

면진설계된 KALIMER 원자로용기의 지진좌굴 특성평가 Evaluation of Seismic Buckling Load for Seismically Isolated KALIMER Reactor Vessel

구 경 회* 서 기 석** 유 봉***
Koo, Gyeong-Hoi Seo, Ki-Suk Yoo, Bong

ABSTRACT

The purpose of this paper is to evaluate the buckling strength of conceptually designed KALIMER reactor vessel. For evaluation of the buckling load, the design equations and the finite element analysis are used. In finite element method, the eigenvalue buckling analysis, nonlinear elastic buckling analysis using snap-through buckling method and nonlinear elastic-plastic buckling analysis are carried out. The calculated buckling loads of KALIMER reactor vessel using the finite element method are in well agreement with those of the design equations. From the calculated results of buckling load in KALIMER reactor vessel, it is shown that the plasticity of vessel material significantly affects the buckling load but the initial imperfection has little effects. In checking the limits of buckling load of KALIMER reactor vessel using the ASME B & PV Section III, Subsection NH, the non-seismic isolation design can not satisfy the buckling limit requirements but the seismic isolation design can sufficiently satisfy the requirements.

1. 서 론

일반적으로 액체금속로는 500°C 이상의 고온과 5 기압이하의 저압에서 운전되며 이러한 고온, 저압환경하에서 발생가능한 열응력을 최소화하기 위하여 상대적으로 두께를 최소화한 박막구조로 되어 있다. 따라서 액체금속로에 있어서 지진하중에 대한 좌굴방지는 전체 구조설계에 있어서 매우 중요한 설계사항중의 하나이다.

액체금속로에 사용되는 재질 및 형상에 대한 연구가 이미 많은 연구자들에 의하여 수행된바 있다^(1,2). 본 연구에서는 좌굴하중 평가를 위하여 J. Okada 등에 의하여 해석적 방법으로 제안된 설계평가식⁽¹⁾을 검토하고 유한요소법을 이용한 고유치해석법과 비선형 좌굴해석법의 장단점을 비교

* 한국원자력연구소 선임연구원, 공학박사

** 한국원자력연구소 책임연구원

*** 한국원자력연구소 책임연구원, 정회원

검토하였다.

본 연구에서는 현재 국내에서 개념설계가 진행중인 액체금속로 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor)의 원자로용기에 대한 좌굴하중 특성평가를 수행하고 ASME Code Section III, Subsection NH⁽³⁾에서 규정하는 고온구조물의 좌굴안정성 한계검토 요건에 따라서 면진 또는 비면진 설계에 대한 지진좌굴 안정성 검토를 수행하였다.

2. 좌굴하중 평가법

2.1 설계평가식에 의한 좌굴하중 산정법⁽¹⁾

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

$$Q_{cr} = \alpha \text{Min}[Q_{cr,o}^b, Q_{cr,o}^s] \quad (1)$$

식에서 α 는 초기 형상결함계수이며 $Q_{cr,o}^b$ 와 $Q_{cr,o}^s$ 는 소성거동을 고려한 굽힘 및 전단좌굴하중을 각각 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{cr,o}^b = y_b \eta_c Q_{cr,e}^b \quad (2)$$

$$Q_{cr,o}^s = y_s \eta_s Q_{cr,e}^s \quad (3)$$

위의 식(2), (3)에서 $Q_{cr,e}^b$ 와 $Q_{cr,e}^s$ 는 이론적 탄성굽힘좌굴하중과 전단좌굴하중을 각각 나타내며 η_c 와 η_s 는 축방향 압축좌굴과 전단좌굴에 대한 소성감소계수를 각각 나타내고 y_b 와 y_s 는 축응력 및 전단응력 기여계수를 각각 나타낸다. 이러한 계수들은 원통형 셸의 반경(R), 두께(t), 길이(L), 탄성계수(E), 0.2% 진응력($\sigma_{0.2}$) 그리고 재료의 포아손비(ν)의 함수로써 해석적으로 결정된다. 액체금속로용 재료, 즉 304SS, 316SS 그리고 Mod.9Cr-1Mo 강의 경우에 이러한 계수들은 Ramberg-Osgood 형 응력-변형률 관계를 가정하여 다음과 같이 근사적으로 구해진다.

$$\eta_c = \text{Min}[1.0, 1.04 \tanh(0.98 \sigma_{0.7E} / \sigma_{cr,e}^c)] \quad (4)$$

$$\eta_s = \text{Min}[1.14 \tanh(\tau_{0.7E} / \tau_{cr,e}^s), \tanh(1.6 \tau_{0.7E} / \tau_{cr,e}^s)] \quad (5)$$

$$y_b = 1.0 + 0.21 \text{sech}(3.5 \sigma_{0.7E} / \sigma_{cr,e}^c) \quad (6)$$

$$y_s = \text{Min}[1.0 + 0.22 \text{sech}(1.7 \tau_{0.7E} / \tau_{cr,e}^s), 1.0 + 13.0 \text{sech}(6.4 \tau_{0.7E} / \tau_{cr,e}^s)] \quad (7)$$

위의 식에서

$$\sigma_{0.7E} = 1.815 E^{-1/9} \sigma_{0.2}^{10/9} \quad (8)$$

$$\tau_{0.7E} = \sigma_{0.7E} / \sqrt{3} \quad (9)$$

이다. 위의 식(4) - 식(7)에 나타나 있는 $\sigma_{cr,e}^c$ 와 $\tau_{cr,e}^s$ 는 이론적 탄성압축좌굴응력⁽⁴⁾과 단순 탄성전단좌굴응력⁽⁵⁾을 각각 나타내며 다음과 같이 결정된다.

$$\sigma_{cr,e}^c = [3(1 - \nu^2)]^{-1/2} \frac{Et}{R} \quad (10)$$

$$\tau_{cr,e}^s = 0.07708 \frac{\pi^2 E}{(1 - \nu^2)^{5/8}} \left(\frac{R}{t}\right)^{-5/4} \left(\frac{L}{R}\right)^{-1/2} \quad (11)$$

구조물의 좌굴강도를 감소시키는 초기 결합형태는 좌굴모우드와 근사한 결합형상이 가장 심각한 결과를 나타내는 것으로 연구된 바 있다⁽⁶⁾. J. Okada 등은 유한요소법을 이용한 다양한 경우의 수치해석을 통하여 다음과 같은 형상결합감소계수를 사용하였다.

$$\alpha = 0.66 \lambda^2 - 0.9 \lambda + 1.0 \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_{0.2} R}{E t} \quad (13)$$

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

2.2 수치해석에 의한 좌굴하중 산정법

수치해석을 통한 좌굴특성 해석에는 유한요소법을 이용한 고유치 좌굴해석(Eigenvalue Buckling Analysis) 방법과 비선형 좌굴해석(Nonlinear Buckling Analysis) 방법이 있다.

고유치 좌굴해석 방법은 다음식과 같은 시스템행렬의 고유치 문제로부터 이상적인 선형탄성 구조물의 이론적 좌굴강도(Bifurcation point)를 예측하는 방법이다.

$$([K] + \lambda[S]) \{\psi\} = 0 \quad (12)$$

여기서 $[K]$ 는 시스템의 강성행렬, $[S]$ 는 응력강성행렬(Stress stiffness matrix), λ 는 좌굴하중을 결정하는 고유치(또는 하중계수) 그리고 $\{\psi\}$ 는 좌굴모우드를 나타내는 고유벡트를 나타낸다. 이러한 방법은 재료의 비선형성이나 초기 형상결합의 영향은 고려할 수 없으며 따라서 계산된 좌굴하중값은 실제 구조물의 좌굴하중값보다 크게 예측될 가능성이 있기 때문에 실제 설계에 적용하기는 곤란하지만 좌굴모우드의 예측에는 비교적 정확한 결과를 나타낸다.

비선형 좌굴해석방법은 적용하중 또는 변위를 점차적으로 증가시키는 비선형 정적해석을 수행하여 구조물이 불안정해지는 영역에서의 하중수준을 좌굴하중으로 결정하는 방법이다. 이 방법에는 초기 형상결합, 소성거동, 간극(Gap) 그리고 대변형응답 등을 고려할 수 있으며 따라서 고유치 좌굴해석 방법에 비하여 비교적 정확한 좌굴하중을 산출할 수 있으나 비선형성이 커질수록 해석

시간이 길어지는 단점이 있다. 이러한 비선형 좌굴해석은 구조물이 극한하중에 도달하는 점까지 대변형 정적해석을 수행하여 변위와 반력관계에서 나타나는 Snap-through 좌굴특성 곡선으로부터 좌굴하중을 결정하는 방법이다.

3. KALIMER 원자로용기의 지진좌굴 특성평가

3.1 개념설계된 KALIMER 원자로용기 제원

Fig. 1 은 현재 개념설계된 KALIMER 원자로의 형상을 나타낸 것으로 노심, 일차냉각수, 내부구조물 그리고 기기 등을 감싸고 있는 원자로용기는 316SS 재질로서 외경 702 Cm, 두께 5 Cm, 용기 실린더 길이 1700 Cm 의 제원을 가지고 있다.

3.2 지진좌굴 특성평가

본 연구에서는 범용 해석 프로그램인 ANSYS version 5.5⁽⁷⁾를 사용한 유한요소해석법을 수행하였다. 사용된 유한요소 해석모델은 Fig. 2 와 같이 1/2 대칭모델이며 탄성해석에는 4 절점 SHELL63 요소, 소성거동을 포함한 해석에는 4 절점 SHELL43 요소를 사용하였다.

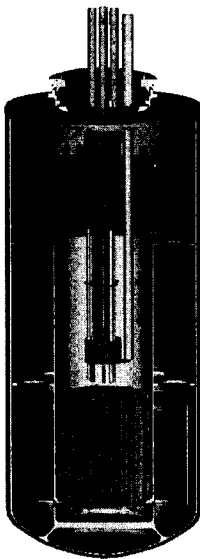


Fig. 1 Conceptually Designed KALIMER Reactor

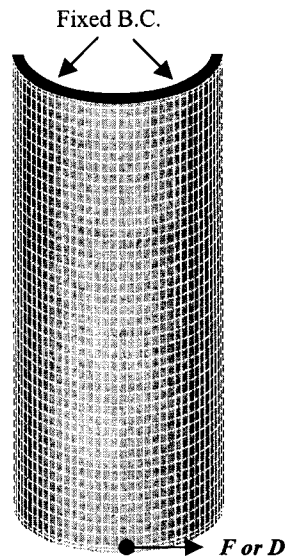


Fig. 2 Finite Element Analysis Model -1/2

KALIMER 원자로용기의 좌굴하중 계산을 위하여 보수적인 운전온도 510°C (950°F)를 가정하여 고온운전에 대한 한계요건을 규정하고 있는 ASME Code Section III, NH 에 명시된 재료의 탄성계수 $E=160\text{ GPa}$ 를 사용하였다. 비선형 탄소성해석에 사용되는 원자로용기 재료 316SS 에 대한 응력-변형률 자료는 Subsection NH 에서 제공하는 등시성(Isochronous) 응력-변형률곡선으로부터 316SS 재료가 510 °C 환경에서 3×10^5 hr 의 운전시간을 지낸 후 나타내는 응력-변형률 곡선인 Fig. 3 를 사용하

였다.

설계평가식과 유한요소해석을 통한 KALIMER 원자로용기의 좌굴하중 계산결과는 다음과 같다.

- 설계평가식 : $Q_{cr} = 1200 \text{ tons}$ (굽힘모우드)
- 선형탄성 고유치해석 : $Q_{cr} = 31829 \text{ tons}$ (굽힘모우드)
- 비선형 탄성해석 : $Q_{cr} = 19252 \text{ tons}$ (굽힘모우드)
- 비선형 탄소성해석 : $Q_{cr} = 2000 \text{ tons}$ (굽힘모우드)

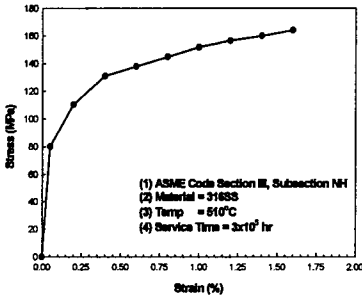


Fig. 3 Stress-Strain Curve

위의 좌굴하중 계산결과에서 설계평가식에 의한 좌굴하중이 유한요소해석에 의한 좌굴하중 계산결과보다 작게 평가됨으로서 설계관점에서 보수성이 있음을 알 수 있다. 설계평가식에 의한 계산에는 재료의 소성거동과 초기 형상결함의 영향이 포함되어 있으나 고유치해석과 비선형 탄성해석에는 대변형 탄성거동만 고려되었기 때문에 실제 좌굴하중보다 매우 크게 평가된다. 따라서 이들 결과를 지진좌굴설계에 적용하기에는 보수성이 크게 저하됨으로 주의할 필요가 있다. 그러나 비선형 탄소성해석에 의한 좌굴하중 계산결과는 설계평가식에 보다 유사한 결과를 나타내며 KALIMER 원자로용기의 경우에 소성거동의 영향이 좌굴특성에 크게 영향을 끼침을 알 수 있다.

KALIMER 원자로용기의 예상되는 좌굴 모우드는 설계평가식에서 결정된 바와 같이 굽힘좌굴이 지배적인 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4 에서와 같이 유한요소해석법에 의한 고유치해석과 비선형 좌굴해석에서 나타난 굽힘좌굴 모우드 해석결과와 일치한다.

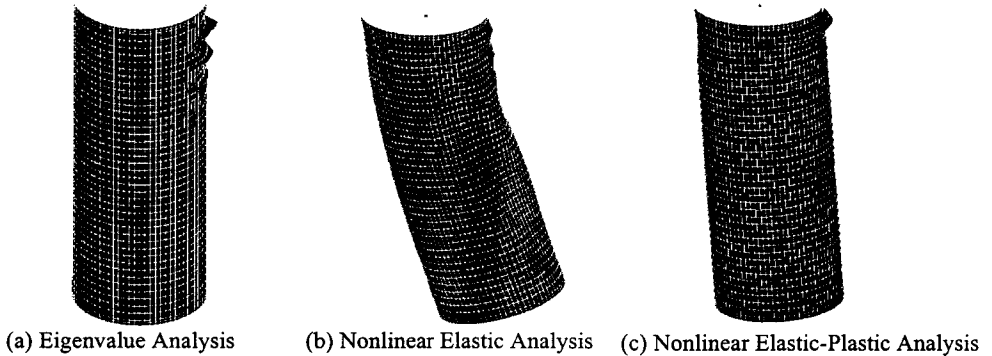


Fig. 4 Buckling Mode of KALIMER Reactor Vessel

Fig. 5 는 KALIMER 원자로용기의 세장비(L/R) 변화에 따른 소성거동 및 초기 형상결함의 영향을 설계특성식으로 계산한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 세장비가 크질 수록 전단좌굴 모우드에서 굽힘좌굴 모우드로 전환되는 현상을 나타낸다. 세장비 L/R=1.6 이하에는 전단좌굴 모우드, 그 이상부터는 굽힘좌굴 모우드가 발생함을 알 수 있다. 또한 그림에서와 같이 소성거동의 영향이 좌굴하중 특성에 크게 영향을 미치며 초기 형상결함의 영향은 상대적으로 매우 작게 나타났

다. 이러한 소성거동의 영향은 원통형셸의 크기에 따라서 달라지며 Fig. 6는 KALIMER 원자로용기의 반경변화에 따른 소성거동의 영향을 나타낸 것으로 반경이 작아질수록, 즉 R/t 가 작아질수록 소성거동의 영향이 크게 나타난다.

비선형 탄성해석으로 구한 KALIMER 원자로용기(세장비 $L/R=4.88$)의 좌굴하중은 $Q_{cr} = 19252$ tons이며 이는 Fig. 5에서와 같이 설계평가식에 의한 계산결과인 탄성굽힘 좌굴하중 $Q_{cr,e}^b=20000$ tons 과 유사한 결과를 나타낸다. 소성거동의 영향을 고려한 비선형 탄소성해석 결과는 $Q_{cr} = 2000$ tons 로 좌굴 설계평가식의 결과인 $Q_{cr}=1200$ tons 과 매우 유사한 결과를 보여주며 앞서 기술한 바와 같이 원자로용기의 좌굴강도는 소성거동 영향을 크게 받음을 알 수 있다. Fig. 7은 비선형 탄성해석과 탄소성해석에 의한 변위-힘 해석결과를 나타낸 것으로 소성거동의 영향이 잘 나타나 있다.

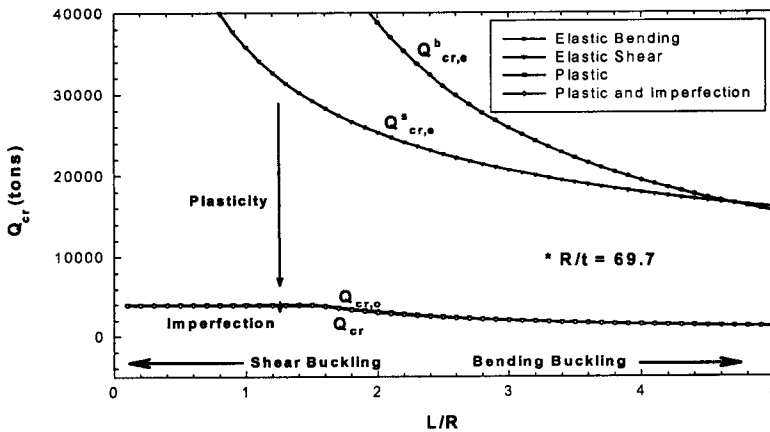


Fig. 5 Plasticity and Imperfection Effects on Buckling Loads

3.3 ASME 설계기준에 따른 지진좌굴한계 요건검토

고온 원자로구조물의 설계요건들을 규정하고 있는 ASME Code Section III, Division 1-Subsection NH에서는 다음과 같은 탄소성좌굴에 대한 한계요건을 규정하고 있다.

- 초기 형상결함(제작허용공차 등에 의한)은 고려하되 고온에서의 크립효과 무시
- 하중제어좌굴 또는 변형률제어좌굴 검토
- 하중제어좌굴과 변형률제어좌굴이 연계작용을 나타내는 조건에 대하여 하중제어좌굴에 적용 가능한 하중계수(Load Factor)는 연계모드에 의한 좌굴을 방지하기 위하여 하중제어와 변형률제어 하중의 조합에 사용
- 심각한 탄성추종이 발생하는 조건들에 대하여 하중제어좌굴에 적용 가능한 하중계수는 변형률제어좌굴에도 사용
- 하중제어좌굴에 있어서 초기 기하학적 imperfection 영향을 시간독립좌굴(Time-Independent Buckling)에 고려
- 하중제어좌굴에 있어서 기하학적 imperfection 이 초기 제작상에 존재하던 운전중에 발생하는

시간종속좌굴(Time-Dependent Buckling)에 고려

- 순수 변형률제어좌굴에 있어서 기하학적 imperfection 이 초기 제작상에 존재하던 운전중에 발생하는 좌굴한계 검토에서 제외
- 해석에 사용될 재료의 응력-변형률곡선은 동시성곡선 비탄성부분의 적절한 평균치와 ASME 코드에 제시된 항복강도의 정규화(Normalizing)로 결정
- 모든 설계 및 운전하중조건들에 대하여 시간독립좌굴 및 시간종속좌굴 한계요건 검토 ASME Subsection NH 에 나타나 있는 시간독립좌굴 평가에 사용되는 하중계수는

$$Load\ Factor = \frac{Q_{cr}}{Q_d} \quad (13)$$

로 정의되며 Q_{cr} 은 주어진 설계 또는 운전조건에서 구조물 불안정성을 야기시키는 하중, 즉 좌굴 하중을 나타내며 Q_d 는 설계하중을 나타낸다. 이러한 하중계수에 대해 설계 및 운전조건 A, B 에 대해서는 3.0, 운전조건 C 에 대해서는 2.5, 운전조건 D 에 대해서는 1.5 그리고 시험조건에 대해서는 2.25 로 규정하고 있으며 주어진 설계하중은 이 값을 초과해서는 안된다. 지진좌굴하중인 안정 정지지진하중(Safe Shutdown Earthquake)의 경우는 운전조건 D 로 분류되어 있다.

KALIMER 원자로용기에 대한 지진좌굴 안정성을 검토하기 위하여 KALIMER 원자로구조물에 대한 지진응답해석을 수행한 결과⁶⁾, 안정정지지진하중(SSE=0.3g)에 대한 원자로용기 하부헤드에서의 최대 수평가속도응답은 비면진설계의 경우 0.9g, 면진설계의 경우에는 0.14g 로 나타났다. 따라서 KALIMER 원자로내부구조물과 일차소듐냉각계의 총질량, $M=1228tons$ 를 고려하면 설계 수평지진력은 비면진설계의 경우 $Q_b=1105.2 tons$, 면진설계의 경우에는 $Q_b=171.9 tons$ 로 결정된다.

본 연구에서는 다음과 같이 보수성이 있는 좌굴 설계평가식으로 계산된 KALIMER 원자로용기의 좌굴하중에 대하여 좌굴한계요건을 검토하였다.

비면진설계의 경우 : $Load\ Factor = 1.09 < 1.5$ (운전조건 D)

면진설계의 경우 : $Load\ Factor = 6.98 > 1.5$ (운전조건 D)

위의 좌굴안정성 평가결과에서와 같이 비면진설계의 경우에 좌굴한계요건을 만족하지 못하지만 면진설계의 경우에는 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 면진설계의 경우에는 비면진설계에 비하여 원자로용기의 지진좌굴 손상에 대한 여유도가 6 배이상 크게 나타나며 따라서 면진설계는 액체금속로의 고온 박막구조물 설계에 대한 지진좌굴 건전성을 보장해 주는 중요한 구조설계법임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 사용한 좌굴강도 설계평가식은 유한요소해석법에 의한 계산결과보다도 다소 보수적인 결과를 보여주며 액체금속로의 좌굴설계 평가식으로 사용하기 위해서는 계산에 사용되는 변수들에 대한 보다 세부적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

KALIMER 원자로용기의 경우에 좌굴하중에 미치는 초기 형상결합의 영향은 작으나 소성거동의 영향은 상당히 크게 나타났다. 이러한 소성거동의 영향은 원자로용기의 반경대 두께비가 작을수록 이러한 현상은 커지며 따라서 용기의 반경이 커질수록 좌굴설계가 유리하다.

KALIMER 원자로용기는 비면진설계의 경우에 ASME 설계코드에서 규정하는 좌굴한계요건을 만족하지 못하며 면진설계를 통한 좌굴안정성의 확보가 필수적인 것으로 나타났다.

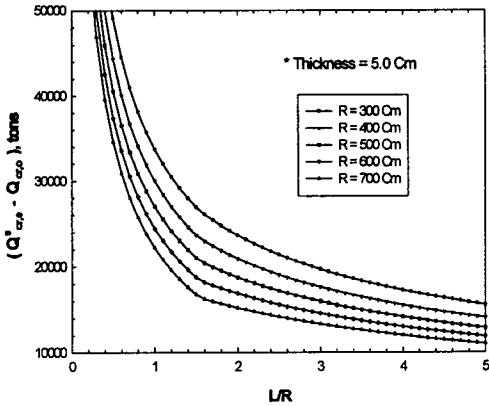


Fig. 6 Plasticity Effects on Buckling Loads

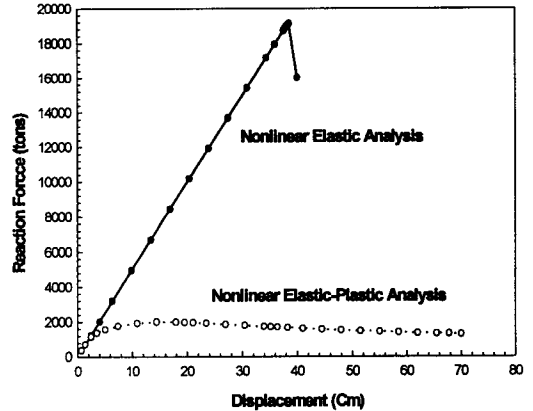


Fig. 7 Disp. - Force Response of KALIMER RV

감사의 글

본 연구는과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. J.Okada, K.Iwata, 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. K. Tsukimori, (1996), "Analysis of the Effects of Interaction between Shear and Bending Load on the Buckling Strength of Cylindrical Shells," Nuclear Engineering and Design, Vol.165, pp.111-141.
3. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Subsection NH, 1995.
4. S.P. Timoshenko et al., (1961), Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, 2nd edn.
5. N. Yamaki, (1984), Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells, North-Holland Series in Applied Math. And Mech.
6. T. Murakami, et al, (1991), "The Effects of Geometrical Imperfection on Shear Buckling Strength of Cylindrical Shells," Proc. SMiRT-11, Vol. E.
7. ANSYS User's Manual for Revision 5.1, Volume I,II,III.
8. 구경희, 이형연, 유봉, (1999), "면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석," 한국지진공학회논문집, 제 3 권 제 1 호, pp.75-92.