

‘96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

월성 원자로빌딩의 지진절연에 대한 연구

김 강 수, 이 정 윤
한국원자력연구소

요 약

월성 2, 3, 4호기(중수로형 원자로) 원자로빌딩에 대한 지진절연 베어링의 효과를 예측하기 위해 해석적 연구를 수행하였다. 이를 위해 월성 원자로빌딩이 lumped-mass로 모델링되고 0.2g 설계 기준지진(DBE)을 적용하여 지진절연 베어링을 사용한 모델과 사용하지 않은 모델이 비교되었다. 지진절연 베어링을 사용하지 않은 원자로빌딩의 1차 고유진동수는 5.4Hz였고, 지진절연 베어링을 사용한 것은 0.7Hz까지 낮아 졌고 원자로빌딩 높이에 따라 거의 일정한 가속도로 나타났다. 지진절연 베어링을 사용하지 않은 원자로빌딩의 최대변위는 7mm였고 지진절연 베어링을 사용한 것의 변위는 106mm였다. 그러므로, 지진절연 베어링을 사용함으로써 지진하중은 크게 감소시키는 반면 큰 변위를 수용하기 위한 부가적설계가 수반되어야한다.

1. 서론

지진절연은 지진 공학측면에서 국제적으로 현저한 진보가 있어왔다. 이것은 높은 강도의 지진이 일어나는 특별한 지역의 원자력 발전소나 다른 구조물의 지진하중을 감소하는데 사용할 수 있다. 오늘날의 원자력 발전소나 다른 안전에 중요한 구조물들은 안전 및 인허가 요구조건을 만족시키기 위해 높은 강도의 지진을 수용하도록 설계된다.

지진으로 발생된 하중을 감소함으로써 경제적인 구조 설계를 할 수 있다. 즉, 지진절연 베어링(Isolation bearing)을 사용함으로써 발전소 내에 위치한 부품 및 시스템은 지진하중은 적게 받는다. 또한 지진반응 수준의 감소 때문에 부품 및 시스템들에 대해 더욱 간단한 해석 과정을 수행할 수 있다.

지진절연 장치는 구조물의 안전율을 증가시키며 높은 정밀도로써 절연구조물의 거동을 예측할 수 있다. 또한 토양의 성질은 불확실성이 높으나 베어링 재질의 성질은 제작과정에서 시험되고 변경될 수 있으므로 지진절연 베어링은 지역이 다른 곳이라 할지라도 설계를 다시 하지 않아도 되는 표준 설계의 가능성을 증가시켜 준다.

지진절연을 한 구조물이 여러 나라에서 건설되고 있다. 현재 일본에서는 지진 절연 베어링을 사용한 건물이 18개 이상이며 계속적으로 이와 같은 건물들이 늘어나는 추세이다 [1]. 미국에서 최초의 절연 베어링을 사용한 빌딩은 1986년에 California에 있는 Foothill Community Center이며, 많은 빌딩과 다리는 지진하중을 감소하기 위해 지진 절연 베어링을 사용하였다.

지진 절연 장치를 사용한 최초의 원자력 발전소는 1982년 프랑스에 있는 Cruas이며 현재 6개의 지진절연 표준 PWR이 있다. Cruas에 4기가 있고 South Africa에 2기가 있는 실정이다[2][3].

또한 절연장치를 사용한 영국의 핵연료 제조건물이 하나 있으며 프랑스에서 핵폐기물 저장시설에 지진절연 베어링을 사용하였다[4]. 또한 지진절연베어링은 1500MW 액체금속 고속증식로(LMFB)의 개념설계에 적용되어 왔다. U.K., EPRI 및 일본의 CRIEPI는 이 기술의 진보를 위해 국제공동 연구를 수행 하여왔다. 이 연구의 일부로써 절연 시스템의 기술적 타당성이 액체 금속로(LMR) 및 유럽 고속 증식로(EFR)에 적용되어 평가되었다. 미국의 두 LMR에 대한 표준 베어링의 해석 결과 및 시험이 보고되었다[5].

최근 일본 및 한국에서 지진이 여러 곳에서 발생하는 추세이며 이러한 정황으로 미루어 보아 한국에서도 지진의 안전지대만이 아닌 것으로 인식되어가고 있다.

이 논문에서는 월성 원자력 발전소에 대해 지진 절연 베어링의 효과를 예측하기 위한 해석적 연구를 수행하였다.

2. 월성 원자력 발전소

월성 1호기 원자력 발전소는 1983년에 상업 가동한 중수로형 원자로이며 발전중 핵연료 교환기(Fuelling Machine)를 사용하여 핵연료 다발을 교환 할 수 있는 특성을 갖춘 600MW 원자로이다. 현재 월성부지에 2호기, 3호기 및 4호기가 건설 중에 있다.

중수로형 원자로는 발전소 운전 중에 핵연료를 교환하는 특성이 있다. 운전중 핵연료를 교환시 즉, 핵연료 교환기가 핵연료 채널에 물려 있을때 지진이 발생하여 핵연료 채널의 압연이음부분(Roll Joint)이 취약하여 파손되는 문제가 생길 수 있으므로 지진 절연을 하여 지진발생시 더 적은 하중이 전달되도록 하는 것이 필요하다. 월성 1, 2, 3 및 4호기는 0.2g 지반 가속도를 적용하여 설계되었다.

3. 지진절연 시스템

월성원자로 빌딩은 그림1에 보여지며 월성 2호기 원자로 빌딩의 무게는 약 712,000KN 이다. 월성 원자력 발전소는 0.2g 지반가속도인 DBE(Design Basis Earthquake)가 적용되었다. 이 지진에 대한 Ground Response Spectra는 그림2에 보여진다.

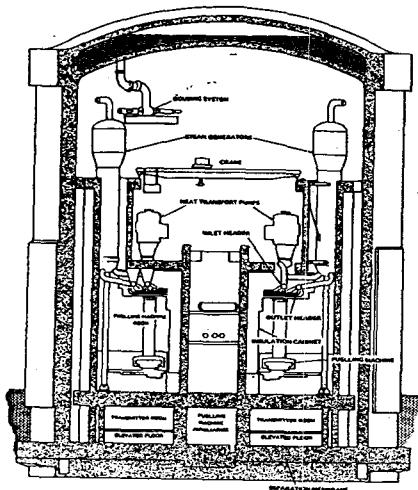


Fig.1. Wolsong Reactor Building

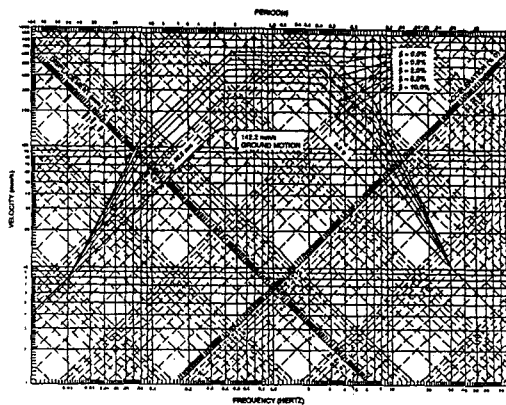


Fig.2. Ground Response Spectra for Wolsong NPP

지진절연효과를 얻기 위해 수평 진동수는 2Hz보다 더 낮추어야 함이 Spectra로 부터 명백하다. 수평방향에서 절연 구조물의 수평방향 설계진동수는 0.7Hz 아래에 있도록 하였다. 지진절연을 하기 위해 high shape factors를 가지는 많은 지진절연 베어링을 사용하였다. 수평방향의 가진력에 비해 수직방향의 것은 일반적으로 낮기 때문에 고려하지 않았다. 제안된 베어링의 모양은 그림3에 보인다[7]. 베어링은 그림4에서 처럼 위쪽 슬래브와 아래쪽 슬래브 사이에 위치한다. 이 배열은 발전소의 수명동안 이 베어링의 검사 및 교체를 위한 공간을 제공한다.

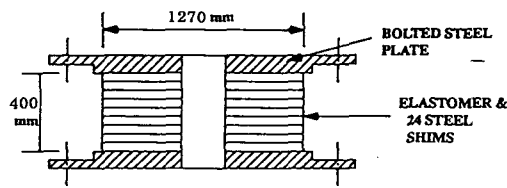


Fig.3. Isolation Bearing

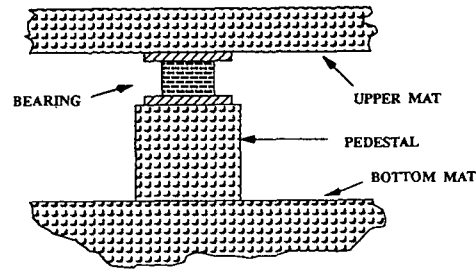


Fig.4. Bearing Arrangement at the Base

베어링 한 개의 수평 강성계수(k_h)와 수직 강성계수(k_v)는 보통 다음 식을 사용하여 구한다.

$$k_h = GAt/nt \quad (1)$$

$$k_v = EcAs/nt \quad (2)$$

여기서 G : 탄성 중합체의 전단계수

Ec : 등가 압축율

At : 베어링 단면적

As : shim 면적

n : layer의 수

t : rubber layer의 두께

베어링 하나의 수평 강성계수와 수직 강성계수는 (1)식과 (2)식을 사용하여 각각 2800KN/m와 3000000KN/m 로 계산되었다[7]. 이식은 사용한 탄성 중합체 베어링의 계수 평가는 어느 정도 오차는 있을 수 있다.

현재의 베어링 강성계수의 평가는 개념설계를 위해 적절하다고 생각되어진다. 유사한 베어링의 실험으로부터, 이 베어링의 성질은 비선형이라고 알려져 있다[6]. 이 연구의 목적을 위해 이 베어링의 특성은 선형이라고 가정한다.

4. 지진해석

그림1에서 월성 원자로 건물은 내부 콘크리트 구조물과 dome을 가진 격납용기에 둘러싸인 여러 장비 및 내부 구조물로 구성된다. 내부 구조물은 원자로와 여러 가지 부품 그리고 발전소를 운전하기 위해 필요한 시스템으로 또한 구성된다.

지진해석을 위해 원자로 건물을 그림5에서와 같이 집중질량(lumped mass)과 보요소로써 모델링할 수 있다. 이 모델에서 보요소는 건물의 구조물 부분이 강성계수로 나타내어지며 중요한 위치

에서 집중질량화 된다. 지진절연 베어링은 등가 강성계수 값을 가지는 스프링요소로써 모델링된다.

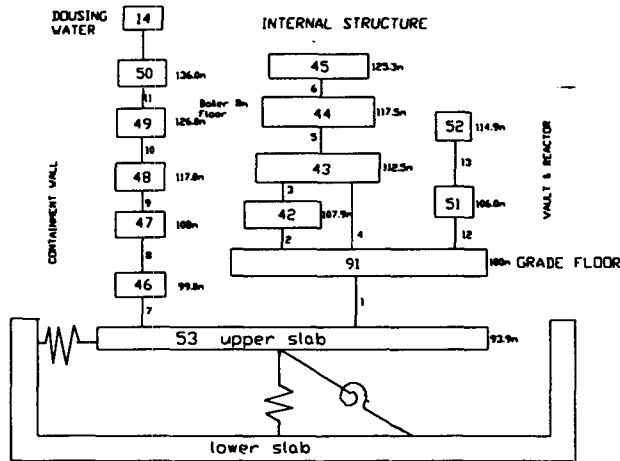


Fig.5. Reactor Building Model for Wolsong NPP

모든 베어링의 효과는 다음식에 의해 스프링요소의 계수로써 표현할 수 있다[7].

$$K_h = Nk_h \quad (3)$$

$$K_v = Nk_v \quad (4)$$

$$K_r = K_v D^2/16 \quad (5)$$

$$K_t = K_h D^2/8 \quad (6)$$

여기서,

K_h : 수평 강성 계수

K_v : 수직 강성 계수

K_r : rocking 강성 계수

K_t : torsional 강성 계수

N : 베어링의 수

D : 기초 슬래브의 직경 (47.6m)

개념 설계를 위해 316개의 베어링이 사용되었다.

지진절연 시스템의 스프링 성질은 (3)식에서 (6)식을 사용하여 계산하였다. 현재의 해석에서 토양 구조물에 대한 영향은 무시하였다. 지진절연 시스템은 토양구조물 반응진동수보다 매우 낮은 진동수를 생산하기 때문이다. 결과적으로 이 구조물의 반응은 지진절연 시스템의 강성계수에 의해 주로 영향받게 된다. 단단한 토양 조건에 대한 토양구조물 반응의 영향은 적으며 무시될 수 있다. 해석을 위해 modal time history방법과 유한 요소프로그램 STARDYNE이 사용되었으며 rubber 베어링에 적용되는 8 % 댐핑값과 그보다 높은 15 % 댐핑값을 각각 사용하였다.

5. 토의 및 결과

그림 5를 모델로 하여 해석한 결과, 절연된 구조물과 절연되지 않은 구조물의 고유진동수를 다음에 비교하였다.

mode NO.	절연되지 않은 구조물의 고유진동수	절연된 구조물의 고유진동수
1	5.4374	0.6950
2	5.4374	0.7018
3	6.6307	5.8602
4	7.0231	5.9502
5	8.5931	7.5873
6	11.5950	8.0050
7	12.1370	8.9886
8	14.5010	11.700
9	15.2870	12.520
10	17.1180	14.485

절연된 구조물의 1차 고유진동수는 절연되지 않은 구조물보다 현저하게 낮아졌다. 원자로 빌딩 높이에 따른 수평가속도의 크기는 절연된 구조물과 절연되지 않은 구조물에 대해 그림 6에 나타내었다. 절연된 구조물에 대해서 지진절연 효과가 나타났고 원자로 빌딩 높이에 따라 거의 일정한 가속도 0.21g(8% 댐핑)와 0.13g(15% 댐핑)를 보였다. 또한 원자로 빌딩의 높이에 따른 수평변위는 그림 7에 나타내었다. 절연구조물의 변위는 106mm(8% 댐핑)와 66mm(15% 댐핑)였고 절연하지 않은 구조물의 최대변위는 7mm 였다. 이와 같이 변위가 증가되는 것은 절연 장치를 사용한 구조물의 특성이기 때문이다.

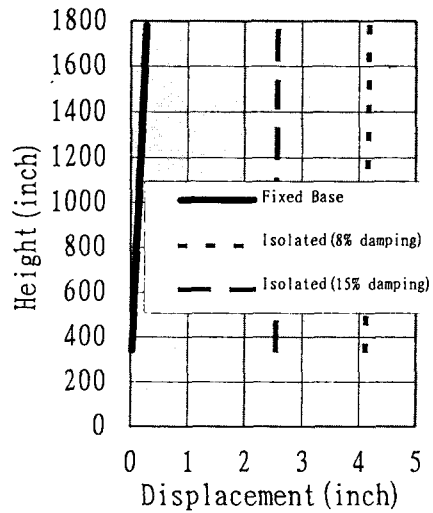
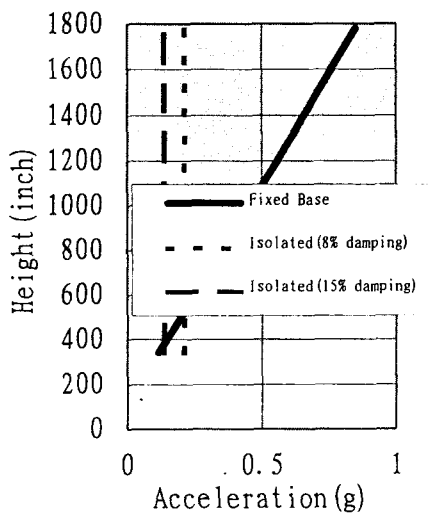


Fig.6. Response Acceleration Plot Fig.7. Response Displacement Plot

6. 결론

월성 원자력 발전소 원자로 빌딩의 지진절연 해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 월성 원자로빌딩의 지진절연장치 사용은 지진하중(seismic loads)을 감소할 수 있다.
- 지진 절연장치는 구조물의 높이에 따른 가속도를 줄일 수가 있다. 3Hz에서 33Hz사이의 진동수를 가지는 시스템 혹은 부품의 지진요건을 실질적으로 낮출 수가 있다.
- 지진절연 장치의 사용은 구조물의 변위를 크게 증가시킨다. 106mm 정도 크기의 변위는 터빈건물 및 스팀 발생기에 연결된 파이프와 같이 다른 부품과 연결된 시스템 설계에 대해 특별히 고려되어야 한다. 큰 변위를 수용하기 위한 부가적 설계의 복잡성이 수반되며 경제성 평가가 수행되어야 한다.
- 지진 절연 장치의 잇점을 극대화하기 위해서는 발전소의 모든 건물들이 같은 기초 슬래브(base mat) 위에 건설되어야 한다.
- 최근 지진 절연 기술의 현저한 진보가 국제적으로 이루어져 왔으며 한국에서도 지진 절연 베어링의 성질에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Kelly, J.M., 1988 Base Isolation in Japan 1988, Report No. UCB/EERC-88/20, Earthquake Engineering Research Centre, California Berkeley, U.S.A.
2. Jolivet, F., and Richli, M., Aseismic Foundation for Nuclear Power Stations, Transactions of the Fourth International Conference of Structural Mechanics in Reactor Technology, Paper K 9/2, August 1977.
3. Kircher, C.A., et al, Overview of Seismic Isolation and Application to Nuclear Facilities, Proceedings of the Third Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structure, Equipment and Piping, Dec 1990, Orlando, Florida.
4. Buckle, I. G., and Mayes, R.L., Seismic Isolation History, Application and Performances - A World View, Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Centre, Volume 6, Number 2, May 1990.
5. Tajirian, F. F., Kelly, J. M., and Aiken, D., Seismic Isolation for Advanced Nuclear Power Stations, Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Centre, Volume 6, number 2, May 1990.
6. Pall, A. S., Verganelakis, V. and Marsh C., Friction Dampers for Seismic Control of Concordia University Building, Proceedings of the Fifth Conference on Earthquake Engineering, July 1987, Ottawa, Canada.
7. Biswas, J. K., Study of Seismic Responses of CANDU 3 Reactor Building Using Isolator Bearings, IAEA Specialists' Meeting on Isolation Technology, San Jose, California, March, 1992.