

## 크레인 하중을 받는 강제 격납구조물의 안전성 평가

서용표, 김우범, 이경진  
전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

송윤수  
한전 중앙교육원  
서울시 노원구 공릉2동 170-2

### 요 약

본 연구에서는 개방구(opening)를 갖는 원자력발전소 강제 격납구조물의 내력을 평가함에 있어서 기존의 실용 구조설계에 적용된 개구부가 없는 원통형 쉘의 좌굴 판정 기준이 적절하지 않음을 밝혔으며, 대안으로서 개방구(opening)를 갖는 원통형 강제 격납구조물의 재료적 비선형과 기하학적 비선형을 고려한 극한 내력 해석을 수행함으로써 증기발생기 교체작업시 유발되는 인양 하중에 대한 격납구조물의 구조적 안전성을 평가하였다. 개방구를 갖는 격납구조물에 대하여 stiffener가 있는 상태에서 크레인 하중에 대한 극한 내력을 평가해본 결과 크레인 하중이 재하될 경우, 구조물이 선형 탄성 범위에 있는 것으로 확인되었으며 개방구 주위의 국부적인 항복응력 도달 상태에 대하여 10.8의 안전율을 확보 할 수 있는 것으로 계산되었다. 본 연구를 통하여 제시된 개방구를 갖는 강제 격납구조물의 극한내력 평가 방법은 유사 구조물의 구조건전성 평가에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 1 서 론

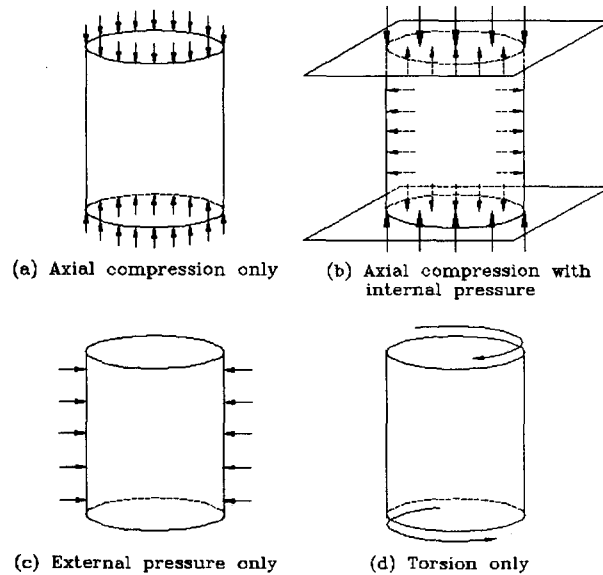
최근의 국내 경제여건의 변화에 따른 에너지 부족 현상은 날로 심화되고 있으며 국내 에너지 수요의 큰 비중을 차지하는 전력분야의 경우 원자력발전의 중요성에 대한 인식이 날로 높아지고 있다. 원자력발전의 비중을 높이기 위해서는 신규투자에 의한 설비증대가 필요하나 작금의 경제적 현실은 이를 어렵게 하고 있으며 이에 따라 원자력발전소의 수명 관리를 통한 경제성 제고의 필요성이 제기되고 있으며 이의 일환으로 고리1호기 원자력발전소에서는 발전설비의 안전성 증진 및 경제성 향상을 위해 증기 발생기(Steam Generator)의 교체를 추진 중에 있다. 증기발생기의 교체를 위해서는 <그림 3>과 같이 원통형 격납용기 건물 벽체에 개방구(Opening)를 설치하게 되는데 증기발생기 인양 시 격납건물 내의 크레인에는 증기발생기 무게에 상응하는 하중이 걸리며 이는 다시 격납건물의 벽체에 전달된다. 개방구가 없는 벽체의 경우에는 하중이 균등히 분포되나 개방구 존재 시에는 개방구 주변에 응력집중이 유발될 뿐 아니라 이는 벽체의 좌굴내력에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 증기발생기 교체에 따른 격납구조물의 엄밀한 안전성 평가를 위해서 비선형 해석을 수행하였으며 이의 결과와 약산 실용설계법의 해석결과로부터 격납건물의 보강여부를 결정하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 기존의 실용설계법

기존 실용설계에서는 여러 가지 하중을 받고있는 실린더형 격납 구조물에 대한 좌굴 응력의 기

본적인 하중요소들을 고려하며, 이 하중요소들은 축 방향 압축만 작용할 때 (Axial compression only), 축 방향 압축과 내압이 작용할 때 (Axial compression with internal pressure), 외압만 작용할 때 (External pressure only) 그리고 비틀림만 작용할 때 (Torsion only) 등으로 구분된다.



<그림 1> 실린더형 격납 구조물을 위하여 Lee (1971)에 의하여 사용한 좌굴 응력의 기본적인 하중요소들.

좌굴응력의 기본요소들을 나타내는 공식들은 Mechanics 이론에 의하여 유도되었고 실험관측을 통하여 보완되었다. 이러한 기본 좌굴 응력 요소들은 둘씩 또는 셋씩 합하여 여러 가지 하중이 작용하는 실린더형 격납 구조물에 적용된다. 이를 위하여 일련의 상호작용 공식들 (interaction equations)이 제안되었다. 이들의 좌굴 판정 기준은 다음과 같이 표현된다:

$$S_{11} < 0, S_{22} < 0, S_{12} \neq 0 \text{ 일때,}$$

$$\frac{S_{11}}{f_{cr}(H)} + \frac{S_{22}}{f_{cr}(V)} + \left( \frac{S_{12}}{\tau_{cr}} \right)^2 < 1 \quad (1)$$

$$S_{11} > 0, S_{22} < 0, S_{12} \neq 0 \text{ 일때,}$$

$$\frac{S_{22}}{f_{cr}(V)} + \left( \frac{S_{12}}{\tau_{cr}} \right)^2 < 1 \quad (2)$$

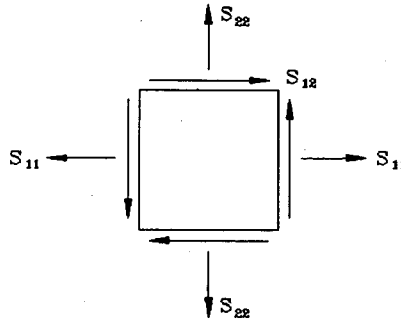
$$S_{11} < 0, S_{22} > 0, S_{12} \neq 0 \text{ 일때,}$$

$$\frac{S_{11}}{f_{cr}(V)} + \left( \frac{S_{12}}{\tau_{cr}} \right)^2 < 1 \quad (3)$$

$$S_{11} > 0, S_{22} > 0, S_{12} \neq 0 \text{ 일때,}$$

$$\left( \frac{S_{12}}{\tau_{cr}} \right)^2 < 1 \quad (4)$$

여기서  $S_{11}$  = 원주(횡)방향 응력,  $S_{22}$  = 실린더 축(수직)방향 응력,  $S_{12}$  = 전단 응력 인데 이들은 유한요소 해석 결과 얻어지며, <그림 2>은 + 방향 응력들을 보여준다.



<그림 2> 유한요소에 작용하는 + 방향 응력들.

### 2.2 개구부가 있는 원통형 셸의 좌굴

등근 실린더형 셸 구조물에 개구부가 뚫려 있고, 셸 구조물에 여러 가지 하중이 작용할 때, 개구부 주위의 셸 부재들은 다른 부분의 셸 부재들에 비하여 심한 응력 집중을 받게 된다. 이러한 상태에서 셸 부재들의 가능한 Failure Mode가 명확히 규명되지 않은 채 개구부가 없는 원통형 셸의 좌굴 판정 기준을 개구부가 뚫린 격납 구조물에 사용하는 것은 적절치 않다. 좌굴 판정 기준은 본래 사용 중에 있는 격납 구조물의 검토를 위하여 유도되었는데, 이 때에는 내압이 존재하는 상태를 반영한 것이므로 개구부가 있을 때와 없을 때의 격납 구조물에 작용하는 하중조건은 상이하게 된다. 임시 개구부 주위의 셸 부재들은 좌굴(Buckling) 보다는 재료의 항복(Yield)에 의하여 좌우될 가능성이 있으므로 소성변형을 고려한 비선형 해석이 필요한 것으로 판단된다.

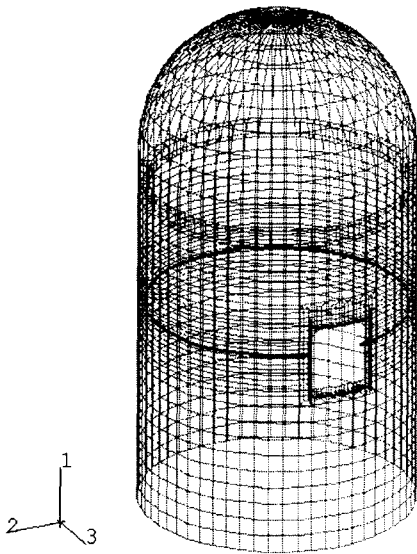
이에 따라 본 연구에서는 상기에 지적한 제반 문제점들에 대한 대안으로서 개방구(opening)을 갖는 원통형 셸의 재료적, 기하학적 비선형을 고려한 극한 내력 해석을 수행함으로써 실제 증기 발생기 교체작업으로 야기되는 격납구조물의 구조적 안전성을 검토하는 방법을 택하고자 한다.

### 2.3 원통형셸의 탄성해석

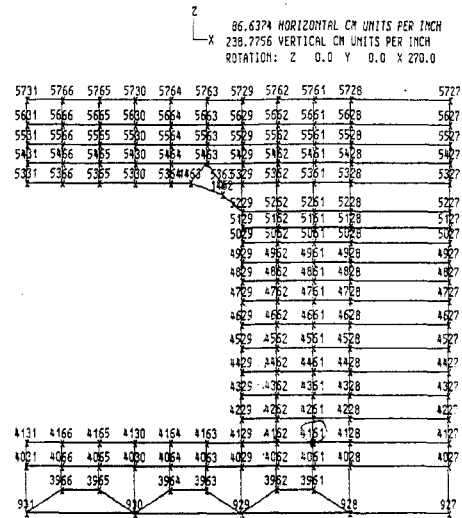
실용설계에서 수행된 격납구조물의 크레인 하중에 의한 탄성응력해석 결과의 타당성을 확인하기 위하여 다른 유한요소해석 프로그램을 사용하여 재해석을 수행하였다. 실용구조계산에서는 SAP90 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 수행하였고 해석결과의 신뢰성 검증을 위해 GT\_STRUDL 프로그램에 의한 해석결과와 비교한 바 있다.

본 보고서에서는 실용구조설계에서 이미 검증된 바 있는 구조해석 결과와 ABAQUS 프로그램에 의한 해석결과를 비교함으로써 SAP90에 의한 해석 결과를 재차 확인하고 ABAQUS 프로그램에 의한 해석 결과의 신뢰성도 아울러 입증하기 위한 목적으로 재 구조해석을 수행하게 되었다. ABAQUS 프로그램에 의한 구조해석 모델은 해석 결과의 비교 분석의 편의를 위해 SAP90 해석 시 사용한 구조해석 모델과 동일한 모델을 적용하여 해석하였다. 구조해석 결과 검증에 사용된 해석 모델은 아래 <그림 3>과 같다.

SAP90에 의한 해석결과와 ABAQUS에 의한 해석 결과는 [표 1]에 정리하였다. [표 1]에서 비교된 결과는 <그림 4>에 표시된 바와 같이 개방구(opening) 주위의 절점에서 발생하는 축방향(수직방향) 응력을 비교한 것으로 ABAQUS에 의한 해석 결과와 SAP90에 의한 해석 결과가 대체로 근접한 결과를 보이고 있으며, 경향을 살펴볼 때 SAP90의 결과보다 GT-STRUDL에 의한 해석 결과에 더욱 근접한 결과를 보여주고 있다. 따라서 SAP90, GT-STRUDL, ABAQUS 프로그램에 의한 해석 결과는 대체로 일치하므로 해석 프로그램에 따른 차이는 고려하지 않기로 한다.



<그림 3> 구조해석 결과 검증에 사용된 해석 모델



<그림 4> 개방구(opening) 주위의 절점 번호

[표 1] 개방구 주위 절점에서의 수직방향 응력 비교

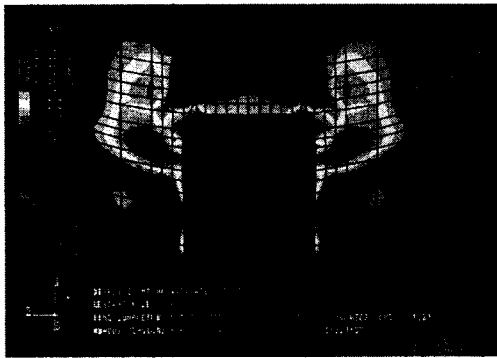
		SAP90	ANSYS	% Difference (vs. SAP90)	ANSYS	% Difference (vs. GTRUCL)	% Difference (vs. SAP90)
4028	TOP	-994.8	-943.3	-5.46	-1012	1.7	6.79
4028	DOWN	-1027.25	-992.5	-3.5	-1078	4.71	7.93
4061	TOP	-1034.15	-1048.3	1.35	-1048	1.32	-0.03
4061	DOWN	-1065.15	-928	-14.78	-1232	13.54	24.68
4062	TOP	-557.08	-703.6	20.82	-1140	51.13	38.28
4062	DOWN	-1616.57	-1364.8	-18.45	-1145	-41.19	-19.2
4128	TOP	-1001.83	-965.9	-3.72	-1010	0.81	4.37
4128	DOWN	-1030.39	-972.9	-5.91	-1096	5.99	11.23
4161	TOP	-996.7	-942.7	-5.73	-1096	9.06	13.99
4161	DOWN	-1180.2	-1139.4	-3.58	-1239	4.75	8.04
4162	TOP	-862.7	-940.1	8.23	-1283	32.76	26.73
4162	DOWN	-1454.78	-1306	-11.39	-1412	-3.03	7.51
4228	TOP	-986.66	-936.8	-5.32	-1011	2.41	7.34
4228	DOWN	-1075.62	-1026.9	-4.74	-1109	3.01	7.4
4261	TOP	-1037.51	-1010.9	-2.63	-1128	8.02	10.38
4261	DOWN	-1234.18	-1175.8	-4.97	-1318	6.36	10.79
4262	TOP	-1234.27	-1122.7	-9.94	-1393	11.39	19.4
4262	DOWN	-1341.75	-1365.3	1.72	-1604	16.35	14.88
4328	TOP	-1001.8	-947.9	-5.69	-1031	2.83	8.06
4328	DOWN	-1122.42	-1067.2	-5.17	-1139	1.46	6.3
4361	TOP	-1133.25	-1072.5	-5.66	-1224	7.41	12.38
4361	DOWN	-1280.2	-1215.1	-5.36	-1365	6.21	10.98
4362	TOP	-1371.58	-1301	-5.43	-1457	5.86	10.71
4362	DOWN	-1458.13	-1437.7	-1.42	-1633	10.71	11.96
4428	TOP	-1047.4	-991.2	-5.67	-1067	1.84	7.1
4428	DOWN	-1163.09	-1094.6	-6.26	-1172	0.76	6.6
4461	TOP	-1261.24	-1155.4	-9.16	-1273	0.92	9.24
4461	DOWN	-1335.45	-1270.2	-5.14	-1416	5.69	10.3

## 2.4 격납구조물의 극한내력 해석

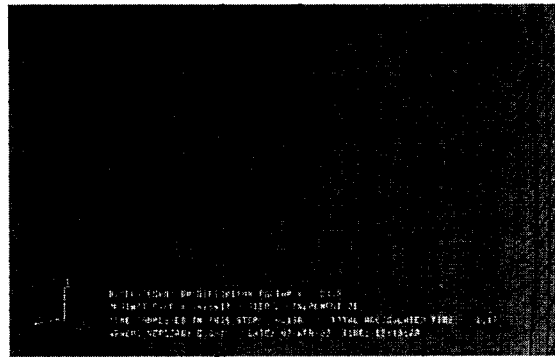
증기발생기 교체시 폴라 크레인으로 증기발생기를 인양할 때 폴라크레인의 양 단부에서 강제 격납구조물로 전달되는 하중에 대하여 7M×7M의 개방구를 격납 구조물이 안전한 상태에 있는 가를 검토하는 방법으로서, 앞 절에서 제시한 바와 같이 구조물의 기하학적 비선형과 강재의 재료적 비선형을 고려한 극한내력 해석을 수행하였다. 실용 구조계산서에 제시된 개방구 주위의 국부좌굴을 방지용 stiffner의 효과를 측정하기 위하여 stiffner가 없는 경우와 stiffner가 있는 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다.

### 2.4.1. Stiffner가 없는 경우

stiffner가 없는 경우 폴라크레인에 하중에 대한 격납구조물의 극한내력을 평가하기 위하여 실용구조계산서에 제시된 <그림 3>의 유한요소해석 모델을 사용하여 크레인 하중을 비례적으로 증가시키면서 각 단계별 응력의 분포와 변위를 산출하였다. 크레인 하중을 점차 증가시켜 격납구조물이 극한내력 상태에 도달할 때의 응력 상태는 <그림 5>와 같다. 또한 극한내력에 도달할 때의 개방구(opening)주위의 변형 형상은 <그림 6>과 같이 나타난다. 예측한 바와 같이 크레인 하중에 대하여 격납구조물 개방구 주위의 응력 집중 현상이 두드러지게 나타나고 있고 격납구조물의 극한내력은 결국 개방구 주위의 응력이 항복장도(Von Mises Yield Criterion)에 도달됨으로써 결정되어짐을 알 수 있었으며 해석 결과 격납 구조물의 극한내력은 <그림 10>에 보이는 바와 같이 대략 크레인 하중의 16.8배 정도인 것으로 나타났다.



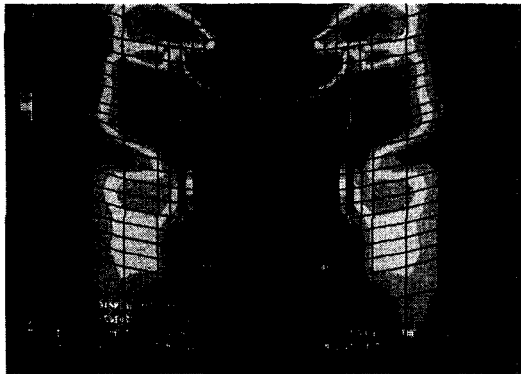
<그림 5> 극한하중 상태에서의 개방구 주위의 Mises 응력 분포 (w/o stiffner)



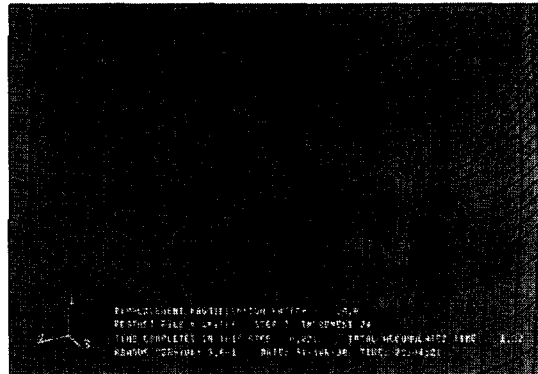
<그림 6> 극한하중 상태에서의 개방구 주위의 변형 형상 (w/o stiffner)

### 2.4.2 Stiffner가 있는 경우

Stiffner가 있는 경우 폴라크레인에 하중에 대한 격납구조물의 극한내력을 평가하기 위하여 유한요소 해석모델에 스티프너를 추가한 후 크레인 하중을 비례적으로 증가시키면서 각 단계별 응력의 분포와 변위를 산출하였다. 예측한 바와 같이 크레인 하중에 대하여 stiffner가 없는 경우와 마찬가지로 격납구조물 개방구 주위의 응력 집중 현상이 나타나고 있으나 stiffner에 의해 응력 집중 현상이 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 이에 따라 stiffner로 보강된 경우 격납구조물의 극한내력은 <그림 10>에 보이는 바와 같이 크레인 하중의 22.1배로서 결국 stiffner가 없는 경우에 비해 극한내력이 약 1.3배 증가하는 것으로 나타났다.



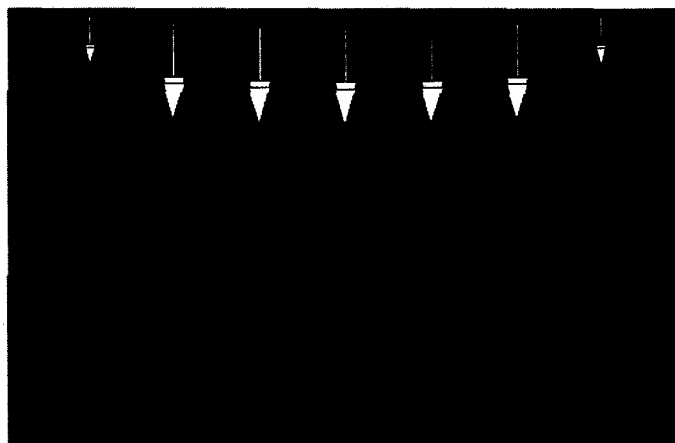
<그림 7> 극한하중 상태에서의 개방구 주위의 Mises 응력 분포 (w/ stiffner)



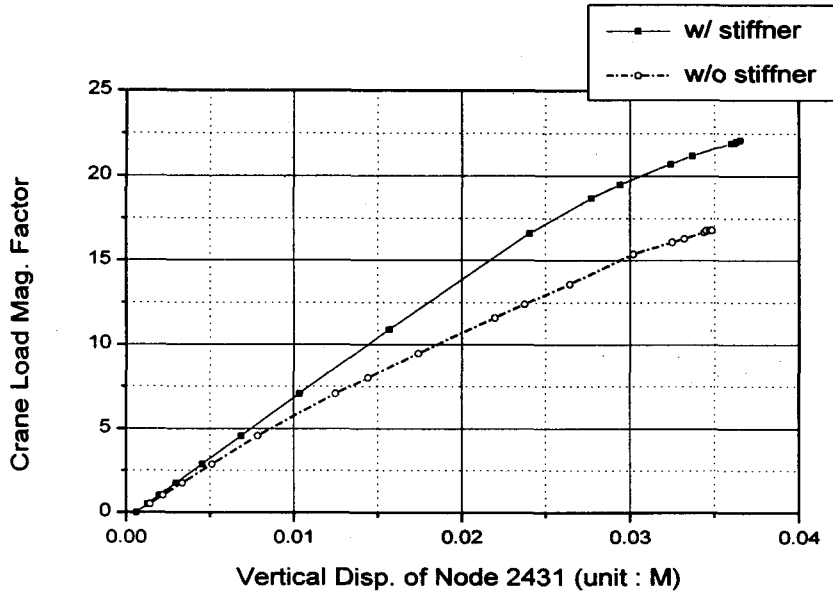
<그림 8> 극한하중 상태에서의 개방구 주위의 변형 형상 (w/ stiffner)

#### 2.5 극한내력 해석결과 분석

격납구조물의 비선형적 거동을 파악하기 위하여 <그림 9>과 같이 개방구 상부 정중앙의 하중점(node 2431)의 변위와 가력 하중과의 관계를 <그림 10>에 표시하였다. <그림 10>의 가로축은 크레인 하중이 증가함에 따른 절점 2431의 변위량을 표시하고 세로축은 크레인 하중의 증가배율을 표시한다. 이 그림으로부터 개방구 주위의 stiffner가 격납구조물의 극한내력 증가와 개방구 주위의 변형 및 응력 집중 억제에 효과적임을 알 수 있고, 크레인 하중이 가해지는 상태 즉 세로축이 1일 때는 구조물이 선형 탄성 범위 내에 있음을 알 수 있다. 또한 stiffner가 있을 때 크레인 하중이 가해지는 상태에서의 개방구 주위의 Von Mises 응력의 최대 값이  $2.47 \times 10^3 \text{ t/m}^2$ 로서 Von Mises 항복 기준인  $2.67 \times 10^4 \text{ t/m}^2$ 의 약 9% 정도로서 안전율이 10.8로 나타나고 있다.



<그림 9> 개방구 상부에 가해지는 크레인 하중의 작용점 및 Node 2431의 위치



<그림 10> 크레인 하중 - 변위 곡선 (at Node 2431)

### 3. 결 론

본 연구에서는 개방구(opening)을 갖는 강제 격납구조물의 내력을 평가함에 있어서 기존의 실용구조설계에서 적용된 좌굴 판정 기준이 적절하지 않음을 밝혔으며, 대안으로서 개방구(opening)를 갖는 원통형 셸의 재료적 비선형과 기하학적 비선형을 고려한 극한 내력 해석을 수행함으로써 실제 증기발생기 교체작업시 증기발생기 인양 작업중에 크레인으로부터 전달되는 하중에 대한 격납구조물의 구조적 안전성을 수행하였다. 개방구를 갖는 격납구조물에 대하여 stiffner가 있는 상태에서 크레인 하중에 대한 극한 내력을 평가해본 결과 기존 구조계산서에 적용된 크레인 하중이 재하될 경우, 구조물이 선형 탄성 범위에 있는 것으로 확인되었으며 개방구 주위의 국부적인 항복응력 도달 상태에 대하여 10.8의 안전율을 확보 할 수 있는 것으로 계산되었다. 따라서 증기발생기 교체시 격납구조물의 자중을 포함한 증기발생기 인양과정 중 발생하는 하중에 대하여 충분한 구조적 안전성을 확보할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Bechtel-Hyundai, "Calculation Sheet for Kori-1 Steam Generator Replacement", Job No. 23213, 265 pages, 1996.
2. KEPCO, "고리 원자력 1호기 증기 발생기 교체 설명회" 원자력 발전처, 한국전력공사, 357 pages, 1997.
3. Lee, A.J.H., "Buckling of Shells under Various Types of Loading", Technical Report, Gilbert Associates, Inc., 28 pages, 1971.
4. Westinghouse Electric International Company, "Containment Vessel Design Report for Kori Nuclear Power Station - Unit #1", 1972.
5. Computer & Structures Inc., "SAP90 Structural Analysis User's Manual", June. 1991.
6. Hibbitt, Karisson & Sorensen, inc., "ABAQUS/Standard User's Manual (version 5.6)", 1996.