

KALIMER-600 원자로배플 지지구조물의 형상 설계

Shape Design of KALIMER-600 Reactor Baffle Supporting Structure

박창규, 이재한, 구경희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

KALIMER의 용량이 격상됨에 따라 원자로용기의 직경이 증가되고 이에 따른 원자로 내부기기들을 지지하는 구조물에 작용하는 하중도 증가되어 기존의 구조 형상은 부적합하였다. 초기 개념 설정을 위하여 원자로배플 지지구조물에 작용하는 자중과 지진하중을 고려하여 응력 해석을 수행하였다. 그리고 ANSYS 최적화 모듈을 이용하여 원자로배플과 분리판의 형상을 개선하였다.

Abstract

As the capacity promotion of KALIMER, reactor vessel diameter and loads at the structure supporting internal components are increased. So the existing support structure shape is not adaptable. For preliminary conceptual study stress analyses are performed considering the weight load of the reactor baffle structure and seismic load. Using ANSYS optimization module, shapes of reactor baffle and separation plate are improved.

1. 서 론

KALIMER의 전기출력이 600MWe로 격상됨에 따라 기존의 KALIMER-150 원자로 내부기기의 적절한 설계변경이 이루어져야 한다. 설계 변경시 원자로의 무게는 약 2배 가량 증가되고 원자로용기의 직경은 11.2m가 된다[1].

원자로 내부구조물 중에서 분리판은 원자로 지지배럴과 원자로배플을 연결하는 구조물

로 KALIMER-600에서도 기존의 구조로 설계하는 경우 반경방향의 폭이 2.62m가 되어 원자로배플의 자중에 의한 과도한 처짐이 발생하게 된다. 분리판에 작용하는 하중으로는 원자로배플의 자중, 지진하중 그리고 열하중이 있다. 본 연구에서는 분리판의 예비 개념 설정이 목적이기 때문에 해석의 단순화를 위해 열하중은 제외하였다. 자중과 지진하중을 고려한 원자로배플 지지구조물의 변위와 응력을 최소화하기 위하여 최적화 문제를 정립하고 ANSYS 최적화 모듈을 사용하여 구조 형상을 최적화하였다.

2. 원자로배플 및 지지구조물 형상

원자로배플 구조물은 원자로배플(reactor baffle)과 지지배럴(support barrel) 그리고 이 둘을 연결하는 분리판(separation plate)으로 이루어진다. 그림 1은 원자로배플 구조물의 형상을 3차원 모델링 프로그램인 I-DEAS로 나타낸 것이다.

원자로배플은 외경이 11.05m, 높이가 9.55m, 두께가 2.5cm의 원통형 실린더로 자중이 약 64ton에 이른다.

지지배럴은 노심이 위치하는 곳으로 고온의 소듐이 발생하는 곳이다. 외경이 5.76m, 높이가 10.53m, 두께가 5.0cm이며 하부에 있는 유입실(inlet plenum)에 고정되어 있다.

분리판은 원자로배플의 하단부와 지지배럴을 연결하는 두께 10cm의 환형 구조물로서 중간열교환기와 같은 내부기기들의 수평 위치를 고정시키고 원자로배플을 지지한다.

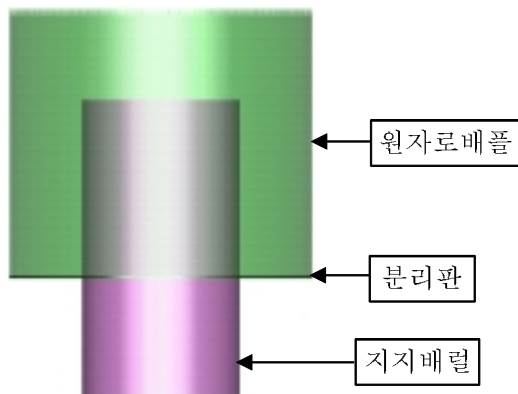


그림 1 원자로배플 구조물

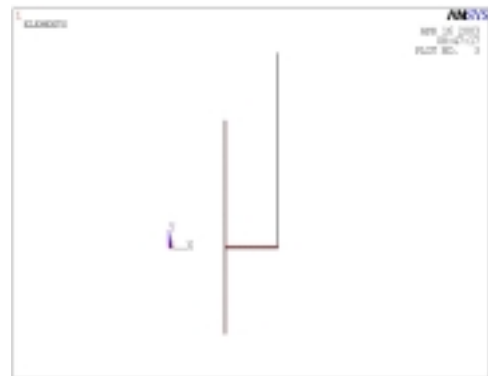


그림 2 ANSYS 해석 모델

3. 원자로배플과 분리판 초기형상에 대한 구조해석

ANSYS 구조해석 프로그램을 이용하여 원자로배플과 분리판의 초기모델에 대한 구조 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 요소는 8절점 PLANE183 축대칭 요소이다. 모델을 단

순화하기 위하여 3차원 모델링이 아닌 축대칭 단면을 이용하였다. 해석에는 85개의 요소와 425개의 절점이 사용되었다. 그림 2는 ANSYS 구조해석을 위한 모델을 나타낸 그림이다[3].

구조물의 재료는 SS 316이다. SS 316의 탄성계수는 200GPa, 포아송비는 0.3, 밀도는 7800 kg/m³이다[4].

3.1 자중만 고려한 해석

그림 3은 구조물에 중력에 의한 자중만 고려한 경우에 대한 ANSYS 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대변위는 12.38mm이고 최대응력은 분리판과 원자로배플이 만나는 지점에서 79.1MPa로 나타났다.

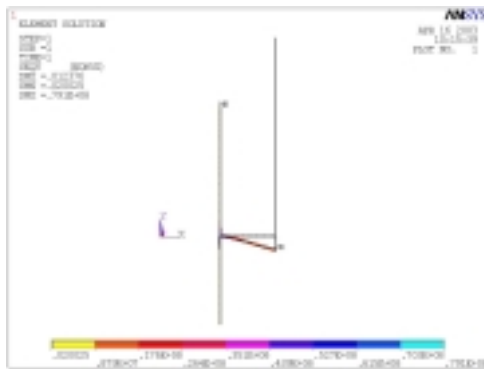


그림 3 자중만 고려한 해석 결과



그림 4 수직방향 모드해석(제 1모드)

3.2 자중과 지진하중을 고려한 해석

구조물에 자중과 지진하중을 고려한 경우에 대한 구조해석을 수행하였다. 지진하중은 수평방향으로 0.3g, 수직방향으로 0.2g를 적용하였다[5]. 구조해석 결과 지진하중의 영향으로 최대변위는 14.85mm, 최대응력은 분리판과 원자로배플이 만나는 지점에서 95.0MPa로 나타났다. 지진하중을 고려했을 때의 최대응력은 자중만 고려한 경우보다 20.1% 증가되었다.

3.3 수직방향 모드 해석

본 해석 모델은 축대칭 요소를 사용하므로 실제 구조물의 모드는 파악할 수 없지만 분리판의 강성 변화를 확인하기 위해 수직방향 모드해석을 수행하였다. 초기 모델에 대한 수직방향 모드해석을 수행한 결과 제 1모드의 고유진동수는 4.71Hz로 그림 4에 나타난 바와 같이 분리판의 상대적으로 낮은 강성에 의해 발생된 것을 알 수 있다.

4. 지지구조물의 형상 개선

4.1 문제 정의

KALIMER-600 원자로배플과 분리판에 대한 지금까지의 해석 결과를 통하여 분리판과 원자로배플이 만나는 곳에서 과도한 응력과 변위가 발생하였다. 원자로배플 지지구조물에서 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 분리판과 원자로배플의 형상을 변경해야 한다.

형상 변경의 방향은 응력과 변위를 작게 하면서 내부기기들이 관통하는 분리판의 단면적이 최소가 되도록 하는 것이다.

지지배럴과 원자로배플의 하단부를 연결하는 분리판을 네 부분으로 나누어 각 부분에서의 y축 방향 위치(coordinate)를 Y5, Y7, Y9, Y11로 정의하고 이들을 설계변수로 설정하였다. 그림 5는 분리판에서 각 변수들의 위치를 나타낸 것이다.

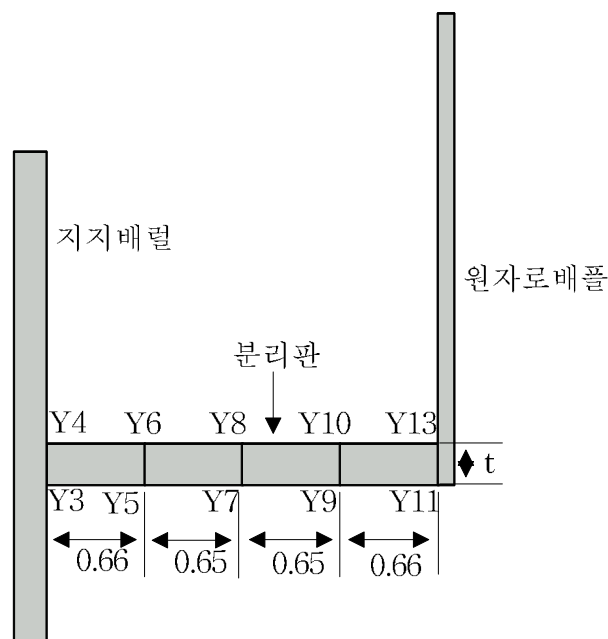


그림 5 분리판에서 변수들의 위치

목적함수는 상태변수들을 초기모델에서의 값에 대한 각각의 비율(ratio)로 나타내어 이들의 합으로 정의하고 목적함수를 최소가 되도록 하였다. 식 (1)~(2)는 형상 변경에 사용될 목적함수와 제한조건들을 수식화한 것이다.

$$\text{Objective Function : } \min\left(f_d \frac{d_{\max}}{d_i} + f_A \frac{A_{\max}}{A_i} + f_\sigma \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_i}\right) \quad (1)$$

$$\text{subjected to } \begin{cases} \frac{d_c}{d_i} \leq 10.0 \\ \frac{A_c}{A_i} \leq 1.0 \\ \frac{\sigma_c}{\sigma_i} \leq 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 d 는 변위, A 는 관통부 단면적, σ 는 von Mises 응력, f 는 contribution factor, 하첨자 i 는 초기모델에 대한 값이고 c 는 현재 모델에서의 값을 나타낸다.

표 1은 원자로배플의 최적설계에 사용될 설계변수의 제한치와 초기값을 나타낸 것이며 식 (3)~(7)은 변수들의 상관관계를 수식화한 것이다[6].

표 1 설계변수 제한치 및 초기값

		Lower Bound	Upper Bound	Initial Value
Design Variables	Y5	0.0	3.0	0.0
	Y7	0.0	5.0	0.0
	Y9	0.0	5.0	0.0
	Y11	0.0	5.0	0.0
Limit	stress (MPa)	-	207	-

$$Y4 = \frac{t\sqrt{0.66^2 + (Y5 - Y3)^2}}{0.66} \quad (3)$$

$$Y6 = Y5 + \frac{t\sqrt{0.66^2 + (Y5 - Y3)^2}}{0.66} \quad (4)$$

$$Y8 = Y7 + \frac{t\sqrt{0.65^2 + (Y7 - Y5)^2}}{0.65} \quad (5)$$

$$Y10 = Y9 + \frac{t\sqrt{0.65^2 + (Y9 - Y7)^2}}{0.65} \quad (6)$$

$$Y12 = Y11 + \frac{t\sqrt{0.66^2 + (Y11 - Y9)^2}}{0.66} \quad (7)$$

모델에 작용하는 하중은 자중과 지진하중이고 경계조건은 지지배럴의 하단부를 고정시켰다. 원자로배플 구조물을 ANSYS의 APDL 언어를 사용하여 구조건전성 측면에서 보다 안전하게 원자로배플을 지지하는 분리판의 형상을 도출하였다.

4.2 자중만 고려한 모델

그림 6은 자중만 고려한 모델에서의 설계변수와 목적함수 변화과정을 나타낸 것이다.

해석 결과는 14회의 반복 해석 후에 최적해에 수렴되었다. 그림 7에서 보는 바와 같이 변형된 모델에서의 최대변위는 0.221mm, 최대응력은 5.57MPa로 나타났다. 또한 네 개의 설계 변수들이 선형적인 관계가 아닌 곡선을 이루는 것을 알 수 있다. 그러므로 분리판은 그림 7과 같이 수평 기울기가 약 38.7°인 S자 형태의 완만한 곡면으로 설계되는 것이 직선으로 연결하는 것보다 구조적으로 안전하다.

최적화로 수정된 모델에 대한 수직방향 모드해석을 수행한 결과 제 1모드는 36.3Hz로 증가되어 분리판의 수직강성이 크게 증가된 것을 알 수 있다. 그림 8은 제 1모드의 형상을 나타낸 것이다.

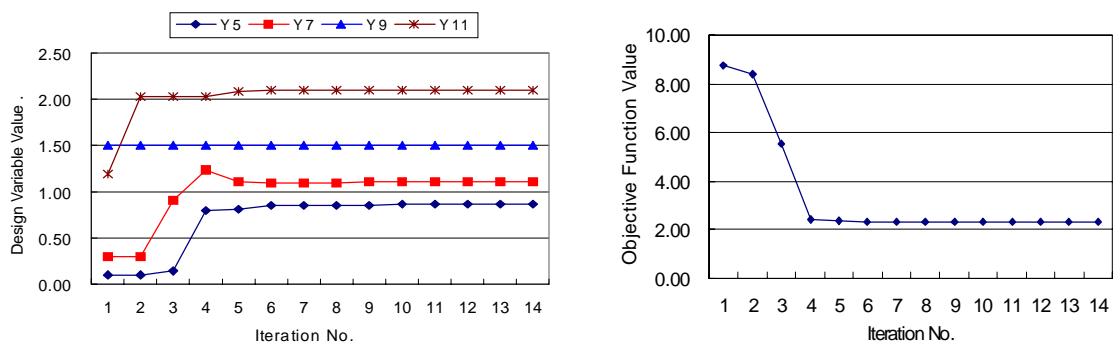


그림 6 자중만 고려한 모델의 설계변수와 목적함수 변화과정

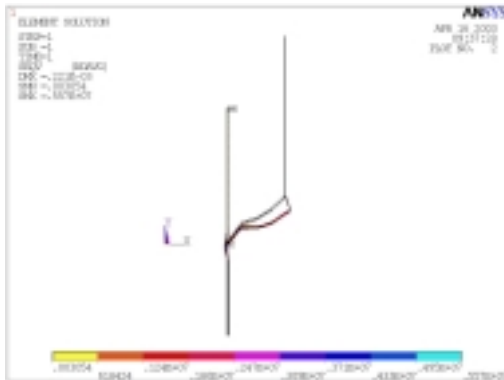


그림 7 설계 최적화 후 변형 형상



그림 8 수직방향 모드해석(제 1모드)

4.3 자중과 지진하중을 고려한 모델

그림 9는 자중과 지진하중을 고려한 모델에서의 설계변수와 목적함수 변화과정을 나타낸 것이다. 해석 결과는 16회의 반복 계산 후에 최적해에 수렴되었다. 그림 10에서 보는 바와 같이 변형된 모델에서의 최대변위는 0.233mm, 최대응력은 6.09MPa로 나타났다. 분리판

의 최적 형상은 수평 기울기가 약 41.7° 이며 완만한 S자 형상을 가지는 곡면이다.

최적화된 모델의 수직방향 모드해석을 수행한 결과 제 1모드는 38.70Hz로 자중만 고려한 최적화 형상과 분리판의 강성 차이가 없는 것으로 나타났다. 그림 11은 제 1모드를 나타낸 것이다.

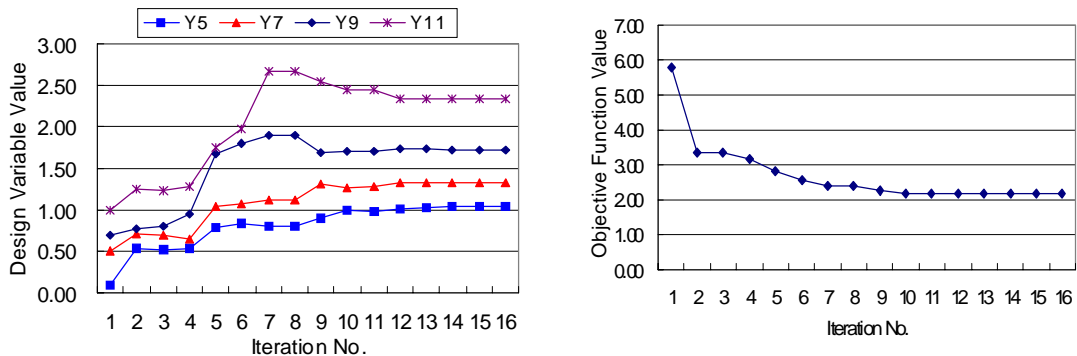


그림 9 자중과 지진하중을 고려한 모델의 설계변수와 목적함수 변화과정

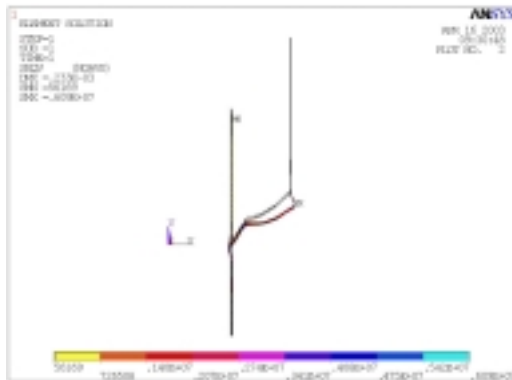


그림 10 설계 최적화 후 변형 형상



그림 11 수직방향 모드해석(제 1모드)

4.4 분리판의 두께가 변하는 모델

지금까지는 분리판의 두께를 10.0cm로 고정한 경우에 대한 최적화를 수행하였다. 하지만 지지배럴과 원자로배플의 두께가 각각 5.0cm, 2.5cm로 분리판의 두께에 비해 얇다. 이러한 두께 차이를 줄이기 위하여 지지배럴에서는 5.0cm, 원자로배플에서는 2.5cm가 되도록 두께가 서서히 감소하는 형상의 분리판을 적용하였을 때의 최적 형상을 도출하였다.

그림 12는 설계변수와 목적함수 변화과정을 나타낸 것으로 14회의 반복계산 후에 최적해에 수렴되었다. 그림 13은 최적화된 모델에서의 해석 결과로서 최대변위는 0.276mm, 최대응력은 9.10MPa로 나타났으며 분리판의 수평 기울기는 약 43.5° 로서 두께가 일정한 모

델보다 다소 높게 나타났다. 그 이유는 분리판은 원자로배플과 만나는 지점에서의 두께가 얇기 때문에 끝부분을 높여서 설계하는 것이 구조적으로 안전하기 때문이다.

최적화된 모델의 수직방향 모드해석을 수행한 결과 제 1모드는 35.46Hz로 앞의 결과와 비교할 때 강성 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 분리판의 두께가 얇아진 대신 기울기가 증가되었기 때문이다. 그림 14은 제 1모드에서의 형상을 나타낸 것이다.

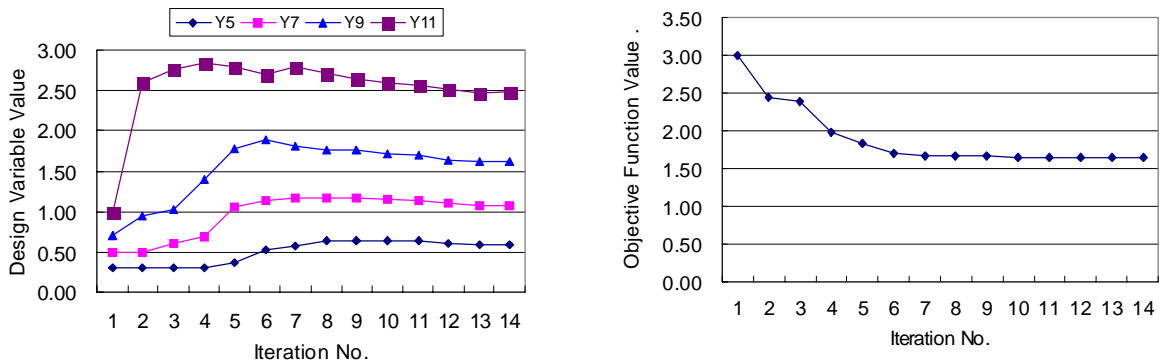


그림 12 분리판의 두께가 변하는 모델의 설계변수와 목적함수 변화과정

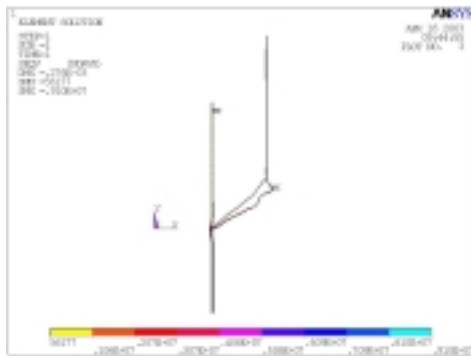


그림 13 설계 최적화 후 변형 형상



그림 14 수직방향 모드해석(제 1모드)

5. 결론

KALIMER-150은 원자로의 직경이 작아 원자로배플의 자중에 의한 영향이 크지 않았지만 대용량 원자로에서는 직경이 기존의 것보다 약 2배 커지게 되므로 원자로배플의 자중에 의한 분리판의 변형이 커진다. 이러한 원자로배플을 지지하는 분리판에서의 변위와 응력 그리고 내부기기 관통부의 면적을 최소화하기 위해 ANSYS의 APDL 언어를 이용한 원자로배플과 분리판의 형상 최적화를 수행하고 그 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2에서 알 수 있듯이 형상 변형 전 모델에서는 지진하중을 포함했을 경우 최대변위

가 0.233mm, 최대응력이 6.09MPa에 이른다. 이러한 응력과 변위를 감소시키기 위해서 분리판의 형상을 변형시켰는데 최적화된 분리판의 형상은 수평방향의 직선 형상에서 43.5°의 기울기를 가지는 완만한 S자 형상의 곡면이 되었다. 이 때의 최대변위와 최대응력은 기존의 모델에 비해서 각각 1.6%, 6.4%로 감소하였으며 격리판과 지지배럴이 만나는 곳에서 최대응력이 발생하게 되었다. 최적화된 모델의 수직방향 모드해석 결과 제 1모드는 38.7Hz로 초기형상의 4.71Hz와 비교하여 크게 증가되어 분리판의 수직 강성이 커졌음을 알 수 있다.

분리판이 고정된 두께가 아니라 5.0cm에서 2.5cm로 점차 감소하는 모델인 경우 최적화 후의 최대변위와 최대응력은 각각 0.276mm, 9.10MPa로 기존의 값에 비해서 0.4%, 5.4%로 감소하였다. 이 때의 분리판 형상은 수평기울기가 43.5°인 완만한 S자 형상의 곡면이다.

앞으로 대용량 원자로에 사용될 내부기기들의 보다 구체적인 설계가 진행되면 원자로 기기 관통부를 고려한 종합적인 최적 형상 설계를 수행할 예정이다.

표 2 원자로배플 지지구조 형상 최적화 결과

Cases		Model		Initial Model	Optimized Model	Ratio (Opt. / Init.)
Uniform thickness	Self-weight	U _{max} (mm)		12.38	0.221	0.018
		σ _{max} (MPa)		79.1	5.57	0.070
		A (m ²)		2.01	2.58	1.28
		ω _n (Hz)	1st	4.71	36.3	-
			2nd	46.4	87.6	-
	Self-weight + Seismic load	U _{max} (mm)		14.85	0.233	0.016
		σ _{max} (MPa)		95.0	6.09	0.064
		A (m ²)		2.01	2.69	1.34
		ω _n (Hz)	1st	4.71	38.7	-
			2nd	46.4	89.3	-
Tapered thickness	Self-weight + Seismic load	U _{max} (mm)		68.74	0.276	0.004
		σ _{max} (MPa)		167.45	9.10	0.054
		A (m ²)		2.01	2.77	1.38
		ω _n (Hz)	1st	2.123	35.46	-
			2nd	25.172	97.30	-

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. 박창규, “신개념 원자로 구조개념 도출”, 한국원자력연구소, MS420-WR-02/2003, 2003.
2. 유봉, 이재한, 최인길, “KALIMER 원자로건물 지진해석 모델링 및 지진응답해석”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1062/98, 1998.
3. ANSYS Analysis Guide for Version 6.1, Volume I, II, III, 2000.
4. ASME Code Section III, Division 1, Appendix I, 2001.
5. 이재한, 유봉, 손재홍, “액체금속로 상부내부구조물 구조동특성 및 지진응답해석”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1538/2000, 2000.
6. 이재한, 유봉, 정명서, “면진된 액체 금속로 KALIMER 원자로 건물과 비면진 건물 연결 배관에 대한 지지위치 최적설계”, 한국원자력학회 99추계 학술발표회 논문집, 1999.