFT	Hachinohn
5F	10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5F	9800	4.6	2.6	3.2	0.7	1.0	0.8	4.3	2.8	5.4	2.8	4.6	3.5
4F	9700	9.2	5.1	6.4	1.4	1.9	1.6	3.8	2.5	4.8	2.5	4.1	3.1
3F	7400	44.3	29.3	30.7	9.9	14.1	11.7	47.1	22.4	27.1	10.0	13.3	14.9
2F	2400	91.9	77.5	75.8	31.3	44.4	36.9	95.9	68.6	73.1	31.3	38.3	44.8
1.5F	400	125.5	120.5	111.9	43.7	63.7	58.1	121.1	106.4	117.3	43.7	58.9	64.2
1F	0	159.1	163.6	148.1	-	-	-	146.2	144.3	161.4	-	-	-

데 이는 사용성면에서 향상된 거동을 기대할 수 있으며, 지진 발생 시 내부의 전도 등으로 인한 등대의 주요 부재

인 렌즈의 손상을 방지하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 모든 지진파에 대하여 면진건물의 최

대 응답가속도가 기초고정 구조물의 최대 응답가속도 보다 현저하게 감소하는 경향을 보이고 있는데, DBE에서는 약 60%로, MCE에서는 약 65%의 감소를 나타내었다. 당초 설계목표 감소량(약 80%)보다 작기는 하지만 이러한 가속도의 감소는 결국 상부구조에서 설계전단력의 감소를 의미하므로 면진기술 적용에 따른 내진안전 확보가 용이함을 확인할 수 있으며, 목표 가속도 감소를 성취하기 위해서는 면진주기를 더 길게 가져갈 필요가 있다.

케이스 2의 경우에도 렌즈부에서는 당초 설계조건보다 작기는 하지만(설계조건 약 80%감소, 해석결과 약 60%감소) 비 면진구조와 비교하여 가속도 감소효과를 얻을 수 있어 등대의 주요 부재인 렌즈의 안전확보가 가능함을 확인할 수 있었으나 등대구조물 자체는 내진구조와 동일하게 거동함으로 내진설계 이전에 지어진 등대의 경우 등대구조물을 현행기준에서 만족하는 내진성능이 확보된 상태로 보강하지 않을 경우 실효성이 떨어질 수도 있다는 점에 주의하여야 할 것으로 판단된다.

케이스 3의 경우에도 전체적인 결과는 비 면진구조와 비교하여 감소된 결과를 나타내었으나, 하부 면진층에서의 가속도 감소와는 다르게 등대 렌즈 하부 면진층에서는 감소된 가속도레벨 대비 오히려 가속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 이중면진에 있어서 두 면진층에서 서로 다른 면진특성을 지니고 있어 가속도의 최대값을 나타내는 점에서의 위상이 달라 나타난 결과라 사료되며, 경우에 따라서는 이중면진의 효과가 부정적으로 나타날 가능성도 있으므로 향후 이 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

4.4 층전단력 검토

케이스 1의 경우 층 전단력은 DBE 레벨에서 기초고정의 경우와 비교하여 약 40% 감소하는 것으로 나타났으며, MCE 레벨에서는 약 50% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지진과별로 다소간 차이는 있으나 면진으로 인한 층 전단력의 감소는 결국 상부 구조의 부재설계에 있어서 작용하중의 감소를 의미하므로 상부구조를 보다 경제적으로 설계할 수 있음을 의미한다.

케이스 2의 경우 층 전단력 감소효과는 등대전체를 면진화 하였을 때 보다 큰 효과를 나타내지 않았는데, 이는 등대 렌즈 층의 층 전단력 감소가 미소하여 하부구조에서의 전단력 감소에는 크게 기여하지 못하였기 때문이다.

케이스 3의 경우 층 전단력 감소효과는 케이스 1과 거의 유사한 형태를 나타내었다. 하지만 등대 렌즈 부분에서는 케이스 2의 결과와 유사하게 나와 이처럼 질량이 작고 속이 텅 빈 구조물의 경우에는 이중면진시스템 보다는 전체 면진을 채용하는 것이 더 유리한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 해안지역의 등대 구조물을 대상으로 면진기술 적용방안을 제시함으로써 지진에 대해 무방비상태에 놓여 있는 등대구조물의 지진안전도 확보방안을 제시하였으며, 기존 등대를 대상으로 그 결과를 시뮬레이션 해 보았다. 검토결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 등대구조물의 경우에 면진장치 선택 시 적층고무 베어링은 장주기화나 경량물에 적용이 어렵고 코일 스프링을 이용한 시스템의 경우에도 적재물이 가볍고 무게가 변화하는 경우 면진효과가 저하되는 등의 문제가 발생하게 됨으로 등대와 같은 구조물의 경우 레일의 기하학적 구조를 사용하는 것이 유리하다. 또한, 비 면진구조 대비 2.5배 이상의 면진주기 설정으로 장주기화를 피하여 적재물의 무게와 관계없이 우수한 면진효과를 발휘할 수 있도록 조치할 필요가 있음을 제안하였다.
- (2) 또한 등대가 위치하고 있는 지반의 종류, 렌즈 구조 등에 따라 바닥 지진동에 대한 응답은 각각 다르지만 등대 면진장치의 경우 필요 요구성능은 렌즈탑 기초부 입력가속도에 대한 응답가속도 감소 1/5, 응답변위 100 mm 정도를 확보하도록 제안하였다.
- (3) 제안된 방법에 따라 기존 등대를 대상으로 시뮬레이션해 본 결과, 등대전체를 면진화(케이스 1)한 경우 최대응답변위, 최대응답가속도 및 층 전단력 측면에서 충분한 면진효과를 나타내었다. 그러나 등대의 렌즈만을 면진화(케이스 2)한 경우 렌즈만의 면진효과는 충분히 있었으나 구조물 자체가 내진설계가 적용되어 있지 않은 상황이라면 렌즈 파괴 이전에 등대 자체파괴가 선행될 가능성이 있으므로 등대구조물 자체의 내진안전이 확보된 경우에만 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (4) 등대전체와 렌즈를 동시에 면진화(케이스 3)한 경

우 비 면진구조 대비 유효한 면진효과는 나타내었지만, 최대응답가속도가 등대전체를 면진화한 경우보다 증가하는 경향을 나타내었으며, 렌즈의 면진화로 인한 층전단력의 감소가 미소함으로 이중면진의 적용으로 인한 실효성은 그 효과가 크지 않은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 (사)한국면진제진협회의 연구비 지원에 의한 결과의 일부로서, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Architectural Institute of Korea, "Building code and commentary", KBC Committee(in korean), 2009.
 2. ASCE/SEI, "Minimum design loads for buildings and other structures", ASCE7-10. 2010, pp.165-178.
 3. Chun, Young Soo, Hur, Moo Won, "Seismic isolation effects according to set up the isolation period in the medium and low-rise framed building", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 14, No. 6, 2010, pp.1-7. (in Korean)
 4. Japanese Maritime Security Testing Research Center, "Study on the seismic isolation device of a large lighting equipments", Annual report, 1999. (in Japanese)
 5. Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Maritime Security Headquarters, "Aseismic measures of a large coastal lighthouse", Regular press interview report, 2006. (in Japanese)
 6. Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Maritime Security Headquarters, "Installation of the seismic isolation device of a large lighting equipments", Release report, 2005. (in Japanese)
 7. Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Maritime Security Headquarters, "Rebirth of 4 earthquake-resistant lighthouses", Regular press interview report, 2006. (in Japanese)
 8. The Japan Society of Seismic Isolation, "The 9th JSSI Award-Seismic isolation device for the lighthouse lens", 2008.
- Received : 07/26/2012
Revised : 10/08/2012
Accepted : 10/11/2012

요 지

본 연구에서는 등대 구조물을 대상으로 한 면진기술 적용방안을 제시함으로써 지진에 대해 무방비상태에 놓여 있는 등대구조물의 지진안전도 확보방안을 제시하였다. 또한, 제안된 면진기술 적용방안을 활용하여 내진설계 이전에 지어진 등대를 대상으로 등대전체를 면진하였을 경우와 등대 렌즈만을 면진하였을 경우에 대하여 면진효과를 분석해 보았다. 해석결과, 등대 전체를 면진화하였을 경우 최대응답가속도와 층전단력 측면에서 충분한 면진효과를 얻은 반면, 등대 렌즈만을 면진화한 경우에는 렌즈부의 면진효과는 유효한 것으로 나타났으나 등대 자체의 안전이 확보되지 못한 상황에서는 등대의 파괴가 선행될 가능성이 있음에 주의할 필요가 있는 것으로 나타났다. 또한 등대전체와 렌즈를 동시에 면진화한 경우 비 면진구조 대비 유효한 면진효과는 나타내었지만, 최대응답가속도가 등대전체를 면진화한 경우보다 증가하는 경향을 나타내었으며, 렌즈의 면진화로 인한 층전단력의 감소가 미소함으로 이중면진의 적용으로 인한 실효성은 그 효과가 크지 않은 것으로 나타났다.

핵심 용어 : 등대, 면진장치, 지진안전도, 최대응답가속도, 층전단력, 면진효과