

지진하중에 의한 제어봉구동장치 내진지지판의 비선형 충격해석

강태교[†]·김태형*·이대희*·최택상*

Nonlinear Impact Analysis of CEDM Seismic Cap Plates for Seismic Loading

Tae Kyo Kang, Tae Hyung Kim, Dae Hee Lee, Taek Sang Choi

Key Words: CEDM(제어봉구동장치), IHA(일체형 원자로상부구조물), Impact Analysis(충격해석)

Abstract

The nonlinear impacts between the Control Element Drive Mechanisms (CEDMs) seismic cap plates installed on the CEDM top of a pressurized water reactor are studied with the dynamically reduced models of the CEDM and Integrated Head Assembly (IHA). It is important to develop nonlinear models considering the gap effects between the plates. In order to simulate impacts, reduced models for the primary structures, such as CEDM and IHA, are developed through simplifying detailed models, and the nonlinear structural analysis is performed under seismic loading conditions. The responses are examined in various gap sizes depending on the reactor operating conditions.

1. 서 론

일체형 원자로상부구조물(Fig.1)은 미국 EPRI URD 및 한국 KURD의 Integrated Head Package 설계 개념에 따라, 원자로 헤드 덮개 인양, 제어봉구동장치의 냉각, 상부 케이블지지, 비산물 방호 그리고 지진으로 인한 횡하중을 재장전 수조벽에 전달하는 기능을 수행한다. 일체형 원자로상부구조물은 제어봉구동장치 냉각 팬과 각종 케이블 등이 상단에 설치되고 냉각공기 유로를 위한 공간 등이 설계에 반영됨에 따라, 한국 표준형 원전의 원자로인양장치와 비교하여 전체적인 크기와 중량이 증가하였다. 따라서 일체형 원자로상부구조물과 제어봉구동장치는 상단에 크게 발생하던 동적 응답을 감소시키고 횡방향 응답을

재장전수조벽에 전달할 목적으로 내진지지계통의 필요성이 제기되었다.

제어봉구동장치 내진지지판(CEDM seismic cap plate, 이하 내진지지판)은 일체형 원자로상부구조물의 내진지지계통의 일부로서 일정한 간극을 가지고 각각의 제어봉구동장치 상단에 설치된다. 지진 발생시 제어봉구동장치와 일체형 원자로상부구조물이 내진지지판 간극 범위 이상의 동적 거동이 발생하게 되면 상호 충돌하면서 내진지지계통으로 하중을 전달하게 된다(Fig.2). 내진지지판의 과도한 충격하중은 압력경계부품인 제어봉구동장치에 영향을 줄 수 있으므로 간극의 영향을 고려한 내진지지판의 비선형 충격해석을 수행하여 정확한 충격하중을 계산하여야 한다. 또한, 원자로 상부에는 73개의 제어봉구동장치가 설치되고 각 제어봉구동장치에 한 개의 내진지지판이 설치되는데, 한 개의 내진지지판에는 네 개의 접촉면이 있고 하중 전달 경로상에 있는 제어봉구동장치, 일체형 원자로상부구조물 그리고 접촉조건 등을 모두 모델링 할 경우, 모델이 매우 복잡해져 해석 수행에 문제가 발생할 수 있다.

† 한국전력기술(주) 원자로설계개발단

E-mail : skylove@kopec.co.kr

TEL : (042)868-4125 FAX : (042)863-4862

* 한국전력기술(주) 원자로설계개발단

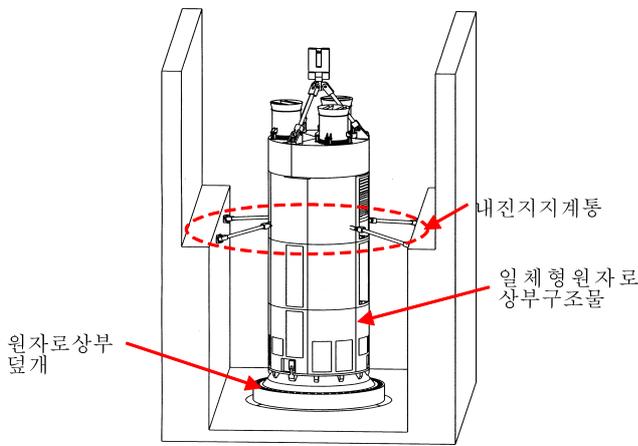


Fig. 1 Integrated Head Assembly(IHA)

또한, 지진하중은 시간이력형태의 하중으로 매우 많은 하중 단계(load step)에 대한 해석이 요구됨에 따라 해석 모델의 단순화는 필수적이며 이를 위하여, 본 논문에서는 내진지지판의 비선형 충격 거동을 모사할 수 있는 단순한 형태의 모델을 개발하였다.

모델 단순화로서 해석 시간 및 해의 수렴성을 고려하여 하중 경로상의 제어봉구동장치, 내진지지판 그리고 일체형 원자로상부구조물의 상세모델에 대한 축소모델을 개발하였다. 유한요소해석에서 축소모델은 상세모델에 비하여 일정한 특성은 유지하면서 자유도 수와 요소 수를 감소시켜 단순하게 모델링하는 방법이다^[1]. 본 논문에서는 전체적으로 하중 경로 상의 주요 구조물인 제어봉구동장치와 일체형 원자로상부구조물 모델링에 대해서 이러한 방법을 적용하였다. 이는 충격해석 모델을 단순화하여 해석시간을 단축하고 해의 수렴성을 확보하기 위한 것으로 상세모델의 모드 참여도가 큰 주요 모드 동특성과 축소모델의 동특성이 일치하도록 개발하였다.

또한, 충격 거동을 간극명령어로 구현하였다. 접촉요소는 점, 선, 면접촉 등의 다양한 조건을 모델링 할 수 있어 비선형 해석에서 간극과 접촉조건을 구현하는데 많이 사용된다^[2]. 그러나, 접촉요소를 내진지지판의 모든 간극에 적용할 경우, 모델이 복잡해지고 전체 자유도를 고려한 해석을 수행해야 만 하중을 생산할 수 있다. 반면 간극명령어는 절점간의 상대변위와 강성을 고려하여 비선형 거동을 나타내는 명령어로 다양한 접촉조건을 구현할 수 있고, 일부의 자유도만

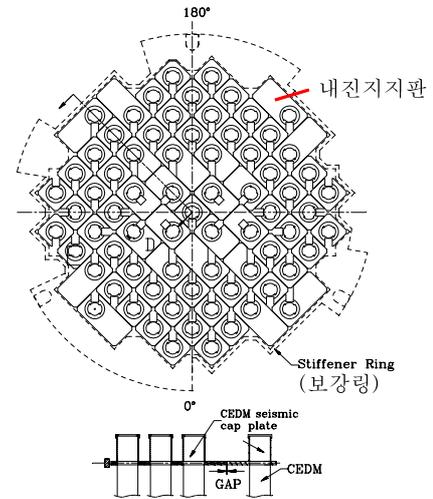


Fig. 2 CEDM Seismic Cap Plates

고려하는 축소 시간이력해석방법을 적용해서 충격하중을 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이를 사용한 내진지지판의 간극 모델링 입력 절차를 개발하였다. 제어봉구동장치의 거동에 따라 내진지지판의 거동은 수평, 수직, 회전등의 다양한 거동이 발생할 수 있으나 본 해석에서는 내진지지판 접촉면에 수직인 방향, 즉 주축의 45° 대각선 방향, 으로부터 충격하중을 전달하는 것으로 가정하였다. 모델 개발 후, 지진하중을 입력가진으로 시간이력해석을 수행하고 계산된 충격하중을 내진지지판의 유한 요소 모델에 가하여 응력 크기와 분포를 확인하고 설계 규정에 따른 적합성 여부를 확인하였다. 모델링과 해석은 ANSYS 코드를 사용하였다.

2. 해석 모델 개발

2.1 내진지지판 모델링 및 접촉 강성

내진지지판은 한쪽 모서리 부분이 개방된 형태의 사각형 판 부분과 원통 실린더 형상의 부품이 일체형으로 조립된 형상(Fig.3)이다. 각각의 제어봉구동장치 상단에 일정한 간극으로 분리되어 설치된 형태의 구조가 복잡하고 다수의 간극이 존재한다. 따라서, 해석 모델에서는 내진지지판의 형상을 직접 모델링하지 않고 간극명령어를 활용하여 충격거동을 구현할 수 있도록 모델링 하였다. 간극명령어는 그 사용 방법에 따라, 순인장

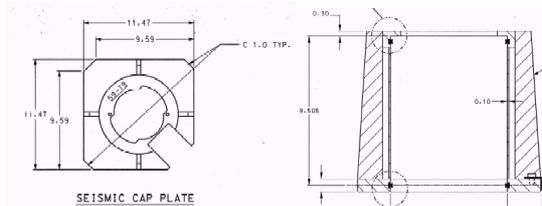


Fig. 3 Geometry of Cap Plate

(tension only), 순압축(compression only)과 동시 인장 압축 스프링(tension and compression)과 같은 효과를 구현할 수 있다. 일정 간극 이상의 상대변위가 발생하면 그 때부터 강성이 작동하여 충격하중을 계산하는 방법으로 하나의 내진지지판은 주위의 내진지지판들에 의해 압축 하중만 받게 되므로 순압축 상태를 간극명령어로 모델링하였다. 간극명령어는 절점이 정의된 좌표계 상의 위치와 시작절점과 끝절점의 정의 순서에 따라 간극 접촉 조건이 달라지게 된다. 내진지지판은 압축하중을 좌, 우측 내진지지판에 의해 교대로 하중을 전달받게 되므로 절점에 대한 정의 순서를 고려하여 간극명령어(GP)를 이용하여 다음과 같이 내진지지판의 간극을 정의하였다.

GP, 1, 2, Fx, K_{GP}, Gap

GP, 2, 1, Fx, K_{GP}, Gap

여기서, F_x는 하중방향, K_{GP}는 강성, Gap는 간극

절점의 위치나 간극의 크기는 설계 조건과 모델에서 결정할 수 있는 값이다. 간극명령어의 입력으로 사용되는 내진지지판의 접촉강성(K_{GP})은 내진지지판의 형상을 고려하여 계산하기 위해 유한요소모델을 개발하였다. 이 모델에 단위하중을 가하고 하중 작용점 위치의 절점들의 변위를 이용하여 접촉 강성을 계산하였다. Fig.3에 보여진 바와 같이 내진지지판은 한 쪽이 개방된 형태로써 단위하중을 가할 때 개방된 쪽이 더 많은 변형을 갖게 되는데 하중 작용면의 변위는 동일하다는 가정하에 이를 평균한 값을 충격강성으로 사용하였다.

Table 1 Contact Stiffness

충격구조물	접촉강성 (단위 : N/mm)
내진지지판 상호간	3206
내진지지판과 보강링	6447

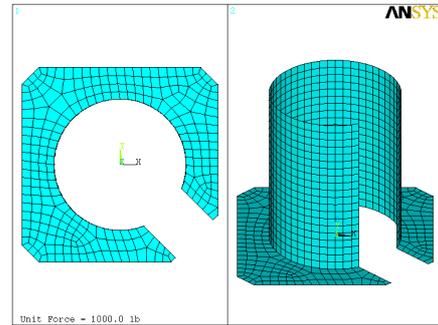


Fig. 4 F.E Model of Cap Plate

이 모델은 추후 계산된 충격하중을 입력으로 응력해석을 수행할 때 사용되었다. 내진지지판 상호간, 내진지지판과 일체형 원자로상부구조물의 보강링간에 접촉 강성은 Table 1, 유한 요소 모델은 Fig.4 와 같다.

2.2 제어봉구동장치 축소모델

원자로 상부 덮개에는 73개의 제어봉구동장치가 설치되어 있고 이에 해당하는 각각의 상세 모델은 요소 수와 자유도 수가 대략 80개, 150개이다. 이를 단순화하여 집중 질량 요소 수가 3개인 집중질량-보요소 제어봉구동장치 축소모델을 모우드 참여도가 큰 주요 모우드인 상세모델의 최초 2차 모우드까지 동특성이 일치하도록 개발하였다(Fig.5). 모든 제어봉구동장치는 노즐의 길이만 차이가 있고 이외 부분은 구조와 치수가 동일하다. 따라서, 원자로 상부 덮개의 중심으로부터 반경 방향 길이가 동일한 몇 개의 그룹으로 나눌 수 있다.

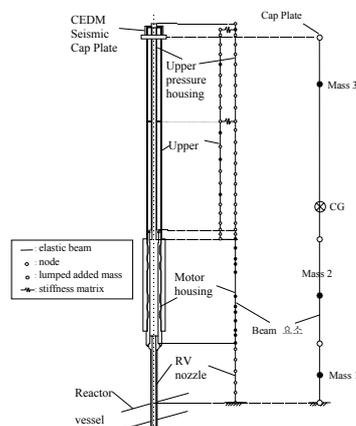


Fig. 5 Reduced and Detailed Model for CEDM

Table 2 Natural Frequencies of CEDMs

그룹 번호	제어봉 구동장치 번호	상세모델		축소모델	
		1st(Hz)	2nd(Hz)	1st(Hz)	2nd(Hz)
1	1	3.32	16.41	3.31	16.57
2	2~5	3.30	16.20	3.30	16.69
5	18~21	3.13	14.55	3.12	14.66
7	30~33	2.99	13.24	2.99	13.35
11	54~65	2.79	11.73	2.76	11.78

이 때, 동일 그룹내의 제어봉구동장치들은 동일한 동특성을 가진다. 내진지지판의 충격하중은 총합 간극의 크기가 크고 가장 많은 수의 제어봉구동장치가 상호작용할 때 최대일 것으로 예상된다. 따라서, 원자로 중심을 통과하는 대각선 방향의 제어봉구동장치 그룹인 1, 2, 5, 7, 11번 그룹에 대한 축소모델을 개발하였다. 그룹별 제어봉구동장치 상세모델 및 축소모델의 동특성은 Table 2와 같다.

2.3 일체형 원자로상부구조물 축소모델

일체형 원자로상부구조물은 다양한 기능을 하도록 설계되어 상세모델 또한 매우 복잡한 형태이다. 따라서, 비선형 충격해석 모델에 사용하는 축소모델을 3개의 집중 질량 요소를 가지는 보요소 모델로 개발하였다. 상세모델에서 보요소로 모델링된 내진지지대(Seismic Restraint)를 축소모델에서는 강성행렬요소^[2]로 모델링하였다. 일체형 원자로상부구조물 축소모델의 동특성은 상세모델의 주요 모드인 최초 2차 모드까지 일치시켰으며 모드 해석결과는 Table 3과 같다.

2.4 충격해석 모델

입력가진에 의해 제어봉구동장치와 일체형 원자로상부구조물에 발생한 거동은 내진지지판의

Table 3 Natural Frequencies of IHA

Mode No.	상세모델 (고유진동수, Hz)	축소모델 (고유진동수, Hz)	방향
1	4.69	4.63	수평방향
2	4.87	4.90	1차
3	9.32	10.0	수평방향
4	10.3	10.3	2차

상호 작용에 영향을 준다. 따라서 충격해석모델은 앞에서 개발한 제어봉구동장치와 일체형 원자로상부구조물 축소모델 그리고 내진지지판을 간극명령어로 구현한 세 부분을 포함하게 된다. 입력가진은 주축(0°-180°, 90°-270°) 방향으로 작용하지만 하중 전달은 내진지지판의 배열과 형상에 따라 주축과 45° 방향인 접촉면과 수직한 대각선 방향으로 작용한다. 대각선 방향으로 배치된 제어봉구동장치들 중에서 한 개의 대각선 열에 위치한 제어봉구동장치의 수가 많고 간극의 수가 많을수록 구조물들의 상호 작용으로 인해 최대응답이 발생할 것으로 예상되므로 좌표축에 45° 방향 대각선 열에 위치한 9개의 제어봉구동장치들을 충격해석모델링에 포함시켰다. Fig.6은 충격해석 모델에 포함되어 있는 제어봉구동장치와 일체형 원자로상부구조물 축소모델의 배열이다.

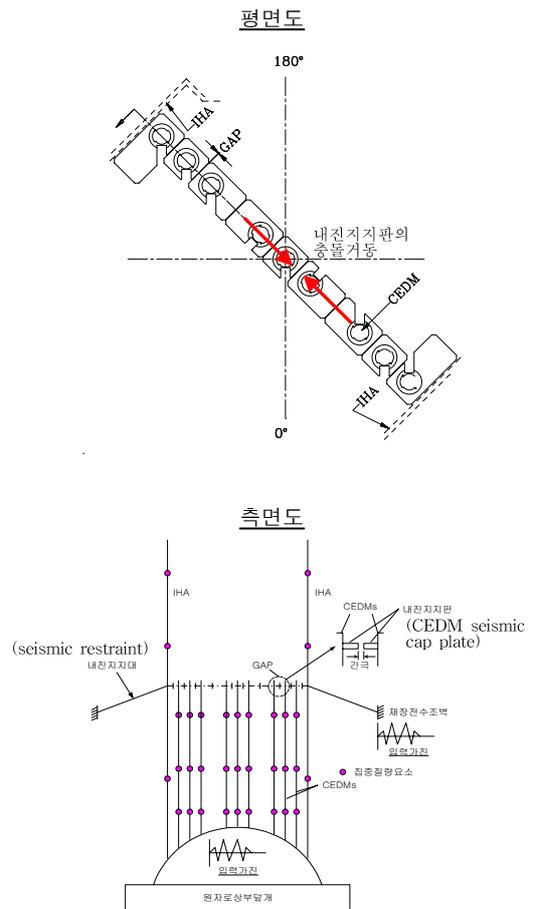


Fig. 6 Impact Analysis Model

3. 충격해석

3.1 해석방법

충격해석 모델은 원자로 상부 덮개와 재장전 수조벽의 내진지지대로 지지된다. 따라서, 이 두 위치를 서로 다른 변위 시간이력 지진하중으로 가진한 시간이력해석을 수행하였다. 입력가진은 최대가속도가 0.8G(8.74m/sec.²) 인 안정정지지진 (Safe Shutdown Earthquake, SSE) 변위 시간이력하중을 적용하였고 적분시간 간격으로 0.0001초를 적용하였다. 또한, 본 구조물을 볼트 연결 철구조물로 가정하여 구조 감쇠비를 7%로 결정하였다^[3]. 해석에서는 비례 감쇠인 α , β 감쇠비를 계산하여 적용하였다. 구조물과 지진하중의 특성상 33Hz 이상의 성분은 ZPA 구간으로 강제 거동을 할 것으로 예상되므로 비례감쇠를 계산하기 위한 관심 주파수 범위를 2.0Hz부터 50Hz까지로 한정하였다. 원자로 장상운전중 운전조건에 따라 온도 및 압력의 영향으로 상부 덮개가 팽창하고 따라서 제어봉구동장치 상단에 설치되는 내진지지판들은 초기 설치위치에서 이동할 수 있다. 그러므로, 정상운전 중 실제 간극은 설계 간극(2.54mm)보다 작거나 크게 변경될 수 있다. 원자로 상부덮개 팽창에 따른 내진지지판 간극 크기의 변화를 고려하여 접촉 상태인 간극 크기가 0.0mm부터 최대 5.08 mm까지 변화시키면서 다양한 간극크기에서 충격하중을 계산하였다.

3.2 해석 결과

간극의 변화에 따라 각각의 내진지지판 상호간 그리고 내진지지판과 일체형 상부구조물의 보강링 상호간에 작용하는 충격하중은 Table 4와 같다. Fig.6(a)와 (b)는 개발된 모델의 시간에 따른 하중 변화를 보여주고 있는데, 초기에는 분리되어 있던 간극이 가진에 따라 간헐적으로 부딪히게 되는 것을 알 수 있다. Fig.6(c)와 (d)는 시간에 따른 절점의 변위로써 충격하중이 크게 발생하는 시간대에 변위도 크게 발생함을 알 수 있다. 해석 결과에 따라 내진지지판 상호간 최대 충격하중은 간극이 0.0mm일때 11,098N이고, 내진지지판과 일체형 원자로 상부구조물 보강링의 최대 충격하중은 간극이 2.54mm일때 1,4511N이다. 또한

Table 4 Impact Loads vs. Gap Sizes

위치 (1)	간극(mm), 충격하중(N)						
	0.000	0.0254	0.127	0.254	1.270	2.54	5.08
1	-12482	-12785	-10328	-10502	-10382	-14511	-8557
2	-11098	-11161	-9252	-8571	-6194	-6795	-4931
3	-8651	-8758	-7716	-6751	-6012	-7360	-8660
4	-5175	-5291	-5126	-4552	-6359	-6497	-3632
5	-1861	-1962	-2437	-3411	-5465	-5273	-659
6	-1861	-1962	-2437	-3609	-4646	-4624	-1384
7	-5175	-5291	-5126	-4721	-6275	-5509	-3636
8	-8651	-8758	-7716	-7027	-4664	-7236	-5362
9	-11098	-11161	-9252	-8735	-5847	-6248	-5976
10	-12482	-12785	-10328	-10542	-9212	-12571	-4940

Notes

- (1) : 1, 10 제외한 내진지지판-일체형 상부구조물 충격하중이며 2 ~ 9는 내진지지판 상호간 충격하중임. 1부터 5로(10에서 6으로) 갈수록 원자로 중심부에 위치한 내진지지판임.
- (2) : 충격하중은 압축력으로 (-) 부호가 포함됨.

원자로 중앙을 기준으로 바깥쪽으로 갈수록 내진지지판에 작용하는 충격하중이 증가함을 알 수 있다. 전체적으로 간극이 2.54mm미만일때는 충격하중이 일정한 수준을 유지하지만 5.08mm간극에서는 충격하중이 감소하는 경향을 보인다. 이러한 결과는 중심부에 있는 제어봉구동장치들의 동특성이 유사하여 다소 변위가 크게 발생하지만 같은 방향으로 거동함을 의미하며 중심부에서 떨어진 제어봉구동장치들은 서로 충격의 방향으로 거동하여 변위는 작지만 간섭양이 크게 발생하기 때문이다. 설계 간극인 2.54mm에서 내진지지판과 일체형 상부구조물의 최대 충격하중을 정적 작용

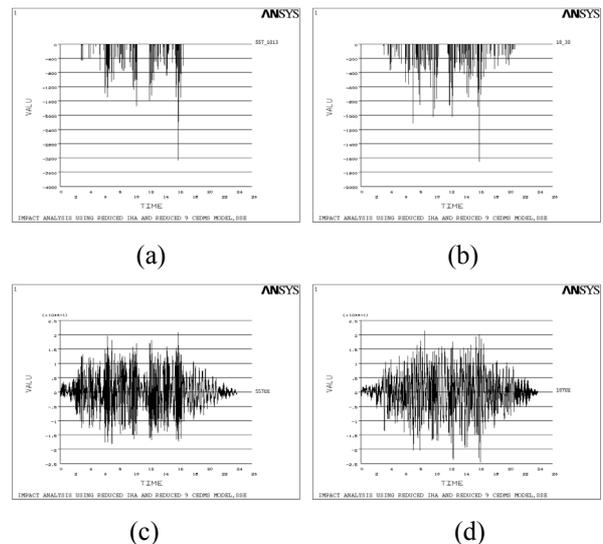


Fig. 6 Gap = 2.54mm, Impact Loads and Displacements (a)(c) for IHA & CEDM Contact, (b)(d) for CEDM & CEDM Contact

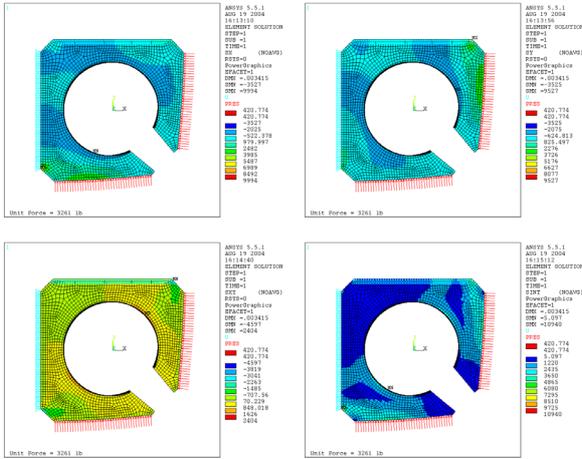


Fig. 7 Plane Stresses and Stress Intensities

하중으로 가정하여 내진지지판의 응력해석을 수행하였다. 충격해석 모델에서 내진지지판은 대각선의 한 열만 모델링 되었으므로 2개의 접촉면을 고려한 충격하중에 대해서만 해석되었다. 그러나, 하나의 내진지지판에는 인접한 4개의 내진지지판들과 4개의 접촉면에서 하중을 전달받게 되므로 응력해석에서는 최대 충격 하중을 서로 수직인 2개의 접촉면에 작용시켰다. 응력해석 결과 평면 응력은 최대 68.2MPa이고, 전단응력은 16.5Mpa 그리고 최대 응력강도는 75.1Mpa이다. 이는 관련 설계 규정^[4]에 의한 지진하중 조건에서 구조물의 허용응력(206Mpa)보다 작은 값으로 충분한 여유를 확보하고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

1. 복잡한 제어봉구동장치와 일체형 원자로상부구조물의 축소모델을 개발함으로써 전체 대상 구조물의 충격해석 모델을 단순화시켜 해석 시간을 절감하였다.
2. 내진지지대의 간극에 대한 비선형 거동을 일반적인 접촉요소가 아닌 간극명령어로 구현하는 입력 절차를 개발하였고, 지진하중에 의한 내진지지판의 충격하중을 해석하였다.
3. 내진지지판 간극 변화에 따른 해석 결과로부터 제어봉구동장치 내진지지판의 충격하중은 내진지지판 사이에서는 0.0mm에서, 내진지지판과 일체형 원자로상부구조물 사이에서는 2.54mm에서 최대 충격하중이 발생하였다. 내진지지판의

설계간극은 제어봉구동장치의 열팽창 변위를 구속하지 않으면서 지진하중을 효과적으로 전달할 수 있는 간극이 설정되어야 한다. 따라서 제시된 설계 간극은 구조적 건전성, 가공성 그리고, 발전소 운전시 열팽창으로 인한 간극의 변화를 고려할 때 타당한 것으로 판단된다.

4. 충격하중으로 인한 내진지지판의 응력해석을 수행하여 설계된 내진지지판이 주어진 최대 충격 하중에서 구조적으로 건전함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Robert D. Cook, 1995, "Finite Element Modeling for Stress Analysis", John Wiley & Sons Inc., pp.235~237, pp.275~298
- (2) ANSYS, Inc, 1998, ".ANSYS Manual" ANSYS, Inc.
- (3) USNRC, 1973, "RG.1.61, Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plant"
- (4) ASME, 1998, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, ASME Section III Division 1 Subsection NF" The American Society of Mechanical Engineers, pp.43~104