

<기술논문>

기기면진 기반 원전 내진성능 상향 타당성 검토

이진형*·신태명†·구경희**

Feasibility Study for Seismic Performance Enhancement of NPP Based on Equipment Base Isolation

Jin Hyeong Lee*, Tae Myung Shin† and Gyeong Hoi Koo**

(Received 31 October 2018, Revised 22 November 2018, Accepted 21 December 2018)

ABSTRACT

In this study, to enhance the seismic performance of nuclear power plants (NPP), a small laminated rubber bearing (LRB) is chosen as a seismic design option of the vulnerable equipment. Prior to the application of equipment base isolation, it is necessary to review the feasibility that the technique contributes enough to the seismic performance of NPP by analysis. At first, some preliminary design of small LRBs for equipment is carried out. Design parameters such as horizontal and vertical stiffnesses, design natural frequencies are checked by calculation and analysis for the four design options considering various upper weights. Performance test of small LRB is to be carried out to verify static performance using the results.

Key Words : Seismic Performance(내진성능), Base Isolation(면진), Equipment(기기), LRB(적층고무받침), NPP(원전)

1. 서 론

A_s = Shear area

D_i = Inner diameter

D_o = Outer diameter

E_b = Apparent compressive modulus without compressive characteristics of rubber

E_c = Apparent Young's modulus corrected, if necessary, by allowing for compressibility

E_o = Rubber young's modulus

E_{∞} = Rubber bulk modulus

\overline{E}_b = Apparent compressive modulus of rubber considering the bulk compression for bending of rubber layer

\overline{E}_c = Apparent Young's modulus corrected for bulk compressibility depending on the first shape factor (S_1)

f = Natural frequency

G = Rubber shear modulus

H_B = LRB total height

I = Moment of inertia

k = Rubber hardness modification factor

K = Horizontal(or Vertical) stiffness

K_H = Horizontal stiffness

K_V = Vertical stiffness

m = Mass

n = Number of rubber layer

P = Design vertical load

S_b = Bending stiffness

S_s = Shear stiffness

S_1 = First shape factor

† 책임저자, 회원, 한국교통대학교

E-mail : tmshin@ut.ac.kr

TEL : (043)841-5377 FAX : (043)841-5370

* 한국교통대학교

* 한국원자력연구원

t_R = Thickness of rubber layer

t_s = Thickness of steel layer

1. 서 론

2016년 9월 경주와 2017년 11월 포항에서 우려할만한 수준의 지진이 발생함에 따라 기존원전 및 신규원전의 내진 안전성에 대한 경각심이 고조되었다. 현재 국내 표준원전인 APR1400(advanced power reactor 1400) 등은 안전정지지진(safety shutdown earthquake, SSE) 0.3g에 맞춰 내진설계가 되어 있으며 내진성능은 0.5g를 만족하는 것으로 알려져 있다. APR1400에는 다양한 구조물 및 기기들이 내재되어 있어서 내진성능을 0.6g 이상으로 상향할 경우 이 중에는 내진에 취약한 설비들의 범위가 일부 늘어날 수가 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로서 내진보강, 탄소성해석 고려 등의 몇 가지 방법이 있을 수 있으나 본 연구에서는 개별기기 면진적용을 통한 원전 내진성능 향상의 타당성을 검토해 보고자 한다. 본 연구에서는 통계적인 내진안전성분석을 통해 분류된 원전 내부의 내진취약 주요기기들에 대하여 면진기술의 적용이 적합한지와 면진을 적용할 경우 원하는 수준의 내진성능 향상을 얻을 수 있는지 등의 여부에 대해 검토하고자 한다. 기존의 안전 및 연계 기능에 영향을 주지 않으면서 개별기기에 면진을 적용하여 내진성능을 높일 수 있는 기술적 방안과 적절성을 분석한다.

2. 연구 동향

1932년 관동대지진 직후 도입된 진도법(震度法)은 전 세계 내진설계법의 시작이었다. 1960년대 들어 구조물에 피해를 주는 대규모 지진이 반복되면서 내진설계 시 에너지 흡수 능력의 중요성이 실증되었다. 이후 건축기준법이 개정되어 종래의 진도법에 구조물의 에너지 흡수 능력을 확인하는 설계법이 부가적으로 도입됨으로써 면진효과의 정량화 수법, 면진구조 실현을 위한 요소개발 등의 전 세계적 연구가 수행되었다. 지진 다발지역(미국, 일본, 뉴질랜드 등)에서는 신설 구조물의 내진설계와 기존 구조물의 내진성능 보강에 면진(Base-isolation) 시스템과 같은 첨단 기술이 오래전부터 적용되어 오고 있다.

1995년 고베지진 이후 효용성이 확인되어 본격적으로 적용되기 시작한 면진설계는 세계적으로 건물,

교량 등 약 10,000 여 개 이상의 구조물에 적용되었으며, 점차 고지진대에 위치한 구조물의 설계에 적용되는 것이 보편화되고 있다.⁽¹⁾ 반면 원전구조물에 적용된 사례는 미미하며, 현재까지 1983년과 1984년에 각각 건설된 프랑스 4기, 남아공의 2기 등에 불과하다. 그러나 IRIS와 4S 등 신형 경수로형 원자로 설계와 ALMR, S-PRISM, KALIMER, DFBR, STAR-LM, EFR 등 계획 중인 고속증식로의 대부분에 면진시스템이 적용되어 향후 면진시스템이 적용된 원전이 크게 늘어날 전망이다.⁽²⁾ 이러한 산업계의 움직임에 부응하여 각국의 규제관련 기관들도 면진시스템의 원전 도입시 예상되는 규제 현안에 대한 연구를 진행하고 있으며 이를 요약하면 다음과 같다.

미국은 1970년대 중반 UC Berkeley 내의 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) 및 SUNY Buffalo 등 연구기관과 대학을 중심으로 면진시스템에 대한 연구가 시작되었다. 1985년에 건설된 Foothill Communities Law & Justice Center에 처음 면진시스템이 사용되었고, 이후 Salt Lake City & County Building, USC Hospital, Sierra Point Bridge 등 많은 구조물에 사용되었다. 미국 원자력규제위원회(NRC)는 ASCE 4-13(2013)을 기반으로 관련 연구를 수행하여 NUREG 발간을 앞두고 있으며 규제지침(Reg. Guide)화를 추진하고 있다.

일본의 경우 1970년대 후반 미온적으로 연구를 시작한 이래 동경대학 내 지진연구소와 경도대학의 방재연구소, 일본 대성건설과 같은 대형 건설 회사나 중공업회사의 연구소를 중심으로 내진제어기술이 연구되었다. 1982년 Yachiyo시 소재 2층 주택 건물에 고무계 면진장치를 처음 사용하면서부터 1986년 1987년 사이에 대규모 건물에 본격적으로 적용되었다. 1995년 고베지진 이후 콘도미니엄, 사무용 건물 및 병원을 중심으로 적용 대상이 급격히 증가하였다. JNES(2010)는 면진구조 심사내규를 완성하고 최근 개정판(JNES, 2013)을 발간하였다.^(3,4)

IAEA도 일본, 유럽 및 미국을 중심으로 면진위원회를 구성하고 기술보고서 작성을 위한 연구를 수행하였으며 초안(IAEA, 2013)을 발간한 바 있다.⁽⁵⁾ 뉴질랜드에서는 1970년대부터 Dr. William Henry Robinson을 중심으로 면진시스템이 연구, 개발되기 시작했으며 Wiliam Clyton Building 등에 적용되었다.

국내의 경우 한국원자력안전기술원(KINS)이 면진시스템에 대한 규제기술 확보를 위한 연구를 진행한 바 있으

며 중장기적으로 규제지침 작성을 계획하고 있다.⁽⁶⁾

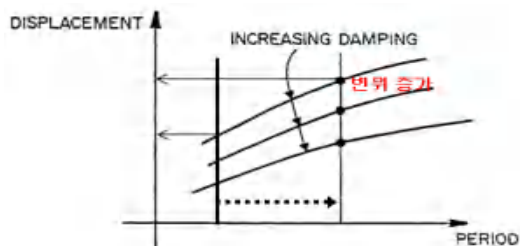
3. 면진의 정의 및 원전적용 현황

3.1 면진의 정의

면진(base-isolation)이란 통계적으로 단주기 성분이 강한 지진의 특성을 감안하여 구조물의 고유주기를 인위적으로 크게 함으로써 구조물에 전달되는 지진력의 크기를 줄이는 시스템을 말한다. 지진 에너지를 흡수하여 구조물에 전달되는 충격을 감소시키는 면진은 구조물의 강성을 높여서 지진 자체를 견디는 내진과는 다른 개념이다. 기본 개념은 구조물과 바닥 사이에 유연도(flexibility)가 높은 면진장치를 도입하여 지진 시 응답변위는 크더라도 지반에서 발생하는 고주파 진동의 전달을 최소화하여 구조물과 계통 및 기기(systems, structures and components, SSC)에 발생하는 지진하중을 감소시키는 것이다. 구조물에 면진장치를 적용할 경우 Fig. 1(a)와 같이 구조물의 주기가 증가하고 이로 인해 구조물에 작용하는 가속도가 저감되어 구조물에 발생하는 관성력을 감소시킬 수 있다. 반면 Fig. 1(b)와 같이 구조물 주기 증가에 따라 변위가 증가하는 단점이 있으나, 면진장치가 일정 수준 이상의 감쇠효과를 제공할 경우 구조물에 발생하는 가속도와 변위를 상당량 감소시킬 수 있다.⁽⁷⁾



(a) Decrease in Acceleration due to Increased Period



(b) Increase in Displacement due to Increased Period

Fig. 1 Base-isolation Effect

3.2 면진기술 원전적용 현황

프랑스 Cruas 원전은 900MWe급 가압경수형 원자로 4기로 구성되어 있다. 1984년 1, 3호기, 1985년 2, 4호기가 가동되었으며, 총 3600개(호기 당 900개)의 합성고무받침(Neoprene) 면진장치가 설치되어 있다. 형상은 500mm × 500mm × 66mm의 사각타입으로 총 고무두께는 40.5mm이다. 설계지반가속도(peak ground acceleration, PGA)는 0.3g, 수평고유진동수는 1Hz로 설계되었다. 전체 고무두께 및 장치 크기는 토목용 받침과 유사하다.

남아공 Koeberg 원전은 900MWe급 가압경수형 원자로 2기로 구성되어 있다. 1984년, 1985년에 1기씩 가동되었으며 총 1800개(호기 당 900개)의 합성고무받침과 마찰판으로 이루어진 면진장치가 설치되어 있다. 형상은 700mm × 700mm × 130mm의 사각타입으로 최대수평변위는 약 50mm로 설계되었다. 설계지반가속도는 0.3g, 수평고유진동수는 0.75Hz로 설계되었다. 마찰판의 마찰계수는 0.16~0.18으로 구조물은 탄성적으로 진동하다 미끄러짐판의 마찰 저항력을 초과하면 미끄러지게 되며, 지진 후에는 잔류변위가 발생하게 된다.

프랑스 Jules Horowitz Reactor(JHR)은 실험 및 의료 목적으로 설계된 100MW급 연구용 원자로이다. JHR에는 195개의 합성고무받침 면진장치가 설치되어 있으며, 형상은 900mm × 900mm × 181mm의 사각타입이다. 총고무두께는 120mm이며 설계변위는 108mm로 설계되어 총고무두께의 90%이며 설계지반가속도는 0.32g, 수평고유진동수는 0.6Hz로 설계되었다. 장치에 적용된 고무의 전단탄성계수는 1.1MPa이며, 감쇠비는 5%이다.

국제 열핵융합 실험로인 프랑스의 International Thermonuclear Experimental Reactor(ITER)는 JHR과 동일한 형상의 900mm × 900mm × 181mm의 사각타입 면진장치가 총 493개 설치되어 있다. 설계변위는 123mm로 설계되어 총고무두께의 약 100%이며, 설계지반가속도는 0.32g, 수평고유진동수는 0.55Hz로 설계되었다. 장치에 적용된 고무의 전단탄성계수 및 감쇠비는 프랑스 JHR과 동일하다. 앞서 소개한 원전 적용 면진장치 형상 및 특성을 비교해 Table 1에 보여주고 있다.

1980년대 중반부터 실시된 면진기술의 원전구조물 적용현황을 검토해 보면 Table 1에서 알 수 있듯이 몇 가지 특징이 있다. 먼저 공통적으로 적용고무받침

(laminated rubber bearing, LRB)을 사용하며 고무재료로서 천연고무에 비해 감쇠기능이 개선된 합성고무(Neoprene)를 활용하였다는 점이다. 또한 개별면진장치의 크기를 보면 그 폭과 높이를 조금씩 증가시켜서 최적화하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 면진장치 총개수를 가급적 줄여 초기 시공뿐 아니라 유지·보수의 관점에서 효율화하기 위한 방향이라 사료된다. 설계지반가속도는 약 0.3g로 하였고 면진장치의 수평고유진동수를 1Hz에서 0.5Hz로 감소시켜서 설계변위는 증가하지만 구조물로 전달되는 지진력 감소효과를 더욱 향상시키려는 추세임을 파악할 수 있다.

Table 1. Comparison of Seismic Isolator⁽⁸⁾

	Cruas	Koeberg	JHR	ITER
Location	France	South Africa	France	France
Operation	1984	1984	2014	2020
Material	Neoprene			
Dimension (mm)	500×500×66.5	700×700×130	900×900×181	900×900×181
Shear modulus (MPa)	1.1	1.4	1.1	1.1
Damping ratio (%)	7	7	5	5
PGA (g)	0.3	0.3	0.32	0.32
Number of Isolator for 1 NPP (Total) (EA)	900 (3600)	900 (1800)	195	493
Horizontal natural freq. (Hz)	1	0.75	0.6	0.55
Design Disp. (mm)	50	50	108	123

4. 기기면진 적용 타당성 검토

4.1 기기면진 개념

원전의 구조물 및 기기들은 일반 구조물에 비해 지진 발생 시 안전성 확보와 기능 유지의 관점에서 그 중요도가 매우 높다. 불시에 발생할 수 있는 내부 및 외부사건으로부터 경미한 손상을 입었을 경우에도 그 파급효과가 매우 크게 나타날 수 있기 때문이다. 따라서 원전 내부 설비는 설계단계에서부터 세심한 주의가 요구되며 가동 중에도 항상 그 안전성에 대한 검토와 확인이 필요하다. 이러한 이유로 원전에 설치

되어 있는 각종 기기들은 설계허용치 이내의 지진이 발생하는 경우에는 충분한 내진 여유도를 가질 수 있도록 설계 및 제작되고 있다.

하지만 설계한도를 넘는 설계초과지진이 발생하여 구조물 내부의 기기들이 손상을 입어 최소한의 안전기능을 유지하지 못할 경우 노심손상 가능성이 증대되며 결과적으로 원전의 안전성에 치명적인 결과를 초래할 가능성이 있다.⁽⁹⁾ 따라서 이전에 건설된 가동원전이나 설계지진의 수준이 낮은 원전의 경우 설계초과지진(0.6g)에 대한 내진성능 검토와 적절한 보완이 요구되고 있다.

본 연구에서는 원전 내 주요 안전관련 기기 중 원전 전체의 안전중요도가 높은 개별기기에 별도의 면진장치를 적용하는 것을 '기기 면진'으로 부르기로 한다.

면진장치는 전 세계적으로 교량이나 건축물 등의 구조물에 많이 사용되고 있으며, 최근에는 국내에도 그 사용빈도가 증가하고 있는 실정이다. 건축물 또는 구조물 면진과 비교하여 기기면진의 차이점은 건축, 토목 구조물에 비하여 상대적으로 중량이 매우 작다는 점이다. 이러한 점은 적절한 강성을 가지는 면진장치의 설계를 어렵게 하는 요인으로 작용되기도 한다. 따라서 저중량의 기기면진을 위해서는 면진장치의 선택 및 설계에 세심한 주의가 필요하다.⁽²⁾

4.2 기기면진용 소형 적층고무받침 예비설계

ASCE-4에는 원전에 사용되는 면진장치에 대한 기준을 정해놓고 있다. ASCE 4-16을 인용하면, 원전구조물에 적용 가능한 면진장치 형식으로서 천연고무를 적용한 low damping rubber isolator, lead-rubber isolator, 그리고 friction pendulum sliding isolator 세 가지를 제시하고 있다. 이들 면진장치들의 경우 충분히 많은 시험을 통하여 성능이 검증되었고 선형 또는 2중 선형 특성을 가정하여 비선형 내진해석 모델링이 가능하며 실제로 주요한 기능이 요구되는 구조물에 설치되어 그 성능이 어느 정도 입증되어 왔기 때문이다⁽⁹⁾. ASCE 4-16을 근거로 하여 본 연구에서는 천연고무에 가까운 저감쇠 고무를 활용한 적층고무받침을 개별기기 면진장치의 대표적 모델로 출발하여 그 설계 고려사항 및 설계변수 등을 검토하고자 한다.

개별기기 면진장치 설계를 위한 설계변수들은 대상 기기의 총중량 및 강성, 면진장치의 수평 및 수직 강성, 면진장치의 최대수평변위 및 설계고유진동수, 감쇠비, 입력지진의 크기 등이다. 본 연구에서는 면

진적용 대상기기가 아직 선정되지 않았으므로 다양한 기기에 대한 면진기술의 적용 타당성을 검토하기 위하여 다음과 같은 가정을 전제한다. 대부분의 기기가 약 4~100tons의 중량 범위를 가지며 기기 당 약 4~10개의 면진장치를 설치한다고 예상하여 면진장치 1개당 설계하중을 4가지(1, 2, 5, 10ton) 대표 값으로 가정한다. 면진장치 설계를 위한 상세한 설계변수 값의 선정은 선행연구를 참고로 한다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

4.2.1 형상 및 제원

앞서 가정한 바와 같이 아직 선정되지 않은 면진 적용 대상기기에 대하여 면진장치 1개당 상부중량(1, 2, 5, 10 ton)만을 고려한 적층고무받침의 예비설계를 수행하였다. Fig. 2은 상부중량 1ton 적층고무받침의 단면형상 및 각 부분 명칭을 보여주고 있다. Table 2에는 상부중량 1, 2, 5, 10 ton 적층고무받침의 제원을 정리하여 보여주고 있다.

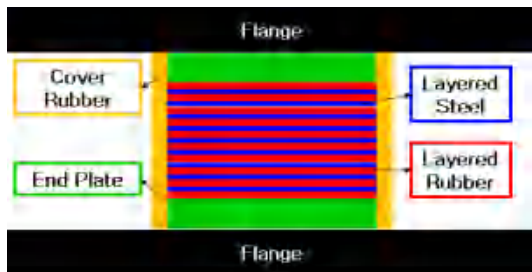


Fig. 2 Cross Section and Name for Each Part of LRB

Table 2. Design Specification of LRB

	1ton	2ton	5ton	10ton
Flange Dia. (Thickness, mm)	165 (15)	170 (15)	230 (15)	280 (15)
End Plate Thickness (mm)	10	10	10	10
Outer Diameter (mm)	65	74	120	158
Inner Diameter (mm)	0	0	20	20
Rubber Thickness (mm)	2.4	2.2	2.3	3.0
No of Rubber Layer	10	12	16	17
Steel Thickness (mm)	1.6	1.6	2.0	2.3
Total LRB Height (mm)	38.4	44	66.8	87.8
Cover Rubber Thickness (mm)	5	5	5	5

4.2.2 재료 물성치

원전 기기면진용 소형 적층고무받침의 재료는 강재와 고무가 쓰이며, 강재의 경우 SS400으로 가정하였으며, 고무재료의 경우는 제작사로부터 제공받은 재료값을 사용한다. 고무재료의 물성치는 Table 3에 정리하여 보여주고 있다.

Table 3. Rubber Material Properties

Shear Modulus (MPa)	0.3 (or 0.5)
Young's Modulus (MPa)	0.9 (or 1.5)
Bulk Modulus (GPa)	1.96
Hardness Mod. Factor	0.85

4.2.3 설계 값 계산

본 연구에서는 기술요건 및 표준, 선행연구 등을 참고로 소형 적층고무받침의 수평·수직강성을 계산한다. 이 값을 이용해 소형 적층고무받침의 수평·수직 고유진동수를 확인한다. Table 4에는 참고로 1ton 적층고무받침의 수평·수직강성 계산식을 보여주고 있다.

Table 4. Design Value Calculation for 1ton LRB(10-12)

	Equation
E_{∞}	-
E_o	$E_o = 3G$
G	-
k	-
D_o	-
D_i	-
n	-
t_s	-
P	-
H_B	$H_B = [nt_R + (n-1)t_s]$
S_1	$S_1 = (D_o - D_i)/(4t_R)$
I	$\pi D^4/64$
A_s	$A_s = \pi(D_o^2 - D_i^2)/4$
E_b	$E_b = E_o(1 + (2/3)kS_1^2)$
\bar{E}_b	$\bar{E}_b = E_b E_{\infty} / (E_b + E_{\infty})$
S_s	$S_s = GA_s H_B / nt_R$
S_b	$S_b = \bar{E}_b I H_B / nt_R$
K_1	$K_1 = H_B / S_s$
K_2	$K_2 = H_B^3 / 12 S_b$
K_3	$K_3 = (1 + P/S_s)^2$
K_H	$K_H = 1 / (K_1 + K_2 \cdot K_3)$
E_c	$E_c = E_o(1 + 2kS_1^2)$
\bar{E}_c	$\bar{E}_c = E_c E_{\infty} / (E_c + E_{\infty})$
K_V	$K_V = A_s \bar{E}_c / nt_R$

면진베어링 설계를 위한 기술요건과 표준을 참고로 하고 Table 4의 수평강성(K_H)과 수직강성(K_V) 계산식을 이용하여 1, 2, 5, 10 ton 적층고무받침에 대해 수평 고유진동수(f_H)와 수직고유진동수(f_V)를 각각 계산하여 정리하면 Table 5에서와 같이 비교할 수 있다.

Table 5. Natural Frequency Calculation Result

	Natural Frequency (Hz)			
	1ton	2ton	5ton	10ton
Horizontal	0.90	0.67	0.62	0.66
Vertical	15.50	14.60	15.86	16.64

4.2.4 ANSYS 해석을 통한 설계값 비교

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Mechanical Ver.19를 이용하여 소형 적층고무받침의 모드해석을 수행한다. 모드해석 시 하부 Flange 아랫면에 Fixed Support 경계조건을 설정하고, 상부 Flange 윗면에 1000kg 분포질량을 설정하여 설계하중을 적용하였다. 모드해석 결과로부터 소형 적층고무받침의 수평·수직 고유진동수를 확인하고 Table 5의 계산값과 비교를 통한 소형 적층고무받침의 성능에 대한 예비평가를 수행한다. Fig. 3에는 상부 중량 1ton에 대한 소형 적층고무받침의 ANSYS 모델 형상을 보여주고 있다.

ANSYS 모델링 시 적층고무(layered rubber), 적층강판(layered steel), End Plate는 멀티바디로 구성하였으며, Cover Rubber는 모델링에서 제외하였다. 그 이유는 실제 소형 적층고무받침 제작 시 적층고무, 적층강판, End Plate를 적층하고 Cover Rubber로 감싼 뒤 가압성형 과정을 거쳐 네 부품이 하나의 물체를 구성한다. 이를 근거로 ANSYS 모델링 시 적층부위를 멀티바디로 설정하는 것이 합리적이라 판단된다.

Table 4의 수평·수직 강성 계산식을 살펴보면 주로 고무재료의 형상 및 물성 정보를 고려함을 알 수 있다. 위 계산식의 경우 주로 건축/토목용 대형 적층고무받침에 대한 계산식이다. 대형 적층고무받침의 경우 적층고무를 제외한 나머지 부품이 적층고무받침의 수평·수직 강성에 미치는 영향이 상대적으로 작아 고려하지 않은 것으로 생각된다. 적층고무받침의 Flange, End Plate 그리고 적층강판의 경우 수직방향 하중지지 또는 전단 변형 시 큰 응력을 받는 구조적 기능을 담당한다. Cover Rubber의 경우 적층고무의 경년열화를 예방하기 위한 부가적인 역할을 담당하지만,

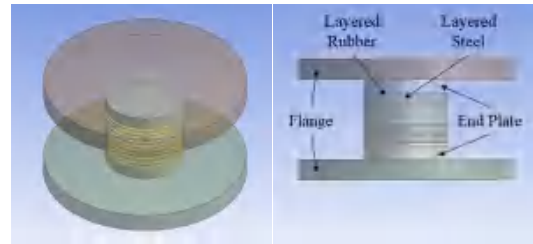


Fig. 3 ANSYS Model of 1ton LRB

ANSYS 해석 결과, 소형 적층고무받침의 경우는 그 구조적 영향을 무시할 수 없는 수준으로 판단된다. 동일 모델에 대해 멀티바디 구성여부와 Cover Rubber의 모델링 유·무를 변화시켜가며 아래의 4가지 해석 모델에 대해 해석을 수행하였다.

- (1) 멀티바디 구성O + Cover Rubber 모델링 포함
 - (2) 멀티바디 구성O + Cover Rubber 모델링 제외
 - (3) 멀티바디 구성X + Cover Rubber 모델링 포함
 - (4) 멀티바디 구성X + Cover Rubber 모델링 제외
- 해석결과 Cover Rubber를 모델링에서 제외하고 적층고무, 적층강판, End Plate를 멀티바디로 구성한 해석모델(1)의 해석결과가 Table 5 계산결과와 가장 유사한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다. ANSYS 모드해석을 수행하여 수평·수직 고유진동수를 Table 6에 정리하였다. Fig. 4는 1ton LRB의 수평·수직 모드형상을 보여준다.

Table 5의 소형 적층고무받침 수평·수직 고유진동수 계산결과와 Table 6의 ANSYS 모드해석 결과를 비교하면 Table 7에 정리한 바와 같이 다소 오차가 발생함을 확인할 수 있다.

Table 6. ANSYS Modal Analysis Result

	Natural Frequency (Hz)			
	1ton	2tons	5tons	10tons
Horizontal	1.0	0.77	0.67	0.68
Vertical	16.51	15.47	15.28	15.54

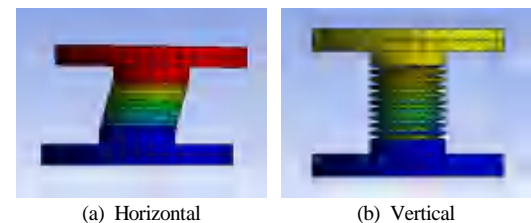


Fig. 4 Horizontal and Vertical Mode Shape of 1ton LRB

이러한 오차는 설계 값 자체 오차에서 기인할 수 있다. Table 4에서 제시한 설계식은 기존 건축/토목용 대형 면진장치의 설계식이다. 이 식으로 계산된 소형 면진장치의 설계 값이 실제 소형 면진장치의 특성을 잘 반영하지 못하는 경우 오차가 발생할 수 있다. 이 경우 계산식 및 설계변수의 수정이 필요할 것으로 예상된다. 또한, 해석모델 및 방법과 관련한 오차를 고려할 수 있다. 소형 면진장치의 설계 값이 성능시험 결과와 비교적 잘 일치할 경우, 해석모델이 설계 값을 잘 반영할 수 있는 해석모델 및 방법의 개선이 필요할 것으로 생각된다.

Table 7. Error in Analysis Compared to Calculation

	Natural Frequency Error Ratio(%)			
	1ton	2tons	5tons	10tons
Horizontal	10	12.99	7.46	2.94
Vertical	6.12	5.62	3.80	7.08

5. 결 론

본 연구에서는 기기면진용 소형 적층고무받침에 대해 면진대상 기기가 정해지지 않은 상태에서 상부 기기의 질량만을 가정하여 수평·수직 강성 및 고유진동수를 계산 및 해석을 통해 확인하였다. 분석 결과, 주로 건축물에 활용하고 있는 대형 면진장치에 비해 기술기준과 표준 등의 설계식이 기기용 소형 면진장치에 바로 적용하기에는 다소 오차가 있음을 파악할 수 있었다.

따라서, 기존에 제시된 계산식 및 설계 값은 추후 실험결과와 분석을 통해 수정 및 개선될 여지가 있다. 이번 연구에서는 소형 면진장치의 설계 및 제작성을 확인하고 해석을 통한 성능의 예비평가를 수행한 것이다. 소형 면진장치의 성능이 목표하는 설계 값을 잘 반영하는 경우, 적절한 대상기기의 선정 및 면진 적용 시, 원전의 개별기기 면진을 통한 내진성능 향상효과를 기대할 수 있다.

6. 향후 연구

현재 진행 중인 소형 적층고무받침의 정적 성능시험결과 분석을 통해 소형 적층고무받침의 실제 성능을 확인할 수 있다. 성능시험결과를 토대로 설계 값에 대한 판단이 가능하다. 설계 값과 성능시험 결과

의 오차가 납득할 만한 수준이라면 설계 값 자체에 대한 오차는 없다고 볼 수 있다. 이 경우 원전의 내진 성능 향상을 위한 기기면진이 가능할 것으로 생각된다. 추후, 면진대상 기기가 정해지면 면진대상 기기의 동특성, 연계 및 지지구조 등의 영향을 고려하여 지진해석을 수행 할 예정이다.

그러나 성능시험결과가 본 연구의 목표 설계 값과 상이한 결과를 갖는 경우 소형 적층고무받침의 성능을 잘 모사할 수 있는 계산식 및 설계 값의 개선(본 연구에서는 대형 적층고무받침의 계산식 사용), 해석 모델 및 방법의 개선이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 2017년도 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No.20171510102050)

참고문헌

- (1) US NRC, 2011, "Technical Considerations for Seismic Isolation of Nuclear Facility Structures", Washington, DC, *Enclosure 3*.
- (2) Jang, K. S., Chang, C. H. and Lee, H. P., 2016, "Influence Evaluation of the Multi-Lead Rubber Bearing due to the Compressive Stress for Nuclear Power Plant", *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, Vol. 7, No. 3, pp. 55-64.
- (3) JNES, 2010, "Regulatory Guideline for Reviewing Seismic Isolation Structures", Tokyo, *JNES-SS-1001*.
- (4) JNES, 2013, "Proposal of Technical Review Guidelines for Structures with Seismic Isolation", Tokyo, *JNES-RC-2013-1002*.
- (5) IAEA, 2013, "Technical Report on Seismic Isolation Systems for Nuclear Installations", Wein, *Draft Ver.2.0*.
- (6) KINS, 2012, "A Fundamental Study on the Development of Regulatory Technology for a Seismic Isolation System of Nuclear Power Plant Structures", Daejeon, *KINS/HR-1227, Vol. 1*.
- (7) KINS, 2014, "A Fundamental Study on the Development of Regulatory Technology for a Seismic Isolation System of Nuclear Power Plant Structures II", Daejeon, *KINS/HR-1227, Vol. 2*.
- (8) Moussallam, N., Allain, F., Petre-Lazar, I., Conneson, M., Diaz, S., Vu, T., Bouleux, S., Soupel, B., Labbe, P. and Thiry, J., 2013, "Seismic Isolation of Nuclear

- Structures-Overview of the French Practice and Experience,” *Trans. of SMiRT-22*, San Francisco, California, USA, Aug. 18-23.
- (9) Kim, M. K., Choun, Y. S. and Choi, I. K., 2004, “A Shaking Table Test for Equipment Isolation in the NPP (I): Rubber Bearing”, *J. of the EESK*, Vol. 8, No. 5, pp. 65-77.
- (10) Koo, G. H. and Shin, T. M., 2018, “Design of Small Size Laminated Rubber Bearings Applicable for Seismic Isolation of Individual Nuclear Components,” *Trans. of the KNS*, Jeju, Korea, May 17-19.
- (11) Lee, J. H., Shin, T. M. and Koo, G. H., 2018, “A Study on the Design Value of Small Laminated Rubber Bearings for Seismic Isolation of Nuclear Power Plant Equipment,” *Trans. of the KNS*, Yeosu, Korea, Oct. 25-26.
- (12) Koo, G. H., Lee, J. H. and Yoo, B., 1997, “Mechanical Characteristics of Laminated Rubber Bearings for Seismic Isolation,” *J. of the EESK*, Vol. 1, No. 2, pp.1-10.