

# 고감쇠고무 적층받침의 경년열화를 고려한 원전구조물의 지진응답

박 준 희<sup>1\*</sup> · 전 영 선<sup>1</sup> · 최 인 길<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국원자력연구원 종합안전평가부

## Seismic Response of Seismically-Isolated Nuclear Power Plants considering Age-related Degradation of High Damping Rubber Bearing

Junhee Park<sup>1\*</sup>, Young-Sun Choun<sup>1</sup> and In-Kil Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

### Abstract

The high damping rubber bearings contributed to reduce a seismic force transmitted to upper structures, the material properties of rubber changes with time and the rubber with age-related degradation can affect the seismic response of structures and equipments. Therefore the seismic response of structure considering age-related degradation of isolators should be evaluated. In this paper, the stiffness and damping for isolators were defined using the aging data proposed by other researchers. The reactor containment building and the auxiliary building were selected to conduct the nonlinear analysis and the natural frequency, maximum responses, floor response spectrum(FRS) were evaluated with time using the four earthquakes with different frequency contents. According to the analysis results, the seismic responses are increased by the age-related degradation of isolators and the detail inspections should be conducted up to 20 years because it was presented that the change of FRS was high during this period.

**Keywords** : high damping rubber bearing, age-related degradation, nonlinear dynamic analysis, floor response spectrum

### 1. 서 론

면진시스템은 지반과 구조물의 바닥사이에 면진장치를 설치함으로써 지진에 의하여 발생하는 지반진동을 구조물에 전달되지 못하도록 하는 시스템이다. 지진에 대하여 우수한 시스템인데도 불구하고 면진장치가 처음 개발되었을때 효율성과 경제성 때문에 면진장치가 적용된 구조물의 수는 많지 않았다. 그러나 1994년 Northridge 지진과 1995년 Kobe 대지진 이후 구조물에서 면진장치를 이용한 지진격리시스템의 적용이 급격하게 증가되고, 현재 내진시스템 가운데 매우 안전한 시스템으로 인식되고 있다. 아무리 우수한 내진시스템 이더라도 시간이 경과하면 열화가 발생한다.

면진장치의 재료로 사용되는 고무는 공기 중에서 오랫동안 산화되면 경도가 증가하는 현상이 발생한다. 이러한 고무재료의 경년열화는 면진장치의 특성을 변화시키며, 변화된 면

진장치의 특성은 구조물의 거동에 영향을 줄 수 있다. 따라서 면진구조물의 장기운영동안 지진에 대한 안전성을 확보하기 위하여 면진장치의 장기거동을 분석할 필요가 있다. 면진장치의 장기거동을 분석하기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구되므로 일반적으로 아레니우스관계식을 이용하여 단기간에 높은 온도에서 고무재료를 열화시켜 그 성능을 분석한다. Itoh 등(2006), Gu 등(2011) Hamaguchi 등(2009)의 연구와 같이 면진장치의 장기거동과 관련한 기존 연구는 대부분 면진장치의 특성변화에 중점을 두고 진행되었으며, 면진장치의 경년열화에 의한 구조물의 영향을 분석한 사례는 없다. 그러나 면진된 구조물에서는 면진장치의 장기거동 특성보다 구조물의 거동평가가 중요하다. 특히, 원자력발전소(이하, 원전)와 같이 원전의 운영과 직접적으로 관련된 수많은 기기들이 위치하고 있는 구조물은 면진장치의 경년열화뿐만 아니라 이로 인한 구조물의 지진응답을 분석하는 것이 필

\* Corresponding author:

Tel: +82-42-868-4859; E-mail: jhpark78@kaeri.re.kr  
Received December 17 2012; Revised March 4 2013;  
Accepted March 5 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요하다.

고베 대지진 이후 구조물에 면진장치의 적용이 증가한 일본은 적층고무의 초기 수평강성을 사용한 원설계와 경년 변화에 의한 강성 변화율을 고려한 설계를 함께 실시하고 있지만, 국내의 경우 면진장치의 경년열화를 고려한 설계 가이드라인이 없는 실정이다. 추후 국내 원전 및 수출 원전에서 면진장치의 적용을 감안한다면 면진장치의 경년열화를 고려한 원전 구조물의 지진응답 분석이 필요하다. 본 연구에서는 기존 문헌을 이용하여 면진장치의 경년열화 특성을 분석하였으며, 감쇠능력이 뛰어난 고감쇠고무 적층받침(high damping rubber bearing)의 경년열화를 고려한 원전 구조물의 지진응답을 분석하였다.

## 2. 면진장치의 경년열화

### 2.1 고무의 열화 메카니즘

원전 구조물은 수명동안 다양한 외부하중과 환경에 처하게 된다. 외부하중(지진, 태풍, 눈)과 환경(화재, 이상기온 등)은 구조물의 재료적 특성을 변화시킬 뿐만 아니라 구조물의 성능도 변화시킬 수 있다. 따라서 원전 구조물의 장기거동에 대한 안전성을 확보하기 위하여 면진장치의 열화 메카니즘을 분석할 필요가 있다.

면진장치의 경년열화를 분석하기 위하여 면진장치를 구성하고 있는 재료와 그 재료들의 경년열화 특성을 분석해야 한다. 일반적으로 고무계 면진장치는 고무재료를 사용하여 복원력을 유지시키고, 감쇠를 추가하기 위하여 납을 삽입하거나 고감쇠고무를 사용한다. 또한 고무사이에 강판을 적층으로 위치시켜 고무의 연직강성을 증가시킨다. 고무계 면진장치의 경우 강재와 납은 화재와 같은 극한재해가 발생하지 않을 경우 경년열화에 의한 재료의 특성변화는 거의 없다. 그러나 고무의 경우 다양한 원인(산화, 자외선, 오존, 온도 등)에 의하여 다른 재료보다 경년열화에 의한 특성 변화가 크게 나타난다.

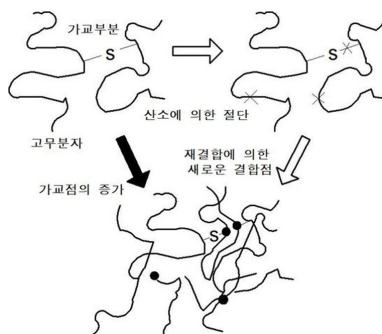


Fig. 1 Aging mechanism of rubber material

고무 분자는 탄소원자로 구성되는 장쇄(long-chain) 분자가 유황(S) 등에 의해 가교된 3차원 그물코 구조체이지만 이 장쇄분자나 가교부분(황)은 대기 중에서 산화되며 절단된다. 절단부는 다른 폴리머에 의하여 재결합되어 그물망 구조가 증가하여 고무분자의 움직임을 제한한다(Fig. 1). 그 결과 고무는 대기 중에서 오랫동안 노출될 경우 조금씩 경화된다.

### 2.2 경년열화와 관련된 중요변수

면진장치의 주재료로 사용되는 고무는 주변환경에 따라 열화의 진행속도가 다르게 나타난다. 고무의 열화 요인은 산소 외에 오존·자외선·열·방사선·화학약품 등에 노출되는 경우이다. Gu와 Itoh(2011)에 의하면 다양한 열화환경에서 고무재료의 가열축진열화실험을 수행하여 고무의 경년열화와 관련된 중요인자를 분석하였다. 실험결과에 따르면 열산화는 고무의 표면뿐만 아니라 시간이 경과할수록 면진받침 내부로 확산되는 반면 자외선이나 오존에 노출된 고무는 표면에서만 열화가 발생하므로 고무표면의 코팅두께를 고려할 때 경년열화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고하고 있다. 따라서 천연고무와 고감쇠고무에서 경년열화와 관련된 중요인자는 열산화인 것으로 분석되었다.

열산화에 의한 고무재료의 가열축진열화실험으로부터 고무재료는 산화될수록 면진장치의 강성은 증가되고, 변형능력과 에너지 흡수능력이 감소되므로 고무받침의 안전여유도(safety margin)는 감소될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 면진장치의 경년열화를 고려한 면진시스템의 지진해석을 수행할 경우 고무재료의 경화현상이 해석적으로 고려되어야 한다.

### 2.3 면진장치의 경년열화에 의한 특성변화

일본면진구조협회(2010)에 의하면 경년열화와 관련하여 면진장치의 특성변화를 다음과 같이 언급하고 있다. 첫째, 건물의 수명동안 방치된 적층고무 수평강성의 변화율은 일반적으로  $\pm 20\%$ 정도이며, 구조물에 사용되는 철, 콘크리트 등 다른 재료의 변화율과 비교하여 상대적으로 큰 값이다. 둘째, 경년열화에 의한 감쇠 성능의 영향은 가열축진 열화시험에 의해서 연구가 진행되어 왔으며, 일반적으로 60년 경과후의 등가 점성 감쇠 정수 변화율은 15%이하인 것으로 보고되고 있다. 셋째, 적층고무에서 경년열화는 대부분 표층에서 나타나므로, 하중 지지에 대해서는 문제가 없다고 보고되고 있다. 그러나 면진장치의 표면열화에 의한 균열이 클 경우 외형상의 불안감을 가져오므로 심한 균열은 나타나지 않도록 권고되고 있다. 넷째, 크리프에 의한 침하량은 연직 방향의 클리

어런스나 슬래브 높이 등에 영향을 준다. 특히, 크리프가 클 경우 개개의 면진장치에서 발생하는 크리프의 차이에 의하여 상부구조물에서 균열이 발생될 수 있다. 현재 일본의 경우 적층고무의 상부 건물과 지표면과의 연직방향 클리어런스는 설계시 고려되고 있지만 개개의 적층고무의 크리프의 차이에 대해서는 특별히 표기하지 않는 경우가 많다.

### 3. 예제모델

#### 3.1 고감쇠고무(High damping rubber, HDR) 적층받침의 해석모델

일반적으로 면진장치는 면진장치의 종류에 따라 모델링하는 방법이 다르다. 천연고무를 사용한 면진장치는 감쇠력은 거의 없고, 오직 탄성거동을 한다. 따라서 면진장치를 모델링할 경우 선형 스프링을 사용할 수 있다. 그러나 고감쇠고무, 납삽입고무와 같이 감쇠력을 고려할 경우 일반적으로 비선형 스프링을 사용하여 면진장치의 이력거동을 표현한다. 원전에는 배관과 같은 설비들이 구조물 사이를 관통하는 경우가 있다. 이 경우 지진에 의하여 발생한 변형이 클 경우 배관에 직접적인 영향을 줄 수 있기 때문에 본 연구에서는 지진시 가속도응답과 변형응답을 함께 감소시킬 수 있는 고감쇠고무 적층받침을 사용하였다. 목표진동수에 부합되도록 면진장치의 강성을 정의하고, 경년열화전 감쇠비는 20%로 가정하였다. 일반적으로 면진장치의 연직강성은 수평강성과 비교하여 상대적으로 매우 크며, 구조물의 수명동안 특성의 변화가 없는 것으로 가정하고 연직방향은 탄성 거동하도록 모델링하였다.

면진장치의 해석모델은 Fig. 2(a)와 같이 SAP2000(CSI, 1995)에서 제공하는 모델을 사용하였으며, 비선형거동을 고

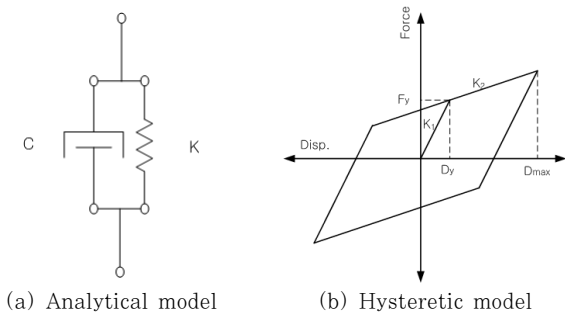


Fig. 2 HDR model

Table 1 Input values for HDR model

(unit: kN, cm)

Model	$F_y$	$K_1$	$K_2/K_1$
Cont. building	22,241	9,486	0.2
Aux. Building	66,723	33,711	0.2

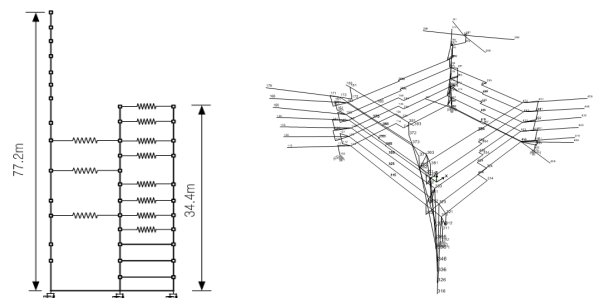
려하기 위하여 초기강성( $K_1$ ), 항복강도( $F_y$ ), 항복후강성비( $K_2/K_1$ )를 Fig. 2 (b)와 같이 입력하였다. 격납건물과 보조건물에 적용된 면진장치의 입력값은 Table 1과 같다.

#### 3.2 대상 구조물의 해석모델

구조물의 지진응답은 입력지진동의 가속도스펙트럼의 진동수성분에 따라 다르게 나타나므로 본 연구에서는 원전의 중요 기기들이 위치하고 있는 격납건물과 보조건물을 예제모델로 선정하였고, 예제모델은 신고리 3&4호기를 대상으로 작성하였다. 해석모델은 강성중심과 질량중심의 편차를 고려하여 Fig. 3과 같이 집중질량모델(lumped mass stick model)로 모델링하였다.

면진 구조물은 면진장치들의 경년열화의 진행속도의 차이로 인하여 연직변형이 서로 다르게 나타날 수 있다. 이러한 현상으로 인하여 면진 구조물은 지진시 횡변위와 함께 회전이 발생할 수 있다. 그러나 회전에 의한 손상은 구조물의 높이-폭비(세장비)가 클 경우 안전성 평가시 중요한 인자가 되지만, 원전 구조물과 같이 세장비가 작은 구조물의 경우 지진시 주로 전단거동을 하므로 본 연구에서는 면진장치의 연직강성의 경년열화의 차이는 고려하지 않았다.

비면진 격납건물과 보조건물의 고유치 해석결과 고유진동수는 3.8Hz와 6Hz로 나타난다. 일반적으로 면진장치의 목표진동수를 구조물의 고유진동수보다 낮게 설계하여 지진응답을 감소시키므로 본 연구에서는 면진구조물의 목표진동수



(a) Containment building (b) Auxiliary building

Fig. 3 Analytical models for NPPs

Table 2 Properties of isolators

(unit: kN, cm)

Properties	Cont. building	Aux. building
Horizontal stiffness	28,460	134,800
Vertical stiffness	28,460,000	134,800,000
Damping	20%	20%
Mass of upper structure	695	3,328
Compressive force	227,400	816,000

를 1Hz로 설정하였다.

Table 2는 목표진동수(1Hz)로 설계된 면진장치의 강성과 감쇠비를 나타낸다. 일반적으로 면진받침의 연직강성은 수평강성보다 매우 크게 나타나므로 본 연구에서는 수평강성과 연직강성의 비를 "1:1000"로 가정하였다.

격납건물과 보조건물에 사용된 면진장치의 총수평강성은 각각 28,460kN/cm, 134,800kN/cm이다. 요구된 총강성과 감쇠비를 고려하여 면진장치를 지반과 구조물의 경계면에 설치하였다. 면진 구조물의 고유진동수는 식 (1)을 사용하여 산정한다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{m_s}{k_i}}} \quad (1)$$

여기서,  $m_s$ 는 상부구조물의 전체 질량을 나타내며,  $k_i$ 는 면진장치의 수평강성을 나타낸다.

격납건물 외벽의 높이는 77m이며, 내부 보조벽체의 높이는 약 34m이다. 격납건물의 벽체를 연결하는 슬래브는 스프링요소를 사용하여 Fig. 3과 같이 주벽체와 보조벽체를 수평방향으로 연결하였다. 보조건물은 4개의 영역으로 구분한 후 각 영역의 질량을 치환하여 Fig. 4와 같이 각각의 절점에 고무 분포하였다. 4개 영역의 구분된 집중질량 모델은 서로 강체요소(rigid elements)를 사용하여 하나의 구조물로 모델링하였다.

### 3.3 해석변수 및 가정사항

고감쇠고무는 고무의 특성변화가 장치의 특성변화를 대표하므로 주파수 의존성이 높지만 본 연구에서는 고감쇠고무의 주파수 의존성은 고려하지 않았다.

면진장치의 경년열화 특성에서도 분석되었듯이 면진장치의 주재료로 사용된 고무는 시간이 경과할수록 산화에 의하여 경화된다. 그 결과 면진장치의 수평강성이 증가할 뿐만 아니라 고무의 감쇠는 산화에 의하여 감소하게 된다. 감쇠의 감소는 지진으로 인하여 면진시스템에서 발생하는 변위가 증가하게 되는 것을 의미한다. 물론 수평강성의 증가가 감쇠의 감소보다 크게 나타나는 것이 Itoh 등(2006)에 의하여 입증되었지만 면진장치의 경년열화를 정확하게 고려하기 위하여 본 연구에서 수평강성과 감쇠를 해석변수로 선정하여 면진장치의 경년열화를 해석적으로 고려하였다.

Itoh 등(2006)은 고감쇠고무 면진장치의 경년열화 특성을 Fig. 4와 같이 수평강성과 감쇠비에 분석하였다. 이들의 연구

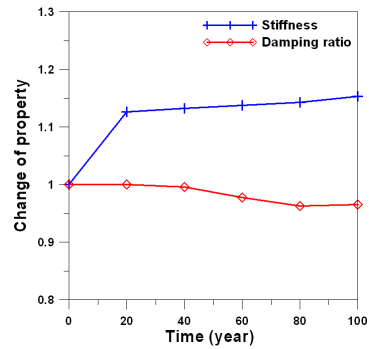


Fig. 4 Horizontal stiffness and damping ratio of isolator with time(Itoh et al.(2006))

결과에 의하면 면진장치의 경년열화는 20년까지 진행속도가 빠르며, 이후 경년열화의 진행속도가 느려지는 것을 알 수 있다. 그리고 초기 수평강성과 비교하여 최대 20%까지 증가하는 것으로 나타났다. 감쇠는 40년까지 큰 변화가 없었지만 100년 경과시 초기값과 비교하여 최대 5%정도 감소하는 것으로 나타났다.

면진장치뿐만 아니라 상부구조물은 노화되면 강성이 변할 수 있다. 그러나 면진장치의 재료로 사용되는 고무의 경년열화에 의한 특성변화가 콘크리트나 철골보다 상대적으로 크게 나타나므로 본 연구에서는 상부구조물의 경년열화는 고려하지 않았다.

### 4. 입력지진동

적층고무 면진시스템은 지반조건에 따라 지진시 응답의 증감이 다르게 나타난다. 지반이 단단한 곳에 위치한 적층고무 면진시스템은 지진력 저감효과가 나타나지만 지반이 연약한 곳에 위치할 경우 지진동은 저진동수 영역에서 응답이 증가하므로 지진력 저감효과를 기대할 수 없다. 따라서 일반적으로 지반이 연약한 곳에는 면진장치를 사용하지 않는다. 본 연구에서는 입력지진동의 진동수 특성에 따라 면진장치의 경

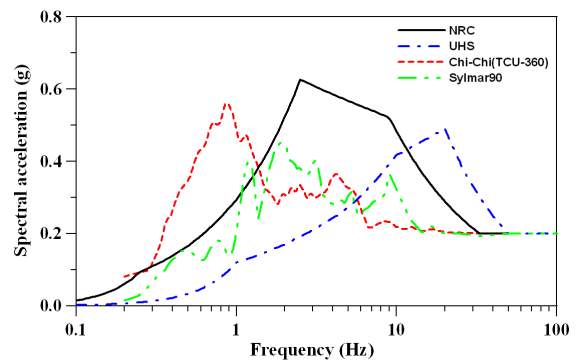


Fig. 5 Acceleration response spectra of different input ground motions

년열화로 인한 구조물의 지진응답을 분석하기 위하여 진동수 성분이 다양한 입력지진동을 입력지진동으로 사용하였다.

입력지진동의 가속도스펙트럼은 Fig. 5와 같다. 면진구조물의 비선형동적해석을 수행하기 위하여 2개의 계측지진과 2개의 인공지진을 사용하였다. 원전의 설계스펙트럼(NRC reg. 1.60), 국내 지반의 특성을 고려한 등재해도스펙트럼(UHS), 그리고 저진동수 영역에서 가속도의 증폭이 크게 나타나는 Chi-chi (TCU-360) 그리고 면진장치의 목표진동수에서 가속도스펙트럼의 변화가 큰 Sylmar90을 입력지진동으로 선정하였다.

해석에서 사용한 입력지진의 최대지반가속도(Peak ground acceleration, PGA)는 0.2g로 가정하였다.

### 5. 해석결과

#### 5.1 면진장치의 경년열화에 의한 구조물의 동특성

면진장치의 경년열화로 인한 특성의 변화는 면진구조물의 동특성을 변화시킬 수 있다. 특히 지진과 같은 동적하중이 작용할 경우 구조물의 동특성 변화는 초기 설계시 고려하였던 지진응답보다 큰 응답을 도출할 수 있다. 또한 변화된 동특성으로 인하여 구조물의 거동도 변할 수 있으며, 그 결과 구조물의 파괴모드는 시간이 경과함에 따라 변할 수 있다. 따라서 면진장치의 경년열화를 고려한 지진응답을 평가할 경우 구조물의 동특성을 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 20년씩 경과한 후 면진 구조물의 고유치해석을 수행하여 동특성의 변화를 분석하였다. Table 3은 면진된 구조물의 시

Table 3 Natural frequency of NPPs with time

Time(year)	Cont. building(Hz)	Aux. building(Hz)
0	1.000	1.000
20	1.060	1.060
40	1.063	1.062
60	1.065	1.065
80	1.068	1.067
100	1.072	1.072

(f: 고유진동수, Kh: 수평강성, β: 감쇠비)

Table 4 Properties of isolator with time

Time (year)	Cont. building		Aux. building	
	Stiffness (kN/cm)	Damping ratio	Stiffness (kN/cm)	Damping ratio
0	28,460	0.200	134,800	0.200
20	32,046	0.200	151,785	0.200
40	32,217	0.199	152,594	0.199
60	32,387	0.196	153,402	0.196
80	32,530	0.192	154,076	0.192
100	32,814	0.193	155,424	0.193

간의 경과에 따른 고유진동수를 나타내며, Table 4는 면진 장치의 수평강성 그리고 감쇠비를 나타낸다.

면진구조물의 고유진동수에 영향을 줄 수 있는 인자는 면진장치와 상부구조물의 강성과 질량이다. 본 연구에서는 상부구조물의 경년열화는 고려하지 않았기 때문에 면진장치의 경화에 의하여 해석모델들의 고유진동수가 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 5에서 나타나듯이 면진장치가 설치된 후 20년까지 경년열화의 진행속도가 빠르기 때문에 고유진동수의 변화가 크게 나타나며, 그 후 경년열화의 진행이 감소하기 때문에 고유진동수의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

면진장치를 설치하고 원전의 설계수명인 60년에 도달할 경우 고유진동수는 초기 설계시와 비교하여 6.5%증가하는 것으로 나타났다. 따라서 면진된 원전구조물은 운영기간동안 안전성을 확보하기 위하여 면진장치가 설치된 후 20년까지 동특성의 변화를 자세하게 분석할 필요가 있으며, 20년 이후 주기적으로 구조물의 진동수를 측정하여 원전의 운영 기간중 발생할 수 있는 지진에 대하여 안전성을 확보해야 할 것이다.

#### 5.2 면진장치의 거동 및 구조물의 시간이력 지진응답

Fig. 6은 NRC 입력지진하중이 작용할 경우 구조물에 설치된 면진장치의 전단 하중-전단변위의 관계를 나타낸다. 경

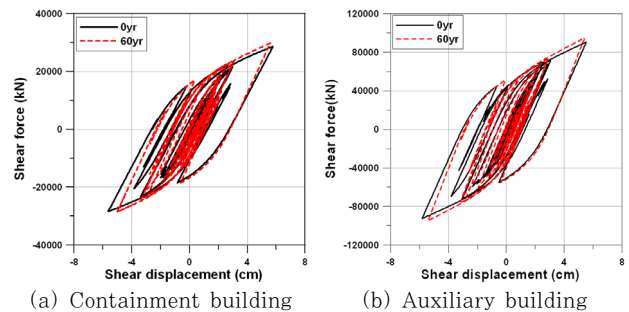


Fig. 6 Load-displacement curves of isolator for NRC spectrum

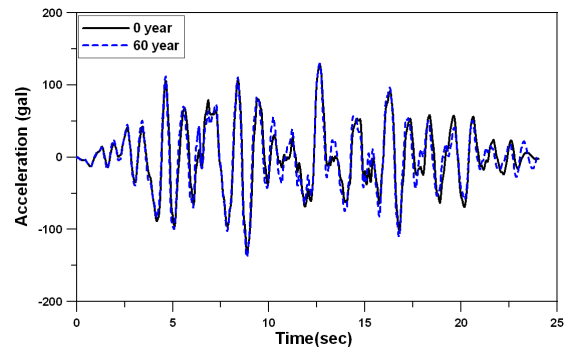


Fig. 7 Acceleration responses of containment building (EL.=38m, NRC)

년열화전 면진장치와 60년 경과후 면진장치의 힘-변위 관계를 비교하면 경년열화에 의한 면진장치의 강성증가를 해석적으로 잘 반영한 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 NRC 입력지진에 대하여 면진장치의 경년열화전후 격납건물 지상 38m에서 가속도응답을 나타낸 것이다. 가속도응답에 의하면 면진장치의 강성변화에 의하여 응답의 최대값과 진동주기가 변하는 것을 알 수 있다. 격납건물의 지상 38m, 보조건물의 지상 47.5m에서 측정된 최대응답을 Table 5와 Table 6에 나타내었다. 면진장치가 경년열화될 경우 면진장치의 강성이 증가되므로 최대가속도응답이 증가하게 된다. 반면 면진장치의 감쇠는 경년열화에 의하여 감소되지만 면진장치의 변위는 시간이 경과할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 면진장치가 경년열화될 경우 구조물의 지진응답은 면진장치의 감쇠보다 수평강성에 의하여 주로 영향을 받는 것을 의미한다. 지진응답의 경향은 다른 입력지진동에서도 유사하게 나타났다. 본 연구에서는 면진장치의 경년열화에 의한 진동수 변동범위에서 입력지진동의 가속도스펙트럼값이 증가하므로 가속도의 최대응답은 증가하는 것으로 나타났다. 만약 입력지진동의 가속도스펙트럼값이 진동수의 변동범위에서 감소하는 형태라면 Table 5와 Table 6의 가속도응답은 시간의 경과에 따라 감소할 수도 있다.

Table 5와 6에서 나타나듯이 면진장치에서 경년열화가 발생하더라도 구조물의 상대변위는 작기 때문에 면진장치의 경년열화에 의한 구조물의 손상은 무시할 수 있다고 판단된다. 그러나 원전은 구조물뿐만 아니라 기기들에 대한 안전성

**Table 5** Maximum responses of containment building for NRC spectrum

Time (year)	Acceleration (gal)	Displacement(cm)	
		Isolator	Structure
0	155.3	5.976	0.017
20	158.2	5.599	0.019
40	158.4	5.591	0.019
60	158.6	5.584	0.019
80	158.9	5.577	0.019
100	159.2	5.562	0.020

**Table 6** Maximum responses of auxiliary building for NRC spectrum

Time (year)	Acceleration (gal)	Displacement(cm)	
		Isolator	Structure
0	116.5	5.828	0.105
20	119.9	5.441	0.113
40	120.2	5.427	0.114
60	120.4	5.414	0.114
80	120.6	5.406	0.114
100	121.1	5.396	0.114

이 확보되어야 하므로 면진장치의 경년열화에 의한 구조물의 시간이력응답과 층응답스펙트럼이 함께 분석되어야 한다.

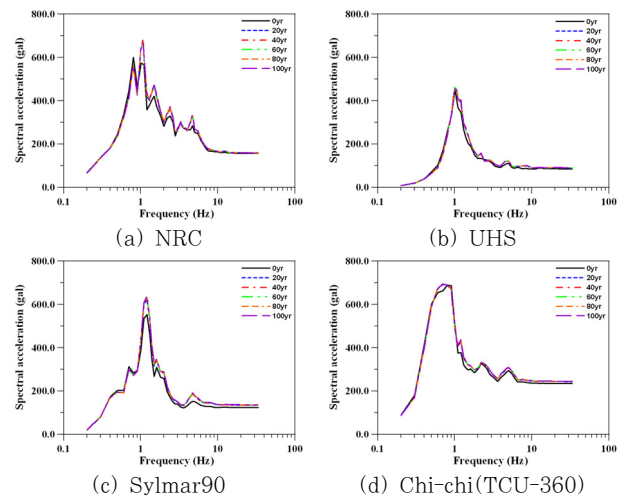
### 5.3 층응답스펙트럼(Floor response spectrum)

원전의 경우 원전의 운영과 관련된 중요 기기들이 구조물 안에 위치하기 때문에 구조물뿐만 아니라 내부기기들도 내진설계를 한다. 기기들의 내진설계를 위하여 일반적으로 층응답스펙트럼을 사용한다.

면진 구조물에서 면진층 상부구조물은 강제거동을 하기 때문에 하부층과 상부층에서 층응답스펙트럼의 차이는 거의 없다. 그래서 면진구조물의 내부기기들은 서로 위치가 다르더라도 동일한 층응답스펙트럼을 사용하여 설계할 수 있는 장점이 있다. 그러나 면진장치가 경년열화되어 고무의 강성이 증가하기 때문에 구조물의 층응답스펙트럼은 열화전과 비교하여 차이가 발생한다. 특히 고무의 경화도가 크면 상부층으로 갈수록 가속도의 크기는 증가하게 된다. 그 결과 기기들의 지진에 대한 안전여유도가 낮아질 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 면진장치의 경년열화에 의한 원전구조물의 층응답스펙트럼의 변화를 분석하였다.

면진장치의 경년열화를 고려한 격납건물과 보조건물의 층응답스펙트럼을 나타내면 Fig. 8과 Fig. 9와 같다.

Fig. 8에 따르면 입력지진동의 진동수특성에 따라 면진장치의 경년열화에 의한 층응답스펙트럼이 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 1Hz 이하의 구간에서는 면진장치의 경년열화에 의한 스펙트럼가속도의 증가가 크지 않지만, 1Hz 이상의 구간에서 스펙트럼가속도의 증가폭이 크게 나타났다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 면진장치의 경년열화에 의하여 열화전보다 고진동수 영역에서 층응답스펙트럼의 탁월진동수가 형성되고, 면진장치의 경년열화에 의하여 수평강성이



**Fig. 8** FRS of containment building(EL. 38m)

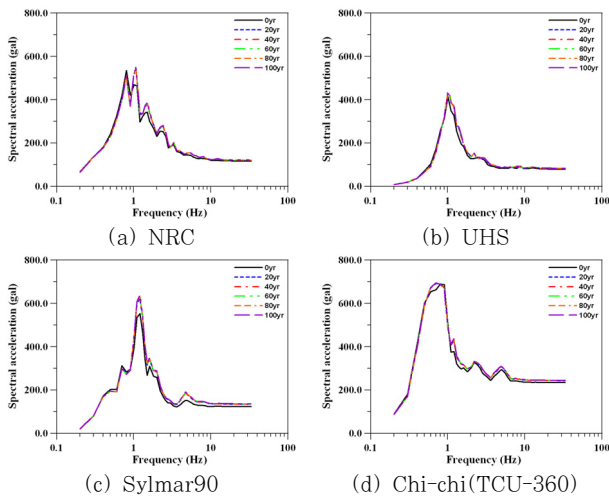


Fig. 9 FRS of auxiliary building(EL. 47.5m)

증가되어 스펙트럼이 전체적으로 상승하기 때문이다.

면진장치의 경년열화에 의한 층응답스펙트럼의 변화는 20년까지 크게 나타나며, 20년후 층응답스펙트럼의 변화는 크지 않았다. 이러한 결과는 면진장치의 주재료인 고무의 경년열화에 의한 것으로 고무의 경년열화에 의하여 면진 구조물 뿐만 아니라 구조물 내부에 위치한 기기들의 지진응답까지 변화시킬 수 있는 것을 나타낸다.

면진장치의 경년열화에 의한 보조건물의 층응답스펙트럼의 변화는 Fig. 9와 같이 격납건물의 층응답스펙트럼의 변화와 유사하게 나타났다.

본 연구의 층응답스펙트럼 결과로부터 면진된 원전 구조물에서는 완공후 20년까지 면진장치에서 발생할 수 있는 열화 현상을 면밀히 조사해야 하며, 면진된 원전의 기기들을 설계 시 면진장치의 경년열화를 고려하여 설계할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 열화전 모델의 스펙트럼 가속도( $SA_{initial}$ )과 60년 경과된 모델의 스펙트럼 가속도( $SA_{60yr}$ )를 진동수에 따라 나타낸 것이다. 면진장치의 경년열화에 의한 층응답스펙트럼

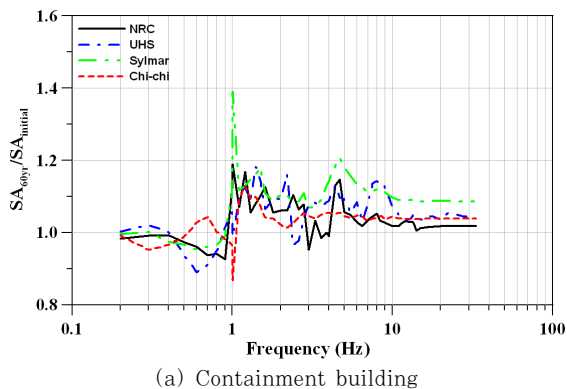
의 증가폭은 입력지진동의 진동수 성분에 따라 다르게 나타났다. 층응답스펙트럼의 결과에 의하면 격납건물의 경우 특정 진동수 영역(1Hz)에서 스펙트럼가속도가 약 40%까지 증가하고, 보조건물의 경우 진동수가 1.4Hz인 구간에서 스펙트럼가속도가 최대 20%까지 증가된다.

Fig. 10에 의하면 격납건물과 보조건물의 경우 10Hz이상에서 스펙트럼가속도의 변화는 약 5%로 나타났다. 신고리 3&4호기에서 중요기기들의 고유진동수가 5Hz~20Hz사이인 것을 고려하면 60년후 면진장치의 경년열화에 의한 가속도는 약 10%증가할 것으로 판단된다. 그러나 원전의 배관과 같이 고유진동수가 낮은 설비들은 면진장치의 경년열화에 의하여 지진응답이 크게 증가될 수 있다.

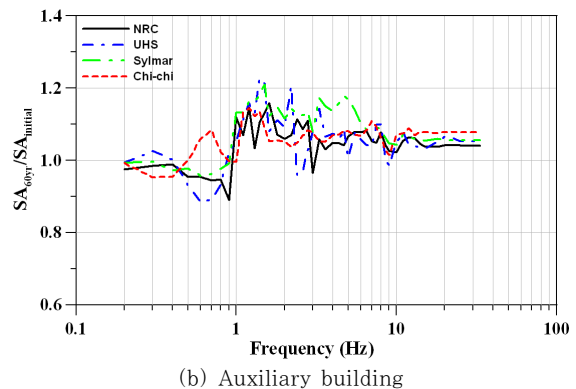
## 6. 결 론

면진장치의 지진력 저감효과는 우수하지만 면진재료의 경년열화로 인하여 지진시 면진장치와 면진층 상부 구조물의 거동은 변화될 수 있다. 본 연구에서는 고강쇠고무 척층받침의 경년열화를 고려한 원전 구조물의 지진응답 변화를 확인하기 위하여 격납건물과 보조건물의 지진응답을 시간의 경과에 따라 분석하였다.

해석결과에 의하면 면진장치의 열화전 가속도응답과 원전의 설계수명인 60년경과시 가속도응답을 비교한 결과 격납건물과 보조건물의 가속도응답은 소폭 증가하였으며, 최대 변위응답은 소폭 감소하였다. 면진장치에서 경년열화가 발생하더라도 구조물의 층간변위는 시간의 경과에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타나므로 지진시 면진장치의 경년열화로 인하여 구조물이 손상될 확률은 매우 작다고 판단되지만, 배관과 같이 고유진동수가 낮은 설비들은 면진장치의 경년열화에 의하여 지진응답이 증가될 수 있다. 따라서 추후 면진장치의 경년열화에 의한 원전 구조물의 안전성을 평가하기 위하여 영향설비들의 지진취약도 분석을 수행할 필요가 있다.



(a) Containment building



(b) Auxiliary building

Fig. 10 Spectral acceleration ratio by age-related degradation of HDRB

격납건물과 보조건물의 경우 층응답스펙트럼의 변화율이 특정 진동수 영역에서 각각 약 40%와 약 20%까지 증가하였지만, 기기들의 성능과 비교하면 충분한 여유도가 있을 것으로 판단된다. 그러나 실제 면진된 원전은 운영기간 중 다양한 열화환경에 노출될 수 있고, 해석결과에서도 나타나듯이 20년까지 지진응답의 변화율이 크게 나타나기 때문에 원전과 같이 중요도가 높은 구조물의 경우 유진관리 측면에서 면진장치의 상세한 검사가 주기적으로 시행되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 2011T100200080).

### 참 고 문 헌

Computer and structures Inc. (1995) SAP2000,

Analysis Reference, Berkeley.

Gu, H., Itoh, Y. (2011) Aging Behaviors of Natural Rubber in Isolation Bearings, *Advanced Materials Research*, 163-167, pp.3343~3347.

Hamaguchi, H., Samejima, Y., Kani, N. (2009) A Study of Aging Effect on Rubber Bearings after about Twenty Years in Use, *11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Guangzhou, China, Nov. pp.17~21.

Itoh, Y., Gu, H., Satoh, K., Yamamoto, Y. (2006) Long-Term Deterioration of High Damping Rubber Bridge Bearing, *Structure Engineering Earthquake Engineering, JSCE*, 23(2), pp.215~227.

NRC (1973) Design Response Spectra for Sesimc Design of Nuclear Power Plants, *US NRC Regulatory Guide 1.60*.

日本免震構造協會 (2010) 免震構造-部材の基本から設計・施工まで-, ISBN978-4-274-20963-5, Ohmsha(in Japanese).

### 요 지

면진장치는 상부구조물의 지진력을 감소시키는데 크게 기여하지만, 고감쇠고무 적층받침에 사용되는 고무재료는 시간이 경과함에 따라 열화되어 상부구조물의 동특성과 기기들의 지진응답에 영향을 줄 수 있다. 따라서 면진장치의 경년열화를 고려한 구조물의 지진응답을 분석하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 기존 문헌을 통하여 분석된 고무의 경년열화 특성을 사용하여 면진장치를 모델링하였다. 면진된 원전의 지진응답을 평가하기 위하여 격납건물과 보조건물을 대상 구조물로 선정하고, 진동수 성분이 다양한 입력지진동을 사용하여 구조물의 고유진동수, 최대지진응답, 층응답스펙트럼을 시간의 경과에 따라 분석하였다. 해석결과에 의하면 면진장치의 경년열화에 의하여 지진응답이 소폭 증가하였으며, 면진장치가 설치된 후 20년까지 지진응답의 증가율이 크게 나타나므로 이 기간에 상세한 검사가 시행되어야 할 것이다.

**핵심용어** : 고감쇠고무 적층받침, 경년열화, 비선형동적해석, 층응답스펙트럼