

## 원자로구조물의 지진응답 민감도해석

Sensitivity Analysis on the Seismic Responses of the Reactor Structures

이재한<sup>1)</sup>, 김종범<sup>2)</sup>, 구경희<sup>3)</sup>, 김종인<sup>4)</sup>, 유봉<sup>5)</sup>, 최순<sup>6)</sup>  
J.H.Lee, J.B.Kim, G.H.Koo, J.I.Kim, B.Yoo, S.Choi

---

### Abstract

The seismic response of the reactor structures depends on the dynamic characteristics of the structures and the input earthquake loadings. The structural integrity of the reactor internal components can be verified by the dynamic response analyses to implement the effects of the design loadings like earthquakes. The sensitivity analyses of the dynamic characteristics for the analytical model of reactor structures considering the possible variations of the stiffnesses of the CSB upper flange and the snubber were performed to improve the dynamic characteristics of the structures against seismic loading. And to enhance the structural design margin of the reactor internal components the nonlinear time history analyses were attempted for the modified analytical model, and the results were compared between the reference model and the modified ones.

---

### 1. 서론

원자로 압력용기의 내부구조물은 원자로용기의 내부에 위치한 노심을 지지하고 또 고유기능을 유지하면서 지진과 같이 외부로부터 주어지는 하중에 견디어내도록 여러가지 복잡한 구조물들의 조합으로 이루어져 있다. 이러한 원자로 내부구조물에 작용하는 지진 하중에 의한 내부구조물의 구조응답(변위, 가속도, 전단력, 모멘트 및 응력)은 원자로 내부구조물의 동특성 및 입력지진하중에 크게 좌우된다. 특히 원자로 구조물에 작용하는 하중은 원자로 건물이 위치하는 부지 특성, 원자로 건물의 크기, 일차냉각재 계통의 배열 그리고 주요기기 및 부품의 특성에 의해 변화되므로 지진하중과 같이 주어진 외력함수들의 특성을 잘 이해하여 구조해석을 수행한 후 각 원자로 부품에 걸리는 작용력과 응력을 분석하여 규정된 설계조건에 맞도록 설계와 해석을 수행하게 된다. 이 과정에서 원자로 구조물 해석모델의 동특성을 분석하여 외력함수에 가장 민감한 부품이 무엇인지 찾아내고 이들 부품에 대한 동특성을 개선시켜 외력함수에 대한 구조물의 안전여유도를 크

---

- 1)정회원, 2), 3), 4), 5)정회원, 한국원자력연구소 기계구조개발실  
6) 한국원자력연구소 원자로기계설계실

게하여 구조적 건전성을 향상시킬 수 있다.

원자로 내부구조물과 같은 복잡한 구조물들은 내부 부품들이 서로 밀접하게 상관되어 있고 많은 비선형성을 포함하고 있기 때문에 상세 유한요소해석 등을 이용한 전체 구조물의 수학적 모델을 설정하여 동특성을 분석하기는 경제적으로나 수학적으로 매우 어렵다. 따라서 원자로 구조물의 동특성 해석과 설계하중 계산을 위하여 내부구조물의 모든 부품들을 집중질량과 선형 또는 비선형 스프링 그리고 간극 요소들로 단순화하여 수학적 해석모델을 설정하는 집중질량-스프링 해석 모형화 기법을 사용한다.

본 논문에서는 원자로 구조물에서 수평 지진하중에 민감한 원통 셸 구조물인 노심 지지원통을 선택하여 노심지지원통 상부 플랜지의 강성변화와 노심지지원통을 지지하는 스너버에서의 경계조건으로 주어지는 비선형 간극 강성변화에 따른 동특성 변화를 살펴 보았다. 또 이러한 동특성 변화에 따른 비선형 지진해석을 수행하여 주어진 지진하중에 대한 구조응답인 원자로 내부구조물 각 부품의 전단력과 모멘트를 비교 분석하였다.

## 2. 원자로 내부구조물의 해석모델과 지진하중분석

### 2.1 해석모델특성

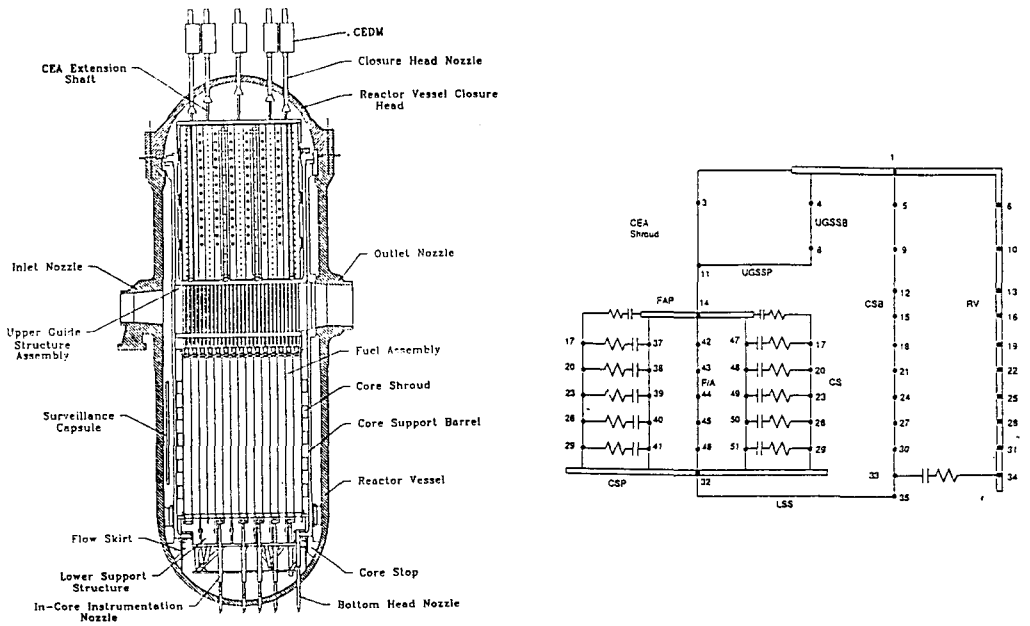
원자로 내부구조물은 그림 1(a)에서 보인 바와 같이 노심지지원통(CSB) 집합체, 하부지지구조물(LSS), 노심보호대(CS), 상부안내구조체(UGS) 등의 여러 복잡한 구조물들의 조합으로 이루어져 있다[1]. 노심지지원통은 원통형 구조물로서 상단과 하단에 플랜지가 있고, 상부 플랜지는 원자로 용기의 받침턱에 올려져서 노심의 하중을 감당하고 있고 하부 플랜지는 노심보호대와 flexure로 연결된 하부지지 집합체를 지지하고 있다. 원자로 내부구조물의 설계에서는 노심을 수직방향으로 지탱하여야 하고 또한 운전중에 수평방향으로 운동을 구속하여야 한다.

원자로 내부구조물의 동특성을 분석하기 위하여 모든 부품들을 집중질량과 스프링 및 간극 요소들로 단순화시킨 해석모델을 사용하며 그림 1(b)는 원자로 내부구조물의 수평방향 지진해석에 사용된 해석모델을 보여준다. 해석모델은 내부구조물이 보요소, 수력학적 질량, 집중질량, 감쇠계수 및 부품간의 간극을 묘사해주는 비선형 요소 등으로 구성된다[2]. 여기서 비선형요소로 나타내진 간극은 노심지지원통과 원자로용기 사이의 스너버 간극과 노심보호대 안내돌기 간극이 있다.

해석모델에 사용된 각 절점의 위치는 핵연료 집합체의 지지격자, 각 부품의 지지점, 천이점 및 외력 작용점 등을 고려하여 결정되고 또한 각각의 부품의 진동 모드를 적절하게 나타낼 수 있도록 절점의 갯수가 결정된다. 이와같이 절점의 갯수와 위치가 결정되면 보요소의 부재특성치인 관성모멘트, 단면적 및 강성계수가 계산된다[3]. 노심지지원통과 상부안내구조체의 플랜지 부위나 원자로용기와 노심지지원통의 스너버 부위와 같은 복잡한 형상을 가진 부분에 대하여서는 좀 더 자세한 해석을 위해 유한요소법 프로그램[4]을 사용하여 부재특성치를 구한다. 한편 내부구조물은 유체속에 잠겨있기 때문에 유체-구조물의 상호작용을 고려해주어야 한다. 유체-구조물의 상호작용은 구조물을 감싸고 있는 유체의 외곽 경계가 구조물의 바깥치수에 가까울 때는 비대각선 수력학적 연계항까지 포함하는 전체 수력학적 질량행렬로 고려된다[5].

### 2.2 지진하중분석

원자로 내부구조물은 지진과 같은 가상사고시에도 기기의 구조적 건전성을 유지할



(a) 원자로 내부구조물 (b) 내부구조물 해석모델

Fig. 1 원자로용기 집합체와 해석모델

수 있도록 설계되어진다. 지진해석에 사용되는 지진하중의 종류는 안전정지지진(SSE)과 운전기준지진(OBE)으로 분류될 수 있는데, 안전정지지진은 특정 발전소 부위에 잠재한 최대 지진하중을 의미하며 안전에 중요한 구조물과 계통 및 부품이 안전정지지진 발생시에도 제 기능을 발휘하여 안전하게 발전소를 정지시킬 수 있도록 해야 한다. 운전기준지진은 발전소 수명기간 동안 예상될 수 있는 지진하중을 의미하며 이 지진하중시에도 원자력 발전소는 공공에 해를 미치지 않으면서 계속적으로 운전할 수 있도록 해야 한다.

원자로 내부구조물에 작용하는 지진하중은 시간영역에서의 시간이력 곡선과 주파수 영역에서의 응답스펙트럼의 형태로 주어진다. 이들 하중은 원자로용기의 플랜지 부위와 스너버 부위에 작용하는 외력함수로 주어지며 이중 주파수 영역에서의 응답스펙트럼은 어떤 주파수에서 가장 큰 외력이 작용하는가를 알려주는 지표가 되므로 이를 잘 분석하여 내부구조물의 동특성중 외력이 작용하는 주파수 범위에 있는 내부구조물 부품은 가능한 이를 벗어나도록 설계하는 것이 설계 안전여유도를 만족할 수 있어 구조적 건전성을 유지할 수 있게 된다.

본 연구에 사용된 수평방향(X 방향 및 Z 방향) 운전기준지진 하중 중에서 더 큰 크기를 나타내는 Z 방향의 원자로용기 플랜지와 스너버 위치에서의 입력가진함수를 그림 2(a)와 그림 2(b)에 나타내었다. 원자로용기 플랜지 위치에서의 최대 가속도는 1.92초에서  $132\text{in}/\text{sec}^2$  ( $0.34g$ )이고 스너버 위치에서의 최대 가속도는 0.515초에서  $77.86\text{in}/\text{sec}^2$  ( $0.2g$ )이다. 실제로 원자로 냉각계통의 구조해석으로부터 주어지는 입력하중의 계속시간은 23.95초이나 가속도값이 18초 이후에는 작아서 무시할 수 있을 정도이므로 본 연구에서는 18초까지만 고려하였다.

한편 입력하중을 주파수 영역에서 살펴보면 원자로용기 플랜지에서의 수평 응답스펙트럼은 10Hz에서 13Hz 범위에서  $1.2g - 3.1g$ 의 가속도 분포를 갖고 있으며(그림 3(a))

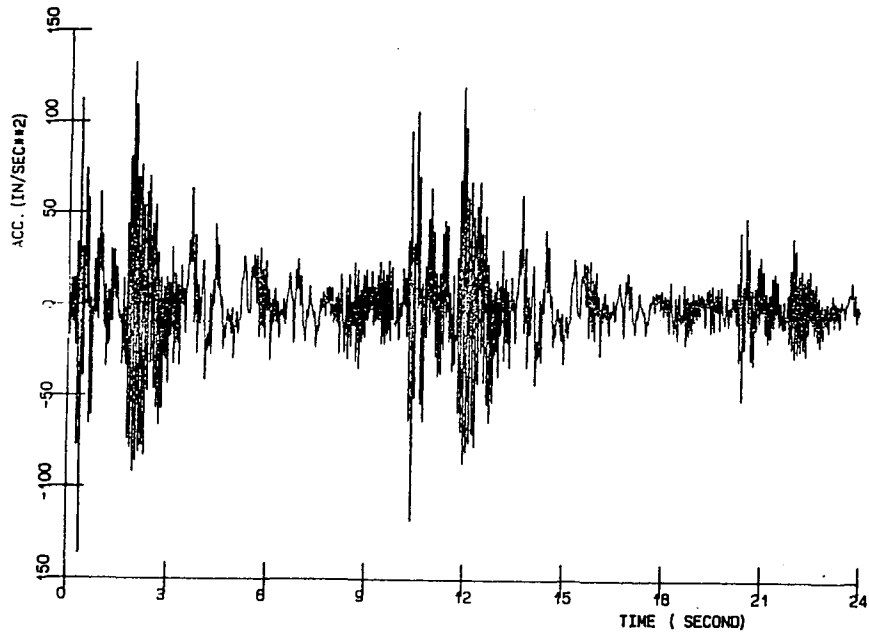


Fig. 2(a) 원자로용기 플랜지에서의 수평방향(Z) 가속도 시간이력값

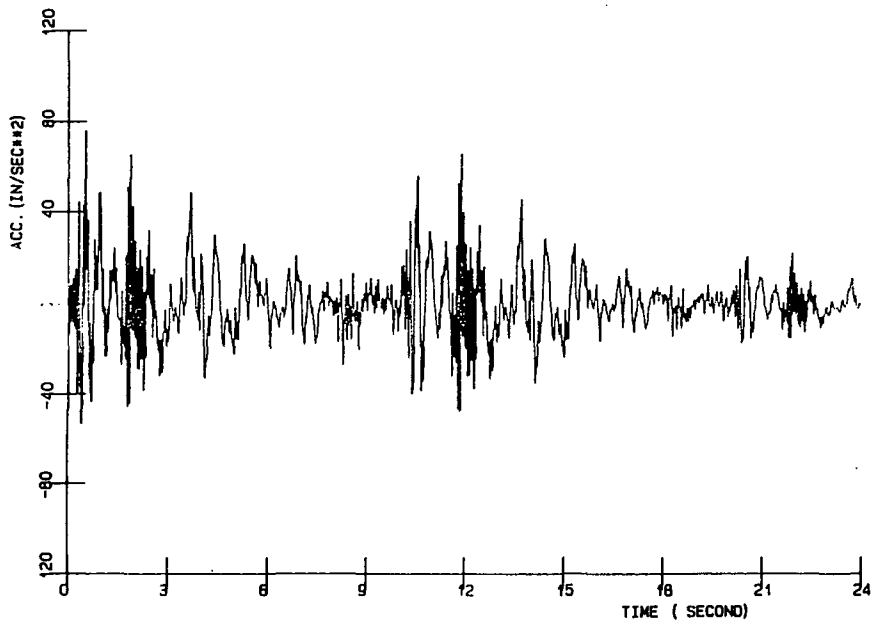


Fig. 2(b) 스팀버에서의 수평방향(Z) 가속도 시간이력값

스너버 위치에서의 수평 응답스펙트럼은 10Hz에서 15Hz 범위에서 0.6g - 1.2g의 가속도 분포를 갖고 있음(그림 3(b))을 알 수 있다.

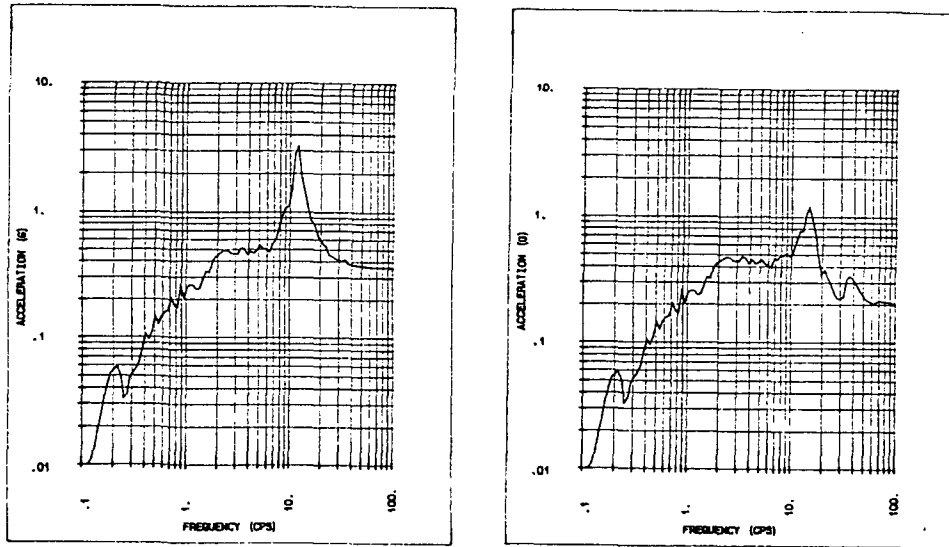
### 3. 민감도 해석모델 설정

#### 3.1 노심지지원통 상부플랜지의 강성증가

원자로 내부구조물 부품들의 1차 고유진동수는 대부분 1Hz에서 20Hz 영역에 있고 이들 중에서도 노심지지원통은 1차 고유진동수가 여러가지의 경계조건하에서 7.99Hz에서 12.39Hz 범위내에 들어있어 여러 부품 중에서도 가장 큰 외력을 받을 것임을 예상할 수 있다. 지진하중의 첨두 가속도 주파수를 벗어나도록 하기 위해서는 구조물의 전반적인 동특성 설계변경이 따라야 하지만 원자로 내부구조물이 매우 복잡하고 서로 연관되어 있어 상당히 어려운 실정이고 노심지지원통과 같은 구조물의 강성을 높이기 위해 기하학적 구조변경을 하는 것은 노심으로부터의 중성자 조사 문제와 열수력학적 문제 그리고 기능상의 문제 등으로 실제로 지진하중에 대한 동특성을 향상시키는 설계는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 야기시키지 않고 설계변경을 고려할 수 있는 부위인 노심지지원통 플랜지 부위의 여러가지 형태의 가능한 변경을 가정하여 강성도 증가에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 그림 4(a)는 노심의 대부분의 하중을 받고있는 노심지지원통의 상부 플랜지(그림 1(b)에서 절점 1)를 나타내며 해석에 사용된 설계변경으로서 천이영역에 덧살을 붙이고 또한 원자로용기의 받침턱 부위와 접하는 상부 플랜지의 면적을 늘려 보았다.

#### 3.2 노심지지원통 스너버의 강성증가

원자로용기 스너버의 역할은 내부구조물의 수평방향 변위를 구속하며 이는 정상운전시 원주방향의 여섯 위치에서 원자로용기 벽과 일정한 간극을 갖고 있는 강 구조물이



(a) 원자로용기 플랜지 스펙트럼      (b) 원자로용기 스너버 스펙트럼

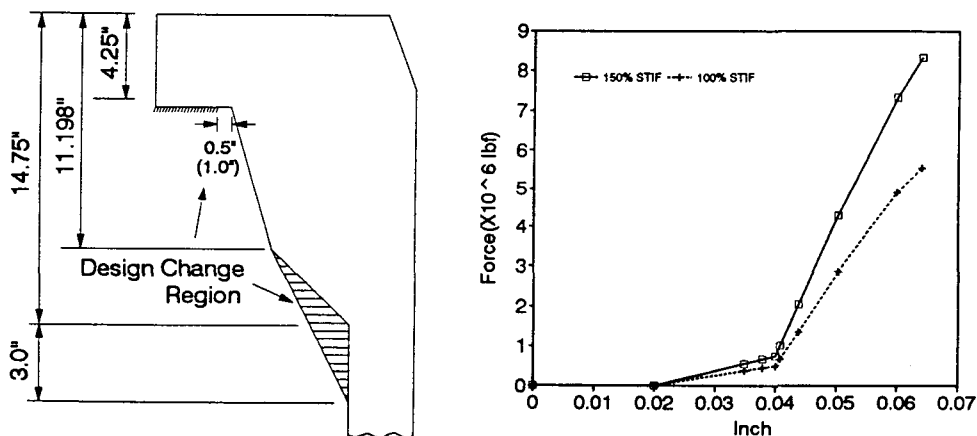
Fig. 3 수평방향(Z) 가속도 응답스펙트럼

다. 이 구조물은 지진하중이 가해져 원자로용기와 노심지지원통의 상대운동이 이들 사이의 간극과 같게 되면 두 절점 사이(그림 1(b)에서 절점 33과 34)의 수평방향 강성계수가 작용하게 되는 비선형 구조물로서 원자로 내부구조물의 고유진동수나 모드형상에 많은 영향을 주게된다. 스너버 강성에 의한 영향을 가장 크게 받는 부품은 노심지지원통으로서 스너버가 원자로용기와 접촉하지 않을 경우에는 노심지지원통에 대한 하부지지점이 없으므로 자유 경계조건을 갖게 되지만, 접촉할 경우에는 핀 경계조건을 가져 이의 접촉조건시 강성값에 따라 고유진동수와 모드형상이 다르게 나타난다. 스너버와 원자로용기 사이의 강성은 이와같이 비선형이고 정확히 알 수 없으므로 일단 정적인 하중변위 관계에서 강성값을 계산하여 사용하고 그림 4(b)에서 보인 바와 같이 본 연구에서는 스너버의 강성값을 50% 증가시켜 민감도 분석을 수행하였다.

#### 4. 민감도 해석결과

상기의 강성변화에 따른 고유진동수의 변화는 표 1과 같다. 경계조건으로 안내들기 간극과 스너버 간극을 자유경계로 하였을 경우 노심지지원통 상부 플랜지의 강성을 증가시키면 노심지지원통의 1차 고유진동수가 7.99Hz에서 8.58Hz로 바뀌고 그 외의 고차 고유진동수는 변화가 없었다. 그리고 스너버의 강성을 증가시킨 경우는 자유경계 조건을 사용한 경우의 8.44Hz인 1차 모드(안내들기 간극을 핀 경계조건으로 하고 스너버 간극을 자유 경계조건으로 한 경우는 없어지고 새로운 급힘 형태 1차 모드의 고유진동수가 나타나는데 이는 강성을 증가시키면 12.36Hz에서 12.38Hz로 바뀌어 미소한 변화를 나타낸다. 또한 고차 고유진동수나 다른 부품의 고유진동수에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

원자로 내부구조물 해석모델(그림 1(b))을 사용하여 비선형 시간이력해석 코드[6]를 써서 수행한 지진응답 민감도 해석결과와 다음과 같다. 노심지지원통 상부 플랜지의 하단면과 원자로용기 받침턱 부위와 접촉하지 않는 길이를 그림 4(a)에서와 같이 1인치에서 0.5인치로 줄여서 접촉면적을 늘리고 상부 플랜지 아래의 천이영역을 두겹게 함으로써 강성의 증가를 얻을 수 있으나, 이는 천이영역을 보강함으로써 상부 플랜지와 원자로용기와의 접합부위의 응력증가를 유발할 수 있으므로 상세한 응력해석이 요구된다.



(a) 상부플랜지의 설계변경

(b) 스너버 강성 50% 증가도

Fig. 4 노심지지원통 상부플랜지와 스너버의 강성증대모델

Table 1. 강성변화에 따른 고유진동수의 변화

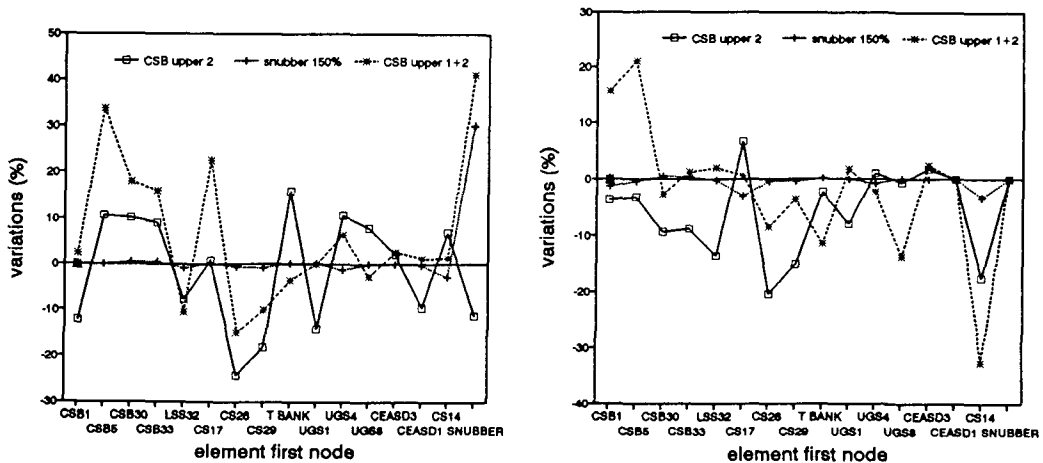
	1차 고유진동수 (변경전)	1차 고유진동수 (변경후)	고차고유진동수
상부 플랜지 강성증가 경우	7.99 Hz	8.58 Hz	변화없음
스너버 강성증가 경우	12.36 Hz	12.38 Hz	변화없음

노심지지원통 상부 플랜지의 강성을 높였을 때 전단력의 경우 그림 5(a)에서 나타난 바와 같이 상단에서 전단력이 커짐을 알 수 있고, 모멘트의 경우도 그림 5(b)에서 보듯이 노심지지원통의 상단에서 모멘트값이 커짐을 알 수 있다. 그러나 노심지지원통 상단을 제외한 내부구조물의 다른 부품에서의 모멘트값은 대체로 줄어들고 있음을 볼 수 있고, 이는 구조적 설계여유도를 높일 수 있는 요소라고 여겨진다.

스너버의 비선형 강성값을 수평방향에 대하여 50% 증가시킨 경우에 대한 구조응답 해석결과는 그림 5(a)와 그림 5(b)에 나타나 있는데 원자로 내부구조물의 각 부품에 대한 전단력과 모멘트값의 변화가 그다지 크지 않음을 보이고 있다. 응답스펙트럼 결과는 스너버 강성을 증가시켰을 때 주요 부품에 발생하는 가속도값이 거의 변화를 나타내지 않았고, 노심지지원통의 강성을 증가시킨 경우에는 가속도값이 핵연료지지판(FAP)에서는 조금 감소하고 하부지지구조물(LSS)에서는 약간 증가함을 보여주었다. 그림 6(a)와 그림 6(b)는 상부 플랜지의 강성을 변경하기 전과 변경 후의 핵연료지지판의 가속도 응답 스펙트럼을 보여주고 있다.

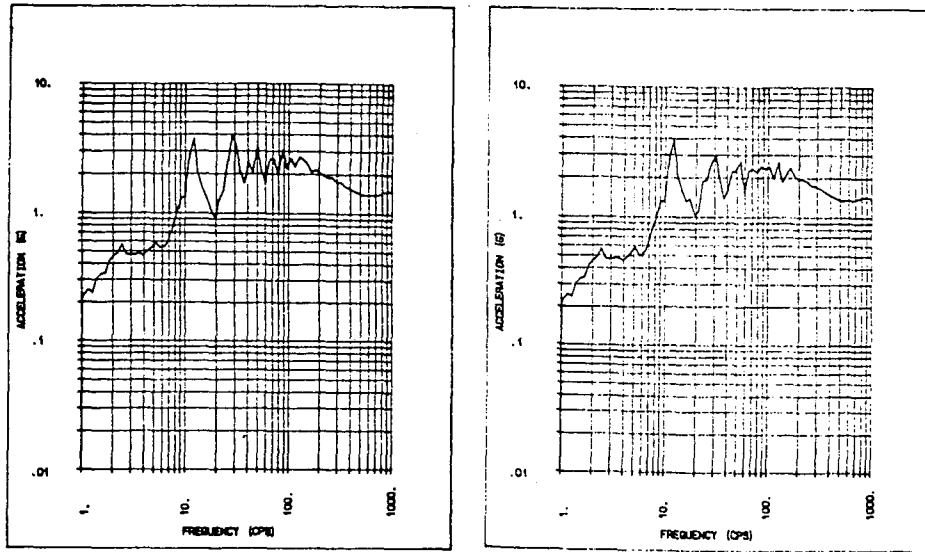
5. 결론

노심지지원통 상부 플랜지의 하단면과 원자로용기 받침턱 부위의 접촉면을 늘리고 천이영역을 두껍게 보강한 경우 자유경계 조건에서의 고유진동수는 7.99Hz에서 8.58Hz로



(a) 최대 전단력 변화(Z 방향) (b) 최대 모멘트 변화(Z 방향)

Fig. 5 강성증가에 따른 수평방향(Z) 전단력과 모멘트의 변화



(a) 상부플랜지 강성증가전

(b) 상부플랜지 강성증가후

Fig. 6 핵연료지지판의 가속도 응답스펙트럼 비교

증가하였으며, 비선형 지진해석 결과인 지진응답에서 플랜지 상단에서의 전단력이 커졌으나 대부분의 주요 부품의 모멘트값은 줄어들었다. 그리고 스너버 강성값을 50% 증가시킨 경우 고유진동수는 큰 변화가 없었으며, 또한 지진응답에서도 대부분의 부품에서 전단력과 모멘트값의 변화는 거의 없음을 알 수 있었다.

이상의 연구에서 얻어진 지진응답 민감도 해석기법은 원자로 내부구조물의 다른 부품에도 적용될 수 있으며, 이러한 해석기법을 적용하여 필요시 원자로 내부구조물의 동특성을 향상시켜 설계여유도를 높이고 각 부품의 설계변경에 능동적으로 대처해 나갈 수 있을 것이다. 앞으로 비선형 간극의 선형화기법, 노심지지원통의 상하부 플랜지의 설계변경에 대한 상세 국부 응력해석 및 상세 유한요소해석과의 비교분석에 관한 연구가 더 요구된다.

#### 참고문헌

1. K-SSAR: Korean Standard Nuclear Power Plant Safety Analysis Report, Korea Electric Power Corporation (1991)
2. 정명조, "원자로 내부구조물의 지진해석 - 표준설계절차," 한국원자력연구소, SDP90-ME-002 Rev.00, KAERI (1990)
4. G.P.DeSalvo, J.A.Swanson, ANSYS-Engineering Analysis System, SASI, Houston (1983)
3. 유봉 외., "원자로 내부구조물 축소해석모델의 동특성연구," KAERI/RR-1181/92 (1992)
5. 정명조, 박근배, "원자로 내부구조물의 지진해석에 관한 연구," 원자력학회지, 25권 1호, pp28-36 (1993)
6. V.K.Gabrielson, "SHOCK, A Computer Code for Solving Lumped Mass Dynamic Systems," SCL-DR-65-34 (1966)