

다른 온도환경에서 고감쇠고무 적층받침의 경년열화를 고려한 면진 원전구조물의 지진응답

박 준 희^{1*} · 전 영 선¹ · 최 인 길¹

¹한국원자력연구원 종합안전평가부

Seismic Responses of Seismically-Isolated Nuclear Power Plants considering Aging of High Damping Rubber Bearing in Different Temperature Environments

Junhee Park^{1*}, Young-Sun Choun¹ and In-Kil Choi¹

¹Integrated Safety Assessment Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

Abstract

The isolators have been generally used to reduce a seismic force. If the isolators apply to the nuclear power plants(NPPs), the durability and capacity for the structures and equipments should be ensured during the life time. In this study, the long-term behavior of isolated NPPs was analyzed for ensuring the seismic safety. The properties of isolator due to the age-related degradation were analyzed. And the seismic behavior of isolated buildings was analyzed by considering the aging of rubber bearings in different temperature environments. According to the analysis results, the natural frequency of structures was increased with time. But the maximum acceleration and maximum displacement of isolated structures have not changed significantly. Although the damaged of structure did not occurred by aging of isolators, it was presented that the spectral acceleration at the target frequency of isolated structure increased with the temperature. Therefore the isolators in the isolated buildings should be carefully designed and manufactured considering the temperature-dependancy of rubber material.

Keywords : high damping rubber bearing, aging, temperature, seismic response

1. 서 론

지반과 구조물을 격리함으로써 지진력 저감효과를 가져오는 면진장치는 건축물, 교량뿐만 아니라 원자력발전소(이하, 원전)에도 설치되고 있다. 그러나 원전과 같이 운영과 관련된 수 많은 기기들이 존재하거나 건물들 사이를 통과할 경우 면진장치의 적용에 있어서 주의를 요구한다.

일본에서는 “원자력발전소 면진구조 설계기술 지침서(JEAG 4614-2000)”를 이미 발간하여 면진형 원전구조물이 운영기간동안 가정된 지지력에 대해서 중대사고가 발생하지 않도록 충분한 내구성을 확보하여 설계하도록 하고 있다. 면진장치는 시간이 경과함에 따라 열, 산화, 방사선, 자외선 등과 같은 외

부환경에 의하여 재료의 열화가 발생한다. 그 결과 면진장치는 시간이 경과함에 따라 역학적 특성이 변할 수 있다.

고무재료는 열에 의하여 매우 민감하게 변하는 것으로 보고되었다(Gu and Itoh, 2011). 그러나 현재 면진장치는 고무의 온도 의존성을 고려한 설계가 이루어지고 있지 않다. 따라서 다른 온도환경에서 면진형 원전구조물의 지진거동을 확인할 필요가 있다.

구조물에 면진장치가 사용되기 시작한 것은 약 40년 전으로 면진장치의 장기거동에 대한 분석은 연구된 사례가 매우 드물며, 대부분 고무재료의 경년열화 특성을 분석한 연구가 주로 수행되었다. Itoh 등(2006)의 연구결과에 의하면 고무재료의 주요 경년열화인자는 열산화이며, 특히 온도가 높을

* Corresponding author:

Tel: +82-42-868-4859; E-mail: jhpark78@kaeri.re.kr

Received April 28 2014; Revised June 11 2014

Accepted June 24 2014

©2014 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.

수목 열화의 진행속도가 빠르게 나타난다고 보고하였으며, 면진장치에서 경년열화가 발생할 경우 표면으로 최대 5cm 까지 열화가 발생하는 것으로 나타났다. 국내에서는 Hwang 등(2013)에 의하여 천연고무적층받침의 가열축진 열화시험이 진행되었으며, 천연고무적층받침의 경년열화에 따른 수평강성과 크리프의 변화가 분석되었다.

본 연구에서는 면진 원전의 설계수명동안 지진에 대한 안전성을 확보하기 위하여 면진구조물과 기기의 장기거동을 해석적으로 분석하였다. 특히, 면진장치에 사용된 고무는 열산화에 의하여 민감하게 반응하므로 주변온도에 따라 면진장치의 경년열화에 의한 구조물의 지진응답이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 다른 온도에서 면진장치의 경년열화 특성을 분석하였다.

면진장치의 비선형성을 고려하기 위하여 이선형모델(Bilinear model)을 선정하였다. 온도에 따른 면진장치의 열화 모델은 기존 연구자들의 연구결과를 이용하여 시간의 경과에 따라 면진장치의 특성을 정의하였다. 면진장치의 장기거동을 고려한 구조물의 지진응답을 분석하기 위하여 열화 전후에 대한 가속도응답과 변위응답을 작성하였다. 그리고 경년열화에 따른 층응답스펙트럼의 변화를 함께 분석하였다.

2. 면진장치의 경년열화

2.1 경년열화를 고려한 면진장치의 구조적 특성

일본면진구조협회(2010)에 의하면 면진장치는 시간이 경과함에 따라 강성, 변형성능, 감쇠성능, 하중지지능력 그리고 크리프에서 변화가 발생한다고 보고되고 있다.

면진장치의 수평강성은 면진구조물의 고유주기를 결정하는 중요한 요소로서 수평강성이 변할 경우 구조물의 동특성이 변할 수 있다. 이러한 동특성의 변화가 설계시와 비교하여 클 경우 면진구조물의 안전성을 확보하기 힘들 수 있기 때문에 경년열화를 고려한 면진구조물의 지진응답 분석시 선행 조사되어야 할 변수이다. 건물의 수명동안 방치된 적층고무 수평강성의 변화율은 일반적으로 $\pm 20\%$ 정도이며(일본면진구조협회, 2010), 구조물에 사용되는 철, 콘크리트 등 다른 재료의 변화율과 비교하여 상대적으로 큰 값이다.

변형성능은 지진시 면진장치의 성능을 나타내는 대표적인 변수이다. 고무재료의 가열축진 열화시험에 의하면 고무재료는 열화 될수록 경화로 인하여 파괴시 연신율이 감소하게 된다. 그러나 현재 면진장치의 실제 변형성능에 대한 사례는 보고된 적이 없다. 이것은 면진장치의 표층에서 발생할 열화가 면진장치의 내부로 침투하지 않았기 때문으로 판단된다.

면진구조물의 변위는 면진장치의 감쇠력에 의하여 제어된다. 따라서 감쇠특성이 변하게 되면 설계변위 이상의 변위가 발생할 수 있다. 면진장치의 경년열화에 의하여 면진 구조물의 수명동안 지진에 의하여 설계변위 이상의 변위가 발생할 경우 면진장치의 감쇠특성은 설계시 고려되어야 할 것이다. 경년열화에 의한 감쇠 성능의 변화는 가열축진 열화시험에 의해서 연구가 진행되어 왔으며, 일반적으로 60년 경과후의 등가감쇠정수의 변화율은 15%이하(일본면진구조협회, 2010)인 것으로 보고되고 있다.

횡하중에 의한 면진장치의 특성변화 뿐만 아니라 면진장치는 상부구조물을 지지하기 위하여 하중지지능력이 요구된다. 만약 면진장치의 하중지지능력이 감소하면 상부구조물의 안전성에 영향을 줄 수 있다. 그러나 적층고무에서 경년열화는 대부분 표층에서 나타나기 때문에 일본면진구조협회(2010)에서는 면진장치의 하중지지능력에 대해서는 문제가 없다고 보고되고 있다. 면진장치의 표면열화에 의한 균열이 클 경우 외형상의 불안감을 가져오므로 극심한 균열은 나타나지 않도록 권고하고 있다.

크리프에 의한 침하량은 연직 방향의 클리어런스나 슬래브 높이 등에 영향을 준다. 특히, 크리프가 클 경우 개개의 면진장치에서 발생하는 크리프의 차이에 의하여 상부구조물에서 균열이 발생할 수 있다. 그러나 크리프양이 매우 작은 것으로 보고되고 있기 때문에 현재 일본의 경우 적층고무의 상부 건물과 지표면과의 연직방향 클리어런스는 설계시 고려되고 있지만 적층고무의 크리프 차이에 대해서는 특별히 표기하지 않는 경우가 많다.

Park 등(2013)에 의하면 면진장치의 강성이 증가하고 감쇠가 감소함에 따라 면진구조물에서 상부구조물의 가속도와 하중이 증가하고, 변위는 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 원전에서는 배관과 같은 저진동수의 기기들이 면진장치의 경년열화에 의하여 영향이 있을 수 있다고 보고되었다.

2.2 온도에 따른 면진장치의 경년열화

Gu와 Itoh(2010)에 의하면 고무의 경년열화와 관련된 변수들 중에서 온도에 의한 영향이 가장 크게 나타났다. 고무를 가열하여 열화특성을 분석하는 가열축진 열화시험에 의하면 고무재료를 256일 동안 열화시킬 경우 변형율 100%에서 응력은 초기상태보다 200%증가하였으며, 파괴시 변형율과 인장강도는 초기상태보다 30%까지 감소하였다. 높은 온도에서 응력이 증가하고 파괴시 변형율이 감소한다는 것은 고무가 경화된다는 것을 의미한다.

고감쇠고무적층받침(High Damping Rubber Bearing,

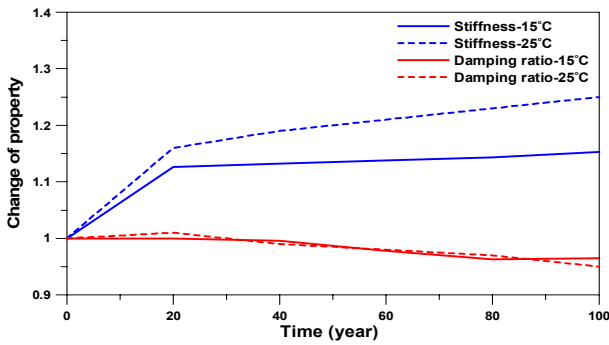


Fig. 1 Temperature dependency of rubber material properties(Itoh *et al.*, 2006)

HDRB)의 경우 고무의 온도의존성에 의하여 경년열화 특성이 결정된다. 고무의 분자는 산화되면 분자구조가 끊어졌다 재결합되는 과정에서 가교점이 증가하여 경화가 된다. 따라서 재결합에 의하여 고무의 분자구조가 안정화될 때까지 특성변화는 급격하게 증가한다. 그래서 Fig. 1과 같이 20년까지 면진장치의 특성변화가 크게 나타나고, 그 후 강성의 변화가 완만하게 나타났다.

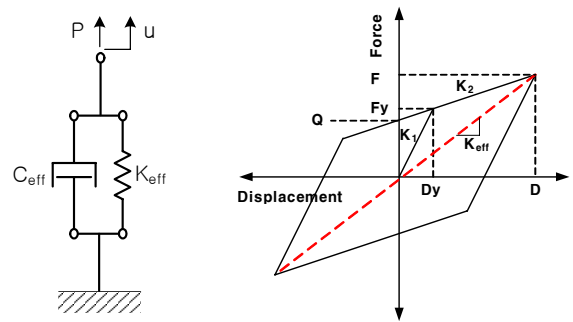
Fig. 1은 시간의 경과에 따라 온도와 면진장치의 특성변화의 관계를 나타낸다. Itoh 등(2006)의 연구결과에 의하면 온도가 15°C와 25°C인 경우 경과시간이 100년이 될 경우 면진장치의 수평강성의 증가율은 각각 약 14%와 25%까지 증가하는 것으로 나타났다. 원전의 설계수명인 60년을 기준으로 온도가 25°C인 경우 면진장치의 수평강성은 온도가 15°C인 경우의 수평강성보다 약 7%정도 크게 나타났다. 또한 시간이 경과할수록 온도에 의한 강성변화의 차이가 증가하였다. 반면 감쇠비는 온도에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 온도에 따른 면진구조물의 지진응답을 분석할 경우 강성의 변화만 고려하면 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 서로 다른 온도에서 경년열화된 원전 구조물의 지진응답을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같이 Itho 등에 의하여 제시된 면진장치의 온도의존 특성모델을 이용하였다. 면진구조물의 초기상태부터 100년까지 매 20년마다 온도에 의한 면진장치의 강성변화를 고려하여 지진응답해석을 수행하였다.

3. 예제모델

3.1 면진장치와 면진구조물의 해석모델

면진구조물은 크게 면진장치와 상부구조물로 구성된다. 원전 구조물에는 수많은 기기들과 파이프들이 있다. 이러한 기기들은 원전의 운영과 밀접하게 관련된 기기들로서 파이프와



(a) Analytical model (b) Hysteretic model
Fig. 2 Modelling of isolator

같이 저진동수의 기기들은 면진장치를 설치하더라도 지진에 대한 안전성을 검토해야 한다.

Fig. 2(b)와 같이 이선형거동을 하는 HDRB는 SAP 2000(CSI, 1995)을 이용하여 간편하게 모델링할 수 있다. 비선형모델은 항복강도(F_y), 탄성강성(K_1) 그리고 항복후 강성(K_2)에 의하여 정의되며, 고유치 해석은 Fig. 2(a)와 같이 선형모델을 이용하였다.

면진장치를 설계하기 위하여 먼저 면진구조물의 목표진동수를 정해야 한다. 면진구조물의 목표 진동수는 지반 스펙트럼과 설계시 고려된 최대 지반 가속도를 고려하여 정의된다. 본 연구에서는 면진장치의 목표 진동수를 1Hz로 설정하여 면진장치의 강성을 설계하였다. 본 연구에서는 면진장치의 연직강성을 수평강성의 100배로 가정하였다. HDRB의 감쇠비는 20%로 가정하였다. HDRB의 이력특성을 결정하기 위해서 먼저 면진장치의 항복변위를 정의해야 한다. 면진장치의 설계변위는 지진계수, 목표 진동수 그리고 감쇠를 가정하여 산정된다. 면진장치의 설계시 변위와 유효 수평강성 그리고 유효 감쇠비를 이용하면 식 (1)과 같이 특성강도(면진장치의 변위가 0일 때 강도)를 산정할 수 있다. 항복후 강성(K_2)는 식 (2)를 이용하여 산정하였으며, 면진장치의 항복강도(F_y)는 식 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$Q = \frac{2\pi K_{eff} D^2 \times \beta_{eff}}{4D} \tag{1}$$

$$K_2 = K_{eff} - \frac{Q}{D} \tag{2}$$

$$F_y = Q + K_2 D_y \tag{3}$$

여기서, Q 는 특성강도, K_2 는 항복후강성, F_y 는 면진장치의 항복강도, β_{eff} 는 유효 감쇠비, K_{eff} 는 유효 수평강성, D 는 면진장치의 설계변위를 나타낸다.

설계된 면진장치의 유효 수평강성과 연직강성은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of isolator

	RCB	AUB
Horizontal stiffness (kN/cm)	28460	134800
Vertical stiffness (kN/cm)	2846000	13480000
Damping ratio	0.2	0.2

본 연구에서는 원전 구조물에서 중요 기기들이 위치하고 있는 격납건물(Reactor Containment Building, RCB)과 보조건물(Auxiliary building, AUB)을 대상구조물로 선정하여 지진응답 해석을 수행하였다. 격납건물과 보조건물은 APRI400을 대상으로 하였다. 면진구조물을 모델링할 경우 일반적으로 discrete model과 continuum model을 사용한다. 면진구조물의 전체적인 거동을 분석할 경우 스프링으로 모델링하는 discrete model을 많이 사용하므로 본 연구에서는 discrete model을 사용하여 경년열화를 고려한 면진구조물의 지진응답을 분석하였다.

격납건물의 재료 특성은 Table 2와 같다. 외벽의 높이는 77m이며, 내부 보조벽체의 높이는 약 34m이다. 격납건물의 벽체를 연결하는 슬래브는 강성을 고려하여 스프링요소를 사용하였다. 슬래브는 Fig. 3(a)와 같이 주벽체와 보조벽체를 수평방향으로 연결하였다. 보조벽체의 저층 슬래브는 매우 두껍기 때문에 지진시 손상이 발생하기 어렵다. 그래서 강체요소로 가정하여 주벽체와 보조벽체를 연결하였다.

보조건물은 평면상 4개의 영역으로 구분한 후 각 영역의

Table 2 Material properties of RCB

	Strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Shear modulus (MPa)	density (kg/m ³)
Reinforced concrete	34.5	27770	11874	2400
Post tension concrete	41.4	30451	13023	2400
Steel	344.7	199948	79979	7849

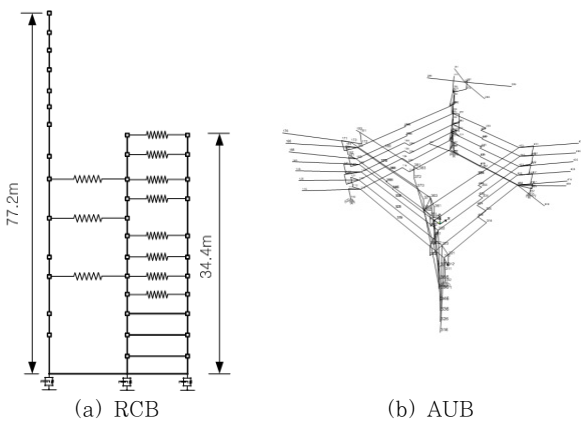


Fig. 3 Lumped mass stick model

질량(슬래브, 벽체, 기둥, 기기 등)을 치환하여 Fig. 3(b)과 같이 각각의 절점에 고무 분포하였다. 4개 영역의 집중질량 모델을 서로 강체요소(rigid elements)로 연결하여 일체 거동하도록 모델링하였다.

3.2 해석을 위한 가정사항

서로 다른 온도에서 경년열화된 면진 원전 구조물의 지진응답을 분석하기 위하여 해석시 다음과 같이 가정하였다.

온도에 따른 면진장치의 열화해석을 수행하기 위하여 먼저 온도를 설정해야 한다. 온도는 연평균기온인 15℃와 25℃인 경우로 설정하였다. 본 연구에서 설정한 온도는 일정하므로 해석 결과는 연중 기온의 변동성이 작은 곳의 구조물들에 한정된다.

고무재료는 변형을 300%에서 경화가 발생하기 때문에 이 선형(Bi-linear)모델로 면진장치의 이력거동을 표현하기 어렵다. 그러나 본 연구에서는 파괴시 면진구조물의 거동을 분석하는 것이 아니기 때문에 면진장치의 이력모델을 이선형으로 가정하였다. 면진구조물에서 상부구조물은 지진시 탄성거동을 하므로 상부구조물은 탄성체로 가정하였다. 면진구조물이 설치된 지역의 지반강성이 충분히 큰 것으로 가정하여 지반구조물의 상호작용은 고려하지 않았다.

4. 입력지진동

일반적으로 면진장치를 설계할 경우 면진구조물이 위치한 지역의 지반상태를 고려하여 설계스펙트럼이 결정된다. 그래서 면진구조물의 목표진동수를 설계지진동스펙트럼의 탁월진동수에서 멀어지도록 설계하지만, 본 연구에서는 입력스펙트럼의 형상에 의하여 면진구조물의 지진응답을 분석하기 위하여 다양한 진동수성분을 가진 지진동을 선택하였다.

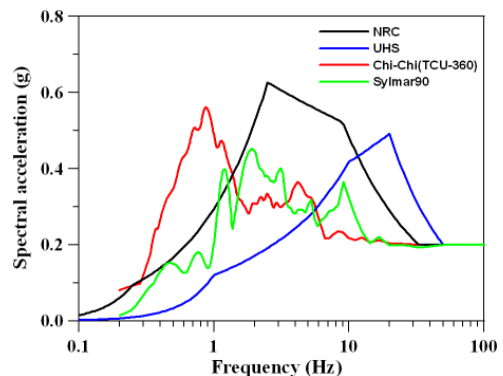


Fig. 4 Acceleration response spectra of different input ground motions

예제모델의 비선형지진해석을 수행하기 위하여 Fig. 4와 같이 2개의 계층지진과 2개의 인공지진을 입력하중으로 사용하였다. 사용된 지진하중은 NRC, UHS, 1999년 Chi-chi 그리고 Sylmar이다. 여기서, NRC 입력지진은 NRC reg1.60 (1973)에서 제시한 원전 구조물의 설계스펙트럼을 나타내며, UHS 입력지진은 국내 지반의 고진동수성분을 고려한 등재해도스펙트럼을 나타낸다. 목표진동수에서 스펙트럼 가속도의 변화가 큰 Chichi 지진과 Sylmar90지진을 입력지진으로 함께 사용하였다.

해석에 사용된 지진하중의 peak ground acceleration (PGA)는 0.2g로 스케일링하였다. 입력지진의 시간간격은 NRC의 경우 0.005초, UHS와 Chi-chi의 경우 0.01초, Sylmar의 경우 0.02초로 설정하였다.

5. 온도에 따른 면진구조물의 지진응답 분석

5.1 면진장치의 지진응답

HDRB의 재료인 고무는 온도의존성이 높은 재료이다. 주온도가 높을수록 열화의 진행속도가 빨라지며 그 결과 동일한 수명에서 낮은 온도보다 높은 온도에서 면진장치의 수평강성이 크게 나타났다.

Fig. 5는 60년 도달시 입력지진하중에 따른 면진장치의 전단하중-전단변형률의 관계를 나타내는 것으로 온도가 높을수록 면진장치의 강성이 증가하는 것을 알 수 있었다.

입력지진동의 가속도스펙트럼에 의하면 UHS는 고진동수

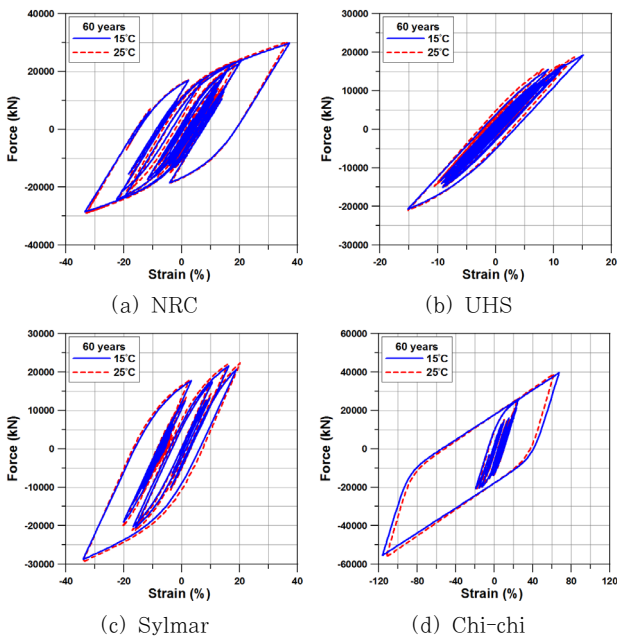


Fig. 5 Load-displacement curves of isolator in different temperature

성분이 강한 지진스펙트럼으로 면진구조물의 목표 진동수인 1Hz에서 다른 입력지진동보다 스펙트럼 가속도값이 작다. 그 결과 Fig. 5(b)와 같이 UHS에서 면진장치의 수평변형률이 다른 입력지진동에 의한 변형보다 작게 나타났다. 반면 입력지진동이 chi-chi일 경우 면진구조물의 목표 진동수에서 가속도스펙트럼이 크게 나타나므로 면진장치의 변형률이 Fig. 5(d)와 같이 약 120%로 다른 입력지진동보다 크게 나타났다.

해석결과에 의하면 온도에 따라 면진장치는 서로 다르게 경화된다. 온도에 따라 면진장치의 수평강성은 60년에 도달할 경우 약 3%~8%까지 차이가 발생하였다. 본 연구에서 면진장치의 강성은 초기강성과 항복후강성으로 정의된다. 면진장치의 항복후강성은 초기강성에 비례하여 결정되므로, 면진장치의 비선형성에 관계없이 온도에 따라 수평강성의 변화가 비슷하게 나타났다. 수평강성의 변화로 인하여 면진구조물의 진동수는 최대 4%정도 차이가 날 수 있을 것으로 예상된다. 면진장치의 이력곡선에서도 나타나듯이 온도에 따라 수평강성의 변화는 나타나지만 이력감쇠의 변화는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 수평강성의 변화에 따른 상부구조물의 지진응답의 변화를 확인할 필요가 있다.

5.2 면진구조물의 고유치해석

면진장치에서 경년열화가 발생하면 면진장치의 수평강성이 증가함에 따라 상부구조물의 지진응답에도 영향을 줄 수 있다. 구조물 및 기기들의 성능은 가속도와 변위에 의하여 결정된다. 그래서 예제모델의 가속도응답과 변위응답을 측정하여 온도에 따른 응답의 변화를 분석하였다. 격납건물의 경우 원자로가 설치되어 있는 38m에서 지진응답을 산정하였으며, 보조건물의 경우 주제어실(Main control room)이 위치하고 있는 47.54m에서 지진응답을 산정하였다.

면진구조물이 온도에 따라 열화의 진행속도가 다르기 때문에 면진구조물의 동특성은 온도환경에 따라 다르게 나타날 수밖에 없다. Table 3은 온도에 따라 경년열화된 면진구조물의 고유진동수를 나타낸다. 고유치해석 결과에 의하면 원전구조물의 수명이 60년에 도달할 때 고유진동수는 온도가 15°C인 경우 약 6.5% 증가하였지만, 온도가 25°C인 경우 약 9.4% 정도 증가되었다.

Table 3 Natural frequency of isolated structure(Hz)

Time (year)	15°C		25°C	
	RCB	AUB	RCB	AUB
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
60	1.0650	1.0650	1.0940	1.0950

5.3 면진구조물의 시간이력응답

Fig. 6은 면진구조물의 수명이 20년과 60년에 도달할 때 온도에 따른 HDRB가 설치된 격납건물의 가속도시간이력응답을 나타낸다. 온도가 높을수록 면진장치의 수평강성이 증가하기 때문에 25℃에서 최대가속도가 15℃에서 최대가속도보다 크게 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 나타난 것처럼 면진구조물의 온도의존성은 최대가속도응답과 진동수에 영향을 주는 것으로 나타

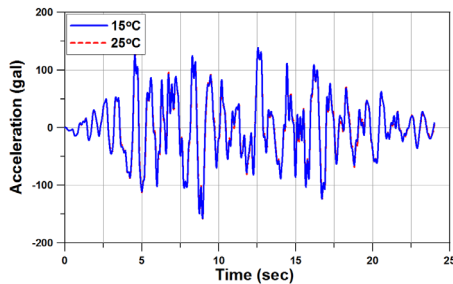


Fig. 6 Time history response of RCB(NRC, 20년)

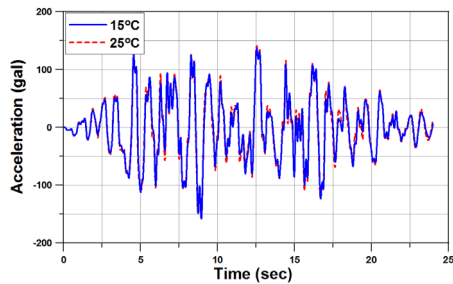


Fig. 7 Time history response of RCB(NRC, 60년)

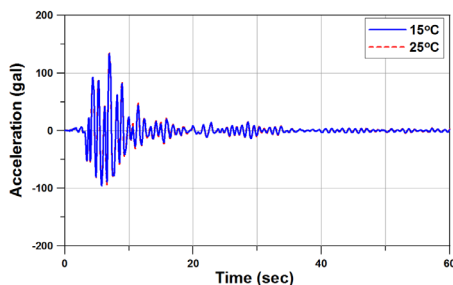


Fig. 8 Time history response of RCB(Sylmar, 20년)

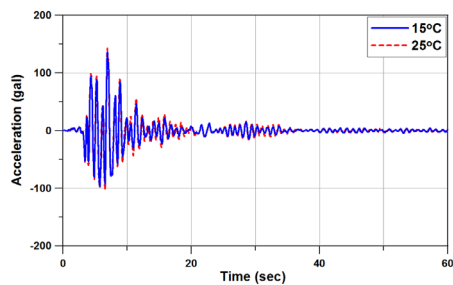


Fig. 9 Time history response of RCB(Sylmar, 60yr)

Table 4 Elongation at the breaking point of rubber in different temperature

Time(year)	Change of elongation(%)	
	15℃	25℃
20	-0.09	-0.23
40	-0.18	-0.46
60	-0.27	-0.70
80	-0.35	-0.93
100	-0.44	-1.16

났다. 시간이 경과할수록 온도에 의한 최대가속도응답의 차이가 증가하지만 상부구조물의 최대가속도는 온도에 따라 약 2%로 크지 않았다.

온도가 높을수록 층간변위비가 증가하지만 증가율이 상당히 작은 것으로 나타났다. 그러나 면진구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 지진에 의한 구조물의 응답 이외에도 면진장치의 성능감소를 고려하여 지진에 대한 여유도를 확인해야 한다.

HDRB의 경년열화특성은 고무의 열화특성에 의존한다. 따라서 고무의 열화특성을 기준으로 면진받침의 열화성능을 간접적으로 도출할 수 있다.

본 연구에서는 고무시편의 가열축진 열화시험(Choun *et al.*, 2014)결과를 이용하여 파괴시 변형율과 온도에 대한 관계를 도출하였다. 시험결과에 따르면, Table 4와 같이 온도가 15℃와 25℃에서 파괴시 전단변형율은 약 2.6배의 차이가 발생하였다. 고무를 주재료로 사용한 면진장치는 온도에 따라 변위응답의 감소를 보다 한계변위의 감소율이 크기 때문에 연평균 기온이 높은 지역에서 면진장치의 경년열화가 발생할 경우 면진장치의 성능이 감소될 것이다. 그러나 Table 4에서도 나타나듯이 면진장치의 시간이 경과함에 따라 파괴시 변형율의 변화가 약 1%로 크지 않은 것을 알 수 있다. 또한 본 연구의 결과는 면진장치의 커버와 열화깊이를 고려하지 않았기 때문에 원전 구조물의 수명동안 실제 면진장치의 파괴 변형율의 변화는 매우 작다고 할 수 있다.

5.4 층응답스펙트럼(Floor response spectrum, FRS)

면진 원전구조물의 시간이력응답 결과에 의하면, 온도에 따라 상부구조물의 응답변화는 크지 않았다. 구조물 내부에 위치한 기기 및 설비들은 캐비닛과 같이 고진동수를 가진 기기부터 파이프와 같이 진동수가 낮은 설비들도 있다. 면진장치의 온도 의존특성으로 인하여 면진 구조물의 진동수의 변화가 발생하면 특정 기기들은 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 원전의 설계수명에 해당하는 60년을 기준으로 FRS

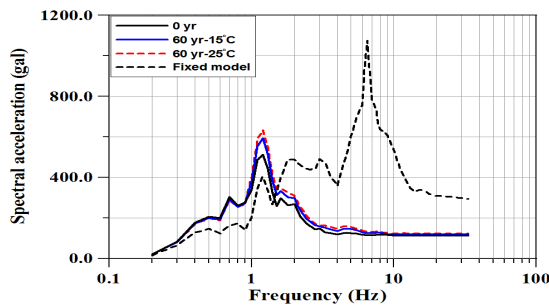


Fig. 10 FRS of auxiliary building(Sylmar, 60yr)

를 온도에 따라 작성하였다.

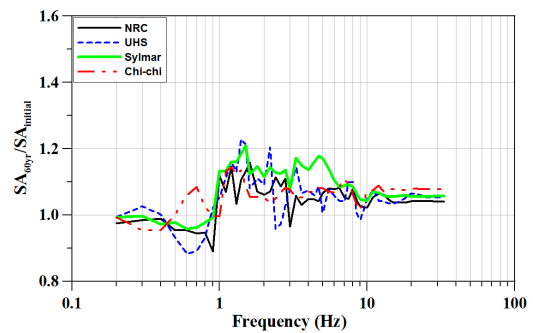
Fig. 10은 Sylmar를 입력지진으로 사용할 경우 보조건물의 주제어실에서 FRS를 나타낸다. 검은 실선은 열화전 구조물의 FRS를 나타내며, 파란 실선은 온도가 15°C인 경우 면진구조물의 수명이 60년에서 FRS를 나타내며, 붉은 점선은 온도가 25°C인 경우 동일한 수명에서 FRS를 나타낸다. 다른 온도에서 경년열화된 면진구조물의 FRS를 비면진구조물의 응답과 비교하기 위하여 비면진구조물의 FRS를 검은 점선으로 함께 표현하였다.

충응답스펙트럼 결과에 의하면 면진구조물의 수명이 동일 하더라도 온도가 높은 경우 가속도스펙트럼의 탁월진동수가 고 진동수 쪽으로 이동하였으며, 진동수에 따라 스펙트럼 가속도의 증감의 변화가 다르게 나타났다. 예제모델의 목표 진동수인 1Hz보다 큰 경우 대부분 온도가 높아짐에 따라 스펙트럼 가속도가 증가하였으며, 1Hz보다 작은 진동수에서는 반대의 현상이 나타났다. UHS와 Chi-chi 지진을 입력한 경우의 FRS도 이와 유사한 경향을 보였다.

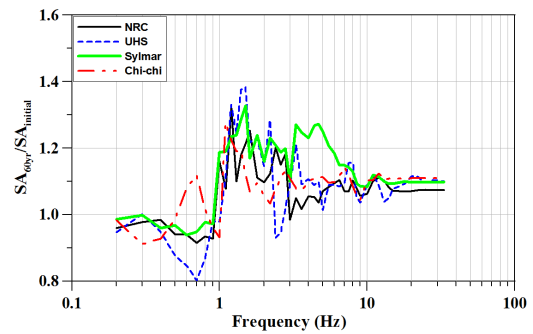
Fig. 10에 의하면 예제모델의 목표 진동수인 1Hz에서 상부구조물은 온도에 따라 영향을 받지만 10Hz이상의 고진동수영역에서는 온도에 따른 FRS의 변화가 크지 않는 것으로 나타났다. 따라서 HDRB를 사용한 면진 원전구조물의 수명이 증가하더라도 고유진동수가 10Hz 이상의 기기들은 주변 온도에 따른 지진응답의 변화는 크지 않을 것으로 예측된다.

높은 온도에서 경년열화된 구조물의 충응답스펙트럼이 낮은 온도에서 경년열화된 구조물의 충응답스펙트럼보다 높게 나타났지만 고진동수영역에서 비면진 원전구조물의 스펙트럼 가속도를 초과하지 않았다.

Fig. 11은 서로 다른 온도에서 경년열화된 면진장치의 FRS의 변화를 진동수에 따라 나타낸 것이다. 열화전 FRS와 60년 후 FRS의 비($SA_{60yr}/SA_{initial}$)를 진동수에 따라 표기한 결과, 대상구조물의 목표 진동수 근처인 1Hz~2Hz 사이에서 FRS의 증가율이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 온도가 15°C인 경우 60년 경과한 격납건물에서 스펙트럼 가속도는 열화전보다 최대 40%까지 증가하였으며, 온도



(a) 15°C



(b) 25°C

Fig. 11 Spectral acceleration ratio by temperature (auxiliary building)

가 25°C인 경우 스펙트럼 가속도는 열화전보다 최대 50%까지 증가하였다. 보조건물의 경우 온도에 따라 스펙트럼 가속도의 비는 최대 20%까지 차이가 발생하였다. 온도가 높을수록 경년열화에 의한 FRS의 변화가 크게 나타나는 이유는 높은 온도에서 면진장치의 경년열화 진행속도가 빠르기 때문이다.

6. 결 론

면진 구조물에서 면진장치의 강성은 면진시스템의 동특성을 결정하는 중요 인자다. 면진장치의 특성이 환경적/인위적 요인에 의하여 변하게 되면 지진에 의하여 상부구조물은 설계시 예측하지 못한 거동을 보일 수 있다. 고무재료는 온도 의존성이 높기 때문에 고무를 사용한 면진 구조물은 다른 온도조건에서 지진응답이 다를 수 있다. 본 연구에서는 면진 원전구조물에 면진 장치를 설치할 경우 온도에 의한 지진응답의 변화를 분석하기 위하여 두 가지 온도에서 비선형지진 해석을 수행하였다.

해석 결과에 의하면 온도에 의한 면진구조물의 지진응답의 변화는 시간이 경과할수록 증가하였다. 그러나 온도가 증가에 의한 면진구조물의 고유진동수의 변화는 약 3%로 크지 않았다. 그래서 상부구조물의 가속도응답과 변위응답은 온도에 따라 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 충응답스펙트럼에 의하면 특정 진동수 영역에서는 온도에 따른

스펙트럼 가속도의 차이가 10%~20%까지 발생하였다. 따라서 원전 구조물에 면진장치를 설치할 경우 고유진동수가 1Hz~2Hz 사이의 기기들은 설계시 면진장치의 온도에 의한 지진응답의 변화를 고려해서 기기들의 지진 여유도를 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

Choun, Y.-S., Park, J.H., Choi, I.-K. (2014) Accelerated Thermal Aging Studies on Natural Rubber in Seismic Isolation Bearings, *Korean Nuclear Society Spring Meeting 2014*, Korean Nuclear Society.

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.

Hwang, K.T., Seo, D.W. Cho, S.G. (2013) Prediction of Long Term Performance and Creep of Laminated Natural Rubber Bearings(NRB), *J. Earthquake Eng.*, 17(3), pp.117~125.

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

Japan Electric Association (2000) Technical Guidelines on Seismic Base Isolation System for Structural Safety and Design of Nuclear Power Plants, *JEAG 4614-2000*.

Japan Society of Seismic Isolation (2010) Quake-absorbing Structure-From Basis of Components to Design and Construction, ISBN: 978-4-274-20963-5.

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

Park, J.H., Choun, Y.-S., Choi, I.-K. (2013) Seismic Response of Seismically-Isolated Nuclear Power Plants considering Age-related Degradation of High Damping Rubber Bearing, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26(2), pp.131~138.

TR-103959 (1994) Methodology for Developing Seismic Fragility, EPRI.

요 지

면진장치는 지진력을 감소시키기 위하여 사용되어왔다. 원자력발전소에 면진장치가 적용된다면, 운영기간동안 구조물과 기기들은 동일한 내구성 및 성능이 확보되어야 한다. 본 연구에서는 면진된 원전의 지진에 대한 안전성을 확보하기 위하여 면진구조물의 장기거동을 해석적으로 분석하였다. 경년열화에 의한 면진장치 특성을 분석하였고, 다른 온도환경에서 면진장치의 경년열화에 의한 구조물의 지진응답을 분석하였다. 해석결과에 의하면 면진장치의 경년열화에 의하여 면진구조물의 고유진동수는 증가하였다. 그러나 면진 구조물의 최대가속도와 최대변위는 온도에 따라 크게 변하지 않았다. 면진장치의 열화에 의하여 구조물의 손상은 발생하지 않았지만 목표진동수 영역에서 스펙트럼가속도는 온도에 따라 증가하였다. 따라서 면진구조물에서 면진장치는 온도에 따른 지진응답의 증가를 고려하여 설치 및 제작해야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 고감쇠고무 적층받침, 경년열화, 온도, 지진응답