'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체금속로 KALIMER 원자로 용기 좌굴설계를 위한 축소실험 모형의 좌굴해석

Buckling Analysis of Reduced Scale Model for Buckling Design of KALIMER Reactor Vessel

신용철, 홍성인

충남대학교
대전광역시 유성구 궁동 220

구경회, 유 봉

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구의 목적은 현재 국내에서 개발중인 KALIMER 액체금속로 원자로 용기의 축소실험 모형에 대한 좌굴해석 및 평가이다. KALIMER 액체금속로 원자로 용기는 외경 702 Cm, 두께 5 Cm, 길이 1700 Cm의 설계제원을 가지며 실 규모에 대한 좌굴 실험은 매우 어렵다. 따라서 상사성을 고려한 원자로의 축소시험 모델로부터 박막구조물에 대한 설계 해석 및 평가 절차를 정립한 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 축소시험 모형에 대한 여러 가지 유한요소 좌굴해석 방법과 평가식에 의한 좌굴 하중의 평가를 수행하여 향후 좌굴 실험을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

Abstract

The purpose of this paper is to evaluate buckling analysis of the reduced model of KALIMER Reactor Vessel. Actually it is very difficult to carry out the buckling test for actual size of directly KALIMER Reactor Vessel having 702 Cm of outer-diameter, 5 Cm of thickness, 1700 Cm of length. Therefore, the results of the Reduced model using the Finite Element Method are in well agreement with the results of KALIMER Reactor Vessel with FEM. We perform the buckling analysis for the reduced scale mode of reactor vessel using numerical analysis, which will be the basic data of buckling test in next stage.

1. 서 론

액체금속로는 가압 경수로에 비해 운전압력이 낮고, 정상 운전온도가 530℃로 매우 높으며

따라서 기계적인 하중과 함께 열하중이 매우 중요시 된다. 열응력을 감소시키기 위해서는 가능하면 두께를 얇게 하는 박막 쉘(shell)구조물 설계가 적용된다. 이 경우 쉘의 두께가 얇아질수록 열응력에 유리하나 좌굴(buckling) 발생 가능성이 커지며 쉘 구조에 열하중, 기계적인 하중, 그리고 지진하중(Seismic Load)이 각각 혹은 조합되어 좌굴을 발생할 가능성이 매우 높다. 또한 고온운전 지속시간이 길어지면 탄성계수, 항복 응력등의 재료 성질이 급격히 저하하고 고온 라체팅, 그립 손상에 의한 비탄성 영구변형에 의하여 좌굴 하중이 크게 저하될수 있다.

좌굴해석에는 고유치 좌굴해석, 비선형 탄성 좌굴해석, 비선형 탄소성 좌굴해석을 각각 수행하고 J.Okada등이 제안한 액체금속로 실용을 위한 좌굴 설계 평가식과 비교 평가 하였다. 또한 구조물의 동특성 해석을 수행하고 동특성이 지진좌굴에 미치는 영향을 분석 하였다. 실제로 박막 쉘 원자로 용기의 좌굴하중은 지진하중이며 따라서 구조물의 동적 좌굴특성은 좌굴 형상과 좌굴하중에 영향을 미칠수 있다.

본 연구에서는 초기 형상 결함외에 지진 하중시 구조물의 동특성에 의한 구조변형이 좌굴하중에 미치는 영향을 검토하기 위하여 축소 시험 모형의 진동 형상과 좌굴 형상의 비교를 수행하고 실제 준정적 좌굴해석에서 동특성의 영향을 고려할 수 있는 방법을 모색하였다.

2. 축소 시험 모형 설계

2.1 좌굴 평가식 검토

본 논문에서 검토한 좌굴설계 평가식은 J.Okada의 식으로 전단하중을 받는 실린더형 쉘 구조물에 적용 가능한 것이다. 좌굴에 있어서 소성거동(Plasticity)의 영향과 구조물에서 발생 가능한 초기 형상결함(Imperfection)의 영향을 고려한 좌굴하중 평가식은 다음과 같다.

$$Q = \alpha Min[\ Q^{b}_{cr,0}\ ,\ Q^{s}_{cr,o}\ ] \tag{1}$$

식에서 α는 초기 형상결함계수이며 $Q^{b}_{cr,o}$와 $Q^{s}_{cr,o}$는 소성거동을 고려한 굽힘 및 전단좌굴 하중을 각각 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$Q^{b}_{cr,o} = y_b \eta_c Q^{b}_{cr,e} \quad \text{; 이론적 탄성 굽힘좌굴 하중} \tag{2}$$

$$Q^{s}_{cr,o} = y_s \eta_s Q^{s}_{cr,e} \quad \text{; 이론적 전단좌굴 하중} \tag{3}$$

η_c 와 η_s 는 축방향 압축좌굴과 전단좌굴에 대한 소성감소계수를 각각 나타내고 y_b와 y_s는 축응력 및 전단응력 기여계수를 각각 나타낸다.

$$Q^{b}_{cr,e} = \frac{\pi R^2 t}{L} \sigma^{c}_{cr,e} \quad \text{; 탄성 영역에서의 이론적인 굽힘 좌굴 하중} \tag{4}$$

$$Q^{s}_{cr,e} = \frac{1}{2} A\ \tau^{s}_{cr,e} \quad \text{; 탄성 영역에서의 이론적인 전단 좌굴 하중} \tag{5}$$

$$\sigma^{c}_{cr,e} = [\,3(1-\nu^2)\,]^{-1/2} E \frac{t}{R} \tag{6}$$

$$\tau^{s}_{cr,e} = 0.07708 \frac{\pi^2 E}{(1-\nu^2)^{5/8}} \left(\frac{R}{t}\right)^{-5/4} \left(\frac{L}{R}\right)^{-1/2} \tag{7}$$

액체금속로용 재료, 즉 304SS, 316SS 그리고 Mod.9Cr-1Mo강의 경우에 이러한 계수들은 Ramberg-Osgood형 응력-변형률 관계를 가정하여 다음과 같이 근사적으로 구해진다.

$$\eta_c = Min[1, 1.04\tanh(0.98\sigma_{0.7E}/\sigma^c_{cr,e})] \quad (8)$$

$$\eta_s = Min[1.14\tanh(\tau_{0.7E}/\tau^s_{cr,e}), \tanh(1.6\tau_{0.7E}/\tau^s_{cr,e})] \quad (9)$$

$$y_b = 1 + 0.21\sec h(3.5\sigma_{0.7E}/\sigma^c_{cr,e}) \quad (10)$$

; 실린더의 축방향 응력분포를 나타내는 인자

$$y_s = Min[1 + 0.22\sec h(1.7\tau_{0.7E}/\tau^s_{cr,e}), 1 + 13\sec h(6.4\tau_{0.7E}/\tau^s_{cr,e})] \quad (11)$$

$$\sigma_{0.7E} = 1.815E^{-1/9}\sigma_{0.2}^{10/9} \quad (12)$$

$$\tau_{0.7E} = \sigma_{0.7E}/\sqrt{3} \quad (13)$$

구조물의 좌굴강도를 감소시키는 초기 결함형태는 좌굴모우드와 근사한 결함형상이 가장 심각한 결과를 나타내는 것으로 연구된 바 있다. J. Okada 등은 유한요소법을 이용한 다양한 경우의 수치해석을 통하여 다음과 같은 형상결함감소계수를 사용하였다.

$$\alpha = 0.66\lambda^2 - 0.9\lambda + 1.0 \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_{0.2}}{E}\frac{R}{t} \quad (15)$$

본 설계평가식을 적용할 수 있는 원통형쉘 구조물의 형상범위는 $0.5 < L/R < 5.0$ 그리고 $50.0 < R/t < 500.0$이다.

2.2 상사성을 도입한 축소시험체 제원

위의 식에서 전단 좌굴 하중의 차원을 보면

$$[Q_{cr}] = [R]^a[L]^b[t]^c[E]^d[\sigma_{0.2}]^e \quad (16)$$

$$[m]^1 = [l]^a[l]^b[l]^c[\frac{m}{l^2}]^d[\frac{m}{l^2}]^e = [l]^{a+b+c-2(d+e)}[m]^{d+e} \quad (17)$$

이며 다음식을 만족한다.

$$a + b + c - 2(d + e) = 0 \qquad d + e = 1 \quad (18,19)$$

$$\therefore c = 2 - (a + b) \qquad e = 1 - d \quad (20,21)$$

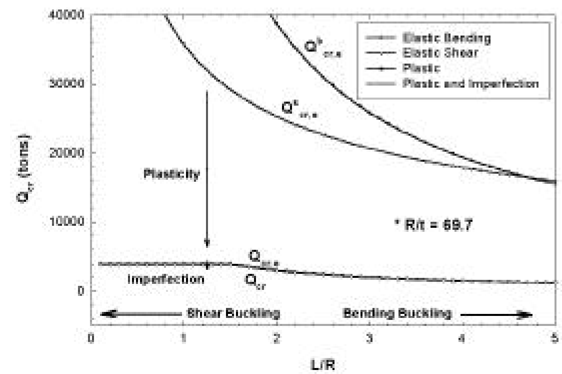
식(16)을 정리하면

$$[Q_{cr}] = [R]^a[L]^b[t]^{2-(a+b)}[E]^d[\sigma_{0.2}]^{1-d} \quad (22)$$

$$= \sigma_{0.2}t^2\left[\frac{R}{t}\right]^a\left[\frac{L}{t}\right]^b\left[\frac{E}{\sigma_{0.2}}\right]^d$$

$$\therefore \frac{Q_{cr}}{\sigma_{0.2}t^2} = f\left(\frac{R}{t}, \frac{L}{t}, \frac{E}{\sigma_{0.2}}\right) \quad (23)$$

위 (23)식으로부터 축소실험을 $R/t, L/t, E/\sigma_{0.2}$ 인자에 따라 결정할수 있고, 항복응력과 실제 실린더 두께가 주어지면 실린더 구조물의 좌굴 하중값을 구할수 있다.



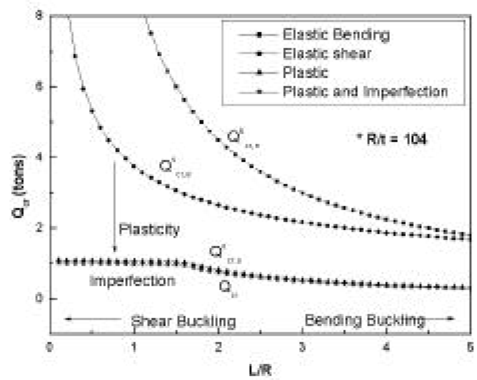


Fig.1 Plasticity and Imperfection Effects(RV) **Fig.2 In case of the Test Model**

본 논문에서는 구축된 최대 2.5tons 좌굴 시험 장비를 사용한 좌굴 특성 시험에 부합하기 위하여 좌굴하중이 최대 2.0tons 이하인 축소 시험 모형을 결정하기 위한 R과 t, 그리고 L을 설계하였다. Fig.1와 Fig.2는 평가식으로부터 결정된 L/R의 비에 따른 좌굴하중을 KALIMER 원자로 용기와 축소시험 모형에 대하여 나타낸 것이다. 소성거동의 영향이 좌굴하중에 크게 작용하는 것을 보여 주며 초기 형상 결함의 영향은 2%로 매우 작게 나타난다. 또 세장비가 작은 경우 굽힘보다는 전단에 의한 좌굴 영향을 받게 된다.

시편을 설정하기 위하여 순수 전단좌굴과 순수 굽힘좌굴 그리고 복합 좌굴 모우드를 갖는 축소 시험 모형을 결정하기 위해 상사성을 고려하여 설계한 시험시편에 대해 설계상의 보수성과 변형에 따른 재료의 비선형성 등을 고려한 이론식으로 구한 하중값을 실제 좌굴 하중의 하한값으로 하고 비선형성을 무시한 고유치 해석으로 계산한 좌굴 하중값을 상한값으로 하중의 범위를 구한다. 설계한 축소실험 모형의 실험 좌굴 하중값이 예측한 하중범위를 만족하면 상사성을 이용한 축소모형의 해석이 실제 원자로 용기 설계의 지침으로 이용될수 있을 것이다. Table.1 은 위 조건을 고려하여 L/R비에 따라 여러 형상이 나올수 있도록 축소시험 모형을 결정하였다.

Table.1 Dimension of Test models

(단위 : mm)

	직경(D)	길이(L)	두께(t)	세장비(L/R)	좌굴하중(tons)	형 상
Model-1	104	50	0.5	0.96	0.854	Shear
Model-2	104	80	0.5	1.54	0.6773	Mixed
Model-3	104	160	0.5	3.077	0.3386	Bending
Model-4	125	75	0.5	1.2	1.0114	Mixed

3. 수치해석에 의한 축소 시험체의 좌굴해석

수치해석을 통한 좌굴 특성 해석에는 유한요소법을 이용한 고유치 좌굴해석(Eigenvalue Buckling Analysis)방법과 비선형 좌굴해석(Non-linear Buckling Analysis)방법이 있다.

3.1 고유치 좌굴해석

고유치 좌굴해석 방법은 시스템 행렬의 고유치 문제로부터 이상적인 선형탄성 구조물의 이론적 좌굴 강도를 예측하는 방법이다.

$$([K] + \lambda[S])\{\Psi\} = 0 \tag{24}$$

$[K]$: 시스템의 강성행렬

$[S]$: 응력 강성 행렬(Stress stiffness matrix)

λ : 좌굴하중을 결정하는 고유치(또는 하중계수)

$\{\Psi\}$: 좌굴 모우드를 나타내는 고유벡터

이 방법은 비선형, 초기 형상결함의 영향을 고려할수 없기 때문에 계산된 좌굴하중이 실제 좌굴하중보다 크게 계산되므로 실제 설계에 적용은 어렵지만 좌굴모우드를 예측하기에는 비교적 정확하다.

본 연구에서는 상용 해석 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하였고 4절점 SHELL63 사용하였으며 모델은 1/2 대칭모델이다.

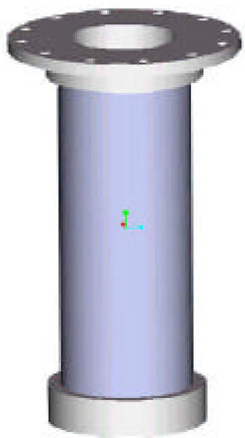


Fig.3 Test Model-3

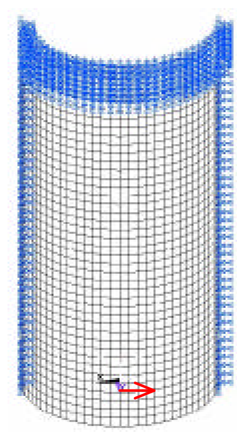
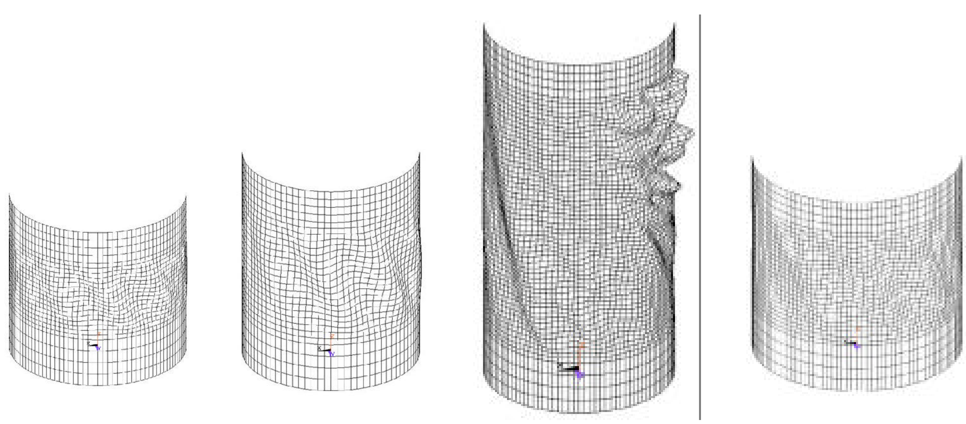


Fig.4 Half-FE Method



(a) Model-1 (b) Model-2 (c) Model-3 (d) Model-4

Fig.5 Eigenvalue Buckling Mode of Test Models

각 시험 모델에 대한 좌굴현상 해석결과는 Fig.5에 나타나 있다. 그림에서와 같이 수치해석에 의한 좌굴형상 결과로 앞의 평가식에 의한 평가 결과와 유사하다. Model-3의 경우에는 굽힘 좌굴과 전단 좌굴이 동시에 발생하는 복합 좌굴 모우드 형상이 나타났다.

3.2 비선형 좌굴해석

비선형 좌굴해석방법은 초기 형상결함, 소성거동, 간극, 대변형 응답등을 고려할수 있어 비교적 정확한 좌굴하중을 산출하나 비선형성이 커질수록 해석시간이 길어진다. 이 방법은 아래 그림과 같이 구조물이 극한 하중에 도달하는 점까지 대변형 정적해석을 수행하여 변위와 반력관계에서 나타나는 snap-through 좌굴특성 곡선으로부터 좌굴하중을 결정하는 방법이다.

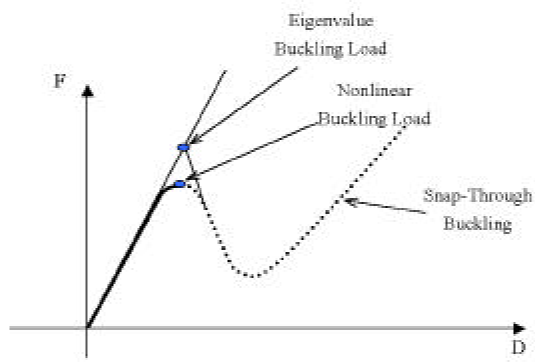


Fig.6 Determination Method of Buckling Load

전단 좌굴 하중에서 초기 결함의 영향은 상대적으로 작고, 좌굴이 탄성 범위에서 발생한다고 하더라도 좌굴 후의 하중 감소는 적당하다. 탄성 굽힘 좌굴은 전단 좌굴 만큼 안정적이지는 못하나 축방향 좌굴에 비하면 안정적이라고 할 수 있다.

수평 지진하에서 원통쉘의 구조 건전성을 평가하기 위하여 다음 3가지가 평가되어야 한다.

a. 정적 또는 지진 하중에서 좌굴 응력을 결정하기 위하여 기본적으로 좌굴 하중이 계산되어야 한다.

b. 좌굴이 시작되기 전, 하중-변위 관계에서 소성에 의한 비선형적 효과를 결정하여 지진 발생시 좌굴 발생전의 실린더의 비선형 응답이 평가 되어야 한다.

c. 좌굴 발생 후, 가해지는 하중의 감소를 평가하여 실린더의 지진 여유도를 평가한다.

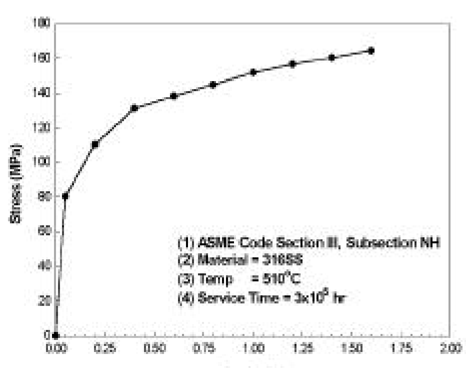


Fig.7 Stress-Strain Curve of R.V

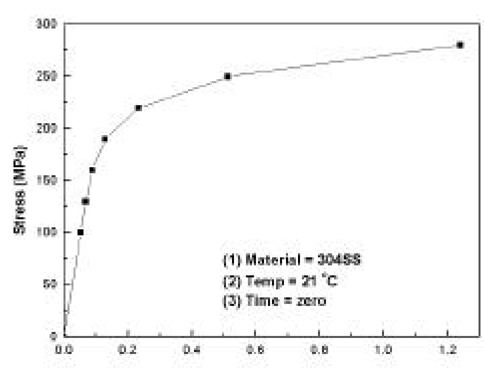


Fig.8 Stress-Strain Curve of Test models

탄성해석에는 4절점 SHELL63, 소성을 포함한 해석에는 SHELL43을 사용하였으면 역시 1/2 대칭모델이다.

실규모인 KALIMER 원자로 용기에 대한 좌굴특성을 분석하기 위하여 보수적인 운전 온도 510℃ (950。F)를 가정하고 ASME Code Section III,NK에 명시된 재료의 탄성계수 $E = 160\,GPa$와 고온설계코드에서 제시하는 등시성 응력-변형률 곡선인 Fig.7을 사용하였다.

축소실험 모형은 상온에서 $E = 190\,GPa$를 사용하였으며 Fig.8의 응력-변형률 곡선을 사용하였다. Table.2 는 설계평가식과 유한요소 수치해석에 의한 원자로 용기와 축소 실험 모형의 좌굴하중 계산결과를 나타낸 것이다.

Table.2 Evaluation Results of Buckling Loads

[단위 : ton]

	설계평가식		유한요소 수치해석		
	탄 성	탄소성	Eigen value	비선형 탄성	비선형 탄소성
원자로 용기	20000	1200	31829	19252	2000
축소시험모델 I	3.8299	0.8540	9.8153	8.3147	0.5684
축소시험모델 II	3.0278	0.6773	5.7513	4.2146	0.4181
축소시험모델 III	2.1409	0.3386	2.7531	1.9206	0.3608
축소시험모델 IV	3.2742	1.0114	6.9342	5.1142	0.7429

위에서 보는 바와 같이 소성거동의 영향을 포함한 값들이 작게 나타남으로 소성거동의 영향을 크게 받음을 보여주고 있다. 축소시험 Model-3의 경우 소성의 영향을 무시한 탄성의 경우, $Q_{cr,이론}/Q_{cr,수치} = 2.1409/1.92058$으로 매우 유사한 결과를 보여주고 있다. 비선형 탄소성 해석의 경우 $Q_{cr,이론}/Q_{cr,수치} = 0.3386/0.3608$ 로 역시 근사한 값을 갖는다. 그러나 L/R 비가 0.5와 5에 가까울수록 평가식에 의한 값과 수치해석에 의한 값이 약간의 차이를 보인다. 좌굴하중 계산결과를 보면 고유치 해석이나 비선형 탄성해석으로 구한 좌굴하중은 본 논문에서 목표하는 좌굴시험기의 용량을 초과하며 비선형 탄소성의 경우 설계평가식과 수치해석으 모두 1톤이하의 좌굴하중을 보여주며 따라서 본 논문에서 의도하는 좌굴시험기 용량 2.5톤을 충분히 만족한다.

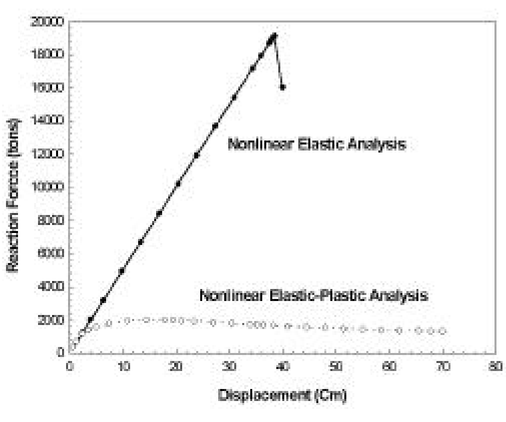


Fig.9 Disp-Force Response of RV

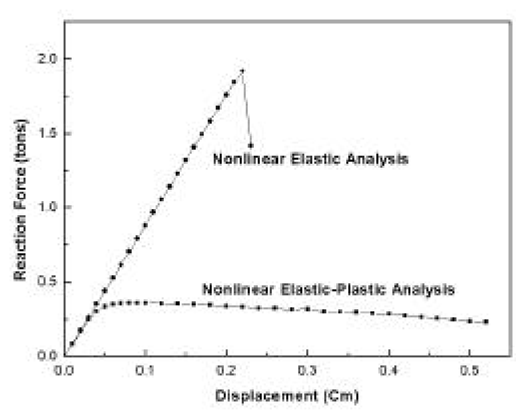
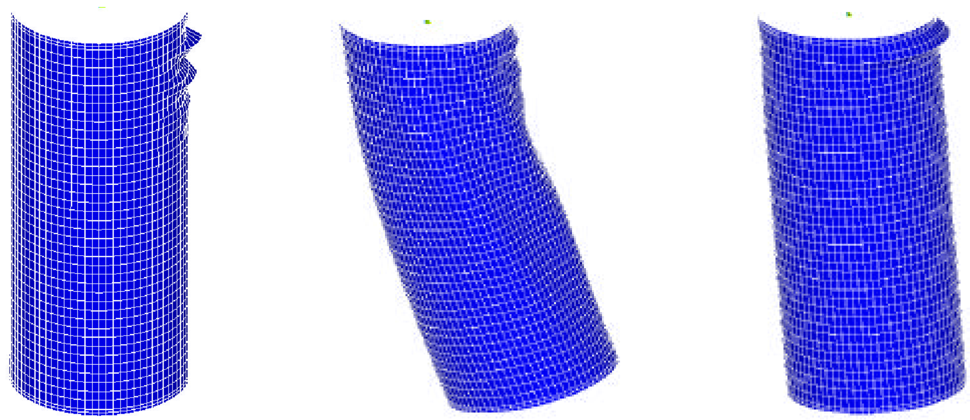


Fig.10 Disp-Force Response of Test model

Fig.9, Fig.10은 원자로 용기와 축소시험 모형에 있어 비선형 탄성해석과 비선형 탄소성 해석에 의한 힘-변위의 결과이다. KALIMER 원자로 용기의 경우와 축소시험 모형의 경우 거의 근사한 결과를 나타내며 소성거동의 영향을 잘 나타내고 있다. KALIMER 원자로 용기의 경우 L/R에 따라 유한요소 수치해석의 결과도 굽힘 좌굴이 지배적인 것으로 나타났다.



(a) Eigenvalue buckling (b) Non-linear Elastic Buckling (c) Non-linear Elasto-Plastic Buckling

Fig.11 Buckling mode of KALIMER Reactor Vessel

4. 축소시험 모형의 동특성과 좌굴 모우드의 관계

Table.3 Geometry of Test models

(단위 : mm)

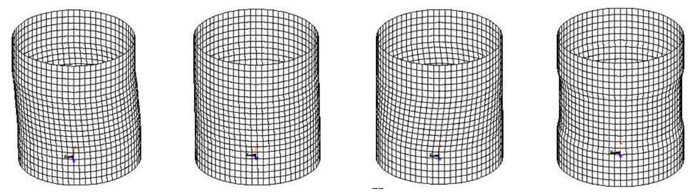
	직경(D)	길이(L)	두께(t)	부착물 질량 (kg)	적용 밀도	세장비(L/R)
Model-1	104	50	0.5	2.761	5.661E05	0.96
Model-2	104	80	0.5	2.761	5.661E05	1.54
Model-3	104	200	0.5	2.761	5.661E05	3.85
Model-4	125	75	0.5	3.792	6.46338E05	1.2

상용프로그램인 ANSYS 5.5를 통해 위의 축소시험 모델의 진동 모우드와 고유 진동수를 구한 결과는 아래와 같다.

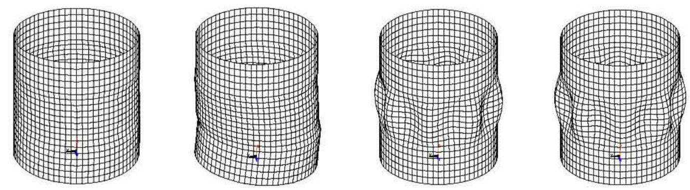
Table.4 Natural Frequency of Test models

[단위 : Hz]

	1	2	3	4	5	6	7
Model-1	938.83	938.83	1508.5	2446.6	2683.6	2683.6	4860.0
Model-2	674.19	674.19	1189.5	1925.4	2273.0	2273.0	3174.4
Model-3	363.90	363.90	836.29	1351.2	1624.3	1624.3	1800.3
Model-4	699.12	699.12	1151.2	1864.0	2095.7	2095.7	3051.9

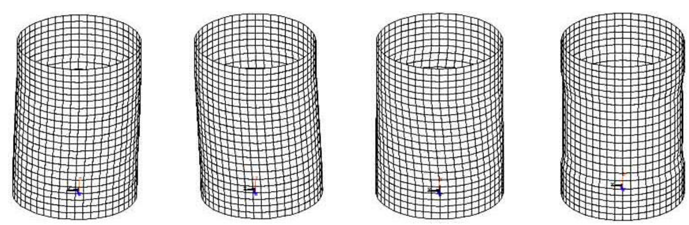


mode 1 **mode 2** **mode 3** **mode 4**

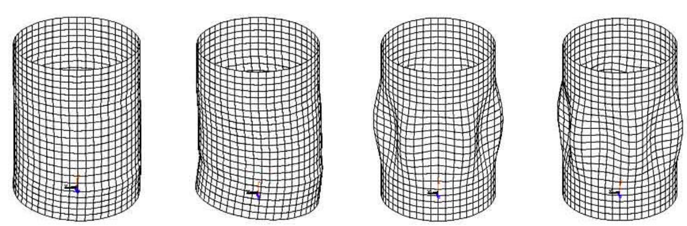


mode 5 **mode 6** **mode 7** **mode 8**

Fig.12 Mode shape of Model-1 (R = 104/2 , L = 50 , t = 0.5)

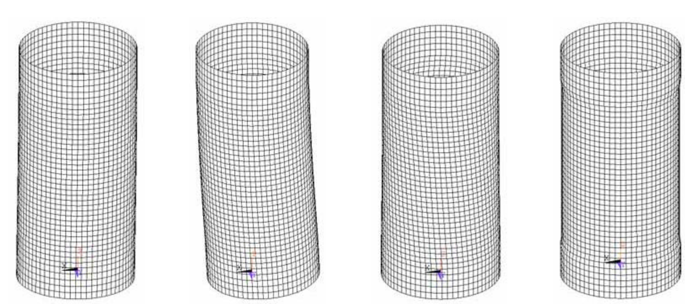


mode 1 **mode 2** **mode 3** **mode 4**

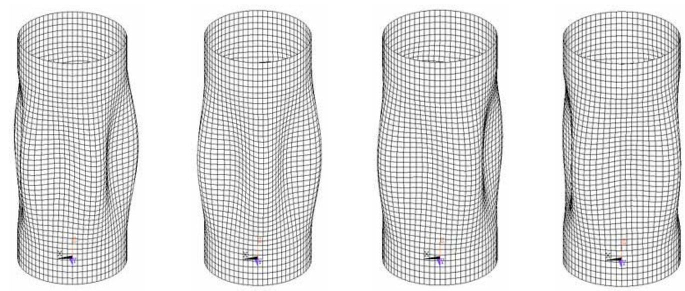


mode 5 **mode 6** **mode 7** **mode 8**

Fig.13 Mode shape of Model-2 (R = 104/2 , L = 80 , t = 0.5)

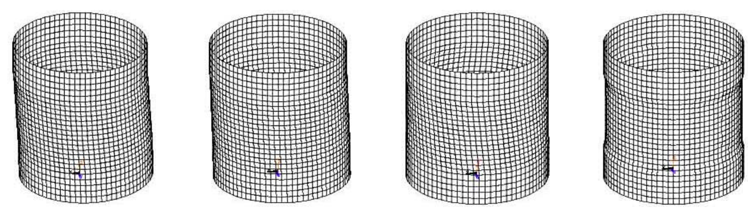


mode 1 **mode 2** **mode 3** **mode 4**

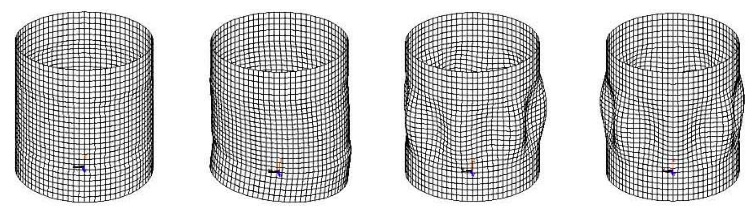


mode 5　　mode 6　　mode 7　　mode 8

Fig.14 Mode shape of Model-3 (R = 104/2 , L = 160 , t = 0.5)



mode 1　　mode 2　　mode 3　　mode 4



mode 5　　mode 6　　mode 7　　mode 8

Fig.15 Mode shape of Model-4 (R = 125/2 , L = 75 , t = 0.5)

Fig.5의 결과에서와 같이 Model-1은 전단좌굴이 지배적이며 동적좌굴이 일어났을 때 전단에 의한 모우드형상이 좌굴에 큰 영향을 미치게 된다. Fig.12의 경우 7차 진동 모우드에서 전단 모우드 형상이 생기며 고유주파수도 크기 때문에 좌굴에 큰 영향을 미치지 못한다. Model-2의 경우 복합좌굴이므로 굽힘, 전단에 의한 모우드 형상 모두 좌굴에 영향을 준다. 하지만 해석결과 굽힘보다는 전단에 의한 좌굴 영향이 크기 때문에 7차 진동 모우드에서 영향을 받게 된다. 역시 고유주파수가 크기 때문에 모우드 형상에 의한 동적좌굴의 영향은 작게 나타난다. Model-3는 굽힘좌굴이 지배적이므로 굽힘에 의한 1차 진동 모우드의 영향을 받을 수 있다.

5. 결론

수치해석 결과 KALIMER 원자로 용기는 굽힘 좌굴 형상이 지배적이지만 좌굴특성에 대한 다양한 평가와 해석 절차의 정립을 위하여 전단좌굴, 굽힘좌굴 그리고 복합좌굴 특성을 나타내는 축소시험 모형을 설계평가식을 통하여 선정하였다. 선정된 축소시험 모형들은 소성거동을 고려한 비선형 탄소성 좌굴해석 방법을 사용할 경우 평가된 좌굴하중들이 본 논문에서 목

적하는 2.5톤 좌굴 시험기 용량을 충분히 만족하였다. 본 논문에서 계산된 좌굴형상, 좌굴하중은 향후 2.5톤 좌굴 시험기로 실험을 통하여 검증할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. J.Okada, K.Iwta, et.al, (1995), "An Evaluation Method for Elastic-Plastic Buckling of Cylindrical Shells under Shear Forces", Nuclear Engineering and Design, Vol.157, pp.65-79.
2. R.Morel, R.Del Beccaro, (1984), "Design and Fabrication Studies for Large French LMFBR Components", PVP, Vol.89.
3. Kazuyuki Tsukimori, (1996) , "Analysis of the effect of interation between shear and bending load on the buckling strength of cylindrical shells.", Nuclear Engineering and Design, Vol.165, pp.111-141.
4. ANSYS User's Manual Volume I, ANSYS Inc. , Ch3.
5. 구경회, 이재한, 유봉, (1999), “KALIMER 원통형 쉘 구조물의 지진좌굴 해석 및 한계요건 검토”, 한국 원자력학회 ‘99추계학술발표회 논문집.